

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

*Допущено Министерством образования  
Республики Беларусь в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений по специальности  
«Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного  
производства»*

Минск  
БГАТУ  
2010

УДК 631.371:621.31(07)  
ББК 40.76я7  
Э45

Составители:

доктор технических наук, профессор *Е. М. Заяц*;  
кандидат технических наук, профессор *В. А. Карасенко*;  
кандидат технических наук, доцент *И. Б. Дубодел*;  
кандидат технических наук, доцент *П. В. Кардашов*;  
старший преподаватель *Д. И. Кривовязенко*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В. А. Анищенко*;  
кандидат технических наук, доцент *В. К. Мороз*

**Электротехнологические установки** : лабораторный  
Э45 практикум / сост. : Е. М. Заяц [и др.]. – Минск : БГАТУ,  
2010. – 184 с.  
ISBN 978-985-519-336-5.

Лабораторный практикум включает 15 работ по дисциплине  
«Электротехнология».

Для студентов высших и средних специальных учебных заведений  
по специальности «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства».

УДК 631.371:621.31(07)  
ББК 40.76я7

ISBN 978-985-519-336-5

© БГАТУ, 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Измерение и коррекция удельного электрического сопротивления воды .....	5
2. Электрические элементные нагреватели .....	12
3. Элементные водонагреватели .....	22
4. Электродные водонагреватели .....	30
5. Электрокалориферные установки .....	41
6. Установки локального электрообогрева .....	58
7. Электросварочное оборудование .....	66
8. Установка индукционного нагрева .....	78
9. Установка диэлектрического нагрева .....	93
10. Термоэлектрический холодильник ХАТЭ-24 .....	106
11. Генераторы электрических импульсов .....	115
12. Диэлектрический сепаратора семян СДЛ-1 .....	127
13. Установки электроочистки и ионизации воздуха .....	139
14. Ультразвуковые установки .....	152
15. Установки электромагнитной обработки материалов .....	167
Литература .....	180

## ВВЕДЕНИЕ

Электротехнология – это наука, изучающая теорию и технологию преобразования электрической энергии в другие виды энергии с целью изменения свойств, состояния, формы предметов труда.

Предметом изучения электротехнологии является теоретическое описание процессов и оборудование для преобразования электрической энергии в:

- тепловую энергию;
- магнитную энергию;
- механическое действие сил электрического и магнитного полей;
- химическое изменение свойств материалов органического и минерального происхождения;

– активацию или подавление развития биологических объектов в технологических процессах производства и переработки продукции сельского хозяйства.

Овладение основами электротехнологии требует не только глубоких теоретических знаний, но и приобретения умений по исследованию оборудования, его наладке, рациональному использованию и обслуживанию. Эта задача решается главным образом на лабораторных и практических занятиях.

Цели лабораторного практикума:

- закрепить и систематизировать теоретические знания по дисциплине «Электротехнология»;
- привить студентам навыки по исследованию и применению электротехнологических установок в сельскохозяйственном производстве;
- подготовить студентов к решению более сложных задач в курсовом и дипломном проектировании.

В основе учебного пособия лежит практикум [6] к лабораторным работам по дисциплине «Электротехнология», дополненный и переработанный с учетом изменений в развитии теории и практики электротехнологии, произошедших за последние годы.

## 1. ИЗМЕРЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДЫ

**Цель работы:** освоить методику экспериментального определения и коррекции удельного электрического сопротивления воды.

### Задачи работы:

1. Изучить по рекомендуемой литературе методы измерения удельного сопротивления проводников второго рода.
2. Измерить удельное сопротивление воды в диапазоне 15–100 °С, математически описать его температурную характеристику.
3. Рассчитать массу дистиллированной воды или соли, необходимую для коррекции измеренного удельного сопротивления воды до величины, указанной в паспорте электродного водонагревателя.

### Общие сведения

Электропроводность – это свойство вещества проводить электрический ток. Мерой электропроводности служит удельная электрическая проводимость (удельная проводимость), имеющая размерность  $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$  (сименс, деленный на метр) и обозначаемая буквой  $\gamma$ . Величина, обратная удельной проводимости, представляет собой удельное электрическое сопротивление (удельное сопротивление) и равна  $\rho = 1 / \gamma$  (Ом·м).

Электропроводность воды зависит от ее химического состава и температуры. При увеличении последней возрастает диссоциация молекул примесей, снижается вязкость воды, повышается концентрация и подвижность ионов, что в целом увеличивает проводимость. Температурная характеристика удельной проводимости воды имеет вид, общий для проводников с ионной проводимостью, и приближенно определяется по следующей формуле:

$$\gamma_t = \gamma_{20} [1 + \alpha(t - 20)], \quad (1.1)$$

где  $\gamma_t, \gamma_{20}$  – удельная проводимость при температуре  $t$  и при  $t = 20$  °С,  $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент проводимости,  $^{\circ}\text{С}^{-1}$ .

Удельное сопротивление воды определяют по выражению

$$\rho_t = \frac{40\rho_{20}}{t + 20}, \quad (1.2)$$

полученному из формулы (1.1), приняв  $\alpha = 0,025$   $^{\circ}\text{С}^{-1}$ ;  $\rho_{20} = 1 / \gamma_{20}$ .

Удельное сопротивление воды лежит в диапазоне от 5 до 250 Ом·м, наиболее часто встречающееся значение  $\rho_{20}$  находится в пределах 10–40 Ом·м. Зависимость (1.2) справедлива до наступления заметного парообразования, при котором сопротивление воды возрастает.

Удельное сопротивление пароводяной смеси:

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{в}} a e^{kj}, \quad (1.3)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – удельное сопротивление воды без заметного парообразования (можно принять при 75–85 °С);  $a = 0,925$  – постоянная величина;  $k \approx 15 \cdot 10^3$   $\text{м}^2/\text{А}$  – величина, зависящая от давления в парогенераторе;  $j$  – плотность тока на электродах,  $\text{А}/\text{м}^2$ .

Знание величины удельного сопротивления воды необходимо при проектировании и эксплуатации электродных водонагревателей. Если удельное сопротивление воды отличается от указанного в паспорте водонагревателя, его мощность будет отличаться от номинальной. Использование воды с низким удельным сопротивлением в водонагревателях, предназначенных для нагрева воды с высоким удельным сопротивлением, ведет к увеличению плотности тока на электродах, интенсификации выделения водорода, образованию гремучей смеси и пробоем промежутка между электродами. Вода с удельным сопротивлением, значение которого больше верхнего предела, не позволяет получать мощность, указанную в паспорте водонагревателя. Поэтому перед вводом водонагревателя в эксплуатацию необходимо измерить удельное сопротивление воды и при необходимости внести коррекцию в его величину путем добавления соли (глауберовой, поваренной, сульфата натрия, тринатрийфосфата), соды (например, кальцинированной) или дистиллята.

В лабораторных и производственных условиях удельное сопротивление воды и других проводников с ионной проводимостью измеряют чаще всего кондуктометрическим методом. Исследуемое вещество помещают в измерительную ячейку, конструкция которой зависит от необходимой точности измерений. Схема простейшей измерительной ячейки представлена на рис. 1.1.

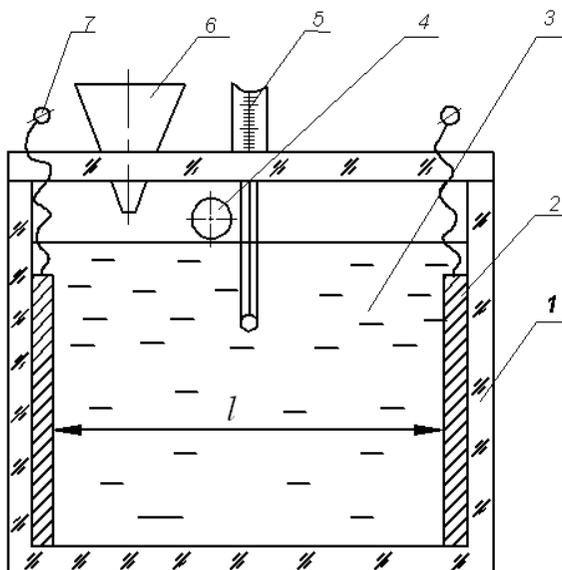


Рис. 1.1. Ячейка измерительная:

1 – корпус; 2 – электроды; 3 – вода; 4 – отверстие для слива воды; 5 – датчик температуры; 6 – воронка; 7 – токоподводящие провода

Важнейшей характеристикой измерительных ячеек является постоянная ячейки, представляющая собой отношение расстояния между электродами к площади поверхности электрода. Эти размеры трудно измерить инструментально, особенно если поверхность электродов отличается от плоской, а сечение межэлектродного пространства в плоскости, перпендикулярной электродам, переменное. Для определения постоянной ячейки используют жидкость, проводимость которой хорошо известна. Такую жидкость называют фиксоном. В качестве фиксонала чаще всего используют 0,1N раствор KCl. Постоянная ячейки:

$$k = \frac{R_{\text{KCl}}}{\rho_{\text{KCl}}}, \quad (1.4)$$

где  $R_{\text{KCl}}$  – сопротивление измерительной ячейки, заполненной 0,1N раствором KCl при определенной температуре, например, 20 °C, Ом;  $\rho_{\text{KCl}}$  – удельное электрическое сопротивление 0,1N раствора KCl при той же температуре, Ом·м.

В простейшем случае, для плоских параллельных электродов  $k = l/S$ , где  $l$  – межэлектродное расстояние, м;  $S$  – площадь поверхности электрода, м<sup>2</sup>.

Сопротивление воды  $R$  в измерительной ячейке можно измерить мостом или с помощью амперметра и вольтметра (рис. 1.2).

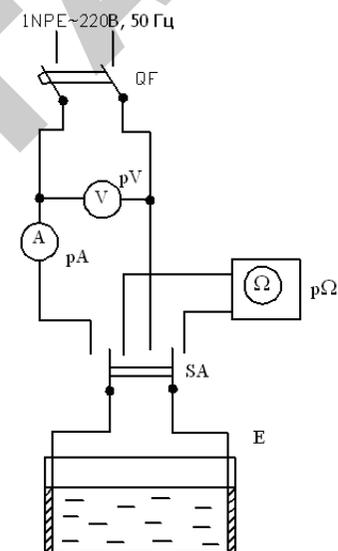


Рис. 1.2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Удельное сопротивление при измерении мостом вычисляется по следующей формуле:

$$\rho_{\text{м}} = \frac{R}{k}, \quad (1.5)$$

а амперметром и вольтметром по выражению

$$\rho_{\text{AB}} = \frac{U}{Ik}, \quad (1.6)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к электродам ячейки, В;  $I$  – сила тока между электродами, А.

## Методика выполнения работы

Экспериментальная установка (рис. 1.2) состоит из измерительной ячейки Е, моста переменного тока  $p\Omega$ , приборов измерения тока  $pA$ , напряжения  $pV$  и температуры. Измерить удельное сопротивление водопроводной воды с трехкратной повторностью.

1. Определить постоянную измерительной ячейки. Для этого ячейку заполнить фиксоналом, мостом измерить ее сопротивление и по формуле (1.4) рассчитать  $k$ . Температурная зависимость удельной проводимости 0,1N раствора KCl приведена на рис. 1.3.

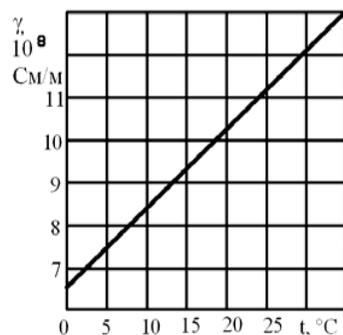


Рис. 1.3. Температурная зависимость удельной проводимости 0,1N раствора KCl

2. Измерительную ячейку промыть, а потом заполнить водой из водопровода до уровня сливного отверстия. Мостом измерить сопротивление, а термометром – температуру воды. Далее переключателем SA ячейку подключить к сетевому напряжению и измерить силу тока и напряжение в цепи. Показания электрических приборов и термометра записать в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерения удельного сопротивления воды

Измерено				Вычислено		
t, °C	U, В	I, А	R <sub>м</sub> , Ом	ρ <sub>м</sub> , Ом·м	ρ <sub>АВ</sub> , Ом·м	ρ <sub>т</sub> , Ом·м

В результате протекания тока через воду ее температура увеличивается. После нагрева воды на каждые 5–10 °C записать показания приборов, напряжение отключить, а выводы от электродов ячейки переключить на мост и измерить сопротивление. Поочередные подключения ячейки к сети и к мосту продолжать до тех пор, пока температура воды не достигнет примерно 100 °C.

По результатам измерений (табл. 1.1) и по формулам (1.5), (1.6) вычислить удельное сопротивление воды.

Температурную характеристику удельного сопротивления воды рассчитать по формуле (1.2), приняв значение ρ<sub>20</sub> из табл. 1.1.

По результатам измерений (табл. 1.1) и вычислений построить графические зависимости ρ<sub>м</sub>, ρ<sub>АВ</sub>, ρ<sub>т</sub> от температуры воды.

3. Определить массу соли или дистиллята, необходимую для уменьшения или увеличения удельного сопротивления воды (табл. 1.1) до величины, соответствующей номинальному сопротивлению воды в электродном нагревателе, например, 30–50 Ом·м. Для этого в воду в измерительной ячейке дозировано добавить соль или дистиллят и измерить удельное сопротивление (табл. 1.2). Массу добавок определить взвешиванием или с помощью мерного сосуда.

Таблица 1.2

Зависимость удельного сопротивления воды от концентрации добавок

Измерено			Вычислено
M <sub>д</sub> , г	V <sub>в</sub> , м <sup>3</sup>	ρ <sub>м</sub> , Ом·м	m <sub>д</sub> , г/м <sup>3</sup>

В табл. 1.2: M<sub>д</sub>, m<sub>д</sub> – масса и концентрация соли или дистиллята; V<sub>в</sub> – объем воды в измерительной ячейке.

По результатам табл. 1.2 строят графическую зависимость ρ<sub>м</sub>(m<sub>д</sub>), по которой найти необходимую концентрацию добавки для получения требуемого удельного сопротивления воды.

### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы, результаты измерений.
2. Графические зависимости удельного сопротивления воды от температуры и концентрации соли или дистиллята.
3. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы:**

1. Электропроводность воды и факторы, ее определяющие.
2. Методы измерения удельной электрической проводимости или удельного сопротивления воды.
3. Температурная характеристика удельного сопротивления воды.
4. Влияние сопротивления воды на работу электродных водонагревателей и парогенераторов.
5. Необходимость и способ коррекции величины удельного сопротивления воды.

## **2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТНЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ**

**Цель работы:** изучить устройство элементных нагревателей, установить влияние условий эксплуатации на характеристики трубчатых электронагревателей.

### **Задачи работы:**

1. Изучить устройство электронагревателей, определить факторы, существенно влияющие на их характеристики при эксплуатации.
2. Исследовать влияние изменения напряжения питания на мощность и температуру нагревателя.
3. Исследовать влияние условий теплоотдачи на температуру нагревателя.

### **Общие сведения**

Элементный нагрев наряду с электродным и электроконтактным является одним из видов электрического нагрева сопротивлением. Энергия электрического тока преобразуется в тепловую в нагревательном элементе и от него передается к нагреваемой среде конвекцией, теплопроводностью, излучением или их комбинацией.

Нагревательные элементы выполняют из токопроводящих материалов высокого сопротивления в виде спиралей из проволоки, зигзагов ленты, стержней, пленок на изолирующей основе, текстильных лент и тканей.

Нагреватель состоит из нагревательного элемента и устройств для подвода напряжения, электроизоляции, защиты от внешних воздействий, крепления.

Нагреватели классифицируют по температуре (низкотемпературные – до 350 °С, среднетемпературные – 350–2000 °С, высокотемпературные – более 2000 °С); материалу нагревательного элемента (металлические, полупроводниковые, неметаллические); степени защиты нагревательного элемента от внешней среды (открытые, закрытые, герметичные); форме материала нагревательного элемента (проволочные, ленточные, стержневые, пленочные, тканевые и др.); конструктивному исполнению (трубчатые, протяженные, поверхностно-распределенные).

Открытые нагреватели (рис. 2.1) просты по устройству, имеют хорошие условия для теплопередачи, ремонтпригодны.

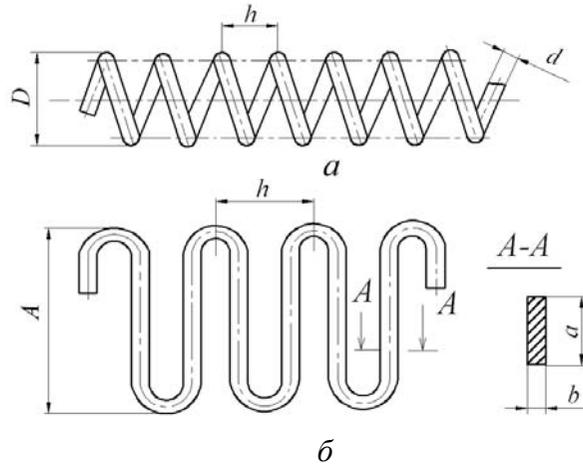


Рис. 2.1. Открытые нагреватели в виде спирали из проволоки (а) и зигзага из ленты (б):  $d$  – диаметр проволоки;  $D$  – диаметр спирали;  $h$  – шаг;  $A$  – высота зигзага;  $a$ ,  $b$  – ширина и толщина ленты

В закрытых нагревателях (рис. 2.2) нагревательный элемент размещен в корпусе, предохраняющем от механических воздействий и доступа нагреваемой среды. В герметичных нагревателях нагревательный элемент защищен от механических воздействий, доступа нагреваемой среды и воздуха.

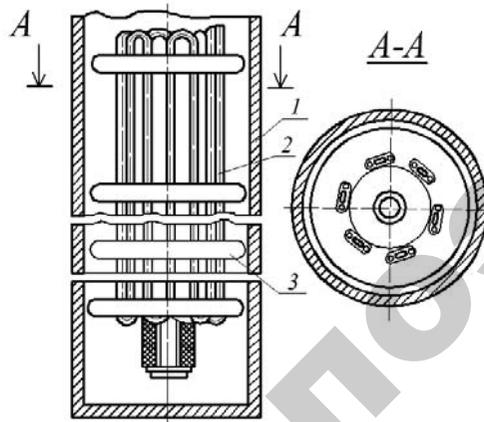
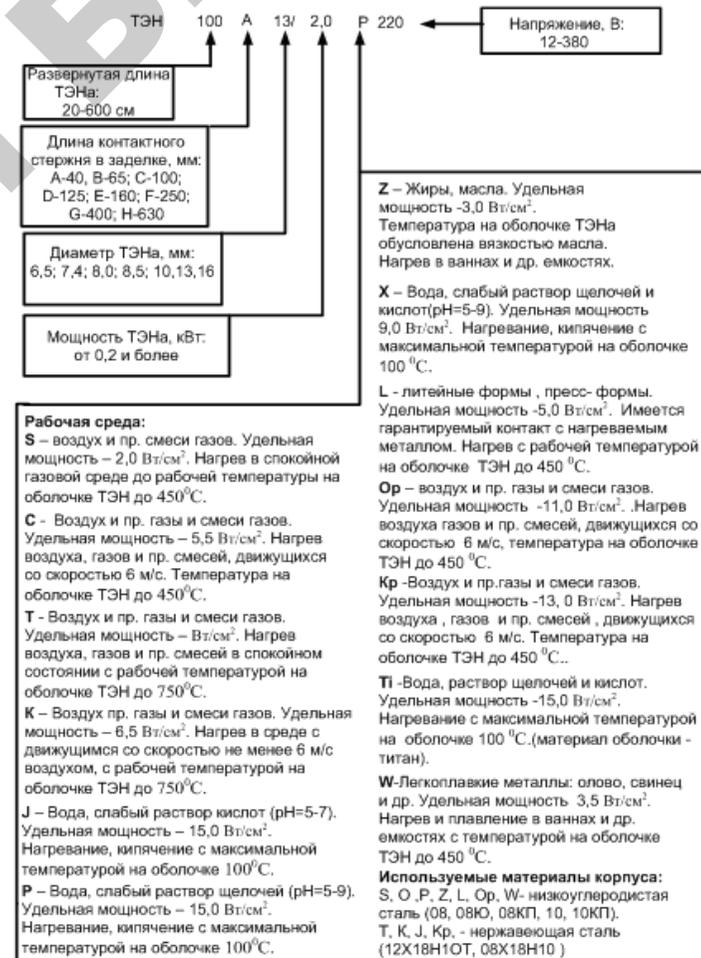


Рис. 2.2. Закрытый нагреватель: 1 – кожух; 2 – нагревательный элемент; 3 – керамическая шайба

Трубчатые электрические нагреватели могут быть закрытыми и герметичными, цилиндрической, овальной, прямоугольной и другой формы. Наиболее распространены герметичные трубчатые электрические нагреватели цилиндрической формы (ТЭНы). Область их применения очень широка, они используются в большинстве установок низкотемпературного нагрева, а также во всех отраслях народного хозяйства (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Структура условного обозначения и технические характеристики ТЭНов



Трубчатый электронагреватель (рис. 2.3.) состоит из тонкостенной (0,5–1,0 мм) металлической оболочки 7 (сталь углеродистая, нержавеющая, медь, латунь), внутри которой размещена нагревательная спираль 6 (нихром, фехраль), изолированная от оболочки наполнителем 4, обладающим высоким электрическим сопротивлением и хорошей теплопроводностью (чаще всего – электротехнический периклаз марки ЛПЭ). Концы спирали соединены с контактными стержнями 5, снабженными с внешней стороны контактными устройствами 1. Торцы трубки заглушены изоляторами 2. Стыки металлической оболочки с изолятором защищены от проникновения в наполнитель воздуха и влаги термостойким герметиком 3 (КО-08, ВГО-1 и др.).

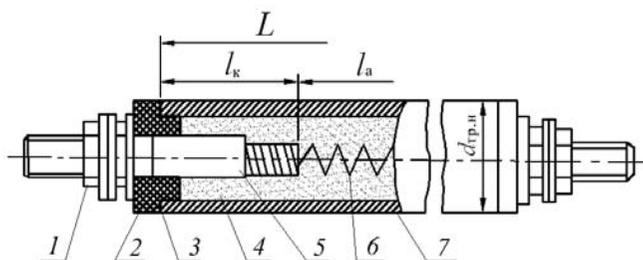


Рис. 2.3. Типовая конструкция трубчатого нагревателя:

1 – контактное устройство; 2 – изолятор; 3 – герметик; 4 – наполнитель;  
5 – контактный стержень; 6 – нагревательная спираль; 7 – металлическая оболочка;  
 $L$ ,  $l_a$ ,  $l_k$  – длина развернутая, активной части, контактного стержня в заделке;  
 $d_{гр.н}$  – наружный диаметр трубки

ТЭНам можно придать разнообразную пространственную форму и увеличить поверхность теплоотдачи путем оребрения (рис. 2.4).

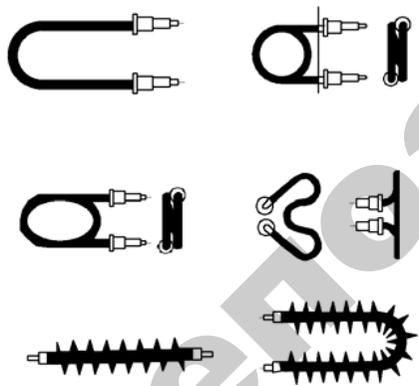


Рис. 2.4. Пример формы ТЭНов

Протяженные электрические нагреватели объединяют нагревательные провода, кабели, ленты. Их применяют для обогрева полов в животноводческих и других помещениях, почвы в парниках и теплицах, футбольных полей, дорог, лестниц, водосточных систем, трубопроводов, резервуаров и т. д. Протяженные нагреватели классифицируют по распределению теплоты по длине нагревателя (равномерное, зональное, термозависимое или саморегулирующееся), температуре и линейной мощности (низкотемпературные – до 130 °С и 40 Вт/м, среднетемпературные – до 230 °С и 70 Вт/м, высокотемпературные – до 1000 °С и 470 Вт/м), напряжению (220, 380, до 1000 В), числу фаз (одно-, двух- и трехфазные), конструктивному исполнению (провода, ленты, кабели, бронированные, армированные, спиральные и др.).

Протяженные нагреватели с равномерным выделением теплоты состоят из жилы из сплава высокого или обычного сопротивления, окруженной изоляцией и защитной оболочкой (рис. 2.6, а). В зональных нагревателях теплота выделяется в спиралях, контактирующих с двумя токоподводящими шинами. Длина одной зоны тепловыделения – около 1 м (рис. 2.5, а). В термозависимых (саморегулирующихся) нагревателях теплота выделяется в полупроводящей пластмассе, заполняющей пространство между двумя токоподводящими шинами (рис. 2.5, б). При повышении температуры сопротивление пластмассы увеличивается и тепловыделение падает, благодаря этому происходит саморегулирование.

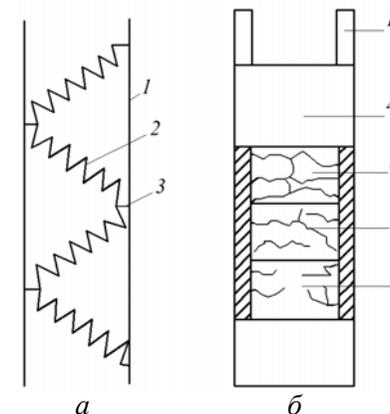


Рис. 2.5. Принцип устройства зонального (а)

и саморегулирующегося (б) протяженных нагревателей:

1 – токоподводящие жилы; 2 – нагревательный провод; 3 – контакт между жилой и проводом; 4 – саморегулирующаяся полупроводящая матрица;  
5, 6, 7 – холодный, теплый, горячий участки

Конструктивное исполнение некоторых протяженных нагревателей показано на рис. 2.6. Их марки не указаны из-за большого количества условных обозначений, систематизированных каждым производителем по своему усмотрению.

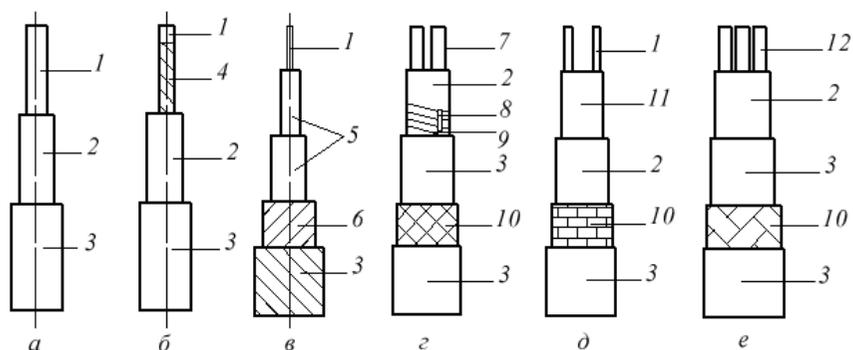


Рис. 2.6. Нагревательные провода (а, б), кабели (в), ленты (г, д, е):

1 – нагревательная жила; 2 – изоляция; 3 – оболочка; 4 – сердечник;  
5 – двухслойная изоляция; 6 – броня; 7 – проводник; 8 – контакт параллельного соединения проводников; 9 – нагревательный элемент; 10 – оплетка;  
11 – матрица; 12 – нагревательная лента

Поверхностно-распределенные электрические нагреватели представляют собой поверхность-основу, на которой или в которой распределен нагревательный элемент. Основой может быть жесткий или гибкий материал, например, изолированный металлический лист, поверхность нагреваемого устройства, тканые материалы, листы резины и пластмассы. В качестве нагревательных элементов используют металлические и полупроводниковые порошки, углерод, сажу, графит, которые распыляют на основе в виде пленок, вплетают в ткань или делают ткань из токопроводящих нитей, добавляют в резину или пластмассу перед изготовлением.

