



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Металлургия и литейное производство»

**В. А. Жаранов**

## **РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по одноименному курсу  
для студентов специальности 1-42 01 01  
«Металлургическое производство  
и материаловедение (по направлениям)»  
специализации 1-42 01 01-01 «Металлургическое  
производство и материаловедение (металлургия)»  
направления 1-42 01 01-01 02 «Электрометаллургия  
черных и цветных металлов»  
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2013

УДК 621.365(075.8)  
ББК 34.314я73  
Ж34

*Рекомендовано научно-методическим советом  
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 1 от 22.01.2013 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Сельскохозяйственные машины»  
ГГТУ им. П. О. Сухого *В. Ф. Хиженок*

**Жаранов, В. А.**  
Ж34 Расчет и проектирование электропечей : лаборатор. практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» специализации 1-42 01 01-01 «Металлургическое производство и материалобработка (металлургия)» направления 1-42 01 01-01 02 «Электрометаллургия черных и цветных металлов» днев. и заоч. форм обучения / В. А. Жаранов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2013. – 183 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: [http:// library.gstu.by](http://library.gstu.by). – Загл. с титул. экрана.

Содержит 15 лабораторных работ, раскрывающих основные принципы работы электрических печей металлургического производства, особенности их конструкции и эксплуатации.

Для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.365(075.8)  
ББК 34.314я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 – ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 – ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА .....	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 – ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ СВЧ НАГРЕВА.....	30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 – ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....	50
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 – ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ.	57
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 – УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ КАМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ.....	63
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 – УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ .....	67
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 (ЧАСТЬ I) – УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕ.....	73
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 (ЧАСТЬ II) – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ РАЗГОНА НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ.....	84
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 – ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА НА СВОЙСТВА ОСАЖДАЕМОГО МЕТАЛЛА.....	93
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10 – ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАСХОДА ГАЗОВ.....	100
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 – ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	105
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12 – МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	117

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13 – ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ .....	129
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14 – ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ И ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ .....	144
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №15 – ЛОКАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ НА БАЗЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГУЛЯТОРА РП4-ТМ1 .....	150
ЛИТЕРАТУРА .....	179

## ВВЕДЕНИЕ

Оборудование для металлургических процессов весьма разнообразно по принципу действия, мощности, характеристикам потребления электроэнергии.

К электротехнологическому оборудованию, применяемому в металлургии относятся: электрические печи и электронагревательные установки, электросварочные установки всех видов, установки для размерной электрофизической и электрохимической обработки металлов. Соответственно в понятие «электротехнология» включены следующие технологические процессы и методы обработки материалов:

- электротермические процессы, в которых используется превращение электрической энергии в тепловую для нагрева материалов и изделий в целях изменения их свойств или формы, а также для их плавления и испарения;

- электросварочные процессы, в которых получаемая из электрической энергии тепловая энергия используется для нагрева тел в целях осуществления неразъемного соединения с обеспечением непосредственной сплошности в месте сварки;

- электрохимические методы обработки и получения материалов, при которых с помощью электрической энергии осуществляется разложение химических соединений и их разделение путем перемещения заряженных частиц (ионов) в жидкой среде под действием электрического поля (электролиз, гальванотехника, анодная электрохимическая обработка);

- электрофизические методы обработки, при которых для воздействия на материалы используется превращение электрической энергии как в механическую, так и в тепловую (электроэрозионная, ультразвуковая, магнитоимпульсная, электровзрывная);

- аэрозольная технология, при которой энергия электрического поля используется для сообщения электрического заряда взвешенным в газовом потоке мелким частицам вещества с целью перемещения их под действием поля в нужном направлении.

В лабораторном практикуме описаны основные виды электротехнологических установок, причём основное внимание уделено тем, которые получили наибольшее распространение и являются крупными потребителями электроэнергии, а также тем, в которых реализуются новые электротехнологические процессы.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 – ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

## 1.1 Цель работы

Изучение автоматического регулирования температурного режима электрической печи сопротивления на примере двухпозиционного принципа.

В соответствии с этой целью рабочее задание заключается в следующем:

- а) изучить электрическую схему установки, порядок практического выполнения работы;
- б) провести эксперимент в соответствии с п.5;
- в) по методике п.6 провести обработку результатов эксперимента;
- г) оформить отчет о проведенной работе.

## 1.2 Контрольные вопросы для собеседования перед выполнением работы:

- 1) цель работы и постановка задачи;
- 2) размещение силового и контрольно-измерительного оборудования лабораторной установки;
- 3) схема силовых цепей и цепей управления установкой;
- 4) порядок проведения эксперимента.

## 1.3 Краткие теоретические сведения

В печах сопротивления в подавляющем большинстве случаев применяется простейший вид регулирования температуры - двухпозиционное регулирование, при котором исполнительный элемент системы регулирования – контактор 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, работа двухпозиционного регулятора показана на рисунке 1.1, на котором в верхней части дана зависимость температуры печи от времени, а в нижней - соответствующее изменение ее мощности. При разогреве печи вначале

ее мощность будет постоянной и равной номинальной, поэтому ее температура будет расти до точки 1, когда она достигнет значения  $t_{зад} + \Delta t_1$ , где  $|\Delta t|$  – зона нечувствительности регулятора. В этот момент регулятор сработает, контактор 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  $t_{зад} - \Delta t_2$ . В этот момент произойдет новое включение печи, и ее температура вновь начнет увеличиваться.

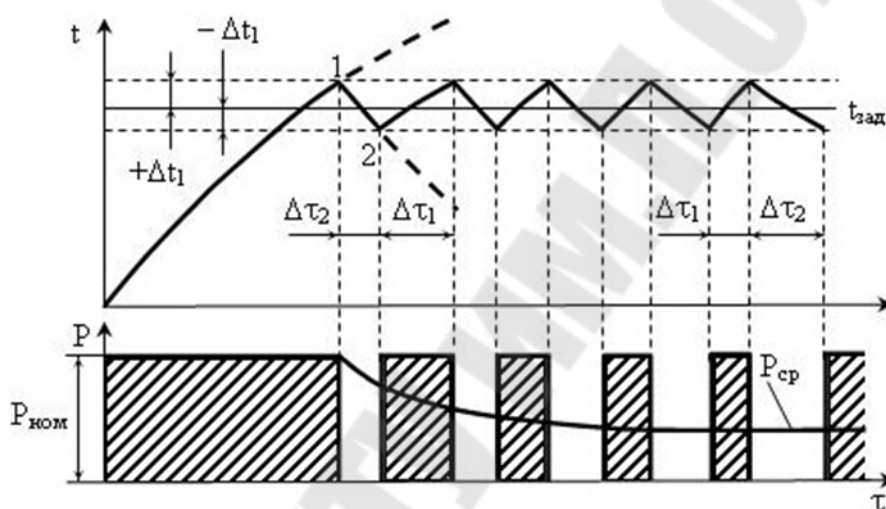


Рисунок 1.1 – Идеализированная схема работы двухпозицион-ного регулятора температуры

Таким образом, процесс регулирования температуры печи по двухпозиционному принципу заключается в ее изменении по пилообразной кривой около заданного значения в пределах интервалов  $+\Delta t_1$ ,  $-\Delta t_2$  определяемых зоной нечувствительности регулятора. Средняя мощность печи зависит от соотношения интервалов времени ее включенного состояния  $\Delta\tau_1$  и выключенного состояния  $\Delta\tau_2$ . По мере прогрева печи и загрузки кривая нагрева печи будет идти круче, а кривая остывания печи – положе, поэтому отношение периодов цикла  $\Delta\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$  будет уменьшаться, а следовательно, будет падать и средняя мощность  $P_{ср}$ . При двухпозиционном регулировании средняя мощность печи все время приводится в соответствие с мощностью, необходимой для поддержания постоянной температуры.

Зона нечувствительности современных терморегуляторов может быть сделана весьма малой и доведена до  $0,1 \div 0,2$  °С. 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 температуры нагревателя превышают зону нечувствительности регулятора. Кроме того, амплитуды этих колебаний очень сильно зависят от избытка мощности печи. Чем больше мощность включения печи превышает среднюю мощность, тем больше эти колебания.

Колебания температуры нагревателей при двухпозиционном регулировании велики, так как масса и тепловая инерция нагревателей сравнительно малы. В других расположенных в камере печи элементах колебания температуры меньше, особенно у теплотехнически массивных тел, у которых падающий на поверхность тепловой поток, излучаемый нагревателями, интенсивно поглощается телом, что ограничивает повышение температуры поверхности. Вследствие этого теплотехнически массивная загрузка печи не испытывает значительных колебаний температуры. Однако колебания температуры загрузки значительны и вредны, если эта загрузка теплотехнически тонкая, например тонкая лента или проволока. Так, в протяжных печах для нагрева ленты или проволоки при двухпозиционном регулировании будет наблюдаться неравномерный (полосатый) нагрев. При больших скоростях одни участки ленты пройдут через печь в период, когда ее нагреватели будут включены, другие – во время их отключения; ясно, что первые участки в результате будут нагреты больше, чем вторые.

Для того чтобы свести до минимума такие колебания температуры загрузки, необходимо повысить чувствительность регулирующего прибора, уменьшить инерцию (постоянную времени) датчика и запас мощности. Как уже говорилось, чувствительность современных автоматических потенциометров очень высока и может удовлетворить любые требования. Инерция датчика, наоборот, велика. Так, стандартная термопара в фарфоровом наконечнике с защитным чехлом имеет запаздывание около  $20 \div 60$  с. Поэтому в тех случаях, когда колебания температуры недопустимы, в качестве датчиков применяют незащищенные термоэлементы с открытым концом. Это, однако, не всегда возможно ввиду возможных механических повреждений датчика, а также попадания в приборы через термоэлемент токов утечки, вызывающих неправильную их работу. Можно достичь уменьшения запаса мощности, если печь не включать и выключать, а переключать с одной ступени мощности на другую, причем высшая ступень должна быть лишь ненамного больше потребляемой печью мощности, а низшая – ненамного меньше. В этом случае кривые нагрева печи и ее



остывания будут очень пологими, а температура почти не будет выходить за пределы зоны нечувствительности прибора.

Для того чтобы осуществить такое переключение с одной ступени мощности на другую, необходимо иметь возможность плавно или ступенями регулировать мощность печи. Такое регулирование может быть осуществлено одним из следующих способов:

- переключением нагревателей печи, например, с «треугольника» на «звезду». Такое весьма грубое регулирование связано с нарушением равномерности температуры и применяется лишь в бытовых электронагревательных приборах;

- включением последовательно с печью регулируемого активного или реактивного сопротивления. Этот способ связан с очень большими потерями энергии или снижением коэффициента мощности установки;

- питанием печи через регулировочный трансформатор или автотрансформатор с переключением печи на разные ступени напряжения. Здесь регулирование также ступенчатое и сравнительно грубое, так как регулируется питающее напряжение, а мощность печи пропорциональна квадрату этого напряжения. Кроме того, имеют место дополнительные потери (в трансформаторе) и снижение коэффициента мощности;

- фазовым регулированием с помощью полупроводниковых приборов. В этом случае питание печи осуществляется через тиристоры, угол включения которых изменяется системой управления. Таким путем можно получить плавное регулирование мощности печи в широких пределах почти без дополнительных потерь, используя непрерывные методы регулирования - пропорциональный, интегральный, пропорционально-интегральный. В соответствии с этими методами для каждого момента времени должно выполняться соответствие поглощаемой печью мощности и мощности, выделяемой в печи.

Приборное оформление, настройка и эксплуатация, систем непрерывного автоматического регулирования температурного режима намного сложнее, чем при позиционном методе. Кроме того, всякие изменения этой мощности (открытие дверцы, повышенные потери, изменение параметров нагреваемых деталей в печах непрерывного действия) вызывают колебательные переходные режимы, в течение которых меняется и регулируемая температура.

*Техника безопасности* для всех видов печей сопротивления основывается прежде всего на правилах и мерах безопасности, применяемых к цеховому электрооборудованию, работающему при напряжении до 1000 В. Исключения составляют электродные высоковольтные электроводоподогреватели, которые относятся к группе высоковольтного электрооборудования.

Основные меры безопасности от поражения током при эксплуатации электрических печей сводятся к следующему:

- токоведущие части, выходящие за пределы кладки (выводы нагревателей, токопроводы к электродам, контактам), должны быть ограждены так, чтобы исключить возможность прикосновения к ним;

- кожухи печей и нагревательных устройств должны быть надежно заземлены;

- открывание загрузочных проемов и осуществление загрузки и выгрузки изделий в печах садового типа не допускаются при включенных нагревателях: в схемах питания должна быть предусмотрена блокировка, автоматически отключающая нагреватели при открывании дверец или крышек печи.

Эксплуатация печей сопротивления создает в цехах, где они установлены, повышенную пожароопасность и опасность ожогов обслуживающего персонала. При проектировании помещений и монтаже в них электропечей необходимо соблюдение общих правил, сформулированных в руководящих указаниях по технике безопасности и производственной санитарии при термической обработке и плавке металлов.

Основные специфические противопожарные мероприятия и правила следующие:

- работа персонала у печей допускается только в спецодежде, рукавицах и очках для работы на плавильных печах и соляных ваннах;

- в непосредственной близости к печам должен быть оборудован пункт хранения противопожарного инвентаря;

- в цехах, эксплуатирующих электрические печи, должно быть предусмотрено аварийное освещение на случай внезапного прекращения подачи энергии.

В электропечах вакуумных и работающих с контролируемыми (защитными или специальными) атмосферами имеется опасность взрыва.

В вакуумных электропечах взрыв возможен при попадании в зону высоких температур воды, масла и других разлагающихся веществ вместе с воздухом'. В печах с защитными или специальными атмосферами опасность взрыва связана с образованием газозвушной смеси.

Практически взрывоопасны все горючие газы, но особую опасность представляет водород. Водородовоздушная смесь взрывоопасна при содержании в ней водорода от 4 до 74 %.

Взрывобезопасность вакуумных печей в основном обеспечивается при их конструировании путем повышения надежности элементов конструкции.

При эксплуатации печей с контролируемыми атмосферами необходимо принимать специальные меры безопасности. Каждая печь должна иметь разработанную для данного технологического процесса инструкцию по технике безопасности, где следует учитывать, что газовые смеси, содержащие окись углерода, сернистый газ, аммиак и сероводород, не только взрывоопасны, но и токсичны.

Содержание этих газов в производственных помещениях не должно превышать  $0,01 \div 0,03$  мг на 1 л воздуха.

Основные правила по взрывобезопасности печей, работающих с горючими газами, следующие:

- перед началом работы из рабочего объема печи должен быть удален воздух (продувкой, выжиганием, вакуумированием). Продувка нейтральным газом (азотом, углекислотой) перед включением нагревателей до полного удаления воздуха требует расхода нейтрального газа, примерно равного четырехкратному объему рабочего пространства печи. Выжигание воздуха подачей рабочего газа в нагретую выше  $750^\circ\text{C}$  камеру печи допускается для печей, имеющих нагреватели, не окисляющиеся на воздухе. Выжигание производится до полного удаления кислорода. Вакуумирование рабочего объема перед подачей газа требует наличия вакуумной системы, обеспечивающей остаточное давление порядка  $10 \div 50$  Па;

- в процессе работы печи подача газа должна контролироваться по количеству и составу автоматическими приборами; кроме того, камеры печей с горючими газами снабжаются свечами - узкими трубками, из которых выходит газ, сгорающий на воздухе. Исчезновение пламени свечи указывает на снижение давления газа в печи и возможный опасный засос воздуха;

- эксплуатация электрических печей и вспомогательных устройств в неисправном состоянии не допускается;

- к работе на печах допускается персонал, прошедший специальное обучение и сдавший экзамен по технике безопасности. Экзамен по технике безопасности сдается ежегодно.

Цеха или отделения цехов, где установлены электрические печи сопротивления, должны иметь вентиляцию, рассчитанную на удаление газов и отвод тепловых потерь, чтобы обеспечить требуемые по санитарным нормам чистоту и температуру воздуха.

#### **1.4 Описание лабораторного стенда**

Исследования проводятся на лабораторном стенде, электрическая схема которого представлена на рисунке 1.2.

Лабораторная установка состоит из муфельной электрической печи сопротивления типа МП-2У, измерительных приборов,

аппаратуры контроля и сигнализации. В качестве регулятора, работающего по двухпозиционному принципу используется прибор КСП-1, позволяющий поддерживать заданную температуру в камере печи. Контроль за изменением температуры осуществляется с помощью хромель-алюмелевого термоэлемента (термопары). Мощность, потребляемая установкой, определяется по прибору типа Н-393 (скорость движения ленты – 60 мм/ч). Включение и отключение нагревателя печи фиксируется сигнальными лампами HL2 и HL3, расположенными на лицевой панели стенда. О включенном состоянии лабораторной установки сигнализирует лампа HL1.

### **1.5 Инструкция по выполнению эксперимента**

Эксперимент необходимо выполнять в следующей последовательности :

а) подать напряжение на лабораторную установку, включив автоматический выключатель QF. При этом загорится сигнальная лампа HL1. Автоматически начинается разогрев печи (горит сигнальная лампа HL2);

б) записать в таблицу 1.1 показания измерительных приборов;

в) при отключении печи (горит сигнальная лампа HL3) определить время, прошедшее с момента ее включения до момента отключения с помощью диаграммной ленты прибора РА1;

г) без изменения режима работы печи фиксировать моменты включения и отключения печи в течение всего времени проведения эксперимента;

д) по окончании проведения эксперимента снять питание с лабораторной установки, отключив автоматический выключатель QF.

### **1.6 Указания по обработке результатов эксперимента**

При обработке результатов эксперимента необходимо руководствоваться следующей методикой :

а) время цикла печи определяется по формуле

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{вкл}} + \tau_{\text{отк}},$$

где  $\tau_{\text{вкл}}$ ,  $\tau_{\text{отк}}$  – время нахождения печи во включенном и отключенном состоянии соответственно, мин.;

б) средняя мощность печи  $P_{\text{ср}}$ , Вт за время  $\tau_{\text{ц}}$  определяется по формуле

$$P_{\text{cp}} = \frac{\tau_{\text{вкл}}}{\tau_{\text{ц}}} \cdot P_{\text{н}}$$

где  $P_{\text{н}}$  – номинальная мощность печи, Вт;

в) суммарная средняя мощность печи  $P_{\text{cp}\Sigma}$ , Вт печи за время цикла определяется как

$$P_{\text{cp}\Sigma} = P_{\text{н}} \cdot \frac{\Sigma \tau_{\text{вкл}}}{\Sigma(\tau_{\text{вкл}} + \tau_{\text{отк}})}$$

г) построить графическую зависимость изменения мощности печи от времени  $P = f(\tau)$ . На графике показать также изменение средней мощности печи;

д) построить графическую зависимость изменения температуры печи от времени  $t = f(\tau)$ .

Таблица 1.1

Время нахождения печи во включенном состоянии $\tau_{\text{вкл}}$ , МИН	Время нахождения печи в отключенном состоянии $\tau_{\text{отк}}$ , МИН	Температура печи $T, ^\circ\text{C}$	Средняя мощность печи $P_{\text{cp}}$ , Вт за время $\tau_{\text{ц}}$

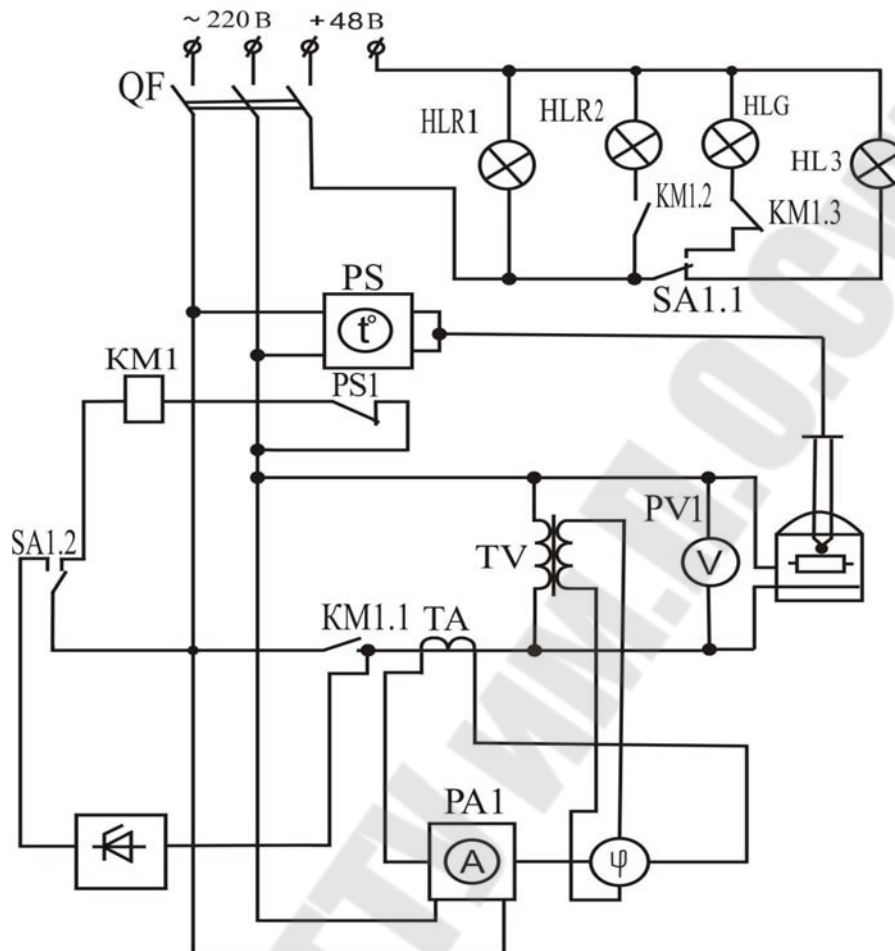


Рисунок 1.2 – Электрическая схема лабораторной установки

### 1.7 Указания по оформлению отчета

Отчет по работе должен содержать :

- а) цель работы;
- б) электрическую схему лабораторной установки;
- в) таблицу с результатами эксперимента;
- г) расчетные значения величин, необходимые для построения графических зависимостей;
- д) графические зависимости  $P = f(\tau)$  и  $t = f(\tau)$ .

С более подробными сведениями по теме лабораторной работы можно ознакомиться [1] – с. 37-94; [2] – с. 32-43; [3] – с. 175-199.

### Вопросы для защиты выполненной работы

1. Объяснить принцип двухпозиционного регулирования температуры в электрической печи сопротивления.

2. Чем вызваны колебания температуры нагревателей при двухпозиционном регулировании? Что необходимо предпринять, для того, чтобы уменьшить их амплитуду?

3. Какими способами можно достичь уменьшения мощности, потребляемой печью?

4. Пояснить графическую зависимость изменения мощности печи от времени.

5. Техника безопасности при эксплуатации электрических печей сопротивления.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 – ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА

### 2.1 Цель работы

Изучение конструкции, принципа действия и режимов работы электросварочного аппарата ТС-300.

В соответствии с этой целью рабочее задание заключается в следующем:

- а) изучить электрическую схему установки, порядок практического выполнения работы;
- б) провести эксперимент в соответствии с п.5;
- в) провести обработку результатов эксперимента, используя указания п.6;
- г) оформить отчет о проведенной работе.

2.2 Контрольные вопросы для собеседования перед выполнением работы :

- 1) цель работы и постановка задачи;
- 2) размещение силового и контрольно-измерительного оборудования лабораторной установки;
- 3) схема силовых цепей и цепей управления установкой;
- 4) порядок проведения эксперимента.

### 2.3 Теоретические сведения

Сварка – технологический процесс получения неразъемного соединения у однородных или разнородных металлов или сплавов, способное работать при заданном давлении, среде, температуре и знакопеременных нагрузках.

В зависимости от технологического процесса (марки свариваемого материала и типа покрытия электрода) сварочные работы выполняются на переменном или на постоянном токе.

Питание сварочных постов на переменном токе осуществляется от специальных сварочных трансформаторов, а постоянным током – от преобразователей и выпрямителей.

Сварочные трансформаторы делятся на трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием (с отдельной реактивной катушкой и на общем сердечнике) и увеличенным магнитным рассеянием (с подвижным магнитным шунтом и подвижными обмотками).

В настоящее время при ручной дуговой сварке получили широкое распространение трансформаторы с увеличенным



магнитным рассеянием и подвижными обмотками. К ним относятся сварочные трансформаторы типа ТС, ТСК и ТД. Они имеют повышенную индуктивность рассеяния и выполняются однофазными, стержневого типа, в однокорпусном исполнении.

В таблице 2.1 представлены технические характеристики трансформаторов с увеличенным магнитным рассеянием и подвижными обмотками.

Таблица 2.1

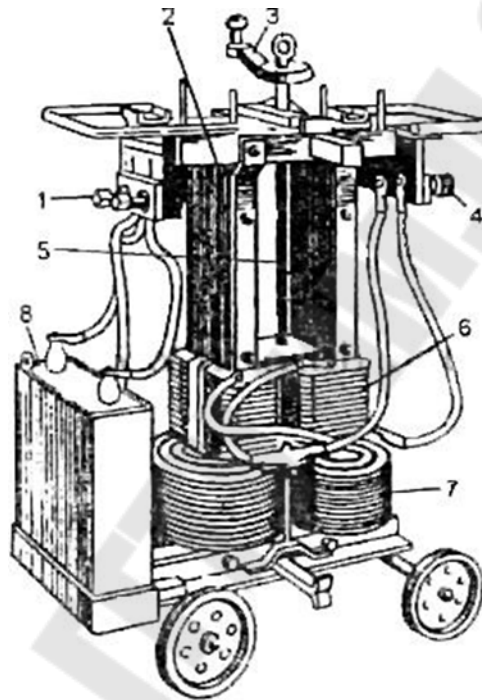
Характеристика	Тип трансформатора					
	ТС-120	ТС-300	ТС-500	ТСК-300	ТСК-500	ТД-300
Напряжение холостого хода, В	68	63	60	63	60	61; 79
Номинальный сварочный ток, А	120	300	500	300	500	300
Номинальная мощность, кВ·А	9	20	32	20	32	20
Габаритные размеры, мм:						
Длина	650	760	840	760	840	692
Ширина	340	520	576	520	576	620
Высота	800	970	1060	970	1060	710
Масса, кг	90	180	250	215	280	137

Катушки первичной обмотки такого трансформатора неподвижные и закреплены у нижнего ярма, катушки вторичной обмотки подвижные. Величину сварочного тока регулируют изменением расстояния между первичной и вторичной обмотками. Наибольшая величина сварочного тока достигается при сближении катушек, наименьшая – при удалении. С ходовым винтом 5 связан указатель примерной величины сварочного тока (рисунок 2.1), Точность показаний шкалы составляет 7,5% от значения максимального тока. Отклонения величины тока зависят от подводимого напряжения и длины сварочной дуги. Для более точного замера сварочного тока должен применяться амперметр.

При повороте рукоятки 3 трансформатора по часовой стрелке катушки обмотки 6 и 7 сближаются, вследствие чего магнитное рассеяние и вызываемое им индуктивное сопротивление обмоток уменьшаются, а величина сварочного тока увеличивается. При повороте рукоятки против часовой стрелки катушки вторичной

обмотки удаляются от катушек первичной обмотки, магнитное рассеяние увеличивается, и величина сварочного тока уменьшается.

Трансформаторы снабжены емкостными фильтрами, предназначенными для снижения помех радиоприему, создаваемых при сварке. Трансформаторы типа ТСК отличаются от трансформаторов типа ТС наличием компенсирующих конденсаторов 8, подключаемых параллельно первичной обмотке, обеспечивающих повышение коэффициента мощности.



1 – сетевые зажимы для проводов; 2 – сердечник; 3 – рукоятка для регулирования тока; 4 – зажимы для подсоединения проводов; 5 – ходовой винт; 6 – катушка вторичной обмотки; 7 – катушка первичной обмотки; 8 – компенсирующий конденсатор

Рисунок 2.1 – Конструктивная схема трансформатора ТСК-500

*Требования к источникам питания для дуговой сварки.* Основным свойством источника питания является его внешняя характеристика, представляющая собой зависимость напряжения источника от тока нагрузки. Сварочная дуга, являющаяся потребителем тока, в свою очередь характеризуется определенной зависимостью напряжения на дуговом промежутке от сварочного тока (статическая характеристика дуги).

Для устойчивого горения дуги необходимо соответствие формы внешней характеристики источника питания форме статической характеристики дуги. В случае однопостовой сварки источником

питания дуги обычно является специальный сварочный генератор постоянного тока или сварочный трансформатор. При многопостовой дуговой сварке под источником питания дуги подразумевают совокупность общего источника питания (генератора постоянного тока, выпрямительной установки или трансформатора) с регулятором тока отдельного сварочного поста в виде балластного реостата при сварке на постоянном токе или реактора (дросселя) при сварке на переменном токе.

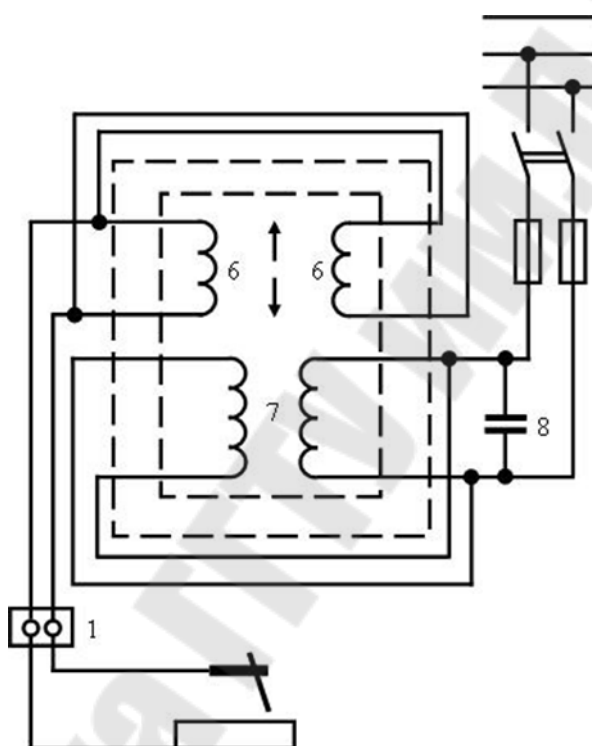


Рисунок 2.2 – Электрическая схема трансформатора ТСК-500

Внешняя характеристика источника питания может быть падающей, жесткой или возрастающей.

Для ручной дуговой сварки при жесткой статической характеристике дуги (рисунок 2.3, кривая 1) внешняя характеристика источника питания должна быть круто падающей (кривая 2). Чем больше крутизна в рабочей части внешней характеристики источника питания (точка К), тем меньше колебания тока при изменениях длины дуги. При падающей характеристике напряжение холостого хода источника питания значительно превышает необходимое рабочее напряжение дуги, что облегчает первоначальное и повторные зажигание дуги, особенно при сварке на переменном токе. Круто падающая характеристика, помимо того, обеспечивает существенное

ограничение тока короткого замыкания, который по отношению к рабочему сварочному току обычно находится в пределах  $1,25 < I_k/I_p < 2$ .

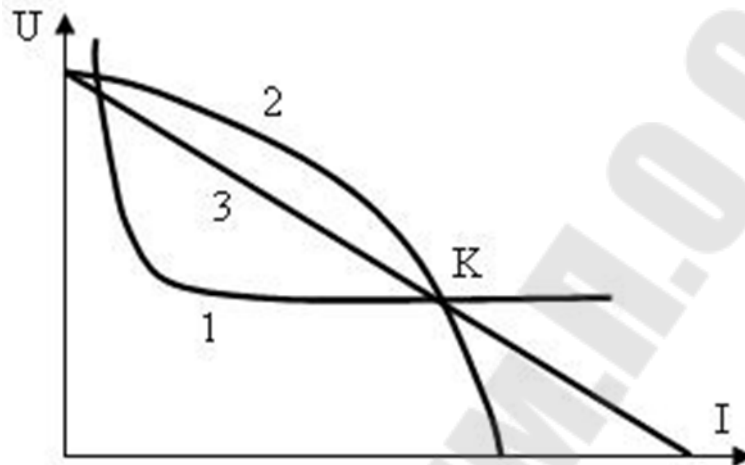


Рисунок 2.3 – Внешние характеристики источника питания 2 и 3 при жесткой характеристике дуги 1

При автоматической дуговой сварке под слоем флюса с жесткой статической характеристикой дуги внешняя характеристика источника питания может быть круто падающей (такая характеристика предпочтительна при автоматическом регулировании напряжения на дуге) или полого падающей (кривая 3), что повышает интенсивность саморегулирования дуги.

В особом случае дуговой сварки в среде защитных газов на постоянном токе при большой плотности тока в электроде имеет место возрастающая статическая характеристика дуги. В этом случае внешняя характеристика источника может быть жесткой и даже слегка возрастающей, что обеспечивает большую интенсивность саморегулирования электрической дуги.

Таким образом, первым требованием к источнику питания сварочной установки является соответствие внешней характеристики источника статической характеристике дуги.

Второе требование заключается в том, что напряжение холостого хода источника должно быть выше напряжения зажигания дуги. При сварке постоянным током металлическим электродом напряжение зажигания составляет 30 – 40 В, а для угольного электрода оно повышается до 45 – 55 В. При сварке переменным током напряжение зажигания составляет 50 – 60 В.

Третье требование состоит в том, что источник должен позволять регулировать сварочный ток.

Для каждой толщины свариваемых деталей требуется различная тепловая мощность сварочной дуги, следовательно, и различный сварочный ток, причем сварка должна производиться при оптимальной длине дуги, которой соответствует ее определенное напряжение. Для этого источник сварочного тока должен обеспечивать возможность получения серии внешних характеристик. Тогда в зависимости от требуемого сварочного тока можно работать на той или иной внешней характеристике и получать необходимую длину дуги.

Кроме перечисленных основных требований, общих для всех источников сварочного тока, к сварочным генераторам постоянного тока предъявляются дополнительные требования в отношении динамических свойств, т. е. способности источника быстро восстанавливать на дуговом промежутке напряжение, соответствующее изменившемуся току. В частности, при обрыве дуги напряжение должно быстро восстанавливаться до напряжения холостого хода, а при коротком замыкании напряжение должно быстро падать до нуля. Время восстановления напряжения от нуля до напряжения дуги у сварочных генераторов не должно превышать 0,03 с.

*Режим работы сварочного оборудования.* Сварочные машины и аппараты обычно характеризуются специфическим режимом повторно-кратковременной нагрузки, обусловленным рабочим процессом сварки. Источник сварочного тока нагружается током только во время горения дуги. При ручной дуговой сварке максимальная длительность горения дуги определяется временем расплавления одного электрода. Минимальная длительность перерыва в горении дуги определяется временем замены электрода и повторного зажигания дуги. Помимо замены электродов перерывы в горении дуги вызываются необходимостью перестановки свариваемых деталей или передвижения сварщика с электрододержателем (а иногда и со сварочным аппаратом) к новому участку сварки.

При эксплуатации сварочного оборудования необходимо, чтобы условия нагрузки соответствовали возможностям источника сварочного тока, так как длительная перегрузка сверх допустимых токов может вывести из строя сварочное оборудование.

Повторно-кратковременный режим работы оборудования, помимо тока нагрузки, характеризуется длительностью включенного состояния  $t_1$  и перерыва  $t_2$ . Отношение  $t_1/(t_1 + t_2)$ , выражаемое обычно в процентах, называется продолжительностью кратковременной работы

(ПР) или продолжительностью включения (ПВ). Если в паспорте сварочного оборудования обозначен ток 250 А при ПВ = 50%, то это означает, что при токе 250 А можно работать при отношении  $t_1/(t_1 - t_2)$  не более 0,5.

Общая длительность цикла  $t_{ц} = t_1 + t_2$  при допустимой ПР не может быть произвольной, так как на температуру обмоток непосредственно влияет абсолютное значение длительности включения  $t_1$ . Поэтому, кроме ПР, в паспорте сварочного оборудования обязательно оговаривается максимальная длительность цикла  $t_{ц}$ .

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

Источники тока для автоматической дуговой сварки обычно имеют номинальный режим с ПР, равной 50 или 60 % при длительности цикла 10 минут.

Технико-экономическое сопоставление электрической сварки на постоянном и переменном токе говорит о том, что в тех случаях, когда сварка на переменном токе обеспечивает необходимое качество соединения, она обладает существенным преимуществом перед сваркой на постоянном токе. Основными причинами этого являются:

- меньшая стоимость источника сварочного тока, питаемого непосредственно от сети переменного тока, и соответственно меньшие амортизационные затраты на единицу свариваемой продукции;
- простота устройства и высокая степень надежности работы сварочного оборудования переменного тока обуславливают меньшие эксплуатационные расходы на его обслуживание и ремонт;
- меньший расход электроэнергии на единицу свариваемой продукции.

*Техника безопасности при производстве сварочных работ.* Основными видами опасности в процессе эксплуатации электросварочного оборудования являются:

- опасность поражения электрическим током;
- опасность излучения открытой сварочной дуги;
- опасность ожогов;
- опасность отравления токсичными газами и парами;
- взрывоопасность при работе с горючими газами и парами;
- опасность травматизма при сварке на высоте;
- пожарная опасность.

Перечисленные виды опасности касаются не только прямых исполнителей сварочных работ, но и персонала, работающего вблизи сварочных установок.

*Опасность поражения электрическим током* возникает как при непосредственном соприкосновении с находящимися под напряжением токоведущими частями установки, так и при касании металлических частей оборудования, случайно оказавшихся под напряжением вследствие повреждения изоляции. Наибольшую опасность представляет первичное напряжение агрегатов для сварки постоянным током и сварочных трансформаторов, которое обычно составляет 220 или 380 В. Вторичное напряжение холостого хода, обычно не превышающее в установках дуговой сварки 80 В, является значительно менее опасным, однако при некоторых условиях прикосновение к токоведущим частям вторичной цепи может вызвать тяжелое поражение; например, в результате нарушения изоляции расположенных в непосредственной близости первичной и вторичной обмоток сварочного трансформатора сварочная цепь может оказаться под потенциалом первичной цепи. Кроме того, даже напряжение 65 – 80 В может оказаться опасным для человека в сыром помещении, если обувь не обеспечивает надежной электрической изоляции от земли. В особо влажных местах сварщик должен работать в резиновых сапогах.

Металлические части сварочного оборудования, нормально не находящиеся под напряжением, но могущие оказаться под напряжением при нарушении электрической изоляции, должны заземляться согласно требованиям Правил устройства электроустановок. Необходимо также заземлять тот вывод обмотки сварочного трансформатора, который соединяется со свариваемым изделием.

Передвижные сварочные установки до включения их в сеть обязательно заземляют; заземление снимается только после окончания работ. Заземляющий провод или шина вначале присоединяется к магистрали заземления, а затем к сварочному оборудованию. Снятие заземления производится в обратном порядке.

Одной из главных причин нарушения изоляции обмоток сварочного оборудования и проводов является их чрезмерная перегрузка по току. Сечение проводов и плавких вставок предохранителей должно соответствовать сварочному току. Предохранители с излишне большими сечениями плавких вставок могут явиться причиной повреждений сварочного оборудования и пожаров.

*Излучение сварочной дуги.* Сварочная дуга является мощным источником излучений с различными длинами волн, в разной степени влияющих на человека, особенно на его зрение. Дуга излучает

видимый свет, а также невидимый ультрафиолетовый и инфракрасный. Длительное облучение инфракрасными лучами может вызвать общую потерю зрения. При правильном подборе защитных стекол инфракрасные лучи полностью поглощаются. Видимые световые лучи при кратковременном облучении действуют ослепляюще, а при длительном вызывают ослабление зрения.

Ультрафиолетовые лучи даже при кратковременном облучении (в течение нескольких минут) вызывают заболевание глаз, называемое светобоязнью и сопровождаемое острой болью и слезотечением. Обычно светобоязнь проходит через 2 – 3 дня, не оставляя вредных последствий. Длительное облучение (в течение нескольких часов) вызывает ожоги кожи подобно солнечным.

Успокаивающее действие на обожженные глаза оказывают холодные примочки, затемнение помещения и глазные цинковые капли; при сильных ожогах необходима немедленная помощь врача.

Для защиты от воздействия лучей дуги сварщика и их подручные, а также работающие со сварщиками сборщики должны надевать на руки брезентовые рукавицы, а лицо и шею закрывать специальным шлемом или щитком. В лицевой части щитка или шлема имеется прямоугольный вырез, в который вставляется светофильтр в виде пластинки из темного стекла типа ЭС, который задерживает ультрафиолетовые лучи полностью, а инфракрасные – по меньшей мере на 99 %.

При работе с открытой дугой при сварочном токе от 100 до 500 А применяются светофильтры различной плотности: ЭС-100 (наибольшей прозрачности), ЭС-300 (средней прозрачности) и ЭС-500 (наименьшей прозрачности). Подручные сварщика и другие работающие рядом со сварщиком должны носить очки шоферского типа со стеклами типа ГС-3 или ГС-7, предназначенный для газосварщиков (стекла ГС-3 и ГС-7, будучи непрозрачными для ультрафиолетовых лучей, пропускают соответственно 3 и 4 % инфракрасных лучей).

С наружной стороны щитка и шлема дополнительно вставляется прозрачное стекло для предохранения светофильтра от брызг расплавленного металла и шлака.

*Опасность ожогов.* Для защиты сварщика и его подручных от брызг расплавленного металла и шлака служит спецодежда из брезента. В целях повышения устойчивости брезентовой и льняной спецодежды против прожигания ее искрами и каплями расплавленного металла целесообразно пропитывать ткань специальными составами, повышающими ее огнестойкость.

Незастегнутая спецодежда, распущенные волосы, торчащий галстук или концы платка могут загореться от искры или капли шлака и



привести к ожогу. Брюки должны надеваться навыпуск и прикрывать верх ботинок, а карманы куртки следует закрывать клапанами.

При контактной стыковой сварке с оплавлением должны приниматься те же меры предосторожности от ожогов, как и при дуговой сварке открытой дугой.

При всех способах контактной сварки работающий на машине сварщик должен иметь очки с простыми стеклами для защиты глаз от искр и брызг расплавленного металла.

*Опасность отравления токсичными газами и парами.* При дуговой сварке качественными электродами с толстым слоем обмазки, содержащей марганец и органические вещества (крахмал, декстрин и др.), воздух загрязняется парами всех составных частей электродов и окислов, а также продуктами сгорания органических веществ. Значительное количество вредных газов, а также пыли выделяется и при автоматической дуговой сварке под слоем флюса. В частности, применение флюса ОСЦ-45 сопровождается выделением токсичного газа – фтористого кремния.

В местах производства сварочных работ должна предусматриваться вентиляция для удаления загрязненного воздуха. Особенно важное значение имеет вентиляция при сварке цветных металлов. При сварке массивных деталей из цветных металлов и чугуна с предварительным подогревом мощными газовыми горелками выделяется окись углерода.

Сварка латуни сопровождается выделением значительного количества токсичных паров цинка, ввиду чего требуется дополнительная защита органов дыхания сварщика.

*Взрывоопасность.* Основными причинами возникновения опасности взрывов в электросварочных установках могут явиться:

- нарушение правил эксплуатации сварочных установок с применением различного рода газов;
- производство сварочных работ во взрывоопасных помещениях; нарушение правил сварки при ремонтах сосудов высокого давления, а также сосудов из-под горючих жидкостей.

При некоторых видах дуговой сварки применяются газы, поступающие к сварочным установкам в баллонах под высоким давлением. Независимо от вида газа (нейтральный или горючий) при работе с газовыми баллонами необходимо руководствоваться соответствующими правилами Госгортехнадзора. Производство сварочных работ во взрывоопасных помещениях, как правило, запрещается. В отдельных случаях при необходимости сварка в таких помещениях может производиться с соблюдением особых мер предосторожности по согласованию со службой техники безопасности предприятия.

При ремонтах сосудов из-под горючих жидкостей перед производством сварочных работ сосуды должны быть тщательно промыты и протерты для полного удаления из них остатков горючего. Промывка сосудов обычно производится водным раствором каустик-честкой соды или тринатрийфосфата.

При дуговой сварке внутри металлических резервуаров необходимо обеспечить сварщиков резиновыми изолирующими ковриками на войлочной или иной подкладке, резиновыми шлемами и спецодеждой с резиновыми подлокотниками и наколенниками. Целесообразно применение специальных электрододержателей с блокировкой, не позволяющей сменить электрод без снятия напряжения.

*Опасность травматизма при сварке на высоте.* Во время работ на подвесных устройствах сварщику необходимо принимать специальные меры безопасности. При работе на высоте сварщик должен надеть пожарный пояс с карабином и привязаться. Для предупреждения травматизма находящихся внизу людей от падающих капель расплавленного металла и шлака, а также от возможного падения металлических предметов под местом сварки должен устраиваться плотный помост, покрытый кровельным железом или асбестовым картоном.

Настилы лесов и подмостков при расположении их на высоте более 1,5 м от уровня земли должны ограждаться барьерами высотой не менее 1 м с бортами внизу высотой не менее 180 мм.

*Пожарная опасность.* Электрическая сварка открытой дугой, а также контактная электросварка с оплавлением сопровождаются брызгами расплавленного металла и шлака, которые могут разлетаться на большие расстояния и вызывать пожарную опасность. Работы с применением таких видов сварки должны проводиться в помещениях, сооруженных из негорючих материалов или защищенных от возгорания штукатуркой, огнестойкой краской и другими средствами. Вблизи мест сварки не допускается скопление легковоспламеняющихся материалов, например жидкого топлива, масел, обтирочной ветоши.

Сварочные участки должны быть оснащены средствами пожаротушения (бочка с водой, ящик с песком и лопаты, а также ручной огнетушитель). Пожарные краны, рукава, стволы, огнетушители, песок и другие средства пожаротушения необходимо содержать в исправности и хранить в определенных местах по согласованию с органами пожарного надзора.

По окончании сварочных работ необходимо дополнительно убедиться в отсутствии возможности возгорания, которое может возникнуть впоследствии в помещении в результате малозаметного

тления того или иного горючего вещества.

#### 2.4 Описание лабораторного стенда

Исследования проводятся на лабораторном стенде, принципиальная схема которого представлена на рисунке 2.4.

Лабораторная установка состоит из сварочного трансформатора типа ТС-300, блока нагрузочных сопротивлений, имитирующих различные режимы работы, аппаратуры управления, сигнализации и измерительных приборов.

Перемещение вторичной обмотки трансформатора вверх по магнитопроводу осуществляется с помощью электродвигателя MS при нажатом кнопочном выключателе SB3, вниз – при нажатом SB4.

Нагрузочные сопротивления R1 и R2 подключаются кнопочными выключателями SB6 и SB7. Для осуществления режима короткого замыкания включается SB8.

Ток первичной и вторичной цепей сварочного трансформатора контролируется амперметрами PA1 и PA2 соответственно. Напряжение вторичной цепи – вольтметром PV2.

Для предотвращения возможности перегрева и выхода из строя вторичной обмотки трансформатора в режиме короткого замыкания, предусмотрено реле времени КТ, которое с выдержкой времени размыкает свой контакт в цепи управления, прерывая, тем самым, данный режим.

#### 2.5 Инструкция по выполнению эксперимента

Эксперимент необходимо выполнять в следующей последовательности :

а) подать напряжение на лабораторную установку, включив автоматический выключатель QF. При этом загорится сигнальная лампа HL1;

б) переместить вторичную обмотку трансформатора в крайнее верхнее положение, нажав кнопочный выключатель SB3. Для фиксации вторичной обмотки нажать SB5;

в) подать напряжение на первичную обмотку трансформатора, для чего нажать кнопочный выключатель SB1. При этом загорится сигнальная лампа HL2;

г) записать показания измерительных приборов в таблицу 2.2 в режиме холостого хода;

д) исследовать работу сварочного трансформатора под нагрузкой, для чего последовательно подключать нагрузочные сопротивления кнопочными выключателями SB6 и SB7. После

каждого нажатия кнопочного выключателя записывать показания измерительных приборов;

е) нажать кнопочный выключатель SB8 (режим короткого замыкания). Записать показания измерительных приборов;

ж) снять напряжение с первичной обмотки трансформатора, нажав кнопочный выключатель SB2;

з) переместить вторичную обмотку трансформатора по магнитопроводу в среднее положение, нажав SB4;

и) повторить эксперимент с пункта в) по пункт е);

к) переместить вторичную обмотку трансформатора по магнитопроводу в нижнее положение, нажав SB4;

л) повторить эксперимент с пункта в) по пункт е);

м) по окончании работы отключить установку автоматическим выключателем QF.