Устройство поверхностно-распределенного пленочного нагревателя представлено на рис. 2.7.

Основными факторами, влияющими на надежность и безопасность работы элементных нагревателей, являются прочность электрической изоляции, условия теплоотвода и соответствие напряжения сети номинальному напряжению нагревателя.

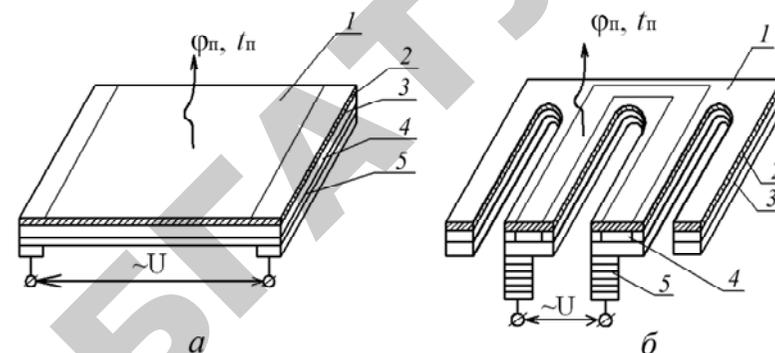


Рис. 2.7. Устройство поверхностно-распределенного пленочного нагревателя:  
а – тонколистовая пластина; б – панель с отверстиями:

1 – контактная поверхность теплообмена; 2 – несущая конструкция; 3 – тонкослойная изоляция; 4 – резистивный электронагревательный элемент; 5 – контактный электрод;  
 $\Phi_p$  – тепловой поток;  $t_p$  – температура поверхности

Сопротивление электрической изоляции между нагревательным элементом и защитной оболочкой для большинства элементных нагревателей должно быть не менее  $5 \cdot 10^5$  Ом. При длительном хранении нагревателей, нарушении герметика при подключении проводов к ТЭНам и попадании влаги из воздуха в периклаз сопротивление изоляции снижается. Для восстановления требуемой величины сопротивления изоляции нагреватели подсушивают, например, ТЭНы при температуре 100–120 °С в течение 10 часов. Если при нарушении герметика подсушка не помогает, ТЭН выйдет из строя.

Условия отвода теплоты от поверхности нагревателя влияют на его температуру. В технической характеристике нагревателей указана допустимая удельная поверхностная или линейная мощность, которую нельзя превышать при эксплуатации. Нагреватель должен работать в среде, для которой он изготовлен, однако можно использовать нагреватели и в других средах, если в них возможна такая или большая теплоотдача. Загрязнение, накипеобразование, отложение фрагментов нагреваемых материалов на поверхности нагревателя, снижение скорости воздуха или жидкости значительно ухудшают теплоотвод. Например, образование накипи на поверхности ТЭНа толщиной 2 мм, прекращение движения воздуха в электрокалориферах, воды в проточных элементных водонагревателях ведет к перегоранию нагревательных элементов. Чтобы этого не допускать, необходимо выполнять инструкции по эксплуатации установок.

## Методика выполнения работы

1. Изучить устройство и характеристики элементных нагревателей по рекомендуемой литературе и образцам, представленным в лаборатории. Начертить эскизы лабораторных нагревателей и записать их основные характеристики.

2. Влияние величины напряжения  $U$  на мощность  $P$  и температуру нагревателя  $t_n$  исследовать на экспериментальной установке (рис. 2.8).

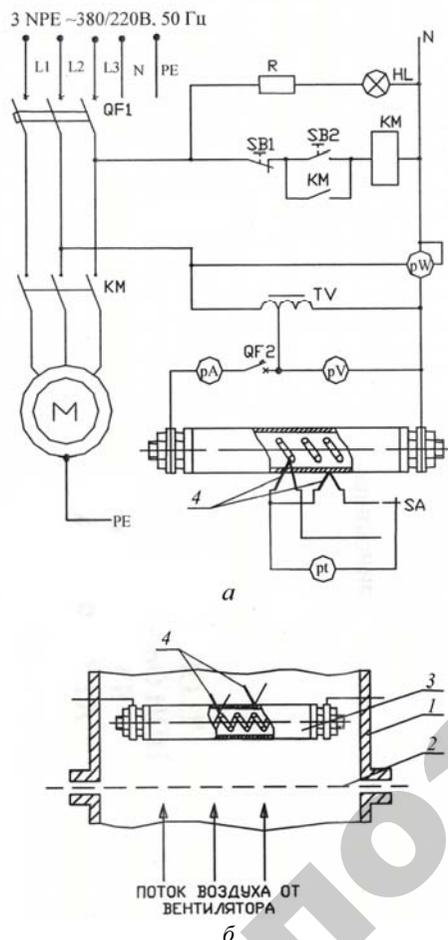


Рис. 2.8. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки (а), схема размещения ТЭНа в воздухе (б): 1 – воздуховод; 2 – заслонка, регулирующая подачу воздуха; 3 – ТЭН; 4 – термопары

При выключенном вентиляторе скорость воздуха равна нулю. Напряжение на ТЭНе отрегулировать автотрансформатором в диапазоне 40, 60, 80, 100 % от номинального. Измеряют силу тока  $I$ , температуру трубки нагревателя  $t_n$  и окружающего воздуха  $t_o$  (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Влияние напряжения питания на мощность и температуру нагревателя

Измерено					Вычислено		
$U, В$	$I, А$	$A, м^2$	$t_o, ^\circ C$	$t_n, ^\circ C$	$R_t, Ом$	$P, Вт$	$\alpha, Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$

По результатам исследований необходимо установить графическую и математическую зависимости мощности и температуры поверхности ТЭНа от величины напряжения питания и проверить их адекватность.

Сопротивление нагревателя при температуре  $t$ , Ом:

$$R_t = \frac{U}{I}. \quad (2.1)$$

Мощность нагревателя, Вт:

$$P = \frac{U^2}{R_t}. \quad (2.2)$$

Уравнение баланса мощностей (выделяющейся в нагревателе  $\frac{U^2}{R_t}$  и отдаваемой в окружающую среду  $\alpha A(t_n - t_o)$ ):

$$\frac{U^2}{R_t} = \alpha A(t_n - t_o), \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к воздуху,  $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $A$  – площадь поверхности теплоотдачи,  $м^2$ .

При конвективной теплоотдаче в неподвижном воздухе от плоской поверхности, температура которой лежит в диапазоне 0–150  $^\circ C$ , принять приближенно  $\alpha = 10 Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$ .

3. Влияние условий теплоотдачи (в лабораторной работе скорости воздушного потока) на температуру нагревателя необходимо исследовать на установке, приведенной на рис. 2.8). Напряжение питания принимают 220 В. Скорость воздуха  $v$  изменить в диапазоне 0,3; 0,6; 0,8 м/с заслонками 2, перекрывающими воздуховод 1. При каждом значении скорости воздуха измерить силу тока в цепи нагревателя  $I$ , температуру трубки  $t_n$  и спирали  $t_c$  (табл. 2.3). По результатам исследований установить графическую зависимость температуры  $t_n$  от скорости воздуха  $v$  и сделать заключение о влиянии температуры спирали  $t_c$  на сопротивление нагревателя  $R_n$ .

Таблица 2.3

Влияние условий теплоотдачи на температуру нагревателя

Измерено						Вычислено		
$v$ , м/с	$U$ , В	$I$ , А	$t_0$ , °С	$t_n$ , °С	$t_c$ , °С	$R_n$ , Ом	$P$ , Вт	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)

#### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы, результаты измерений.
2. Графические зависимости мощности и температуры нагревателя от напряжения питания, температуры нагревателя от скорости воздуха.
3. Математическая зависимость мощности и температуры нагревателя от напряжения питания.
4. Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы:

1. Механизм преобразования электрической энергии в тепловую. Закон Джоуля–Ленца.
2. Классификация и устройство элементных нагревателей.
3. Условное обозначение ТЭНов.
4. Основные факторы, влияющие на надежность и безопасность элементных нагревателей.
5. Влияние составляющих уравнения баланса мощностей на характеристики нагревателя.
6. Основные правила монтажа и обслуживания нагревателей.

### 3. ЭЛЕМЕНТНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия элементных водонагревателей и электрические схемы управления ими.

#### Задачи работы:

1. Изучить устройство, принцип действия, способы регулирования мощности элементных водонагревателей САОС, САЗС, ЭВ-Ф-15, КВ-02 и индукционного водонагревателя 084.ПВ-1.
2. Изучить принципиальные электрические схемы управления водонагревателями САЗС, ЭВ-Ф-15, 084.ПВ-1.
3. Опробовать нагрев воды в емкостном ЭН-1В, проточном КВ-02 и индукционном 084.ПВ-1 водонагревателях. Определить их КПД, скорость нагрева воды, удельный расход энергии.

#### Общие сведения

Устройства нагрева воды, в которых используют элементные нагреватели, чаще всего ТЭНы, называют элементными водонагревателями. Различают аккумуляционные и проточные водонагреватели.

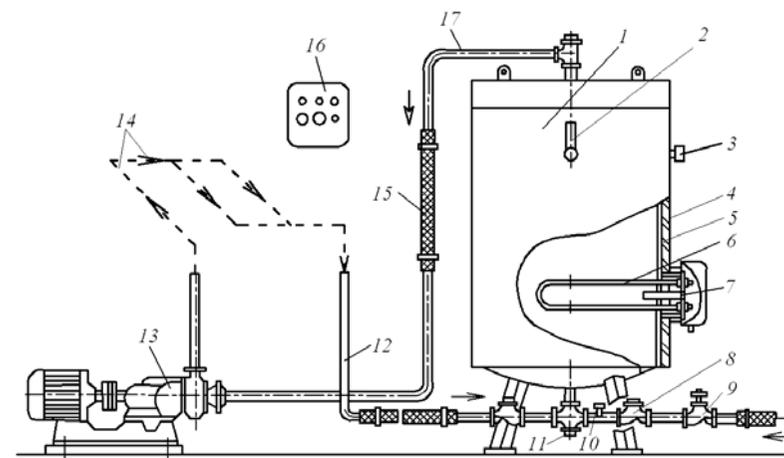


Рис. 3.1. Водонагреватель САЗС-400/90И1:

1 – водонагреватель; 2 – термометр; 3 – аварийный датчик температуры; 4 – стальной резервуар; 5 – теплоизоляция и кожух; 6 – блок нагревателей; 7 – датчик температуры воды; 8, 9 – обратный клапан и вентиль на трубопроводе холодной воды; 10 – клапан избыточного давления; 11 – пробка слива; 12 – трубопровод возврата воды; 13 – насос; 14 – система горячего водопотребления; 15 – изоляционная вставка; 16 – ящик управления; 17 – трубопровод горячей воды

Аккумуляционные водонагреватели представляют собой теплоизолированный стальной бак определенного объема, в котором воду нагревают до 90 °С за 3–5 часов и сохраняют горячей в течение необходимого времени. Наиболее распространены аккумуляционные водонагреватели типов САОС и САЗС (рис. 3.1) с объемом бака от 400 до 1600 литров (С – нагрев сопротивлением, А – аккумуляционная, О – открытая, З – закрытая, С – система). Водонагреватель САОС конструктивно выполнен так же, как и САЗС, только в нем отсутствует насос для перекачивания воды по замкнутому контуру «водонагреватель–потребитель». Водонагреватели вместимостью 800 литров и более оснащены двумя нагревательными блоками.

Проточные водонагреватели (ЭВ-Ф-15, КВ-02) представляют собой металлическую емкость небольшого размера без теплоизоляции, в которой проточную воду нагревают до любой температуры менее 90 °С. Наиболее распространен элементный водонагреватель для ферм ЭВ-Ф-15 мощностью 15 кВт (рис. 3.2).

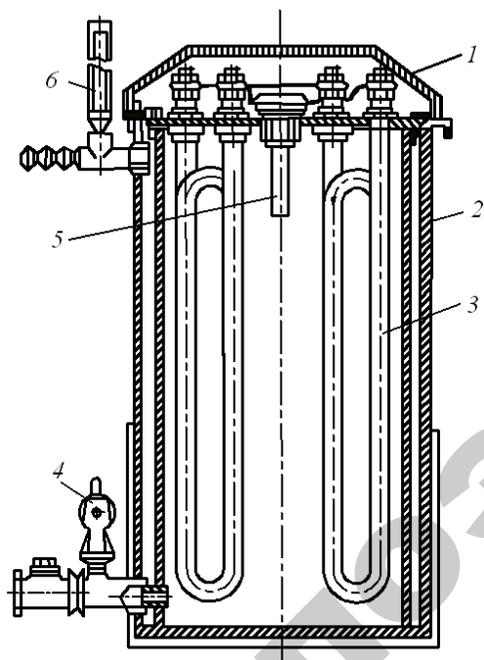


Рис. 3.2. Водонагреватель ЭВ-Ф-15:

1 – защитный кожух; 2 – резервуар; 3 – нагреватель;

4 – предохранительный клапан; 5 – терморегулятор ТР-200; 6 – термометр

Так называемый индукционный водонагреватель (рис. 3.3) представляет собой трехфазный понижающий трансформатор, вторичные фазные обмотки которого выполнены из стальной трубы диаметром 20 мм и закорочены между собой. Вторичный ток трансформатора (5–10 тыс. ампер) нагревает трубу и, следовательно, воду, протекающую в ней. Фактически это не индукционный, а элементный водонагреватель, выполненный в виде стальной трубы, одновременно являющейся вторичной обмоткой понижающего трансформатора.

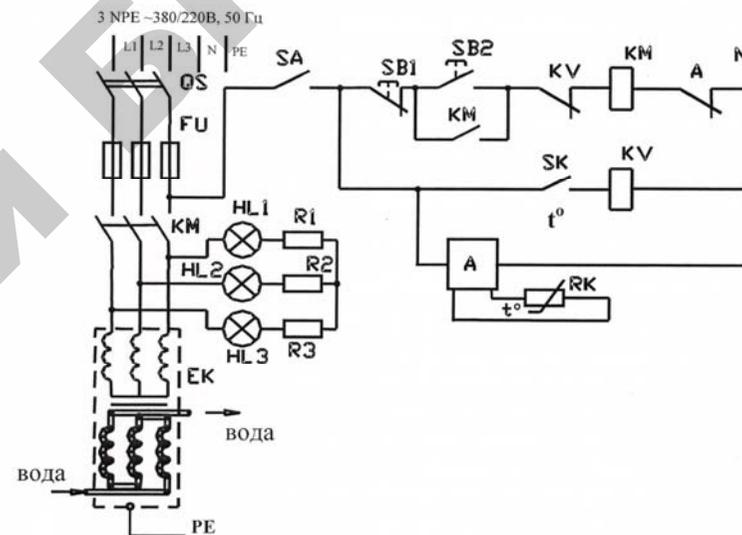


Рис. 3.3. Принципиальная электрическая схема индукционного водонагревателя 084.ПВ-1:

А – устройство защиты трансформатора от перегрева;

ЕК – индукционный водонагреватель; SK – контакт манометрического термометра

Электрическая схема индукционного водонагревателя 084.ПВ-1 обеспечивает отключение водонагревателя в случае превышения температуры воды, заданной на SK, и при перегреве трансформатора (блок А).

Предприятия выпускают большое количество разнообразных аккумуляционных и проточных водонагревателей, которые принципиально не отличаются от показанных на рис. 3.1, 3.2.

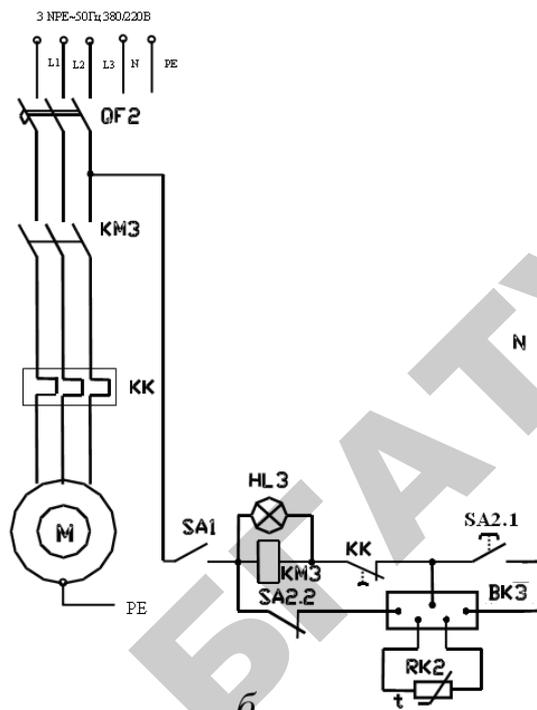
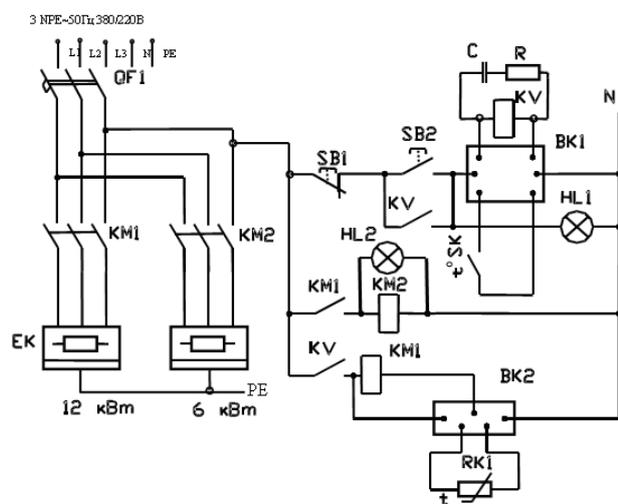
В элементных водонагревателях баланс мощностей – подводимой к нагревателям, отдаваемой от нагревателей к воде и расходуемой на нагрев воды, без учета теплотерь – рассчитывается по следующей формуле:

$$\frac{U^2}{R_t} n = \alpha A (t_n - t_b) = m_\tau c (t_2 - t_1), \quad (3.1)$$

где  $U$  – напряжение на нагревателе, В;  $n$  – общее количество нагревателей, шт.;  $R_t$  – сопротивление каждого нагревателя, Ом;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от нагревателя к воде, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $A$ ,  $t_n$  – площадь (м<sup>2</sup>) и температура поверхности нагревателя (°С) соответственно;  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_b$  – температура воды начальная, конечная и у поверхности нагревателя соответственно, °С;  $m_\tau$  – подача (расход) воды, кг/с;  $c$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С).

Согласно выражению (3.1) температуру можно регулировать изменением напряжения, количеством нагревателей или подачей воды. Напряжение изменяют с помощью регулируемого источника питания, например, тиристорного регулятора, переключением схемы соединения нагревателей или просто его включением-отключением. Подача воды влияет не только на  $t_2$ , но и на  $t_b$  и  $\alpha$ . Этот способ регулирования наиболее часто ведет к перегоранию ТЭНов из-за ухудшения теплоотдачи от их поверхности к воде.

Электрическая схема водонагревателя типа САЗС (рис. 3.4, а) автоматически поддерживает температуру с точностью  $\pm 3-5$  °С около значения, заданного на блоке регулирования температуры ВК2, защищает водонагреватель от перегрева воды свыше 95 °С (терморегулятор ВК1), обеспечивает автоматическую работу насоса для перекачивания воды. При нажатии кнопки SB2 напряжение подается на терморегулятор ВК1, который включает промежуточное реле KV. Реле KV блокирует кнопку SB2, подает напряжение на ВК2, который, в свою очередь, включает катушки магнитных пускателей КМ1, КМ2 и нагревательные блоки ЕК. При достижении заданной температуры ВК2 отключает КМ1 и КМ2. При снижении температуры воды на 3–5 °С, по сравнению с заданной, ВК2 снова включает нагрев. Если температура воды превышает заданную и достигает 95 °С, то замыкается термоконтакт SK, терморегулятор ВК1 выключает KV, ВК2 и нагреватели. Температуру воды в системе горячего водоснабжения поддерживают терморегулятором ВК3, первичный преобразователь РК-2 которого установлен на трубопроводе системы (рис. 3.4, б). При понижении температуры ВК3 включает насос, который перекачивает остывшую воду через водонагреватель. Ручной или автоматический режим работы насоса задают выключателем SA2.



*a*

*б*

Рис. 3.4. Принципиальные электрические схемы управления водонагревателем САЗС-800/90И1 (а) и водяным насосом (б)

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

В водонагревателе ЭВ-Ф-15 (рис. 3.5) температуру воды регулируют подачей и контролируют по термометру. В автоматическом режиме работы водонагреватель включается через 15–45 с после включения тумблера SA и замыкания контакта SK. Выдержку обеспечивает реле времени KT. При замыкании контакта SK конденсатор C2 заряжается от выпрямителя VD2–VD5 через SK и R1. При достижении напряжения на C2 определенной величины транзистор VT открывается и включает тиристор VS1, который закорачивает цепь постоянного тока выпрямителя и тем самым обеспечивает питание катушки пускателя KM на переменном токе. Выдержка времени снижает частоту включений пускателя и подгорание контакта термореле. При температуре 75–80 °С термореле контактом SK отключает водонагреватель от сети.

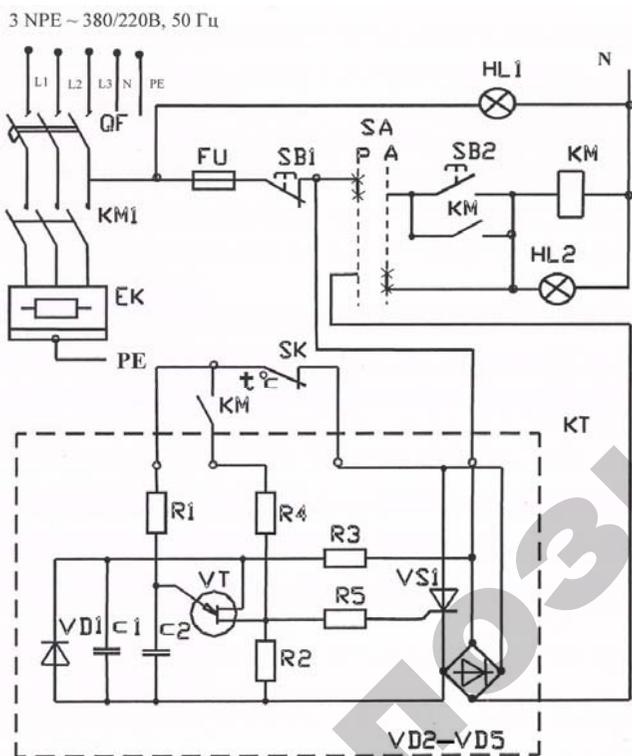


Рис. 3.5. Принципиальная электрическая схема управления водонагревателем ЭВ-Ф-15

## Методика выполнения работы

1. Изучить устройство, принцип действия и способы регулирования мощности водонагревателей ЭВ-Ф-15, KB-02, САОС, САЗС, 084.ПВ-1. Нарисовать принципиальные схемы изучаемых водонагревателей. Уяснить местоположение, назначение, действие подводящих и отводящих трубопроводов, предохранительных и обратных клапанов, циркуляционных насосов, изолирующих вставок, датчиков и регуляторов температуры. Изучить устройство терморегуляторов, температурных реле, манометрических термометров, установленных на водонагревателях.

Уяснить месторасположение, назначение, действие аппаратов, работу электрических схем водонагревателей, изучив электроаппаратуру, установленную в шкафах управления и на водонагревателях.

2. Поочередно включить водонагреватели KB-02, ЭН-1В, 084.ПВ-1. Открыть вентиль и установить подачу воды  $m_\tau$  равной, указанной на водонагревателе. Включить автоматический выключатель QF на лабораторном стенде «Элементные водонагреватели», установить пакетный переключатель SA в положение KB-02. Включить автоматический выключатель QF1 на пульте управления водонагревателем KB-02. С помощью измерителей-регуляторов MT2 через каждые 2 минуты измерить температуру на входе  $t_1$ , выходе  $t_2$  водонагревателя и трубки ТЭНа  $t_n$ , контролируя время нагрева  $\tau$  и мощность  $P$ . Опыт проводить до установившейся температуры  $t_2$ . Результаты исследований записать в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Энергетические характеристики водонагревателей KB-02, ЭН-1В, 084.ПВ-1

Измерено						Вычислено			
$m_\tau$ , кг/с	$\tau$ , с	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$t_n$ , °C	$P$ , Вт	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	$\eta$ , о.е.	$\Delta t/\tau$ , °C/с	$q$ , Дж/(кг·°C)

Мощность водонагревателей снижена по сравнению с номинальной из-за ограниченных возможностей лабораторной электрической сети.

По результатам исследований определить следующие показатели.

Коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к воде:

$$\alpha = \frac{P}{(t_n - t_2)A}, \quad (3.2)$$

где  $A$  – площадь теплоотдающей поверхности (ЭН-1В – 0,82 м<sup>2</sup>, КВ-02 – 0,2 м<sup>2</sup>, 084.ПВ-1 – 0,965 м<sup>2</sup>).

Коэффициент полезного действия водонагревателя:

$$\eta = \frac{m_\tau c(t_2 - t_1)}{P}, \quad (3.3)$$

где  $c = 4190$  Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость воды.

Скорость нагрева:

$$\frac{\Delta t}{\tau} = \frac{t_2 - t_1}{\tau}. \quad (3.4)$$

Удельный расход энергии на нагрев воды:

$$q = \frac{P}{m_\tau(t_2 - t_1)}. \quad (3.5)$$

По результатам исследований сделать вывод об энергетической эффективности водонагревателей.

#### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы, результаты измерений.
2. Графические зависимости  $t_2(\tau)$ .
3. Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы:

1. Устройство, принцип действия элементных и индукционных водонагревателей.
2. Работа принципиальных электрических схем управления.
3. Способы регулирования температуры воды.
4. Основные энергетические характеристики водонагревателей.
5. Основные правила эксплуатации элементных водонагревателей.

## 4. ЭЛЕКТРОДНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия, типовые схемы управления электродных водонагревателей.

#### Задачи работы:

1. Изучить устройство, принцип действия и способы регулирования мощности водонагревателей ЭПЗ и КЭВ.
2. Определить геометрический коэффициент электродной системы и пределы регулирования мощности водонагревателя КЭВ-100/0,4.
3. Исследовать влияние температуры воды на мощность водонагревателя. Определить КПД системы «водонагреватель–теплообменник» и расход энергии на нагрев воды.
4. Установить влияние неполнофазных режимов питания водонагревателя на «вынос» напряжения на трубопроводы.
5. Изучить принцип работы  $\alpha$ -контроллера для автоматического управления электродным водонагревателем в системе отопления.

#### Общие сведения

Устройства, в которых воду нагревают, пропуская электрический ток через нее между токоподводящими электродами, называют электродными водонагревателями или парогенераторами.

Электродный водонагреватель состоит из металлического корпуса, внутри которого установлены электроды, механизм регулирования мощности, токоподводящие, изолирующие и другие конструктивные элементы.

Наиболее распространены водонагреватели с плоскими, цилиндрическими коаксиальными и секторными электродами, в частности электродный водогрейный котел КЭВ (рис. 4.1), электродные подогреватели ЭПЗ-100И1 (рис. 4.2) и ЭПЗ-100ИЗ (рис. 4.3).

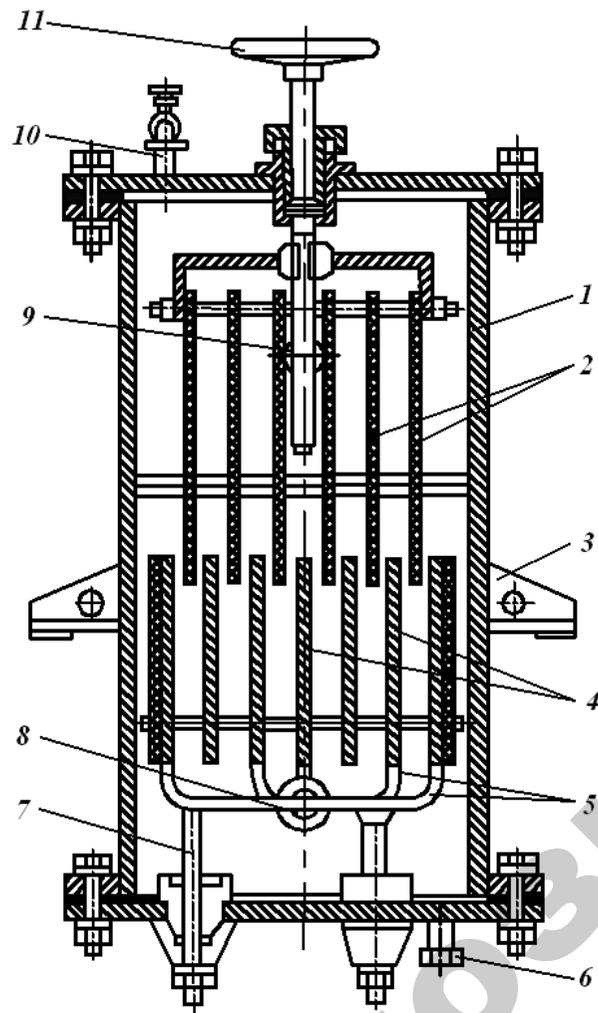


Рис. 4.1. Электродный водогрейный котел КЭВ-0,4:  
 1 – корпус; 2 – диэлектрические пластины; 3 – опоры; 4 – фазные электроды;  
 5 – переключки; 6 – пробка слива; 7 – узел токоподвода; 8, 9 – входное и выходное  
 отверстия для воды; 10 – патрубок для выпуска воздуха;  
 11 – механизм перемещения диэлектрических пластин

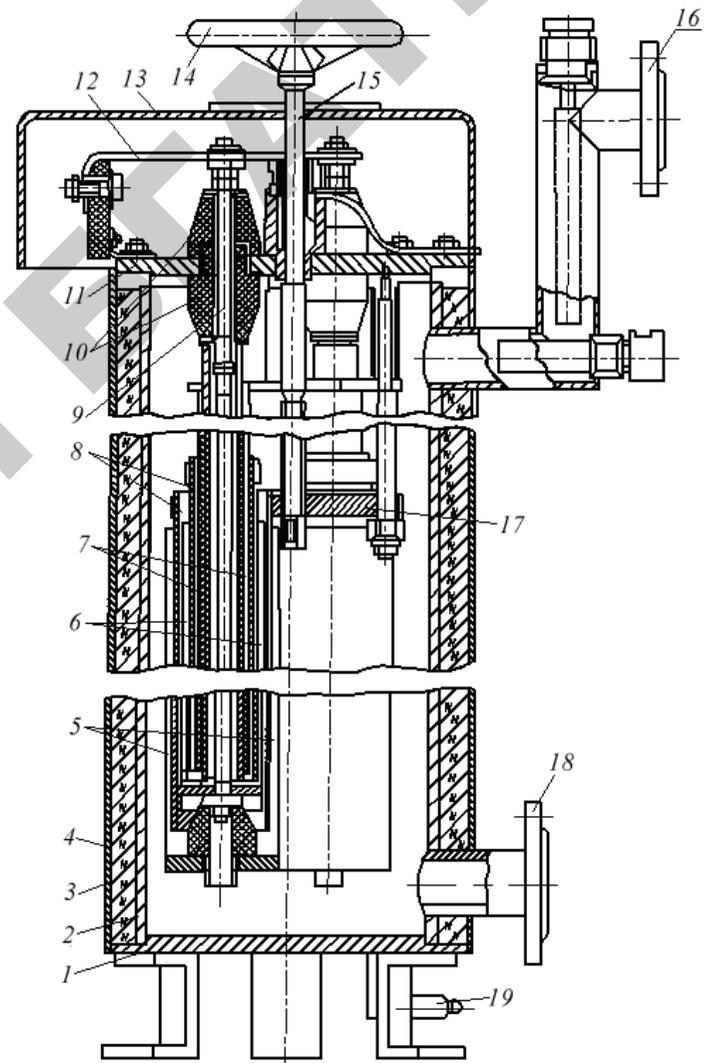


Рис. 4.2. Электродный водонагреватель ЭПЗ-100И1:  
 1 – днище; 2 – корпус; 3 – теплоизоляция; 4 – кожух; 5 – наружные нулевые электроды;  
 6 – фазные электроды; 7 – внутренние нулевые электроды; 8 – изоляционные экраны;  
 9 – токоподводы; 10 – изоляторы; 11 – крышка; 12 – токоподводящие шины;  
 13 – кожух; 14 – маховик; 15 – ходовой винт; 16 – патрубок для отвода воды;  
 17 – траверса; 18 – патрубок для подачи воды; 19 – сливная труба

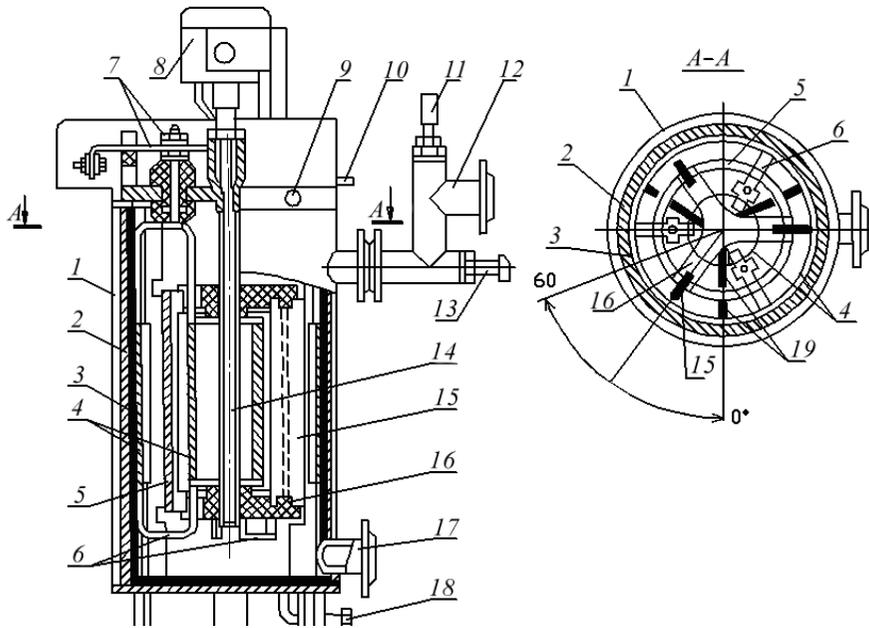


Рис. 4.3. Электродный водонагреватель ЭПЗ-100ИЗ:

1 – кожух; 2 – корпус; 3 – изоляционное покрытие; 4 и 5 – фазные и регулирующие электроды; 6 – перемычки; 7 – токоподвод к электродам; 8 – электроприводной механизм; 9 – вентиль выпуска воздуха; 10 – дренаж из зоны вала; 11, 13 – защитный и регулирующий термодатчики; 12, 17 – патрубки; 14 – вал; 15 – изоляционные пластины; 16 – траверса; 18 – пробка слива; 19 – изоляционные экраны

Мощность водонагревателя зависит от напряжения на электродах  $U$ , их геометрических размеров (высоты  $h$ , ширины  $b$  или диаметра  $d$ , числа  $n$  и расстояния между ними  $l$ ) и удельного сопротивления воды (рис. 4.4). В простейшем случае мощность однофазных плоских электродов равна

$$P_1 = \frac{U^2}{R_t} = \frac{U^2 b h}{\rho_{cp} l}, \quad (4.1)$$

где  $R_t$  – сопротивление одной фазы, Ом;  $\rho_{cp}$  – среднее удельное сопротивление воды между электродами в диапазоне температур нагрева, Ом·м.

В сложных электродных системах путем прямых геометрических измерений трудно определить действительное расстояние между электродами  $l$ , по которому течет ток, и ширину поверхности электрода  $b$ , с которой он стекает. Поэтому введена безразмерная величина  $k = l/b$ , названная геометрическим коэффициентом электродной системы. Формулы для определения  $k$  получают на основе расчета электрических полей в межэлектродном пространстве.

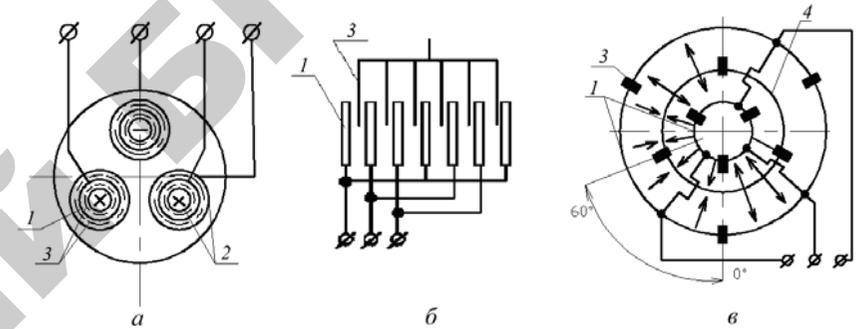


Рис. 4.4. Принципиальные схемы электродной системы водонагревателей ЭПЗ-100И1 (а), КЭВ-100 (б), ЭПЗ-100ИЗ (в):  
1, 2, 4 – фазные, нулевые, регулирующие электроды;  
3 – диэлектрические экраны

Для простой системы (рис. 4.4, б):

$$k = \frac{l}{b(n-1)}, \quad (4.2)$$

где  $n$  – число электродов, работающих на одну фазу.

С учетом геометрического коэффициента сопротивление одной фазы нагревателя:

$$R_t = \frac{\rho_{cp} k}{h}. \quad (4.3)$$

Мощность водонагревателя, согласно выражению (4.1), зависит от напряжения, геометрических размеров электродов, удельного сопротивления воды и, следовательно, ее температуры

(формула (1.2)) (см. л. р. 1). Последнее является недостатком, который необходимо учитывать при конструировании электродных нагревателей. Мощность можно регулировать изменением напряжения питания или сопротивления электродной системы. Первый способ не нашел применения из-за необходимости использования специальных устройств регулирования напряжения, которые усложняют и удорожают водонагреватель, второй способ применяют широко, путем изменения площади электродов (высоты или ширины). Для этого, например, между электродами размещают подвижные диэлектрические пластины (см. рис. 4.1). Перемещая их механизмом 11, изменяют рабочую высоту фазных электродов 4 и, следовательно, мощность, вычисляемую по формуле (4.1), и температуру воды. В водонагревателях ЭПЗ-100ИЗ мощность регулируют плавным изменением рабочей поверхности регулирующих электродов 5 путем их вращения электроприводным исполнительным механизмом 8 вокруг вала 14 (см. рис. 4.3). Мощность минимальна, когда положение изоляционных пластин на регулирующих электродах 4 совпадает с положением изоляционных диэлектрических экранов 3 (рис. 4.4, в). Ее максимум соответствует положению траверс, показанному на рис. 4.4, в. При повороте регулирующих электродов от 0 до 60° мощность увеличивается от 25 до 100 %.

Электрическая схема управления ЭПЗ-100И1 (рис. 4.5) обеспечивает автоматическое поддержание температуры воды в заданном диапазоне за счет включения и отключения напряжения на электродах (терморегулятор SK), защиту от неполнофазных режимов работы (реле тока KA) и коротких замыканий между электродами (предохранители FU1–FU3), блокировку включения водонагревателя при неработающем насосе подачи воды. В автоматическом режиме работы в начальный момент включения напряжение подается на катушку промежуточного реле KV2 по цепи FU4, SK<sub>min</sub>, KV1, KV3, N. Реле KV2 своим замыкающим контактом KV2 включает пускатель KM, который подает напряжение на электроды водонагревателя. При нагревании воды до нижнего заданного значения температуры (например, 80 °С) контакт SK<sub>min</sub>, заблокированный контактом KV2, размыкается. При достижении верхнего заданного значения температуры (например, 90 °С) замыкается контакт SK<sub>max</sub>. Напряжение подается на реле KV1 по цепи FU4, SK<sub>max</sub>, KV2, N. Реле размыкает свой контакт KV1, обесточивает катушку реле KV2 и тем самым отключает пускатель KM. Температура воды понижается до нижнего заданного значения, контакт SK<sub>min</sub> замыкается

и снова подает напряжение на катушку реле KV2. Процесс регулирования повторяется. В случае не одинаковых фазных токов срабатывает реле тока KA, включает промежуточное реле KV3, которое контактом KV3 отключает реле KV2 и пускатель KM.

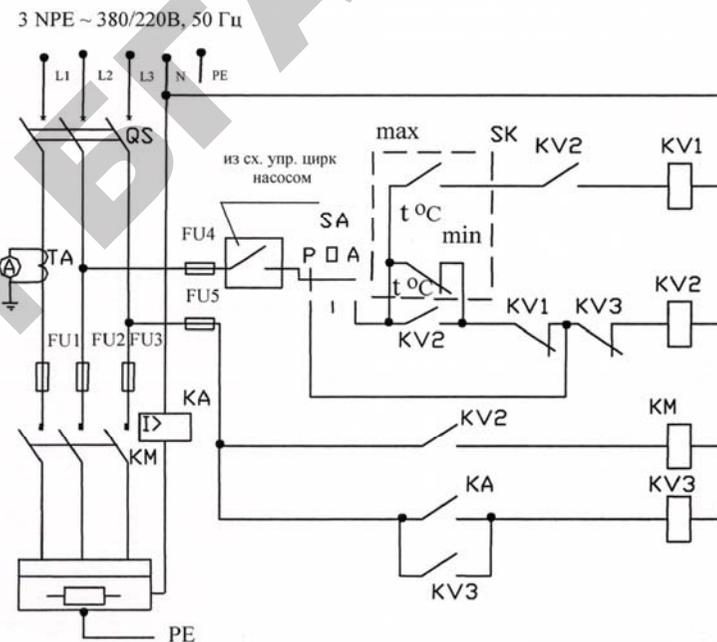


Рис. 4.5. Принципиальная электрическая схема управления электродным водонагревателем ЭПЗ-100И1

Электрическая схема водонагревателей ЭПЗ-100ИЗ (рис. 4.6) автоматически управляет мощностью водонагревателя при помощи  $\alpha$ -контроллера. Режим работы водонагревателя задают переключателем SA2.

В автоматическом режиме работы принцип действия схемы управления сводится к измерению температуры того или иного объекта терморезисторами RK1, RK2, RK3, ее сравнению с заданной в  $\alpha$ -контроллере A1, воздействию контактами A1:1 или A1:2 на исполнительный механизм ИМ и повороту регулирующих электродов водонагревателя. В результате этого изменяются его мощность и температура воды.

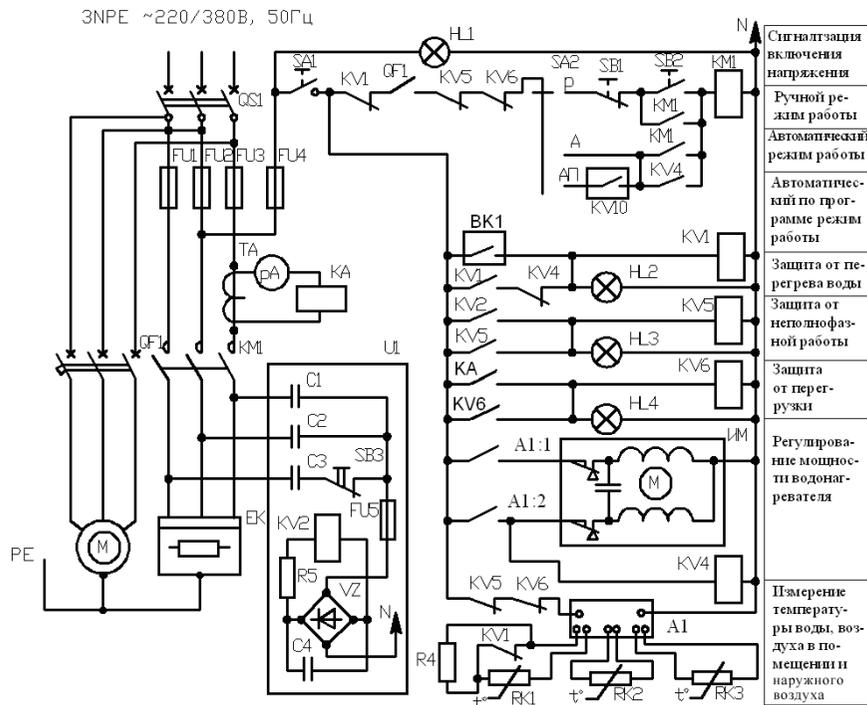


Рис. 4.6. Принципиальная электрическая схема управления водонагревателем ЭПЗ-100ИЗ

При неполнофазном режиме работы или превышении номинального тока срабатывает KV2 или реле тока KA соответственно и отключает водонагреватель.

### Методика выполнения работы

Лабораторная установка включает электродный водонагреватель ЭПЗ-100ИЗ, работающий по замкнутому контуру, и КЭВ-100/0,4 со снятым корпусом.

1. Устройство, принцип действия и схему включения водонагревателей в систему горячего водоснабжения изучить по лабораторным образцам и рис. 4.1–4.3.

Измерить размеры и нарисовать электродную систему водонагревателя КЭВ-100/0,4 (см. рис. 4.1).

2. Геометрический коэффициент рассчитать по формуле (4.2) и результатам измерения, выполненным в п. 1. Измерить линейкой пределы перекрытия электродов диэлектрическими вставками и рассчитать пределы регулирования мощности фодонагревателя КЭВ-100/0,4.

3. Открыть кран подачи воды в теплообменник. Мерным сосудом, секундомером и термометром измерить расход и температуру воды во вторичном контуре теплообменника. Включить автоматический выключатель QF на лабораторном стенде, рубильник QS на шкафу управления, запустить насос подачи воды (см. рис. 4.5). Пакетный переключатель SA установить в положение «Р» (ручной режим работы электродного водонагревателя) и установить мощность водонагревателя 8–10 кВт.

Влияние температуры воды на мощность наблюдать в период «разгона» водонагревателя до установившейся температуры. Показания приборов записать согласно табл. 3.1.

Таблица 3.1

Влияние температуры воды на мощность электродного водонагревателя

Измерено				Вычислено			
$\tau$ , с	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$P$ , Вт	$\rho_{20}$ , Ом·м	$t_{cp}$ , °C	$\rho_t$ , Ом·м	$\rho_{cp}$ , Ом·м

В табл. 3.1:  $\tau$  – время работы водонагревателя;  $t_1$ ,  $t_2$  – температура воды на входе и выходе водонагревателя;  $P$  – мощность, потребляемая водонагревателем;  $t_{cp} = 0,5(t_1 + t_2)$  – средняя температура воды;  $\rho_{20}$ ,  $\rho_t$ ,  $\rho_{cp}$  – удельное сопротивление воды при 20 °C,  $t_2$  и  $t_{cp}$ .

В установившемся режиме работы (температура воды на выходе из теплообменника не изменяется) записать показания приборов согласно табл. 3.2.

Таблица 3.2

Энергетические показатели системы «водонагреватель–теплообменник»

Измерено							Вычислено	
$P$ , Вт	$P_{дв}$ , Вт	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$t_3$ , °C	$t_4$ , °C	$m_t$ , кг/с	$\eta$ , о.е.	$q$ , Дж/кг

В табл. 3.2:  $P_{\text{дв}}$  – мощность электродвигателя насоса;  $t_3, t_4$  – температура воды на входе и выходе теплообменника;  $m_{\tau}$  – подача воды;  $\eta$  – КПД системы «водонагреватель–теплообменник»;  $q$  – удельный расход энергии на нагрев воды.

$$\text{Коэффициент полезного действия } \eta = \frac{m_{\tau} c (t_4 - t_3)}{P}$$

$$\text{Удельный расход энергии } q = \frac{P + P_{\text{дв}}}{m_{\tau}}$$

4. Отключить пакетным выключателем, который находится на стенке шкафа управления, одну из фаз. Вольтметром и щупом измерить напряжение по отношению к нулевому проводу в специальных точках на поверхности диэлектрической вставки, гальванически связанных с водой. Измерения выполнить для следующих случаев: полнофазный режим работы; двухфазный режим работы с зануленным трубопроводом; двухфазный с незануленным трубопроводом (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Влияние неполнофазного режима питания водонагревателя на «вынос» напряжения на трубопровод

Точка измерения №	Трубопровод занулен		Трубопровод не занулен	
	3 фазы	2 фазы	3 фазы	2 фазы

По результатам исследований сделать заключение и влиянии температуры на мощность, энергоемкости нагрева воды и электробезопасности электродных установок.

5. Установить на лабораторном стенде пакетный переключатель SA в положение «А» (автоматический режим работы электродного водонагревателя). Открыть щит управления, подключить  $\alpha$ -контроллер к системному блоку, подать напряжение на  $\alpha$ -контроллер. Включить в сеть компьютер и уяснить, как загрузить программу (для управления работой электродного водонагревателя в системе отопления) в  $\alpha$ -контроллер.

Изменить температуру воздуха внутри условного объекта отопления (макет домика), для чего переключателем SA1 включить источник обогрева домика. При повышении температуры в домике

выше заданной электродвигатель включается в работу и поворачивает электроды электродного водонагревателя ЭПЗ-100ИЗ против часовой стрелки, что снижает мощность, при уменьшении температуры ниже нормы электродвигатель поворачивает электроды по часовой стрелки, что увеличивает мощность. Повышение или понижение мощности необходимо контролировать по измерительным приборам на лабораторном стенде.

#### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Результаты измерений.
3. Графические зависимости  $\rho_{\text{ср}}(t_2), \rho_r(t_2)$ .
4. Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы:

1. Устройство и принцип действия электродных водонагревателей.
2. Способы регулирования мощности и температуры.
3. Работа схем управления водонагревателями ЭПЗ.
4. Основные энергетические показатели водонагревателей.
5. Основные меры по повышению надежности электродных водонагревателей.

## 5. ЭЛЕКТРОКАЛОРИФЕРНЫЕ УСТАНОВКИ

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия, схемы управления, исследовать некоторые характеристики электрокалориферных установок.

### Задачи работы:

1. Изучить устройство и принцип действия электрокалориферных установок СФОО-10/0,4И2, СФОЦ-25/0,5И2, СФОЦ-25/0,5ИЗ.

2. Изучить принципиальные электрические схемы управления установками СФОЦ-25/0,5И2, СФОЦ-25/0,5ИЗ.

3. Исследовать влияние мощности электрокалорифера и подачи воздуха на температуру поверхности ТЭНов и выходящего воздуха, коэффициент теплоотдачи, КПД электрокалорифера.

4. Исследовать зависимость напряжения на ТЭНах и их мощности от величины заданной и фактической температур воздуха в помещении.

### Общие сведения

Электрокалориферные установки (ЭКУ) предназначены для подогрева воздуха и поддержания требуемой температуры в системах отопления, вентиляции, сушки. Различают ЭКУ с осевым (СФОО) и с центробежным (СФОЦ) вентиляторами.

Электрокалориферные установки типа СФОЦ имеют исполнения И2, И3, И4 и состоят из электрокалорифера типа СФО (С – нагрев сопротивлением, Ф – калорифер, О – окислительная среда (воздух)) и центробежного вентилятора типа Ц4-70, соединенных между собой матерчатой виброизолирующей вставкой. Используют калориферы мощностью от 10 до 100 кВт – вентиляторы с подачей воздуха от 800 до 10 000 м<sup>3</sup>/ч, согласованные между собой по условию, что температура поверхности обрешетки ТЭНа не должна превышать 190 °С.

В установках исполнения И2 (рис. 5.1) мощность и, следовательно, температуру воздуха регулируют ступенчато, путем изменения числа включенных ТЭНов электрокалорифера (100, 66, 33 % от номинальной мощности).

Установки исполнения И3 (рис. 5.2) оснащены устройством управления типа «Электротерм» и двухскоростным электродвигателем привода вентилятора. Мощность регулируют плавно, изменением напряжения на нагревателях. Подача воздуха может быть 1500 и 3000 м<sup>3</sup>/ч.

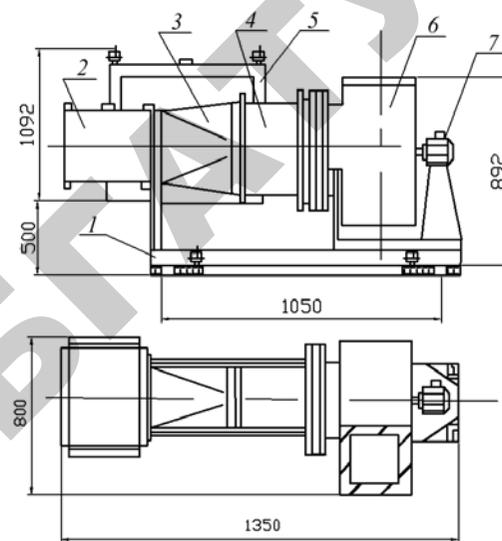


Рис. 5.1. Электрокалориферная установка СФОЦ-25/0,5-И2:  
1 – рама; 2 – электрический калорифер; 3 – переходной патрубком; 4 – мягкая вставка; 5 – шкаф управления; 6 – центробежный вентилятор; 7 – электродвигатель

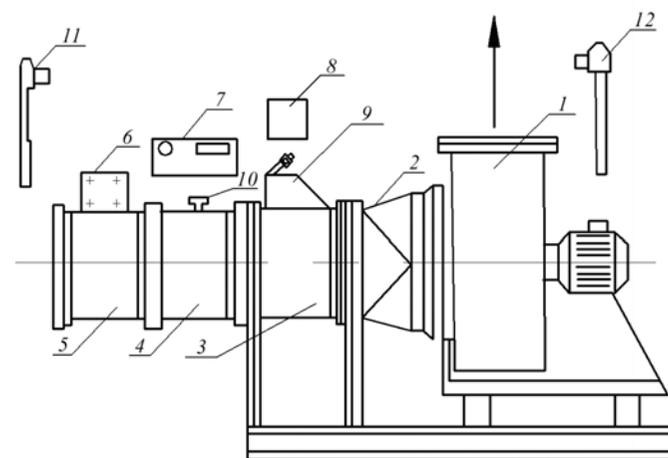


Рис. 5.2. Электрокалориферная установка типа СФОЦ-25/0,5-ИЗ:  
1 – вентилятор; 2 – соединительная вставка; 3 – камера смешивания воздуха (байпасная камера); 4 – электрокалорифер; 5 – патрубок притока воздуха; 6 – тиристорный регулятор; 7 – ящик управления электродвигателем; 8 – ящик преобразования и задания температуры; 9 – регулятор подачи воздуха из помещения; 10 – датчик температуры поверхности ТЭНов; 11, 12 – датчики температуры воздуха снаружи и внутри помещения

В установках исполнения И4 используют односкоростной электродвигатель и устройство «Электротерм».