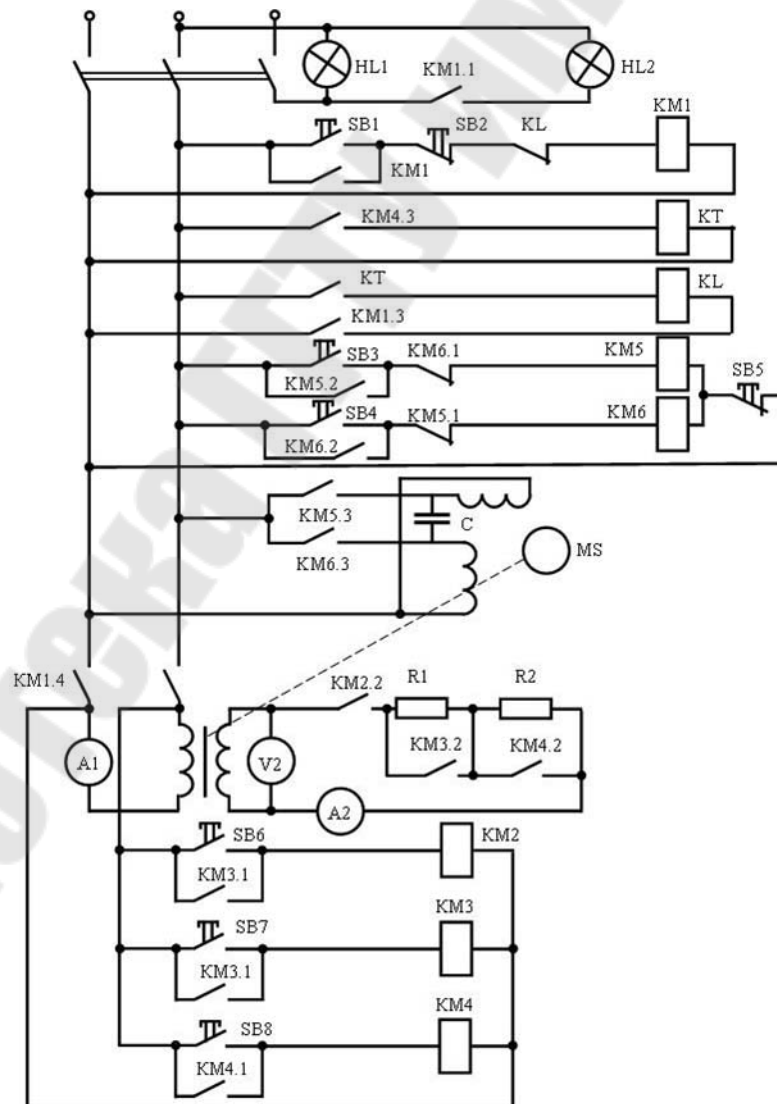


Рисунок 2.4 – Электрическая схема лабораторной установки

Таблица 2.2

Положение вторичной обмотки	Показания приборов							
	Режим холостого хода		Нагрузочные режимы				Режим КЗ	
			Включен SB6		Включен SB7		Включен SB8	
	U <sub>2</sub> , В	I <sub>2</sub> , А	U <sub>2</sub> , В	I <sub>2</sub> , А	U <sub>2</sub> , В	I <sub>2</sub> , А	U <sub>2</sub> , В	I <sub>2</sub> , А
Верхнее								
Среднее								
Нижнее								

## 2.6 Указания по обработке результатов эксперимента

На основании экспериментальных данных построить графическую зависимость изменения напряжения источника  $U$  от тока нагрузки  $I$  (внешние характеристики) сварочного трансформатора для трех положений вторичной обмотки: верхнего, среднего, нижнего).

## 2.7 Указания по оформлению отчета

Отчет по работе должен содержать :

- а) цель работы;
- б) электрическую схему установки;
- в) таблицу с результатами эксперимента;
- г) графическую зависимость  $U_2 = f(I_2)$ .

С более подробными сведениями по теме лабораторной работы можно ознакомиться [1] – с. 256-290; [4] – с. 384-387.

## Вопросы для защиты выполненной работы

1. Конструкция и принцип регулирования вторичного тока сварочного аппарата ТС-300.
2. Почему внешняя характеристика должна иметь круто падающий характер? Что необходимо предпринять для обеспечения этого?
3. Требования к источникам питания для дуговой сварки.
4. Режим работы сварочного оборудования.
5. Техно-экономическое сопоставление электрической сварки на постоянном и переменном токе.
6. Техника безопасности при проведении сварочных работ.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 – ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ СВЧ НАГРЕВА

## 3.1 Цель работы

Изучение конструкции, принципа действия установки сверхвысокочастотного (СВЧ) нагрева, определение влияния степени заполнения рабочей камеры установки на ее энергетический режим работы.

В соответствии с этой целью рабочее задание заключается в следующем:

- а) изучить электрическую схему установки СВЧ нагрева порядок практического выполнения работы;
- б) провести эксперимент в соответствии с п.5;
- в) по методике п.6 провести обработку результатов эксперимента;
- г) оформить отчет о проведенной работе.

## 3.2 Контрольные вопросы для собеседования перед выполнением работы :

- 1) цель работы и постановка задачи;
- 2) размещение силового и контрольно-измерительного оборудования лабораторной установки СВЧ нагрева;
- 3) схема управления установкой;
- 4) порядок проведения эксперимента.

## 3.3 Краткие теоретические сведения

Нагрев диэлектрических материалов в электрическом поле сверхвысоких частот – СВЧ нагрев – получил широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом.

Основным преимуществом применения энергии СВЧ для нагрева диэлектрических материалов перед высокочастотным нагревом в диапазоне метровых волн (высокочастотный нагрев материала в рабочем конденсаторе) является то, что одни и те же значения удельной мощности в материале при нагреве СВЧ могут быть получены при значительно меньших значениях напряженности поля. При СВЧ нагреве менее строгие требования предъявляются к конфигурации и однородности продукта. Оборудование СВЧ нагрева имеет значительно меньшие линейные размеры.

Для целей электротермии в диапазоне СВЧ выделены частоты: (915, 2375, 2450)  $\pm$  2 % МГц.

В качестве генератора СВЧ колебаний используются магнетроны непрерывного действия, выпускаемые на мощности от 0,1 до нескольких

десятков киловатт. Установки СВЧ нагрева широко используются для тепловой обработки влажных материалов (сушка асбестового волокна и асбестовой руды, сушка волокна и тканей в текстильной промышленности и т.д.), для теплового стимулирования ряда химических процессов и сварки материалов с малым фактором потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ), для размораживания и приготовления продуктов питания.

В комплект установки СВЧ нагрева входят блок питания, генератор СВЧ энергии, в качестве которого используют магнетрон, волновод. Нагрев обрабатываемого материала осуществляется в полном резонаторе (камере).

Блок питания включает в себя силовой трансформатор и полупроводниковый выпрямитель. Для питания магнетронов используется постоянное напряжение  $1000 \div 3000$  В. Питание установки СВЧ нагрева осуществляется, как правило, от однофазной или трехфазной сети переменного тока напряжением 220/380 В. В блок питания могут входить дополнительные устройства для регулирования анодного напряжения. Коэффициент полезного действия блока питания достаточно высок ( $\eta = 0,82 \div 0,92$ ) и зависит, главным образом, от устройства полупроводникового преобразователя.

Естественный коэффициент мощности блока питания определяется параметрами полупроводникового преобразователя и в большинстве промышленных установок составляет значение  $0,8 \div 0,93$ . Применение устройств регулирования анодного напряжения магнетрона приводит к снижению  $\eta$  и  $\cos \varphi$  как блока питания, так и установки в целом.

Следует отметить, что при работе блока питания установки СВЧ нагрева, в питающую сеть могут проникать высшие гармонические составляющие тока. Однако их влияние на систему электроснабжения незначительно, так как мощность установок СВЧ нагрева не превышает нескольких десятков киловатт.

Магнетроном называется генераторный, вакуумный, двухэлектродный прибор СВЧ, в котором движение электронов происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях. Перед тем как ознакомиться с работой магнетрона, необходимо вспомнить законы взаимодействия электронов с электрическим и магнитным полями.

*Движение электронов в электрическом поле.* На рисунке 3.1 показаны три основных случая движения одиночного электрона в однородном электрическом поле, созданном двумя плоскими электродами, обозначенными как анод (+) и катод (-).

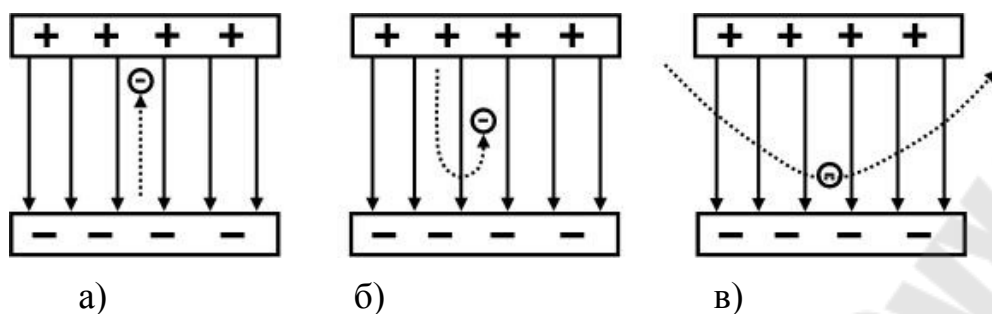


Рисунок 3.1 – Варианты движения электронов в постоянном электрическом поле

В первом случае (рисунок 3.1, а) электрон влетает в поле, отрываясь от отрицательно заряженного катода. Для такого электрона поле будет ускоряющим. Оно действует на электрон с постоянной силой и заставляет его двигаться с ускорением вдоль силовых линий поля. При этом, кинетическая энергия электрона возрастает. Если он попадает в ускоряющее поле, не имея начальной скорости, то, достигнув анода, он приобретает скорость, равную  $v = 6 \cdot 10^5 \sqrt{U}$ , м/сек, при  $U$  – напряжении между катодом и анодом

Как видно, скорость электрона не зависит от пройденного расстояния, а определяется исключительно разностью потенциалов. Как известно, энергия не возникает из ничего. Приобретенную кинетическую энергию электрон отбирает у поля. Переместив отрицательный заряд с катода на анод, электрон снизил заряд обоих электродов и тем самым уменьшил напряженность поля между ними.

Если электрон влетает в поле со стороны анода (рисунок 3.1, б), имея некоторую начальную скорость, то поле будет для него тормозящим. Скорость движения электрона и его кинетическая энергия в тормозящем поле уменьшаются, так как в данном случае работа совершается не силами поля, а самим электроном, который за счет своей энергии преодолевает сопротивление сил поля. Энергия, теряемая электроном, переходит к полю. Имея достаточный запас энергии, электрон может долететь до катода, несмотря на действие тормозящих сил поля. Но если, не долетев до противоположного электрода, электрон израсходует свою кинетическую энергию, его скорость окажется равной нулю, а затем электрон будет двигаться в обратном направлении. При этом поле возвращает ему ту энергию, которую он потерял при своем замедленном движении.

В случае, если электрон влетает в электрическое поле, имея начальную скорость, направленную под углом к силовым линиям поля (рисунок 3.1, в). Помимо изменения величины скорости электрона, будет изменяться и направление его движения, при этом траектория движения электрона становится криволинейной. Электрон под действием сил поля отклоняется в сторону положительного потенциала.



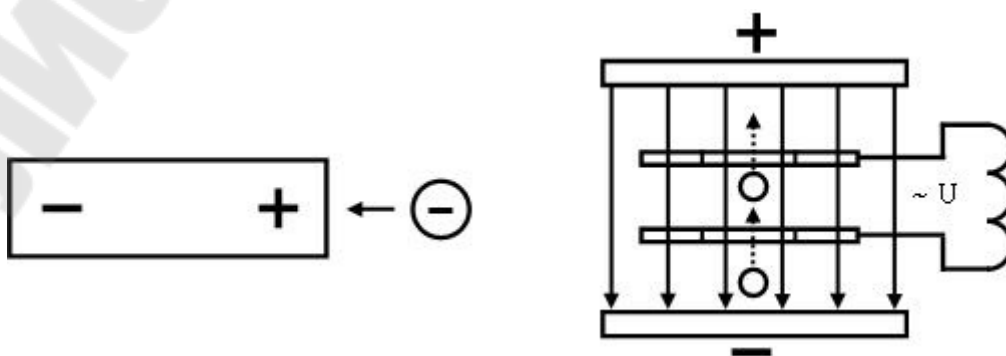
Обычно для упрощения считают, что ток во внешней цепи вакуумного электронного прибора возникает в момент попадания электронов на анод. В действительности ток протекает и в процессе движения электронов от катода к аноду. Чтобы это уяснить, вспомним явление электростатической индукции.

Пусть имеется электрически нейтральный проводник (рисунок 3.2, а), к одному концу которого приближается отрицательный электрический заряд  $e$ . Тогда электроны, имеющиеся в проводнике, отталкиваясь зарядом  $e$ , сместятся в сторону удаленного конца и там образуется отрицательный заряд. На ближнем к заряду  $e$  конце получится недостаток электронов, т.е. положительный заряд.

Процесс перераспределения зарядов есть электрический ток, поэтому можно сделать обобщающий вывод: если отрицательный электрический заряд приближается к проводнику или удаляется от него, то в этом проводнике возникает ток, по направлению совпадающий с направлением движения заряда. В электронных приборах функцию индуктирующего заряда выполняют электроны, движущиеся от катода к аноду, а возникающий при этом ток во внешней цепи называется наведенным.

В электронике СВЧ наведенные токи очень широко используются для возбуждения колебаний в резонаторах, которые являются составной частью большинства СВЧ приборов. В качестве примера рассмотрим электрическую схему на рисунке 3.2, б. Здесь в области между анодом и катодом помещены обкладки конденсатора с отверстием в центре, так чтобы электроны могли проходить сквозь него. Во внешней цепи обкладки замкнуты на катушку индуктивности, образуя колебательный контур.

Предположим, электроны вылетают с катода поочередно по одному. Тогда первый электрон, пролетающий мимо обкладок конденсатора, вызовет во внешней цепи наведенный ток и в контуре возникнут электрические колебания. Помимо постоянной составляющей электрического поля, между обкладками появится переменная составляющая. Если после этого выпустить еще один электрон, то в интересующей нас области он либо получит дополнительное ускорение, когда переменное поле будет совпадать по направлению с постоянным, либо наоборот – замедлится в случае противоположной ориентации полей.



а)

б)

Рисунок 3.2 – Возникновение наведенных токов

В последнем случае электрон отдаст часть своей энергии контуру, увеличив амплитуду его колебаний. Выпуская электроны таким образом, чтобы они каждый раз попадали в тормозящее электрическое поле контура, можно возбудить в нем колебания любой амплитуды, которую только обеспечивает его добротность.

Если же электроны будут влетать в пространство между обкладками в тот момент, когда там существует ускоряющее поле, то второй электрон погасит колебания, возбужденные первым, и так далее: один электрон будет совершать работу, другой – ее уничтожать.

*Движение электронов в магнитном поле.* Движущийся электрон представляет собой элементарный ток и поэтому испытывает со стороны магнитного поля такое же действие, как и проводник с током. Из электротехники известно, что на прямолинейный проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует механическая сила, направленная под прямым углом к магнитным силовым линиям и к проводнику. Эта сила пропорциональна напряженности поля, величине тока и длине проводника, а также зависит от угла между проводником и направлением поля. Она будет наибольшей, если проводник расположен перпендикулярно силовым линиям; если же проводник расположен вдоль линий поля, то сила равна нулю.

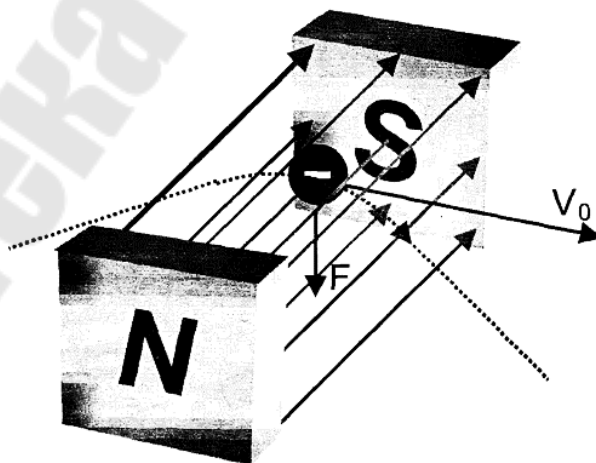


Рисунок 3.3 – Воздействие постоянного магнитного поля на движущийся электрон

Если электрон в магнитном поле неподвижен или движется вдоль его силовых линий, то на него магнитное поле не действует. На рисунке 3.3 показано, что происходит с электроном, который влетает с начальной скоростью  $v_0$  в равномерное магнитное поле, перпендикулярно его силовым линиям. Под действием сил со стороны магнитного поля его траектория искривляется, он начинает двигаться по дуге окружности. При этом его скорость и кинетическая энергия не изменяются. Радиус окружности, по которой движется электрон, определяется формулой

$$r = \frac{m \cdot v_0}{e \cdot \vec{H}},$$

где  $m$ ,  $e$  – масса, заряд электрона соответственно;

$v_0$  – скорость электрона;

$\vec{H}$  – напряженность магнитного поля.

*Конструкция магнетрона.* Магнетрон представляет собой вакуумный диод, анод которого выполнен в виде медного цилиндра, на внутренней стороне которого расположено четное число резонаторов (рисунок 3.4). В магнетронах для СВЧ-печей их, как правило, десять. Форма резонаторов может быть различной, но при этом они должны удовлетворять следующим условиям :

- электрическое поле преимущественно сосредоточено в зазоре резонатора;

- все резонаторы сильно связаны между собой;

- обладать высокой добротностью.

В дальнейшем для простоты мы будем рассматривать только одну конструкцию магнетрона, которая типична для микроволновых печей. Резонаторы в этом случае представляют собой секторы цилиндра. По сравнению с другими конструкциями эта более технологична и более экономична.

Четные и нечетные перегородки между резонаторами соединены между собой связками. Катод представляет собой спираль из вольфрама, поверхность которого имеет шероховатость для увеличения эмиссии. Выводы катода через металлокерамический переход и высокочастотный фильтр подключаются к внешнему разъему. Промежуток между анодом и катодом, называемый пространством взаимодействия, с торцов ограничен металлическими пластинами, препятствующими выходу электронов и СВЧ поля из этого пространства. Для отбора энергии вблизи одного из резонаторов подключена магнитная петля связи, которая через отрезок коаксиального волновода соединена с излучателем. Магнитное поле в пространстве взаимодействия создается двумя кольцевыми постоянными магнитами и магнитопроводом, в качестве которого служат корпус и

фланец. Для более интенсивного охлаждения магнетрона анодный блок окружен радиатором. Для снижения паразитного излучения в месте соединения магнетрона с внешней цепью имеется металлическая оплетка. СВЧ фильтр состоит из катушек индуктивности на ферритовом сердечнике и проходных конденсаторов.

*Принцип действия магнетрона.* Рассмотрим вначале движение электронов в магнетроне, предполагая, что колебаний в резонаторах нет. Для упрощения изобразим анод без резонаторов (рисунок 3.5).

Под влиянием ускоряющего электрического поля электроны стремятся лететь вдоль его силовых линий, т.е. по радиусам от катода к аноду. Но как только они набирают некоторую скорость, постоянное магнитное поле начинает искривлять их траектории. Так как скорость электронов постепенно нарастает, то радиус этого искривления постепенно увеличивается. Поэтому траектория электронов представляет собой не дугу окружности, а более сложную кривую – циклоиду.

На рисунке 3.5 показаны траектории электронов, вылетевших с катода с ничтожно малой начальной скоростью при разной напряженности магнитного поля  $H$ . Анодное напряжение во всех случаях одно и то же. Если магнитное поле отсутствует, то электрон летит строго по радиусу (траектория 1). При напряженности поля, меньшей некоторого критического значения  $H_{кр}$ , электрон попадает на анод по криволинейной траектории 2. Критическая напряженность поля соответствует более искривленной траектории 3. В этом случае электрон пролетает у самой поверхности анода, почти касаясь ее, и возвращается на катод. Если поле выше критического, то электрон еще более круто поворачивает обратно (кривая 4).

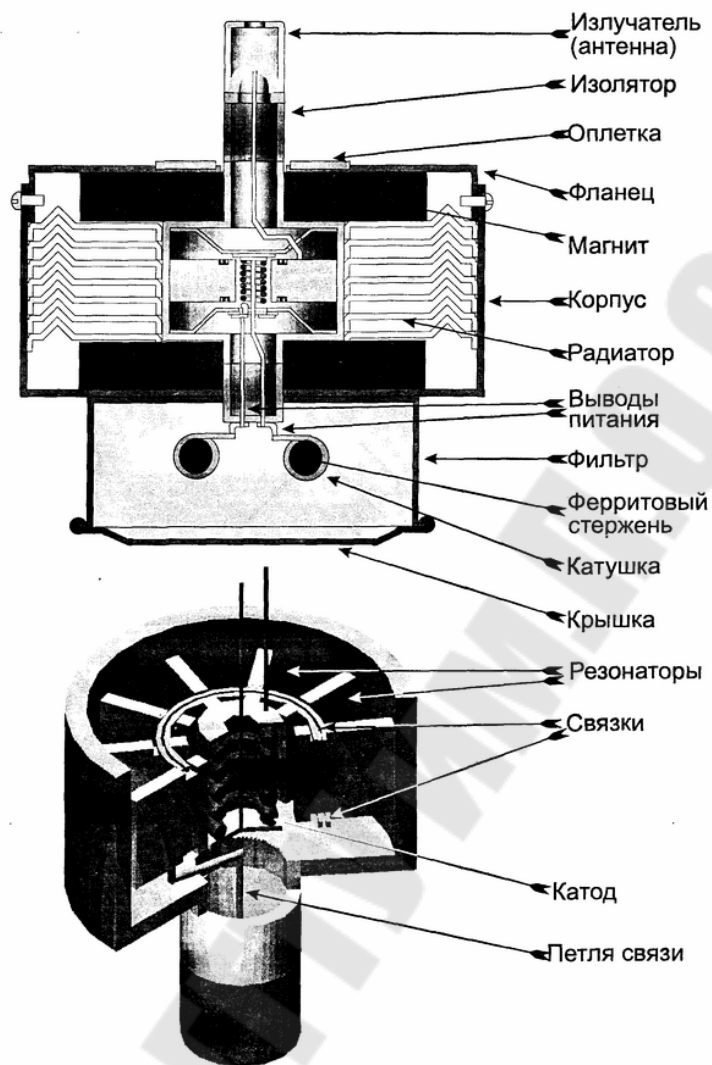


Рисунок 3.4 – Конструкция магнетрона СВЧ-печи

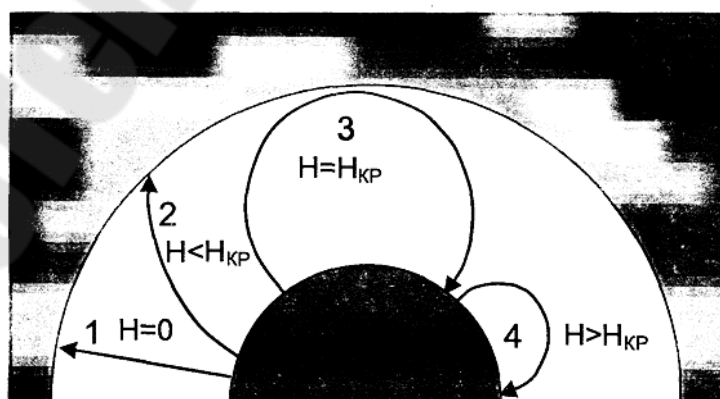


Рисунок 3.5 – Движение электронов в пространстве взаимодействия при различной индукции магнитного поля

Магнетроны работают при напряженности поля, несколько большей критической. Поэтому электроны при отсутствии колебаний пролетают близко к поверхности анода на различных расстояниях от него в зависимости от начальной скорости. Поскольку одновременно движется очень большое количество электронов, можно считать, что в пространстве взаимодействия вращается электронное облако в виде кольца (рисунок 3.6).

Скорость вращения электронного облака зависит от приложенного напряжения и поэтому может регулироваться. Чтобы при ее увеличении электроны не попадали на анод, одновременно необходимо увеличивать и напряженность магнитного поля.

Теперь вернем на место резонаторы. Все они сильно связаны между собой, так как магнитное поле каждого из них замыкается, проходя через смежные резонаторы. Переменное электрическое поле в магнетронных резонаторах сосредоточено в области щели, причем значительная его часть проникает в область взаимодействия, что имеет принципиальное значение в работе магнетрона. Движение электронного облака в пространстве взаимодействия будет наводить токи в резонаторах.

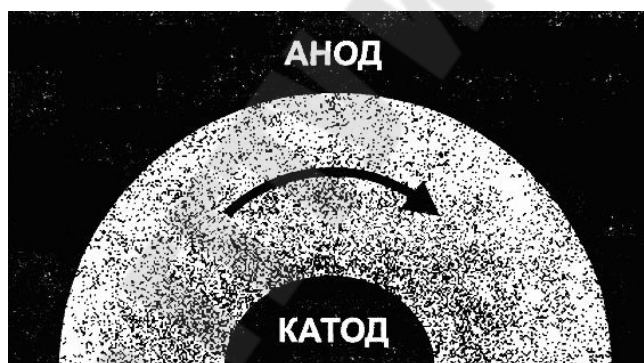


Рисунок 3.6 – Вращающееся электронное облако в пространстве взаимодействия

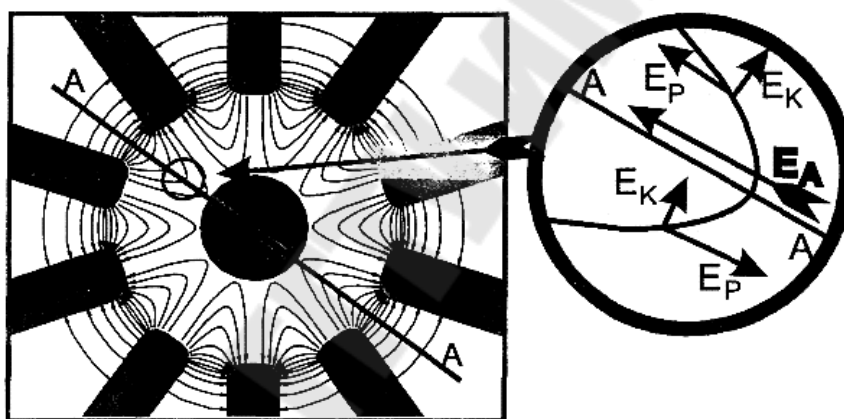
Однако в начальный момент увеличение амплитуды колебаний будет сдерживаться тем, что движение электронов не синхронизировано, и в то время, как одни электроны будут возбуждать колебания, отдавая им часть своей кинетической энергии, другие будут эти колебания гасить. Кроме того, если сдвиг фаз в соседних резонаторах не синхронизирован со скоростью электронов, то один и тот же электрон, отдавая энергию одному резонатору, будет ее тут же отбирать у другого.

Обычно для нормальной работы магнетрона требуется, чтобы фазы соседних резонаторов были смещены на  $180^\circ$ , т.е. на  $\pi$  радиан. Поэтому такой вид колебаний называется  $\pi$  – видом. Чтобы способствовать возбуждению этого вида и препятствовать возбуждению остальных, в

магнетроне используются металлические связки, которые электрически соединяют между собой четные и нечетные резонаторы.

Предположим, что в какой-то момент времени в резонаторах случайным образом возникли колебания нужного нам вида (рисунок 3.7). Покажем, что при правильно заданных режимах магнетрона эти колебания будут усиливаться за счет автоматической группировки электронов.

В любой точке пространства взаимодействия мы можем рассматривать СВЧ поле как сумму двух составляющих: радиальной – направленной по радиусу от центра магнетрона, и перпендикулярной ей касательной составляющей. На рисунке 3.7 можно заметить характерную особенность: во всем пространстве, находящемся под отрицательным сегментом, радиальная составляющая поля направлена к катоду, а во всем пространстве под положительным сегментом она направлена к аноду (поле считаем направленным в ту сторону, куда движется электрон под действием этого поля). Границами, разделяющими эти пространства, являются плоскости, проходящие через ось магнетрона и середины щелей.



$E_p$  - радиальная составляющая СВЧ поля  
 $E_k$  - касательная составляющая СВЧ поля  
 $E_a$  - поле, созданное анодным напряжением

Рисунок 3.7 – Распределение силовых линий переменного электрического поля в пространстве взаимодействия

Обозначим одну из таких плоскостей буквами АА. Слева от этой плоскости радиальная составляющая будет ускорять электроны, поскольку она совпадает по знаку с постоянным анодным напряжением. Так как под влиянием магнитного поля направление скорости изменяется, то через некоторое время увеличение скорости в радиальном направлении превращается в увеличение скорости по направлению к плоскости АА.

Поэтому электроны, находящиеся под положительным сегментом, догоняют электроны, находящиеся в плоскости АА. Электроны, находящиеся под отрицательным полюсом, тормозятся радиальной

составляющей СВЧ поля, поэтому их скорость в направлении движения электронного облака снижается. В результате образуются области электронных скоплений, по форме напоминающие спицы колеса, как это показано на рисунке 3.8. Эти спицы вращаются с такой скоростью, чтобы за половину периода проходить расстояние от одной резонаторной щели до другой.

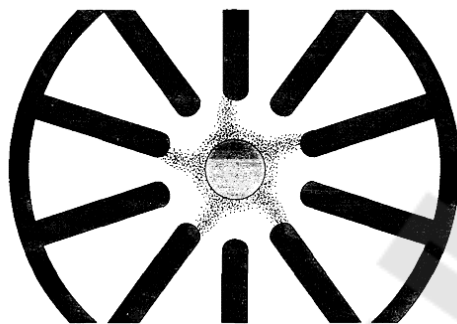


Рисунок 3.8 – Форма вращающегося электронного облака в работающем магнетроне

В этом случае электроны, находящиеся в спицах, пролетая над щелями резонаторов, могут постоянно попадать в тормозящее поле касательной составляющей и отдавать ему энергию, накопленную во время движения по радиальной составляющей. Таким образом, основная роль касательной составляющей СВЧ поля заключается в преобразовании кинетической энергии электронов в энергию колебаний, а основная роль радиальной составляющей заключается в преобразовании равномерного электронного облака в колесо.

Рассмотрим более подробно движение отдельного электрона в двух случаях: когда он находится в спице и когда он вне ее. Как уже отмечалось, при отсутствии СВЧ поля электрон, вылетевший с катода со скоростью, равной нулю, совершит круг почета вблизи анода и вновь вернется на катод. Причем скорость в конце пути будет той же, что и в начале, т.е. в нашем случае нулевой.

При наличии СВЧ поля возможны два случая:

Первый. Допустим, электрон находится в области спицы. Тогда, вылетев с катода, он будет разгоняться анодным напряжением и за счет магнитного поля постепенно изменять направление движения. Влетев в тормозящее СВЧ поле, он отдаст ему часть своей кинетической энергии, и его скорость снизится. В результате ему не хватит оставшейся энергии, чтобы долететь обратно до катода. В какой-то момент он остановится, а затем вновь начнет движение к аноду под воздействием анодного напряжения. Все предыдущие процессы повторятся, за исключением того, что точкой начала движения будет не катод. Так же будут происходить и последующие циклы, пока в конце концов электрон не доберется до анода.



Таким образом, электрон на пути к аноду проходит по сложной траектории (рисунок 3.9) несколько раз, отдавая свою энергию СВЧ полю.



Рисунок 3.9 – Траектория электрона, находящегося в «спице» при движении от катода к аноду

Второй. Если при прочих равных условиях электрон вылетел с катода в момент, когда он находился между спицами, то он попадет в ускоряющее СВЧ поле, и поэтому ему после правого разворота в магнитном поле вполне хватит энергии врезаться в катод. Избыток кинетической энергии выделится в виде тепла, приводя к дополнительному разогреву катода.

*Характеристики магнетронов.* Основными параметрами магнетронов являются: рабочая частота, выходная мощность, коэффициент полезного действия (КПД), рабочие токи и напряжения. Частота магнетронов для микроволновых печей составляет 2450 МГц. Отклонение от этой частоты в ту или иную сторону может быть вызвано изменением анодного напряжения или параметрами нагрузки. Величина смещения частоты составляет несколько мегагерц. Мощность магнетронов лежит в пределах от 500 Вт, до 1 кВт, а КПД составляет от 50 до 85 %. Анодный ток магнетронов для СВЧ-печей обычно составляет 250 –300 мА.

КПД магнетрона возрастает при одновременном увеличении анодного напряжения и магнитной индукции, если при этом не нарушаются условия синхронизма. КПД магнетрона напрямую зависит от потерь, которые происходят двумя путями. Часть мощности теряется потому, что некоторые электроны прибывают на анодный блок магнетрона с большими скоростями и тратят свою энергию на его нагрев. Вследствие этого магнетрон разогревается до высокой температуры и необходимо принимать специальные меры для его охлаждения. Другая часть мощности теряется в резонаторах магнетрона, так как в них возникают СВЧ токи большой силы. Для снижения этих потерь необходимо повышать добротность резонаторов.

*Техника безопасности при эксплуатации высокочастотных установок с ламповыми генераторами.* Поскольку установки с ламповыми генераторами работают при высоком напряжении (5 – 15 кВ) на повышающем трансформаторе и на выпрямительном и генераторном блоках, вопросам техники безопасности должно быть уделено особое внимание. Непременными условиями при конструировании и эксплуатации установок являются: выполнение надежного заземления всех кожухов блоков; устройство механических блокировок всех дверей; при наличии смотровых стекол в кожухах блоков покрытие металлическими сетками стекол во избежание прикосновения к токоведущим элементам и приборам при случайном растрескивании стекол и их выпадении. Должно быть предусмотрено устройство, контролирующее расход охлаждающей воды и автоматически выключающее установку при прекращении подачи воды или перегреве ее свыше допустимой температуры (50 – 60°С), а также релейная защита, выключающая установку при перенапряжениях, токовых перегрузках и коротких замыканиях.

Для подавления радиопомех, создаваемых высокочастотной установкой, применяют экранирование и фильтрацию высокочастотных колебаний, что препятствует проникновению токов высокой частоты в электрическую сеть. Экранирование может быть общим для всей установки или поблочным. В первом случае вся установка вместе с колебательным контуром помещается в экранированную комнату или кабину. Экранирование заключается в покрытии стен, пола и потолка листовой сталью толщиной 0,5 – 1 мм или листовой латунью толщиной 0,5 – 0,8 мм: Экран должен представлять собой одно целое в отношении электрического контакта и иметь надежное заземление. Окна и вентиляционные проемы экранируются металлическими сетками, пропускающими свет и воздух.

Для уменьшения проникновения высокочастотных колебаний в питающую электросеть применяют специально сконструированные сетевые фильтры, состоящие из катушек со стальными сердечниками и безындуктивными конденсаторами, включенными по Г-образной двухзвенной схеме. Рабочее напряжение фильтра должно быть равно напряжению сети, а рабочий ток должен соответствовать мощности установки. Допустимое падение напряжения в фильтре – не более 5 %. Сетевой фильтр обычно помещают с внешней стороны экранированной комнаты. Экранированные комнаты имеет смысл делать в случае размещения в них нескольких установок.

В современных серийных высокочастотных установках применяется поблочное экранирование, что позволяет размещать блоки установок в любом месте производственного цеха (участка) и защищать рабочий персонал от действия высокочастотного поля. В этом случае экранируются все блоки высокочастотной установки, включая рабочий (нагрузочный) контур с нагревательным устройством. Сетевой фильтр монтируется в

кожухе входного блока установки. Такие установки носят название выполненных в помехозащищенном исполнении, т. е. при эксплуатации эти установки не дают радиопомех выше допустимого уровня. Металлические кожухи блоков установки имеют надежное заземление. Нагревательное устройство (или рабочий конденсатор для термообработки полупроводников и диэлектриков) в случае их больших размеров помещают в отдельной экранированной камере. Питание от установки к рабочему контуру подается экранированным, чаще всего коаксиальным кабелем, экран которого присоединяется к экранам установки и рабочей камеры.

В мощных установках с многообъемными маслonaполненными силовыми повышающими трансформаторами предусматривается маслосточная яма, расположенная под трансформатором и покрытая металлической сеткой со слоем песка и гравия на ней.

При обслуживании лампового генератора и высокочастотных нагревательных устройств должны строго выполняться правила техники безопасности, разработанные для высоковольтных устройств промышленной частоты, и соблюдаться мероприятия по предохранению обслуживающего персонала от случайного прикосновения к токоведущим шинпроводам и приборам, находящимся под высоким напряжением как промышленной, так и высокой частоты. Несоблюдение этих правил может привести к ожогам и смертельным случаям.

Эксплуатация генератора разрешается только при полной его исправности.

Наладка генератора должна производиться не менее чем двумя лицами, имеющими соответствующие практические навыки и теоретическую подготовку. Работа в ночные часы должна проводиться только при наличии двух рабочих (термиста и электрика), хорошо знающих правила техники безопасности при работе на данной установке и умеющими оказать первую помощь при поражении электрическим током.

Ремонтные и монтажные работы внутри блоков генератора или в помещении ввода высокого напряжения промышленной частоты разрешаются только после полного выключения питания установки и заземления всех токоведущих частей. Перед началом работ необходимо убедиться в отсутствии напряжения на токоведущих элементах с помощью индикатора. На время работ в местах возможного включения напряжения должны вывешиваться предупредительные надписи и плакаты. Вблизи установок должны находиться все необходимые защитные приспособления (индикаторы высокого напряжения, резиновые коврики, галоши и перчатки, изолирующие штанги, закорачивающие перемычки и предупредительные плакаты), а также принципиальные и монтажные схемы, схемы водоохлаждения, инструкции по эксплуатации установки и средства для оказания первой помощи.

Высокочастотные шинопроводы должны быть расположены на недоступной для прикосновения высоте или иметь защитное ограждение с заземлением, так как прикосновение к высокочастотным проводам высокого напряжения грозит сильным ожогом. Резиновые перчатки и галоши, защитная одежда не могут предохранить от ожогов токами высокой частоты.

Необходимо следить за накалом ламп (промышленные установки обычно снабжены стабилизаторами напряжения цепей накала ламп).

Подача охлаждающей воды после выключения цепей накала во всех элементах установки прекращается не менее чем через 5 – 10 мин.

Вся система водяного охлаждения должна периодически очищаться от накипи и грязи. Анодные бачки очищают металлической щеткой и промывают проточной водой.

Проверяются и очищаются также подводящие и отводящие ниппели, стеклянные трубки и резиновые шланги. Поскольку анодные бачки находятся под напряжением до 8 – 13 кВ, длина подводящих и отводящих шлангов должна быть не менее одного метра на каждые 1000 В напряжения, чтобы было обеспечено достаточное электрическое сопротивление столба воды во избежание утечки тока и пробоя.

Тиратроны, включаемые впервые или после длительного хранения, должны быть предварительно оттренированы путем прогрева нитей накала в течение длительного времени, указанного в паспорте, без включения высокого напряжения, а затем выдержаны при высоком напряжении без тока нагрузки.

*При эксплуатации СВЧ-печи необходимо помнить, что*

- нельзя помещать в СВЧ-печь посуду с золотыми или иными металлическими ободками. Дело в том, что переменное электрическое поле микроволнового излучения приводит к появлению в металлических предметах наведенных токов. Сами по себе эти токи ничего страшного не представляют, но в тонком проводящем слое, каким является слой декоративного металлического покрытия на посуде, плотность наведенных токов может оказаться столь высокой, что ободок, а с ним и посуда, перегреется и разрушится.

В СВЧ-печь нельзя помещать металлические предметы с острыми кромками, заостренными концами (например, вилкам): высокая плотность наведенного тока на острых краях проводника может стать причиной оплавления металла или появления электрического разряда;

- ни в коем случае не следует ставить в СВЧ-печь плотно закрытые емкости: бутылки, консервные банки, контейнеры с продуктами и т.д., а также яйца (сырые или вареные). Все перечисленные предметы при нагреве могут разорваться и привести печь в негодность.

- нельзя пустую СВЧ-печь, без единого предмета, который поглощал бы микроволны. В качестве минимальной загрузки печи при любом ее включении (например, при проверке работоспособности) принята простая

и всем понятная единица: стакан воды (200 мл). Включение пустой микроволновой печи чревато ее серьезным повреждением. Не встречая на своем пути никаких препятствий, микроволны будут многократно отражаться от внутренних стенок полости печи, а сконцентрированная энергия излучения может вывести печь из строя.

### **3.4 Описание лабораторного стенда**

Работа выполняется на стенде, электрическая схема которого представлена на рисунке 3.10.

Лабораторная установка состоит из СВЧ печи “Электроника”, измерительных приборов и аппаратуры сигнализации, установленных на лицевой панели стенда.

Печь СВЧ выполнена в виде шкафа настольного исполнения. Дверца рабочей камеры размещена на лицевой панели и открывается влево. Там же расположена ручка таймера и кнопки управления печью. Рабочая камера, листом из радиопрозрачного материала, разделена на два отсека. Нижний отсек рабочей камеры служит для размещения нагреваемого тела. В верхнем отсеке размещены вывод энергии магнетрона, пассивные отражатели и диссектор, представляющий собой металлическую крольчатку с несколькими лопастями. Назначение диссектора – возбуждение большого числа типов колебаний с различным пространственным расположением максимумов и минимумов электрического поля, что приводит к повышению равномерности нагрева. Дверца печи снабжена электромеханической блокировкой. По периметру рабочей камеры размещены поглощающие прокладки, препятствующие выходу электрического поля за его пределы. Дверца имеет окно для наблюдения за процессом нагрева. Объемный нагрев тела происходит за счет поглощения многократно отраженной в камере печи электромагнитной сверхвысокочастотной волны. Вся электрическая энергия, поступающая в камеру, поглощается нагреваемым телом.

Измерительный стенд содержит вольтметр для измерения входного напряжения, амперметр для измерения силы тока установки. Для измерения температуры нагрева материала используется электрический термометр В1 со щупом.

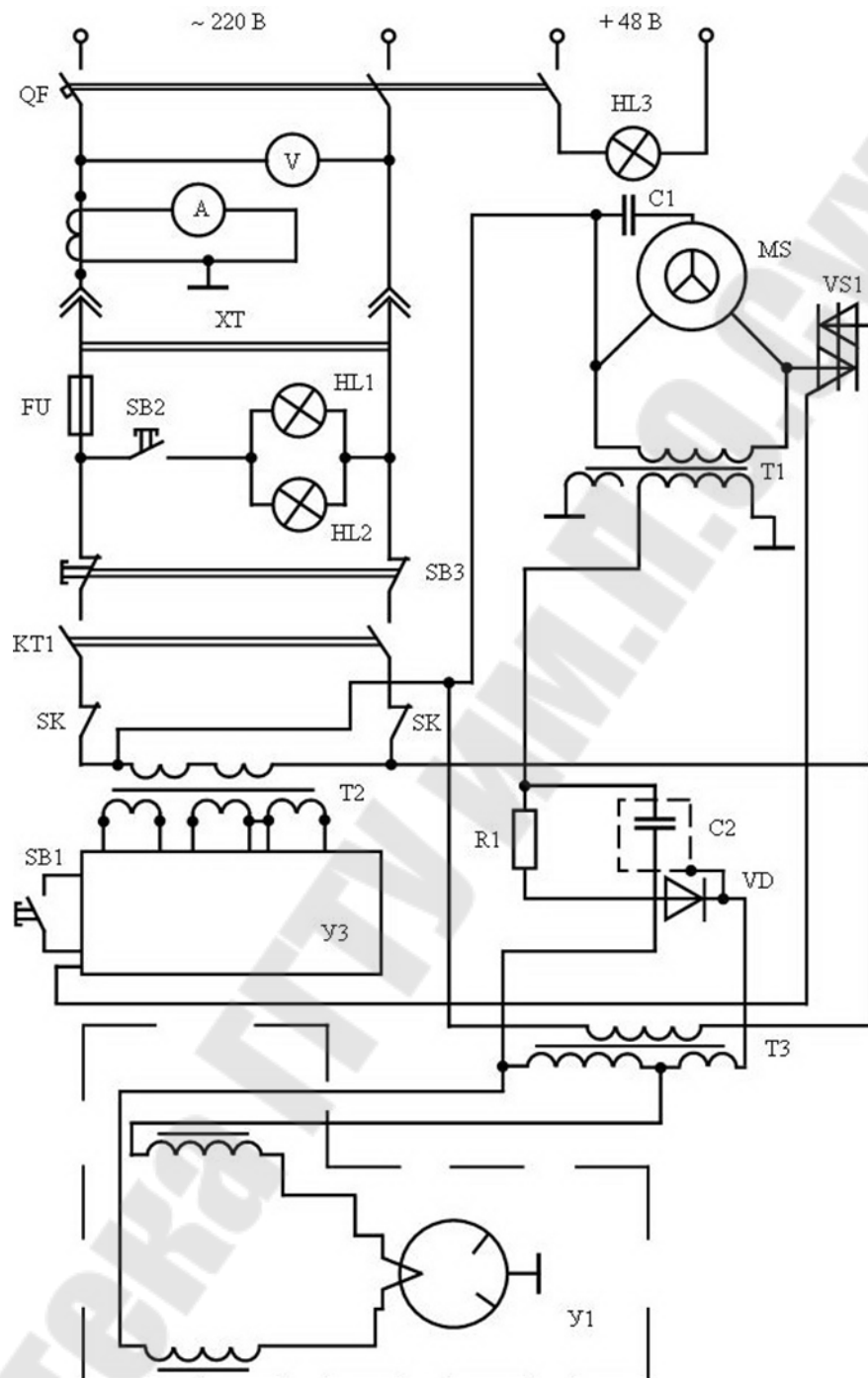


Рисунок 3.10 – Электрическая схема лабораторной установки

### 3.5 Инструкция по выполнению эксперимента

Эксперимент необходимо выполнять в следующей последовательности :

- а) налить в мерную емкость нормированное количество воды (по заданию преподавателя).

б) подать питание на установку, включив автоматический выключатель QF.

в) определить начальную температуру воды с помощью электрического термометра В1 и рисунка 3.11.

г) закрыть емкость сверху листом материала, прозрачного для СВЧ волн.

д) поместить емкость в камеру печи, плотно закрыв дверцу.

е) повернуть ручку таймера по часовой стрелке до отметки “25”. Затем, поворачивая ручку таймера против часовой стрелки, установить необходимое время работы установки (задается преподавателем).

ж) включить нагрев, нажав кнопку “Вкл” на лицевой панели печи.

з) записать показания измерительных приборов в таблицу 3.1.

и) после автоматического отключения печи, открыть дверцу, вынуть емкость и определить температуру нагретой воды с помощью электрического термометра В1 и рисунка 3.11.

к) эксперимент проделать три раза, меняя каждый раз объем нагреваемой воды (задается преподавателем).

л) после завершения эксперимента отключить питание установки, выключив QF.