ЭКУ типа СФОО-10/0,4-И2 (рис. 5.3) используют в безнапорных системах отопления и вентиляции, в овоще- и фруктохранилищах и других помещениях, где не требуется больших перепадов температур нагреваемого воздуха (8–10 °С). Электрический калорифер размещен на нагнетающем патрубке осевого вентилятора и содержит 6 оребренных ТЭНов, расположенных в один ряд.

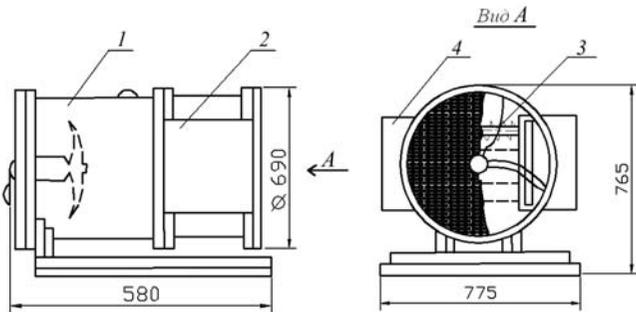


Рис. 5.3. Электрокалориферная установка СФОО-10/0,4-И2:  
1 – вентилятор; 2 – электрокалорифер; 3 – оребренный трубчатый электронагреватель (ТЭН); 4 – коробка подключений

Полное обозначение ЭКУ (СФОЦ-25/0,5-ИЗ, СФОО-10/0,4-И2) включает: мощность электрокалорифера (25, 10 кВт); максимальное превышение температуры выходящего воздуха над температурой входящего воздуха в сотнях градусов (0,5 соответствует 50 °С); номер исполнения (И2, ИЗ).

Холодный воздух обтекает трубчатые нагреватели электрокалорифера, нагревается и вентилятором подается в помещение. Забор воздуха через калорифер обеспечивает равномерное обдувание и охлаждение ТЭНов, исключает обледенение лопастей вентилятора.

Количество теплоты, выделяющейся в электрокалорифере и передаваемой воздуху, определяется равенством

$$\frac{nU^2}{R_1} = \frac{\alpha A(t_H - t_B)}{\eta}, \quad (5.1)$$

где  $R_1$  – сопротивление одного нагревателя, Ом;  $n$  – число нагревателей в электрокалорифере;  $U$  – напряжение на нагревателе, В;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от нагревателей, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $A$  – пло-

щадь поверхности нагревателей, м<sup>2</sup>;  $t_H, t_B$  – температура поверхности нагревателей и воздуха в калорифере, °С;  $\eta$  – КПД электрокалорифера.

Полезная мощность, необходимая для нагревания воздуха в диапазоне температур  $t_2-t_1$  при подаче  $V_T$ :

$$P = V_T \rho C(t_2 - t_1), \quad (5.2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С).

Равенство (5.1) показывает, что температура воздуха, выходящего из калорифера, может быть изменена числом включенных нагревателей, напряжением на ТЭНах, подачей воздуха. Обычно применяют все три способа. Наиболее эффективным является регулирование температуры изменением напряжения на нагревателях. Этот способ используют в установках, оснащенных устройствами управления типа «Электротерм». Плавное регулирование мощности по сравнению со ступенчатым за счет изменения напряжения на ТЭНах экономит от 20 до 40 % электроэнергии. Подача воздуха не влияет на тепловую мощность электрокалорифера. От нее зависит теплоотдача и температура выходящего воздуха. При недостаточной подаче воздуха ухудшается теплоотвод, растет температура нагревателей, что может вызвать их перегорание. Минимальная подача воздуха ограничена максимально допустимой температурой оребрения нагревателей (не более 190 °С).

Схема управления установками типа СФОЦ-25/05-И2 (рис. 5.4) предусматривает ручной (Р) и автоматический (А) режимы работы (переключатель SA1), ступенчатое включение мощности (SA2), двухпозиционное регулирование температуры (SK1, SK2), защиту ТЭНов от перегрева (SK3), защиту электрокалорифера от включения при неработающем вентиляторе (блок-контакт QF в цепи управления).

В ручном режиме работы секции электрокалорифера включают выключателем SA2. В автоматическом режиме секции 1 и 2 управляются регуляторами температуры SK1 и SK2, секция 3 может быть включена или выключена только вручную, переключателем SA1. Переключатель SA1 устанавливаем в положение Р, SA2 – в положения 1/3, 2/3 или 1. В положении 0 переключатель SA2 не работает. В положении 1/3 напряжение подается на катушку магнитного пускателя KM1 и включается секция 1 электрокалорифера, в положении 2/3 напряжение подается на катушки магнитных пускателей KM1 и KM2, включаются секция 1 и секция 2, в положении 1 запитываются катушки магнитных пускателей KM1, KM2 и KM3, включаются все три секции электрокалорифера.

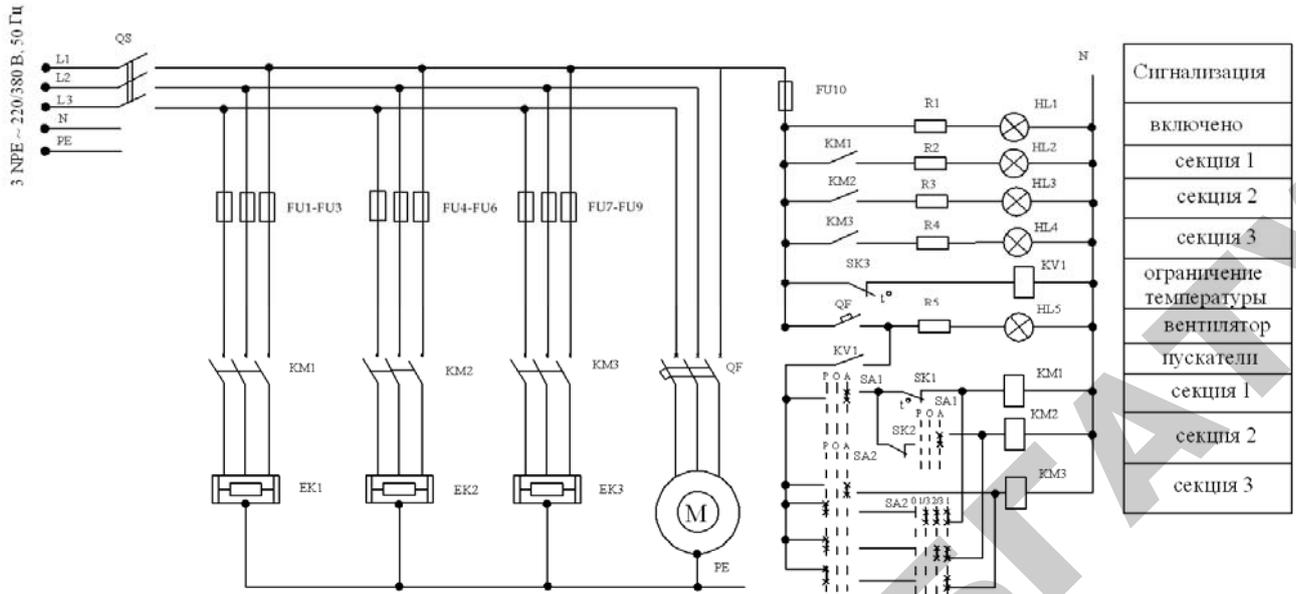


Рис. 5.4. Принципиальная электрическая схема электрокалориферной установки СФОЦ-25/0,5-И2

В автоматическом режиме схема работает следующим образом. Переключатель SA1 устанавливаем в положение А, SA2 – в положение 0. На переключателе SK1 устанавливаем температуру 12 °С, а на SK2 – 16 °С. При этом температура в помещении должна быть ниже заданной. Включаем рубильник QS, загорается лампа HL1. Включаем автоматический выключатель QF, запускается электродвигатель вентилятора, напряжение подается на катушки пускателей KM1, KM2 и KM3 по цепи FU10, QF, KV1, SA1, SK1 (SK2), KM1 (KM2). Пускатели замыкают свои контакты в силовой цепи и включают секции электрокалорифера ЕК. При температуре воздуха 12 °С размыкается контакт SK1 и отключается секция 1, при 16 °С размыкается контакт SK2 и отключается секция 2. При понижении температуры SK2 и SK1 замыкают свои контакты и включают секции электрокалорифера. При температуре обрешетки ТЭНов 180 °С терморегулятор SK3 выключает электрокалорифер.

Схема управления установками типа СФОЦ-ХХ/0,5-ИЗ с устройствами управления «Электротерм-ХХТВУХЛЗ.1» (ХХ – мощность регулирования, ТВ – автоматическое и ручное регулирование тепло- и воздухопроизводительности, УХЛЗ.1 – климатическое исполнение и категория размещения) обеспечивает плавное, по пропорциональному закону, автоматическое и ручное регулирование мощности калорифера от 1 до 100 % в зависимости от температуры воздуха в помещении, ступенчатое регулирование подачи воздуха за счет изменения частоты вращения электродвигателя вентилятора в соотношении 1:2, защиту от ненормальных режимов работы.

Принципиальная электрическая схема электрокалориферной установки СФОЦ-ХХ/0,5-ИЗ показана на рис. 5.5. Она включает следующие блоки. Блок VI (ящик Я9201-104ВУХЛЗ.1) предназначен для измерения температуры в помещении, сравнения ее с заданной на панели блока и формирования выходного унифицированного сигнала управления, который поступает в блок II. Блок II (ящик Я4301-ХХ7ВУХЛЗ.1) представляет собой тиристорный регулятор мощности, который в зависимости от величины сигнала управления изменяет напряжение на нагревателях электрокалорифера. Блок IV (ящик Я5701-ХХ74УХЛЗ.1) регулирует частоту вращения электродвигателя вентилятора в зависимости от температуры наружного воздуха.

В упрощенном виде схема (рис. 5.5) работает следующим образом. Напряжение от датчика R42 и задатчика R5 температуры воздуха в помещении суммируется в блоке VI и поступает в блок II управления тиристорами. В зависимости от этого напряжения тиристоры изменяют величину напряжения на ТЭНах и, следовательно, мощность калорифера и температуру воздуха в помещении.

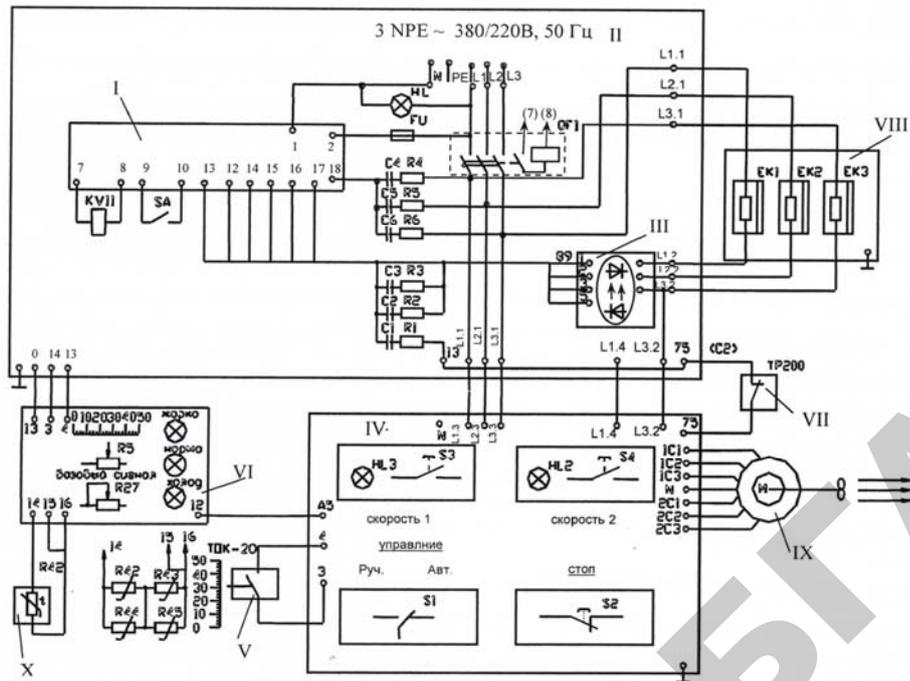


Рис. 5.5. Принципиальная электрическая схема электрокалориферной установки СФОЦ-XX/0,5-ИЗ:

I – панель управления; II – тиристорный регулятор мощности; III – силовая панель тиристорного регулятора; IV – блок регулирования частоты вращения вентилятора; V – термометр наружного воздуха; VI – блок измерения и задания температуры воздуха в помещении; VII – устройство защиты нагревателей от перегрева; VIII – нагреватели электрокалорифера; IX – электродвигатель вентилятора; X – термометр воздуха в помещении

Электрическая схема блока VI (рис. 5.6) включает измерительный мост постоянного тока (R4, R5, R7, R8, R9, R41–R44), дифференциальный усилитель постоянного тока A1, транзисторные усилители мощности (VT2, VT4), элементы сигнализации и стабилизированные узлы питания, задатчик температуры R5, датчики температуры R41–R44, потенциометр для корректировки моста R9. Светодиод VD6 (VD7) выдает световую информацию о превышении (снижении) температуры воздуха от заданного значения, VD8 сигнализирует о равенстве температур. При отклонении температуры от заданной сигналы от датчика и задатчика температуры суммируются и поступают на вход дифференциального усилителя A1. Усиленный сигнал с параметрами +0...9 В и +5 мА снимается с клемм 3, 4 и подается в блок II на клеммы 13, 14. Базовый аналоговый сигнал, обеспечивающий необходимую минимальную теплопроизводительность электрокалорифера, устанавливают задатчиком R27.

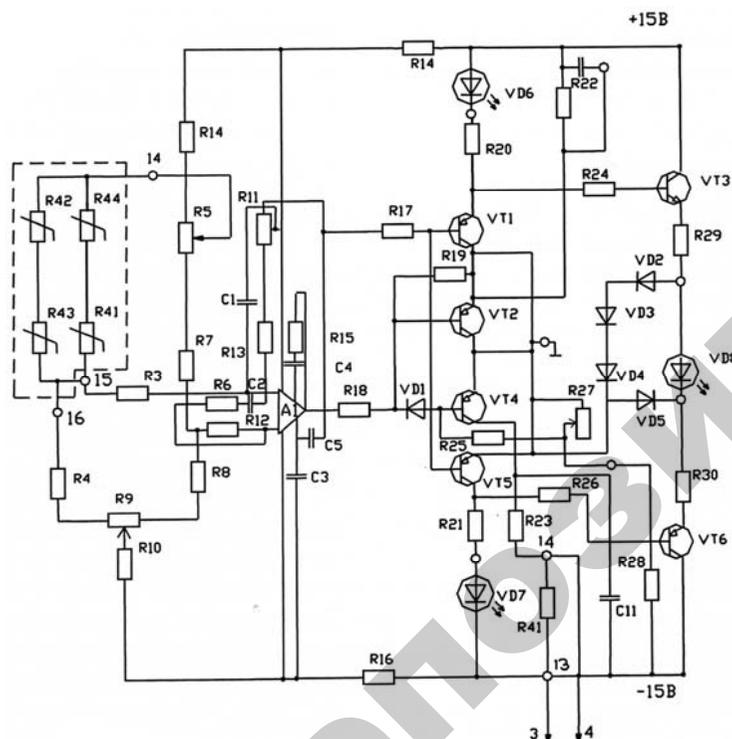


Рис. 5.6. Принципиальная электрическая схема блока измерения и задания температуры (блок VI)

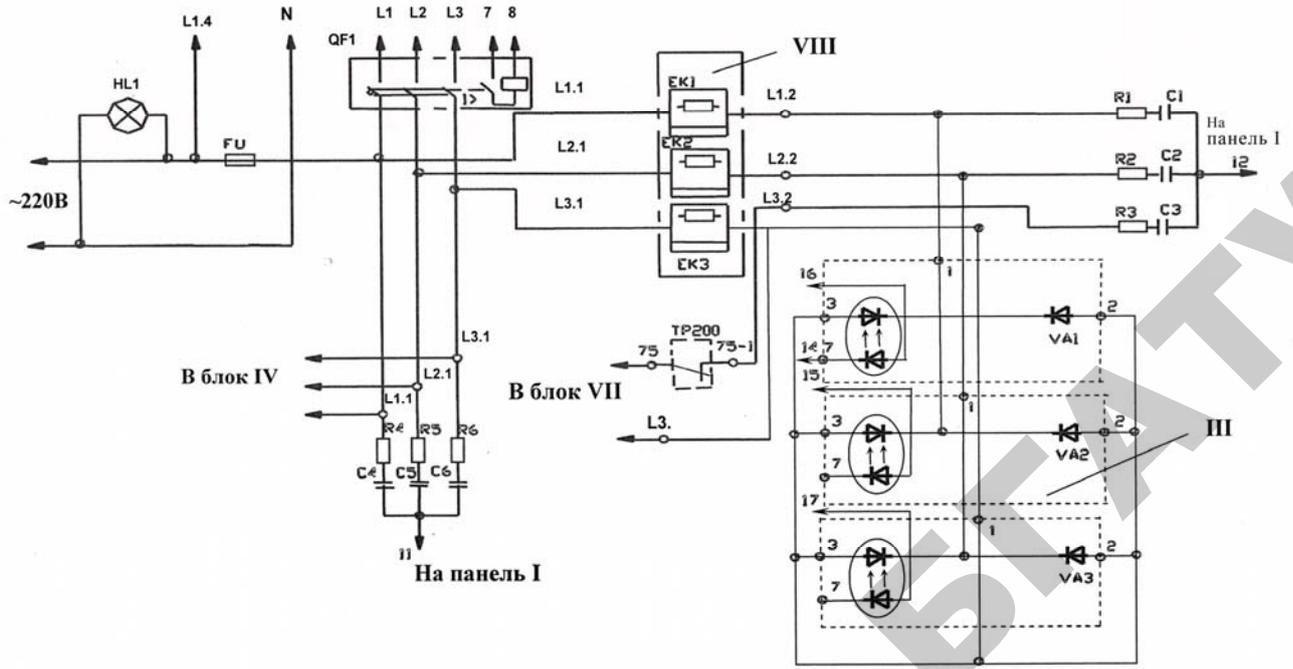


Рис. 5.7а. Принципиальная электрическая схема силовой панели III тиристорного регулятора мощности

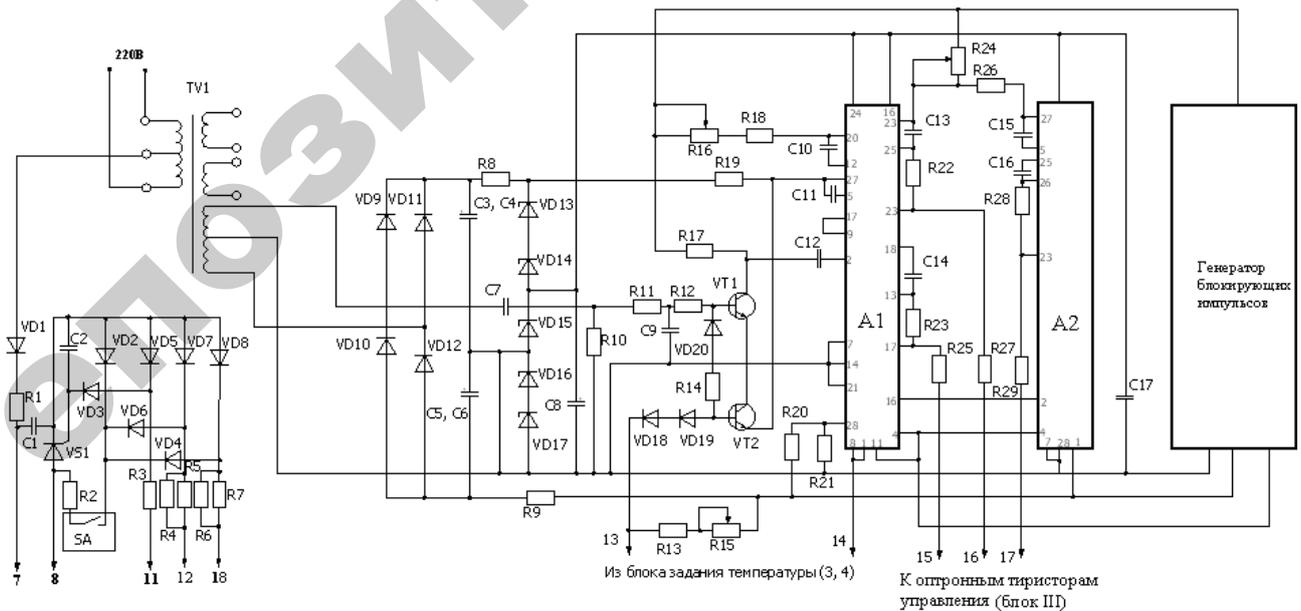


Рис. 5.7б. Принципиальная электрическая схема панели управления I тиристорного регулятора мощности

Блок II (рис. 5.7а) содержит автоматический выключатель QF1, панель управления тиристорными модулями I, силовую панель с тиристорными модулями III, сигнальную лампу HL1 и предохранитель FU. Панель управления I формирует импульсы, управляющие силовыми тиристорными модулями VA1, VA2, VA3, а также отключает QF1 по сигналам датчиков ненормальных режимов работы.

Силовая панель III регулирует мощность электрокалорифера, а также формирует сигналы аварии для отключения QF1.

Напряжение питания подается через автоматический выключатель QF1 на нагреватели EK1, EK2, EK3 электрокалорифера и через них на вход тиристорных модулей VA1–VA3.

На панели управления I размещена система импульсно-фазового управления, узел формирования сигнала на отключение силового автоматического выключателя, а также генератор блокирующих импульсов.

Система импульсно-фазового управления (рис. 5.7б) выполнена по одноканальному принципу и обеспечивает формирование трех импульсов, сдвинутых относительно друг друга на  $120^\circ$ .

Система управления содержит узел питания на +15 В, +5 В, формирователь синхроимпульсов, узел согласования фазы управляющих импульсов и три узла временной задержки.

Формирователь синхроимпульсов обеспечивает синхронизацию системы управления сетью. Они формируются путем дифференцирования с помощью конденсатора C12 сигнала, снимаемого с коллектора транзистора VT1. На базу последнего через фильтр на конденсаторах C6, C9 и резисторах R10, R11, R12 подают напряжение синхронизации. Для фазового сдвига используют синхроимпульс, формируемый в точке перехода через ноль сигнального напряжения.

Узлы задержки импульсов реализованы на двух гибридных микросхемах A1 и A2 типа ЗФИ. Каждая из них содержит две временные задержки с выходными усилителями и формирует на выходе импульсы управления положительной полярности с амплитудным значением тока до 0,1 А, достаточным для непосредственного управления силовыми оптронными тиристорами. В схеме используют три узла временных задержек, включенных последовательно, одна из которых регулируемая, а две другие имеют фиксированное время задержки, соответствующее углу  $120^\circ$ .

Выходные импульсы первого и второго каналов снимают с клемм 23 и 17 элемента A1, а третьего – с клеммы 23 элемента A2. Узлы задержки питают напряжением +5 В, подаваемым на клеммы

15 и 24 элементов A1, A2. Напряжение смещения –15 В поступает к клеммам 1, 8, а сигнал управления с делителей 20 и 21 – к клеммам элемента A1.

Диапазон изменения фазы управляемого узла задержки определяется цепочкой, состоящей из резисторов R19 и конденсатора C11. Первый узел задержки запускают синхроимпульсом положительной полярности, поступающим на клемму 2 элемента A1. С выхода 23 (A1), усиленный и смещенный на требуемый угол, он через ограничивающий резистор R27 подается на вход оптронного тиристора в фазе А.

Второй узел задержки запускают входным импульсом, снимаемым с клеммы 22 (A1) путем подачи его на клемму 9 (A1). Усиленный импульс с клеммы 17 (A1) через ограничивающий резистор 25 поступает на вход оптронного тиристора фазы В. Длительность фиксированной задержки, составляющей  $120^\circ$ , задается цепочкой C10, R16 и R18. Задержку регулируют резистором R16. Сигнал, снимаемый с клеммы 16 (A1), запускает третий узел задержки.

Усиленный импульс с клеммы 23 (A2) через резистор R29 поступает в силовую схему на вход оптронного тиристора фазы С. Длительность фиксированной задержки, составляющей  $120^\circ$ , задается цепочкой C15, R24 и R25. Задержку регулируют резистором R24. Конденсаторы C14, C16 осуществляют емкостную связь узлов задержки с выходными усилителями.

Узел согласования фазы управляющих импульсов выполнен на транзисторе VT2. На его входе суммируются сигналы смещения и управления. Уровень первого сигнала регулируют с помощью переходного резистора R15. Сигнал управления положительной полярности подают на клемму 13. Диоды VD18 и VD19 предназначены для температурной компенсации дрейфа.

Узел формирования сигнала на отключение силового автоматического выключателя содержит конденсатор C1, который заряжается от переменного напряжения 127 В (обмотка C1-OK TV1) через диод VD1 и ограничивающий резистор R1. При аварийной ситуации этот конденсатор через тиристор VS1 разряжается на катушку расцепителя выключателя QF1, подключенную к контактам 7 и 8 панели управления. Тиристор включается от сигналов датчиков, поступающих на клеммы 11, 12, 18. Конденсатор C2 исключает ложные срабатывания защиты при включении QF1 из-за неоднородности замыкания его контактов.

Генератор блокирующих сигналов осуществляет кратковременный срыв управляющих импульсов на 20–30 с с интервалом около 7 с. Это необходимо для своевременного выявления замыкания тиристоров на землю, так как в противном случае нарушается нормальная работа защиты по перегрузке нагревательных элементов калорифера.

Силовая панель III содержит три силовых гибридных модуля VA1, VA2, VA3 типа МДТО (диод-оптронный тиристор), две группы цепочек RC, соединенных каждая в отдельности в звезду.

Первая группа цепочек R1, R2, R3, C1, C2, C3 подключена к выходным фазам преобразователя. Общая точка ее соединяется с выходом 12 панели управления. Эта группа контролирует обрыв или исчезновение фазы питающего напряжения, а также перегрузку нагревательных элементов при обрыве одного или более элементов в фазе. Принцип ее работы заключается в том, что при возникновении аварийных режимов в общей точке 12 по отношению к нулевому проводу появляется сигнал, который отключает выключатель QF1.

Вторая группа цепочек R4, R5, R6, C4, C5, C6 используется для защиты от аварийных режимов электродвигателя вентилятора.

Во всех аварийных случаях в точке 11 или 12 панели I появляется напряжение, которое открывает тиристор VS1, включает катушку расцепителя QF1 и отключает автоматический выключатель QF1. Геркон SA служит для защиты от замыкания на землю силовых элементов схемы преобразователя. Геркон установлен на металлической скобе П-образной формы, образуя с ней замкнутый сердечник, через который проходят провода трех фаз. Разбаланс магнитного потока, возникающий в аварийном режиме в фазах питающего напряжения, вызывает замыкание контактов геркона, отпирание тиристора VS1 и отключение выключателя QF1.

Схема управления вентилятором (рис. 5.8.) обеспечивает ручное и автоматическое изменение частоты вращения электродвигателя 1:2 и подачу воздуха 1500 и 3000 м<sup>3</sup>/ч.

В автоматическом режиме частота вращения зависит от температуры наружного воздуха. В зимний период, когда температура воздуха ниже заданной, на контактном термометре контакт SK разомкнут, электродвигатель работает на скорости I и обеспечивает подачу воздуха 1500 м<sup>3</sup>/ч. В переходной период (весна–лето) увеличивается температура наружного воздуха, контакт SK замыкается, обмотки электродвигателя переключаются на большую частоту вращения, и вентилятор подает 3000 м<sup>3</sup>/ч воздуха.

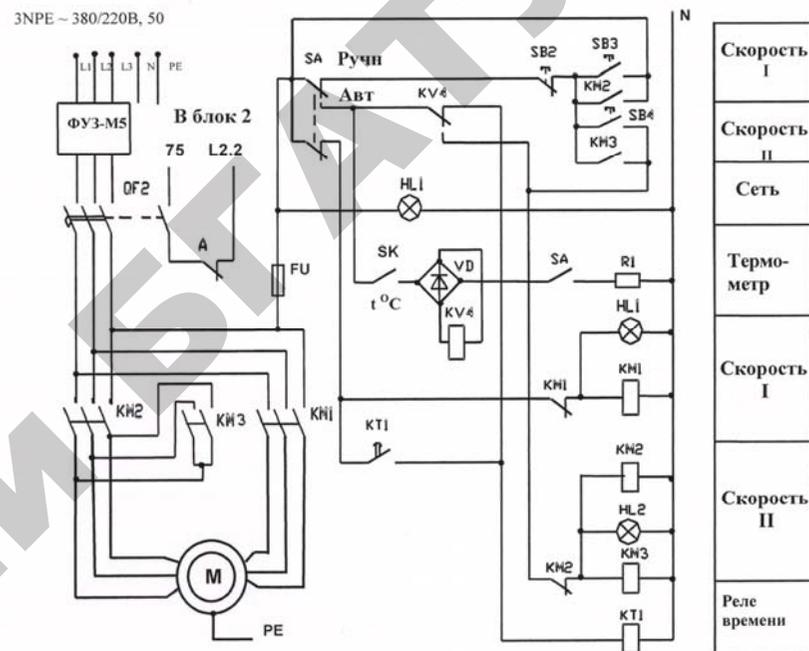


Рис. 5.8. Принципиальная электрическая схема управления вентилятором (блок IV)

### Методика выполнения работы

1. Устройство, принцип действия, схемы управления электрокалориферными установками СФОЦ-25/0,5 ИЗ, СФОО-10/0,4 И2 изучить по методическим указаниям и на установках, представленных в лаборатории.

Используя рисунки и их описание, уяснить: назначение и устройство электрокалорифера, вентиляционного блока, блока измерения и задания температуры, блока регулирования частоты вращения электродвигателя вентилятора, тиристорного регулятора мощности установки СФОЦ-25/05-ИЗ; устройство установок типов СФОО-10/0,4-И2, СФОЦ-25/0,5-И2.

2. На панели управления электродвигателем вентилятора установить ручной режим работы. Включить установку. Для этого включить автоматические выключатели QF2 и QF1, нажать кнопку включения электродвигателя «Скорость I» (подача воздуха 1500 м<sup>3</sup>/ч).

Установить максимальную мощность электрокалорифера. Для этого открыть крышку блока измерения и задания температуры. Установить ручку датчика температуры R27 в положение, при котором электрокалорифер потребляет максимальную мощность (по показаниям приборов).

Температуру воздуха на входе и выходе ЭКУ, трубки ТЭНов измерить регулятором температуры «Сосна-004», подключенным к компьютеру. Включить регулятор температуры и компьютер в сеть. На рабочем столе монитора найти значок «SysView». Открыть этот файл. Появится окно «Начальные установки». Нажать на слово «Принять». Появится таблица с тремя столбцами, в которых с заданным интервалом (10 секунд) начнет появляться информация о температуре на входе ЭКУ, на выходе из ЭКУ, трубки ТЭНа.

Подождать пока температура трубчатого нагревателя достигнет установившегося значения. Установившейся считается температура, которая не изменилась за опыт три раза в каждом столбце. Записать результаты измерений в табл. 5.1. Опыт повторить при любых других трех-четырёх значениях мощности электрокалорифера и подаче воздуха 3000 м<sup>3</sup>/ч (скорость II).

Таблица 5.1

Влияние мощности калорифера и подачи воздуха на КПД ЭКУ и коэффициент теплоотдачи от ТЭНов к воздуху

Задано		Измерено			Вычислено		
$V_{\tau}$ , м <sup>3</sup> /с	$P_{\kappa}$ , Вт	$t_1$ , °С	$t_n$ , °С	$t_2$ , °С	$P$ , Вт	$\eta$ , о.е.	$\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С

В табл. 5.1:  $V_{\tau}$  – подача воздуха;  $P_{\kappa}$  – мощность, потребляемая электрокалорифером;  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_n$  – температура воздуха на входе, выходе установки и трубки ТЭНов соответственно;  $P$  – полезная мощность на нагревание воздуха;  $\eta$  – КПД электрокалорифера;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности ТЭНов к воздуху.

Полезную мощность определить по формуле (5.2), приняв  $\rho = 1,29$  кг/м<sup>3</sup> и  $C = 1000$  Дж/(кг·°С).

Коэффициент полезного действия электрокалорифера:

$$\eta = \frac{P}{P_{\kappa}}. \quad (5.3)$$

Коэффициент теплоотдачи от поверхности ТЭНов к воздуху:

$$\alpha = \frac{P_{\kappa}}{A(t_n - t_B)}. \quad (5.4)$$

Площадь поверхности одного нагревателя  $A = 0,3$  м<sup>2</sup>. В калорифере используют 3 нагревателя, остальные (6 шт.) отключены с целью снижения мощности.

Средняя температура воздуха в электрокалорифере:

$$t_B = 0,5(t_1 + t_2). \quad (5.5)$$

3. На панели управления электродвигателем вентилятора установить автоматический режим работы. На термометре ТПК, показывающем температуру наружного воздуха, задать любую температуру, при которой контакты термометра разомкнуты, и, следовательно, двигатель будет работать на скорости I.

В блоке регулирования и задания температуры задать температуру, которая должна поддерживаться в помещении. Рекомендуется включить электрокалорифер на полную мощность.

Включить установку. Включить устройство, имитирующее изменение температуры в помещении. Имитатор изменения температуры воздуха в помещении представляет собой вентилятор с электронагревателем. Температуру воздуха на выходе вентилятора регулируют напряжением на нагревателе. С помощью имитатора изменять температуру воздуха в помещении до полного снятия напряжения с нагревателей калорифера.

Исследование провести для нескольких значений заданной температуры воздуха в помещении. Результаты записать в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Зависимость напряжения на нагревателях от температуры воздуха в помещении

Задано		Измерено		Вычислено	
$V_{\tau}$ , м <sup>3</sup> /с	$t_3$ , °С	$t_n$ , °С	$U_n$ , В	$P$ , Вт	Графические зависимости $U_n, P(t_n)$

В табл. 5.2:  $t_3$  – температура в помещении, указанная на шкале блока задания температуры;  $t_n$  – фактическая температура воздуха в помещении, создаваемая имитатором;  $U_n$  – напряжение на нагревателях калорифера.

### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Результаты измерений.
3. Рисунок блок-схемы установки СФОЦ-25/0,5-ИЗ.
4. Графические зависимости  $t_n(V_\tau, P_k)$ ,  $\alpha(V_\tau)$ ,  $U_n(t_n)$ .
5. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы:

1. Устройство и принцип действия ЭКУ.
2. Схемы управления ЭКУ СФОЦ-25/0,5ИЗ, СФОЦ-25/0,5-И2.
3. Способы регулирования температуры воздуха.
4. Основные энергетические характеристики ЭКУ.
5. Особенности эксплуатации ЭКУ.

## 6. УСТАНОВКИ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРООБОГРЕВА

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия, схемы управления установками локального электрообогрева.

### Задачи работы:

1. Изучить устройство, принцип действия, схемы управления установками комбинированного электрообогрева ЭИС-11-И1 «Комби», электроконвектора ЭОКС-2,0/1,5-И1, электрообогреваемых полов, панелей и ковриков.
2. Проверить исправность блока защиты от токов утечки, определить соответствие температуры, заданной на терморегуляторе, и фактической на поверхности обогреваемой панели.
3. Исследовать температурное поле и определить зону обогрева, создаваемую установкой ЭИС-11-И1 «Комби».

### Общие сведения

Системы локального электрообогрева применяют в помещениях для содержания молодняка животных и птицы, при совместном содержании животных разных возрастных групп, а также в родильных отделениях, профилакториях, ветлечебницах и других помещениях. Преимущество установок и устройств локального обогрева в том, что их максимально приближают к зонам обитания животных или встраивают непосредственно в эти зоны, обеспечивая таким образом требуемые параметры микроклимата при существенно меньших затратах энергоресурсов.

Локальный электрообогрев создают установками лучистого, контактного, конвективного и комбинированного обогрева. Для лучистого обогрева применяют различные инфракрасные облучательные установки, например, ИКУФ, «Луч», «Сож», ССПО1-250 и др.

К установкам контактного обогрева относят электрообогреваемые полы (рис. 6.1, а, б), электрообогреваемые бетонные плиты (рис. 6.1, в, г), различного рода панели и коврики (рис. 6.2, 6.3).

Электрообогреваемые полы (рис. 6.1) могут быть сплошными либо в виде полос или площадок, расположенных в зоне содержания животных. Достоинством электрообогреваемых полов являются их большая аккумуляционная способность, позволяющая применять внепиковую электроэнергию и безболезненно переносить перерывы в электроснабжении, отсутствие подстилки, пониженная влажность и концентрация вредных газов в зоне нахождения животных.

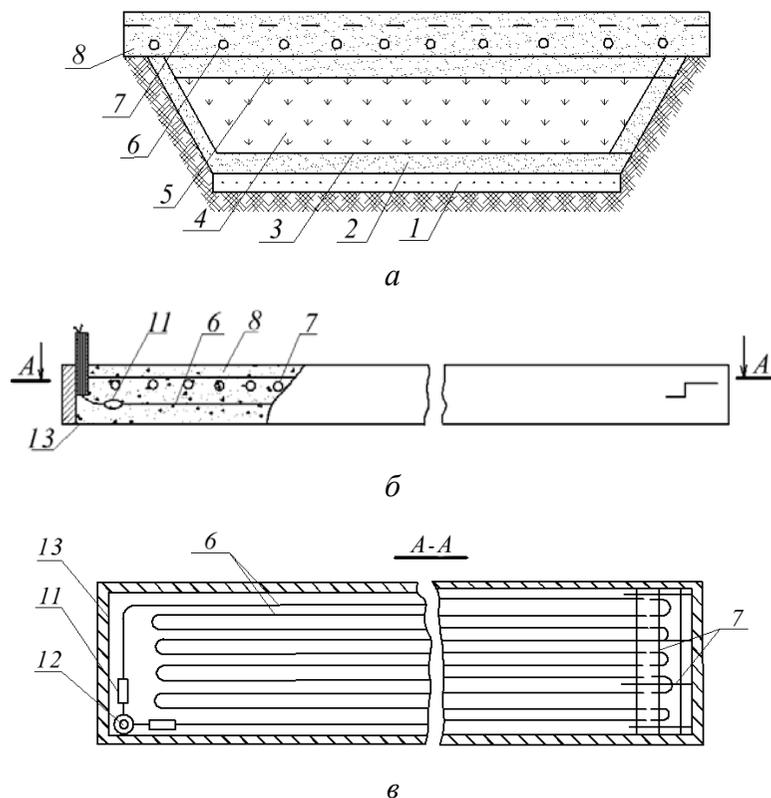


Рис. 6.1. Поперечные разрезы и планы

электрообогреваемых пола (а, б) и бетонной плиты (в, г):

1 – грунт; 2, 8 – бетонные стяжки; 3 – гидроизоляция (рубероид); 4 – теплоизоляция (шлак); 5 – песок; 6 – провод нагревательный; 7 – металлическая сетка; 9 – ограждения станка для животных; 10 – коробка подключений; 11 – узел соединения токопроводящего и нагревательного проводов; 12 – стальная труба; 13 – металлический каркас

В качестве нагревательных элементов используют нагревательные провода и кабели, укладываемые в бетонный пол и подключаемые на сетевое или пониженное напряжение. В последнем случае используют специальные понижающие трансформаторы. Для выравнивания потенциалов в пол укладывают металлическую сетку из стальной проволоки диаметром 3 мм с ячейками 800×200 мм. Температуру пола поддерживают его включением и отключением. Основные недостатки электрообогреваемых полов – их высокая материалоемкость и сложность ремонта.

Электрообогреваемые бетонные плиты в значительной мере лишены недостатков электрообогреваемых полов (рис. 6.1, в, г). Плита представляет собой бетонный блок (например, 1400×80×700 мм), внутрь которого уложены нагревательный провод, сетка для выравнивания потенциалов и узел соединения токопроводящих проводов с нагревателями. Напряжение питания одной плиты – 36 или 110 В. Плиты соединяют последовательно и подключают на сетевое напряжение. Плиты применяют для обогрева небольших сельскохозяйственных помещений (родильные отделения КРС, профилактории, бытовки и т. д.), устанавливая их, подобно отопительным батареям, на стенки. Плиты могут использоваться для создания электрообогреваемого пола, что экономичнее сооружения стационарного пола.

Электрообогреваемый коврик ЭП-935 (рис. 6.2) и обогреватель молодняка (рис. 6.3) относятся к напольным средствам обогрева.

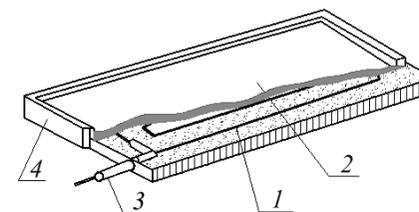


Рис. 6.2. Электрообогреваемый коврик ЭП-935:

1 – нагревательный провод ПОСХП; 2 – химостойкая резина; 3 – токоподводящий провод; 4 – металлический каркас

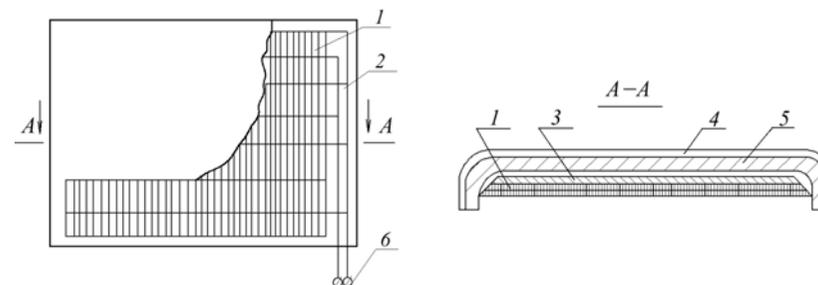


Рис. 6.3. Обогреватель молодняка

с полупроводниковым электронагревательным элементом:

1 – полупроводниковый нагреватель; 2 – контактные электроды; 3 – стеклоэмалевая изоляция; 4 – металлическая панель; 5 – изоляционное покрытие; 6 – токопроводы

Нагревательный элемент коврика из изолированного провода ПОСХП уложен зигзагом между листами винилпласта, что обеспечивает ему двойную электрическую изоляцию. Коврики применяют для обогрева отдельных участков пола, например, при содержании животных в станках.

Электроконвектор ЭОКС-2/1,5-И1 (рис. 6.4) (ЭО – электрообогреватель; К – конвективный нагрев; С – сельскохозяйственного назначения; 2 – мощность в кВт; 1,5 – температура теплотдающей поверхности в сотнях °С; И1 – исполнение) применяют в небольших производственных помещениях в качестве отопителей-доводчиков температуры в периоды ее значительного понижения. Обогреватель имеет три ТЭНа, соединенных в звезду и подключенных к сети 380/220 В. Переключателем на коробке выводов ТЭНов регулируют мощность обогревателя ступенями 2 и 1 кВт, третье положение – «Выключено».

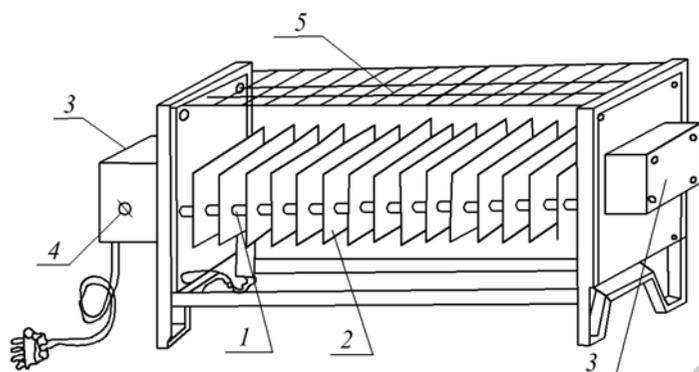


Рис. 6.4. Электроконвектор ЭОКС-2,0/1,5И1:  
1 – трубчатые нагреватели; 2 – пластины оребрения;  
3 – коробка соединения ТЭНов; 4 – переключатель мощности;  
5 – ограждающая сетка

Наиболее благоприятный температурный режим для молодняка животных обеспечивает обогрев сверху и снизу. Установка комбинированного обогрева поросят ЭИС-11-И1 «Комби» (рис. 6.5) состоит из 30 обогревателей и шкафа управления. Обогреватель содержит инфракрасный керамический облучатель мощностью 250 Вт и электрообогреваемую панель мощностью 120 Вт. Нагревательным элементом является нихромовая проволока, уложенная в керамику облучателя и в панель.

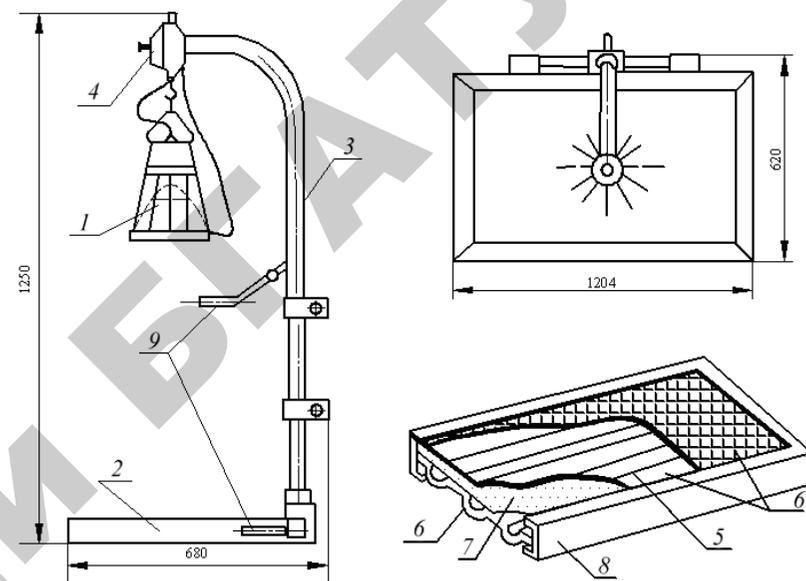


Рис. 6.5. Установка комбинированного электрообогрева ЭИС-11-И1 «Комби»:  
1 – инфракрасный нагреватель; 2 – напольная электроннагревательная панель;  
3 – трубостойка; 4 – коробка с тумблером; 5 – нагревательный провод (нихром);  
6 – пластины из винилпласта; 7 – экран из алюминиевой фольги; 8 – каркас;  
9 – терморегуляторы

Схема управления установкой ЭИС-11-И1 «Комби» (рис. 6.6) поддерживает в заданном диапазоне температуру воздуха в зоне действия инфракрасного облучателя и панели, защищает установку от несимметричных режимов работы и замыканий на землю.

Температуру регулируют двумя терморегуляторами (ВК1, ВК2) типа Т419 с терморегуляторами типа ТСМ (РК1, РК2).

Местоположение терморегуляторов показано на рис. 6.5.

Защита от токов утечки выполнена на реле утечки РУД 0,5 (А2). Датчик тока утечки (А1) представляет собой катушку, которая охватывает фазные провода (рис. 6.6). При несимметричной нагрузке фаз в катушке наводится ЭДС, под действием которой срабатывает реле блока А2 и отключает установку. Исправность реле утечки проверяют кнопкой SB1. При нажатии SB1 реле А2 должно размыкать свой контакт в цепи питания катушек пускателей КМ1, КМ2 и включать сигнальную лампу НЛ3. В исходное состояние схему возвращают отключением и включением QF1.

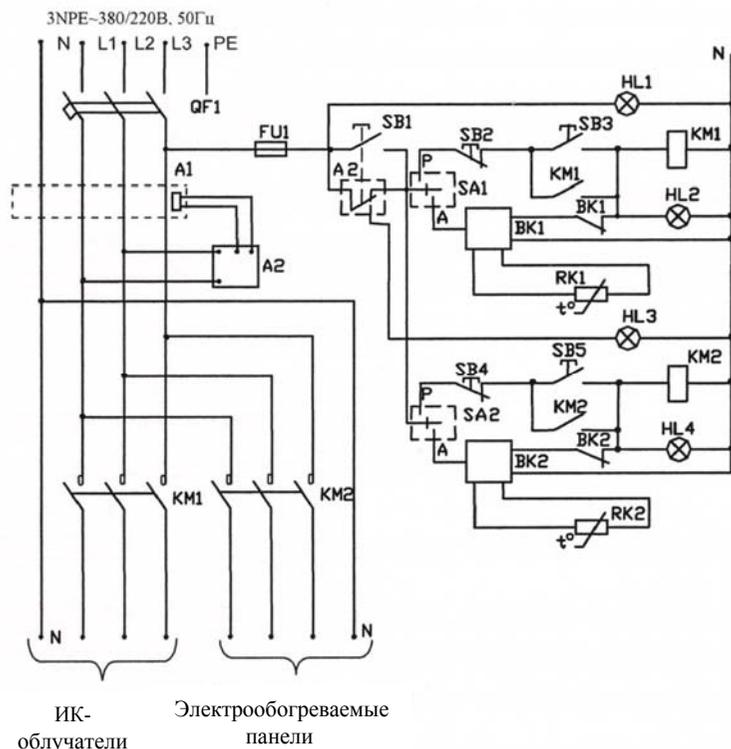


Рис. 6.6. Принципиальная электрическая схема установки ЭИС-11-И1 «Комби»

### Методика выполнения работы

1. Изучить устройство, принцип действия, схемы управления установок ЭИС-11-И1 «Комби», ЭОКС-2/1,5-И1, коврика ЭП-935 на образцах, представленных в лаборатории, электрообогреваемых полов и панелей по рекомендуемой литературе, методическим указаниям и моделям в лаборатории.

2. Проверить исправность блока защиты от токов утечки в установке «Комби». Для этого включить установку в ручном или автоматическом режиме управления. Нажать кнопку SB1 (рис. 6.6), после чего должно сработать устройство защиты А2. Отключить установку. Для возврата установки в рабочее состояние выключить и снова включить. Уяснить принцип действия блока защиты.

3. Измерить температуру на поверхности обогреваемой панели в зоне размещения датчика температуры и сравнить ее с заданной на шкале терморегулятора. Определить, насколько различаются заданная на терморегуляторе и фактическая температуры панели.

4. Приборами МТ2 и ЭТП-М измерить температуру на поверхности обогреваемой панели и в пространстве между облучателем и панелью (рис. 6.7). Результаты измерений записать в табл. 6.1.

Построить график распределения температуры в зоне обогрева в зависимости от высоты над панелью и расстояния от центра панели (рис. 6.7, б).

Таблица 6.1

Распределение температуры в зоне обогрева установки ЭИС-11-И1 «Комби»

Расстояние от облучателя до обогреваемой панели Н, м	Расстояние от центра панели $l$ , м				
	$l_1 =$	$l_2 =$	$l_3 = 0$	$l_4 =$	$l_5 =$
	Температура $t$ , °C				
H1 =					
H2 =					
H3 =					

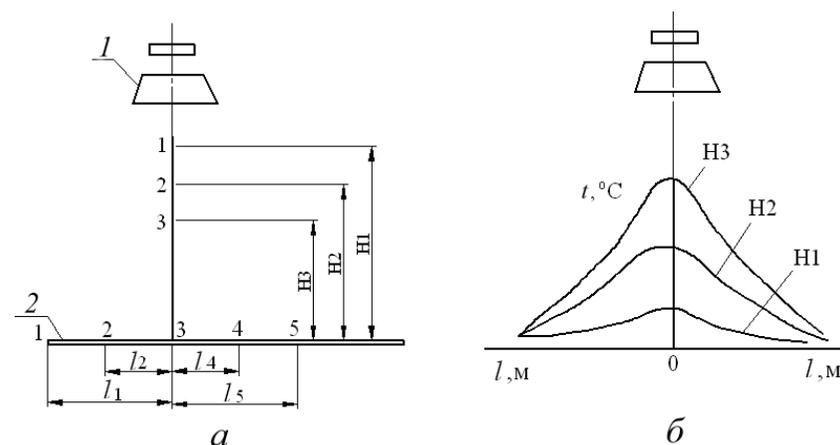


Рис. 6.7. Точки измерения температуры (а), распределение температуры (б) в зоне обогрева ЭИС-11-И1 «Комби»:

1 – ИК-облучатель; 2 – электрообогреваемая панель

### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Принципиальная электрическая схема управления установкой ЭИС-11-И1.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. График распределения температуры в зоне обогрева установки ЭИС-11-И1 «Комби».

### Контрольные вопросы:

1. Проблемы создания оптимального микроклимата для разных возрастных групп животных и птицы.
2. Устройство электрообогреваемых полов, плит, ковриков, панелей, электроконвекторов.
3. Устройство электроустановки ЭИС-11-И1 «Комби».
4. Работа электрической схемы управления ЭИС-11-И1 «Комби».
5. Особенности эксплуатации установок локального электрообогрева.

## 7. ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия, электрические схемы сварочного выпрямителя ВД-306УЗ и машины электроконтактной точечной сварки МТ-501, экспериментально определить их основные параметры.

### Задачи работы:

1. Изучить назначение, устройство, принцип действия, электрическую схему сварочного выпрямителя ВД-306УЗ.
2. Изучить назначение, устройство, принцип действия, электрическую схему машины электроконтактной точечной сварки МТ-501.
3. Определить внешние характеристики сварочного выпрямителя ВД-306УЗ.

### Общие сведения

Электрическая сварка – способ получения неразъемного соединения путем электронагрева отдельных участков металлических тел до жидкого или пластического состояния с их последующим соединением и охлаждением.

Дуговая сварка основана на использовании энергии электрического разряда, возбуждаемого и поддерживаемого между электродом и изделием. Различают сварку открытой, закрытой под слоем флюса и защищенной в среде газа дугой. Сварка может быть на постоянном и переменном токе, однофазной или трехфазной дугой, плавящимся или неплавящимся электродом с использованием для наплавки приращочного прутка. В зависимости от степени механизации работ говорят о ручной, полуавтоматической и автоматической сварке. При питании сварочной дуги постоянным током свариваемые детали чаще всего соединены с положительным полюсом источника (прямая полярность сварки). Вблизи анода выделяется больше теплоты, чем у катода, и металл изделия плавится интенсивнее, чем электрод. Иногда, например, при сварке тонких листов, применяют «обратную полярность», когда электрод является анодом.

Контактная сварка основана на использовании теплоты, выделяющейся непосредственно в свариваемом стыке за счет протекания через свариваемые детали электрического тока. Контактная сварка имеет следующие разновидности: стыковая, точечная, шовная (роликовая). Сварку выполняют переменным однофазным током большой силы (до тысяч и десятков тысяч ампер) при малых

напряжениях (единицы вольт) или мощными однополярными импульсами тока (точечная или стыковая сварка).

Источники питания сварочной дуги должны обеспечивать надежное зажигание и устойчивое горение дуги в процессе сварки, возможность регулирования сварочного тока, безопасность обслуживания. Они должны иметь достаточно высокие технико-экономические (КПД, cosφ) и другие показатели.