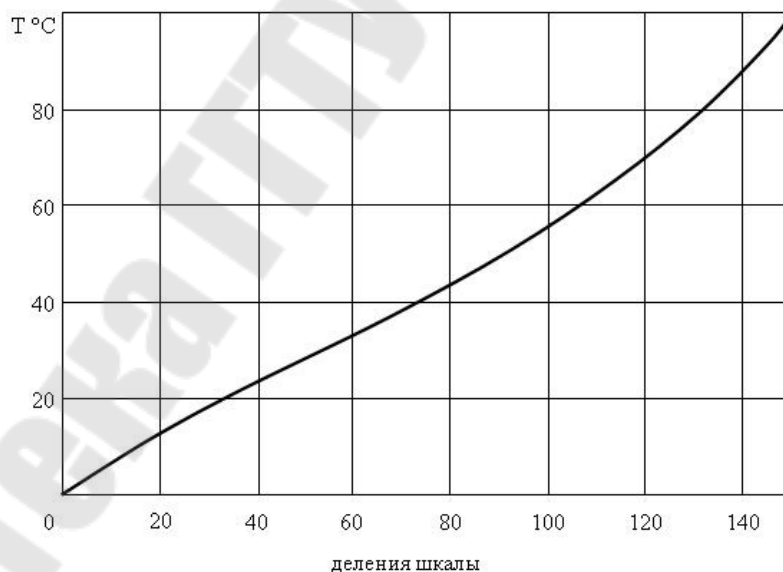


Рисунок 3.11 – График для определения температуры воды

### 3.6 Указания по обработке результатов эксперимента

При обработке результатов эксперимента необходимо руководствоваться следующей методикой:

а) определить количество теплоты, затраченное на нагрев воды, кДж

$$Q_2 = 4,18 \cdot V \cdot (T_2 - T_1),$$

где  $V$  – объем нагреваемой воды, л;

$T_2, T_1$  – температура воды соответственно после и до нагрева, °С;

б) Определить количество энергии, потребленное установкой из сети, Дж

$$Q_1 = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \tau,$$

где  $U$  – напряжение питания, В;

$I$  – ток, потребляемый установкой, А,

$\tau$  – время нагрева, с;

в) Определить коэффициент полезного действия установки

$$\eta = (Q_2 / Q_1) \cdot 100 \%;$$

г) Построить графическую зависимость

$$\eta = f(V).$$

Таблица 3.1

№ Экспе-ри-мен-та	Экспериментальные данные				Расчетные данные		
	Объем Нагрева-емой воды $V$ , л	Температура воды до и после нагрева		Время нагрева $\tau$ , с	Потреб- ленная энерги я $Q_1$ , Дж	Энергия, затраченна я на нагрев $Q_2$ , Дж	КПД установ- ки, %
		$T_1$ , °С	$T_2$ , °С				

### 3.7 Указания по оформлению отчета

Отчет по работе должен содержать :

а) цель работы;

б) электрическую схему лабораторной установки;

в) таблицу с результатами эксперимента;

г) графическую зависимость  $\eta = f(V)$ .

С более подробными сведениями по теме лабораторной работы можно ознакомиться [1] – с. 174-177; [2] – с. 86-94.

### Вопросы для защиты выполненной работы



1. Конструкция и принцип действия установок СВЧ нагрева.
2. Устройство и принцип действия магнетрона.
3. Конструкция СВЧ нагревателя “Электроника”.
4. Провести анализ зависимости  $\eta = f(V)$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 – ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

**Цель работы:** Изучение основных положений молекулярно-кинетической теории, измерение коэффициента линейного теплового расширения твердых тел.

**Приборы и принадлежности:** нагревательная печь, пробирка с водой, термометр, индикатор удлинения часового типа, набор стержней из разных материалов.

Общие сведения

Основные положения молекулярно-кинетической теории:

тела состоят из молекул, а молекулы – из атомов;

молекулы находятся в непрерывном движении;

на расстояниях  $r < r_0 \sim 0,1$  нм молекулы отталкиваются, при  $r > r_0$  – притягиваются, однако при  $r > 10r_0$  сила притяжения пренебрежимо мала (верхний график на рисунок 4.1).

График потенциальной энергии взаимодействия молекул (атомов) представляет собой потенциальную яму (нижний график на рисунок 4.1).



рисунок 4.1

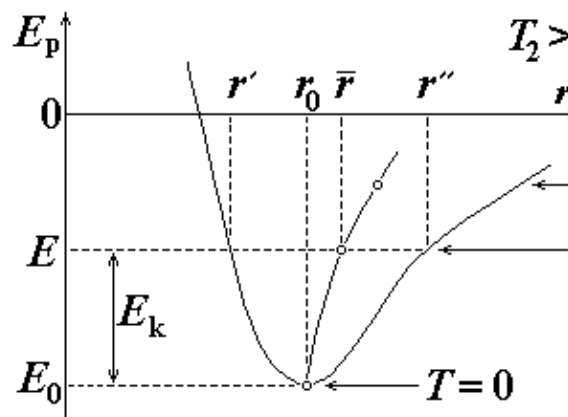


рисунок 4.2.

Взаимодействие между атомами, которые размещаются в узлах кристаллической решетки, определяется зависимостью потенциальной энергии  $W_p$  от расстояния  $r$  между ними (рисунок 4.2). Расстояние  $r_0$  между взаимодействующими атомами соответствует

минимуму потенциальной энергии при абсолютном нуле температур. Согласно представлениям классической физики, атомы при абсолютном нуле температур неподвижны, каждый из них находится в положении устойчивого равновесия – на дне потенциальной ямы. С повышением температуры атом начинает колебаться возле этого положения равновесия, имея среднюю кинетическую энергию  $\frac{3}{2}kT$ . Температура является мерой средней кинетической энергии теплового движения атомов или молекул.

При некоторой температуре  $T_1$ , не сильно отличающейся от нормальной температуры  $T_0 = 273,15$  К, которой по шкале Цельсия соответствует температура  $t = 0^\circ\text{C}$ , суммарная кинетическая и потенциальная энергия атома равна  $E$ . Это означает, что в процессе колебаний расстояние между атомами изменяется от  $r'$  к  $r''$ . Среднее расстояние между атомами будет равно  $\bar{r} = (r' + r'')/2$ . Поскольку график потенциальной энергии не симметричен относительно положения равновесия – точки  $r_0$ , то с увеличением температуры среднее расстояние между атомами будет возрастать. Следовательно, будут возрастать линейные размеры и объем тела. Это явление называется тепловым расширением.

Как видно из графика, (рис.2) расстояние между молекулами при температурах, не на много отличающихся от  $0^\circ\text{C}$ , практически линейно зависит от температуры. Это позволяет записать линейный размер (длину)  $L$  тела в виде:

$$L = L_0(1 + \alpha T), \quad (4.1)$$

где  $L_0$  – длина тела при температуре  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения твердого тела.

Для анизотропных твердых тел (кристаллов) коэффициент линейного теплового расширения зависит от направления, для изотропных (аморфных, таких как стекло, и поликристаллических, к которым принадлежат металлы) – не зависит. Для железа и бетона  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Из формулы (4.1) вытекает зависимость объема тела от температуры:

$$V = V_0(1 + \alpha T)^3 \approx V_0(1 + 3\alpha T) = V_0(1 + \beta T), \quad (4.2)$$

где  $\beta = 3\alpha$  – коэффициент объемного теплового расширения.

Записав уравнение (4.1) для двух значений температуры, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} L_1 = L_0(1 + \alpha T_1), \\ L_2 = L_0(1 + \alpha T_2). \end{cases}$$

Решая систему уравнений, получаем,

$$\alpha = \frac{L_2 - L_1}{L_1 T_2 - L_2 T_1} = \frac{x}{L_1 T_2 - (L_1 + x) T_1} \approx \frac{x}{L_1 (T_2 - T_1)}, \quad (4.3)$$

где  $x = L_2 - L_1$  – приращение длины тела при его тепловом расширении; очевидно, что  $x \ll L_1$ .

Абсолютная погрешность результата косвенных измерений коэффициента линейного теплового расширения:

$$\Delta\alpha = \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T_2 - T_1}\right)^2}, \quad (4.4)$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta T$  – погрешности измерения приращения  $x$  длины стержня, длины стержня  $L$ , температуры  $T$ , соответственно.

### **Описание лабораторной установки**

Установка (рисунок 4.3) состоит из наполненной водой пробирки 5, нагревательной печи 4, микрометрического индикатора 1, закрепленного в обойме винтом 2. Индикатор может поворачиваться в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси вместе с кронштейном, на котором он закреплен. Образец (стержень) 6 располагается между толкателем 3 индикатора и дном пробирки. При нагревании образец расширяется и перемещает толкатель 3 индикатора. Удлинение стержня фиксируется на шкале индикатора.

### **Порядок выполнения работы**

Заполните пробирку на три четверти водой комнатной температуры и измерьте начальную температуру воды  $T_1$ . Результаты этого и дальнейших измерений заносите в табл. 1.

Измерьте штангенциркулем длину  $L_1$  стержня–образца и поместите его в пробирку.

Приведите в контакт толкатель 3 индикатора удлинения с образцом и зафиксируйте индикатор удлинения винтом 4.

Совместите нулевое деление шкалы индикатора с его стрелкой.

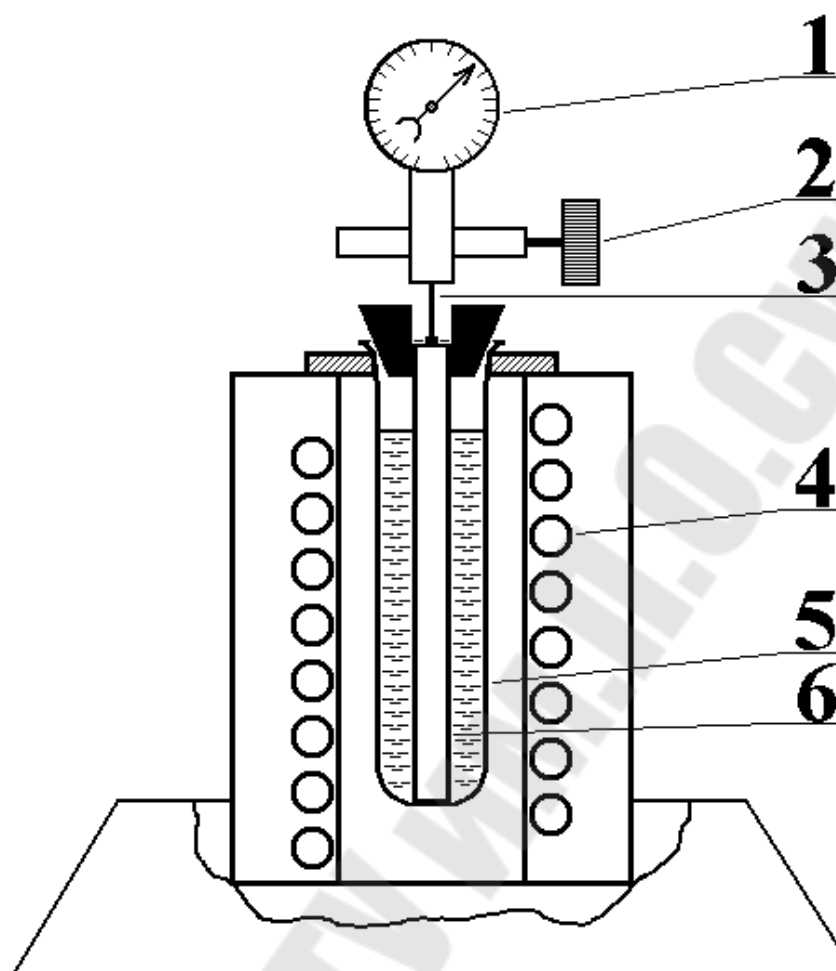


Рисунок 4.3

Включите электронагреватель и, доведя воду в пробирке до кипения  $T_2$ , снимите отсчет  $x$  удлинения образца. После чего выключите нагреватель.

Отпустите винт 4, отклоните индикатор 1 в сторону, выньте пробирку с образцом из печи, замените воду в пробирке водой комнатной температуры и замените образец.

Согласно пунктам 1 - 5 проведите измерения для второго образца.

Занесите в таблицу 4.1 значение погрешностей измерения приращения длины стержня, длины стержня и температуры ( $\Delta x$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta T$ ), считая, что каждая из них равняется половине цены наименьшего деления шкалы соответствующего прибора.

Таблица 1

Образец	L, м	T <sub>1</sub> , К	x, м	T <sub>2</sub> , К	α, К <sup>-1</sup>	$\frac{\Delta L}{L}$	ΔT, К	Δx, м	Δα, К <sup>-1</sup>
1									
Среднее значение									
2									
Среднее значение									

**ПРИМЕЧАНИЕ:** Операции после помещения пробирки с образцом в печь нужно выполнять как можно быстрее, чтобы температура образца не успела повыситься, прежде чем будет установлен нуль на шкале индикатора.

9. Сравните полученные значения с табличными в таблице 4.2 и сделайте выводы относительно их соответствия.

Таблица 4.2 - Свойства некоторых твердых тел

Вещество	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость c, Дж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, λ, кДж/кг	Температурный коэффициент линейного расширения, α · 10 <sup>-5</sup> , К <sup>-1</sup>
Алюминий	659	896	322	2,3
Железо	1530	500	272	1,2
Латунь	900	386	-	1,9
Лед	0	2100	335	-
Медь	1100	395	176	1,6
Олово	232	230	58,6	2,7
Платина	1770	117	113	0,89
Пробка	-	2050	-	-
Свинец	327	126	22,6	2,9
Серебро	960	234	88	1,9
Сталь	1300	460	-	1,06

## Обработка экспериментальных данных

1. Для образца по формуле (4.3) найдите коэффициент линейного теплового расширения  $\alpha$ .

2. Определите среднее значение  $\alpha_{cp}$ :

$$\alpha_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n}.$$

3. Определите абсолютную погрешность отдельного вычисления косвенных измерений:

$$\Delta\alpha_i = \alpha_i \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T_2 - T_1}\right)^2},$$

где  $\Delta x = 10^{-3}$  мм,  $\Delta L = 0,5$  мм,  $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$ .

4. Определите среднее значение абсолютной погрешности:

$$\Delta\alpha_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta\alpha_i}{n}.$$

5. Запишите окончательные результаты измерений в виде:

$$\alpha_{ист} = \alpha_{cp} \pm \Delta\alpha_{cp}.$$

6. Определите относительную погрешность измерения

$$\varepsilon = \frac{\Delta\alpha_{cp}}{\alpha_{cp}} \cdot 100\%.$$

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории.
2. Напишите и объясните формулу связи между средней кинетической энергией молекул и температурой тела.
3. Как строится график потенциальной ямы взаимодействия атомов (молекул)? Изобразите этот график.
4. Пользуясь графиком потенциальной ямы, объясните явление теплового расширения жидкостей и твердых тел.
5. Дайте определение коэффициента линейного теплового расширения твердого тела. В каких единицах он измеряется?
6. Запишите, как зависит длина тела от его температуры?
7. Как коэффициент линейного расширения связан с коэффициентом объемного расширения для изотропных твердых тел?
8. Как с физической точки зрения объяснить увеличение размеров твердого тела при возрастании его температуры?

9. Объясните, что характеризует температура тела?
10. В каких единицах измеряется коэффициент линейного расширения?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 - ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: Изучить порядок испытания твердых диэлектриков на электрическую прочность.

Получить навыки в определении электрической прочности различных материалов.

Краткие теоретические сведения

Электрическая изоляция не может выдерживать приложенного к ней неограниченного высокого напряжения. Если мы будем повышать приложенное к изоляции напряжение, то рано или поздно произойдет пробой изоляции. При этом ток утечки, идущий через изоляцию, чрезвычайно резко возрастает, а сопротивление изоляции соответственно снижается, так что практически получается короткое замыкание между электродами, с помощью которых подведено к изоляции напряжение.

Наибольшее значение напряжения, которое было приложено к изоляции в момент пробоя, называется пробивным напряжением  $U_{пр}$ .

В месте пробоя возникает искра или даже электрическая дуга, которая может вызвать оплавление, обгорание, растрескивание и тому подобные изменения, как диэлектрика, так и электродов. После снятия напряжения в пробитом твердом диэлектрике может быть обнаружен след пробоя, в виде пробитого (откуда и название явления «пробой»), проплавленного, прожженного или т.п. отверстия. При повторном приложении напряжения к ранее подвергавшейся пробую твердой изоляции пробой по месту прежнего пробоя, как правило, происходит при сравнительно низком напряжении. Таким образом, пробой твердой изоляции в электрической машине, аппарате, кабеле и т.п. означает аварию, выводящую данное устройство из строя.

Пробивное напряжение электрической изоляции зависит от ее толщины, т.е. расстояния между электродами  $h$ ; чем толще слой электроизоляционного материала, тем выше пробивное напряжение этого слоя. Однако слои одной и той же толщины, но различных материалов имеют различные значения пробивного напряжения. Это дает основание для введения параметра диэлектрического материала, определяющего его способность противостоять пробую – электрическая прочность.

Электрическая прочность  $E_{пр}$ , МВ/м, определяется пробивным напряжением  $U_{пр}$ , отнесенным к толщине диэлектрика  $h$  в месте пробоя, т.е.

$$E_{пр} = U_{пр}/h$$

В большинстве случаев при возрастании  $h$  величина  $E_{пр}$  уменьшается, т.е. величина  $U_{пр}$  возрастает с увеличением толщины не линейно, а медленнее. Таким образом, тонкослойная изоляция с точки зрения использования ее электрической прочности предпочтительнее толстослойной. Это явление можно объяснить трудностью формирования разряда при малом расстоянии между электродами, так как ударная ионизация затрудняется вследствие малой общей длины пробега свободных зарядов.

Для надежной работы любого электротехнического устройства рабочее напряжение  $U_{раб}$  его изоляции должно быть существенно меньше пробивного напряжения  $U_{пр}$

Коэффициентом запаса электрической прочности изоляции  $K_{зап}$  называют отношение пробивного напряжения к рабочему, т.е.

$$K_{зап} = U_{пр}/U_{раб}$$

При повышении напряженности электрического поля в твердом диэлектрике, также как и в жидком и газообразном, возникают ионизационные процессы, связанные с увеличением сквозного тока, высоковольтной поляризацией, ударной ионизацией, диэлектрическими потерями, нагревом диэлектрика.

По физической сущности развития пробоя различают несколько видов; основные из них: электрический, электротепловой, электромеханический, электрохимический и ионизационный пробой.

Электромеханический - пробой, который может наблюдаться, например, у хрупких материалов в сильно неоднородном электрическом поле; подготавливается механическим разрушением материала (образованием макроскопических трещин) силами электрического поля (давлением электродов).

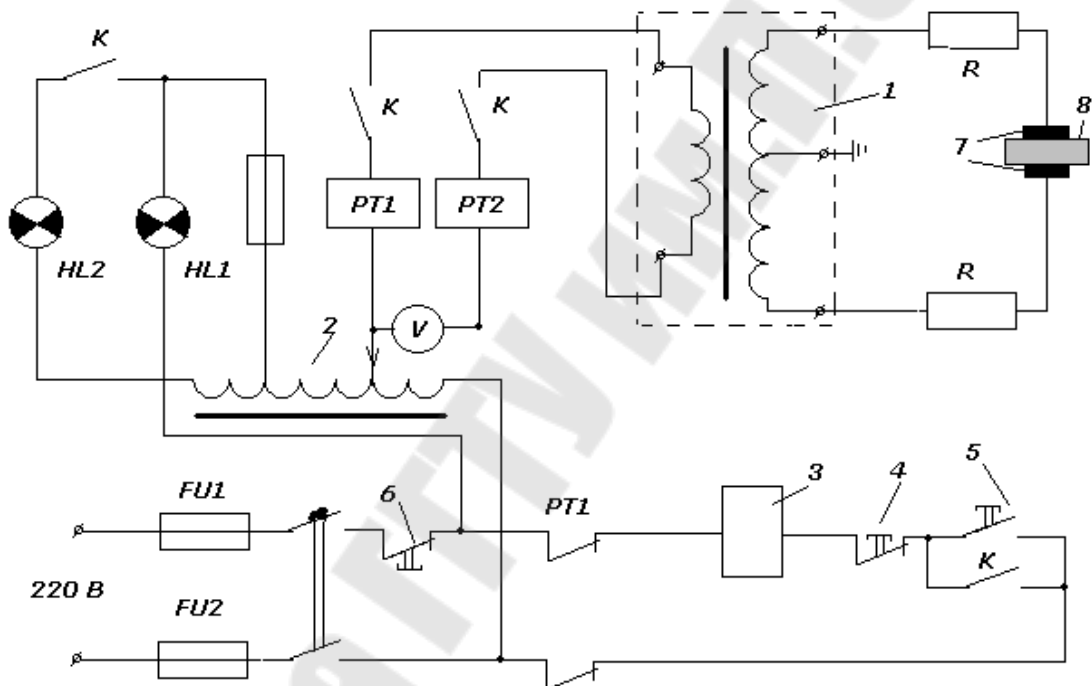
Электрохимический пробой - вид медленно развивающегося пробоя, связанного с химическим изменением материалов в электрическом поле. Такое явление часто называют старением диэлектрика в электрическом поле, поскольку оно приводит к постепенному снижению электрической прочности, заканчивающемуся пробоем при напряженности поля, значительно меньшей пробивного напряжения.

Ионизационный пробой объясняется действием на диэлектрик химически агрессивных веществ, образующих в газовых порах

диэлектрика при частичных разрядах, а также эрозией диэлектрика на границе пор ионами газа.

#### Приборы и оборудование

Для определения электрической прочности твёрдых диэлектриков используется установка переменного тока (рисунок 5.1). Установка питается от сети однофазного переменного тока напряжением 220 В. Высоковольтный однофазный масляный трансформатор 1, создаёт во вторичной обмотке напряжение до 80 кВ.



1 – испытательный трансформатор; 2 – регулировочный трансформатор; 3 – обмотка контактора; 4 – выключатель кнопочный «Стоп»; 5 – выключатель кнопочный «Пуск»; 6 – блок – контакты двери ограждения; 7 – электроды; 8 – испытываемый образец диэлектрика; R – защитное сопротивление; PT1 и PT2 – обмотки и контакты токовых реле; K – замыкающие контакты контактора

Рисунок 5.1 – Принципиальная схема установки переменного тока

Во вторичной обмотке трансформатора 1 включены буферные сопротивления R, которые служат для защиты высоковольтного трансформатора от перегрузки при пробое.

Первичная обмотка высоковольтного трансформатора 1 присоединяется к сети через регулировочный автотрансформатор 2, позволяющий плавно менять напряжение от нуля до максимального значения. Установки имеют реле максимального тока РТ1 и РТ2, контактор 3, блок-контакты 6 двери ограждения. Установки снабжены сигнальными лампами: зелёной НЛ1, загорающейся при включении штепсельной вилки в сеть, и красной НЛ2, загорающейся при включении кнопки 5, сигнализирующей о наличии напряжения на высоковольтной обмотке трансформатора.

Порядок выполнения работы

1) Ознакомиться со схемой испытательной установки.  
 2) Убедиться в исправности блокировки 6, защитного заземления и проверить наличие защитных средств.

3) При выключенном аппарате установить между электродами 7 испытуемый диэлектрик 8. При испытании плоских твердых диэлектриков используются цилиндрические электроды диаметром 50 мм. Образцы испытуемых материалов помещают в горизонтальной плоскости между двумя электродами, причем размеры образцов должны быть больше размера электродов, чтобы избежать поверхностного перекрытия.

4) Проверить положение регулировочного автотрансформатора 2.

5) Включить установку в сеть напряжением 220 В. При этом должна загореться зеленая сигнальная лампа НЛ1.

6) Включить контактор 3 нажатием кнопки «Пуск» 5 и подать напряжение на испытательный трансформатор 1, при этом должна загореться красная сигнальная лампа НЛ2.

7) С помощью регулировочного автотрансформатора 2 изменить напряжение от нуля до пробивного напряжения со скоростью 1 кВ/с. В момент пробоя сработают реле максимального тока РТ1 и РТ2 и установка выключится. Снять емкостной заряд прикосновением к электродам заземляющей штанги.

Пробивные напряжения определяются для одного, двух, трех слоев имеющих диэлектриков.

8) Записать величину напряжения  $U_1$  при пробое диэлектрика в таблице 5.1

Таблица 5.1

Наименование образцов диэлектрика	Число слоев диэлектрика	Измеряются		Вычисляются	
		$U_1$ , В	$h$ , мм	$U_{пр}$ , кВ	$E_{пр}$ , кВ/мм

9) Вывести регулировочной автотрансформатор в нулевое положение и отключить установку нажатием кнопки 4 «Стоп».

Работу проводить в диэлектрических перчатках. После каждого пробоя обязательно разряжать электроды прикосновением к ним заземляющей штанги, выводить ЛАТР в нулевое положение и отключать установку нажатием кнопки 4 «Стоп».

10) Произвести необходимые вычисления.

Пробивное напряжение  $U_{пр}$ , кВ, при каждом пробое определяется по формуле:

$$U_{пр} = K U_1 ,$$

где  $K$  – коэффициент трансформации испытательного трансформатора.

$$K = 85000/220 = 386,4$$

Электрическая прочность  $E_{пр}$ , кВ/мм, определяется по выражению

$$E_{пр} = U_{пр}/h$$

11) Результаты вычислений записать в таблицу 4.1

1. Содержание отчета
2. Цель работы.
3. Схему испытательной установки.
4. Таблицу опытных и вычисленных данных.
5. Выводы.

#### **Контрольные вопросы**

1. Что называется пробоем?
2. Что называется пробивным напряжением?
3. Что называется электрической прочностью диэлектрика?
4. Что называется коэффициентом запаса электрической прочности?
5. Какие вы знаете виды пробоев?
6. Объясните физическую сущность чисто электрического пробоя.
7. То же электротеплового пробоя.
8. То же электромеханического пробоя.
9. Объясните принцип действия установки для определения электрической прочности твердых диэлектриков.

## Литература

1 Электротехнологические промышленные установки / И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич, Н. М. Некрасова и др. – М. : Энергоиздат, 1982. – 400 с.

2 Болотов А. В., Шепель Г. А. Электротехнологические установки. – М. : Высшая школа, 1988. – 336 с.

3 Автоматическое управление электротермическими установками : Учебник для вузов / А. М. Кручинин, К. М. Махмудов, Ю. М. Миронов и др. ; под. ред. А. Д. Свенчанского. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

4 Электротермическое оборудование : Справочник / под общ. ред. А. П. Альтгаузена. – М. : Энергия, 1980. – 487 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 – УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ КАМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

### Цель работы

Изучить устройство и принцип работы камерной электрической печи сопротивления МПЛ-6. Научиться проводить термические операции в печи МПЛ-6.

### Оборудование и материалы

Печь МПЛ-6, штангенциркуль, шлифовальная бумага, изделия или образцы из стали 45.

### Краткое введение

*Определение времени нагрева при закалке стальных деталей*

Общее время нагрева складывается из времени нагрева до заданной температуры ( $\tau_n$ ) и времени выдержки при этой температуре ( $\tau_b$ ). Величину  $\tau_n$  определяют нагревающая способность печи, форма и размеры детали, способ укладки в печи. Величину  $\tau_b$  определяют скорость фазовых превращений и дисперсность исходной структуры.

Нагрев обычно проводится в газовой среде (воздух, топочные газы) в расплавленных солях и металлах.

Время нагрева для углеродистых и малолегированных сталей можно определять пользуясь формулой

$$\tau_n = 0,1 \cdot D_1 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (6.1)$$

где  $D_1$  – размерная характеристика: размер максимального сечения изделия в мм,  $K_1$  – коэффициент среды (при нагреве на воздухе или топочных газах  $K_1 = 2,0$ ; в расплавленных солях  $1,0$  и в расплавленных металлах  $0,5$ ),  $K_2$  – коэффициент формы (для шара –  $1,0$ ; цилиндра –  $2,0$ ; параллелепипеда –  $2,5$ ; пластины –  $4,0$ ),  $K_3$  – коэффициент равномерности нагрева (равномерный нагрев –  $1,0$ ; нагрев изделия, лежащего на поде печи –  $1,5$  и односторонний нагрев –  $4,0$ ).

Формула (6.1) в большей мере справедлива при нагреве до температуры  $800-900^\circ\text{C}$ . Необходимая температура закалки высоколегированных сталей может быть значительно выше этого интервала, кроме того, теплопроводность этих сталей значительно ниже, чем у углеродистых или малолегированных сталей и пользоваться формулой (6.1) в этом случае нельзя.

Время выдержки деталей  $\tau_b$  составляет 20-25% от времени нагрева  $\tau_n$ .

### *Определение времени нагрева и выдержки при отпуске стальных деталей*

Время выдержки деталей в электропечах при отпуске и низкотемпературном отжиге ( $\tau_{н.о}$ ) зависит от температуры отпуска и определяется следующим образом:  $\tau_{н.о} = 10 \text{ мин} + 1 \text{ мин на } 1 \text{ мм}$  условной толщины

### *Устройство и основные конструктивные элементы печи МПЛ-6*

Камерная электрическая печь сопротивления МПЛ-6 предназначена для выполнения термических операций в интервале температур 20-1200°C. Она может использоваться для нагрева металлов и сплавов под закалку, отжига, отпуска, нормализации, спекания порошковых прессовок из металлических и полимерных порошков, предварительного отжига оксидных керамических порошков, выжигания шликера из керамических отливок.

Печь имеет прямоугольное рабочее пространство, стенки, свод и под которого выполнены из шамотных плит. На боковых стенках в продольных пазах размещены электрические нагревательные элементы сопротивления. Обрабатываемые изделия размещаются на плите пода.

Питание на электрические нагреватели подается от сети переменного тока 220 В через тиристорный блок, который управляется программным регулятором температуры. Таким образом, регулятор автоматически поддерживает заданный температурно-временной режим работы печи. Режим задается оператором в виде термической программы перед началом выполнения термической операции.

На рисунок 6.1 представлена электрическая схема электропечи МПЛ-6.

#### **Порядок выполнения работы**

1. В течение 20 минут изучить методические указания, руководства по эксплуатации печи МПЛ-6 и программного регулятора ТП-403.
2. Получить образцы стали для термообработки, измерить их размеры, пользуясь методическими указаниями, диаграммой Fe–C и литературой по металловедению и термической обработке определить температуру и время нагрева, выдержки исследуемых образцов под закалку и температуру и время нагрева и выдержки при отпуске.
3. Ознакомиться с устройством печи МПЛ-6.



4. Составить термическую программу для температурно-временного режима нагрева и выдержки исследуемых образцов под закалку.

5. Ввести термическую программу в регулятор печи, запустить ее выполнение.

6. Наблюдая за текущими показаниями регулятора, через каждые 2 мин записать соответствующие значения температуры. После окончания термической операции по этим данным построить реальный температурно-временной режим.

7. После окончания стадии выдержки закалить образцы в воду.

8. Зачистить образцы шлифовальной шкуркой, определить твердость НРС после закалки.

9. Составить термические программы для температурно-временных режимов нагрева и выдержки, соответствующих низкому, среднему и высокому отпуску исследуемых образцов.

10. Провести последовательно указанные термические операции, измеряя после выполнения каждой твердость НРС.

11. В отчете представить подробные данные о назначении, устройстве и принципе работы печи МПЛ-6 и регулятора ТП-403, соответствующие схемы, температурно-временные режимы выполненных термических операций в виде графиков и термических программ, графики зависимости твердости исследованных образцов от температуры отпуска, подробные выводы. Отчет должен быть оформлен в соответствии со стандартом ТПУ, требования к оформлению размещены на сайте ТПУ.

### **Контрольные вопросы**

1. Является ли печь МПЛ-6 муфельной?

2. Участок нагрева образцов при составлении термической программы линейный. Почему реальный график нагрева нелинейный?

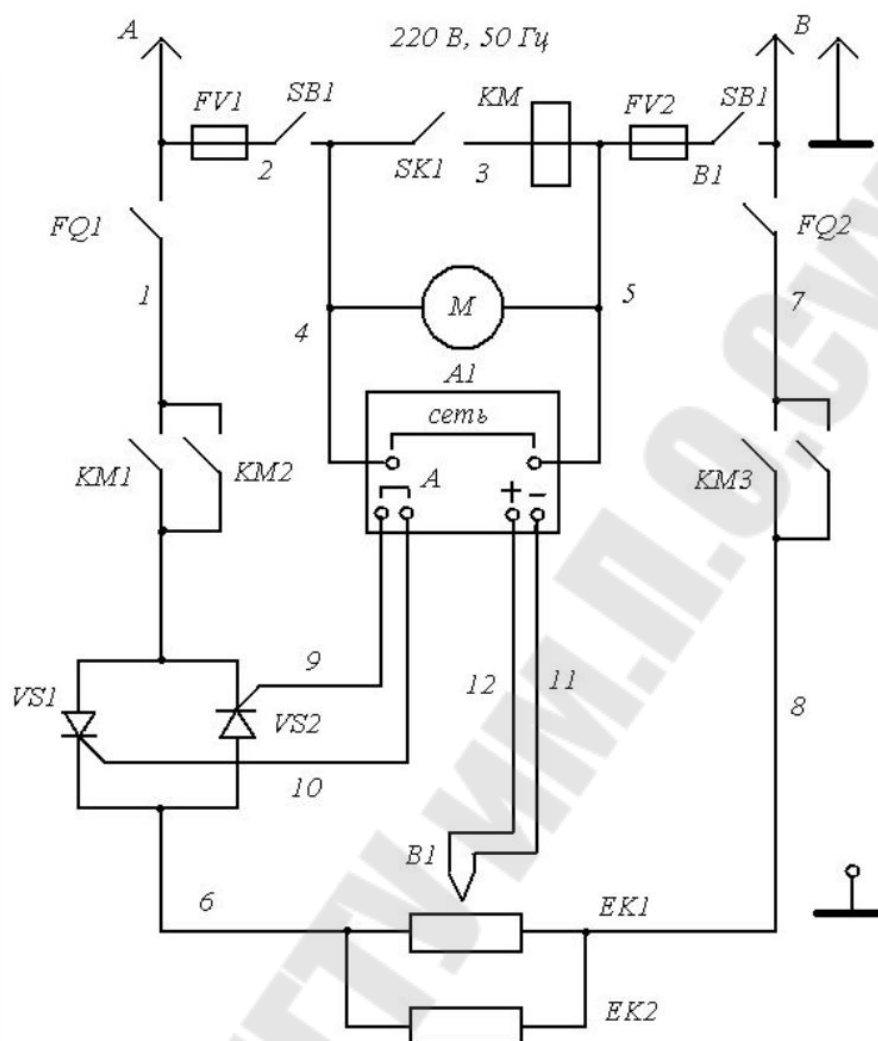


Рисунок 6.1 – Электрическая схема электропечи МПЛ-6.

Обозначение	Наименование	Кол.
A1	Терморегулятор ТП-403	1
M	Вентилятор ВН-2	1
FQ1, FQ2	Автоматический выключатель 40 А	2
FV1, FV2	Предохранитель с вставкой на 1А	2
KM	Пускатель магнитный ПМ 12-010100 на 220 В 50Гц	1
VS1, VS2	Тиристор Т-122-32-8	2
B1	Термопреобразователь ТХА	1
EK1, EK2	Нагреватель 1,2 кВт	2
SK1	Микровыключатель	1
SB1	тумблер	1

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 – УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

## Цель работы

Изучить устройство и принцип работы электрической вакуумной печи СНВЭ-1.3.1/16. Провести в печи спекание прессовок из твердого сплава ВК8 (WC – 92 %, Co – 8 %).

## Оборудование и материалы

Электрическая вакуумная печь сопротивления СНВЭ-1.3.1/16, гидравлический пресс и пресс инструмент, весы, микрометр, порошок твердого сплава ВК8.

## Краткое введение

*Устройство и основные конструктивные элементы печи СНВЭ-1.3.1/16*

Электропечь СНВЭ-1.3.1/16 предназначена для проведения различных термических процессов (отжига, дегазации, спекания и т.п.) в вакууме при температуре до 1600°C и небольших газовыделениях, при которых не происходит взаимодействия среды остаточных газов с нагревателями, теплоизоляцией и других элементов конструкции. Допускается работа в среде нейтральных газов повышенной чистоты при избыточном давлении не более 0,02 МПа (0,2 кгс/см<sup>2</sup>).

Рабочая температура определяется в зависимости от температуры плавления, фазовых превращений обрабатываемого материала, вида термических операций. Электропечь может применяться в электронной, радиотехнической, электротехнической, авиационной и других отраслях промышленности.

В электропечи не рекомендуется:

- а) проводить технологические процессы в углеродосодержащих и окислительных атмосферах, в атмосфере газов технической чистоты;
- б) нагревать угольные и графитовые изделия;
- в) нагревать изделия, содержащие кислоты (или их кислотные остатки), щелочи и др. элементы, вступающие в реакцию с углеродистой или нержавеющей сталью, молибденом и медью.

Рабочая зона электропечи по бокам и с обоих торцов окружена 6-ю W-образными нагревателями из вольфрамового прутка диаметром 6мм, образующими однофазную систему из двух параллельно включенных групп. Отогнутые концы боковых нагревателей проходят через отверстия в экранах и вставляются в отверстия молибденовых переходных втулок, ввернутых в медные пластины токоподводов. Под действием собственного

веса, нагреватель удерживается на месте и между ним и токоподводом образуется электрический точечный контакт. Такой способ установки нагревателей облегчает монтаж и ремонт электропечи. Торцевые нагреватели выполнены поворотными для обеспечения установки садки в камеру. В поднятом положении они фиксируются специальными крючками, установленными на каркасе бокового экрана. Операции загрузки-выгрузки садки могут производиться с обоих торцов камеры нагревательной.

Вакуумная система состоит из:

- а) диффузионного паромасляного насоса Н-250/2500;
- б) механических насосов 2НВР-5ДМ;
- в) вакуумного затвора с электромеханическим приводом;
- г) четырех вакуумных запорных сильфонных вентилях;
- д) двух натекаателей.

Для измерения остаточного давления в электропечи применяется вакуумметр ВИТ-3П, который имеет выходной канал для записи давления. Датчиками вакуумметра являются манометрические преобразователи: термодатчик ПМТ-2 и ионизационный ПМИ-2. Для измерения избыточного давления нейтрального газа на электропечи установлен электроконтактный мановакуумметр ЭКМВ-1У.

Система водоохлаждения электропечи состоит из коллектора, сливной воронки, рубашек водоохлаждения, элементов конструкции электропечи и диффузионного паромасляного насоса. Соединения в системе осуществляются через резино-тканевые шланги, закрепленные на штуцерах элементов системы водоохлаждения бондажами. Система разделена на 3 цепи охлаждения, в каждой из которых водоохлаждаемыми элементами соединены последовательно:

- а) диффузионный паромасляный насос;
- б) охладитель нагревательной камеры и 6 токоподводов;
- в) корпус и крышки нагревательной камеры.

На коллекторе имеются общий запорный вентиль, 3 вентиля цепей охлаждения, манометр для контроля давления воды на входе системы водоохлаждения. На сливной воронке смонтированы 3 реле давления, с помощью которых осуществляется контроль за работой каждой цепи охлаждения, предусмотрены необходимые блокировки и сигнализация о нарушении охлаждения.

Охлаждающая вода должна удовлетворять следующим требованиям:

- а) жесткость – не более 0,5 мг· экв/л;
- б) количество взвешенных веществ – не более 5 мг/л;
- в) окисляемость - не более 10 мг/л;
- г) хлориды - не более 5 мг· экв/л.

Давление охлаждающей воды в подводящей магистрали должно быть не менее 0,25-0,30 МПа (2,5-3,0 кгс/см<sup>2</sup>). Для обеспечения паспортных характеристик диффузионного паромасляного насоса температура воды на входе для охлаждения должна быть не более + 20 °С. Для других узлов электропечи температура может быть и выше, но при любых условиях температура на входе не должна превышать + 45 °С.

На случай аварийного прекращения подачи воды из водопроводной магистрали следует иметь либо питание водой из двух независимых друг от друга источников, либо аварийную емкость. При аварийном прекращении подачи воды охлаждаемые узлы электропечи могут находиться без подачи воды не более 0,1 ч. Подача воды из аварийной емкости обеспечивается в течение 2 ч.

Регулирование теплового режима осуществляется путем изменения подводимого к нагревателям напряжения с помощью тиристорного регулятора напряжения, включенного в первичную обмотку печного трансформатора. Сигнал управления тиристорного регулятора напряжения формируется и подается с микропроцессорного регулирующего прибора ПРОТАР-100.

Работа на электропечи производится в следующей последовательности

- а) подать электропитание на блок управления;
- б) произвести загрузку садки;
- в) произвести вакууммирование камеры до рабочего давления;
- г) подключить нагреватели к системе силового питания;
- д) произвести нагрев садки в соответствии с заданным технологическим режимом;
- е) охладить садку, после чего напустить в камеру воздух;
- ж) произвести выгрузку садки.

Вся контрольно-измерительная аппаратура смонтирована на передней части шкафа управления электропечью. Измерение остаточного давления производится вакуумметром ВИТ-ЗП, датчиками которого являются манометрические преобразователи термометрические ПМТ-2 и ионизационные ПМИ-2, которые установлены на корпусе нагревательной камеры и вакуумного блока. При работе в среде нейтрального газа избыточное давление измеряется манометром ЭКМВ-1У.

Измерение давления воды в подводящей магистрали производится манометром. Температура воды на сливе в коллекторах водоохлаждения измеряется переносным термометром со шкалой до 100°С.

Регулирование температуры в камере нагревательной – ручное и автоматическое (программное). Регулирование и измерение температуры производится с помощью регулирующего микропроцессорного прибора

ПРОТАР-100, работающим в комплекте с вольфрам-рениевой термопарой ВР(А).

На рисунке 7.1 приведена блок-схема вакуумной электропечи.

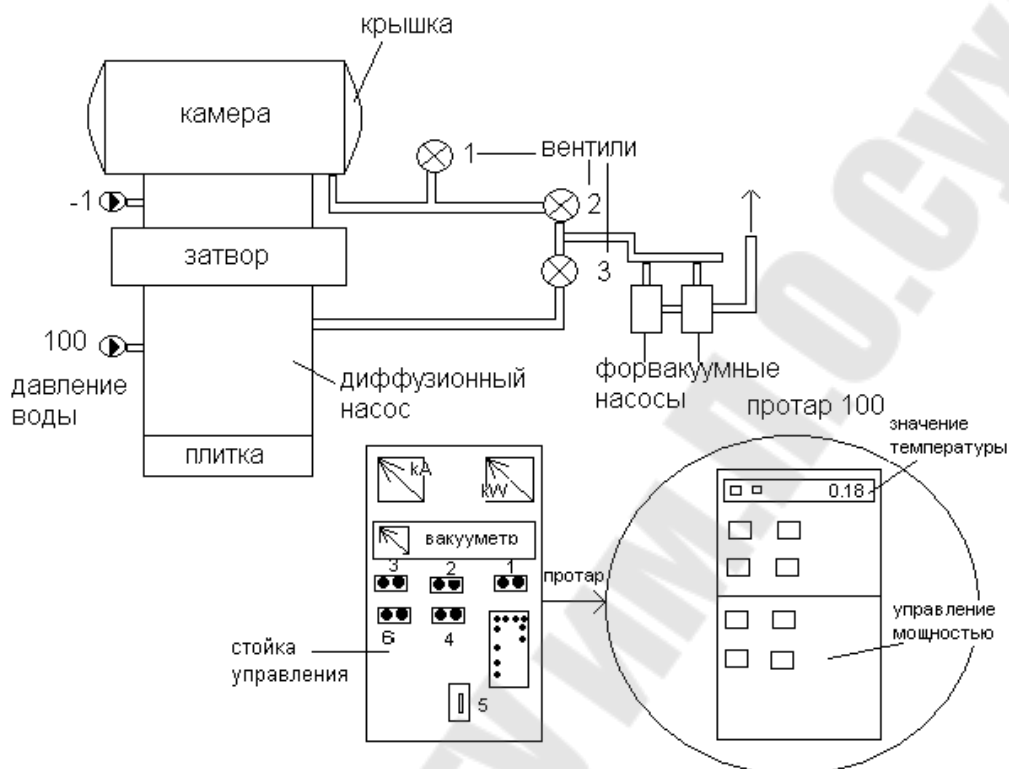


Рисунок 7.1 – Блок-схема вакуумной электропечи

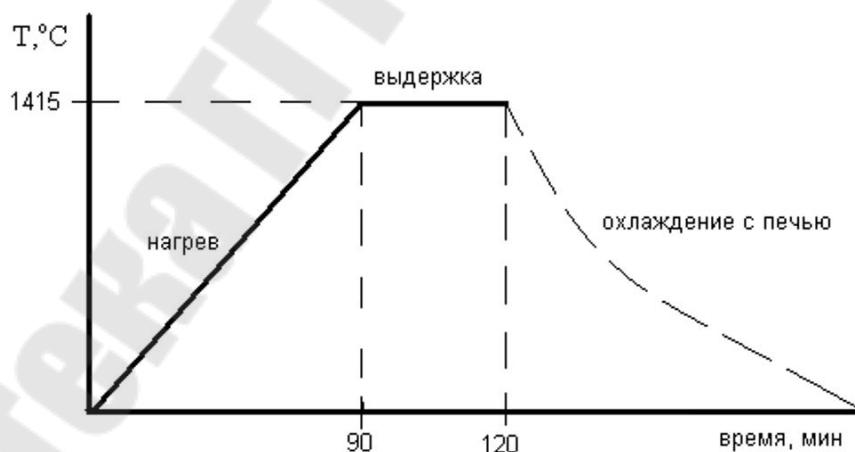


Рисунок 7.2 – Режим спекания прессовок из ВК8

### Порядок выполнения работы

1. В течение 20 минут изучить методические указания, руководства по эксплуатации вакуумной печи СНВЭ-1.3.1/16.
2. Приготовить 4 навески порошка твердого сплава ВК8 массой 8 г, спрессовать образцы.
3. Взвесить прессовки и измерить их высоту и диаметр.

4. Ознакомиться с устройством печи СНВЭ-1.3.1/16.
5. Составить термическую программу для температурно-временного режима спекания исследуемых образцов (рис.2).
6. Включить питание и открыть воду (давление по манометру 2,5-3,0 кгс/см<sup>2</sup>).
7. Открыть вентиль 1 напуска воздуха в камеру.
8. Открыть крышку печи, снять экран, убрать секцию нагревателя, осуществить загрузку. Закрыть крышку печи в обратной последовательности.
9. Закрыть вентиль 1, включить форвакуумные насосы (1, 2 - на стойке управления).
10. Медленно открыть вентиль 2 и следить за показанием манометра предварительной откачки (до 1 ат). Затем следить за давлением по вакуумметру на стойке управления.
11. При достижении давления  $10^{-1}$  мм рт.ст. (черной черты на шкале прибора) открыть вентиль 3, закрыть вентиль 2.
12. Включить дифнасос (кнопка 3 на стойке управления), открыть затвор (кн. 4 на стойке).
13. Примерно через 40 мин насос выйдет на режим (нагреется плитка) и стрелка вакуумметра отклонится до конца вправо (до 10 делений, что соответствует давлению не выше  $10^{-4}$  мм рт. ст.).
14. Включить нагрев. Тумблер 5 на стойке управления вверх, нажать кнопку 6 пуск на стойке.
15. Управляя мощностью (на Протаре стрелки в нижнем правом углу), провести термический режим. Время нагрева до 1415°C – 1,5 часа. Выдержка 30 мин.
16. Отключить тумблер 5 на стойке.
17. При достижении температуры примерно 400°C отключить дифнасос (кн. 3 на стойке).
18. Примерно через 1 час плитка остынет (стрелка на вакуумметре упадет до 4-5 делений). Если температура печи ниже 100°C закрыть затвор дифнасоса (кн. 4 на стойке), закрыть вентиль 3.
19. Отключить форнасосы (кн. 1.2 – на стойке).
20. Напустить воздух в камеру и далее как в пункте 3.
21. Закрыть воду, включить питание.
22. Выгрузить спеченные образцы, измерить их высоту и диаметр, взвесить, определить твердость HRA.
23. Рассчитать усадку и плотность образцов, изготовить микрошлифы, провести металлографический анализ.
24. В отчете представить подробные данные о назначении, устройстве и принципе работы печи СНВЭ-1.3.1/16, соответствующие

схемы, температурно-временные режимы выполненных термических операций в виде графиков и термических программ, экспериментальные и расчетные данные по физико-механическим свойствам спеченных образцов, фотографии микроструктур, подробные выводы. Отчет должен быть оформлен в соответствии со стандартом ТПУ, требования к оформлению размещены на сайте ТПУ.

**Контрольные вопросы**

1. Возможно ли использовать вакуумную печь СНВЭ-1.3.1/16 для нагрева стальных изделий под закалку?
2. Объясните назначение форвакуумных насосов.
3. К какому типу регуляторов относится прибор «ПРОТАР»?



# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 (ЧАСТЬ I) – УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕ

## Цель работы

Изучить устройство и принцип работы установки для обработки материалов в плазме тлеющего газового разряда, провести режим плазменного азотирования изделий из стали 40Х, ХЗ8МЮА, пресс-инструмента из стали Х12

## Краткое теоретическое введение

Химико-термическая обработка (ХТО) – процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали. Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой, газообразной, плазменной), в которой осуществляется нагрев.

В результате изменения химического состава поверхностного слоя изменяются его фазовый состав и микроструктура. Основными параметрами химико-термической обработки являются температура нагрева и продолжительность выдержки.

В основе любой разновидности химико-термической обработки лежат процессы *диссоциации, адсорбции, диффузии*.

*Диссоциация* – получение насыщающего элемента в активированном атомарном или ионизированном состоянии в результате химических реакций, а также испарения. Например,



*Адсорбция* – захват поверхностью детали атомов насыщающего элемента. Адсорбция – всегда экзотермический процесс, приводящий к уменьшению свободной энергии.

*Диффузия* – перемещение адсорбированных атомов вглубь изделия.

Для осуществления процессов адсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения.

Химико-термическая обработка является основным способом поверхностного упрочнения деталей.

Основными разновидностями химико-термической обработки являются:

- цементация (насыщение поверхностного слоя углеродом);
- азотирование (насыщение поверхностного слоя азотом);

- нитроцементация или цианирование (насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом);
- диффузионная металлизация (насыщение поверхностного слоя различными металлами).

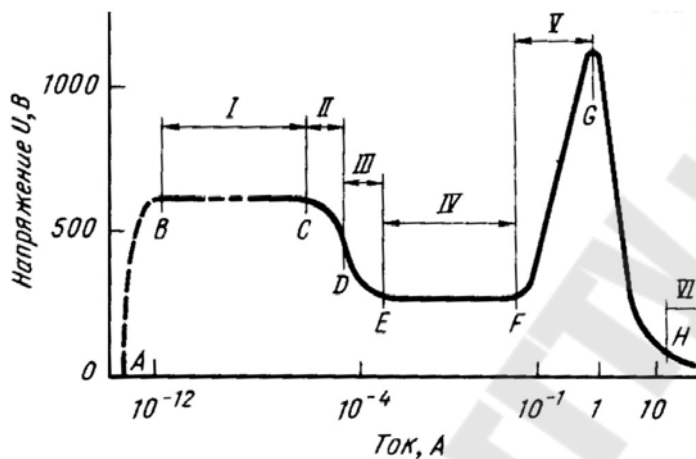
#### *Основы тлеющего разряда*

При нормальных условиях газы являются непроводниками, т.е. число свободных носителей заряда столь мало, что электрический заряд не переносится. При очень высоких напряжениях (молния) или в условиях вакуума (тлеющий разряд) эти изоляционные свойства могут измениться; первоначально непроводящий газ превращается в частично ионизированную электрически проводящую плазму. На рисунок 8.1 показаны возможные с физической точки зрения состояния газа.

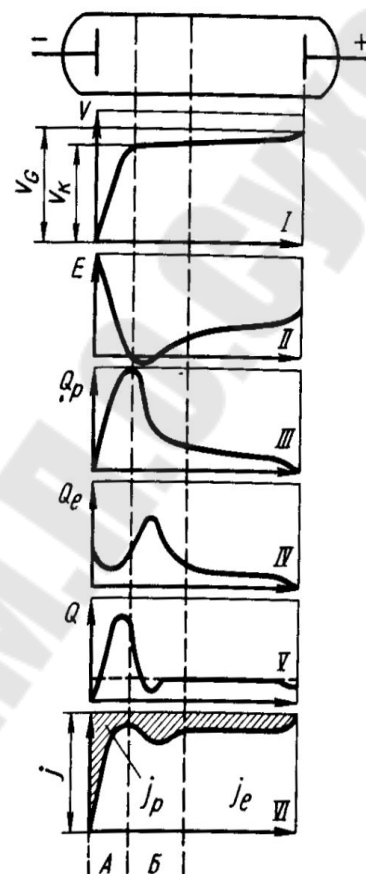
В области  $F - G$  вольтамперная характеристика положительна. Эта область "сильноточного" (повышенной плотности тока) тлеющего разряда, используемого для плазменного азотирования. Эта форма разряда метастабильна и под действием внешних факторов может трансформироваться в нежелательную стабильную форму – электрическую дугу. В случае образования дуги она гасится с помощью быстродействующего выключателя, благодаря чему не возникает опасности повреждения поверхности обрабатываемой детали.

Плазменное азотирование осуществляется с помощью данной метастабильной формы разряда. За счет энергии ионов газа, бомбардирующих поверхность, детали нагреваются до температуры азотирования при одновременной диффузии в их поверхность азота.

В случае приложения выпрямленного напряжения образуются зависящие от места возникновения потенциалы и пространственные заряды (рис. 2). Рассмотрение изменения напряжения в пространстве между катодом и анодом показывает, что напряжение вследствие большой разницы масс электронов и ионов сначала остается приблизительно постоянным (т.е. не зависит от расстояния «катод – анод»), и только вблизи поверхности катода начинает снижаться. Этот спад напряжения – так называемое катодное падение напряжения – обусловлен интенсивной ионной бомбардировкой катода и позволяет использовать плазму тлеющего разряда для обработки поверхности. Все важные процессы в плазме, такие как возбуждение, диссоциация, ионизация, а также рекомбинация, происходят в этой области. Возбужденные атомы и молекулы излучают кванты света, и в области катодного падения напряжения перед поверхностью детали наблюдается свечение тлеющей кромки. Тлеющая кромка принимает форму контура детали, что имеет определяющее значение для промышленного применения этого способа.



**Рисунок 8.1** – Вольтамперная характеристика различных форм газового разряда (среда – неон, давление 133 Па: *I* – разряд Таундсена; *II* – коронный разряд; *III*, *IV*, *V* – субнормальный, нормальный, аномальный тлеющий разряд соответственно; *VI* – дуговой разряд



**Рисунок 8.2** – Характеристика тлеющего разряда: *I* – кривая напряжения; *II* – электрическое поле; *III* – положительный пространственный заряд; *IV* – отрицательный пространственный заряд; *V* – суммарное распределение заряда; *VI* – плотность тока (положительные  $j_p$  и отрицательные  $j_e$  носители заряда); *A* – катодное падение напряжения; *B* – отрицательная область тлеющего разряда

Реакции плазмы на поверхности детали были длительное время неизвестны. Первое удовлетворительное объяснение дал Кёльбель: «реактивное распыление катода». Другое объяснение приводит Худис,

постулирующий внедрение (диффузию) азота из азотводородных радикалов. Согласно Кельбелю, происходящие при возникновении ионов газа на поверхности катода процессы можно подразделить следующим образом:

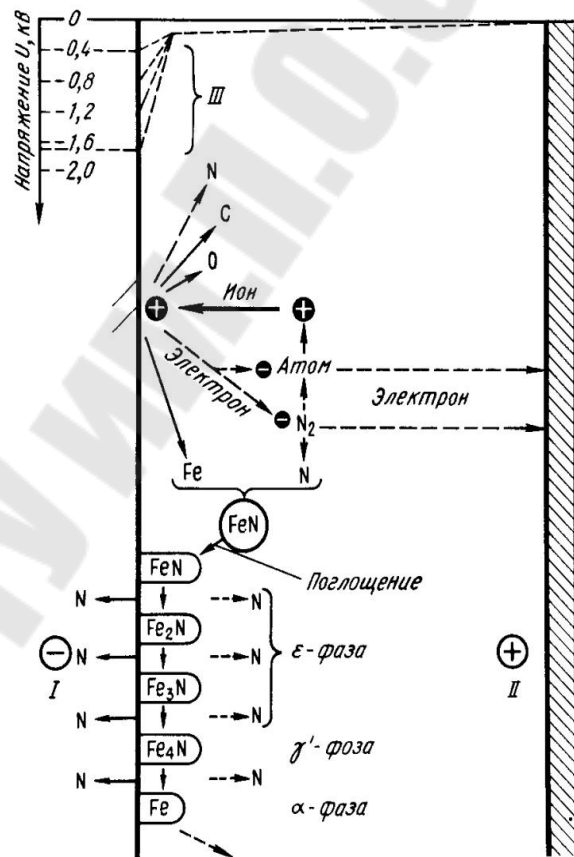
- эмиссия электронов;
- вырывание атомов из поверхности (*Sputtering* – испарение);
- внедрение (диффузия) ионов в поверхностный слой детали;
- отдача кинетической энергии поверхности: нагрев детали.

На рисунке 8.3 представлены определяющие процесс реакции. В нескольких миллиметрах от поверхности детали ионы, ускоренные в области падения катодного потенциала, с относительно высокой кинетической энергией попадают на поверхность детали. При этом до 90 % энергии ионов превращается в тепловую энергию. Таким образом, плазма нагревает деталь до требуемой температуры азотирования. Количество подведенной энергии можно регулировать с помощью внешнего источника электрической энергии. Благодаря этому отпадает необходимость в дополнительном источнике тепла.

Значительно меньшая часть кинетической энергии ионов требуется для вырывания атомов из кристаллической решетки.

Испарению с поверхности могут подвергаться как металлические элементы, например железо, так и неметаллические, например углерод, кислород, азот и другие.

Непосредственный массоперенос азота из плазмы в поверхностный слой металла, если он вообще происходит, очень незначителен и возможен лишь путем непосредственного внедрения его ионов. Согласно



*I* – деталь (катод); *II* – анод;  
*III* – изменение энергии ионов  
 Рисунок 8.3 - Процессы на поверхности при плазменном азотировании.

Кельбелю, диффузия азота эффективна только в сочетании с вышеописанным процессом испарения атомов железа.

Азот в плазме находится в атомарном состоянии и в этой форме химически очень активен. Перед поверхностью катода происходит образование обогащенных азотом нитридов железа. Молекулы FeN конденсируются на поверхности детали и диссоциируют, так как при температурах азотирования нестойки и образуют нитриды железа низшего порядка Fe<sub>2</sub>N, Fe<sub>3</sub>N и Fe<sub>4</sub>N. Выделяющийся при этом азот диффундирует в деталь или, испаряясь, возвращается в плазму.

Азотирование в плазме тлеющего разряда, таким образом, характеризуется комбинированным процессом испарения – осаждения. Подобное взаимодействие распространяется не только на нитриды, но и на карбиды и карбонитриды.

Уже через несколько минут после начала процесса образуются взаимосвязанные нитридные слои, в результате чего на поверхности очень быстро появляется избыток азота. Возникает высокий градиент концентрации азота, оказывающий положительное влияние на диффузию.

Быстрое образование взаимосвязанных нитридных фаз железа, приводит к тому, что азот диффундирует как вдоль границ зерен, так и в самих зернах. Кроме того, регулируемое испарение углерода из поверхностного слоя, а также его последующая диффузия преимущественно вдоль границ зерен приводит к тому, что в этой области не образуется или образуется лишь очень мало карбонитридов, благодаря чему вязкость подвергнутого плазменному азотированию поверхностного слоя повышается.

Из приведенных сведений о реакциях плазменного азотирования следует, что температура не оказывает влияния на механизм диффузии. Содержание азота при 400 °С зависит от тех же параметров, что и при 500 или 600 °С. Отсюда ясно, что температурный диапазон очень велик и ограничивается лишь физико-химическими процессами в металле. Так, например, диффузия азота при температуре ниже 350 °С хотя и чрезвычайно слабая, но позволяет получать азотированные слои, пусть и небольшой толщины.

Азотирование в плазме тлеющего разряда в диапазоне температур 400-500 °С, обеспечивает сохранение высокой прочности сердцевины обрабатываемых деталей. Кроме того, при низкотемпературной обработке достигается очень высокая стабильность размеров и формы при сильном упрочнении поверхностного слоя.

В случае обработки при 450 °С твердость поверхности примерно на 150 HV выше. Если, например, построить зависимость твердости

поверхности HV от температуры плазменного азотирования, то (при условии одинаковой толщины азотированного слоя) при понижении температуры азотирования наблюдается рост твердости поверхностного слоя.

Причиной более высокой твердости являются выделившиеся в перлите при низких температурах в большом количестве и тонко распределенные сложные нитриды. Также установлено, что меньший износ образцов соответствует более низким температурам азотирования.

Низкотемпературное плазменное азотирование приобрело большое значение при обработке таких сталей, которые обычно подвергают отпуску при температуре  $\sim 500$  °С или с учетом возможностей плазменного азотирования в порядке исключения отпускают при температурах  $\sim 500$  °С. Плазменное азотирование при температурах ниже 500 °С в настоящее время приобрело решающее значение для инструментов и деталей машин из инструментальных легированных сталей для холодной обработки, быстрорежущих и мартенситно-старееющих сталей, так как значительно повышает их эксплуатационные свойства. Часто очень высокая твердость сердцевины, превышающая HRC 60, после плазменного азотирования полностью сохраняется. Кроме того, существенно повышается твердость поверхности.

Большая часть подвергаемых в настоящее время плазменному азотированию деталей обрабатывается в интервале температур от 500 до 550 °С. Получаемые при этом азотированные слои в основном определяются термической обработкой, составом легирующих элементов, а также требуемой толщиной слоя соединений или глубиной диффузии азота.

Общего правила при выборе температуры азотирования нет, однако можно руководствоваться следующими рекомендациями: Если коробление детали должно быть минимальным ( $< 0,05$  мм/м), то при условии оптимального отжига для снятия напряжений азотирование сталей, а в особых случаях и чугунов следует проводить при 500 - 520 °С. Если длительность обработки не слишком велика (например,  $< 16$  ч), то обусловленное азотированием увеличение объема ("припухание"), представляющее собой меру изменения размеров, может быть ограничено величиной по крайней мере не меньше чем 10 мкм (азотируемая поверхность).

Если требования к точности размеров не столь жестки, то плазменное азотирование следует проводить при 520 - 540 °С, что диктуется, например, соображениями экономики.

Для чугунов можно рекомендовать температурный интервал 550 - 580 °С, так как в данном случае, как правило, на первом плане стоит

толщина слоя соединений. Как известно, толщина особенно нитридного  $\varepsilon$ -слоя по мере повышения температуры азотирования возрастает ( $\geq 10$  мкм при температурах выше  $570^\circ\text{C}$ ).

Высоколегированные стали следует азотировать также при температурах выше  $550^\circ\text{C}$ .

Из литературы известно лишь немного сведений об азотировании при температурах выше  $590^\circ\text{C}$ . С одной стороны, это связано с тем, что азотирование при низких температурах дает целый ряд преимуществ, когда при сохранении высокой прочности сердцевины достигается повышение твердости поверхностного слоя, обеспечивается высокая стабильность размеров, но, с другой стороны, при температурах выше  $590^\circ\text{C}$  при определенных условиях образуется азотистый перлит (браунит), который может ухудшить свойства деталей, подвергаемых высоким механическим нагрузкам.

Феррито-аустенитное превращение сталей, легированных элементами, которые сужают  $\gamma$ -область, смещено в сторону более высоких температур. Благодаря этому плазменное азотирование таких сталей можно проводить при температурах выше  $590^\circ\text{C}$ , не опасаясь образования браунита, в отличие, например, от коррозионностойких или аустенитных сталей. При обычных температурах азотирования твердость поверхности этих высоколегированных сталей очень высока ( $> 1100$  HV), что дает известные преимущества при определенных нагрузках, например, при абразивном износе.

С этой высокой твердостью поверхности связана известная хрупкость, которая может отрицательно сказываться при динамических нагрузках. Поэтому в случае подвергаемых таким нагрузкам деталей стремятся получить азотированный слой без слоя соединений. Если одного сокращения содержания азота в плазме недостаточно для подавления образования этого слоя, то с помощью высокотемпературной обработки можно настолько снизить обусловленную им хрупкость, что подвергнутые такой обработке детали смогут выдерживать высокие динамические нагрузки. Кроме того, по сравнению с обработкой при обычных температурах в случае плазменного азотирования при температурах выше  $590^\circ\text{C}$  наблюдается значительное увеличение глубины диффузии азота.

В настоящее время длительность плазменного азотирования колеблется в интервале от 10 мин до 48 ч; в исключительных случаях обработка проводится в течение 60 ч и более. Выбор оптимальной длительности обработки всегда следует ставить в зависимость от температуры для достижения определенной глубины азотирования. Содержание легирующих элементов также оказывает влияние на

глубину азотирования, достижимую в течение заданного времени обработки.

#### *Установки плазменного азотирования*

На установках плазменного азотирования можно проводить как азотирование, так и карбонитрирование. Они включают в себя следующие узлы (рисунок 8.4): вакуумную печь 1, блок питания вакуумной печи 2, микропроцессорный блок управления технологическим процессом 3, систему газообеспечения 4 для подготовки и подачи необходимых газовых смесей; систему откачки 5 для создания и поддержания в процессе обработки детали 6 необходимого разрежения.

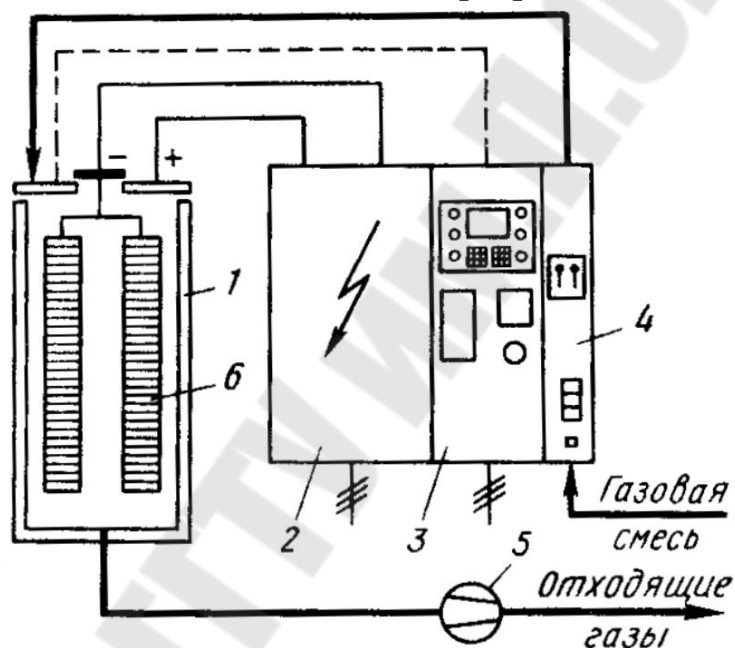


Рисунок 8.4 – Схема установки для плазменного азотирования

Печь для плазменного азотирования является вакуумной и в ней обычно отсутствуют нагревательные элементы, поскольку нагрев азотируемой детали осуществляется за счет ионной бомбардировки ее поверхности. Загружаемая в печь садка является катодом, а стенка печи – анодом. Таким образом, полезный объем печи благодаря отсутствию дополнительных приспособлений практически равен ее фактическому объему. Размеры и форма вакуумной печи согласуются с соответствующими параметрами обрабатываемых деталей. Хорошо зарекомендовали себя шахтные, колпаковые и комбинированные печи полезным диаметром 750 - 1250 и 2000 мм, оснастка которых может быть разной.

Шахтные печи рассчитаны на обработку длинномерных деталей, таких как шнеки, цилиндры и т.д., но могут быть использованы и для обработки серий деталей при оснащении печей сменными загрузочными приспособлениями. В колпаковой печи детали преимущественно



обрабатывают в вертикальном положении. И в этом случае при обработке больших серий деталей хорошо зарекомендовали себя сменные загрузочные приспособления.

Комбинированные печи применяются в случае часто меняющихся вертикального или подвешенного положений обрабатываемых деталей. Следует отметить, что путем использования дополнительных корпусных секций, например от соседних аналогичных печей, можно значительно варьировать высоту.

Для создания тлеющего разряда на поверхности детали можно использовать переменный трехфазный и постоянный ток. При этом, в отличие от постоянного тока, в случае использования переменного тока в печи должна размещаться в соответствии с фазами напряжения. При выпрямлении тока во избежание дугового разряда необходима система аварийного отключения. Использование современных электронных систем аварийного отключения дает возможность применять постоянный ток. Мощность блоков питания рассчитывается в соответствии с габаритами печных агрегатов и в настоящее время составляет от 20 до 450 кВА. Особое значение для обеспечения безопасности работы установок плазменного азотирования придается передаче необходимой мощности на обрабатываемые детали через систему изоляторов, исключающую возможность короткого замыкания даже при напряжениях до 1000 В.

Блок управления осуществляет регулировку и контроль за всем процессом плазменного азотирования. Регулируются температура деталей (с помощью термопар или специальных оптических пирометров), состав газовой смеси в плазме, а с помощью давления в печи - и ширина светящейся зоны.

*Вакуумная система и система газоснабжения* установки плазменного азотирования Вакуумная система служит для создания важного для осуществления процесса плазменного азотирования разрежения, причем для этого вполне достаточно форвакуумных насосов, обеспечивающих конечное давление 1 Па. В течение всего процесса азотирования давление регулируется путем поддержания небольшого расхода азотсодержащего газа. Для получения газовой среды, в которой проводится азотирование, либо смешивают соответствующие баллонные газы, либо подводят смесь из специальных газосмесительных установок. Расход газа составляет лишь несколько литров в час, вследствие чего нет необходимости в специальных газгольдерах. Простым способом получения смеси, состоящей из 25 %  $N_2$  и 75 %  $H_2$ , является диссоциация аммиака в печи для крекинга при 1000 °С. Регулирования состава атмосферы печи не требуется.

Процесс плазменного азотирования не отличается от других процессов азотирования и включает следующие операции: 1) очистка деталей; 2) загрузка печи; 3) откачка и нагрев; 4) азотирование или карбонитрирование; 5) охлаждение деталей в вакууме или в среде защитного газа; 6) выгрузка деталей из печи. На поверхности деталей не должно быть органических пленок (жировых, масляных), остатков краски и т.д. Так как газоотделение из неочищенных пустот может оказывать отрицательное влияние на стабильность тлеющего разряда при нагреве (и при определенных условиях привести к увеличению продолжительности нагрева), очистку следует проводить очень тщательно.

В печи для плазменного азотирования детали могут находиться как в вертикальном, так и в подвешенном положении, причем они автоматически, через загрузочную плиту соединяются с отрицательным полюсом (катодом) блока питания. При загрузке деталей необходимо учитывать, что поверхности, на которые устанавливаются и с которыми контактируют детали, не должны давать зоны свечения, т.е. после азотирования эти поверхности должны оставаться мягкими.

При обработке больших серий деталей рекомендуется для повышения коэффициента использования печи предварительно устанавливать подлежащие обработке детали на расположенное вне печи загрузочное приспособление. Это позволяет производить быструю смену садок.

После включения и откачки печи до давления, например, 10 Па поддерживается тлеющий разряд. Предварительно на пульте управления должны быть заданы все параметры процесса, такие как температура, длительность, тип газа, давление. Процесс обработки начинается с очистки, при которой в результате испарения, обусловленного ионной бомбардировкой, с поверхности детали удаляются всегда имеющиеся на ней загрязняющие примеси. Затем садку нагревают посредством тлеющего разряда.

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить устройство и принцип работы установки, зарисовать блок-схему.
2. Назначить термический режим азотирования детали, используя литературу.
3. Поместить обрабатываемое изделие в камеру, провести согласно термической программе процесс азотирования.
4. Изготовить микрошлиф.
5. Измерить микротвердость азотированного слоя через каждые 10 мкм от поверхности в глубину.

6. Построить графики распределения микротвердости по толщине азотированного слоя.

7. Результаты представить в виде схем, графиков, микрофотографий и подробных выводов.

#### **Контрольные вопросы**

1. В чем суть процесса плазменного нагрева.
2. Схема управления процессом.
3. Достоинства и недостатки технологического процесса.
4. Способы интенсификации методов обработки в металлургических печах.
5. Способы создания вакуума в металлургии.
6. Оборудование для создания плазмы в промышленных печах.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 (ЧАСТЬ II) – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ РАЗГОНА НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

**Цель работы:** провести экспериментальное определение кривой разгона нагревательной печи и по полученным данным рассчитать основные характеристики динамики объекта регулирования (нагревательной печи).

Автоматизация процессов литья является одним из самых эффективных путей повышения производительности труда и качества отливок, а также улучшения условий труда рабочих, занятых в литейном производстве. Однако решение этой задачи затруднено в связи с недостатком информации по вопросам статики и динамики объектов автоматизации, выбора средств измерения параметров процессов, агрегатов, устройств и т.д. В литейном производстве указанные трудности определяются многообразием и сложностью технологических процессов, отсутствием математических описаний объектов и датчиков для измерения переменных величин.

Задачей лабораторной работы является знакомство с основными характеристиками динамики объекта регулирования и экспериментальное определение некоторых из них на основе анализа кривой разгона нагревательной печи.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проектирование автоматической системы управления должно начинаться с изучения объекта с целью установления его связей. В общем виде эти связи могут быть представлены четырьмя группами переменных:

- управляющие воздействия (входные переменные) –  $X=X_1, X_2, \dots, X_n$ , которые зависят от внешней среды, оказывают наиболее существенное влияние на технологический процесс и используются для целенаправленного изменения протекания процесса. В литейном производстве к управляющим воздействиям относятся положение регулирующих заслонок в воздуховодах дутья вагранок, температура заливки и усилие прессования при формировании кристаллического строения отливок при литье под давлением и т.д.

- выходные переменные –  $Y=Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ . Эти переменные являются выходом объекта, характеризующим состоянием объекта и определяющим качественные показатели продукта. Например, геометрическая точность и качество поверхности отливок, плотность и

неравномерность уплотнения форм и стержней, точность дозирования металла и т.д.

- контролируемые возмущающие: воздействия  $-H=h_1, h_2 \dots h_n$ . К ним относятся измеряемые переменные зависящие от внешней среды и влияющие на протекание процесса. Например, качество исходных литейных материалов. Для контролируемых возмущающих воздействий задаются ограничения по условиям технологии.

- неконтролируемые возмущающие воздействия -  $F=f_1, f_2, f_3 \dots f_n$ , которые не могут быть изменены по тем или иным причинам (например, из-за отсутствия датчиков), но оказывающие влияние на выходные параметры. К ним относятся изменения технологических характеристик литейного оборудования в результате износа, колебания качества исходных шихтовых материалов и т.д.

Часто в литейном производстве не представляется возможным дать обоснованные и однозначные суждения о характере зависимости между отдельными, переменными технологическими процессами из-за объективных трудностей, связанных со сложностью расчетов массо - и теплопереноса. В этих случаях при автоматизации используют прием, который заключается в представлении объекта в виде "черного ящика". При этом исследуют только внешние связи, внутреннюю структуру системы не учитывают, т.е. изучают, что делает объект, а не как он функционирует. Поведение, объекта определяют по реакции выходных величин на изменение: входных. Такие Методы исследования объектов автоматизации называются экспериментальными. Они позволяют при минимальных сведениях о сущности протекающих процессов сравнительно просто и быстро с приемлемой, для практики точностью получить, математическое описание объекта.

Экспериментальные методы исследования автоматических систем делятся на активные и пассивные.

Активные методы заключаются в следующем: определяет главные параметры, устанавливают дискретный ряд изменения главных параметров объекта в пределах установленного дискретного ряда, фиксируют все изменения выходов и статистически обрабатывают полученные результаты

Пассивные методы основаны на использовании информации, полученной от действующего объекта в процессе его нормальной эксплуатации, при этом не применяют специальных возмущающих воздействий. Пассивные эксперименты удобны для воздействия и исследования промышленных объектов - устойчивых объектов, в которых происходят непрерывные технологические процессы.

Объекты регулирования характеризуются тем, что через них непрерывно протекает вещество или энергия. Количество вещества или энергии, протекающее через объект или отбираемое от объекта, называется нагрузкой. Изменение нагрузки приводит к изменению регулируемого параметра.

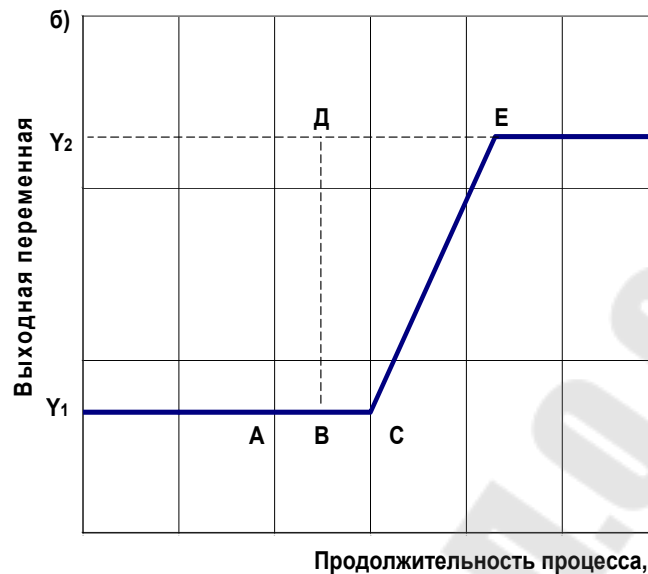
Важной характеристикой автоматической системы является емкость объекта - количество вещества или энергии, содержащееся в нем в конкретный момент времени. Для количественной оценки емкостных свойств объекта введено понятие коэффициента емкости, который численно равен значению входного воздействия, необходимого для изменения значения выходного параметра на единицу. Коэффициент емкости характеризует инертность процесса, и чем он больше, тем объект менее чувствителен к воздействию, т.е. меньше меняется его выходная координата при том же воздействии.

Для полного описания объекта автоматизации необходимо знание его статических и динамических характеристик. Статическая характеристика в математической или графической форме выражает зависимость выходных параметров от входных в установившемся режиме, т.е. когда скорости изменения входных и выходных параметров равны нулю:

$$\frac{dx}{dt} = 0 \quad \frac{dy}{dt} = 0$$

Главной особенностью статической характеристики следует считать ее неизменность во времени для статических звеньев. К статическим характеристикам относятся коэффициенты усиления, управления, зона нечувствительности, порог чувствительности и другие. Например, статическая характеристика весовых дозаторов литейных материалов имеет вид:

$$h = k \cdot m$$



**Рисунок 8.1 – Изменение управляющего воздействия**

На практике для управления объектом используют не статические характеристики, а их отклонение от установившихся значений. Изменения этих отклонений называют переходными процессами и описывают дифференциальными уравнениями динамики объекта: динамическими характеристиками.

Важной характеристикой динамических свойств объекта является кривая разгона, которая представляет собой графическое, изображение реакции исследуемого объекта на ступенчатое изменение входного сигнала при нулевых начальных условиях (Рисунок 8.1). Кривая разгона одноемкостного объекта приведена на рисунке 8.2.

Кривые разгона, полученные в результате испытаний объекта автоматического регулирования, дают лишь косвенные представления о его динамических свойствах. Для расчета и анализа систем автоматического регулирования необходимо найти аналитические выражения, соответствующие экспериментальным кривым. При этом наиболее целесообразно получить линейное дифференциальное уравнение невысокого порядка с постоянными коэффициентами, решение которого с достаточной точностью совпадает с опытной кривой. Такая операция называется приближением или аппроксимацией.

Большое количество объектов регулирования могут точно или с некоторым приближением обладать двумя параметрами, связанными функционально одним уравнением. Такие объекты называются

одноемкостными. Дифференциальное уравнение такого объекта имеет вид:

$$F_0 \frac{dy}{dt} + \Delta y = k \cdot \Delta x,$$

Где  $F_0$  – постоянная времени объекта

$K$  – коэффициент усиления объекта

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз изменение регулируемого параметра будет больше изменения входного воздействия.

$$k = \frac{\Delta y_{\max}}{\Delta x}$$

Где  $y_{\max} = (y_2 - y_1)$  – максимальное изменение регулируемого параметра  
В безразмерном выражении эта зависимость имеет вид:

$$k = \frac{\Delta y_{\max} / y_1}{\Delta x / x_1} = \frac{\varphi}{\mu}$$

Величина  $\rho = 1/k$  называется коэффициентом самовыравнивания (коэффициент статизма, неравномерности).

При протекании любого процесса всегда возможны какие-либо возмущения, для устранения и компенсации которых требуется некоторое время. За период своего действия эти возмущения, пусть даже очень кратковременные, вызовут определенные отклонения выходного параметра процесса. При  $\rho > 0$  эти отклонения не накапливаются, а за счет собственных свойств процесса, способности к самовыравниванию, постепенно устраняются, компенсируются (статический объект). В случае  $\rho = 0$  рассматриваемые отклонения не устраняются, а постепенно и неограниченно накапливаются (суммируются), такие объекты называются нейтральными или астатическими. При  $\rho < 0$  объект считается неустойчивым, т.е. образовавшееся отклонение выходного параметра начинает неограниченно возрастать, даже при немедленном устранении породившего его возмущения.

В связи с изложенным, коэффициент самовыравнивания является важнейшей характеристикой объекта: он характеризует его динамические и статические свойства, т.е. поведение объекта в переходном и установившемся режимах.

Отрезок АВ (см рисунок 1 ) характеризует чистое запаздывание ( $t_n$ ) - время, в течение которого регулируемый параметр не изменяется после возмущения. Часто  $t_n$  называют передаточным, транспортным или дистанционным запаздыванием. Отрезок ВС характеризует переходное



(емкостное) запаздывание  $t_r$ . Оно связано с замедлением перехода энергии или вещества в данный объект из другого объекта. Для одноемкостного объекта полное запаздывание  $t_{\text{пол}} = t_n + t_r$ . Интервал между точками Д и Е называется временем разгона  $t_a$ . Время разгона и коэффициент самовыравнивания определяют постоянную времени объекта  $F_0$

$$F_0 = \frac{t_a}{\rho}$$

Скоростью разгона ( $C$ ) называется величина обратная времени разгона.

$$C = \frac{K}{F_0} = \frac{1}{t_a}$$

Определение параметров передаточной функции объекта по переходной кривой

Процесс получения передаточной функции объекта, исходя из данных о переходном процессе, называется идентификацией объекта.

Предположим, что при подаче на вход некоторого объекта ступенчатого воздействия была получена переходная характеристика (см. рисунок 3). Требуется определить вид и параметры передаточной функции.

Предположим, что передаточная функция имеет вид

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s},$$

(инерционное звено с запаздыванием).

Параметры передаточной функции:  $K$  - коэффициент усиления,  $T$  - постоянная времени,  $\tau$  - запаздывание.

Коэффициентом усиления называется величина, показывающая, во сколько раз данное звено усиливает входной сигнал (в установившемся режиме), и равная отношению выходной величины  $y$  в установившемся режиме ко входной величине  $x$ :

$$K = \frac{y_{\text{уст}}}{x},$$

Установившееся значение выходной величины  $y_{уст}$  - это значение  $y$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Запаздыванием  $\tau$  называется промежуток времени от момента изменения входной величины  $x$  до начала изменения выходной величины  $y$ .

Постоянная времени  $T$  может быть определена несколькими методами в зависимости от вида передаточной функции. Для рассматриваемой передаточной функции 1-го порядка  $T$  определяется наиболее просто: сначала проводится касательная к точке перегиба, затем находят точки пересечения с осью времени и асимптотой  $y_{уст}$ ; время  $T$  определяется как интервал времени между этими точками.

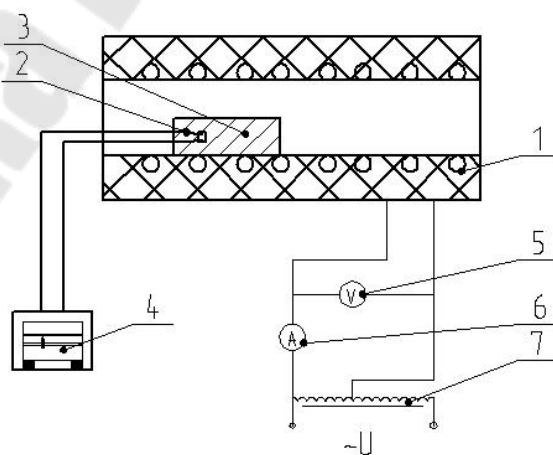
В случае, если на графике между точкой перегиба имеется вогнутость, определяется дополнительное запаздывание  $\tau_{доп}$ , которое прибавляется к основному:  $\tau = \tau + \tau_{доп}$ .

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Описание экспериментальной установки

Объектом регулирования служит электрическая печь 1 (рисунок 8.2). Регулируемым параметром ( $y$ ) - температура металлического цилиндра 3. Управляющим воздействием ( $x$ ) является мощность нагревателя электропечи, которую можно определить из выражения:

Где  $I$  - ток в цепи, А;  $U$  - Напряжение, В;  $R$  - сопротивление нагревателя, Ом.



1-электрическая печь сопротивления, 2 – термопара, 3 – металлический цилиндр, 4 - автоматический потенциометр, 5 – вольтметр, 6 – амперметр, 7 – регулируемый источник питания.

**Рисунок 8.2 – Схема установки для определения кривой разгона нагревательной печи.**

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Кривую разгона нагревательной электрической печи определить при возмущении, имеющем ступенчатую форму, в данном случае возмущением является мощность электрического тока, создаваемого на вход объекта. Для реализации этого эксперимента необходимо проверить схему установки, включить автоматический самопишущий потенциометр 4 (см. рисунок 4) и электропечь 1. С помощью автотрансформатора 7 и амперметра 6 установить заданное преподавателем значение рабочего тока  $I_l$ . Следя за показаниями потенциометра и секундомера, определить момент времени, когда в объекте установится статический режим, т.е. при установленной мощности на входе нагревательной печи температура последней не будет изменяться в течение 5 мин. После выхода на статический режим объект подготовлен для определения кривой разгона.

Нанести объекту возмущающее воздействие, соответствующее увеличению тока на 10 % от ранее установленного и фиксировать изменение температуры во времени до тех пор, пока в объекте вновь не установится статический режим. При этом необходимо очень внимательно отнестись к определению момента подачи на вход объекта возмущающего воздействия и начала изменения температуры печи, поскольку от этого зависит точность вычисления значения чистого запаздывания. Результаты измерений занести в протокол работы (см.табл.).

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

По полученным данным построить графики зависимостей последний из которых и является кривой разгона нагревательной печи.

$$P = f(t); T = \phi(t)$$

Исследуя график  $T = \phi(t)$ , определить следующие параметры:

- время разгона  $t_a$
- степень самовыравнивания  $\rho$
- коэффициент усиления объекта  $K$ ;
- полное запаздывание  $t_{пол}$ ;
- постоянную времени объекта  $F_0$ ;
- скорость разгона  $C$ .

Построить графики изменения во времени значений управляющего воздействия и выходной переменной в безразмерном выражении:  $\mu = f(t)$ ;  $\phi = f(t)$  сравнить их с зависимостями (I).

**Таблица 1. Протокол лабораторной работы**

Время, с	Температура цилиндра, °С	Напряжение, В		Возмущение, $\Delta P = P - P_{нач}$	Относительное значение возмущения $\mu = \Delta P / P_{нач}$	Относительное значение текущего параметра $\phi = \Delta T / T_{нач}$
		До возмущения	После возмущения			
1	2	3	4	5	6	7

**Контрольные вопросы**

1. Способы управления работой нагревательных печей.
2. Что характеризует скорость разгона.
3. Основные материалы для нагревателей.
4. Основные преимущества и недостатки нагревательных печей.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 – ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА НА СВОЙСТВА ОСАЖДАЕМОГО МЕТАЛЛА

## Цель работы:

Изучить процесс электролитического осаждения металлов в процессе электролиза и исследовать влияние режимов процесса на свойства полученных осадков меди и выход металла по току.

Задачи проведения лабораторного занятия состоят в том, чтобы

**знать:** теоретические основы, сущность процессов и условия осаждения металлов в процессе электролиза, влияние различных факторов на процесс катодного осаждения металлов из водных растворов их солей, достоинства и недостатки электролитического способа получения покрытий и порошков металлов;

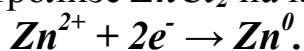
**уметь:** самостоятельно проводить исследование условий осаждения металлических порошков и покрытий при электролизе, обрабатывать и анализировать полученные результаты.

## Основные теоретические положения

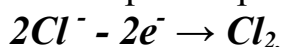
Электролиз — один из простейших и распространенных физико-химических методов анализа. Этот метод основан на выделении из исследуемого раствора электролитическим путем металлов. В некоторых случаях метод электролиза рассматривают как вариант гравиметрического метода анализа, в котором реагентом является электрический ток. Однако, поскольку выделение металлов электрическим током связано с рядом индивидуальных физико-химических свойств ионов (потенциалом выделения, перенапряжением и др.), этот метод относится к физико-химическим методам анализа.

В любом растворе электролита имеются положительные и отрицательные ионы — катионы и анионы, движущиеся в беспорядке. Если в такой раствор погрузить электроды, один из которых заряжен положительно, а другой — отрицательно, то катионы станут перемещаться к отрицательному электроду — катоду, а анионы к положительному электроду — аноду. При этом на катоде электроны

переходят от металлического электрода к иону. Например, при электролизе  $ZnCl_2$  на катоде выделяется цинк:

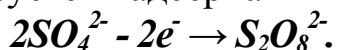


а на нерастворимом аноде выделяется хлор

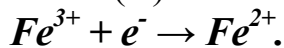


При электролизе некоторых солей, например  $Na_2SO_4$ , на электродах выделяются не продукты электролиза растворенной соли, а продукты электролиза воды — водород на катоде и кислород на аноде.

В других случаях электролиз идет сложнее, например, при электролизе серной кислоты в определенных условиях на аноде образуется надсерная кислота



При электролизе хлорида железа (III) на катоде может получаться ион железа (II):



Основным законом электролиза является закон Фарадея.

*Количество эквивалентов любого вещества, выделяемого или разлагаемого на электроде, пропорционально количеству электричества, прошедшего через поверхность соприкосновения электрода с раствором.*

Большое значение при электролизе имеет характер выделяющихся осадков металлов. Металл на катоде может выделяться в виде мелко- или крупнокристаллического, порошкообразного или губчатого осадка. Характер выделяющихся осадков зависит от ряда факторов.

Кратко рассмотрим влияние этих факторов.

*Концентрация ионов металла в электролите.* Для получения плотных осадков на катоде необходимо обеспечить такую концентрацию ионов данного металла, чтобы обеспечить скорость выделения атомов металла на катоде, соизмеримую со скоростью роста кристаллов. В этих условиях растущие кристаллы примыкают друг к другу, не оставляя зазоров.

Если концентрация ионов в электролите мала, то между растущими кристаллами возникают разрывы и образуется рыхлый порошкообразный осадок. При пониженной концентрации ионов металла также становится более возможным образование водорода на катоде. Выделение пузырьков водорода дополнительно способствует разрыхлению осадка. В пределах значений концентраций, обеспечивающих образование рыхлых осадков, повышение концентрации увеличивает средний размер частиц порошка.

*Плотность тока.* При постоянной концентрации электролита с повышением плотности тока, наряду с разрядом металлических ионов,

происходит разряд и ионов водорода, что способствует осаждению рыхлого порошкообразного осадка. Увеличение плотности тока в пределах условий электролиза, способствующих образованию порошкового осадка, приводит к уменьшению размера частиц получаемого порошка. Чем выше плотность тока, тем больше формируется центров кристаллизации на единицу катода, тем меньше размер частиц порошка.

*Температура электролита.* С увеличением температуры увеличивается подвижность ионов металла. Последнее способствует повышению их концентрации у поверхности катода, и, тем самым, создаются условия, благоприятствующие образованию плотного осадка. В связи с этим температуру электролита необходимо поддерживать на оптимальном уровне (40 - 60°C).

*Кислотность электролита.* Повышение кислотности электролита способствует увеличению концентрации ионов водорода в нем и выделению водорода на катоде. Последнее приводит к разрыхлению осадка и понижению выхода металла по току.

*Примеси в электролите.* Как правило, примеси в электролите носят искусственный характер. К ним можно отнести поверхностно-активные вещества, коллоиды, перекись водорода, растворенный кислород и др. Поверхностно-активные вещества, коллоиды создают адсорбированные пленки на поверхности осаждающихся кристаллов и препятствуют их сращиванию, что способствует получению порошкообразного осадка. Такое же влияние оказывают окислители путем создания окисных пленок на поверхности частиц катодного осадка.

Экспериментально установлена зависимость между плотностью тока ( $i_K$ , А/см<sup>2</sup>) и концентрацией катионов металла в электролите ( $C$ , моль/л), позволяющая определять условия получения осадков с заданными свойствами. Плотные осадки выделяются при

$$i_K \leq 0,2 \cdot K \cdot C. \quad (9.1)$$

При более высокой плотности тока или при меньшей концентрации электролита образуется переходная структура осадков и при

$$i_K \geq K \cdot C. \quad (9.2)$$

образуются рыхлые, порошкообразные осадки. Приведенные соотношения между  $i_K$  и  $C$  удовлетворительно отражают поведение

многих солей металлов (сульфитов, хлоридов, нитридов и т.д.) при значениях  $K$  для разных солей, колеблющихся от 0,5 до 0,9.

Электролитический способ получения металлических порошков нашел широкое распространение в промышленности. Этим методом можно получать порошки почти всех металлов. Важным преимуществом электролитического метода является высокая техническая чистота получаемого продукта, его хорошая прессуемость и спекаемость. Кроме того, варьируя состав ванн и режим электролиза, можно получать порошки с широким диапазоном свойств. Например, насыпная масса электролитического медного порошка в зависимости от условий его получения может изменяться от 0,4 до 4,0 г/см<sup>3</sup>. Электролиз позволяет также получать легированные порошки. Основным недостатком электролитического метода является высокая стоимость порошка.

В зависимости от условий электролиза, природы осаждаемого металла и электролита можно получить три типа катодных осадков, пригодных для производства металлических порошков:

1) твердые хрупкие осадки в виде плотных слоев, чешуек или ветвистых кристаллов, которые в дальнейшем могут быть превращены в порошок какими-либо добавочными операциями;

2) губчатые мягкие осадки - скопления отдельных мелких кристаллов, легко поддающиеся разрушению;

3) рыхлые (черные) осадки, представляющие высокодисперсные порошки, получающиеся в готовом виде непосредственно при самом электролизе.

Некоторые хрупкие, но компактные электролитические отложения металлов, легко поддающиеся размолу, получают при значительных концентрациях водородных ионов в электролите, низких содержаниях ионов металла и высоких плотностях тока. В таких условиях легко получают хрупкие осадки никеля, кобальта, железа и хрома. Технологический процесс получения порошков из компактного крупнокристаллического металла после электролиза сводится к дроблению и последующему измельчению. Для удаления водорода из частиц металла порошок подвергается отжигу.

Губчатые катодные осадки (объемистая, рыхлая, ноздреватая масса, часто темно-серого цвета) получается при низких плотностях тока. Осадок сначала образуется обычно в отдельных точках катода, а затем постепенно разрастается по всей его поверхности. Это явление наблюдается при электровыделении немногих металлов. Особую склонность к образованию губки отмечают у цинка, кадмия, олова, свинца и сурьмы.



Наиболее удобный способ получения больших количеств металлических порошков - непосредственно в порошкообразной форме. Такой вид осадков не требует растирания или размола. Рыхлые порошкообразные осадки получаются на катоде при высоких плотностях тока. При этом в большинстве случаев по внешнему виду они представляют собой аморфные отложения, хотя при наблюдении под микроскопом в них часто удается выявить ясную высококристаллическую структуру [3].

#### **Приборы, принадлежности, растворы**

**Приборы:** источник постоянного тока, магнитная мешалка, амперметр, вольтметр.

**Принадлежности:** ванна для электролиза, медные аноды и катоды, сушильный шкаф, аналитические весы, термометр, воронка, стакан, фильтровальная бумага, металлический шпатель, стеклянная палочка.