Надежность зажигания дуги повышается с возрастанием напряжения холостого хода источника питания  $U_0$ , которое должно быть больше напряжения дуги  $U_d$  в установившемся режиме. Значения  $U_d$  лежат в пределах 25–50 В для ручной сварки открытой дугой, 30–40 В – для сварки под флюсом и 20–30 В – для сварки в среде защитных газов. По условиям техники безопасности напряжение холостого хода источника питания ограничивают величиной 90 В.

Основной характеристикой источника питания является его внешняя характеристика, представляющая собой зависимость напряжения источника от тока нагрузки:  $U_n = f(I_d)$ . По форме внешняя характеристика источника может быть крутопадающей (рис. 7.1, кривая 1), пологопадающей (кривая 2) и жесткой (линия 3).

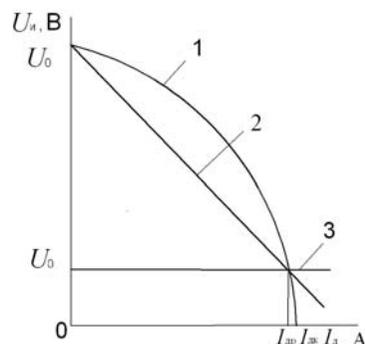


Рис. 7.1. Внешние характеристики источника питания сварочной дуги:  
1 – крутопадающая; 2 – пологопадающая;  
3 – жесткая

Для устойчивого горения дуги форма внешней характеристики источника питания  $U_n = f(I_d)$  должна соответствовать форме статической характеристики дуги  $U_d = f(I_d)$ . Аналитически устойчивость дуги определяют коэффициентом устойчивости  $K_y$ , который должен быть больше нуля:

$$K_y = \left( \frac{\partial U_d}{\partial I} - \frac{\partial U_n}{\partial I} \right)_{I=I_p} > 0. \quad (7.1)$$

Условие (7.1) выполняется, если при падающей характеристике дуги внешняя характеристика источника будет более падающей, а при возрастающей – более возрастающей. Для ручной сварки используют источники питания с крутопадающей характеристикой. Такая форма обеспечивает устойчивость горения дуги и ограничивает ток короткого замыкания ( $I_{д.к}$ ), который по отношению к рабочему току ( $I_{д.р}$ ) не должен выходить за пределы  $I_{д.к} / I_{д.р} = 1,25-2,0$ .

При автоматической сварке под флюсом в среде защитных газов и некоторых других видах сварки применяют источники с пологопадающей и жесткой характеристиками.

Для ручной дуговой сварки переменным током источниками питания служат сварочные трансформаторы с первичным напряжением 220 или 380 В. Однопостовые сварочные трансформаторы имеют падающую внешнюю характеристику и по способу регулирования сварочного тока подразделяются на две группы: трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием и дополнительной реактивной катушкой-дросселем и трансформаторы с повышенным магнитным рассеянием, к которым относятся три основных типа: трансформаторы с подвижными катушками, трансформаторы с магнитным шунтом, трансформаторы с витковым (ступенчатым) регулированием. Наиболее распространены трансформаторы с подвижными катушками, у которых регулирование сварочного тока осуществляют изменением расстояния между первичной и вторичной обмотками.

Источниками для сварки постоянным током служат сварочные генераторы (преобразователи) и сварочные выпрямители. В настоящее время машинные сварочные генераторы вытесняются статическими сварочными выпрямителями, имеющими лучшие эксплуатационные и экономические показатели.

Выпрямитель сварочный ВД-306УЗ предназначен для питания электрической сварочной дуги постоянным током при ручной дуговой сварке, резке и наплавке металлов при трехфазном питании от сети переменного тока (рис. 7.2).

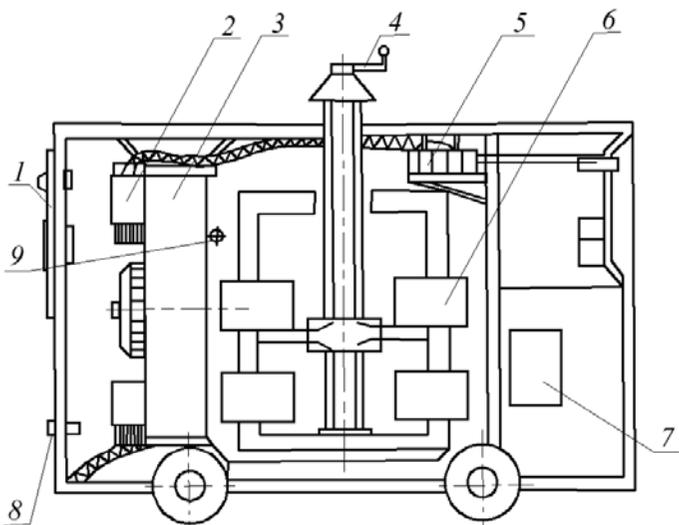


Рис. 7.2. Конструктивная схема сварочного выпрямителя ВД-306УЗ:  
 1 – панель управления; 2 – блок силовых реле; 3 – вентилятор; 4 – рукоятка перемещения обмоток; 5 – переключатель диапазонов силы сварочного тока; 6 – трансформатор; 7 – силовой блок системы управления; 8 – выводы для подключения сварочных проводов; 9 – реле потока воздуха

Технические данные сварочного выпрямителя ВД-306УЗ:

Номинальное первичное напряжение, В	220 или 380
Вторичное напряжение холостого хода, В	60–70
Номинальное вторичное напряжение, В	22–32
Номинальный сварочный ток при ПВ = 60 %, А	315
Пределы регулирования сварочного тока, А:	
– основной диапазон	126–315
– вспомогательный диапазон	45–125
Потребляемая мощность, кВА	24
Коэффициент полезного действия	0,7

Принципиальная электрическая схема выпрямителя приведена на рис. 7.3. Выпрямитель состоит из понижающего трехфазного силового сварочного трансформатора TV1 с подвижными катушками, выпрямительного кремниевого блока UZ с вентилятором, пусковой и защитной аппаратуры, тележки, кожуха. Все составные части выпрямителя смонтированы на тележке и защищены кожухом.

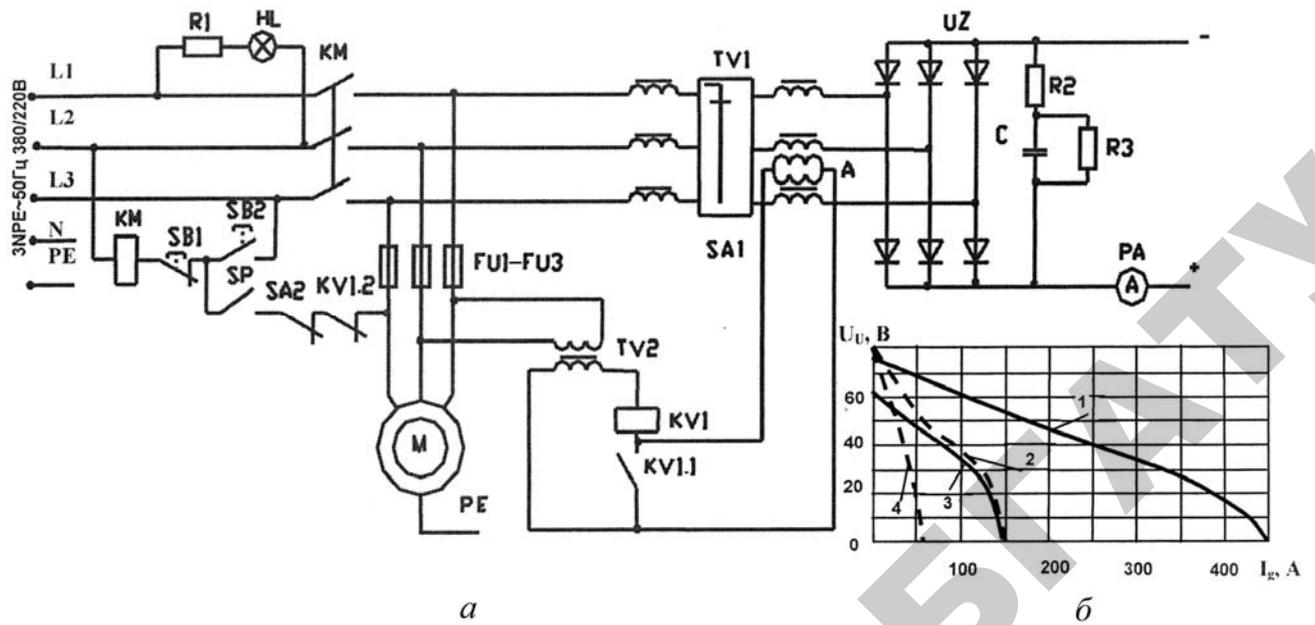


Рис. 7.3. Принципиальная электрическая схема сварочного выпрямителя ВД-306 УЗ (а) и его внешние характеристики (б):  
 ——— диапазон больших токов ( $\Delta/\Delta$ ); - - - диапазон малых токов (Y/Y);  
 1, 2 – при сдвинутых обмотках; 3, 4 – при раздвинутых обмотках

Напряжение, необходимое для сварки, падающая внешняя характеристика выпрямителя и регулирование сварочного тока обеспечиваются трехфазным силовым трансформатором TV1 с повышенной индуктивностью рассеяния. Повышенная индуктивность рассеяния создается специальной конструкцией первичной и вторичной обмоток с расположением их вдоль стержней сердечника на некотором расстоянии друг от друга.

Выпрямитель имеет два диапазона регулирования сварочного тока, устанавливаемых переключателем SA1: диапазон малых токов (при соединении первичной и вторичной обмоток трансформатора по схеме Y/Y) и диапазон больших токов (по схеме Δ/Δ). Для исключения возможности переключения диапазоном под нагрузкой служит микровыключатель SA2, вмонтированный в переключатель SA1. Плавное регулирование сварочного тока внутри каждого диапазона производят путем изменения расстояния между первичной и вторичной обмотками.

Выпрямитель включают кнопкой SB2, которую необходимо удерживать в нажатом состоянии до тех пор, пока не придет во вращение вентилятор и не сработает реле потока SP.

Аварийное отключение в зависимости от причины аварии может осуществляться с помощью реле потока SP (при прекращении или снижении уровня обдува вентиля) или узлом защиты А (при пробое вентиля выпрямителя UZ или замыканиях на корпус вторичных обмоток трансформатора TV1). Узел защиты состоит из магнитного усилителя А, вспомогательного трансформатора TV2 и реле KV1. Обмотками управления служат провода двух фаз вторичной обмотки трансформатора TV1, проходящие через окна двух тороидальных сердечников магнитного усилителя. Эти провода соединяют вторичную обмотку трансформатора с выпрямительным блоком. Необходимость наличия в окнах сердечников проводов двух фаз объясняется тем, что узел защиты должен обеспечивать отключение выпрямителя при соединении фаз вторичной обмотки TV1 как в звезду, так и в треугольник. Обмотка реле KV1 и включенные параллельно рабочие обмотки магнитного усилителя питаются от вспомогательного трансформатора TV2. В нормальных (неаварийных) условиях работы сердечники магнитного усилителя не насыщены, величина напряжения вторичной обмотки TV2 не достаточна для срабатывания реле KV1. В аварийных режимах (например, при пробое p-n – перехода вентиля) в фазных вторичных обмотках трансформатора TV1 появляются постоянные составляющие

щие, вызывающие насыщение сердечника усилителя А, реле KV1 срабатывает, снимает питание с катушки электромагнитного пускателя КМ, контакты которого размыкаются и отключают трансформатор и двигатель вентилятора, процесс сварки прерывается. В схеме предусмотрена самоблокировка реле KV1 с помощью замыкающего контакта KV1.1.

Машина МТ-501 предназначена для электроконтактной точечной сварки деталей из листовой стали. Принцип ее устройства и работы поясняет рис. 7.4.

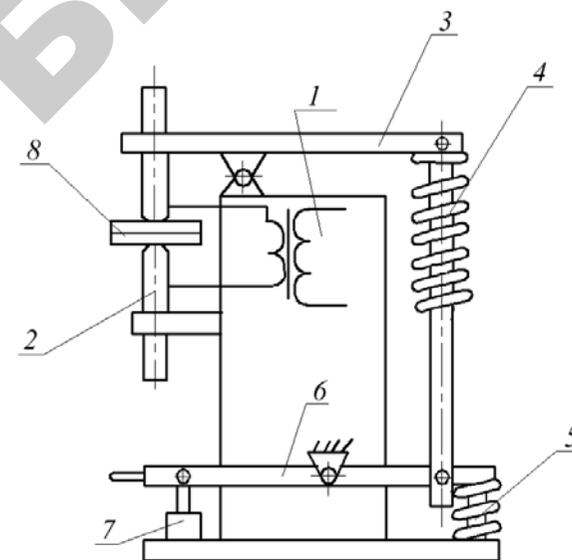


Рис. 7.4. Конструктивная схема машины для электроконтактной точечной сварки:  
1 – сварочный трансформатор; 2 – электроды; 3–6 – рычажный привод сжатия;  
7 – электропневматический привод сжатия электродов; 8 – свариваемое изделие

Машина состоит из корпуса, сварочного трансформатора, устройства зажима деталей, системы водяного охлаждения электродов, регулятора режимов сварки, электрической системы управления.

Принципиальная электрическая схема машины (рис. 7.5) включает силовые цепи питания, сварочный трансформатор TV1 с переключателями ступеней мощности SA1–SA3, электропневматический клапан У, контактор включения трансформатора КМ, двухпозиционный регулятор цикла сварки, собранный на электронной лампе VL, обеспечивающий регулировку времени нагрева и времени

паузы. Регулирование силы сварочного тока осуществляют ступенчато, путем изменения коэффициента трансформации TV1 с помощью переключателей SA1–SA3, которые имеют по две рабочие позиции и одну холостую.

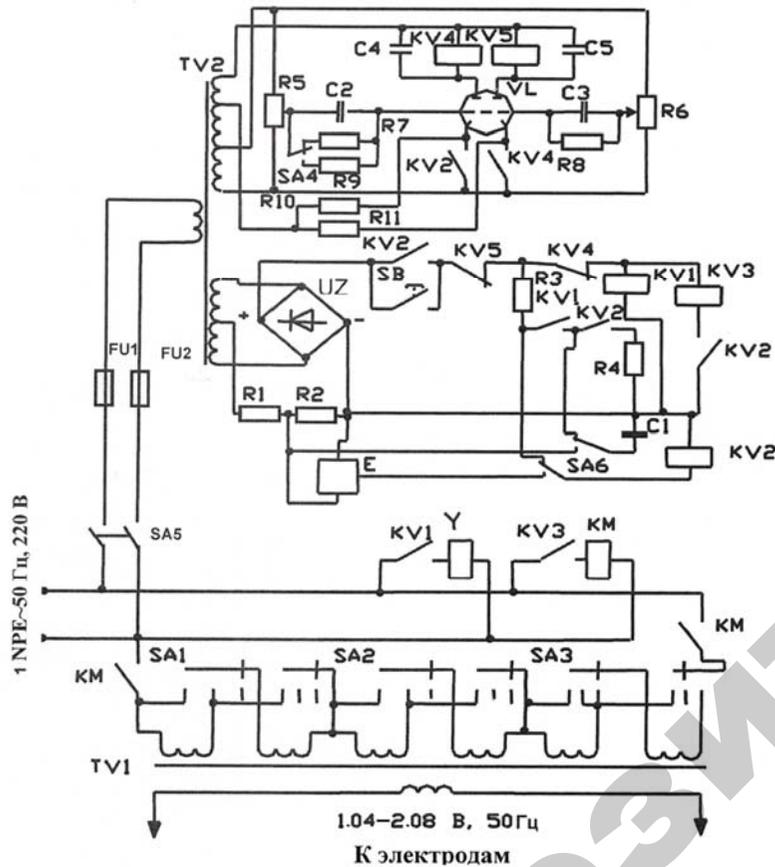


Рис. 7.5. Принципиальная электрическая схема машины электроконтактной точечной сварки МТ-501

Регулятор времени подключают к питающей сети пакетным выключателем SA5. После включения питания происходит запитка электронной лампы VL и заряд конденсаторов C2 и C3 через резисторы R10, R11 и электронную лампу. Рабочий цикл машины начи-

нается с момента нажатия на педальную кнопку SB, при этом замыкается цепь питания реле KV1, одновременно с включением реле начинается заряд конденсатора C1, включенного параллельно катушке реле KV2. Когда напряжение на C1 достигает величины, необходимой для срабатывания реле KV2, последнее включается и своим контактом замкнет цепь питания реле KV3, управляющего контактором KM. Сработав, контактор KM включает в цепь нагревательный трансформатор TV1. Одновременно замыкающие контакты KV2 включают выдержку времени «Сварка», блокируют педальную кнопку SB и переключают конденсатор C1 на разряд через резистор R4.

Выдержку времени «Сварка» определяют параметры электронного реле времени, выполненного на левом триоде электронной лампы VL и реле KV4. Предварительно заряженный конденсатор C2 прикладывает к сетке триода запирающее напряжение. При замыкании контакта SA4 конденсатор C2 начинает разряжаться на резистор R9 (или R7). Как только напряжение на конденсаторе C2 станет достаточным для отпирания лампы, левый триод откроется, и реле KV4 сработает. Контакты в цепи правого триода включают выдержку времени «Пауза», а размыкающий контакт отключает цепь питания реле KV1 и KV3. Трансформатор отключается, и электроды (в режиме сварки) освобождают детали.

Выдержку времени «Пауза» определяют параметры электронного реле времени, выполненного на правом триоде лампы VL и реле KV5. По истечении выдержки времени «Пауза» (определяемого разрядом конденсатора C3) срабатывает реле KV5 и размыкающим контактом отключит реле KV2 и KV4, приведя схему в исходное состояние. Работа регулятора закончится выключением реле KV5. Продолжительность выдержек «Сварка» и «Пауза» регулируется с помощью переменных резисторов R5 и R6. Выдержка времени «Сварка» имеет два диапазона, определяемых величиной резисторов R7 и R9.

Бесконтактный выключатель БВК (E) используют при работе с педальным приводом. При нажатии на педаль срабатывает выключатель E и включает реле KV2, которое приводит в действие реле KV3. Начинается протекание сварочного тока и отсчет интервала «Сварка». После отработки этой выдержки реле KV4 отключит KV3 и, следовательно, трансформатор. Цепь реле KV5 разомкнется, и схема окажется в исходном состоянии после того, как отпустят педаль и выключат БВК.

## Методика выполнения работы

Пункты 1, 2 задач работы (см. с. 66) выполняют при подготовке к лабораторному занятию, используя рекомендованную литературу, конспект лекций, настоящие методические указания, а также в процессе самого занятия при изучении устройства и работы оборудования.

Испытание сварочного выпрямителя ВД-306УЗ (п. 4) производят на лабораторном стенде (рис. 7.6) после изучения устройства, принципа действия, электрической схемы и правил обслуживания выпрямителя.

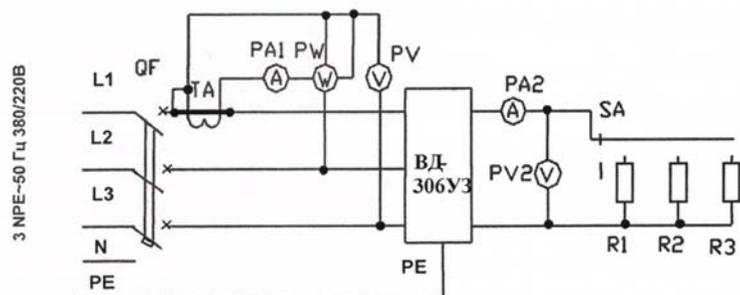


Рис. 7.6. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки:  
R1, R2, R3 – нагрузочные сопротивления выпрямителя,  
которые равны 1,26; 0,63 и 0,42 Ом соответственно

Выпрямитель включают нажатием кнопки «Пуск». Кнопку следует удерживать в нажатом состоянии до тех пор, пока не придет во вращение вентилятор и не сработает реле потока SP. Необходимо убедиться, что вентилятор вращается в нужном направлении – воздух должен засасываться со стороны лицевой панели. В случае неправильного вращения вентилятора следует поменять местами два провода питания выпрямителя, предварительно отключив его от сети. При перерывах в работе выпрямитель должен быть отключен нажатием красной кнопки «Стоп».

Сила сварочного тока зависит от:

- 1) нагрузки – электрического сопротивления дуги, которое (при данном диаметре электрода) определяется длиной дуги;
- 2) расстояния между катушками первичной и вторичной обмоток.

Нагрузку выпрямителя в лабораторных условиях имитируют сопротивлениями R1, R2, R3, а расстояние между обмотками изменяют вращением ходового винта с помощью рукоятки на верхней крышке кожуха.

В работе необходимо снять и построить 5 внешних характеристик, соответствующих пяти положениям регулятора силы тока при изменении нагрузки (сопротивлений R1, R2, R3).

Силу тока в зависимости от расстояния между обмотками устанавливают по шкале регулятора (окошко в верхней крышке кожуха), на которой нанесены деления от 1 до 9. Большая цифра соответствует большей силе тока.

При выполнении работы для уменьшения износа механизма регулятора фиксируют его положения (2, 3, 4, 5, 6) и для каждого из них изменяют величину нагрузки:  $R = \infty$  (холостой ход); R1 = 1,26 Ом; R2 = 0,63 Ом; R3 = 0,42 Ом.

Показания приборов и результаты вычислений записывают в табл. 7.1, где индекс 1 имеют величины, относящиеся к первичной цепи выпрямителя, индекс 2 – к вторичной.

Таблица 7.1

Внешние и энергетические характеристики сварочного выпрямителя ВД-306УЗ

Положение регулятора	R, Ом	Измерено					Вычислено		
		U <sub>1</sub> , В	I <sub>1</sub> , А	P <sub>1</sub> , кВт	U <sub>2</sub> , В	I <sub>2</sub> , А	P <sub>2</sub> , кВт	cosφ, о.е.	η, %
2	х.х.								
	1,26								
	0,63 0,42								
3	х.х.								
	1,26								
	0,63 0,42								
4	х.х.								
	1,26								
	0,63 0,42								
5	х.х.								
	1,26								
	0,63 0,42								
6	х.х.								
	1,26								
	0,63 0,42								

## 8. УСТАНОВКА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

$$\text{Коэффициент мощности: } \cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}.$$

$$\text{КПД выпрямителя приближенно равен } \eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Каждая цифра шкалы регулятора соответствует определенному расстоянию между обмотками ( $l = 2, 3, 4$  и т. д.).

### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Электрическая схема ВД-306У3.
3. Результаты измерений и вычислений.
4. Графические зависимости  $U_2(I_2, l)$ ,  $\cos\varphi(I_2)$ ,  $\eta(I_2)$ ,  $I_2(l)$ .
5. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы:

1. Требования к источникам питания сварочной дуги, условия устойчивого горения дуги.
2. Статическая ВАХ сварочной дуги, ее практическая значимость.
3. Принципиальная электрическая схема сварочного выпрямителя ВД-306У3.
4. Принципиальная электрическая схема машины электроконтактной точечной сварки МТ-501.
6. Основные правила техники безопасности при эксплуатации установок дуговой сварки.

**Цель работы:** изучить энергетические характеристики индукционного нагрева, устройство, принцип действия установки индукционного нагрева, приобрести навыки эксплуатации индукционных установок.

### Задачи работы:

1. Изучить энергетические характеристики индукционного нагрева, устройство и принцип действия индукционной установки ВЧИ4-10/0,44, конструктивное исполнение индукторов.
2. Определить пределы регулирования напряжения на индукторе. Установить зависимость между анодным напряжением и напряжением на индукторе, его мощностью и напряженностью магнитного поля.
3. Исследовать влияние удельного сопротивления и магнитной проницаемости металла на глубину проникновения тока и поглощаемую мощность.
4. Исследовать влияние зазора между изделием и индуктором на поглощаемую мощность, скорость нагрева, теплоперепад, КПД, коэффициент мощности.

### Общие сведения

Индукционный нагрев основан на законах электромагнитной индукции и Джоуля–Ленца. Переменный электрический ток, протекающий по индуктирующему проводу, создает переменное магнитное поле, которое проникает в металлическое тело, наводит в нем переменную ЭДС и токи, нагревающие его (рис. 8.1, в). Для индукционного нагрева используют частоты от 50 Гц до 5 МГц. Энергия электромагнитного поля, поступающая в металл, расходуется на нагрев и создание магнитного поля:

$$P_s = \frac{1}{2} \rho k H_0^2 e^{-2kz}, \quad (8.1)$$

где  $P_s$  – поверхностная плотность потока энергии (Вт/м<sup>2</sup>) в теле на расстоянии  $z$  (м) от его поверхности (рис. 8.1, в);  $\rho$  – удельное со-

противление металла, Ом·м;  $k$  – коэффициент затухания волны, м<sup>-1</sup>;  $H_0$  – действующее значение напряженности магнитного поля на поверхности тела, А/м;  $e = 2,71$  – основание натуральных логарифмов.

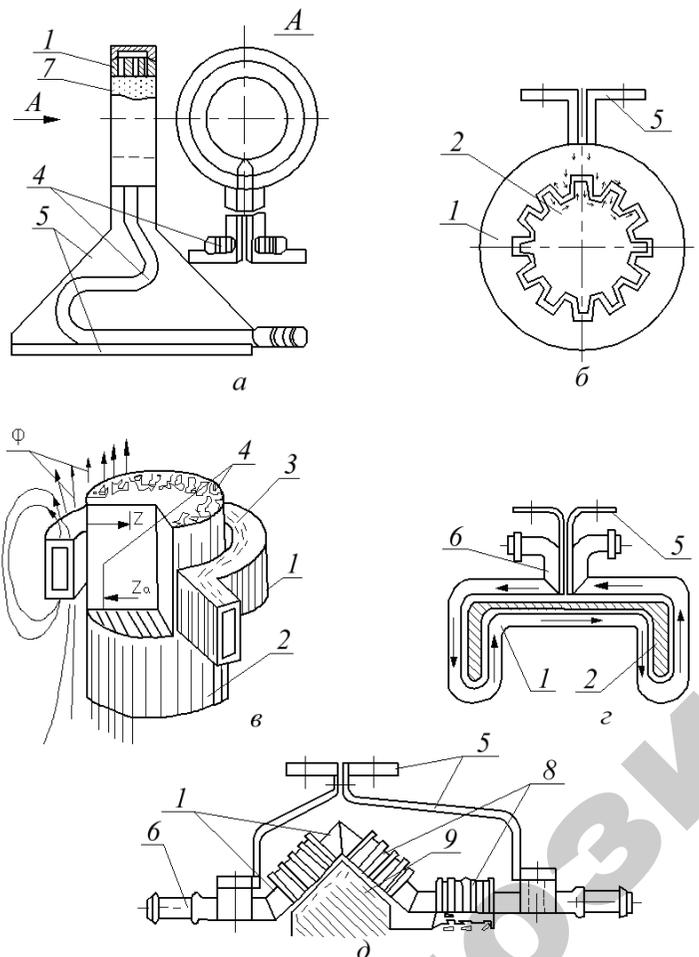


Рис. 8.1. Закалочные индукторы (примеры выполнения):

1 – индуктирующий провод; 2 – изделие; 3, 4 – условное распределение токов в системе «индуктор–изделие»; 5 – токоподводящие шины; 6 – элементы водоохлаждения; 7 – отверстия подачи воды; 8 – магнитопровод; 9 – станина металлорежущего станка

Величина поглощаемой мощности зависит от электрических свойств металла (удельного электрического сопротивления  $\rho$ , магнитной проницаемости  $\mu$ ) и параметров магнитного поля (частоты  $f$ , напряженности  $H$ ). По мере проникновения электромагнитной волны вглубь тела ее мощность убывает по экспоненте, как указано в формуле (8.1). Способность электромагнитного поля проникать, а материала поглощать его характеризуют глубиной проникновения тока ( $z_a$ ), на которой амплитуда волны уменьшается в  $e$  раз:

$$z_a = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}. \quad (8.2)$$

В слое толщиной  $z_a$  выделяется 86 % поглощенной мощности. С целью упрощения расчетов учитывают только эту мощность.