**Растворы:** электролит состава  $40 \text{ г/л } \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + 150 \text{ г/л } \text{H}_2\text{SO}_4$ , этиловый спирт.

#### **Порядок выполнения работы**

1 Собрать электрическую цепь установки для электролиза в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.1.

2 Опустить крышку с электродами в электролизер, после чего заполнить его электролитом.

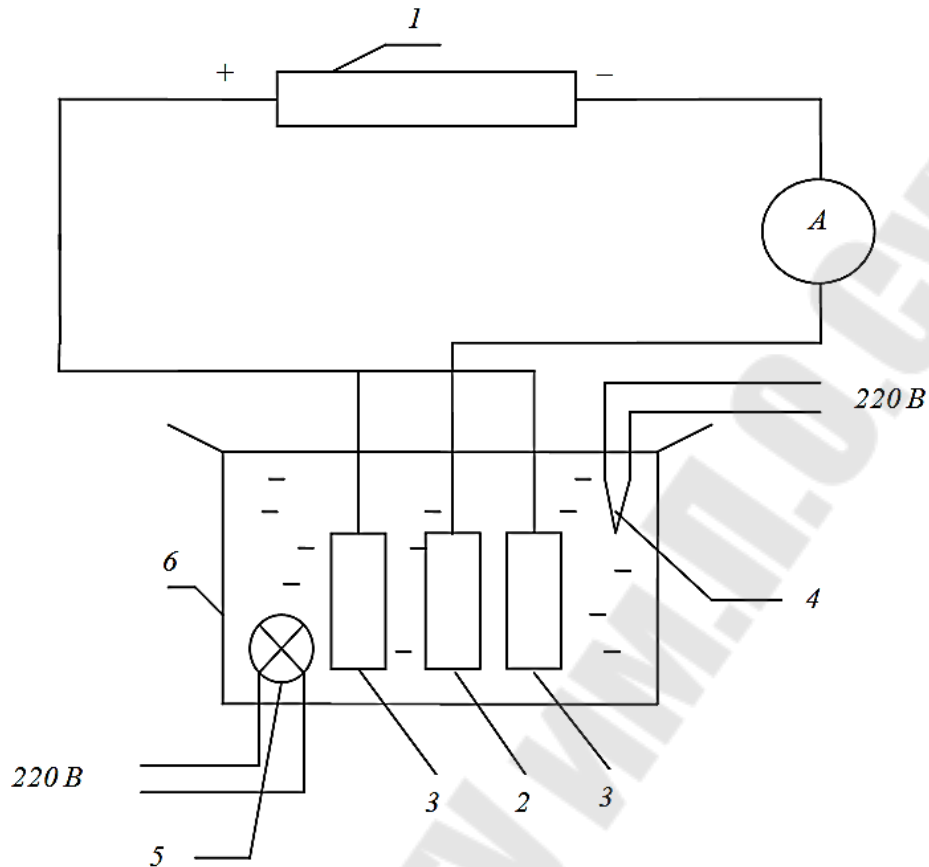
3 Поставить электролизер на магнитную мешалку (в случае реализации режима с циркуляцией раствора).

4 В присутствии преподавателя включить источник тока, и установить по амперметру силу тока в цепи, соответствующую плотности тока на катоде, равной  $10 \text{ А/дм}^2$ .

5 Вести электролиз в течение 20 минут. Во время электролиза следует поддерживать постоянной силу тока в цепи и контролировать температуру электролита. Скорость циркуляции электролита при помощи магнитной мешалки поддерживать на уровне, заданном преподавателем.

6 По истечению времени осаждения выключить источник тока, полученный осадок шпателем удалить с поверхности катода в стакан, несколько раз промыть водой, затем этиловым спиртом, отфильтровать и вместе с фильтром просушить в сушильном шкафу 10-15 минут при температуре  $100-150^\circ\text{C}$ . Взвесить массу полученного порошка на аналитических весах ( $G_{\text{пр}}$ ).

7 Провести аналогичный эксперимент при различных плотностях тока на катоде и разных скоростях перемешивания электролита (по заданию преподавателя).



1 – источник постоянного тока; 2 – катод; 3 – растворимые медные аноды; 4 – устройство для нагрева электролита; 5 – насос для циркуляции электролита; 6 – ванна с электролитом

**Рисунок 9.1 – Схема экспериментальной установки**

### **Обработка экспериментальных данных и порядок оформления отчета**

1 Определить теоретический выход порошка в соответствии с законом Фарадея по формуле

$$G_T = \frac{A_{Cu} \cdot I \cdot \tau}{n \cdot F}, \text{ Г} \quad (9.3)$$

где  $A_{Cu}$  - атомная масса меди;  $I$  - сила тока, А;  $\tau$  - продолжительность электролиза, час.;  $n$  - валентность ионов меди;  $F$  - число Фарадея (26,8 А·ч/Г·экв.).

2 Для каждого опыта определить выход по току по формуле

$$\eta = \frac{G_T}{G_{ПФ}} \cdot 100 \% \quad (1.4)$$

3 Полученные результаты обсудить с точки зрения влияния плотности тока и скорости циркуляции электролита на вид получаемого осадка при электролизе. Обсудить причину отличия практического выхода порошка от теоретического. Полученные данные занести в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 - Режим получения и характеристики порошка меди, полученного электролизом

№	Плотность тока, А/дм <sup>2</sup>	Состав электролита	Напряжение, В	Температура электролита, °С	Время электролиза, час	Циркуляция, л/мин	Вид осадка	Выход по току, %
1								
2								
3								

4 Сделать выводы о проделанной работе и полученных результатах.

### Контрольные вопросы

1. В чем суть процесса электролиза как одного из методов физико-химических исследований свойств материалов?
2. В чем заключается закон Фарадея?
3. В чем заключается сущность электролитического метода получения металлических порошков?
4. Какие факторы и как влияют на форму и гранулометрический состав металлических порошков, получаемых электролитическим методом?
5. Как влияет плотность тока и концентрация электролита на вид осадка?
6. Какого типа осадки металлических порошков могут быть получены электролизом?
7. Что такое выход по току, что он характеризует?
8. От каких факторов и как зависит выход по току?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10 – ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАСХОДА ГАЗОВ

### Цель работы

Изучить методы определения температуры и расхода газов.

Задачи проведения лабораторного занятия состоят в том, чтобы

**знать:** методику определения температуры и расхода газов;

**уметь:** самостоятельно проводить замеры температуры и расхода газа, строить калибровочные кривые.

### Основные теоретические положения

#### Температура среды

Температура – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия системы и являющаяся важнейшим и часто основным параметром технологических процессов. Существует контактные и бесконтактные методы измерения температуры. При использовании первых методов необходимо обеспечить надежный тепловой контакт чувствительного элемента прибора с объектом измерения. Температура измеряется термометрами, которые по принципу действия могут быть разделены на следующие группы: термометры расширения, термометры сопротивления, термоэлектрические термометры. В практике физико-химического эксперимента чаще всего используются термоэлектрические термометры (термопары), принцип действия которых основан на существовании определенной зависимости между термоэлектродвижущей силой (т.э.д.с.), установившейся в цепи из разнородных проводников, и температуры мест их соединений.

Пределы измерений термопар зависят от материала термоэлектродов. Термопары типа ТПП с платино-платинородиевыми электродами применяется для диапазона температур от  $-20$  до  $+1300^{\circ}\text{C}$ , типа ТПР с платинородий-платинородиевыми – от  $+300$  до  $1600^{\circ}\text{C}$ , типа ТХК с хромель-копелевыми – от  $-50$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ .

Для измерения т.э.д.с. в комплекте с термопарами в качестве вторичных приборов применяют магнитоэлектрические милливольтметры и автоматические потенциометры.

## **Расход газов**

Расход вещества определяется его количеством, проходящим в единицу времени через данное сечение канала. Различают массовый (кг/с) и объемный ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) расход вещества.

Для измерения расхода вещества используются приборы (расходомеры), которые по принципу действия можно разделить на реометры, ротаметры, газовые часы.

Действие U-образного реометра основано на перепаде давления на концах капилляра (капиллярный реометр) (рисунок 4.1) или до и после диафрагмы (диафрагменный). Разность давлений зависит от скорости газа (расхода), температуры, диаметра капилляра или диафрагмы, вязкости газа. Для каждого реометра и данного газа все параметры, за исключением расхода газа, являются величинами постоянными, поэтому можно градуировать реометр, установив связь расхода газа и перепада жидкости в реометре. В качестве рабочих жидкостей, используемых в реометрах, применяют бензин, дибутилфталат, подкрашенную воду.

Градуировку реометров проводят с помощью пенного измерителя (см. рисунок 10.1) или газометра.

Для приближенного определения расхода газов используются ротаметры поплавкового типа. Ротаметр представляет собой стеклянную трубку, внутри которой движется вращающийся вдоль оси поплавков. Газ проходит снизу вверх, поднимая поплавок на определенную высоту. Высота подъема поплавка соответствует расходу газа.

Большие расходы газов измеряют газовыми часами. Их недостатком является невозможность использования для контроля расхода агрессивных и растворимых в воде газов.



1 – воздушный компрессор; 2 - U-образный реометр; 3 – пенный измеритель

Рисунок 10.1 – Общий вид установки по определению расхода газов

### **Приборы и принадлежности**

**Приборы:** термопара, потенциометр (или магнитоэлектрический милливольтметр), электрическая плита, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), реометр, микрокомпрессор, пенный измеритель, секундомер.

**Принадлежности:** штатив для крепления термопары, электропровода, металлическая линейка, резиновые трубки.

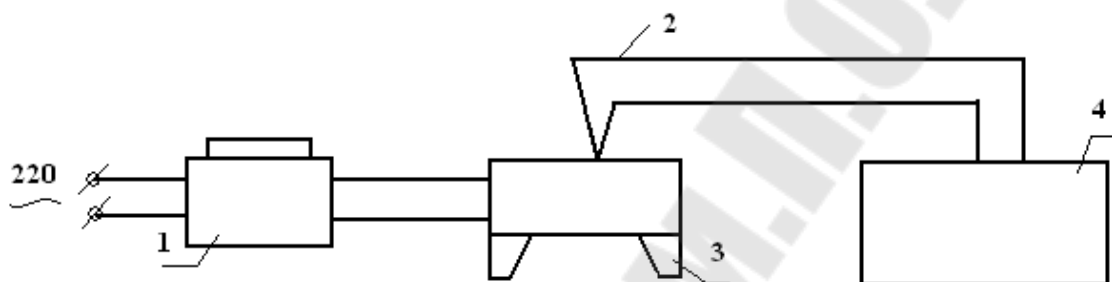
### **Порядок выполнения работы**

1 Определение температуры газовой среды

1.1 Собрать экспериментальную установку согласно схеме, представленной на рисунке 10.2.

1.2 Установить на ЛАТРе значение напряжения, указанное преподавателем, и включить электрическую плитку.

1.3 Через 10 мин. зафиксировать показания потенциометра (или вольтметра) при размещении спая термопары на поверхности плиты и на расстоянии 10 и 20 мм от нее.



1 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 2 – термопара;  
3 – электрическая плитка; 4 – потенциометр (или магнитоэлектрический милливольтметр)

**Рисунок 10.2 – Схема экспериментальной установки**

1.4 Пользуясь градуировочной кривой, определить температуру газа в местах, указанных в п.п. 1.3.

1.5 Результаты определений занести в таблицу 4.1.

Таблица 10.1 – Результаты определения температуры газа

Расстояние от рабочей поверхности плитки, мм	0	10	20
Показания потенциометра (или вольтметра), т.э.д.с., мВ			
Температура, °С			

2 Градуировка реометра и определение расхода газа.

2.1 Собрать установку согласно схеме, показанной на рисунок 10.1.

2.2 Кран реометра установить в положение, указанное преподавателем.

2.3 Включить воздушный компрессор.

2.4 Резиновой грушей создать пленку пены и при помощи секундомера определить время прохождения пленки от нижней до верхней отметки. Зафиксировать перепад уровня жидкости в реометре.

2.5 Операцию 2.4 повторить для четырех различных расходов газа. Расход газа изменять вращением регулировочного винта компрессора.

2.6 Результаты определений занести в таблицу 10.2.

**Таблица 10.2 – Результаты определений при градуировке реометра**

Время прохождения пленки между отметками, с					
Расход газа, см <sup>3</sup> /с					
Перепад уровня жидкости в реометре, см					

2.7 Построить градуировочную прямую реометра в координатах «расход газа – перепад уровня жидкости в реометре».

2.8 Отсоединить пенный расходомер.

2.9 Определить расход газа, подаваемого компрессором, фиксируя перепад уровня жидкости в реометре и используя градуировочную прямую.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите группы термометров при классификации их по принципу действия.

2. На чем основан принцип действия термопары?

3. Из каких металлов (сплавов) изготавливают термопары?

4. Приведите классификацию приборов для определения расходов газов.

5. На чем основано действие U-образного реометра?

6. Как производится градуировка U-образного реометра с помощью пенного расходомера?



## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 – ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Цель работы: Выбор рациональных графиков электрических нагрузок печей сопротивления на основании условия минимума оплаты за потребление электрической энергии.

Выполнение лабораторной работы заключается в следующем:

- а) изучение устройства и принципа действия лабораторной установки;
- б) изучение основных теоретических положений по теме и содержанию лабораторной работы;
- в) проведение экспериментов и обработка результатов экспериментов;
- г) оформление отчета по лабораторной работе.

### **Основные теоретические положения**

В процессе взаимоотношений потребителей электрической энергии с энергоснабжающими организациями важное значение имеет размер оплаты за потребление электрической энергии. Нормативно-методической основой ценообразования на розничном рынке являются «Методические указания по расчету регулируемых тарифов (цен) на электрическую и тепловую энергию на розничном (потребительском) рынке», утвержденные Федеральной службой по тарифам. В соответствии с «Методическими указаниями ...» в настоящее время все предприятия осуществляют оплату за электроэнергию по двухставочному или одноставочному тарифам. По первой ставке двухставочного тарифа оплата производится за киловатты заявленной мощности, а по второй ставке этого тарифа оплата производится по показаниям счетчиков за фактически потребленную электроэнергию. Оплата по одноставочному тарифу производится только по показаниям счетчиков за фактически потребленную электроэнергию.

Если размер оплаты по второй ставке двухставочного тарифа не зависит от режимов работы потребителей электрической энергии, то размер оплаты по первой ставке полностью определяется формой графиков электрических нагрузок.

Электрическая нагрузка многих базовых промышленных предприятий колеблется в широких пределах как в течение суток, так и

в течение каждого месяца и года. Колебание электрических нагрузок промышленных предприятий зависит от вида производства, режима рабочего дня и числа смен, а также от сезонности их работы в течение года. В качестве примера на рисунке 11.1 изображен годовой график электрических нагрузок промышленного предприятия, который показывает изменение электропотребления по месяцам в течение года. Из графика электрических нагрузок на рисунке 11.1 следует, что максимумы электропотребления приходятся на апрель и ноябрь, а минимумы электропотребления приходятся на март, май и июль.

Размер заявляемой мощности предприятие определяет самостоятельно, но ее величина должна быть не меньше максимальной нагрузки предприятия в отдельные периоды работы в течение года. Согласно графика электрических нагрузок, изображенного на рисунке 11.1, заявляемая мощность рассматриваемого предприятия должна быть равна максимальной нагрузке, который имеет место в апреле месяце ( $P_{\text{заявл}} = P_4$ ). Это приводит к тому, что заявленная мощность оказывается намного больше среднемесячной нагрузки предприятия в течение года и значительно превышает фактическую нагрузку в отдельные месяцы (март, май и июль). В результате затраты предприятия на оплату за электроэнергию получаются существенно завышенными.

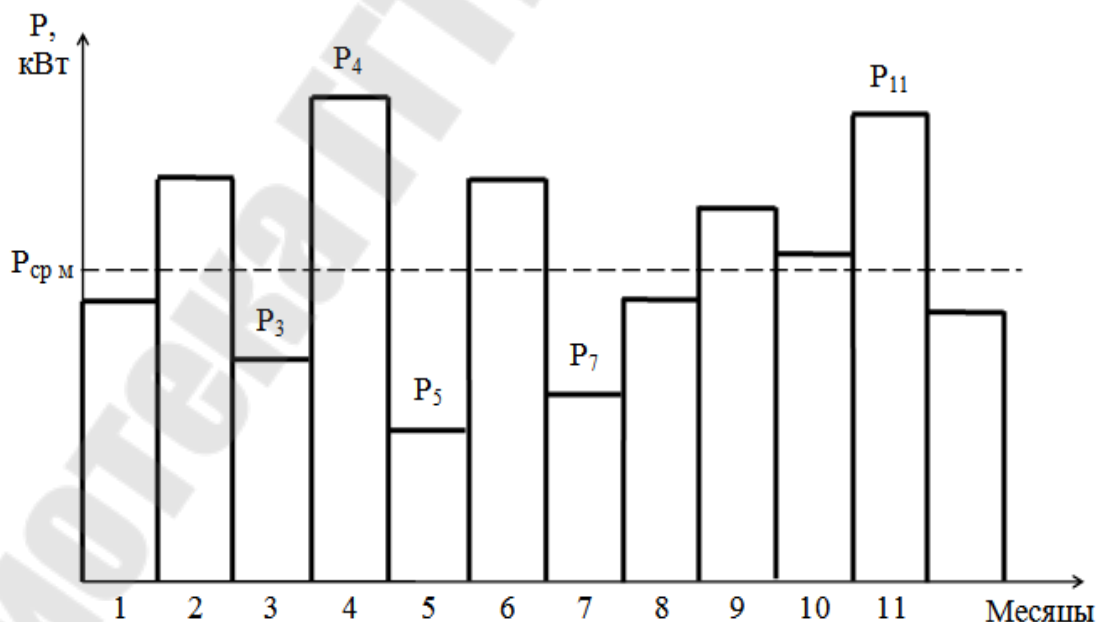


Рисунок 11.1 – Пример годового графика электрических нагрузок

## Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки изображена на рисунке 2. В лабораторной установке потребителями электрической энергии являются физические модели электрических печей сопротивления ПС-1...ПС-4 (в последующем просто электрические печи сопротивления). Каждая электрическая печь сопротивления состоит из электронагревательной спирали, которая намотана на электроизоляционный и термостойкий каркас и размещена внутри закрытого сосуда цилиндрической формы. На нагревательные спирали подается напряжение питания переменного тока, под действием которого происходит их нагрев. Чтобы электрические спирали не перегревались, они обдуваются потоками холодного воздуха от центробежного вентилятора (на рисунке 11.2 вентилятор и воздухопроводы не показаны).

Каждая электрическая печь сопротивления получает питание от тиристорных усилителей ТУ, которые подключены к электрической сети ( $\sim U_c$ ) переменного тока напряжением 220 В через выключатели SA1...SA4 и общий выключатель SA. В тиристорных усилителях ТУ производится регулирование их выходных напряжений под действием управляющих сигналов величиной 0...5 мА, которые формируются с помощью блоков ручного управления БУ типа БУ-12.

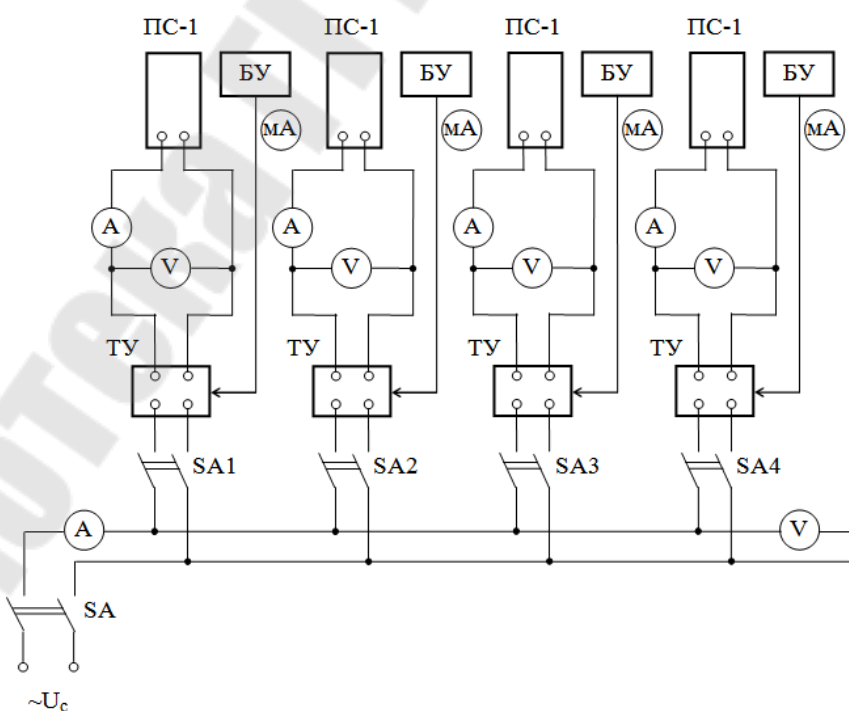


Рисунок 11.2 – Принципиальная схема лабораторной установки

Таким образом, в рассматриваемом лабораторном стенде имеется возможность изменять нагрузку электрических печей сопротивления (потребителей электрической энергии) от 0 до 100 % при помощи блоков ручного управления БУ и тиристорных усилителей ТУ и задавать любые режимы их работы.

Величина управляющих сигналов контролируется с помощью миллиамперметров, которые включены в выходные цепи каждого блока управления БУ. Контроль напряжений и токов, потребляемых электрическими печами сопротивления, производится с помощью щитовых амперметров и вольтметров, включенных в цепи питания каждой электрической печи сопротивления (выходные цепи тиристорных усилителей ТУ). Контроль напряжения электрической сети и суммарного тока всех электрических печей сопротивления осуществляется с помощью щитовых амперметра и вольтметра, включенных в цепь питания лабораторного стенда. Контроль температуры воздуха на выходе из каждой из электрических печей сопротивления производится с помощью термопар, работающих в комплекте с логометрами.

#### **Выполнение работы**

Выполнение лабораторной работы производится в несколько этапов в следующей последовательности.

1 Изучение конструкции лабораторного стенда. Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо изучить схему лабораторной установки, назначение всех устройств, измерительных приборов и органов управления.

Все элементы лабораторного стенда расположены следующим образом.

Электрические печи сопротивления смонтированы на специальной околостенной стойке на высоте около одного метра над уровнем пола. С помощью трубопроводов (воздуховодов) они соединены таким образом, что образуют две параллельно-последовательные пары. Каждая электрическая печь сопротивления имеет индивидуальный ввод и вывод воздуха. Для контроля за состоянием электрических печей сопротивления используются термоэлектрические датчики (термопары), с помощью которых производится измерение температуры воздуха на выходе из печей. В качестве вторичных приборов служат логометры, шкалы которых проградуированы в градусах Цельсия. Тиристорные усилители тоже смонтированы на околостенной стойке на высоте примерно двух метров над уровнем пола.

Амперметры и вольтметры, логометры, блоки ручного управления и миллиамперметры установлены с лицевой стороны панелей. Там же

размещается кнопочный пост для пуска и останова электродвигателя вентилятора. Сетевые выключатели SA и SA1...SA4 располагаются в силовом распределительном шкафу. Органами управления для изменения нагрузки электрических печей сопротивления служат ручки переменных резисторов в блоках ручного управления БУ.

2 Проверка работоспособности стенда. Перед включением лабораторного стенда в электрическую сеть необходимо блоки ручного управления БУ установить в режим управления «Р», а ручки переменных резисторов повернуть до упора в крайнее левое положение. С помощью выключателей, установленных в силовом распределительном шкафу, производится подача электропитания ко всем устройствам лабораторного стенда (руководитель лабораторной работы). С помощью ручек переменных резисторов БУ устанавливаются произвольные значения управляющих сигналов. После выполнения указанных операций электроизмерительные приборы должны показывать соответствующие токи и напряжения, а логометры должны фиксировать изменения температуры воздуха на выходах физических моделей электрических печей.

Для исключения перегрева нагревательных спиралей температура воздуха на выходах электрических печей сопротивления не должна превышать 150 °С.

3 Проведение экспериментов. В процессе проведения экспериментов необходимо последовательно выполнить следующие действия:

3.1 ознакомиться с планом проведения экспериментов по исследованию рациональных режимов работы электрических печей сопротивления, который приведен в таблице 1;

3.2 с помощью ручек переменных резисторов в блоках управления БУ установить нагрузку каждой электрической печи сопротивления для первого месяца года в соответствии с планом экспериментов поочередно для всех трех вариантов;

3.3 снять показания электроизмерительных приборов и записать в специальную таблицу 2 значения напряжений и токов нагрузки каждой электрической печи сопротивления, значения напряжения сети и суммарного тока нагрузки;

3.4 повторить эксперименты по пунктам (3.3.2) и (3.3.3) последовательно для всех остальных месяцев года и для всех заданных вариантов, приведенных в таблице 11.1.

**Таблица 11.1 – План проведения экспериментов**

печь	ар.	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Нагрузка печей, В											
1	1	140	100	120	180	170	110	200	190	90	150	160	130
	2	180	170	110	200	190	90	150	160	130	140	100	120
	3	200	190	90	150	160	130	140	100	120	180	170	110
2	1	190	90	150	160	130	140	100	120	180	170	110	200
	2	160	130	140	100	120	180	170	110	200	190	90	150
	3	100	120	180	170	110	200	190	90	150	160	130	140
3	1	120	180	170	110	200	190	90	150	160	130	140	100
	2	110	200	190	90	150	160	130	140	100	120	180	170
	3	90	150	160	130	140	100	120	180	170	110	200	190
4	1	150	160	130	140	100	120	180	170	110	200	190	90
	2	130	140	100	120	180	170	110	200	190	90	150	160
	3	170	110	200	190	90	150	160	130	140	100	120	180

Для исключения перегрева нагревательных спиралей температура воздуха на выходах электрических печей сопротивления не должна превышать 150 °С.

### **Обработка результатов экспериментов**

Обработка результатов экспериментов заключается в выполнении расчетов и построении графиков электрических нагрузок, в выполнении расчетов годовой стоимости потребления электроэнергии каждой из электрических печей сопротивления и лабораторной установки в целом для трех вариантов электропотребления.

При выполнении расчетов определяются следующие величины:

1 по формуле  $P_i = U_i \cdot I_i$  вычисляются потребляемые активные мощности каждой из электрических печей сопротивления по месяцам в течение года, где  $U_i$  и  $I_i$  – показания электроизмерительных приборов;  $i$  – номер месяца в году;

2 по формуле  $W_i = P_i \cdot t_i$ , где  $t_i$  – количество часов в  $i$  – м месяце, вычисляется потребление активной мощности каждой из электрических печей сопротивления по месяцам в течение года;

3 по результатам расчетов по пунктам (1) и (2) определяются суммарная потребляемая активная мощность и суммарное потребление активной мощности лабораторной установки по месяцам в течение года. Результаты расчетов по пунктам (1)...(3) заносятся в таблицу 11.2;  
4 по формуле

$$W_{\text{год}} = \sum_{i=1}^{12} P_i \cdot t_i \cdot (11.1)$$

**Таблица 11.2 – Результаты экспериментов и расчетов**

Печь	Пар.	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	U, В												
	I, А												
	P, Вт												
	W, Вт·ч												
2	U, В												
	I, А												
	P, Вт												
	W, Вт·ч												
3	U, В												
	I, А												
	P, Вт												
	W, Вт·ч												
4	U, В												
	I, А												
	P, Вт												
	W, Вт·ч												
P <sub>уст</sub> , Вт													
W <sub>уст</sub> , Вт·ч													

вычисляется годовое потребление активной мощности каждой из печей сопротивления и лабораторной установки в целом. Результаты расчетов заносятся в таблицу 3;

5 по формуле

$$\text{Ц}_1^{\text{д}} = 12 \cdot \text{C}_1^{\text{д}} \cdot \text{P}_{\text{заявл}}, \quad (11.2)$$

где  $\text{C}_1^{\text{д}}$  – размер первой ставки двухставочного тарифа, руб/кВт;  
 $\text{P}_{\text{заявл}} = \text{P}_{\text{max}}$  – заявленная мощность, кВт, вычисляется размер  
 годовой оплаты за потребляемую

Таблица 11.3 – Результаты обработки экспериментальных данных

Показатели	Электрические печи сопротивления				Лабораторная
	1	2	3	4	
Вариант 1					
$\text{W}_{\text{год}}$ Вт·ч					
Вариант 2					
$\text{W}_{\text{год}}$ Вт·ч					
Вариант 3					
$\text{W}_{\text{год}}$ Вт·ч					

электроэнергию по первой ставке двухставочного тарифа каждой электрической печи сопротивления и лабораторной установки в целом;  
 6 по формуле

$$\text{Ц}_2^{\text{д}} = \text{C}_2^{\text{д}} \cdot \text{W}_{\text{год}}, \quad (11.3)$$

где  $\text{C}_2^{\text{д}}$  – размер второй ставки двухставочного тарифа, руб/кВт·ч, вычисляется размер годовой оплаты за потребляемую электроэнергию по второй ставке двухставочного тарифа каждой печи сопротивления и лабораторной установки в целом; 7 по формуле

$$\text{Ц}_2^{\text{о}} = \text{C}_2^{\text{о}} \cdot \text{W}_{\text{год}}, \quad (11.4)$$

где  $\text{C}_2^{\text{о}}$  – величина одноставочного тарифа, руб/кВт·ч, вычисляется размер годовой оплаты за потребляемую электроэнергию по одноставочному тарифу каждой из электрических печей сопротивления и лабораторной установки в целом;

8 повторить расчеты по пунктам (1)...(8) для второго и третьего вариантов.



Результаты расчетов по пунктам (1)...(3) для второго и третьего вариантов сводятся в таблицы, аналогичные таблице 11.2. Результаты расчетов по пункту (4) для второго и третьего вариантов сводятся в таблицу 3. Результаты расчета стоимости потребляемой электроэнергии по пунктам (5)...(7) сводятся в таблицу 4.

### Метрологическое обеспечение лабораторной работы

Измерение экспериментальных данных производится с помощью электроизмерительных приборов, имеющих определенный класс точности, который указан на шкале электроизмерительного прибора. Класс точности представляет собой максимальную абсолютную погрешность, приведенную к пределу измерения прибора:

$$K_x = \frac{Dx_{\max}}{X_m} \cdot 100 \%, \quad (11.5)$$

Таблица 11.4 – Результаты расчета годовой стоимости электроэнергии

Расчетные параметры	Электрические печи сопротивления				Лабораторная установка
	1	2	3	4	
Вариант 1					
$\Pi_1^d$ , руб					
$\Pi_2^d$ , руб					
$\Pi_y^d$ , руб					
$\Pi_2^o$ , руб					
Вариант 2					
$\Pi_1^d$ , руб					
$\Pi_2^d$ , руб					
$\Pi_y^d$ , руб					
$\Pi_2^o$ , руб					
Вариант 3					
$\Pi_1^d$ , руб					
$\Pi_2^d$ , руб					
$\Pi_y^d$ , руб					
$\Pi_2^o$ , руб					

где  $\kappa_x$  – класс точности электроизмерительного прибора, %;  
 $\Delta x_{\max}$  – максимальная абсолютная погрешность измерения;  
 $x_m = x_{\max} - x_{\min}$  – пределы измерения прибора.

Из формулы (11.5) следует, что абсолютная нормированная погрешность измерения данным прибором будет равна

$$\Delta x = \Delta x_{\max} = \frac{\kappa_x \cdot x_m}{100 \%}. \quad (11.6)$$

Таким образом, фактическое значение измеряемой величины будет находиться в пределах

$$x = x_{\text{и}} \pm \Delta x, \quad (11.7)$$

где  $x_{\text{и}}$  – показание электроизмерительного прибора.

Для вычисления погрешности расчетных данных используется выражения для оценки погрешности функции приближенных аргументов [3]

$$\Delta u = \sum_{i=1}^n \left| \frac{df(x)}{dx_i} \right| \cdot \Delta x_i, \quad (11.8)$$

где  $df(x)/dx_i$  – частные производные от расчетной формулы  $u = f(x)$  по измеряемым

параметрам  $x_i$ ;

$n$  – число измеряемых параметров, входящих в расчетную формулу  $u = f(x)$ .

Результаты расчета погрешностей по формулам (11.5) и (11.8) заносятся в специальную таблицу.

### **Оформление отчета**

Отчет по лабораторной работе необходимо оформлять в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95 «Общие требования к текстовым документам». Отчет должен содержать:

а) титульный лист установленной формы для отчетов по лабораторным работам в соответствии с требованиями СКФ;

б) пояснительную записку, в которой должны быть цель и программа работы, порядок выполнения работы, расчетные формулы,

таблицы с экспериментальными и расчетными данными, графики и выводы по лабораторной работе.

При защите лабораторной работы необходимо ответить на все вопросы, которые касаются устройства и принципа действия лабораторной установки, теоретических основ, содержания и выполнения лабораторной работы, обработки и анализа экспериментальных данных, а также ответить на контрольные вопросы, которые приведены в методических указаниях.

### **Техника безопасности при выполнении лабораторной работы**

К лабораторной работе допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности при работе с электроизмерительными приборами.

1 С момента вступления в лабораторию каждый студент должен проявлять максимальную осторожность, постоянно следить за работой лабораторных стендов, не оставлять их под напряжением без надзора.

2 Включать общее электропитание в лаборатории и электропитание лабораторных стендов разрешается только руководителю лабораторных работ.

3 Разрешение на проведение экспериментов дает руководитель лабораторных работ после проверки знаний по технике безопасности, готовности группы к работе и проверки рабочей схемы.

4 В случае возникновения неисправностей выполнение лабораторной работе следует прекратить и продолжить только после устранения неисправностей.

5 Не допускается разборка, сборка и монтаж электрооборудования и приборов, находящихся под напряжением.

6 Проверка наличия напряжения допускается только специальными электроизмерительными приборами.

7 Не разрешается работать неисправными электроприборами, применять соединительные провода с поврежденной изоляцией.

8 В лаборатории запрещается:

- а) самостоятельно вскрывать приборы и другое оборудование;
- б) самостоятельно включать выключатели и рубильники;
- в) пользоваться открытым огнем, курить.

9 По окончании лабораторной работы необходимо привести рабочее место в порядок, отключить электропитание и отсоединить проводники.

### **Контрольные вопросы**

1 Схема лабораторной установки

- 2 Устройство лабораторной установки
- 3 Принцип работы лабораторной установки
- 4 Основные параметры лабораторной установки
- 5 Способы измерения параметров лабораторной установки
- 6 Определение режимов работы потребителей электрической энергии
- 7 Определение графиков электрических нагрузок
- 8 Определение заявленной мощности при оплате за электроэнергию
- 9 Системы оплаты за электроэнергию
- 10 Определение двухставочного тарифа оплаты за электроэнергию
- 11 Определение одноставочного тарифа оплаты за электроэнергию
- 12 Порядок выполнения лабораторной работы
- 13 Порядок проведения экспериментов
- 14 Порядок обработки результатов экспериментов
- 15 Расчетные величины, используемые для построения графиков электрических нагрузок
- 16 Области применения двухставочного тарифа при оплате за электроэнергию
- 17 Области применения одноставочного тарифа при оплате за электроэнергию
- 18 Достоинства и недостатки одноставочных тарифов
- 19 Достоинства и недостатки двухставочных тарифов

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12 – МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Цель работы – моделирование источников электрической энергии

### Общие сведения

DC Voltage Source – идеальный источник постоянного напряжения

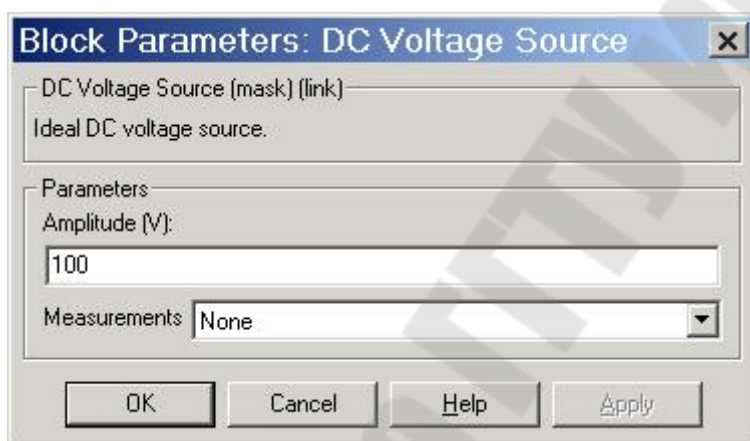
*Пиктограмма:*



*Назначение:*

Вырабатывает постоянное по уровню напряжение.

*Окно задания параметров:*



Параметры блока:

Amplitude (V): [Амплитуда (В)]. Задаёт величину выходного напряжения источника.

Measurements:

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок Multimeter, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

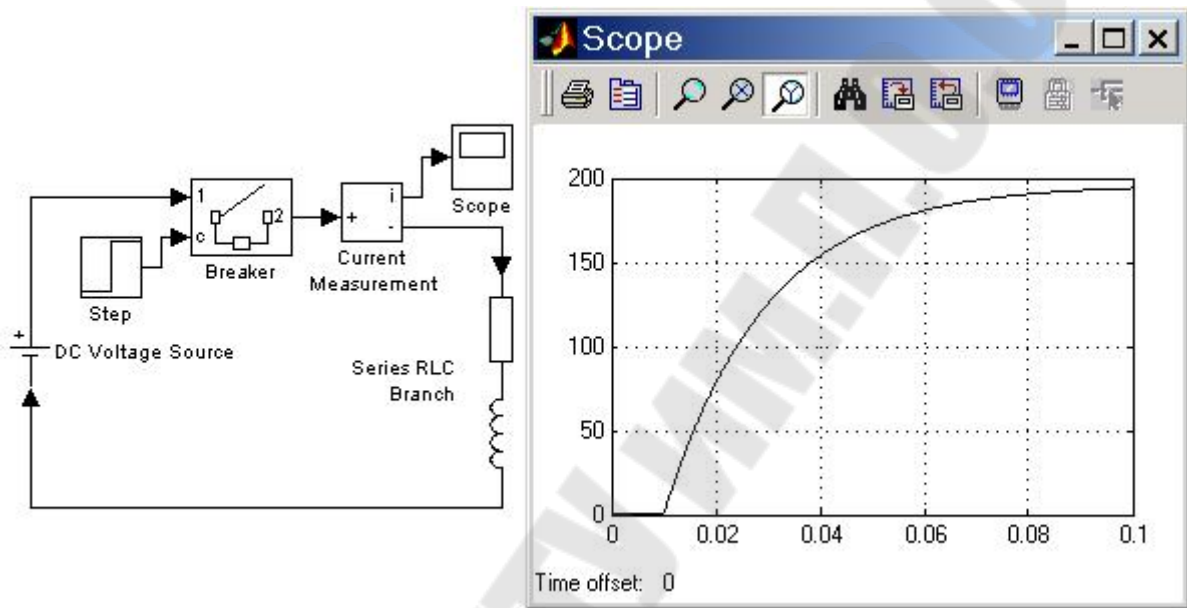
None – нет переменных для отображения,

Voltage – выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения, т. е. его собственное сопротивление равно нулю.

*Пример:*

На рисунке 12.1 показан пример включения активно-индуктивной нагрузки на постоянное напряжение. Подключение источника к нагрузке обеспечивается блоком Breaker, который замыкает электрическую цепь по сигналу вырабатываемому генератором ступенчатого сигнала Step. Измерение тока в цепи выполняется с помощью блока Current Measurement. Полученный измерителем сигнал отображается с помощью блока Scope.



**Рисунок 12.1 – Пример включения активно-индуктивной нагрузки на постоянное напряжение**

AC Voltage Source –идеальный источник переменного напряжения



*Пиктограмма:*

*Назначение:*

Вырабатывает синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой.

Параметры блока:

Peak Amplitude (V): [Амплитуда]. Амплитуда выходного напряжения источника.

Phase (deg): [Фаза (град)]. Начальная фаза.

Frequency (Hz): [Частота (Гц)]. Частота источника.

Sample time: [Шаг дискретизации]. Параметр задает шаг дискретизации по времени выходного напряжения источника при создании дискретных моделей.

Measurements:

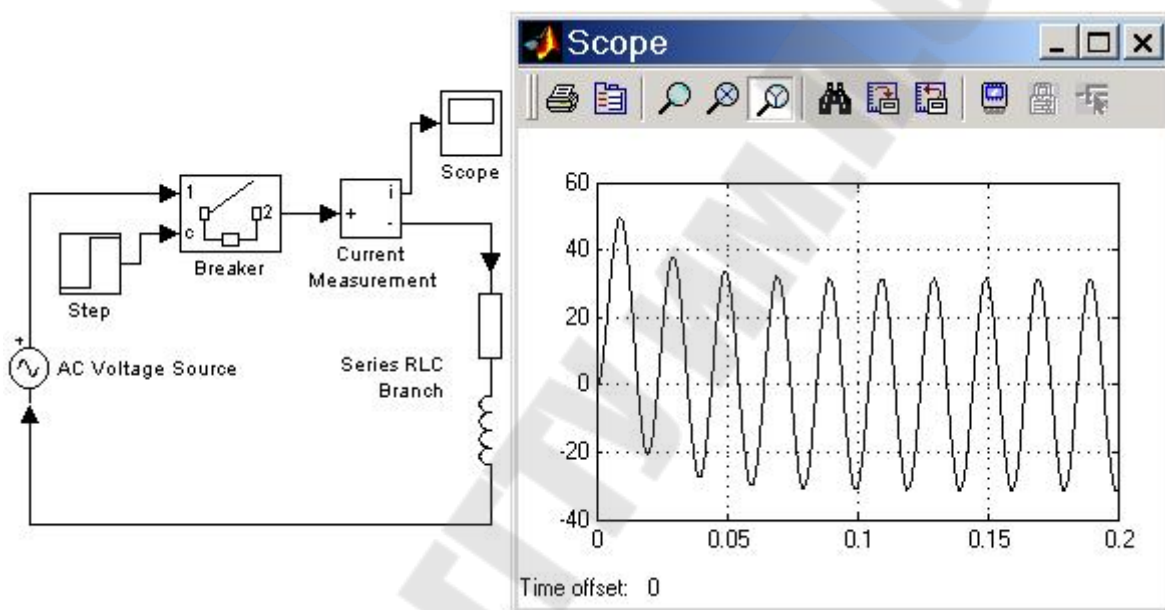
[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок Multimeter, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения,
- Voltage – выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения, т. е. его собственное сопротивление равно нулю.

*Пример:*

На рисунке 12.2 показана схема, моделирующая подключение активно-индуктивной нагрузки к источнику переменного напряжения. Там же приведен график тока в нагрузке.



**Рисунок 12.2 – Схема, моделирующая подключение активно-индуктивной нагрузки к источнику переменного напряжения**

AC Current Source –идеальный источник переменного тока

*Пиктограмма:*



*Назначение:*

Вырабатывает синусоидальный ток с постоянной амплитудой.

Параметры блока:

Peak Amplitude (A): [Амплитуда]. Амплитуда выходного тока источника.

Phase (deg): [Фаза (град)]. Начальная фаза.

Frequency (Hz): [Частота (Гц)]. Частота источника.

Sample time: [Шаг дискретизации]. Параметр задает шаг дискретизации по времени выходного тока источника при создании дискретных моделей.

Measurements:

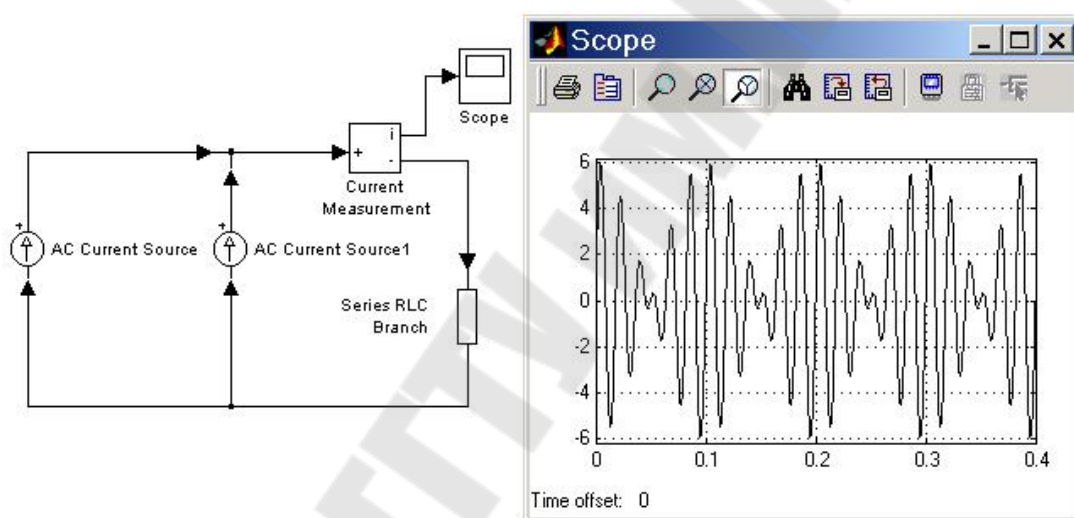
[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок Multimeter, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None – нет переменных для отображения,
- Current – выходной ток источника.

Блок является идеальным источником тока, т. е. его собственное сопротивление равно бесконечности.

*Пример:*

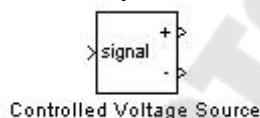
На рисунке 12.3 показана схема, моделирующая работу двух источников тока на активную нагрузку. Источники имеют одинаковую амплитуду тока (3 А), но разную частоту (50 и 60 Гц). Ток в нагрузке является суммой токов этих двух источников.



**Рисунок 12.3 – Схема, моделирующая работу двух источников тока на активную нагрузку**

Controlled Voltage Source–управляемый источник напряжения

*Пиктограмма:*



*Назначение:*

Вырабатывает напряжение в соответствии с сигналом управления.

Параметры блока: Initialize:

[Инициализация]. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами - амплитудой, фазой и частотой.

Source type:



[Тип источника]. Тип источника указывается, если требуется инициализация источника. Если инициализация источника не задана, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- AC - источник переменного напряжения,
- DC - источник постоянного напряжения.

Initial amplitude (V):

[Начальная амплитуда (В)]. Начальное значение выходного напряжения источника. Параметр доступен, если задана инициализация источника.

Phase (deg):

[Начальная фаза (град)]. Начальная фаза. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного напряжения.

Initial frequency (Hz):

[Initial частота (Гц)]. Начальная частота источника. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного напряжения.

Measurements:

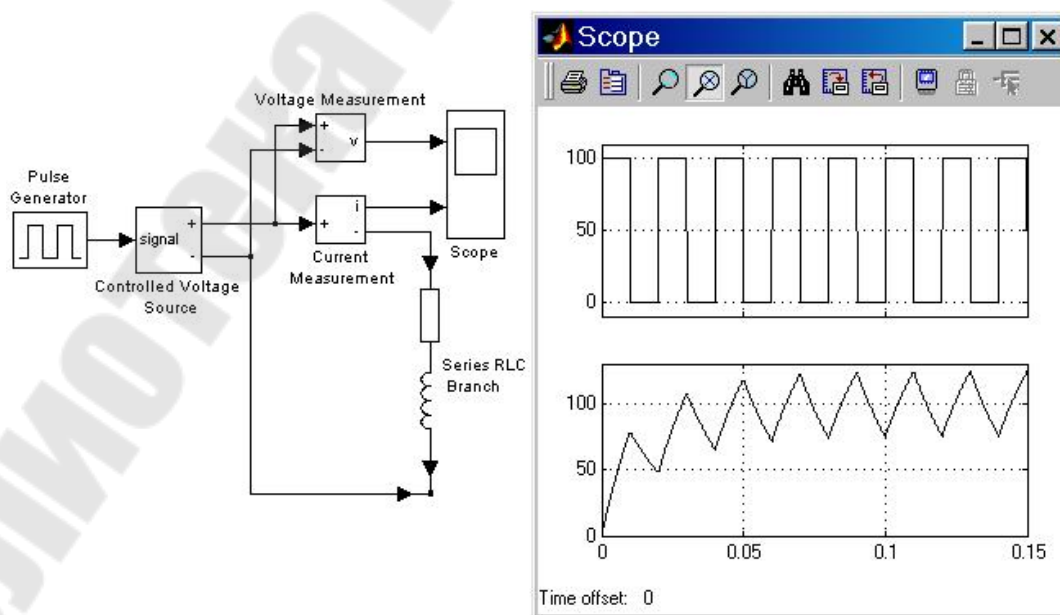
[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок Multimeter, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None - нет переменных для отображения,
- Voltage - выходное напряжение источника.

Блок является идеальным источником напряжения, т.е. его собственное сопротивление равно нулю.

*Пример:*

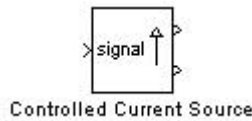
На рисунке 12.4 показана схема с использованием управляемого источника напряжения, формирующего по сигналу управления прямоугольное напряжение на нагрузке.



**Рисунок 12.4– Схема с использованием управляемого источника напряжения**

## Controlled Current Source –управляемый источник тока

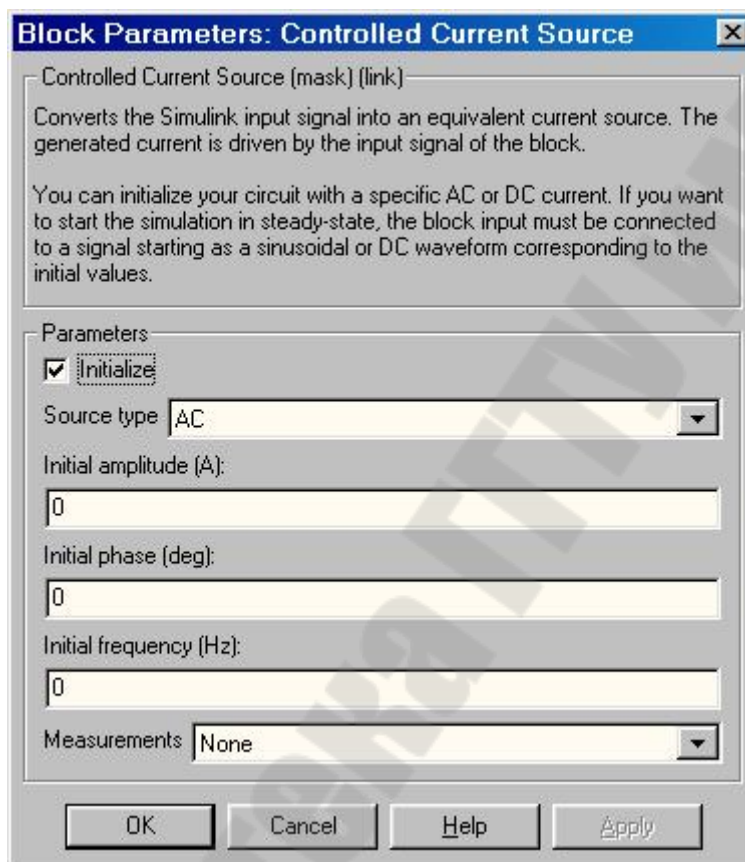
*Пиктограмма:*



*Назначение:*

Вырабатывает ток соответствии с сигналом управления.

*Окно задания параметров:*



Параметры блока:

Initialize:

[Инициализация]. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами - амплитудой, фазой и частотой.

Source type:

[Тип источника]. Тип источника указывается, если требуется инициализация источника. Если инициализация источника не задана, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- AC - источник переменного тока,

- DC - источник постоянного тока.

Initial amplitude (A):

[Начальная амплитуда (A)]. Начальное значение выходного тока источника. Параметр доступен, если задана инициализация источника.

Phase (deg):

[Начальная фаза (град)]. Начальная фаза. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного тока.

Initial frequency (Hz):

[Initial частота (Гц)]. Начальная частота источника. Параметр доступен, источник инициализируется как источник переменного тока.

Measurements:

[Измеряемые переменные]. Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок Multimeter, переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope. Значения параметра выбираются из списка:

- None - нет переменных для отображения,
- Current - выходной ток источника.

Блок является идеальным источником тока, т.е. его собственное сопротивление равно бесконечности.

*Пример:*

На рисунке 12.5 показана схема с использованием управляемого источника тока, формирующего в нагрузке серии синусоидальных импульсов тока.

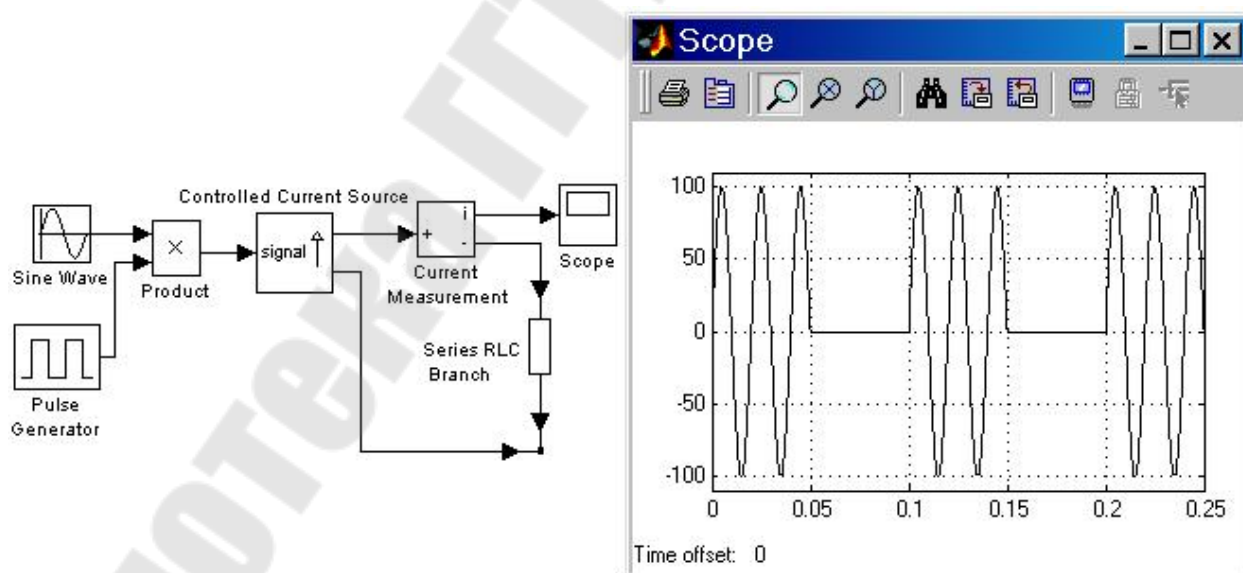
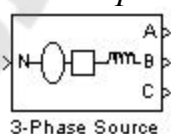


Рисунок 12.5–Схема с использованием управляемого источника тока 3-Phase Source –трехфазный источник напряжения

*Пиктограмма:*



*Назначение:*

Вырабатывает трехфазную систему напряжений.

Параметры блока:

Phase-to-phase rms voltage (V):

[Действующее значение линейного напряжения].

Phase angle of phase A (deg):

[Начальная фаза напряжения в фазе А (град)].

Frequency (Hz):

[Частота (Гц)]. Частота источника.

Internal connection:

[Соединение фаз источника]. Значение параметра выбирается из списка:

- Y - звезда,
- Yn - звезда с нулевым проводом,
- Yg - звезда с заземленной нейтралью.

Specify impedance using short-circuit level:

[Задать собственное полное сопротивление источника используя параметры короткого замыкания]. При установке данного параметра в окне диалога появляются дополнительные графы для ввода параметров короткого замыкания источника.

Source resistance (Ohms):

[Собственное сопротивление источника (Ом)].

Source inductance (H):

[Собственная индуктивность источника (Гн)].

3-Phase short-circuit level at base voltage (VA):

[Мощность короткого замыкания при базовом значении напряжения].

Base voltage (Vrms ph-ph):

[Действующее значение линейного базового напряжения]. Величина базового линейного напряжения источника при котором определена мощность короткого замыкания.

X/R ratio:

[Отношение индуктивного и активного сопротивлений].

При задании импеданса источника через мощность короткого замыкания реактивное сопротивление источника определяется по выражению:

$$X = \frac{U_{кз}^2}{Q_{кз}}$$

где  $Q_{кз}$  - мощность короткого замыкания,

$U_{кз}$  - напряжение источника при котором определена мощность короткого замыкания.

Активное сопротивление источника находится в соответствии с выражением:

$$R = \frac{X}{k}$$

где  $k$  - отношение X к R (параметр X/R ratio).

*Пример:*

На рисунке 12.6 показана схема с использованием трехфазного источника напряжения, подключаемого к несимметричной трехфазной нагрузке. Токи в нагрузке измерены с помощью блока Multimetr.

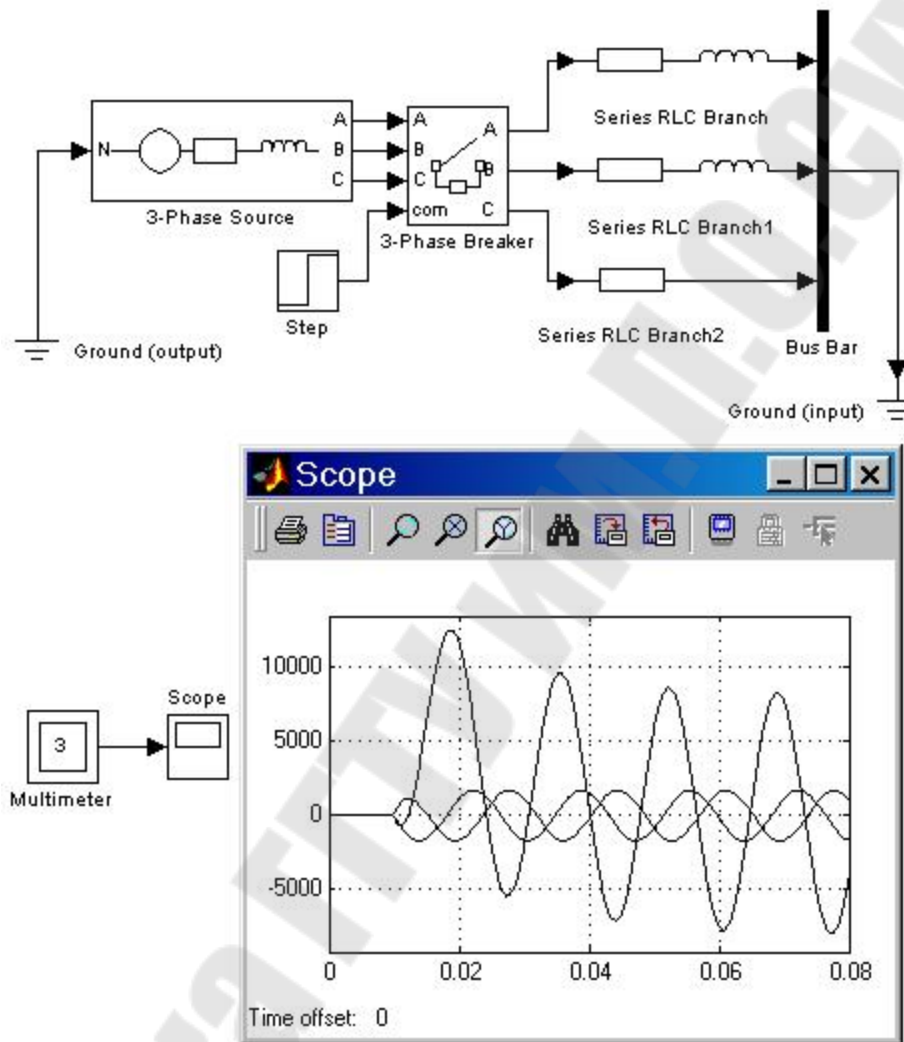
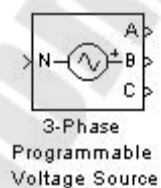


Рисунок 12.6 – Схема с использованием трехфазного источника напряжения

3-Phase Programmable Voltage Source –трехфазный программируемый источник напряжения

*Пиктограмма:*



*Назначение:* Вырабатывает трехфазную систему напряжений с программируемыми во времени изменениями амплитуды, фазы, частоты, а также гармонического состава.

Параметры блока: Positive-sequence: [Amplitude (Vrms Ph-Ph) Phase (degrees) Freq. (Hz)]

[Прямая последовательность: [Амплитуда Фаза (градусы) Частота (Гц)]]

Параметр задается в виде вектора из трех элементов.

Time variation of: [Изменение во времени]. Раскрывающийся список позволяет выбрать параметр источника, который будет изменяться с течением времени. Значение параметра выбирается из списка:

- None - Нет изменяющихся во времени параметров источника,
- Amplitude - Амплитуда,
- Phase - Фаза,
- Frequency - Частота.

Type of variation: [Способ изменения]. Параметр задает вид изменения выбранного параметра источника. Вид изменения выбирается из списка:

- Step - Ступенчатое изменение,
- Ramp - Линейное изменение,
- Modulation - Модуляция,
- Table of time-amplitude pairs - Таблица - 'время-значение'.

Step magnitude: [Уровень ступенчатого сигнала]. Задает величину, на которую ступенчато изменяется выбранный параметр. Изменение величины напряжения задается в относительных единицах (о.е.), фазы - в эл. градусах и частоты - в Гц. Например, если выбрано ступенчатое изменение амплитуды сигнала равное 0.5, то это означает, что величина выходного напряжения источника будет увеличена на 0.5 относительно указанного в первой графе значения. Время в течение которого величина выходного напряжения будет изменена задается в графе Variation timing.

Rate of change (value/s): [Скорость изменения (величина/с)]. Задает скорость изменения параметра источника. Изменение величины напряжения задается в о. е./с, фазы - в эл. градусах/с и частоты - в Гц/с.

Amplitude of the modulation:

[Амплитуда модуляции]. В данной графе задается амплитуда модуляции параметра источника. Амплитуда модуляции напряжения задается в относительных единицах (о.е.), фазы - в эл. градусах и частоты - в Гц.

Frequency of the modulation (Hz):

[Частота модуляции (Гц)].

Variation timing (s): [Start End]

[Время действия изменения [Начало Конец]]. Параметр определяет время начала и время окончания действия изменения выбранного параметра источника. Параметр задается в виде вектора из двух значений (начальное и конечное время).

Fundamental and/or Harmonic generation

[Наложение прямой обратной или нулевой последовательности и/или высших гармоник].

A: [Order(n) Amplitude Phase(degrees) Seq(0, 1 or 2)]

[A: [Гармоника (n) Амплитуда Фаза (град) Последовательность (0, 1 или 2)]]].

В графе задается вектор параметров генерируемой гармоники напряжения: номер гармоники, амплитуда (в относительных единицах), начальная фаза, последовательность (0 - нулевая, 1 - прямая, 2 - обратная). Результирующее выходное напряжение будет являться суммой напряжений заданных в графе Positive-sequence и в данной графе.

B: [Order(n) Amplitude Phase(degrees) Seq(0, 1 or 2)].

[B: [Гармоника (n) Амплитуда Фаза (град) Последовательность (0, 1 или 2)]]].

Параметр задается аналогично предыдущему.

Harmonic timing (s): [Start End]

[Время действия гармоники (с) [Начало Конец]]. В графе задается вектор начального и конечного значения времени для генерации гармоник.

Источник является идеальным источником напряжения (его внутреннее сопротивление равно нулю).

*Пример:* На рисунке 12.7 показана схема с использованием трехфазного программируемого источника напряжения, подключенного к симметричной активной нагрузке. В интервале времени от 0,02 до 0,06 с источник дополнительно генерирует третью гармонику напряжения прямой последовательности с амплитудой 0,5.

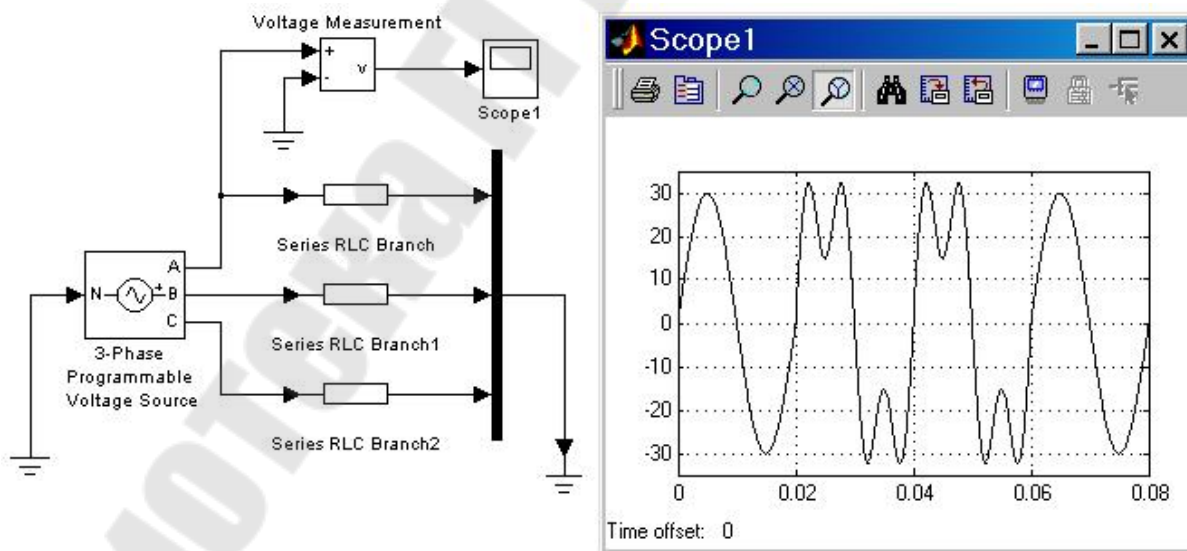


Рисунок 12.7– Схема с использованием трехфазного программируемого источника напряжения

Порядок выполнения работы

1 Запустить Simulink.

- 2 Изучить источники электрической энергии по рисункам 1–7.
- 3 Сохранить результаты моделирования для оформления отчета.

### 3 Требования к отчету

Отчет должен содержать краткие общие сведения, схемы 1–7, графики или рисунки результатов моделирования (результаты моделирования не должны повторяться), выводы.

### 4 Контрольные вопросы

- 1 Расскажите параметрах идеального источника постоянного напряжения.
- 2 Расскажите параметрах идеального источника переменного напряжения.
- 3 Расскажите параметрах идеального источника переменного тока.
- 4 Расскажите параметрах управляемого источника напряжения.
- 5 Расскажите параметрах управляемого источника тока.
- 6 Расскажите параметрах трехфазного источника напряжения.
- 7 Расскажите параметрах трехфазного программируемого источника напряжения.



# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13 – ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

## Цель работы

Исследование статических режимов работы силовых управляемых полупроводниковых выпрямителей.

## Программа работы

Выполнение лабораторной работы заключается в следующем:

- а) изучение устройства и принципа действия лабораторной установки;
- б) изучение основных теоретических положений по теме и содержанию лабораторной работы;
- в) проведение экспериментов и обработка результатов экспериментов;
- г) оформление отчета по лабораторной работе.

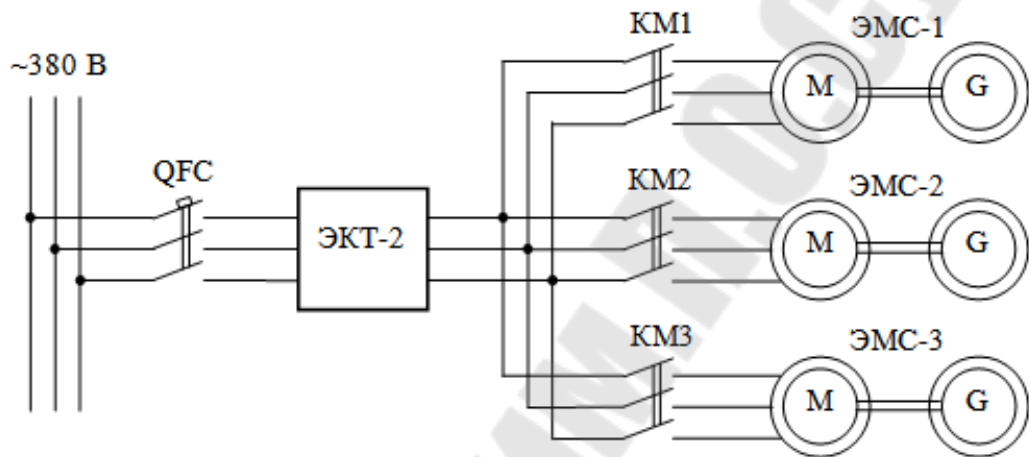
## Описание лабораторной установки

Силовые управляемые выпрямители используются как самостоятельные устройства в качестве индивидуальных источников постоянного регулируемого напряжения, в составе электроприводов постоянного тока и в составе звена постоянного тока преобразователей частоты. Выполнение данной лабораторной работы производится на лабораторной установке, одним из основных узлов которой является комплектный реверсивный электропривод переменного тока типа ЭКТ-2Д-380/25.

Функциональная схема лабораторной установки изображена на рисунке 13.1.

В состав лабораторной установки входят один комплектный электропривод переменного тока типа ЭКТ-2Д-380/25 (в дальнейшем просто преобразователь частоты ЭКТ-2) и три лабораторных стенда. Каждый лабораторный стенд состоит из электромеханической системы ЭМС и панели управления, контроля и сигнализации. Внешний вид и схема панелей контроля, управления и сигнализации на рисунке 13.1 не показаны. Преобразователь частоты ЭКТ-2 получает электропитание от сети трехфазного переменного тока напряжением 380 В через автоматический выключатель QFC, который находится в силовом распределительном пункте СП1. В состав каждой электромеханической

системы входят асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и генератор постоянного тока. Они связаны между собой механическим валом через соединительную муфту. К выходу преобразователя частоты ЭКТ-2 с помощью магнитных пускателей КМ1...КМ3 можно подключить асинхронные двигатели одной, двух или сразу трех электромеханических систем ЭМС-1...ЭМС-3.



**Рисунок 13.1 – Функциональная схема лабораторной установки**

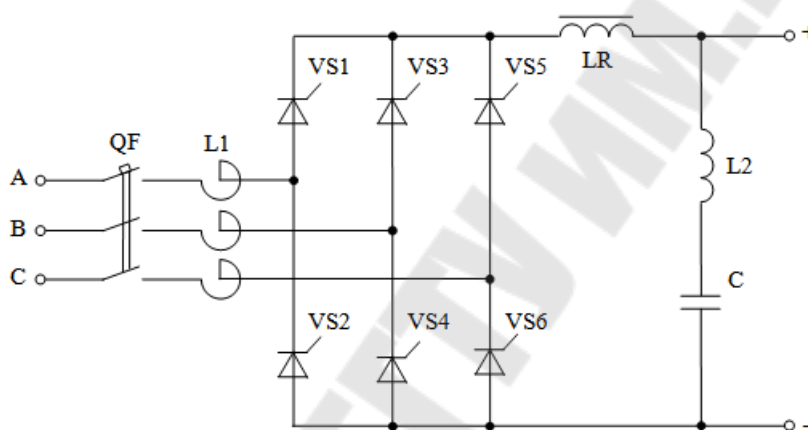
На лицевой стороне каждой из панелей управления, контроля и сигнализации размещены электроизмерительные приборы для измерения напряжения, тока и потребляемой мощности асинхронных двигателей, для измерения напряжения и выходного тока генераторов, автоматический выключатель для подачи тока к обмоткам возбуждения генераторов, выключатели нагрузки генераторов и сигнальные лампы. С задней стороны панелей управления, контроля и сигнализации расположены магнитные пускатели КМ1...КМ3, системы из пяти ламп накаливания мощностью по 200 Вт, которые служат нагрузкой генераторов, токовые реле защиты асинхронных двигателей от перегрузки, панели клеммных зажимов, силовые кабели и соединительные проводники схемы управления, контроля и сигнализации.

Основными элементами силовой части преобразователя частоты ЭКТ-2 являются последовательно соединенные управляемый выпрямитель УВ, который является объектом исследования, и автономный инвертор напряжения АИН. Упрощенная принципиальная схема управляемого выпрямителя изображена на рисунке 2 [1].

В состав управляемого выпрямителя входят вводной автоматический выключатель QF, реактор L1, тиристоры VS1...VS6 и

LC-фильтр, состоящий из дросселя LR, индуктивности L2 и емкости C. Тиристоры VS1...VS6 соединены по схеме трехфазного мостового выпрямителя. При этом тиристоры VS1, VS3 и VS5 образуют катодную группу, а тиристоры VS2, VS4 и VS6 образуют анодную группу. Автоматический выключатель QF служит для местного и дистанционного включения-отключения управляемого выпрямителя от питающей сети и защитного отключения преобразователя частоты при различного рода неисправностях и сбоях в его работе.

Трехфазный реактор L1 выполняет функцию ограничения тока при резких его изменениях и коротких замыканиях. LC-фильтр предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного тока и напряжения, а также для ограничения тока в случае возникновения различных аварийных режимов.



**Рисунок 13.2 – Упрощенная принципиальная схема управляемого выпрямителя**

### **Основные теоретические положения**

Управляемые выпрямители предназначены для преобразования напряжения переменного тока промышленной частоты 50 Гц в постоянный ток с регулируемой величиной выходного напряжения [2]. Принцип действия управляемых выпрямителей заключается в том, что используемые в нем тиристоры выполняют роль электрических ключей, которые пропускают ток в проводящую часть периода и запирают цепи в непроводящую часть периода. Регулирование напряжения осуществляется путем изменения длительности работы тиристоров в проводящую часть периода. В управляемых выпрямителях используются полууправляемые тиристоры, для которых можно

задержать начало пропускания тока в проводящую часть периода, но нельзя прекратить пропускание тока до его естественного перехода через нуль. По этой причине регулирование напряжения на выходе управляемого выпрямителя осуществляется путем задержки момента открытия тиристорov в проводящую часть периода. Сокращение длительности открытого состояния тиристорov в проводящую часть периода характеризуется углом запаздывания открытия  $\alpha$ , который отсчитывается от точки естественного открытия тиристорov (угол  $\beta$ ).

На рисунке 13.3 изображены диаграммы изменения фазных ЭДС  $e_d$  источника питания (а), выпрямленных ЭДС  $e_{d\beta}$ , напряжений  $u_d$  (б) и токов  $i_d$  (в) управляемого выпрямителя в режиме непрерывных токов [3].

На диаграмме изменения ЭДС источников питания (рисунок 13.3а) дополнительно указаны углы естественного открытия тиристорov  $\beta$  и углы запаздывания открытия  $\alpha$  для катодной (выше оси времени) и анодной (ниже оси времени) групп тиристорov. Диаграмма изменения выпрямленной ЭДС показана на рисунке 13.3б сплошной жирной линией. Из анализа данной диаграммы следует, что при увеличении угла открытия  $\alpha$  амплитуда пульсаций выпрямленной ЭДС  $e_d$  становится больше, что приводит к уменьшению величины средней составляющей выпрямленной ЭДС  $E_d$  (на рисунке 13.3б средняя составляющая выпрямленной ЭДС не показана). Диаграммы изменения выпрямленных токов всех трех фаз, изображенных на рисунке 3в, перекрывают друг друга, поэтому результирующий выпрямленный ток  $I_d$  является непрерывным и пульсирующим. Переход в режим прерывистых токов происходит при углах задержки открытия тиристорov больших  $\alpha > 90^\circ$ . Граничный режим и режим прерывистых токов на рисунке 13.3в не показаны.

В режиме непрерывных токов среднее значение выпрямленной ЭДС трехфазной мостовой схемы определяется по формуле [3]

$$E_d = E_{dm} \cos \alpha, \quad (13.1)$$

где  $E_{dm}$  – максимальная величина выпрямленной ЭДС, соответствующая отсутствию запаздывания открывания тиристорov, равная

$$E_{dm} = \frac{E_{2\text{л}m}}{p/m} \sin \frac{p}{m} = \frac{E_{2\text{л}}}{\sqrt{2} p/m} \sin \frac{p}{m}, \quad (13.2)$$

где  $m$  – число фаз управляемого выпрямителя ( $m = 6$ );

$E_{2лм}$  и  $E_{2л}$  – амплитудное и действующее значение линейной ЭДС источника питания.

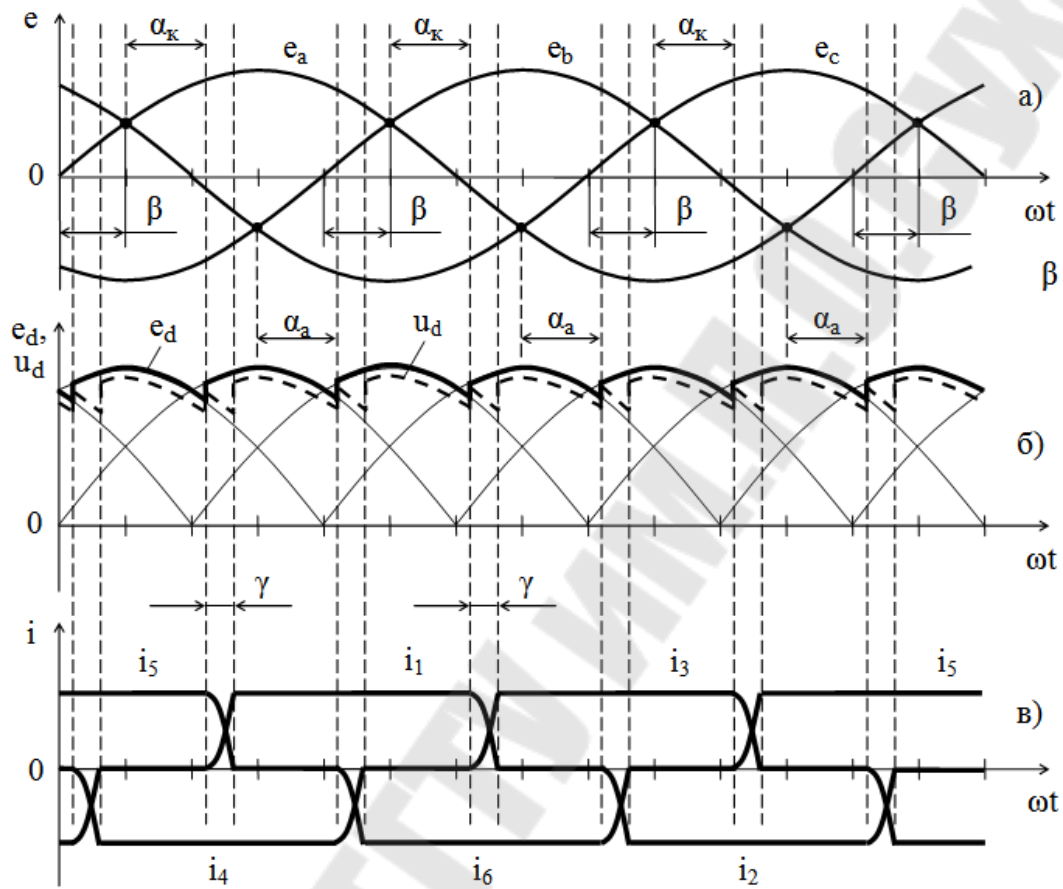


Рисунок 13. 3 – Диаграммы изменения фазных ЭДС, напряжений и токов в тиристорах управляемого выпрямителя

Падение напряжения в управляемом выпрямителе определяется падением напряжения на тиристорах в проводящий период ( $\Delta U_B$ ), падением напряжения на активном сопротивлении ( $\Delta U_R$ ) и падением напряжения, обусловленным процессом коммутации тиристоров ( $\Delta U_X$ ). Падение напряжения на тиристоре в проводящий период практически не зависит от тока и равно  $\Delta U_B = 0,5...1$  В. Падение напряжения на активном сопротивлении пропорционально выпрямленному току и равно

$$\Delta U_R = 2R_{ин} \left( 1 - \frac{r_m}{4p} \right) I_d, \quad (13.3)$$

где  $I_d$  – среднее значение нагрузки управляемого выпрямителя;

$R_{ин}$  – активное сопротивление источника питания управляемого выпрямителя;

$\gamma$  – угол коммутации, который характеризует время открывания и закрывания

тиристоров в реальных условиях.

Угол коммутации  $\gamma$  зависит от множества факторов (угол задержки открытия тиристорov, реактивное сопротивление источника питания, максимальное значение выпрямленной ЭДС, ток нагрузки управляемого выпрямителя). При заданном значении угла задержки открытия  $\alpha$  тиристорov угол коммутации  $\gamma$  в основном определяется выпрямленным током  $I_d$  и определяется по формуле

$$\gamma = \arccos \left( \cos \beta - \frac{m x_{ин} I_d}{p E_{dm}} \right) - \beta. \quad (13.4)$$

На практике, как правило,  $\gamma \ll 4\pi/m$ , поэтому можно принять, что

$$\Delta U_R = 2R_{ин} I_d. \quad (13.5)$$

Падение напряжения на выходе управляемого выпрямителя, обусловленное процессом коммутации тиристорov, определяется следующим образом

$$\Delta U_x = \frac{x_{ин}}{2p/m} I_d = 0,955 x_{ин} I_d. \quad (13.6)$$

С учетом вышеизложенного среднее значение напряжения на выходе двухполупериодного управляемого выпрямителя будет равно

$$U_d = E_{dm} \cos \beta - 2\Delta U_B - R_\gamma I_d, \quad (13.7)$$

где  $R_\gamma = R_{ин} + 0,955 x_{ин}$  – эквивалентное сопротивление управляемого выпрямителя;

$\Delta U_B$  – падение напряжения на одном тиристоре в проводящий период.

Диаграмма изменения выпрямленного напряжения  $u_d$  управляемого выпрямителя изображена на рисунке 3б пунктирной линией. Оно проходит ниже диаграммы изменения выпрямленной ЭДС и учитывает падения напряжений  $\Delta U_B$  и  $\Delta U_R$  тиристорov в проводящие периоды и в периоды коммутации тиристорov  $\Delta U_x$ .

К основным характеристикам управляемых выпрямителей относятся:

а) регулировочные характеристики  $E_d = f(\alpha)$  и  $U_d = f(\alpha)$  при различных значениях выпрямленного тока  $I_d$ ;

б) внешние характеристики  $U_d = f(I_d)$  при различных значениях угла запаздывания открытия тиристорov  $\alpha$ .

### Выполнение работы

Выполнение лабораторной работы производится в несколько этапов в следующей последовательности.

### Ознакомление с системой измерения и органами управления лабораторной стенда

Схема подключения электроизмерительных приборов и органов управления одного лабораторного стенда изображена на рисунке 4.

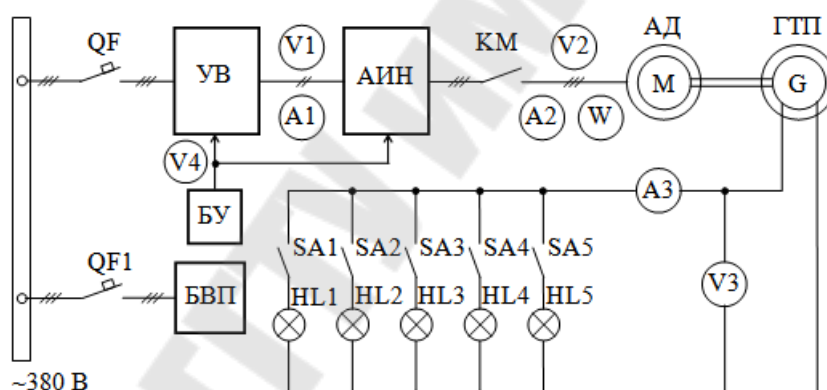


Рисунок 13.4 – Схема подключения измерительных приборов и органов управления

В лабораторном стенде управляемый выпрямитель УВ входит в состав преобразователя частоты ЭКТ-2 и его конечной нагрузкой является система ламп накаливания HL1...HL5, которая передается к выпрямителю через генератор постоянного тока ГПТ, асинхронный двигатель АД и автономный инвертор напряжения АИН.

Для изменения режимов работы управляемого выпрямителя в лабораторном стенде используются следующие органы управления:

а) автоматический выключатель QF с дистанционным управлением. Управление автоматического выключателя QF осуществляется с помощью кнопок «Пуск/Стоп», расположенных на лицевой стороне корпуса преобразователя;

б) автоматический выключатель QF1 с ручным управлением, который установлен внутри корпуса преобразователя частоты ЭКТ-2.

Он предназначен для подключения к питающей сети и защитного отключения блока вторичного питания;

в) магнитный пускатель КМ. Управление магнитным пускателем осуществляется с помощью кнопочного поста «Пуск/Стоп», который расположен с лицевой стороны панели управления, контроля и сигнализации;

г) выключатели SA1...SA5 для подключения ламп накаливания HL1...HL5 к выходу генератора постоянного тока ГПТ в любой комбинации. Они расположены с лицевой стороны панели управления, контроля и сигнализации;

д) переменные резисторы задания частоты («Грубо» и «Точно») блока управления БУ, которые находятся на лицевой стороне корпуса преобразователя частоты.

Система измерения лабораторной установки содержит следующие электроизмерительные приборы:

а) амперметр А1 и вольтметр V1 для измерения тока и напряжения в цепи между управляемым выпрямителем УВ и автономным инвертором напряжения АИН. Они расположены на лицевой стороне корпуса преобразователя частоты;

б) амперметр А2, вольтметр V2 и ваттметр W для измерения тока, напряжения и активной мощности в цепи питания асинхронного двигателя АД. Они расположены с лицевой стороны панели управления, контроля и сигнализации;

в) амперметр А3 и вольтметр V3 для измерения тока и напряжения в выходной цепи генератора постоянного тока ГПТ. Они расположены с лицевой стороны панели управления, контроля и сигнализации;

г) вольтметр V4 для измерения управляющего сигнала преобразователя частоты ЭКТ-2. Он расположен на лицевой стороне корпуса преобразователя частоты.

### **Проверка работоспособности преобразователя частоты ЭКТ-2**

Проверка производится в следующей последовательности:

а) путем включения автоматических выключателей в силовых пунктах СП1 и СП2 руководитель лабораторных работ подает переменное напряжение на лабораторный стенд и включает источник постоянного напряжения для обмотки возбуждения генератора постоянного тока. Схемы силовых пунктов и источников постоянного напряжения для обмоток возбуждения на рисунках не показаны;

б) производится ручное включение автоматического выключателя QF1. При этом через несколько секунд на лицевой стороне корпуса преобразователя частоты ЭКТ-2 загорается сигнальная лампа «Готовность»;



в) производится включение автоматического выключателя QF нажатием соответствующей кнопки «Пуск». При этом через несколько секунд на лицевой стороне корпуса преобразователя частоты ЭКТ-2 загорается сигнальная лампа «Работа»;

г) с помощью переменного резистора задания частоты «Грубо» производится плавное изменение управляющего сигнала от 0 до 8 В, а затем устанавливается его значение, равное 1 В по шкале вольтметра V4. При этом по показаниям вольтметра V1 проверяется изменение напряжения на выходе управляемого выпрямителя.

### **Проверка работоспособности лабораторного стенда**

Сразу после проверки работоспособности преобразователя частоты начинается проверка работоспособности лабораторного стенда в следующей последовательности:

а) производится включение магнитного пускателя КМ нажатием соответствующей кнопки «Пуск». После этого вал электромеханической системы должен медленно вращаться, а приборы A2, V2 и W должны показывать некоторые значения тока, напряжения и потребляемой активной мощности асинхронного двигателя АД;

б) с помощью переменного резистора задания частоты «Грубо» устанавливается значение управляющего сигнала, равное 4 В по шкале вольтметра V4. При этом соответствующим образом должны измениться показания приборов V1, A2, V2 и W;

в) подается постоянное напряжение на обмотку возбуждения генератора с помощью автоматического выключателя «ОВГ». При этом по шкале вольтметра V3 проверяется наличие напряжения на выходе генератора. Автоматический выключатель «ОВГ» на рисунках не показан;

г) производится последовательное подключение ламп накаливания HL1...HL5 к выходу генератора с помощью выключателей SA1...SA5. При этом по показаниям амперметров A2 и A3, по показаниям вольтметров V1, V2 и V3, а также ваттметра W проверяется изменение токов, напряжений и активной мощности.

После окончания проверки лабораторный стенд устанавливается в режим холостого хода (преобразователь частоты остается включенным в работу, управляющий сигнал равен 1 В, отключаются асинхронный двигатель от преобразователя частоты и нагрузка генератора, напряжение возбуждения остается включенным).

### **сигнала допускается в пределах от 0 до 8 В.**

В преобразователе частоты ЭКТ-2 отсутствует возможность непосредственного измерения угла задержки открытия тиристоров  $\alpha$ , однако между управляющим сигналом и углом задержки открытия тиристоров имеет место обратная линейная зависимость. Поэтому регулировочные и внешние

характеристики управляемого выпрямителя можно получить также путем изменения величины управляющего сигнала  $U_y$ .

### Проведение экспериментов

Эксперименты по исследованию статических характеристик управляемых выпрямителей проводятся в следующей последовательности:

а) при управляющем сигнале  $U_y = 1$  В на рабочем стенде нажимается кнопка «Пуск», за счет чего производится включение магнитного пускателя КМ и подключение асинхронного двигателя АД к преобразователю частоты ЭКТ-2;

б) по показаниям вольтметров  $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$  и  $V4$ , амперметров  $A2$ ,  $A3$  и ваттметра  $W$  фиксируются значения измеряемых параметров, которые записываются в протокол эксперимента (специальная таблица);

в) с помощью выключателей  $SA1...SA5$  к выходу генератора последовательно подключаются лампы накаливания  $HL1...HL5$  и после каждого подключения ламп выполняются действия по пункту б);

г) с помощью переменного резистора задания частоты «Грубо» по шкале вольтметра  $V4$  устанавливается новое значение управляющего сигнала  $U_y = 2$  В;

д) с помощью выключателей  $SA1...SA5$  производится последовательное отключение ламп накаливания  $HL1...HL5$  от выхода генератора до полного снятия его нагрузки, а после каждого отключения ламп выполняются действия по пункту б);

е) с помощью переменного резистора задания частоты «Грубо» по шкале вольтметра  $V4$  последовательно устанавливаются значения управляющего сигнала от  $U_y = 3$  В до  $U_y = 8$  В с шагом 1 В;

ж) после каждого изменения управляющего сигнала попеременно выполняются действия по пунктам в и д, а после каждого подключения и отключения ламп накаливания  $HL1...HL5$  производится выполнение действий по пункту б), включая и режимы холостого хода генератора;

з) с помощью выключателей  $SA1...SA5$  производится последовательное отключение ламп накаливания  $HL1...HL5$  от выхода генератора до полного снятия его нагрузки, а с помощью переменного резистора задания частоты «Грубо» по шкале вольтметра  $V4$  управляющий сигнал устанавливается на значение  $U_y = 1$  В.

После окончания экспериментов производится выключение лабораторного стенда в следующей последовательности:

а) отключается напряжение возбуждения генератора с помощью автоматического выключателя «ОВГ»

б) нажатием соответствующей кнопки «Стоп» на лицевой стороне панели управления, контроля и сигнализации производится отключение асинхронного двигателя от преобразователя частоты ЭКТ-2;

в) с помощью переменного резистора задания частоты «Грубо» по шкале вольтметра V4 устанавливается значение управляющего сигнала, равное  $U_y = 0$  В;

г) нажатием соответствующей кнопки «Стоп» управляемый выпрямитель преобразователя частоты ЭКТ-2 отключается от питающей сети;

д) с помощью автоматического выключателя QF1 от питающей сети отключается блок вторичного питания преобразователя частоты ЭКТ-2;

е) с помощью автоматических выключателей в силовых пунктах СП1 и СП2 от питающей сети отключаются преобразователь частоты ЭКТ-2 и источник постоянного напряжения для обмотки возбуждения генератора.

#### **Формирование экспериментальных данных для получения регулировочных характеристик $U_d = f(U_y)$**

Формирование исходных данных для получения регулировочных характеристик управляемого выпрямителя  $U_d = f(U_y)$  заключается в перегруппировке экспериментальных данных, полученных при выполнении предыдущих этапов лабораторной работы. Для этого необходимо выполнить следующее:

а) строится специальная таблица, в которой по строкам располагаются ячейки для значений выпрямленного напряжения  $U_d$  и управляющего сигнала в пределах от  $U_y = 0$  В до  $U_y = 8$  В;

б) строки таблицы разделяются на группы, соответствующие различным значениям выпрямленного тока;

в) из специальных таблиц выбираются экспериментальные данные выпрямленного напряжения  $U_d$  и управляющего сигнала  $U_y$ , соответствующие определенным значениям выпрямленного тока  $I_d$ , которые были получены при проведении предыдущих экспериментов, и переносятся в новую таблицу.

#### **Формирование исходных данных для получения внешних характеристик управляемого выпрямителя $U_d = f(I_d)$**

Формирование исходных данных для получения внешних характеристик управляемого выпрямителя  $U_d = f(I_d)$  при изменении

управляющего сигнала в пределах от  $U_y = 1$  В до  $U_y = 8$  В заключается в перегруппировке экспериментальных данных, полученных при выполнении предыдущих этапов лабораторной работы. Для этого необходимо выполнить следующее:

а) строится специальная таблица, в которой по строкам располагаются ячейки для значений выпрямленного напряжения  $U_d$  и выпрямленного тока  $I_d$ ;

б) строки таблицы разделяются на группы, соответствующие различным значениям управляющего сигнала от  $U_y = 0$  В до  $U_y = 8$  В;

в) из специальных таблиц выбираются экспериментальные данные выпрямленного напряжения  $U_d$  и тока  $I_d$ , соответствующие определенным значениям управляющего сигнала  $U_y$ , которые были получены при проведении предыдущих экспериментов, и переносятся в новую таблицу.

### Метрологическое обеспечение лабораторной работы

В процессе проведения экспериментов измерение параметров проводится с помощью приборов, каждый из которых имеет определенный класс точности. Величина класса точности указана на шкале электроизмерительного прибора или в его техническом описании. Класс точности представляет собой максимальную абсолютную погрешность, приведенную к пределу измерения прибора [4]

$$K_x = \frac{\Delta x_{\max}}{x_m} \cdot 100\%, \quad (13.8)$$

где  $K_x$  – класс точности электроизмерительного прибора, %;  
 $\Delta x_{\max}$  – максимальная абсолютная погрешность измерения;  
 $x_m = x_{\max} - x_{\min}$  – пределы измерения прибора.

Из формулы (8) следует, что погрешность измерения электрических параметров будет равна

$$\Delta x = \Delta x_{\max} = \frac{K_x \cdot x_m}{100\%}. \quad (13.9)$$

Фактические значения измеряемых величин будут находиться в пределах

$$x = x_{и} \pm \Delta x, \quad (13.10)$$

где  $x_{и}$  – показание электроизмерительного прибора.

Для вычисления погрешности расчетных данных используется выражение для оценки погрешности функции приближенных аргументов [4]

$$\Delta u = \sum_{i=1}^n \left| \frac{df(x)}{dx_i} \right| \cdot \Delta x_i, \quad (13.11)$$

где  $df(x)/dx_i$  – частные производные от расчетной формулы  $u = f(x)$  по измеряемым

параметрам  $x_i$ ;

$n$  – количество измеряемых величин, входящих в расчетную формулу  $u = f(x)$ .

Фактические значения расчетных величин будут находиться в пределах

$$u = u_{и} \pm \Delta u. \quad (13.12)$$

### **Обработка результатов экспериментов**

Обработка результатов экспериментов заключается в следующем:

а) построение графиков регулировочных и внешних характеристик управляемого выпрямителя с использованием полученных экспериментальных данных;

б) аппроксимация графиков регулировочных и внешних характеристик управляемого выпрямителя на основании полученных экспериментальных данных одним из методов интерполяции (линейной или квадратичной) [5];

в) расчет погрешности аппроксимации по наибольшему отклонению между экспериментальными и расчетными характеристиками управляемого выпрямителя;

г) расчет погрешности измерений и вычислений по формулам (9) и (11).