Электрическую энергию преобразуют в магнитную и подводят к нагреваемому телу с помощью устройства, называемого индуктором. Индукторы классифицируют: по технологическому назначению – закалочные (рис. 8.1), нагревательные (рис. 8.2), сварочные и др.; по принципу действия – периодического или непрерывного; рабочей частоте и конструктивному исполнению.

Конструктивное исполнение индукторов может быть самым разнообразным (рис. 8.1, 8.2) и зависит главным образом от технологического назначения. Принципиально индуктор состоит из индуктирующего провода, токоподводящих шин, узла подключения охлаждающей воды. Индуктирующий провод изготавливают из медной трубки круглого или прямоугольного сечения. Медь обладает низким удельным сопротивлением и меньшими потерями мощности в индукторе. Толщина стенки трубки индуктора составляет  $(1,6-3,0) z_a$ .

Индуктор и изделие образуют электрическую систему с общим сопротивлением, которую характеризуют мощностью, поглощаемой изделием, КПД, коэффициентом мощности.

Удельная поверхностная мощность (Вт·м<sup>-2</sup>), поглощаемая изделием, при условии, что удельное сопротивление ( $\rho_2$ ) и магнитная проницаемость ( $\mu_2$ ) изделия в процессе нагрева неизменны, определяется по следующей формуле:

$$\Delta P_0 = 10^{-3} H_0 \sqrt{\rho_2 \mu_2} f. \quad (8.3)$$

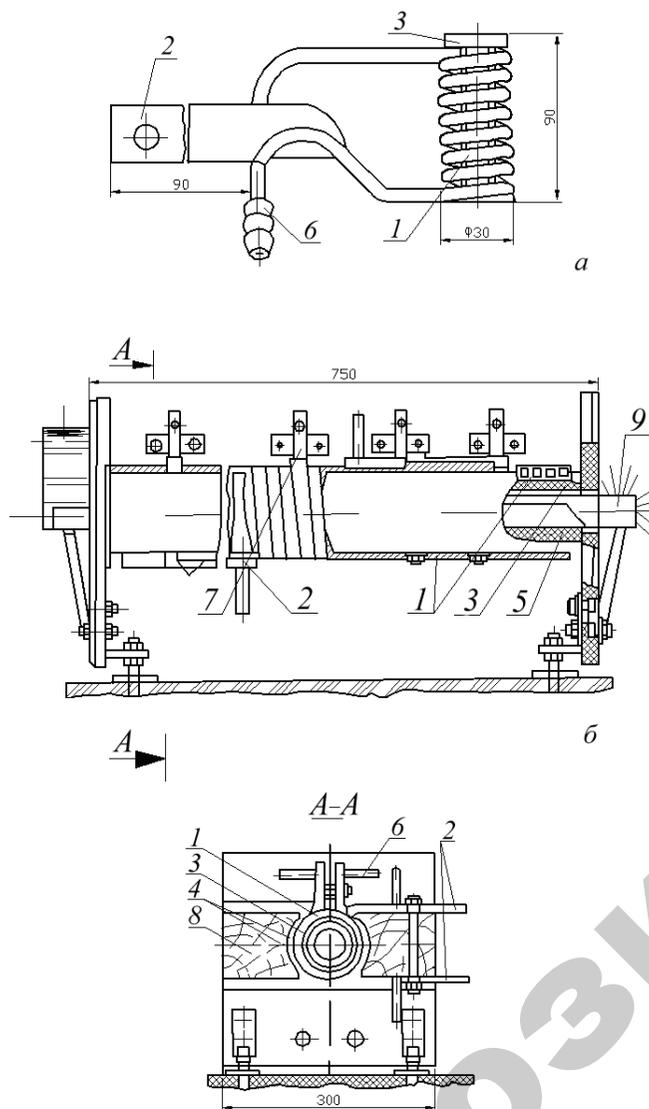


Рис. 8.2. Нагревательные индукторы периодического (а) и непрерывного (б) действия:

1 – индукционный провод; 2 – токоподводящие шины; 3 – керамические втулки (тепловая изоляция); 4 – асбестовая прокладка; 5 – металлическая направляющая для перемещения заготовок; 6 – водоохлаждаемая трубка; 7 – узел соединения секций индуктора; 8 – бруски крепления индуктора; 9 – заготовка

Поглощаемая мощность пропорциональна  $\sqrt{f}$ , зависит от  $\rho_2$ ,  $\mu_2$  и в реальных условиях изменяется в процессе нагрева, так как электрические свойства металла зависят от температуры. При температуре выше точки Кюри ( $\mu_2 = 1$ ,  $\rho_2 = \text{const}$ ) мощность снижается до установившегося значения и дальше не изменяется. При изменении  $\rho_2$ ,  $\mu_2$  меняется ток индуктора и напряженность магнитного поля, что также влияет на мощность.

КПД системы «индуктор – изделие» зависит от частоты и зазора между индуктором и изделием. При оптимальном соотношении частоты и диаметра цилиндрической заготовки КПД достигает предельного значения:

$$\eta_{\text{пред}} = \frac{P_2}{P_1} = \left( 1 - \frac{r_1}{r_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}} \right), \quad (8.4)$$

где  $P_1$  – активная мощность, подведенная к индуктору;  $P_2$  – полезная мощность, переданная в изделие;  $r_1$ ,  $r_2$  – радиусы индуктора и изделия;  $\rho_1$  – удельное сопротивление индуктирующего провода;  $\rho_2$  – удельное сопротивление изделия.

Коэффициент мощности снижается с увеличением частоты и зазора:

$$\cos \varphi = \frac{r_{\text{н}}}{z_{\text{н}}} = \frac{503}{a} \sqrt{\frac{\rho_2 \mu_2}{2f}}, \quad (8.5)$$

где  $r_{\text{н}}$ ,  $z_{\text{н}}$  – активное и полное сопротивления системы «индуктор–изделие»;  $a$  – зазор между индуктором и изделием.

Основным фактором, влияющим на характеристики системы «индуктор – изделие», является частота тока.

При закалке частоту тока выбирают исходя из требований высокого термического КПД и стремятся, чтобы при температуре свыше  $800^\circ\text{C}$   $z_a = (1-3) X_k^2$ . Это условие выполняется при частоте закалки:

$$f_{\text{опт}} \approx \frac{0,06}{X_k^2}, \quad (8.6)$$

где  $X_k$  – глубина закаленного слоя, м.

При сквозном нагреве величину частоты определяют электрический КПД индуктора и равномерность нагрева. Диапазон частот при нагреве:  $3/d_2^2 < f < 6/d_2^2$ . На практике при выборе частоты исходят из рекомендаций (табл. 8.1), где  $d_2$  – диаметр цилиндра или ширина пластины.

Таблица 8.1

Рекомендуемая частота тока для сквозного нагрева  
стальных заготовок

$f$ , кГц	0,05	0,5	1,0	2,5	4,0	8,10	66
$d_2$ , мм	160	70–160	60–120	40–80	30–60	20–40	10–20

Источники питания индукционных установок предназначены для преобразования токов промышленной частоты в токи высокой частоты. Различают машинные (0,5–10 кГц), статические (0,15–1,3 кГц), ламповые (66, 440 кГц) преобразователи. Применительно к задачам работы рассмотрим устройство и принцип действия лампового преобразователя на примере генератора ВЧИ4-10/0,44.

Генератор ВЧИ4-10/0,44, как и любой другой ламповый преобразователь, состоит из следующих основных узлов: источника питания, генераторного блока, аппаратуры управления и защиты.

Источник питания содержит: блок регулирования напряжения (А1), повышающий (анодный) трансформатор TV1, анодный выпрямитель VD1–VD6 (рис. 8.3).

Блок регулирования А1 (рис. 8.4) может изменять величину сетевого напряжения от 0 до 380 В. Следовательно, мощность на индукторе, состоит из тиристоров VS1–VS6 и схемы управления тиристорами, которая содержит три фазосдвигающих устройства А7, усилитель постоянного тока А8, импульсные трансформаторы А9. Величину напряжения регулируют силовыми тиристорами VS1–VS6 за счет изменения момента их включения. Момент включения силовых тиристоров определяется суммарной величиной напряжения, приложенного к базовым цепям транзисторов VT1, VT2 через диоды VD20, VD21.

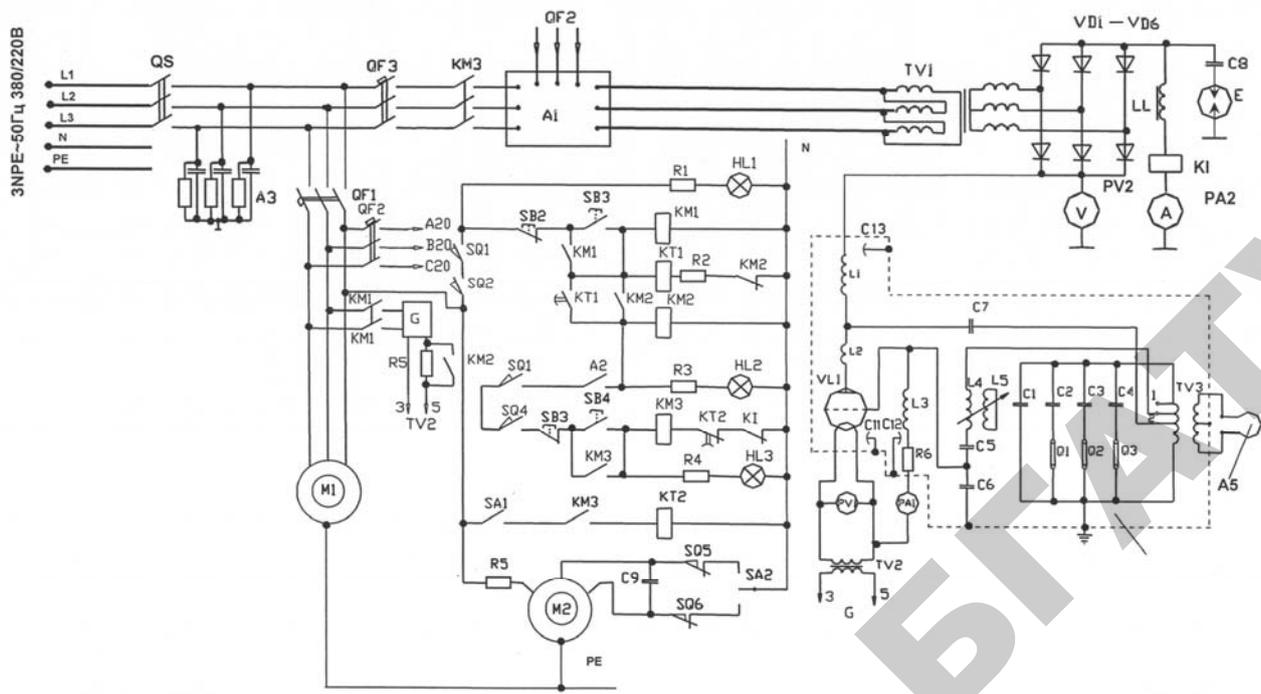


Рис. 8.3. Принципиальная электрическая схема индукционной установки ВЧИ4-10/0.4

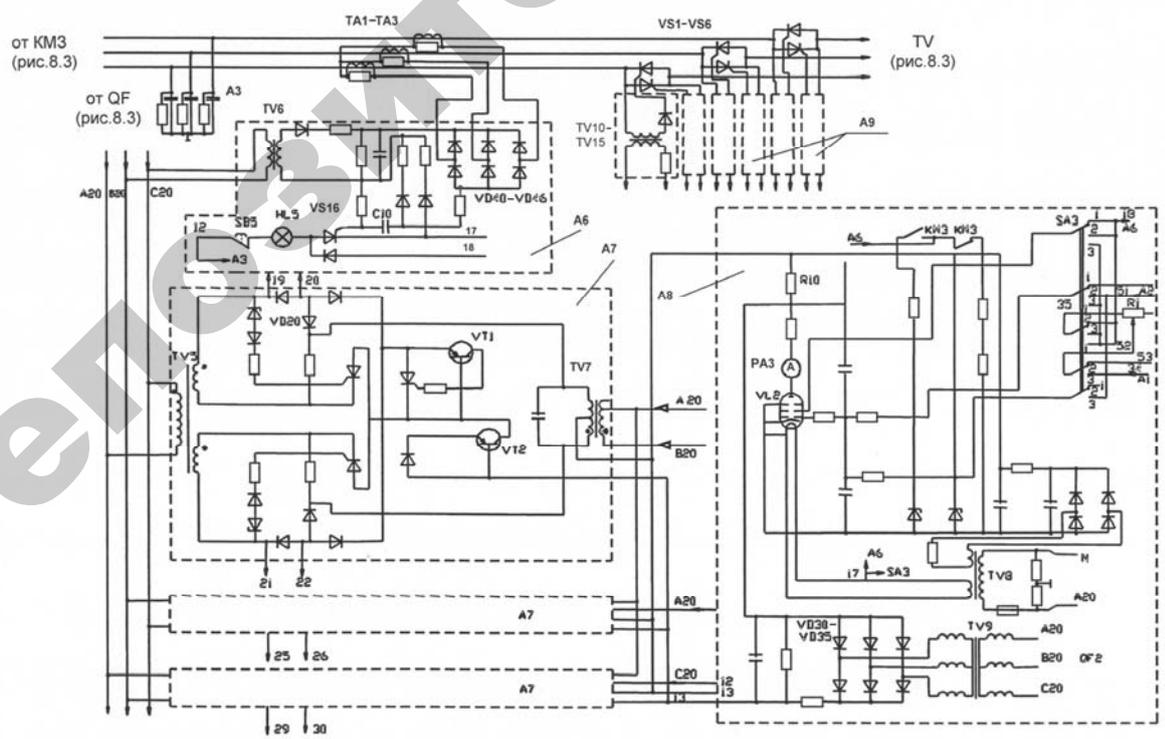


Рис. 8.4. Принципиальная электрическая схема блока А1

Суммарная величина напряжения состоит из синусоидального напряжения от трансформатора управления TV5, напряжения отрицательного смещения от выпрямителя VD30–VD35, напряжения положительного смещения, снимаемого с сопротивления R10 блока A8. Величину напряжения изменяют вручную потенциометром R1 (регулятор напряжения на двери шкафа) за счет изменения величины анодного тока пентода VL2 в блоке A8.

Цепи управления и стабилизации предусматривают три режима регулирования напряжения на индукторе, задаваемые переключателем SA3.

Режим настройки. Переключатель SA3 находится в положении 3. Регулирование напряжения осуществляется вручную потенциометром R1.

Режим стабилизации напряжения. Переключатель SA3 находится в положении I. Величина напряжения задается вручную потенциометром R1. Стабилизация напряжения с точностью  $\pm 0,05\%$  осуществляется автоматически за счет напряжения обратной связи, подаваемого в блок A8 (провода 50, 53).

Режим стабилизации напряжения от датчика стандартным выходным сигналом (ток 5 мА, напряжение – 10–15 В). Переключатель SA3 находится в положении 3. Величину напряжения задают потенциометром R1, подключенным к датчику стандартного напряжения (провода 53, 54).

Блок электронной защиты A6 (рис. 8.4) предназначен для мгновенного прекращения тока в силовой сети, питающей анодный трансформатор TV1 и генераторный блок A4 (рис. 8.3). Это достигается выключением тиристоров VS1–VS6 за счет снятия напряжения с импульсных трансформаторов TV–TV15. В нормальном режиме к управляющему электроду тиристора VS16 (блок A6) приложены напряжения отрицательного смещения от TV6 и положительного смещения от выпрямителя VD40–VD46. Напряжения взаимокompенсируются. В случае аварийного режима токи в фазах сети (ТА1–ТА3) возрастут, напряжение положительного смещения превысит напряжение от TV1, тиристор VS16 откроется, закортит цепь стабилитрона VD17 (A8), снимет напряжение с экранной сетки пентода VL2 и тем самым выключит усилитель постоянного тока (A8) и тиристоры VS1–VS6.

Анодный трансформатор повышает регулируемое сетевое напряжение до 2–7 кВ, необходимое для работы лампы, исключает конденктивную связь между генератором и питающей сетью.

Наличие анодного выпрямителя обусловлено значительно лучшими режимами работы генераторной лампы на постоянном токе.

Высокочастотный блок генератора A4 (рис. 8.3) представляет собой одноконтурный автогенератор с емкостной обратной связью. Состоит из генераторной лампы VL1, колебательного контура (емкости C1–C4, трансформатора TV3, индуктора A5), цепи обратной сеточной связи (делителя из индуктивностей L4, L5 и емкостей C5, C6), сопротивления гридлика R6, катодного трансформатора TV2, блокировочных дросселей L1, L2, L3 и конденсаторов C11–C13, разделительного конденсатора C7.

При подаче от выпрямителя VD1–VD6 на генераторный блок напряжения постоянного тока в колебательном контуре автоматически возникает резонанс токов. Генерируемая частота определяется величиной емкости C и индуктивности L колебательного контура:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (8.7)$$

Энергию, расходуемую в колебательном контуре на нагрев изделия, токоподводящих шин и проводов, восполняют подзарядкой конденсаторов C1–C4 от источника питания. Частота подзарядки конденсаторов совпадает с частотой колебаний и направлением токов в резонансной цепи, момент подзарядки определяют запирающим и отпирающим генераторной лампы. Для этого на сетку лампы с конденсатора C6 подают напряжение обратной связи, изменяющееся в такт изменению напряжения на колебательном контуре, которое управляет лампой.

Индуктивность L1 и емкость C7 разделяют цепи переменного и постоянного токов. Индуктивности L2, L3 ограничивают, а конденсаторы C11, C12, C13 блокируют переменную составляющую анодной и сеточной цепей. Настройка генератора необходима потому, что изменяются мощность и индуктивность колебательного контура при смене индуктора, изделия или режимов нагрева. При изменении индуктивности нагрузки колебательный контур настраивают подбором величины емкости переключателями Q1–Q3.

Ток сетки согласуют с анодным током напряжением обратной связи за счет перемещения индуктивности L5 относительно L4 (тумблер SA2, электродвигатель M2, рис. 8.3). При этом изменяется полное сопротивление делителя L4, C5, C6, напряжение на C6 и угол между напряжением на сетке и колебательном контуре. В оптимальном режиме ток сетки должен составлять 20–25 % величины анодного тока. Напряжение на индукторе изменяют за счет регулирования напряжения источника питания (потенциометр R1, рис. 8.4) и коэффициентом трансформации TV3 (провод от C7 в положении 1 или 2, рис. 8.3).

## Методика выполнения работы

1. Оборудование индукционного нагрева (блок регулирования напряжения, анодный трансформатор, выпрямитель, генераторная лампа, разделительные емкость и индуктивность, высокочастотный трансформатор, индуктивности обратной связи, колебательный контур) изучить на примере установки ВЧИ4-10/0,44 и индукторов, представленных в работе. Характеристики лабораторного индуктора записать в табл. 8.2.

Таблица 8.2

### Характеристики индуктора

Индуктивный провод				Индуктор				
Материал	Форма	Сечение, мм <sup>2</sup>	Толщина стенки, мм	Конструктивное исполнение	Количество витков, шт.	Высота, мм	Диаметр, мм	
							вн.	нар.

2. Прочитать краткую инструкцию «Подготовка и работа на генераторе ВЧИ4-10/0,44». Согласно инструкции и схеме управления (рис. 8.3) включить генератор. Задатчиком «Регулятор напряжения» установить нужное анодное напряжение  $U_a$  и по приборам на лабораторном стенде определить напряжение  $U_1$  и магнитный поток  $H$  индуктора, анодный  $I_a$  и сеточный  $I_c$  токи генератора. Результаты записать в табл. 8.3.

Таблица 8.3

### Зависимость напряжения магнитного потока и мощности ненагруженного индуктора от анодного напряжения

$U_a$ , В	$I_a$ , А	$I_c$ , А	$U_1$ , В	$H$ , А·м <sup>-1</sup>	$P_1$ , Вт

3. Заготовки одинаковых геометрических размеров из стали Ст.3 и меди М1 поочередно поместить в индуктор и нагреть при одинаковом напряжении и продолжительности. Продолжительность нагрева установить по реле времени КТ2 (рис. 8.3). Глубину проникновения тока определить визуально по изменению цвета поверхности заготовок и расчетным путем. Поглощаемую мощность найти методом калориметрирования. Для этого заготовки сразу после окончания нагрева сбросить специальным устройством в калориметр. Измерить температуру воды в калориметре до и после погружения заготовок. Результаты записать в табл. 8.4.

Таблица 8.4

### Влияние электрических свойств металла на глубину проникновения тока и поглощаемую мощность

Металл	$\rho_2$ , Ом·м	$\mu_2$ , о.е.	$C_2$ , кДж/(кг·°C)	Измерено					Вычислено		
				$m_2$ , кг	$m_b$ , кг	$t_{b1}$ , °C	$t_{b2}$ , °C	$\tau$ , с	$z_{a,x}$ , м	$z_{a,r}$ , м	$P_2$ , кВт
Сталь	$1,8 \cdot 10^{-7}$	5–10	0,67								
Медь	$0,18 \cdot 10^{-7}$	1	0,42								

В табл. 8.4:  $m_2$  – масса заготовки;  $m_b$  – масса воды в калориметре;  $t_{b1}$ ,  $t_{b2}$  – температура воды в калориметре до и после погружения заготовки;  $\tau$  – продолжительность нагрева;  $P_2$  – мощность, поглощенная заготовкой;  $z_{a,x}$ ,  $z_{a,r}$  – глубина проникновения тока в холодном ( $t < 700$  °C) и горячем ( $t > 800$  °C) режимах.

4. На индукторе установить требуемое напряжение. Заготовки различных диаметров из стали Ст.3 поочередно поместить в индуктор, обеспечив равномерный по периметру зазор. Термопары, приваренные к поверхности заготовки, подключить к самописцу. Установить на реле времени продолжительность нагрева. Включить самописец, протяжку ленты (1 мм/с), отметчик времени. Включить нагрев. После автоматического окончания нагрева заготовку сбросить в калориметр. Данные записать в табл. 8.5.

Таблица 8.5

### Влияние зазора между индуктором и изделием на характеристики нагрева (исходные данные)

$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$m_2$ , кг	$U_a$ , В	$U_1$ , В	$I_{ay}$ , А	$\tau$ , с	$m_b$ , кг	$t_{b1}$ , °C	$t_{b2}$ , °C

Обработать записи на диаграмме самописца. Результаты записать в табл. 8.6

Таблица 8.6

### Кинетика индукционного нагрева заготовок различного диаметра

$\tau$ , с	$d_1 =$ мм			$d_2 =$ мм		
	$t_o$ , °C	$t_{ц}$ , °C	$\Delta t$ , °C	$t_o$ , °C	$t_{ц}$ , °C	$\Delta t$ , °C

По результатам табл. 8.5 и 8.6 определить мощность, поглощаемую изделием, скорость нагрева, средний теплоперепад, КПД и  $\cos\varphi$ . Результаты записать в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Влияние зазора ( $a$ ) между индуктором и изделием на характеристики индукционного нагрева

$a = \frac{d_1 - d_2}{2}$ , мм	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$\frac{\Delta t}{\Delta \tau}$ , °C/c	$\Delta t_{cp}$ , °C	$P_2$ , Вт	$\eta$ , о.е.	$\cos\varphi$ , о.е.

В табл. 8.5, 8.6, 8.7:  $d_1, d_2$  – диаметр индуктора (внутренний) и заготовки;  $t_o, t_u$  – температура поверхности и центра заготовки;  $\Delta t$  – теплоперепад;  $I_{ay}$  – анодный ток в установившемся (горячем) режиме нагрева;  $\Delta t/\Delta \tau$  – средняя скорость нагрева;  $\Delta t_{cp}$  – средний теплоперепад;  $t_1, t_2$  – начальная и конечная температуры заготовки.

Глубина проникновения тока

$$z_a = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_2 f}}. \quad (8.8)$$

Значение  $\rho_2$  взять из табл. 8.4. Величину  $\mu_2$  в холодном режиме определить по величине  $H$  (табл. 8.3) на рис. 8.5, в горячем режиме  $\mu_2 = 1$ . Частота тока  $f = 440$  кГц.

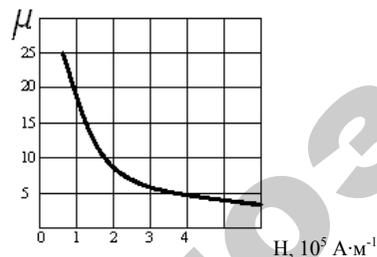


Рис. 8.5. Зависимость магнитной проницаемости сталей от напряженности магнитного поля

Мощность индуктора определяется по формуле  $P_1 = U_a P_a / \eta_k$ , где  $\eta_k = 0,7$  – КПД генераторного блока.

Мощность, поглощаемая заготовкой, по методу калориметрирования:

$$P_2 = \frac{(m_b C_b + m_2 C_2)(t_{b2} - t_{b1})}{\tau}, \quad (8.9)$$

где  $C_b = 4190$  кДж/(кг·°C) – удельная теплоемкость воды.

Теплоперепад и средний теплоперепад:

$$\Delta t = t_o - t_u, \quad (8.10)$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{max} + \Delta t_{min}}{2}. \quad (8.11)$$

Скорость нагрева:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{t_2 - t_1}{\tau}. \quad (8.12)$$

Коэффициент мощности определить в горячем режиме по формуле (8.5).

Коэффициент полезного действия определить приближенно по экспериментальным данным и по формуле (8.4):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{I_{acr} U_a \cos \varphi}, \quad (8.13)$$

где  $I_{acr} = 1,25 I_{ay}$  – средний анодный ток;  $P_1$  – активная мощность, подводимая к индуктору.

#### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Эскиз цилиндрического индуктора.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Графические зависимости:  $U_1, H, P_1(U_a); t_o, t_u(\tau); P_2, \Delta t/\Delta \tau, \eta, \cos \varphi(a)$ .
5. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы:

1. Физические основы индукционного нагрева.
2. Назначение, классификация, конструктивное исполнение индукторов.
3. Основные характеристики системы «индуктор–изделие».
4. Устройство лампового генератора ВЧИ4-10/0,44.
5. Принцип работы генератора ВЧИ4-10/0,44.
6. Настройка генератора ВЧИ4-10/0,44 на оптимальный режим работы.

## 9. УСТАНОВКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия, электрическую схему установки ВЧД2-2,5/81, определить энергетические параметры диэлектрического нагрева.

### Задачи работы:

1. Изучить устройство, принцип действия, электрическую схему установки ВЧД2-2,5/81.
2. Изучить принцип генерирования токов высокой частоты ламповыми преобразователями.
3. Определить мощность и КПД установки, расход электроэнергии на сушку, распределение температуры по толщине образца.