Так как управляющий сигнал связан с углом запаздывания открытия тиристорov управляемого выпрямителя обратной зависимостью, то при построении графиков регулировочных характеристик значения управляющего сигнала следует располагать в

убывающей последовательности, что эквивалентно увеличению угла запаздывания открытия тиристорov.

### **Оформление отчета**

Отчет по лабораторной работе необходимо оформлять в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95 «Общие требования к текстовым документам». Отчет должен содержать:

а) титульный лист установленной формы для отчетов по лабораторным работам в соответствии с требованиями СКФ;

б) пояснительную записку, в которой должны быть указаны цель и программа работы, приведены описание лабораторной установки (в случае необходимости привести одну из схем лабораторной установки), основные теоретические положения по теме и содержанию лабораторной работы (в кратком изложении), порядок выполнения работы, расчетные формулы, таблицы с экспериментальными и расчетными данными, графики и выводы по лабораторной работе.

При защите лабораторной работы необходимо ответить на все вопросы, которые касаются устройства и принципа действия лабораторной установки, теоретических основ, содержания и выполнения лабораторной работы, обработки и анализа экспериментальных данных, а также ответить на контрольные вопросы, которые приведены в методических указаниях.

### **Контрольные вопросы**

1 Назначение управляемых выпрямителей и области их применения

2 Структура лабораторной установки и лабораторного стенда

3 Характер нагрузки управляемого выпрямителя в лабораторном стенде

4 Топология, принцип работы и вольтамперная характеристика тиристорov

5 Топология и принцип работы управляемых выпрямителей

6 Определение и диапазон изменения угла запаздывания открытия тиристорov

7 Определение и диапазон изменения угла коммутации тиристорov

8 Принцип построения диаграммы выпрямленной ЭДС и напряжения

9 Принцип построения диаграммы выпрямленного тока

10 Определение регулировочных характеристик управляемых выпрямителей

11 Определение внешних характеристик управляемых выпрямителей

12 Порядок проведения экспериментов по снятию регулировочных характеристик

13 Порядок проведения экспериментов по снятию внешних характеристик

14 Характеристика системы измерения лабораторной установки

15 Характеристика органов управления лабораторной установки

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14 – ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ И ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

## Цель работы

Ознакомиться с методикой проведения термического анализа чистых металлов и градуировки термопар.

## Задание

1. Произвести термический анализ чистых металлов и построить для них кривые охлаждения.
2. По кривым охлаждения определить значения ЭДС, характеризующие температуры кристаллизации чистых металлов.
3. Построить градуировочную кривую для хромель-алюмелевых термопар.

## Основные сведения

Переход металла из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллов называется кристаллизацией. Особенностью перехода из жидкого состояния в твердое является то, что в чистых металлах он протекает при постоянных температурах, которые зависят от природы металла и давления.

Расположение атомов в жидкости характеризуется отсутствием дальнего порядка, т.е. отсутствием правильного расположения атомов, периодически повторяющегося в трех измерениях.

Внутренняя энергия неупорядоченной жидкости больше упорядоченного строения твердого тела, поэтому при переходе из одного состояния в другое наблюдается выделение (или поглощение) тепла.

Теплота, выделяющаяся при переходе металла из жидкого состояния в твердое, называется скрытой теплотой плавления. Температура кристаллизации определяется как температура, при которой свободные энергии жидкой и твердой фаз равны. Изменение свободной энергии жидкого и твердого состояний зависит от температуры (рисунок 1).

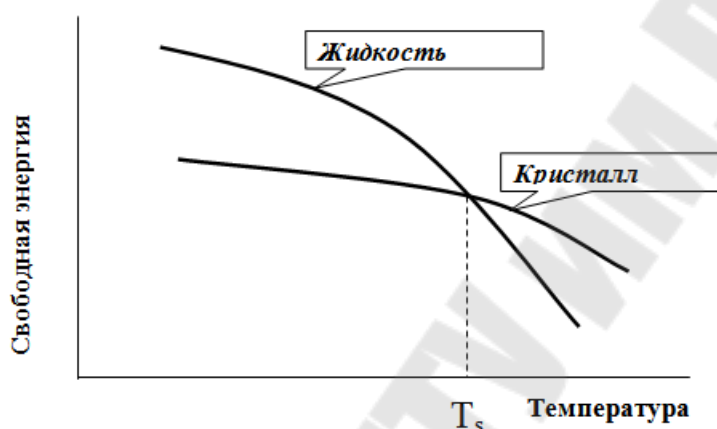
Температура  $T_s$  называется равновесной температурой кристаллизации (плавления). Процесс кристаллизации при этой температуре не происходит, т.к. в этих условиях свободные энергии жидкого и твердого состояний равны.

Процесс кристаллизации начинается, когда возникает разность свободных энергий, которая образуется вследствие меньшей свободной энергии твердого металла по сравнению с жидким. Следовательно, для

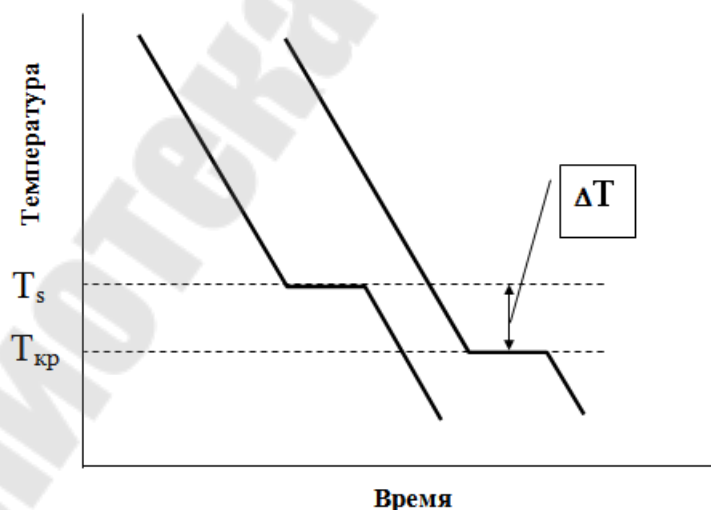


перехода металла из жидкого состояния в твердое необходимо переохлаждение ниже равновесной температуры кристаллизации.

Для проведения термического анализа испытуемый металл, если определяют температуру кристаллизации, помещают в тигель и доводят до плавления. После этого металл медленно охлаждают с постоянной скоростью и через равные промежутки времени замеряют его температуру. Для измерения высоких значений температур обычно используют термоэлектрические пирометры. Термоэлектрические пирометры состоят из термопары и регистрирующего устройства (милливольтметра, потенциометра).



**Рисунок 14.1 – Изменение свободной энергии жидкого и кристаллического состояния металла в зависимости от температуры**



**Рисунок 14.2 – Кривые охлаждения при кристаллизации**

Термопара состоит из двух проволочек разных металлов или сплавов и обладает тем свойством, что если соединить (сварить) одни концы проволочек, а другие присоединить к гальванометру, то при нагреве спая возникает электродвижущая сила, вызывающая отклонения стрелки гальванометра. Величина электродвижущей силы зависит от состава материала термопары и температуры замкнутых концов цепи. Результирующая ЭДС тем больше, чем больше разность температур горячего и холодного спая. При постоянной температуре одного из концов, выведенных к измерительному прибору (называемого холодным спаем), результирующая ЭДС определяется температурой второго конца (горячего спая), который вводится в расплавленный металл.

В качестве термопары применяют следующие сочетания металлов: платинородий (10% Rh) - платина (ПП1) ; платинородий (30% Rh ) - платинородий (6 % Rh ) (ДР30/6), хромельалюмель (ХА); хромелькопель(ХК).

**Таблица 14.1 –Химический состав сплавов для термопар**

Хромель	Алюмель	Константан	Платинородий
Ni - 89,0 % Cr - 9,8 % Fe - 1,0 % Mn - 0,2 %	Ni - 94 % Al - 2 % Si - 1,0 % Fe - 0,5 % Mn - 2,5 %	Ni - 40 % Cu - 59 % Mn - 1 %	Pt - 90 % Rh - 10 %

**Таблица 14.2 – Область применения термопар**

Термопара	Температурный предел, °С
Медь- константан	400
Серебро-константан	600
Железо-константан	650
Хромель-алюмель	900
Платина-платинородий	1600

Горячий спай термопары, защищенный огнеупорным колпачком от соприкосновения с жидким металлом, опускается в металл с таким расчетом, чтобы спай находился в середине объема металла, что позволяет характеризовать его действительную температуру. Холодный спай термопары выводят к измерительным приборам. По показаниям этих приборов - по отдельным замерам температуры через

определенные промежутки времени получают графики  $T=f(\tau)$ , в координатах ЭДС - время (рис.2).

На кривой охлаждения можно выделить три участка:

- 1 - охлаждение металла в жидком состоянии,
- 2 - период кристаллизации,
- 3 - охлаждение металла в твердом состоянии.

На кривой охлаждения при кристаллизации появляется горизонтальная площадка (остановка в падении температуры), причиной которой является выделение скрытой теплоты кристаллизации.

Фактическая температура кристаллизации ниже теоретической температуры. Разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации называется степенью переохлаждения

$$\Delta T = T_s - T_{кр}$$

Степень переохлаждения зависит от природы, чистоты металла и скорости охлаждения. Чем больше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения, и процесс кристаллизации протекает при температурах, лежащих значительно ниже теоретической температуры кристаллизации.

Механизм кристаллизации состоит в образовании центров кристаллизации и последующем их росте.

При достижении температуры кристаллизации в жидком металле возникают мельчайшие частицы кристаллов, называемые "зародышами" или "центрами кристаллизации", из которых с определенной скоростью растут кристаллы. Пока кристаллы окружены жидкостью, они имеют правильную форму. При столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается. Форма кристаллов зависит от условий их соприкосновения в процессе роста.

Скорость процесса кристаллизации зависит от скорости зарождения центров кристаллизации (ч.ц) и скорости роста кристаллов из этих центров (с.к.). Число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов определяются степенью переохлаждения.

С увеличением степени переохлаждения с.к. и ч.ц. возрастают, достигают максимума при определенной степени переохлаждения, после чего снижаются (рис.3).

Размер образовавшихся кристаллов зависит от числа центров кристаллизации и скорости роста кристаллов при данной степени переохлаждения. При небольших степенях переохлаждения в жидкости образуется малое количество центров кристаллизации, а скорость роста

кристаллов из этих центров велика, в результате образуются немногочисленные крупные кристаллы. С увеличением степени переохлаждения число центров кристаллизации увеличивается и размер зерна в затвердевшем металле уменьшается. Для получения высоких механических, в частности, прочностных свойств желательно получение мелкозернистой структуры.

Зависимость между ЭДС в мВ и температурой в  $^{\circ}\text{C}$  устанавливают по результатам построения градуировочной кривой, т.е. проводят градуировку термопар.

Градуированную кривую строят по известным температурам плавления (кристаллизации) чистых металлов и соответствующим им значениям ЭДС, определяемым по экспериментальным кривым охлаждения.

### Методика проведения работы

В экспериментах используются чистые металлы: олово, свинец, цинк, сурьма.

1. Тигель с металлом установить в электропечь и нагревать несколько выше температуры плавления исследуемого металла.

2. В расплавленный металл опустить термопару, защищенную огнеупорным колпачком..

3. Печь выключить. Металл охлаждается вместе с печью.

4. С момента начала охлаждения показания милливольтметра через каждые 30 секунд записывать в табличной форме.

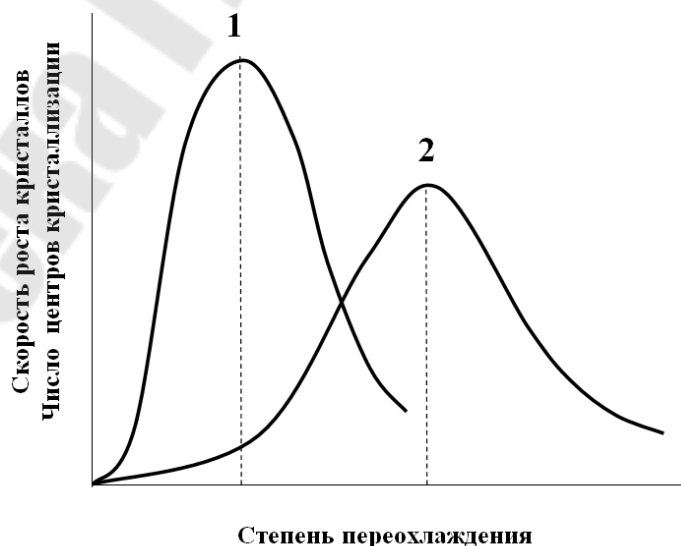


Рисунок 14.3 – Скорость роста кристаллов (1) и число центров кристаллизации (2) в зависимости от степени переохлаждения металла

**Таблица 14.3**

Номер опыта	Показания милливольтметра мВ	Примечания

Порядок оформления отчета

В отчете приводятся:

1. Цель работы и задание по ее выполнению.
2. Краткие сведения по теории кристаллизации металлов.
3. Результаты измерения ЭДС для всех исследуемых металлов в табличной форме (табл. 3).
4. Кривые охлаждения в координатах: ЭДС - время.
5. Таблица со значениями ЭДС кристаллизации исследуемых металлов (табл. 4).

**Таблица 14.4**

Металл	Температура плавления, °С	ЭДС кристаллизации мВ
олово	232	
свинец	327	
цинк	419	
сурьма	630	

6. График - градуировочная кривая для хромель-алюмелевой термопары.

#### **Контрольные вопросы**

1. Что называется равновесной температурой кристаллизации.
2. В чем сущность термического анализа.
3. Опишите механизм кристаллизации.
4. Для чего используют термопары на металлургических агрегатах.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №15 – ЛОКАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ НА БАЗЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГУЛЯТОРА РП4-ТМ1

**Цель лабораторной работы.** Ознакомление с функциональными возможностями САР температуры электрической печи на базе промышленного регулятора РП4-Т-М1. Определение оптимальных параметров настройки регулятора. Приобретение практических навыков по настройке регулятора на процесс.

### **Описание лабораторного стенда**

Современные электрические средства автоматического регулирования разрабатываются по агрегировано-блочному принципу. Блоки образуют агрегированный комплекс технических средств (КТС), с помощью которого для конкретного технологического объекта путем набора определенных блоков проектируют автоматическую систему регулирования с требуемыми статическими и динамическими свойствами.

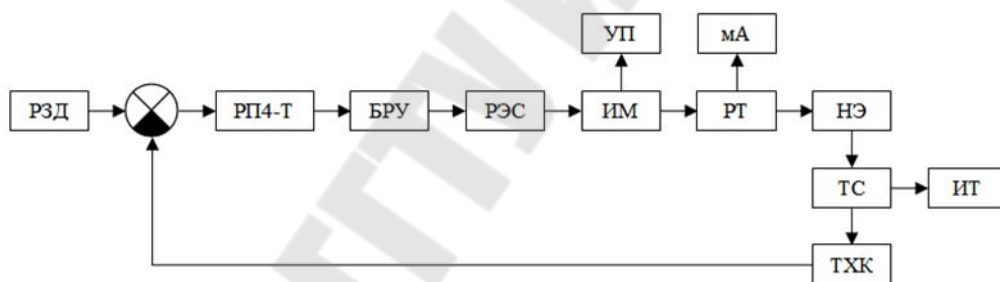
Каждый блок КТС выпускается заводами приборостроительной промышленности в виде конструктивно законченного изделия. При автоматизации технологических процессов в настоящее время наиболее широкое применение находят агрегированные комплексы электрических средств регулирования АКЭСР, АКЭСР-2 и др.

Рассматриваемый лабораторный стенд локальной САР температуры электрической печи реализован на базе комплекса технических средств, входящих в состав агрегированного комплекса электрических средств регулирования АКЭСР-2. Это такие технические средства, как блок ручного управления БРУ-32 и блок «ручной задатчик» РЗД-12, входящие в группу устройств оперативного управления, а также регулирующий блок РП4-Т, входящий в группу регулирующих устройств системы АКЭСР-2.

Структурная схема лабораторного стенда локальной системы автоматического регулирования температуры печи представлена на рисунке 13.1.

Сигнал от термоэлектрического преобразователя температуры типа «хромель-копель» ТХК и сигнал задания, формируемый задатчиком РЗД-12, поступает на вход регулирующего прибора РП4-Т. На входе регулирующего прибора РП4-Т формируется сигнал рассогласования. Управление объектом от регулирующего прибора РП4-Т может осуществляться как автоматически, так и дистанционно. Переключение это осуществляется ключом выбора режимов блока

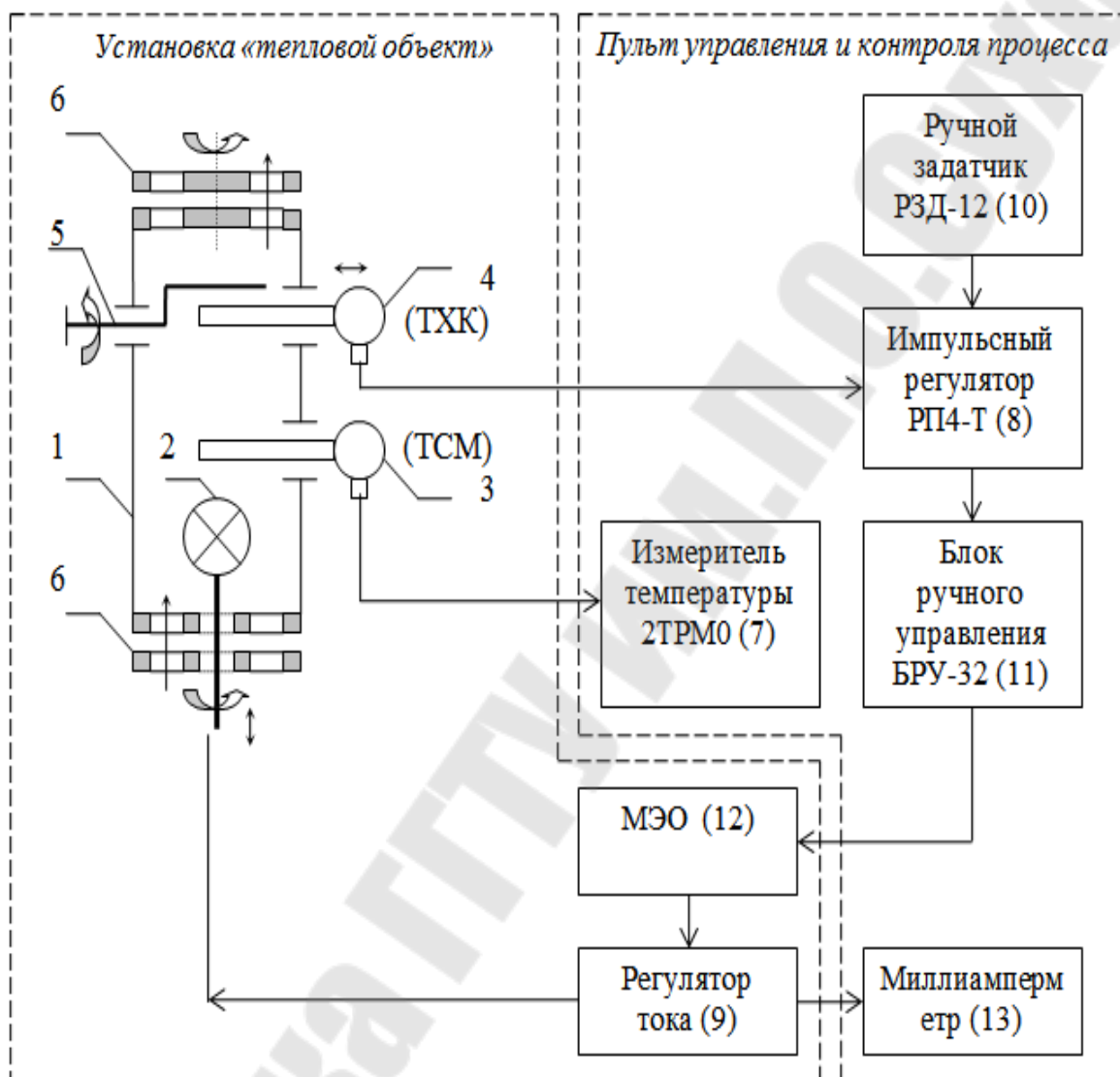
управления БРУ-32. В автоматическом режиме сигнал рассогласования обрабатывается в регуляторе РП4-Т в соответствии с ПИ-законом регулирования и через ключ блока ручного управления БРУ-32, установленный в положение «автоматическое», поступает на электромагнитное реле РЭС, которое управляет исполнительным механизмом МЭО. В качестве исполнительного механизма служит реверсивный электродвигатель СД-54, через вал которого происходит воздействие на регулятор тока РТ, через который, в свою очередь, осуществляется питание нагревательного элемента (лампы накаливания). В режиме ручного управления через ключ блока ручного управления БРУ-32, установленный в положение «ручное», сигнал формируется путем нажатия кнопок «Больше» и «Меньше», встроенных в панель управления БРУ-32. Сигнал от датчика положения УП исполнительного механизма МЭО поступает на индикатор, встроенный в панель блока БРУ-32. Регулятор тока РТ включен последовательно с нагревательным элементом НЭ и величина тока регистрируется миллиамперметром МА.



РЗД – ручной задатчик РЗД-12; РП4-Т – регулирующий прибор;  
 БРУ – блок ручного управления БРУ-32; РЭС –  
 электромагнитное реле РЭС-22; ИМ – исполнительный механизм СД-  
 54; УП – указатель положения; РТ – регулятор тока; МА –  
 миллиамперметр; НЭ – нагревательный элемент; ТС – датчик  
 температуры (термосопротивление медное); ИТ –  
 микропроцессорный измеритель температуры типа 2ТРМ0; ТХК –  
 датчик температуры (термопара «хромель-копель»).

Информация в виде сигнала о текущем значении температуры теплового контура поступает от термопреобразователя сопротивления медного ТСМ-50 на двухканальный микропроцессорный измеритель температуры ИТ типа 2ТРМ0 и регистрируется на светодиодном дисплее измерителя. Использование разных датчиков температуры, термоэлектрического преобразователя типа ТХК для работы с регулятором РП4-Т и термопреобразователя сопротивления типа ТСМ-

50 для работы с микропроцессорным измерителем типа 2ТРМ0, обусловлено исполнением измерителя.



**Рисунок 15.1 – Структурная схема лабораторного стенда.**

Функциональная схема лабораторного стенда локальной САР представлена на рисунке 15.2.

Принципиальная электрическая схема установки «тепловой объект» представлена на рисунке 15.3.



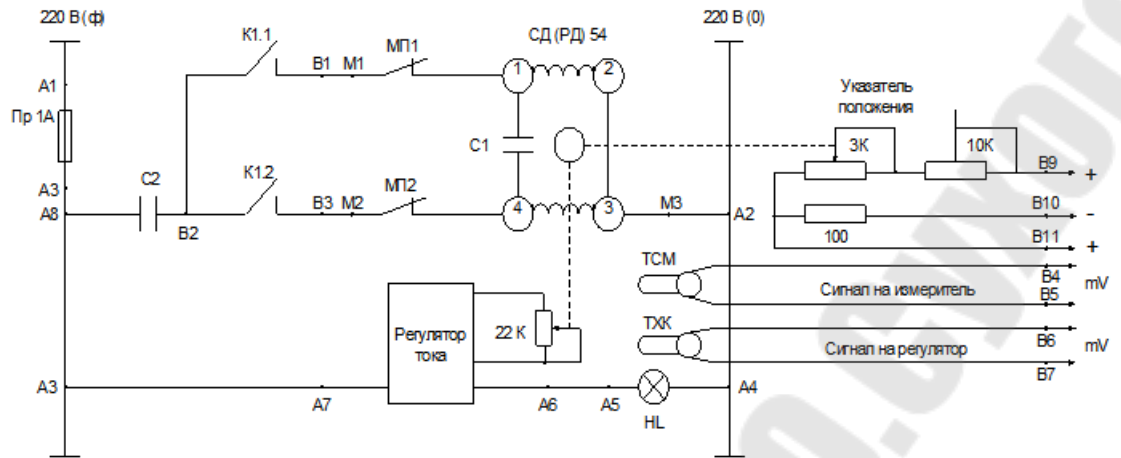


Рисунок 15.2 – Функциональная схема лабораторного стенда.

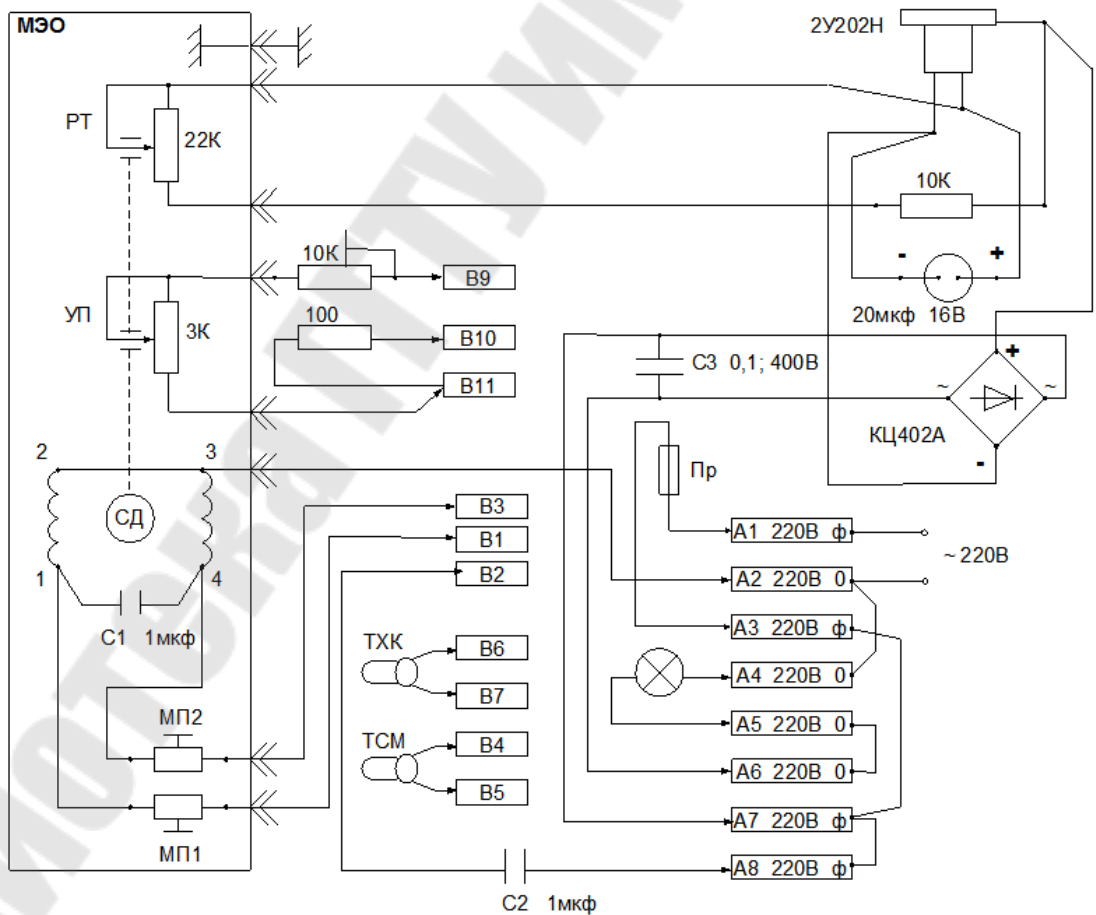


Рисунок 15.3 – Принципиальная электрическая схема установки «тепловой объект»

Конструктивно лабораторный стенд состоит из *установки «тепловой объект»* и *пульты управления и контроля процесса* регулирования температуры печи, которые соединены между собой с помощью многожильного кабеля.

*Установка «тепловой объект»* состоит из пустотелого корпуса печи (1), в котором расположена на штоке лампа накаливания (2), служащая источником тепла. Над лампой накаливания в верхней части корпуса печи установлены датчики температуры типа термосопротивление ТСП (3) и термопара ТХК (4). Над датчиками температуры расположен экран (5), а в основании корпуса печи и в верхней его части предусмотрены жалюзи (6), с помощью которых можно изменять температуру в печи за счет конвекции воздушных потоков. Конструкция штока позволяет изменять расстояние между лампой накаливания и датчиками температуры. Сигналы о текущем значении температуры поступают с термосопротивления на микропроцессорный измеритель температуры (7), а с термопары через коробку холодных спаев КХС4 – на вход регулирующего устройства РП4-Т (8). Напряжение на лампу накаливания поступает от регулятора тока (9), который собран на электронных элементах 2У202Н и КЦ402А. Управление регулятором тока осуществляется от переменного сопротивления 22 кОм, которое расположено с одной стороны вала исполнительного механизма (МЭО). С другой стороны вала МЭО установлено переменное сопротивление 3 кОм, которое выполняет роль указателя положения исполнительного механизма, сигнал с которого поступает на индикатор блока ручного управления БРУ-32. Исполнительный механизм в свою очередь управляется в импульсном режиме от регулятора РП4-Т. Вал МЭО приводится в движение от электродвигателя СД-54 посредством червячной передачи. Реверсирование электродвигателя СД-54 осуществляется замыканием контакта В2 (синий провод) с контактом В1 (красный провод) или с контактом В3 (зеленый провод). Конденсатор С2 (1мкф) понижает напряжение питания электродвигателя СД-54 с 220 В до 127 В. Микропереключатели МП1 и МП2 выполняют роль конечных выключателей для электродвигателя СД-54. В установке «тепловой объект» используется лампа накаливания мощностью 60 Вт. Возможно применение лампы накаливания другой мощности, лишь бы величина тока не превышала допустимую для электронного элемента КЦ402А.

*Пульт управления и контроля процесса* состоит из средств контроля за процессом регулирования температуры печи: миллиамперметра (13) и микропроцессорного измерителя температуры 2ТРМ0 (7); и комплекса технических средств, входящих в состав

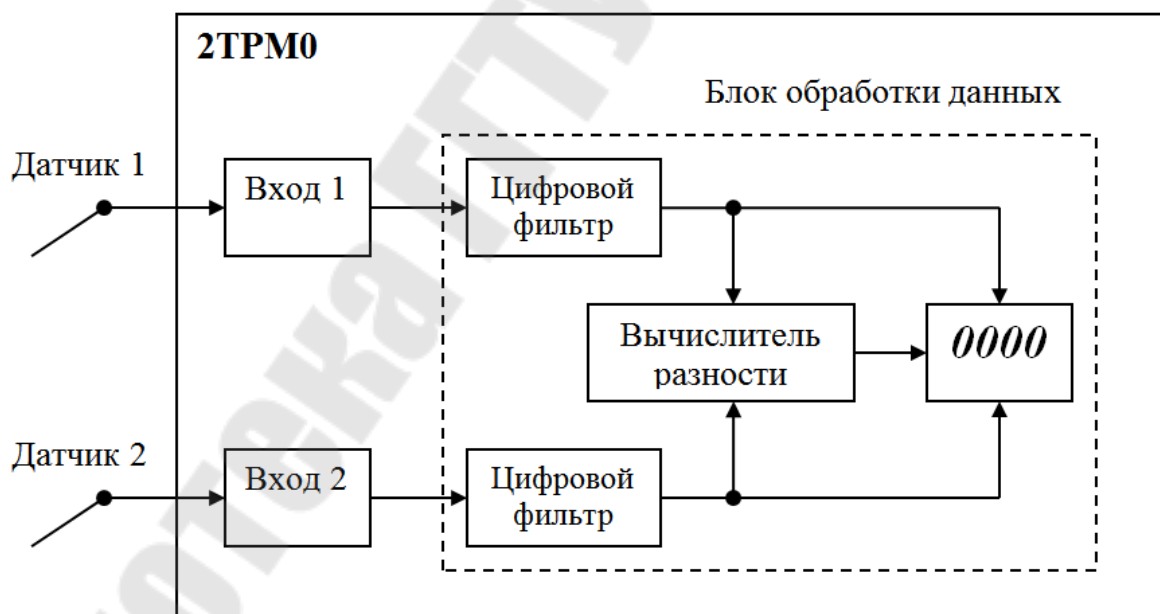
АКЭСР-2: блока «ручной задатчик» РЗД-12 (10), регулирующего прибора РП4-Т (8) и блока ручного управления БРУ-32 (11).

*Миллиамперметр* (шкала 0 – 40 мА) предназначен для измерения величины постоянного тока на регуляторе тока.

*Микропроцессорный программируемый измеритель типа 2ТРМ0* совместно с датчиком температуры ТС125-50М предназначен для измерения температуры в печи и отображения текущего значения измеряемого параметра на встроенном светодиодном цифровом индикаторе. Функциональные параметры прибора задаются пользователем при программировании и сохраняются при отключении питания в энергозависимой памяти.

Функциональная схема двухканального микропроцессорного измерителя типа 2ТРМ0 представлена на рисунке 4.

Прибор имеет два входа для подключения первичных преобразователей (датчиков), блок обработки данных, состоящий из измерителей физических величин и разности между ними и цифрового фильтра, а также светодиодный индикатор для отображения информации.



**Рисунок 15.4 – Функциональная схема прибора 2ТРМ0.**

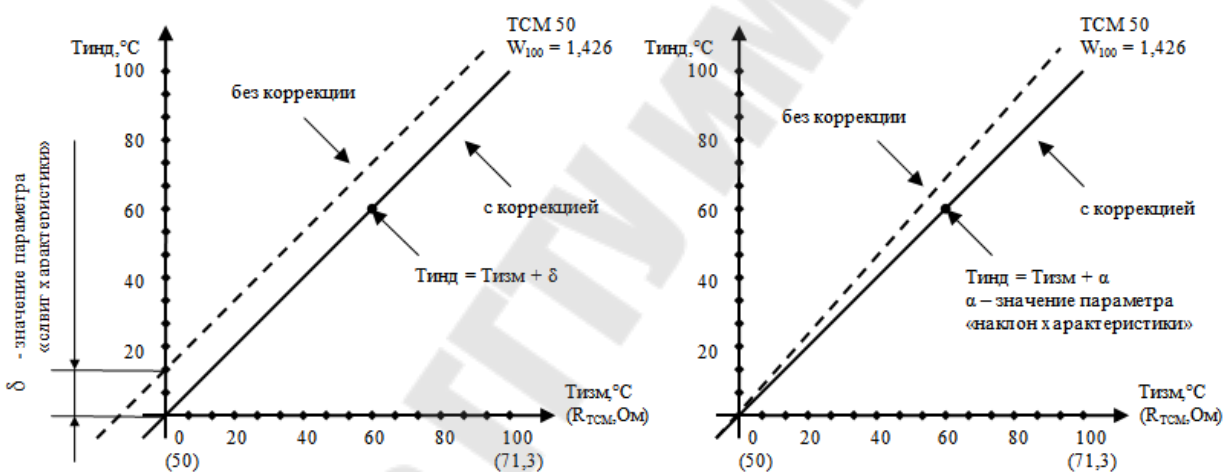
Электрическое питание микропроцессорного программируемого измерителя осуществляется переменным однофазным напряжением 220 В 50 Гц. Потребляемая мощность не более 6 ВА.

Преобразование сигнала в текущее цифровое значение измеряемой температуры производится в измерителе Т1.

Поскольку большинство датчиков температуры имеют нелинейную зависимость выходного сигнала от температуры в измерителях заложены таблицы коррекции показаний для всех типов датчиков, которые могут быть подключены к прибору.

Вычисленные прибором значения могут быть откорректированы пользователем с целью устранения начальной погрешности преобразования входных датчиков. Эти погрешности устраняются путем ввода корректирующих значений.

В приборе заложены два параметра, позволяющие осуществлять сдвиг и изменение наклона измерительной характеристики прибора на заданную величину. Сдвиг и изменение наклона измерительной характеристики представлены на рисунке 15.5.



**Рисунок 15. 5 – Сдвиг и изменение наклона измерительной характеристики**

К каждому вычисленному значению измеренной величины прибавляется значение, заданное программируемыми параметрами b1-1 и b2-1 для первого и второго каналов измерения соответственно. Эти параметры используются для компенсации погрешностей, вносимых сопротивлениями подводящих проводов (при подключении термопреобразователей сопротивления по двухпроводной схеме), а также при отклонении у термопреобразователя сопротивления значения  $R_0$  ( $R_0$  – сопротивление датчика при 0 °C).

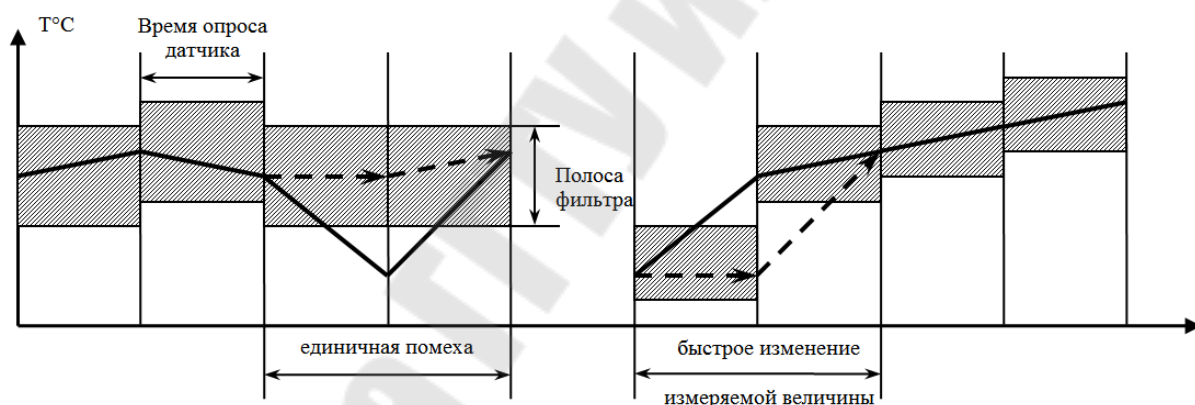
Скорректированное «сдвигом» значение умножается на поправочный коэффициент, задаваемый программируемыми параметрами b1-2 и b2-2 для первого и второго каналов измерения соответственно. Этот коэффициент близок к единице и находится в

пределах 0.900...1.100. Используется, как правило, для компенсации погрешностей самих датчиков, например, при отклонении значения  $W_{100}$  у термопреобразователя сопротивления ( $W_{100}$  - отношение сопротивления датчика при 100 °С к его сопротивлению при 0 °С).

Для улучшения эксплуатационных качеств в блок обработки входных сигналов введен цифровой фильтр, позволяющий уменьшить влияние случайных помех на измерение контролируемых величин. Параметр b0-2, называемый полосой цифрового фильтра, позволяет защитить измерительный тракт от единичных помех.

Полоса фильтра задается в единицах измеряемой величины. Если полученное значение отличается от предыдущего на величину, большую, чем установлено в этом параметре, то прибором производятся повторные измерения, до тех пор, пока полученное значение не попадает в заданную полосу. В течение всего этого времени на цифровом индикаторе остается старое значение измеренной величины.

Графическое изображение принципа работы цифрового фильтра представлено на рисунке 15.6.



**Рисунок 15.6 – Полоса цифрового фильтра**

Вывод текущих значений измеряемой величины на цифровом индикаторе осуществляется в одном режиме: «0» - фиксированный Т1. На индикацию выводятся показания только первого канала измерения. Режим работы индикации задается при программировании функциональных параметров прибора путем установки соответствующего значения параметра b0-4.

Кнопка «ПРОГ» предназначена для входа в режим просмотра и установки параметров, а также для записи новых установленных значений в энергонезависимую память прибора.

Кнопки «▲» и «▼» предназначены при установке параметров для выбора и увеличения или уменьшения значения параметра. При удержании кнопки скорость изменения возрастает.

Вход в режим «УСТАНОВКА ПАРАМЕТРОВ» осуществляется нажатием и удержанием кнопки «ПРОГ» более 6 с. Если в течение 20 с в режиме «УСТАНОВКА ПАРАМЕТРОВ» не производится операций с кнопками, прибор автоматически возвращается в режим «РАБОТА».

Блок «ручной задатчик» РЗД-12 предназначен для выполнения операций ручной установки задания для регулирующего прибора РП4-Т.

Выходной сигнал задатчика – плавное изменение коэффициента деления потенциометра с сопротивлением 10 кОм. Задатчик представляет собой потенциометр, сопротивление на выходе которого изменяется от 0 до 10 кОм. Задатчик РЗД-12 мощности не потребляет.

На передней панели задатчика расположена ручка задания, с помощью которой, устанавливаются выходные сигналы, оцениваемые по шкале 0-100 %. Потенциометр откорректирован таким образом, что 20 % шкалы задатчика соответствуют ~ 20 °С, 50 % шкалы задатчика соответствуют ~ 80 °С, 80 % шкалы задатчика соответствуют ~ 115 °С.

Блок ручного управления БРУ-32 предназначен для переключения цепей управления исполнительными устройствами и индикации положений цепей управления.

Блок ручного управления БРУ-32 обладает следующими функциональными возможностями: ручное переключение с автоматического режима управления на ручной и обратно; кнопочное управление интегрирующими исполнительными механизмами; световая индикация выходного сигнала регулирующего устройства с импульсным выходным сигналом; определение положения регулирующего органа.

Коммутационная способность групп переключающих контактов реле и кнопок управления при активной нагрузке - постоянный ток до 0,25 А при напряжении до 34 В.

Электрическое питание блока ручного управления БРУ-32 осуществляется от пускателей, имеющих источники двухполупериодного выпрямленного напряжения со средним значением 24 В при токе 100 мА. Потребляемая мощность не превышает 2,5 ВА. Параметры питания индикаторов - напряжение постоянного тока 24 В, ток не более 10 мА.

Переключатель режимов предназначен для ручного переключения цепей управления. Нажатое и не нажатое положение переключателя

имеют фиксацию. Нажатое, с поворотом против часовой стрелки, положение соответствует режиму управления «Автомат», не нажатое – режиму управления «Ручной».

Переключение реле может производиться также дистанционно. Переключающие группы контактов реле выведены на контакты разъема. После включения питания блока реле переходит в положение, определяемое замкнутой цепью дистанционного управления.

Блок содержит стрелочный указатель, осуществляющий индикацию аналоговых сигналов 0-5 мА.

*Устройство регулирующее РП4-Т* с импульсным выходным сигналом предназначено для формирования динамических свойств ПИ-закона регулирования системы, содержащей электрический исполнительный механизм постоянной скорости.

Функциональная схема регулирующего устройства РП4-Т представлена на рисунке 15.7.

Устройство выполнено по функциональной схеме, которая содержит:

- 1 – входной сумматор;
- 2 – демпфер;
- 3 – операционный усилитель-сумматор;
- 4 – трехпозиционный нуль-орган;
- 5 – инерционное звено отрицательной обратной связи;
- 6 – источник питания;
- 7 – задатчик.

Сигналы регулируемого параметра и задания поступают на входы сумматора 1, в котором происходит их алгебраическое суммирование и формируется сигнал рассогласования  $\varepsilon$ .

Сигнал рассогласования поступает на демпфер 2, представляющий собой инерционное RC-звено с регулируемой постоянной времени демпфирования  $T_{\phi}$ .

С выхода демпфера 2 сигнал рассогласования поступает на вход операционного усилителя-сумматора 3, с выхода которого поступает на вход трехпозиционного нуль-органа 4, имеющего регулируемую зону нечувствительности  $\Delta$ . При сигнале рассогласования, превышающем порог срабатывания устройства регулирующего, нуль-орган срабатывает и скачком подает сигнал в цепь отрицательной обратной связи, представляющей активное инерционное RC-звено 5, и на выходные ключи, коммутирующие цепи внешней нагрузки. При срабатывании соответствующего полярности сигнала рассогласования ключа, на выходе появляется напряжение.

При отключенной цепи отрицательной обратной связи устройство представляет собой трехпозиционный нуль-орган с гистерезисом.

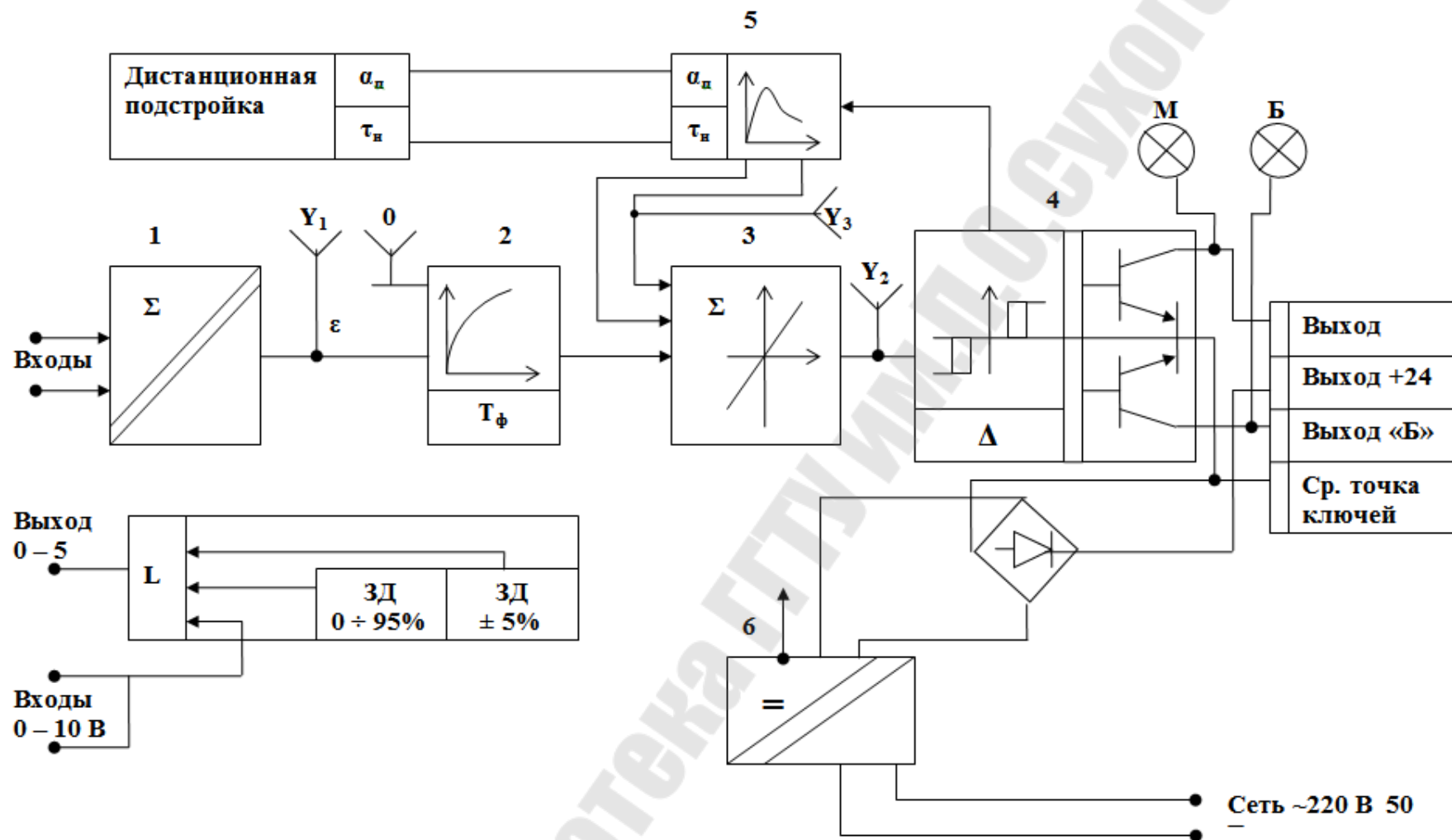


Рисунок 15.7 – Функциональная схема устройства регулирующего РП4-Т.



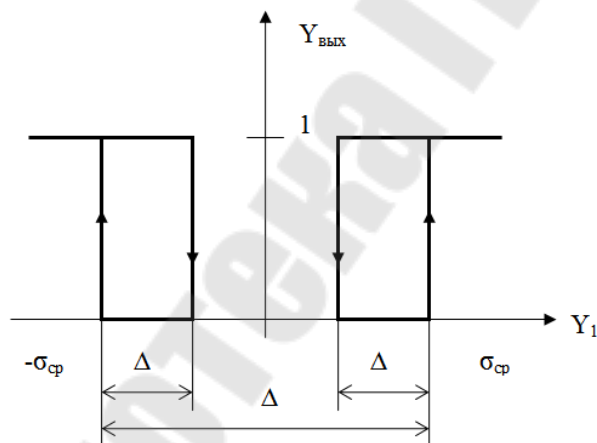
Характеристика регулирующего устройства РП4-Т при отключенной цепи обратной связи представлена на рисунке 15.8.

При включенной цепи отрицательной обратной связи и сработавшем состоянии нуль-органа 4 сигнал отрицательной обратной связи на выходе инерционного звена 5 начинает плавно увеличиваться и компенсировать сигнал рассогласования на выходе операционного усилителя-сумматора 3. Сигнал на входе нуль-органа 4 плавно уменьшается до порога отпускания, после чего нуль-орган отключается, сигналы на выходе устройства и на входе отрицательной обратной связи скачком уменьшаются до нуля.

Сигнал отрицательной обратной связи на выходе инерционного звена 5 начинает плавно уменьшаться, а сигнал на входе нуль-органа 4 возрастает до порога срабатывания  $\sigma_{\text{ср}}$ , после чего нуль-орган срабатывает, включает выходные ключи и подает сигнал в цепь отрицательной обратной связи. При сохранении сигнала рассогласования цикл повторяется.

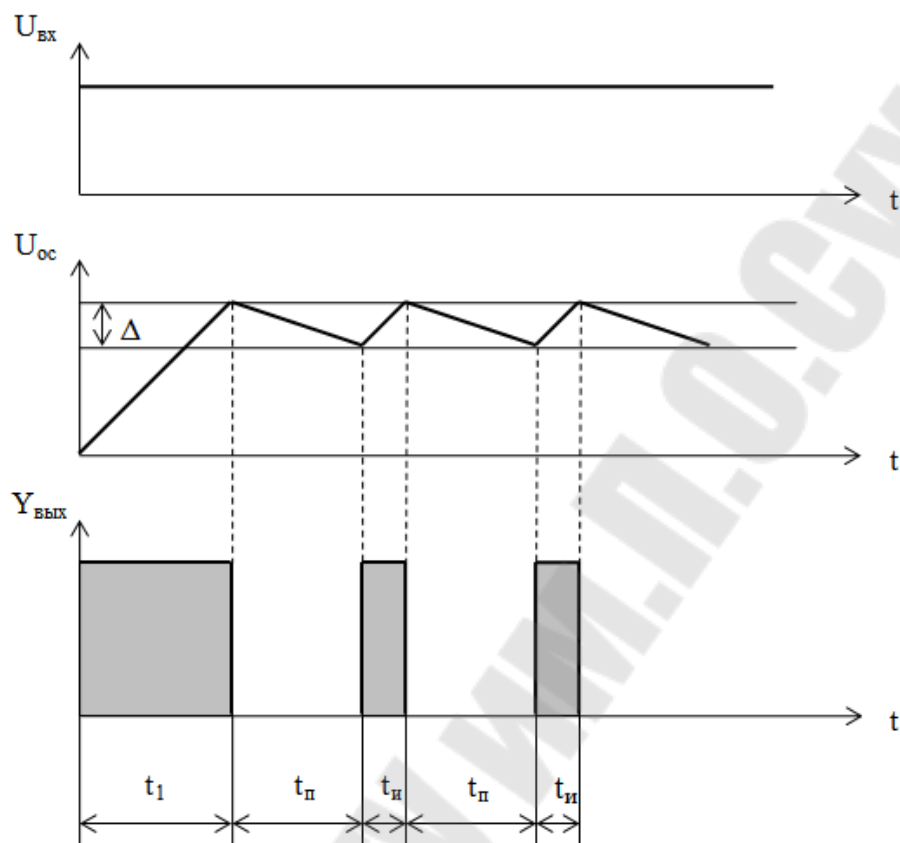
Таким образом, устройство регулирующее РП4-Т формирует на своем выходе импульсы, чередующиеся паузами. Интегрирование этих импульсов при помощи исполнительного механизма постоянной скорости позволяет получить пропорционально-интегральный ПИ-закон регулирования.

Работа регулирующего устройства при включенной отрицательной обратной связи и при скачкообразном сигнале рассогласования  $Y_1$  показана на рисунке 15.9.



- $\sigma_{\text{ср}}$  – порог срабатывания;
- $\sigma_{\text{в}}$  – порог отпускания;
- $\Delta$  – зона нечувствительности;
- $\Delta_{\text{в}}$  – зона возврата;
- $Y_1$  – сигнал рассогласования;
- $Y_{\text{вых}}$  – состояние выходных ключей.

**Рисунок 15.8 -  
Характеристика  
устройства  
регулирующего РП4Т  
при отключенной цепи  
обратной связи.**



$t_1$  – длительность первого импульса (пропорциональная часть), с;  
 $t_п$  – длительность паузы, с;  
 $t_и$  – длительность интегрального импульса, с.

Рисунок 15.9 – Работа устройства регулирующего РП4-Т с включенной цепью обратной связи.

Длительность первого импульса  $t_1$  (пропорциональная часть) зависит от величины сигнала рассогласования и коэффициента передачи  $\alpha_п$  инерционного RC-звена 5.

Интегрирование последующих импульсов дает интегральную часть регулятора, которая характеризуется величиной постоянной времени интегрирования  $\tau_и$  инерционного звена 5.

Коэффициент передачи  $\alpha_п$  и постоянная времени интегрирования  $\tau_и$  регулируются при помощи переменных резисторов в цепях заряда и разряда активного инерционного RC-звена 5.

Длительность интегральных импульсов  $t_и$  на выходе устройства регулируется при помощи дополнительной положительной обратной связи, поступающего с RC-звена 5 на вход операционного

усилителя 3 и расширяющего зону возврата  $\Delta_v$  нуля-органа 4 при срабатывании. Во время паузы этот сигнал отсутствует.

Минимальная длительность импульса формируется при малых сигналах рассогласования. При увеличении сигнала рассогласования длительность импульса увеличивается. Минимальная длительность импульса устанавливается органом  $t_{и}$ , определяет статическую точность регулирования в системе регулирования.

Контроль срабатывания устройства по направлениям работы осуществляется при помощи световых индикаторов «М» и «Б». Для контроля работы устройства служат контрольные гнезда «0» - «УЗ». Питание электрической схемы устройства осуществляется от источника питания 6.

Схема предусматривает подключение к регулятору РП4-Т внешнего потенциометрического задатчика РЗД-12 сопротивлением 10 кОм.

Термопара подключается к регулятору через коробку холодных спаев КХС4, которая служит для компенсации влияния окружающей температуры на термо-э.д.с. термопары.

Схема соединений коробки холодных спаев КХС4 представлена на рисунке 15.10.

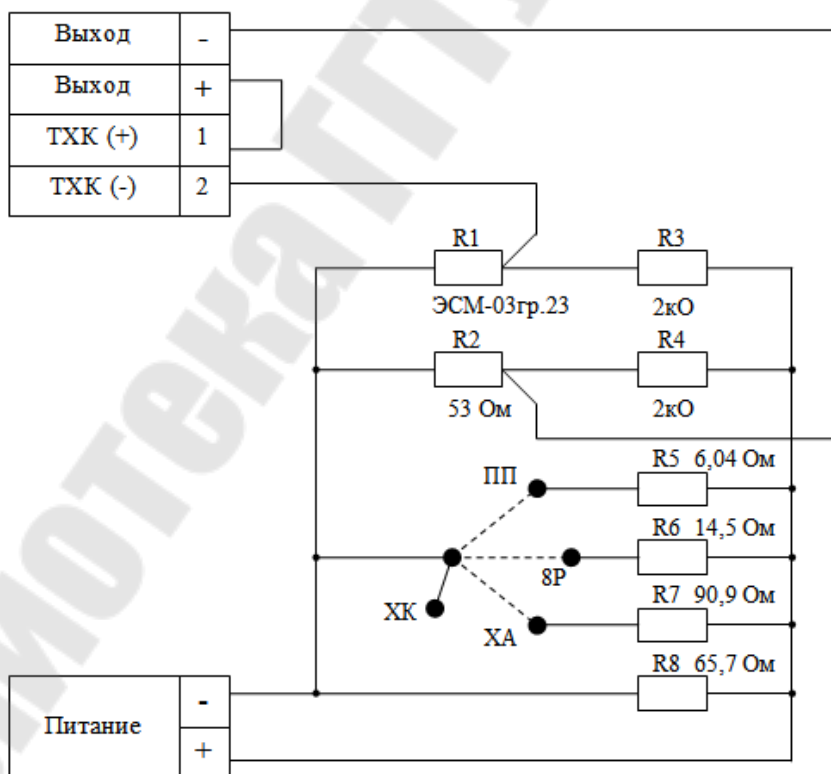


Рисунок 15.10 – Коробка холодных спаев КХС4.

Схема представляет собой мост, образованный резисторами R1, R2, R3, R4. Резистор R1 – медный. Питание моста осуществляется от регулятора РП4-Т напряжением постоянного тока. Изменение чувствительности измерительного моста КХС4 в зависимости от типа термопары осуществляется путем изменения напряжения, подаваемого на вход измерительного моста. Это в коробке холодных спаев осуществляется путем переключения переключки, подключающей параллельно входу моста соответствующий резистор R5 – R8. В зависимости от используемой термопары (в нашем случае ТХК) переключка в КХС4 устанавливается на соответствующие контакты.

Рабочие параметры регулятора РП4-Т имеют следующие номинальные диапазоны:

- плавной установки зоны нечувствительности « $\Delta$ » 0.2-2 % диапазона изменения входного сигнала;
- плавной установки коэффициента передачи « $\alpha_n$ » 0.5-5 с / %;
- плавной установки постоянной времени интегрирования « $\tau_n$ » 5-500 с;
- плавной установки постоянной времени демпфирования « $\tau_\phi$ » 0-10 с;
- плавной установки минимальной длительности импульса « $t_n$ » 0.1-1 с;
- плавной установки коэффициента масштабирования устройства 0-1;
- действия внешнего реостатного задатчика  $\pm 5$  %;
- действия «корректора»  $\pm 5$  %.

Питание регулирующего устройства РП4\_Т осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением 220 В 50 Гц.

Потребляемая мощность не более 15 ВА.

Регулирующее устройство РП4-Т не имеет гальванической развязки между входными и выходными цепями. В регуляторе обеспечивается дискретная трехступенчатая дистанционная подстройка коэффициента передачи в диапазоне 0.5 – 5 с / % и постоянной времени интегрирования в диапазоне 5–500 с с кратностью 10 от установленного значения в сторону увеличения.

Функциональная связь между входными сигналами регулирующего устройства и положением выходного органа исполнительного механизма имеет вид:

$$y(t) = Kn \cdot \left[ \varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_u} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt \right], \quad (15.1)$$

где  $y$  – значение выходного сигнала;  
 $\varepsilon$  – значение входного сигнала;  
 $\tau_u$  – постоянная времени интегрирования, с.

Коэффициент пропорциональности регулятора, образованного регулирующим устройством РП4-Т и исполнительным механизмом постоянной скорости, определяется выражением:

$$Kn = \frac{100\% \cdot \alpha_n}{T_{им}}, \quad (15.2)$$

где  $Kn$  – коэффициент пропорциональности регулятора;  
 $\alpha_n$  – коэффициент передачи регулирующего устройства, с/  
 %;  
 $T_{им}$  – время 100 % хода исполнительного механизма, с.

### Подготовка регулирующего устройства РП4-Т к работе

Подготовка регулирующего устройства заключается в установке всех органов настройки параметров, расположенных на боковой панели управления, на начальные значения.

Расположение органов установки параметров показано на рисунке 15.11.

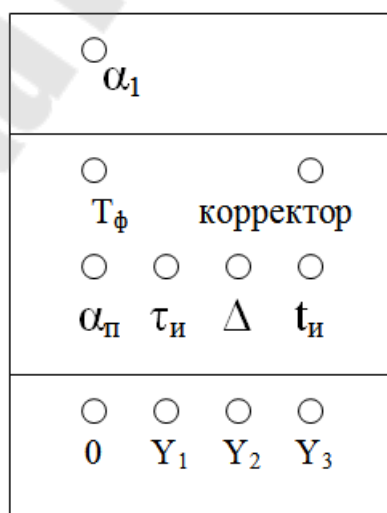


Рисунок 15.11 – Расположение органов установки параметров.

На панели управления установлены следующие органы настройки, с начальными значениями параметров:

- « $\alpha_1$ » - масштабирование входного сигнала, 0.2;
- « $T_\phi$ » - установка постоянной времени демпфирования, 6 с;
- «корректор» - балансировка устройства, 0;
- « $\alpha_n$ » - установка коэффициента передачи регулятора, 5.0 с / %;
- « $t_n$ » - установка постоянной времени интегрирования, 15 с;
- « $\Delta$ » - установка требуемого значения зоны нечувствительности, 2.0 %;
- « $t_{ин}$ » - установка длительности интегральных импульсов, 0.4 с;
- «0» - гнездо общее;
- « $Y_1$ » - гнездо для контроля работы входной схемы;
- « $Y_2$ » - гнездо для контроля работы усилителя регулирующей схемы;
- « $Y_3$ » - гнездо для контроля работы интегратора обратной связи.

В регулирующем устройстве РП4-Т значение коэффициента передачи устанавливается органом « $\alpha_n$ » на панели управления. Значение постоянной времени интегрирования устанавливается органом « $t_n$ » на панели управления. При определенных соотношениях параметров настройки « $\alpha_n$ », « $t_n$ » и « $\Delta$ » возможен автоколебательный режим работы устройства, что фиксируется по поочередному включению индикаторов «Б» и «М» на передней панели. Условием отсутствия автоколебаний является выполнение следующего соотношения:  $t_n / \alpha_n < \Delta$ .

### **Методы настройки промышленных регуляторов**

Параметры настройки регуляторов должны быть выбраны такими, чтобы в замкнутой автоматизированной системе регулирования (АСР) был обеспечен заданный запас устойчивости; при этом выбранный показатель качества регулирования должен быть не хуже требуемого (или должен иметь экстремальное значение).

Поскольку в теории автоматического регулирования запас устойчивости может быть оценен по-разному, а также используются различные показатели качества регулирования, в инженерных расчетах применяются несколько методов определения оптимальных параметров настройки регуляторов.

Ниже рассмотрены наиболее распространенные из них.

### Формульный метод определения настроек регулятора

В практике наладочных работ широко используют приближенные формулы для определения оптимальных параметров настройки регуляторов. Метод используется для быстрой, приближенной оценки значений параметров настройки регулятора для трех видов оптимальных типовых процессов регулирования. Метод применим как для статических объектов с самовыравниванием (таблица 15.1), так и для объектов без самовыравнивания (таблица 2).

Таблица 15.1 - Формульный метод определения настроек регулятора для статических объектов с самовыравниванием.

Регулятор	Типовой процесс регулирования		
	Апериодический	С 20% перерегулированием	$J_{\min}$
И	$K_p = \frac{1}{4.5K_{oy}\tau}$	$K_p = \frac{1}{1.7K_{oy}\tau}$	$K_p = \frac{1}{1.7K_{oy}\tau}$
П	$K_p = \frac{0.3}{K_{oy}\tau/T}$	$K_p = \frac{0.7}{K_{oy}\tau/T}$	$K_p = \frac{0.9}{K_{oy}\tau/T}$
ПИ	$K_p = \frac{0.6}{K_{oy}\tau/T}$ $T_u = 0.6T$	$K_p = \frac{0.7}{K_{oy}\tau/T}$ $T_u = 0.7T$	$K_p = \frac{1}{K_{oy}\tau/T}$ $T_u = T$
ПИД	$K_p = \frac{0.95}{K_{oy}\tau/T}$ $T_u = 2.4\tau$ $T_d = 0.4\tau$	$K_p = \frac{1.2}{K_{oy}\tau/T}$ $T_u = 2\tau$ $T_d = 0.4\tau$	$K_p = \frac{1.4}{K_{oy}\tau/T}$ $T_u = 1.3\tau$ $T_d = 0.5\tau$

где  $T$ ,  $\tau$ ,  $K_{oy}$  - постоянная времени, запаздывание и коэффициент усиления объекта. В этих формулах предполагается, что настраивается регулятор с зависимыми настройками, передаточная функция которого имеет вид:

$$W_p(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_u p} + T_d p \right), \quad (15.3)$$

где  $K_p$  – коэффициент усиления регулятора;  
 $T_u$  – постоянная интегрирования регулятора;  
 $T_d$  – постоянная дифференцирования.

Таблица 15.2 – Формульный метод определения настроек регулятора для статических объектов без самовыравнивания.

Регулятор	Типовой процесс регулирования		
	Апериодический	С 20% перерегулированием	$\min \int_0^{\infty} \varepsilon^2 dt$
П	$K_p = \frac{0.4}{\tau/T}$	$K_p = \frac{0.7}{\tau/T}$	-
ПИ	$K_p = \frac{0.4}{\tau/T}$ $T_u = 6T$	$K_p = \frac{0.4}{\tau/T}$ $T_u = 3T$	$K_p = \frac{1}{\tau/T}$ $T_u = 4T$
ПИД	$K_p = \frac{0.6}{\tau/T}$ $T_u = 5\tau$ $T_d = 0.2\tau$	$K_p = \frac{1.1}{\tau/T}$ $T_u = 2\tau$ $T_d = 0.4\tau$	$K_p = \frac{1.4}{\tau/T}$ $T_u = 1.6\tau$ $T_d = 0.5\tau$

### Оптимальная настройка регуляторов по номограммам

В отличие от формульного метода, метод расчета по номограммам позволяет более точно определить настройки регулятора, т.к. учитывает наличие нелинейной зависимости между параметрами настройки регулятора и величиной отношения  $\tau/T$ .

Существуют номограммы для расчета настроек ПИ- и ПИД-регуляторов для объектов первого и второго порядков с запаздыванием [1].

Номограмма для настроек ПИ-регулятора представлена на рисунке 15.12.



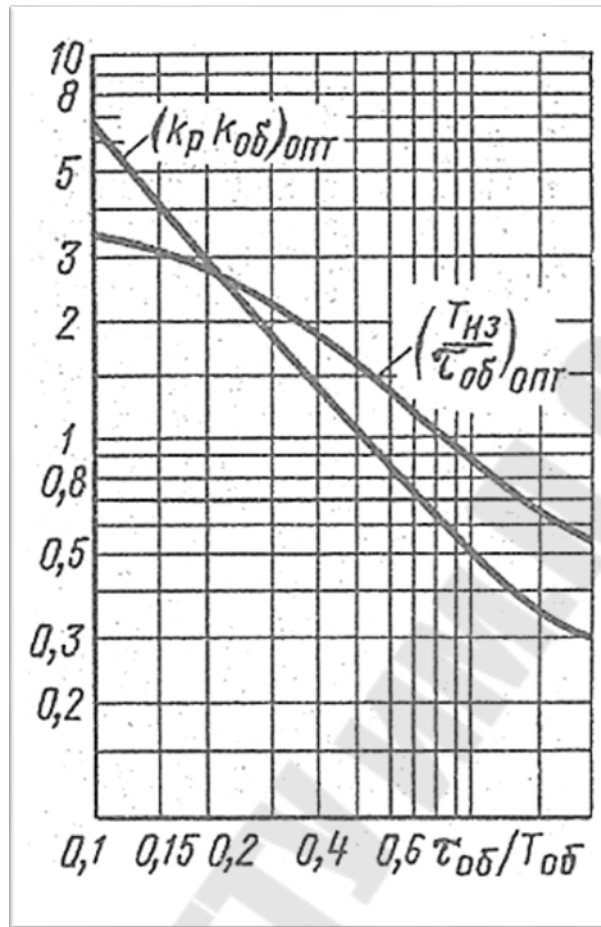


Рисунок 15.12 – Номограмма для расчета настроек ПИ-регулятора.

Предположим, что объект управления описывается звеном первого порядка с запаздыванием, а оптимальный процесс регулирования – это процесс с 20%-ным перерегулированием. Следует иметь в виду, что современные электронные и микропроцессорные регуляторы реализуют ПИ- и ПИД-законы регулирования с зависимыми настройками, а пневматические регуляторы – с независимыми настройками вида

$$W_p(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_u p} + T_d p \right). \quad (15.4)$$

Дифференциальная составляющая промышленных регуляторов обычно реализуется в виде

$$\frac{K_{pd} T_f p}{T_f p + 1} \rightarrow T_d p, \quad (15.5)$$

где  $K_{p\delta}$  – коэффициент усиления регулятора по дифференциальной составляющей (выбирается в диапазоне 1 – 10);

$T_f$  – постоянная времени фильтра.

Эти параметры определяются из соотношения

$$K_{p\delta} T_f = T_\delta. \quad (15.6)$$

Чем выше уровень помех в выходном сигнале объекта, тем меньше рекомендуется брать величину  $K_{p\delta}$ . Это будет способствовать уменьшению величины средней квадратичной ошибки регулирования.

### Расчет настроек по частотным характеристикам объекта

Существует специальная аппаратура для экспериментального определения амплитудно-фазовой характеристики АФХ объекта управления. Эту характеристику можно использовать для расчета настроек ПИ-регулятора, где главным критерием является обеспечение заданных запасов устойчивости в системе.

Запасы устойчивости удобно характеризовать показателем колебательности системы  $M$ , величина которого в системе с ПИ-регулятором совпадает с максимумом амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы. Для того чтобы этот максимум не превышал заданной величины, АФХ разомкнутой системы не должна заходить внутрь окружности с центром  $P_0$  и радиусом  $R$ , где

$$P_0 = \frac{M_3^2}{1 - M_3^2}, \quad R = \left| \frac{M_3^2}{1 - M_3^2} \right|. \quad (15.7)$$

Можно доказать, что оптимальными, по минимуму среднеквадратичной ошибки регулирования настройками будут такие, при которых система с показателем колебательности  $M \leq M_3$  будет иметь наибольший коэффициент при интегральной составляющей, чему соответствует условие  $K_p / T_u \rightarrow \min$ .

В связи с этим расчет оптимальных настроек состоит из двух этапов:

1. Нахождение в плоскости параметров  $K_p$  и  $T_u$  границы области, в которой система обладает заданным показателем колебательности  $M_3$ .

2. Определением на границе области точки, удовлетворяющей требованию  $K_p / T_u \rightarrow \min$ .

### Методика расчета настроек ПИ регулятора по АФХ объекта

1. Строится семейство амплитудно-фазовых характеристик разомкнутой системы при  $K_p = 1$  и различных значениях  $T_{ij}$  (5-6 значений).

$$A\Phi X_{pc} = A\Phi X_{oy} + \left(1 + \frac{1}{T_{ij}(j\omega)}\right). \quad (15.8)$$

2. Задаются значением показателя колебательности  $M$ , из диапазона  $1.55 \leq M \leq 2.3$  (рекомендуется  $M = 1.6$ ). Из начала координат проводят прямую ОЕ под углом

$$\beta = \arcsin\left(\frac{1}{M_3}\right), \quad (15.9)$$

где  $M_3$  - выбранное значение показателя колебательности.

3. Строится семейство окружностей, касающихся  $A\Phi X_{oj}$  прямой ОЕ под углом  $\beta$ , причем центр окружностей все время лежит на отрицательной действительной оси. В результате построения определяются радиусы этих окружностей  $R_j$ .

4. Для каждой окружности вычисляют предельное значение  $K_p$ .

5. По значениям  $K_{pj}$  и  $K_{ij}$  строят границу области заданного показателя колебательности.

6. На этой границе определяют точку, для которой отношение  $K_p / T_u$  максимально.

Существует упрощенная методика настройки ПИ-регулятора по одной точке АФХ разомкнутой системы. В основу методики положен следующий факт. В результате экспериментов и численных расчетов было установлено, что для различных типов объектов управления при оптимально настроенном ПИ-регуляторе АФХ разомкнутых систем проходят приблизительно через одну точку с амплитудой  $A_p = 0.8$ , фазой  $\varphi_p = -2.62 \text{ rad} = -150^\circ$  и частотой  $\omega_p$ .

### Экспериментальные методы настройки регулятора

Для значительного числа промышленных объектов управления отсутствуют достаточно точные математические модели, описывающие их статические и динамические характеристики. В то же время, проведение экспериментов по снятию этих характеристик весьма дорого и трудоемко. Экспериментальный метод настройки регуляторов не требуют знания математической модели объекта. Однако предполагается, что система смонтирована и может быть запущена в работу, а также существует возможность изменения настроек регулятора. Таким образом, можно проводить некоторые эксперименты по анализу влияния изменения настроек на динамику

системы. В конечном итоге гарантируется получение хороших настроек для данной системы регулирования. Существуют два метода настройки - метод незатухающих колебаний (метод Циглера и Никольса) и метод затухающих колебаний.

### **Метод незатухающих колебаний**

В работающей системе выключаются интегральная и дифференциальная составляющие регулятора ( $T_u = \infty$ ,  $T_d = 0$ ), т.е. система переводится в П-закон регулирования. Путем последовательного увеличения  $K_p$  с одновременной подачей небольшого скачкообразного сигнала задания добиваются возникновения в системе незатухающих колебаний с периодом  $T_{кр}$ . Это соответствует выведению системы на границу колебательной устойчивости. При возникновении данного режима работы фиксируются значения критического коэффициента усиления регулятора  $K_{кр}$  и периода критических колебаний в системе  $T_{кр}$ . При появлении критических колебаний ни одна переменная системы не должна выходить на уровень ограничения. По значениям  $K_{кр}$  и  $T_{кр}$  рассчитываются параметры настройки регулятора:

П-регулятор:  $K_p = 0.55 K_{кр}$ ;

ПИ-регулятор:  $K_p = 0.45 K_{кр}$ ;  $T_u = T_{кр}/1.2$ ;

ПИД-регулятор:  $K_p = 0.6 K_{кр}$ ;  $T_u = T_{кр}/2$ ;  $T_d = T_{кр}/8$ .

Расчет настроек регулятора можно производить по критической частоте собственно объекта управления  $\omega_{кр}$ . Учитывая, что собственная частота  $\omega_{кр}$  объекта управления совпадает с критической частотой колебаний замкнутой системы с П-регулятором, величины  $K_{кр}$  и  $T_{кр}$  могут быть определены по амплитуде и периоду критических колебаний собственно объекта управления.

При выведении замкнутой системы на границу колебательной устойчивости амплитуда колебаний может превысить допустимое значение, что в свою очередь приведет к возникновению аварийной ситуации на объекте или к выпуску бракованной продукции. Поэтому не все системы управления промышленными объектами могут выводиться на критический режим работы.

### **Метод затухающих колебаний**

Применение этого метода позволяет настраивать регуляторы без выведения системы на критические режимы работы. Так же, как и в предыдущем методе, для замкнутой системы с П-регулятором, путем последовательного увеличения  $K_p$  добиваются переходного процесса

отработки прямоугольного импульса по сигналу задания или возмущения с декрементом затухания  $D = 1/4$ .

Далее определяется период этих колебаний  $T_k$  и значения постоянных интегрирования и дифференцирования регуляторов  $T_u$  и  $T_d$

Для ПИ-регулятора:  $T_u = T_k/6$ ;

Для ПИД-регулятора:  $T_u = T_k/6$ ;  $T_d = T_k/1.5$ .

После установки вычисленных значений  $T_u$  и  $T_d$  на регуляторе необходимо экспериментально уточнить величину  $K_p$  для получения декремента затухания  $D = 1/4$ . С этой целью производится дополнительная подстройка  $K_p$  для выбранного закона регулирования, что обычно приводит к уменьшению  $K_p$  на  $20 \div 30\%$ . Аналогичный метод настройки используется в адаптивных регуляторах американской фирмы "Фоксборо".

Большинство промышленных систем регулирования считаются качественно настроенными, если их декремент затухания  $D$  равен  $1/4$  или  $1/5$ .

В настоящее время разработан новый метод настройки замкнутых систем управления, основанный на подаче пробных синусоидальных колебаний на вход регулятора. По амплитуде и фазе колебаний выходного сигнала объекта управления осуществляется расчет настроек ПИ-регулятора, исходя из условия обеспечения заданного показателя колебательности  $M$  и максимума отношения  $K_p/T_u$ .

#### **4 Экспериментальное определение модели объекта управления**

Для определения оптимальных параметров настройки регуляторов необходимы сведения о статических и динамических характеристиках объектов регулирования. Эти характеристики могут быть получены либо аналитически, либо путем активного эксперимента. При планировании эксперимента выбирают метод исследования динамики объекта, а также вид испытательного (с заранее известным характером изменения) воздействия.

Для ускорения определения динамических характеристик обычно используют *метод переходных характеристик*. Этот метод прост, требует минимального количества аппаратуры и позволяет получить динамические характеристики объекта за короткий промежуток времени.

При определении переходной характеристики на вход объекта подают сигнал заданной формы и через определенные промежутки

времени снимают показания выходной величины до установления состояния равновесия (установившийся режим).

По результатам проведенного эксперимента строится график переходной характеристики, по аналогии с рисунком 15.13, который несет в себе исходную информацию о модели объекта.

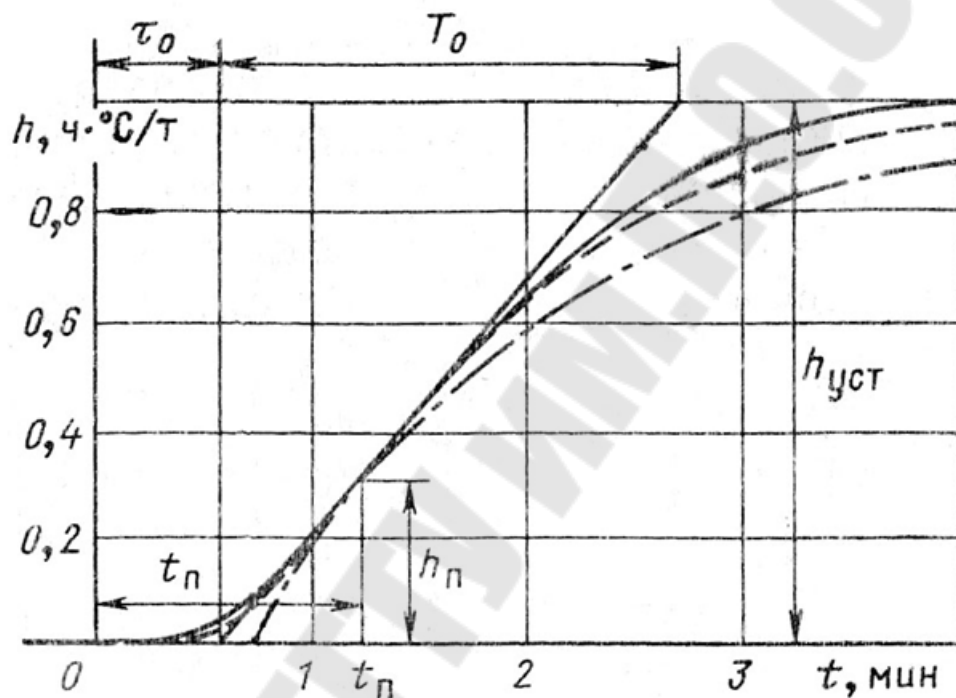


Рисунок 15.13 – Экспериментальная переходная характеристика статического объекта управления.

Такие характеристики часто называют  $S$  – образными.

Аппроксимируем переходную характеристику моделью, состоящей из запаздывающего звена и инерционного звена первого порядка

$$W_a(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1s + 1)}. \quad (15.10)$$

По переходной характеристике определяют исходные данные для аппроксимации:  $h_{уст}$ ,  $h_n$ ,  $t_n$ ,  $T_0$ .

Определяются значение положения точки перегиба

$$b = h_n / h_{уст}. \quad (15.11)$$

Очевидно, что  $k = h_{уст}$ . Требования, чтобы переходная характеристика инерционного звена первого порядка и производная от нее в некоторый момент времени приняли заданные значения  $bk$  и  $k/T_0$ , записываются следующим образом

$$1 - e^{-\frac{t}{T_1}} = b; \quad \left(\frac{1}{T_1}\right) \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} = \frac{1}{T_0} . \quad (15.12)$$

Отсюда легко найти постоянную времени аппроксимирующей модели

$$T_1 = (1 - b) T_0 . \quad (15.13)$$

При найденном таким образом  $T_1$  время  $t$ , при котором выполняется условие аппроксимации, определяется по формуле

$$t = T_1 \ln (T_0 / T_1) . \quad (15.14)$$

а время запаздывания

$$\tau = t_{п} - t . \quad (15.15)$$

По номограмме (рисунок 15.14), используя найденные значения  $T_1$  и  $\tau$ , определяются оптимальные параметры настройки регулятора. Здесь следует учитывать, что  $\tau / T_1$  берется как  $\tau_{об} / T_{об}$ .

Очевидно, что  $K_{об} = h_{уст}$ . Тогда, с учетом выражения (15.2) коэффициент передачи регулятора определяется

$$\alpha_n = \frac{(K_p K_{об})_{opt} \cdot T_{ум}}{100\%} , \quad (15.16)$$

где  $T_{ум}$  - время 100 % хода исполнительного механизма от одного конечного состояния до другого, с / %.

Скорость исполнительного механизма  $T_{ум}$  определяется экспериментально и составляет 195 с.

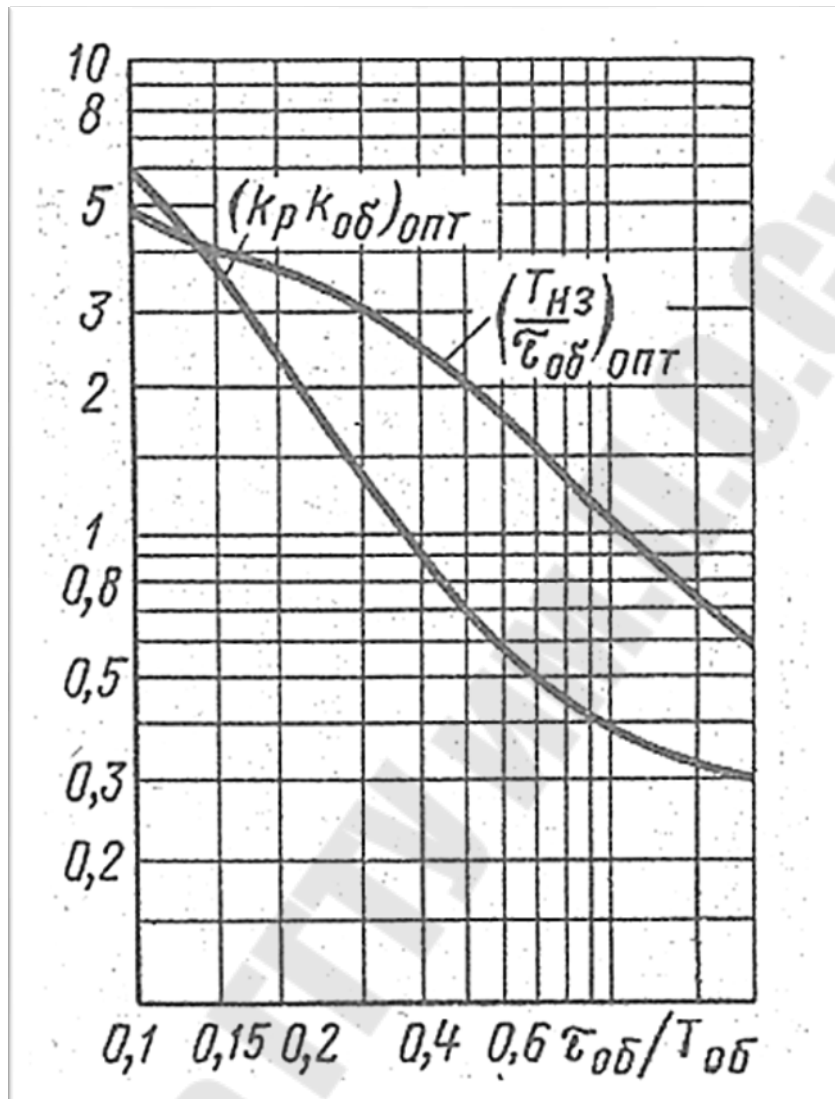


Рисунок 15.14 – Номограмма для определения оптимальных параметров настройки регулятора РП4-Т.

### Задание на выполнение лабораторной работы

1 Снять кривую разгона объекта управления, выполняя пункты 6.1 – 6.8 раздела 6. Результаты, полученные в ходе эксперимента, свести в таблицу.

Таблица 15.3 – Результаты эксперимента.

t, с	$\Theta$ , °С	t, с	$\Theta$ , °С	t, с	$\Theta$ , °С
------	---------------	------	---------------	------	---------------

2 Построить график кривой разгона и определить исходные данные для аппроксимации  $h_{уст}$ ,  $h_n$ ,  $t_n$ ,  $T_0$ , выполняя пункты 6.9 – 6.10



раздела «**Методические указания по выполнению лабораторной работы**» .

3 Рассчитать оптимальные параметры настройки регулятора РП4-Т по методу настройки с помощью номограмм:  $\alpha_n$ ,  $\tau_u$ .

4 На основании полученных значений оптимальных параметров настройки построить график переходного процесса и провести анализ качества процесса регулирования, выполняя пункты 12 – 16 раздела «**Методические указания по выполнению лабораторной работы**».

5 Оформить отчет по лабораторной работе.

### **6 Методические указания по выполнению лабораторной работы**

1. Включить питание стенда «пульт управления и контроля процесса» нажатием кнопки «Пуск».
2. Убедиться в соответствии параметров настройки регулятора РП4-Т, расположенных на боковой панели органов управления, начальным значениям в соответствии с разделом 2.
3. Записать начальное значение температуры объекта по показанию микропроцессорного измерителя температуры 2ТРМ0.
4. Установить ключ управления блока БРУ-32 в положение «Ручное».
5. Открыть верхние и нижние жалюзи (6) на корпусе печи, совместив отверстия (рисунок 2).
6. Включить питание стенда «тепловой объект».
7. Установить стрелку индикатора указателя положения исполнительного механизма на значение 30 %, оперируя кнопками блока ручного управления БРУ-32 «Больше» и «Меньше». При данном положении исполнительного механизма величина тока, которая регистрируется миллиамперметром, составляет 21 мА.
8. Приступить к записи показаний температуры по микропроцессорному измерителю через каждые 15 с. По истечении 3-х минут записывать показания температуры через 30 с. Показания снимать на протяжении 15 – 20 минут до установившегося режима ( $\sim 75 - 80$  °С).
9. Построить кривую разгона  $\theta = f(t)$ .
10. Провести касательную к кривой разгона  $\theta = f(t)$ , как показано на рисунке 13, и определить начальные данные  $h_{уст}$ ,  $h_n$ ,  $t_n$ ,  $T_0$  для расчета параметров аппроксимирующей модели  $T_1$  и  $\tau$ .

11. Произвести расчет оптимальных параметров настройки регулятора  $\tau_u$  и  $\alpha_n$ .
  12. Установить задание 35 % на шкале блока РЗД-12, что соответствует  $\sim 55$  °С.
  13. Перевести ключ блока БРУ-32 в положение «Автоматическое» и приступить к записи показаний текущих значений температуры по микропроцессорному измерителю.
  14. Показания снимать с интервалом 30 с до установившегося режима, когда световые индикаторы «М» и «Б» на передней панели импульсного регулятора РП4-Т не горят.
  15. Построить график функции  $\theta = f(t)$ .
  16. Провести анализ качества процесса регулирования по показателям качества: время регулирования  $t_p$ ,
- $$\sigma = \frac{\theta_{\max} - \theta_{уст}}{\theta_{уст}},$$
17. перерегулирование
- $$\eta = \frac{y_1 - y_2}{y_1}.$$
18. степень затухания
  19. Перевести ключ блока БРУ-32 в положение «Ручное».
  20. Установить задание 0 % на шкале блока РЗД-12 и отключить питание стенда нажатием кнопки «Стоп».

### Содержание отчета

1. Структурная схема САР регулирования температуры электрической печи.
2. Таблицы экспериментальных данных и графики, построенные по ним.
3. Результаты вычисления оптимальных настроек регулятора.
4. Выводы по качеству регулирования.
5. Ответы на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

1. Укажите основные характеристики ПИ-закона регулирования.
2. Какое требование должно выполняться при выборе параметров настройки регуляторов?
3. Какие методы настройки промышленных регуляторов вы знаете?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация металлургических печей [Учебник для студ. вузов, обуч. по спец. "Теплотехника и автоматизация металлург. печей] /под ред. О.М. Блинова Блинов О.М. – Москва: Металлургия, 1975. -376 с Автоматическое управление электротермическими установками / Под. ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
2. Альтгаузен А.П. Применение электронагрева и повышение его эффективности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 128 с.
3. Аншин В.Ш., Крайз А.Г., Мейксон В.Г. Трансформаторы для промышленных электропечей. – М.: Энергоиздат, 1982. – 296 с.
4. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов / под науч. ред. В.А. Арутюнова: учебник для вузов Бухмиров В.В. – Москва: Металлургия, 1990. -238 с.
5. Болотов А.В., Шпель Г.А. Электротехнологические установки. – М.: Высшая школа, 1988. – 336 с.
6. Борисов Б.П., Вагин Г.Я. Электроснабжение электротехнологических установок. – М.: Киев: Наукова думка, 1985. – 248 с.
7. Великин Б.А. Торкретирование металлургических печей – Москва: Металлургия, 1972. -280 с.
8. Воителев В.В. Механическое оборудование печей: учеб. пособие для вузов / В.В. Воителев, Е.И. Могилевский: учеб. пособие для вузов Могилевский Е.И. – Москва: Металлургия, 1991. -148 с
9. Глинков Марк Алексеевич Общая теория печей: учеб. пособие для вузов / М.А. Глинков, Г.М. Глинков: учеб. пособие для вузов Глинков Герман Маркович – Москва: Металлургия, 1978. -264 с.
10. Глуханов Н.П., Федорова И.Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1983. – 160 с.
11. Головкин И.П. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных подстанций повышенной частоты. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 80 с.

12. ГОСТ 2.105–95. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 36 с.
13. ГОСТ 2.309–95. Единая система конструкторской документации. Обозначение шероховатости поверхностей. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 11 с.
14. ГОСТ 7.1–84. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления. – Взамен ГОСТ 7.1–76; Введ. 01.01.86. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 78 с.
15. Данцис Я.Б. Методы электротехнических расчетов мощных электропечей. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 229 с.
16. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: учеб. пособие для вузов / А.В. Егоров: учеб. пособие для вузов – Москва: МИСИС, 2000. -272 с.
17. Кацевич Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей: учебник для электромеханических техникумов: учебник для электромеханических техникумов – Москва: Энергия, 1977. -304 с.
18. Княжевская Г.С., Фирсова М.Г., Килькеев Р.Ш. Высококачественный нагрев диэлектрических материалов. – Л.: Машиностроение, 1989. – 64 с.
19. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей / Под ред. Я.В. Данциса, Г.М. Жилова. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.
20. Лапшин И.В. Автоматизация дуговых печей – Москва: МГУ, 2004. -166 с.
21. Математическое моделирование и проектирование промышленных печей: учебное пособие / Ивановский энергетич. ин-т им. В.И. Ленина: учебное пособие – Иваново: Ивановский гос. ун-т, 1984. -89 с.
22. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Графики нагрузок дуговых электропечей. – М.: Энергия, 1977. – 120 с.
23. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Повышение эффективности электроснабжения печей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

24. Миронов Ю.М., Миронова А.Н. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 376 с.
25. Повышение эффективности использования электроэнергии в системах электротехнологии / В.П. Борисов, Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.К. Шидловский. – Киев: Наукова думка, 1990. – 237 с.
26. Пономаренко О.И. Расчет оптимального количества плавильных печей. // Литейное производство. – 1997. – №2. – С. 21–23. Пелих В.Ф.
27. Попкович В.Н. Оптимизация расчетов при определении теплового режима работы нагревательных печей // Известия ВУЗов. сер. Энергетика. – 2000. – №5. – С. 97–100. Каснерик Е.Н.
28. Проектирование электрометаллургических цехов / М.И. Гасик, В.А. Гладких, В.С. Игнатьева и др. – Киев: Донецк: Высшая школа, 1987. – 143 с.
29. Рапутов Б.М. Электрооборудование кранов металлургических предприятий. – М.: Металлургия, 1990. – 272 с.
30. Ровин Л.Е. Модернизация действующих плавильных печей // Литье и металлургия. – 2003. – № 3. – С.99–103. Ровин С.Л.
31. Ровин Л.Е. Системы очистки выбросов плавильных печей // Литье и металлургия. – 2002. – №4. – С. 109–111. Ровин С.Л.
32. Самохвалов Г.В. Электрические печи черной металлургии: учеб. пособие для вузов по спец. "Теплотехника и автоматизация металлург. печей": учеб. пособие для вузов по спец. "Теплотехника и автоматизация металлург. печей" Металлургические печи – Москва: Металлургия, 1984. -232 с.
33. Сойфер В.М. Огнеупоры для дуговых сталеплавильных печей малой емкости: справочник: справочник – Москва: Металлургия, 1994. -192 с.
34. Сооружение промышленных печей / под ред. канд. техн. наук И.А. Шишкова – Москва: Стройиздат, 1978. -413 с

35. Справочник по электропотреблению в промышленности / Г.П. Минин, Ю.В. Копытов. – М.: Энергия, 1978. – 495 с.
36. Тайц А.А. Электроснабжение металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1967. – 288 с.
37. Теплотехнические расчеты металлургических печей: учеб. пособие для вузов / под ред. А.С. Телегина: учеб. пособие для вузов – Москва: Металлургия, 1982. – 358 с.
38. Ус А.Г. Оптимизация электропотребления индукционных тигельных печей РУП ГЛЗ "Центролит" // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. VI I Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому), Гомель, 23–24 окт. 2008 г.. – 2008. – С. 154–155.
39. Установки индукционного нагрева / Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 325 с.
40. Фотиев М.М. Электрооборудование предприятий черной металлургии. – М.: Металлургия, 1980. – 312 с.
41. Фотиев М.М. Электроснабжение и электрооборудование металлургических цехов. – М.: Металлургия, 1979. – 255 с.
42. Фотиев М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1990. – 352 с.
43. Чалых Б.Ф. Оборудование электродных заводов. – М.: Металлургия, 1990. – 257 с.
44. Шевцов М.С., Бородачев А.С. Развитие электротермической техники. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
45. Электрификация металлургических предприятий Сибири / Под ред. В.И. Кудрина. – Томск: ТГУ, 1989. – 214 с.
46. Электрические печи сопротивления и дуговые печи / Под ред. М.Б. Гутмана. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
47. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева / Под. общ. ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
48. Электрооборудование и автоматика электротермических установок / Под ред. А.П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.

49. Электроснабжение и автоматизация электротермических установок / А.Д. Свенчанский., З.П. Трейзон., Л.А. Мнухин. – М.: Энергия, 1980. – 320 с.
50. Электротермическое оборудование: Справочник / Под ред. А.П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1980. – 416 с.
51. Электротехнологические промышленные установки / Под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 400 с.
52. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов; в 2 т. / Под ред. В.П. Смолянцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 240 с.
53. Эффективное использование электроэнергии / Под ред. К. Смита. – М.: Энергоиздат, 1981. – 400 с.
54. Эффективные режимы работы электротехнологических установок / И.В. Жежеленко, В.М. Божко, Г.Я. Вагин, М.Л. Рабинович. – Киев: Техника, 1987. – 184 с.
55. Ярошенко Ю.Г. Тепловая работа и автоматизация печей: введение в специальность: учеб. пособие для вузов: введение в специальность: учеб. пособие для вузов – Москва: Металлургия, 1984. -207 с

**Жаранов Виталий Александрович**

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ**

**Лабораторный практикум  
по одноименному курсу  
для студентов специальности 1-42 01 01  
«Металлургическое производство  
и материалобработка (по направлениям)»  
специализации 1-42 01 01-01 «Металлургическое  
производство и материалобработка (металлургия)»  
направления 1-42 01 01-01 02 «Электрометаллургия  
черных и цветных металлов»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 30.12.13.

Рег. № 20Е.  
<http://www.gstu.by>