### Общие сведения

Диэлектрический нагрев является прямым бесконтактным нагревом неэлектропроводящих материалов в электрическом поле частотой от 5 до 300 МГц. В основе диэлектрического нагрева лежит поляризация вещества: электронная, ионная, дипольная, межслойная и др. Вследствие поляризации происходит знакопеременное с частотой поля смещение связанных зарядов. Кинетическая энергия смещения зарядов, дополнительно полученная в электрическом поле, передается элементарным структурам вещества диэлектрика, повышая интенсивность их теплового движения и в целом температуру. Удельная объемная мощность, выделяемая в диэлектрике:

$$P_v = 0,555 \cdot 10^{-10} \varepsilon \operatorname{tg} \delta f E^2, \quad (9.1)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь;  $f$  – частота электрического поля, Гц;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м.

Произведение  $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ , отражающее электрофизические свойства диэлектрика, носит название фактора потерь. Из выражения (9.1) следует, что интенсивность нагрева пропорциональна фактору потерь, частоте поля и квадрату напряженности поля. Повышение  $P_v$  возможно за счет увеличения  $f$  и  $E$ . Но величина  $E$  ограничивается электрической прочностью диэлектрика, поэтому основным способом

повышения интенсивности высокочастотного нагрева диэлектриков является повышение частоты и, в конечном счете, переход к СВЧ нагреву.

Установка высокочастотная ВЧД2-2,5/81 предназначена для предварительного подогрева в электрическом поле высокой частоты таблетированных реактопластов в электротехнической, машиностроительной, химической и других отраслях промышленности, а также на ремонтных заводах и т. д.

Установка (рис. 9.1) состоит из следующих основных частей: лампового генератора 1, камеры 2, шкафа с аппаратурой 3.

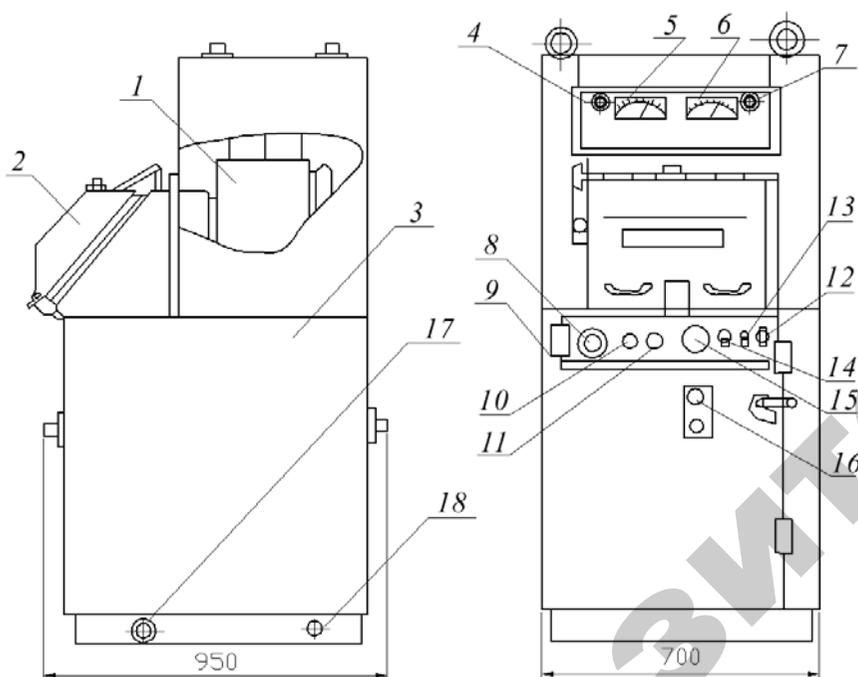


Рис. 9.1. Установка высокочастотная ВЧД2-2,5/81:

1 – ламповый генератор; 2 – камера; 3 – шкаф с аппаратурой; 4 – сигнальная лампа (накал HL2); 5 – милливольтметр (pV2); 6 – амперметр (pA1); 7 – сигнальная лампа (нагрев HL3); 8 – сигнальная лампа (готов к нагреву HL1); 9 – выключатель автоматический (QF2); 10 – кнопка «Пуск» (SB1); 11 – кнопка «Стоп» (SB2); 12 – резистор (R6); 13 – переключатель (SA2); 14 – тумблер (SA1); 15 – реле времени (KT2); 16 – выключатель (QF1); 17 – отверстие ввода проводов; 18 – заземляющий болт

Технические данные установки ВЧД2-2,5/81:

Колебательная мощность, кВт	2,5
Мощность, потребляемая от сети, кВт	5,1
Частота рабочая, МГц	81
Номинальное напряжение питающей сети, В	380
Масса нагреваемых таблеток, кг	0,25–0,6
Время нагрева таблеток до температуры 110 °С, с	30–50
Ток анодный, А	0,7
Ток сеточный, А	0,2–0,3
Напряжение накала генераторной лампы, В	6
КПД, %, не менее	50
Размеры рабочего конденсатора, мм	250×250
Расстояние между пластинами рабочего конденсатора, мм	20–50
Масса, кг	310

Генератор ламповый 1 предназначен для преобразования постоянного высоковольтного (анодного) напряжения в напряжение высокой частоты.

Камера 2 представляет собой замкнутую конструкцию, внутри которой размещается рабочий конденсатор и другие элементы. Внутри верхней пластины рабочего конденсатора в целях предотвращения конденсации паров размещены нагреватели, поддерживающие температуру пластины в пределах 85–95 °С. Камера одновременно выполняет функцию экрана, защищающего персонал от высокочастотных электромагнитных излучений.

Принципиальная электрическая схема установки (рис. 9.2) включает: силовой блок, блок управления, выпрямитель, генераторный блок, систему стабилизации анодного тока, систему защиты, систему сигнализации.

Силовой блок состоит из автоматического выключателя QF1, рубильника QS, анодного трансформатора TV1. Блок управления содержит аппаратуру управления подогревом верхней пластины конденсатора, вентилятором, охлаждением генераторной лампы VL, накалом лампы, включения и отключения питания лампы, реле времени автоматического отключения нагрева и др.

Выпрямитель UZ собран из полупроводниковых силовых диодов по трехфазной двухполупериодной схеме. Он преобразует высокое напряжение анодного трансформатора в постоянное анодное напряжение, подаваемое на генераторную лампу. При помощи переключки напряжение можно изменять от 100 до 50 %.

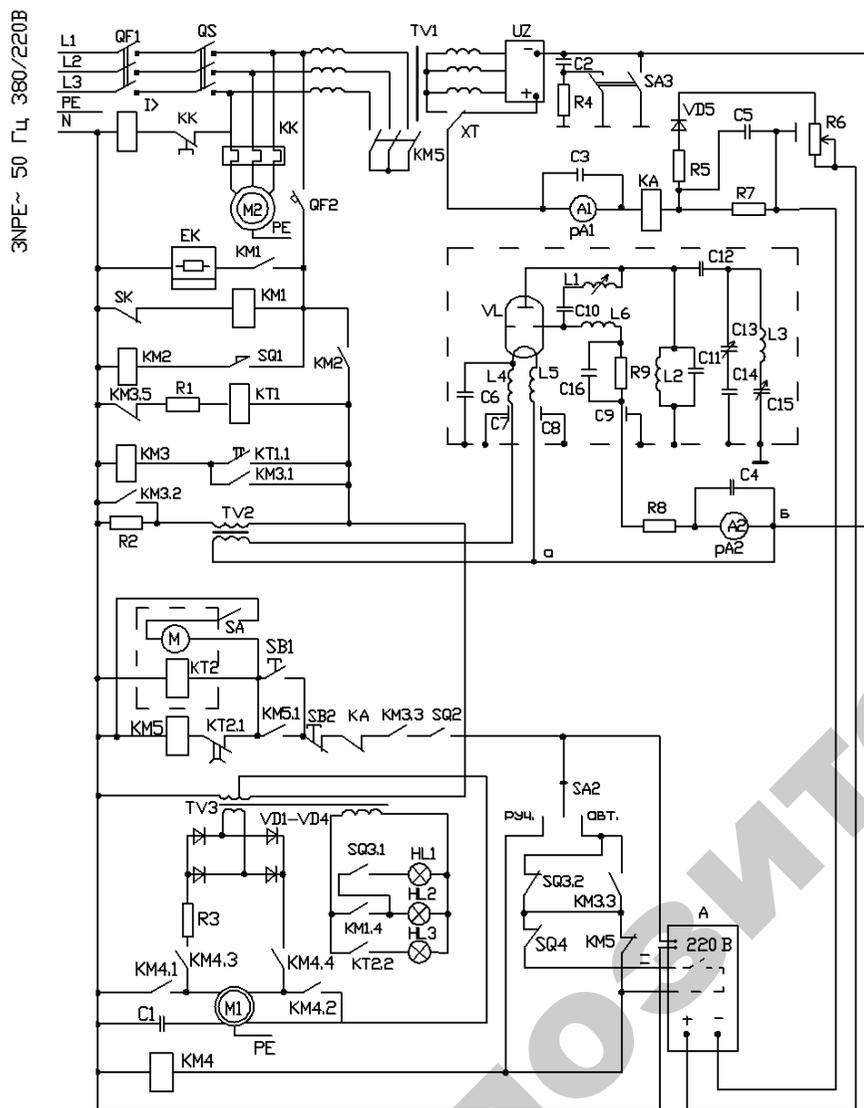


Рис. 9.2. Принципиальная электрическая схема установки ВЧД2-2.5/81

Ламповый генератор состоит из лампы VL, анодного колебательного контура C11, L2, нагрузочного контура C15, L3, сеточного контура C10, L1, фильтров, разделительного конденсатора C12, конденсаторов C13, C14 и является генератором с общим анодом. Подробнее работа генератора описана ниже. Анодный ток измеряется амперметром pA1, сеточный ток – миллиамперметром pA2.

Система стабилизации анодного тока включает конденсатор C13 с электроприводом (электродвигатель M1) и элементами его управления. В процессе нагрева анодный ток возрастает. Система позволяет стабилизировать ток, тем самым повышая эффективность работы установки.

Система защиты включает следующие ее виды: от длительной перегрузки и короткого замыкания (автоматические выключатели QF1, QF2) (см. рис. 9.1 поз. 9, 16); от перегрузки анодного тока (реле KA), от перегрузки электродвигателя M2 (тепловые реле KK), от повышения анодного напряжения в момент включения (фильтр C2, R4). Для защиты персонала от попадания под напряжение служит блокировка, осуществляемая с помощью выключателя SA3, который при открывании дверей отключает напряжение, а остаточное напряжение на конденсаторах замыкает на землю.

Система сигнализации включает:

- сигнальную лампу HL2 «Накал», которая загорается при включении накала генераторной лампы;
- сигнальную лампу HL1 «Готов к нагреву», которая загорается, когда конденсатор C13 занимает исходное положение;
- сигнальную лампу HL3 «Нагрев», которая загорается при включении нагрева.

Ламповый генератор является преобразователем электрической энергии сетевых параметров (220/380 В, 50 Гц) в энергию высокой частоты и высокого напряжения, на которые рассчитан рабочий конденсатор. С помощью ламповых генераторов получают частоты до 100 МГц, единичная их мощность может составлять от сотен ватт до сотен киловатт. Генераторы для высокочастотного нагрева выпускают одно- или двухконтурными и, как правило, с самовозбуждением (автогенераторы).

Рассмотрим принцип возникновения и поддержания колебаний в нагрузочном колебательном контуре установки, элементом которого является рабочий конденсатор C15 (рис. 9.3), где воспроизведен генераторный блок со схемы (рис. 9.2).

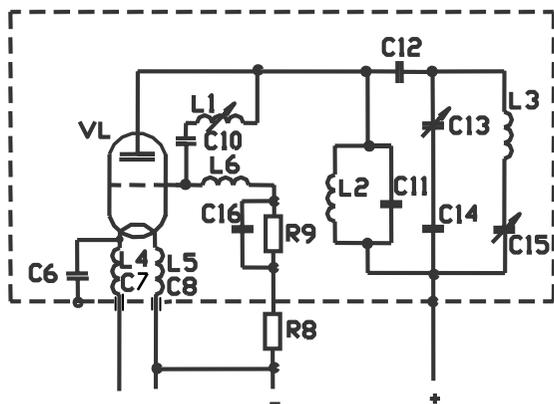


Рис. 9.3. Принципиальная электрическая схема генераторного блока установки ВЧД2-2.5/81

Генераторная лампа VL служит нагрузкой источника питания выпрямителя UZ и, в свою очередь, источником питания анодного колебательного контура C11, L2, подпитывая его импульсами энергии с частотой, равной собственной частоте контура. Энергия, поступающая в анодный колебательный контур, преобразуется в синусоидальные колебания. Собственная, или резонансная частота колебательного контура, при пренебрежении его активным сопротивлением определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (9.2)$$

Упрощенно рассмотрим процесс возникновения и поддержания незатухающих колебаний в анодном контуре C11, L2. Нагрузочный контур L3-C15 связан с анодным через конденсатор C12 (емкостная связь). Благодаря этой связи колебания, возбуждаемые в анодном контуре, передаются нагрузочному контуру с той же частотой (собственные частоты обоих контуров равны).

При включении питания постоянный ток от «плюса» выпрямителя UZ (рис. 9.2) протекает по цепи: амперметр A1 – реле KA – резистор R7 – корпус – индуктивность L2 анодного колебательного контура – анод VL – катод VL – индуктивность L5 в цепи катода – точка «а» – точка «б» – «минус» выпрямителя. При этом в анодном контуре возникают слабые колебания собственной частоты, которые

всегда имеют место в переходные режимы во всяком контуре в результате электрических флуктуаций. Эти колебания воспринимаются устройством обратной сеточной связи в виде сеточного колебательного контура C10, L1, включенного между анодом и сеткой. Сеточный контур имеет собственную частоту, равную частоте анодного контура, и с этой частотой воздействует на сеточную цепь. Колебания анодного и сеточного контуров совпадают по фазам – в этом условии функционирования положительной обратной связи, обеспечивающей нарастание и затем (после наступления установившегося режима) поддержание незатухающих колебаний в анодном контуре. Одновременно с переменным потенциалом от сеточного контура на сетку подается постоянное отрицательное смещение, создаваемое постоянной составляющей сеточного тока на сопротивлении гриддики R9. Постоянная составляющая сеточного тока протекает по цепи: сетка – катод – точка «а» – точка «б» – миллиамперметр A2 – сопротивление гриддики R9 – индуктивность L6 – сетка. Сопротивление гриддики R9 создает отрицательный потенциал на сетке генераторной лампы. Переменная (высокочастотная) составляющая сеточного тока протекает по цепи: сетка – катод – конденсатор C6 – корпус – анодный контур C11, L2 – сеточный контур C10, L1 – сетка. Результирующий потенциал сетки имеет форму периодических импульсов с частотой  $\omega_0$ .

Чтобы электрические колебания в колебательном контуре были незатухающими, необходимо в течение каждого периода вводить в контур столько энергии, сколько теряется на его активном сопротивлении R за время одного периода колебаний. Эта энергия вводится от источника питания UZ каждый раз, когда лампа отпирается, т. е. когда потенциал на управляющей сетке становится меньше запирающего потенциала. Открытие лампы происходит в течение некоторой доли каждого периода, определяемой «углом отсечки» (70–80°), поэтому ток через лампу протекает в виде кратковременных импульсов с частотой следования  $\omega_0$ . Разложив функцию анодного тока в ряд Фурье, получим постоянную составляющую, замыкающуюся через лампу на источник питания UZ по цепи, приведенной выше, и переменную (высокочастотную) составляющую (первую гармонику ряда, представляющую собой собственную частоту контура, остальные гармоники отфильтровываются контуром). Высокочастотная составляющая анодного тока замыкается на лампу и колебательные контуры, протекая по цепи: анод – катод – конденсатор C6 – корпус – анодный и нагрузочный контуры – анод.

Процесс колебаний в анодном контуре протекает следующим образом. Импульсы анодного тока заряжают конденсатор С11, который (после прекращения импульса анодного тока) начинает разряжаться через катушку индуктивности L2. Ток разряда конденсатора, протекая через катушку L2, создает магнитное поле, энергия которого достигает максимума в момент времени, когда ток через катушку достигает наибольшего значения  $I_m$ :

$$W_L = \frac{1}{2} L I_m^2. \quad (9.3)$$

Напряжение на конденсаторе С11 при этом уменьшается до нуля, поэтому ток катушки L2 начинает уменьшаться, а магнитное поле, убывая по величине, вызывает ЭДС самоиндукции:

$$e_L = L \frac{di}{d\tau}, \quad (9.4)$$

которая стремится сохранить ток неизменным. ЭДС самоиндукции заряжает конденсатор С11 до напряжения  $U_m$ , при котором энергия электрического поля конденсатора будет равна

$$W_C = \frac{1}{2} C U_m^2. \quad (9.5)$$

Таким образом, между катушкой L2 и конденсатором С11 происходит колебательный обмен энергией. С момента включения генератора под напряжение амплитуда колебаний, быстро нарастая, достигает установившегося значения, определяемого кривой насыщения анодно-сеточной характеристики лампы. Одновременно с анодным контуром через емкостную связь С12 возбуждаются и поддерживаются незатухающие колебания и в нагрузочном контуре.

Для подготовки установки к включению следует убедиться в наличии защитных экранов генераторного блока, исправности блокировочных устройств. Подачу напряжения на схему управления осуществляют включением автоматического выключателя QF1 при включенном блокировочном рубильнике QS. Одновременно запитывается электрический двигатель М2 привода вентилятора охлаждения.

При включении автоматического выключателя QF2 срабатывает электромагнитный пускатель КМ1 и включает нагреватели ЕК

подогрева верхней пластины рабочего конденсатора. При наличии воздушного потока, создаваемого вентилятором, замыкается контакт реле потока SQ1, срабатывает пускатель КМ2 и через резистор R2 от трансформатора TV2 на лампу подается напряжение 1-й ступени накала катода. Одновременно получают питание реле времени КТ1 и трансформатор TV3. Примерно через 30 с с помощью контакта реле времени КТ1.1 включается пускатель КМ3, контактом КМ3.2 шунтирует пусковой резистор R2 и на лампу VL подается 2-я ступень накала, загорается лампа HL2 «Накал». Для включения нагрева нажимают кнопку SB1 (см. рис. 9.1, поз.10), при этом пускатель КМ5 получает питание и замыкает силовые контакты КМ5, включая анодный трансформатор, загорается сигнальная лампа HL3 «Нагрев» (см. рис. 9.1, поз. 7).

Конденсатор С13 (с приводом от электрического двигателя М1) служит для стабилизации анодного тока, который изменяется в течение цикла нагрева. В исходном положении С13 имеет максимальную емкость, и при этом микровыключатель SQ3 зажат (контакт SQ3.1 закрыт, SQ3.2 открыт). При превышении анодного тока выше заданного резистором R6 срабатывает блок сигнализации и регулирования А, который замыкает свой замыкающий контакт, срабатывает пускатель КМ4 и включает электродвигатель М1, который поворачивает конденсатор. Анодный ток при этом уменьшается, контакт блока А размыкается, КМ4 обесточивается, двигатель М1 останавливается и так несколько раз за цикл. Во время остановки автоматически включается динамическое торможение (от выпрямителя VD1–VD4 через контакты КМ4). Поскольку ток динамического торможения на период остановки не отключается, происходит фиксация электродвигателя в остановленном положении. При повороте конденсатора на 180° срабатывает микропереключатель SQ4, и процесс стабилизации прекращается. После выключения нагрева конденсатор возвращается в исходное состояние. При этом размыкается контакт SQ3.2, замыкается SQ3.1 и загорается лампа HL1 «Готов к нагреву».

Устройство А представляет собой двухпозиционный регулятор, питающийся от сети 220 В. На вход его подается напряжение (около 15 В), снимаемое с резистора R7, через который протекает анодный ток.

При работе в автоматическом режиме включают тумблер SA1, подающий питание на реле времени КТ2. По окончании выдержки времени реле КТ2 разрывает цепь питания катушки магнитного пускателя КМ5 и нагрев прекращается.

Режим стабилизации анодного тока (ручной или автоматический) задают переключателем SA2. Реле КА служит для защиты от перегрузки анодной цепи.

### Методика выполнения работы

1. Пункты 1 и 2 задач работы (см. с. 93) выполняют при подготовке к лабораторной работе, используя рекомендованную литературу, настоящие методические указания, конспект лекций.

2. После проверки руководителем занятий знания устройства, принципа действия и правил обслуживания с его разрешения включить установку под напряжение, прогреть на холостом ходу в течение не менее 5 минут и выключить.

3. Работу установки изучают на примере нагрева деревянных брусков с целью их сушки. Для этого необходимо:

- бруски предварительно увлажнить, лишнюю влагу снять;
- измерить путем взвешивания начальную массу образца  $m_1$  и с помощью потенциометра определить его температуру  $t_1$ ;
- поместить образец в рабочий конденсатор, закрыть камеру, поставить переключатель SA2 в положение «Авт.» и кнопкой SB1 «Нагрев» подать напряжение на генератор.

4. В процессе нагрева (сушки) через каждые 20 с, начиная с момента включения, измерять и заносить в табл. 9.1 указанные в ней величины. Нагрев производить в течение 4–5 минут. После окончания нагрева, не извлекая образец из камеры, измерить температуру  $t_2$  внутри образца и на его поверхности  $t_{2n}$ , а также температуру  $t_k$  нижней пластины конденсатора. Извлечь образец, взвесить его и данные записать в табл. 9.2.

Таблица 9.1

Нагрев образца №1 со стабилизацией анодного тока

$\tau$ , с	10	20	40	60	...
$U$ , В					
$I$ , А					
$P_{\text{потр}}$ , Вт					
$I_a$ , А					

В табл. 9.1:  $\tau$  – время от начала опыта, с;  $U$  – напряжение питания, В;  $I$  – ток, А;  $P_{\text{потр}}$  – мощность, потребляемая из сети, Вт;  $I_a$  – анодный ток, А.

Повторить опыт с образцом №2 в режиме нагрева без стабилизации анодного тока. Результаты представить в виде табл. 9.3 и 9.4, аналогичных табл. 9.1 и 9.2.

Таблица 9.2

Результаты измерений и вычислений (образец №1)

Измерено							Вычислено									
$\tau$ , с	$m_1$ , кг	$m_2$ , кг	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$t_{2n}$ , °С	$t_k$ , °С	$\Delta\omega$ , кг	$P_{\text{пол}}$ , Вт	$P_{\text{потр}}$ , Вт	$I$ , А	$\eta$	$\cos\varphi$	$\eta_T$	$P_V$ , Вт/м <sup>3</sup>	$E_M$ , В/м	$a$ , кВтч/кг

В табл. 9.2:  $\tau$  – продолжительность нагрева (сушки), с;  $m_1$  и  $m_2$  – масса влажного и высушенного образцов, кг;  $t_1$  и  $t_2$  – начальная и конечная температуры образца, °С;  $t_{2n}$  – температура поверхности образца в конце нагрева, °С;  $t_k$  – температура нижней пластины конденсатора, °С;  $\Delta\omega$  – количество удаленной влаги, кг;  $P_{\text{пол}}$  – полезная мощность, израсходованная на нагрев образца и испарение влаги, Вт;  $P_{\text{потр}}$ ,  $I$  – средние за период нагрева значения потребляемой мощности и тока, Вт, А;  $\eta$ ,  $\cos\varphi$  – полный КПД и коэффициент мощности установки;  $\eta_T$  – тепловой КПД рабочего конденсатора;  $P_V$  – удельная объемная мощность, выделяемая в древесине, Вт/м<sup>3</sup>;  $E_M$  – напряженность электрического поля в древесине, В/м;  $a$  – удельный расход электроэнергии на испарение влаги, кВт·ч/кг.

Средние за период нагрева значения потребляемой мощности и тока вычисляют по формулам

$$P_{\text{потр}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P_{\text{потр}}(\tau) d\tau, \quad (9.6)$$

$$I = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} I(\tau) d\tau \quad (9.7)$$

или определяют путем графического интегрирования кривых  $P_{\text{потр}}(\tau)$ ,  $I(\tau)$ ,  $\eta$ .

Количество удаленной влаги:

$$\Delta\omega = m_1 - m_2. \quad (9.8)$$

Полезная мощность на нагрев образца и испарение влаги:

$$P_{\text{пол}} = \frac{\Delta\omega \left[ C_{\text{в}} (t_2 - t_1) + q \right] + m_2 C_{\text{д}} (t_2 - t_1)}{\tau}, \quad (9.9)$$

где  $C_{\text{в}} = 4190 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$  – удельная теплоемкость воды;  $C_{\text{д}} = 1760 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$  – удельная теплоемкость в древесины;  $q$  – удельная теплота испарения воды ( $2,96 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$ ).

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{потр}}}, \quad (9.10),$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{пол}}}{UI}, \quad (9.11),$$

$$\eta_{\Gamma} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{V}}V}, \quad (9.12)$$

где  $V$  – объем образца,  $\text{м}^3$ ;  $P_{\text{V}}$  – вычисляются по формуле (9.1), приняв для древесины следующие средние за время нагрева значения:  $\varepsilon \approx 2$ ;  $\text{tg} \delta \approx 0,08$ .

Напряженность поля в древесине приближенно равна

$$E_{\text{M}} = \frac{U}{d_{\text{M}} + \varepsilon d_{\text{B}}}, \quad (9.13)$$

где  $U$  – напряжение, подводимое к обкладкам конденсатора (5000 В);  $d_{\text{M}} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – толщина образца древесины;  $d_{\text{B}} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – величина воздушного зазора между образцом и второй обкладкой конденсатора.

Сумма

$$d = d_{\text{M}} + d_{\text{B}} \quad (9.14)$$

представляет собой расстояние между обкладками конденсатора ( $50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ).

По результатам опытов (табл. 9.1 и 9.2) построить зависимости  $I$ ,  $P_{\text{потр}}$ ,  $I_{\text{а}}$  от  $\tau$  для образцов №1 и №2.

### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Таблицы измерений и вычислений.
3. Графические зависимости.
4. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы:

1. Физическая природа нагрева диэлектриков в высокочастотном электрическом поле.
2. Принцип работы лампового автогенератора.
3. Принципиальная электрическая схема установки ВЧД2-2,5/81.
4. Факторы, определяющие мощность, выделяющуюся в диэлектрике.
5. Особенности эксплуатации установок диэлектрического нагрева.

## 10. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХОЛОДИЛЬНИК ХАТЭ-24

**Цель работы:** изучить принцип термоэлектрического нагрева и охлаждения на примере термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24, получить основные его энергетические характеристики.

### Задачи работы:

1. Изучить физические основы термоэлектрического нагрева и охлаждения.
2. Изучить устройство и принцип действия термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24.
3. Определить энергетические характеристики холодильника при различной силе тока, проходящего через термобатарею.

### Общие сведения

Косвенное преобразование электрической энергии в тепловую (для получения холода и теплоты) осуществляют с помощью холодильных машин и тепловых насосов. Основу обоих классов машин составляют трансформаторы теплоты, которые могут быть компрессионными (механическими), адсорбционными (термохимическими) и полупроводниковыми (термоэлектрическими).

Трансформатор теплоты (ТТ) переносит энергию от среды (тепла) с более низкой температурой к потребителю теплоты с более высокой температурой. При этом температура источника теплоты понижается, а температура потребителя теплоты повышается. Трансформатор теплоты может работать как в режиме охлаждения (в качестве холодильной машины), так и в режиме нагревания (в качестве теплового насоса), а при совмещенном режиме (цикле) осуществляет одновременно охлаждение и нагревание (производство холода и теплоты). Совмещенный режим является энергетически наиболее целесообразным.

В соответствии со 2-м законом термодинамики перенос (передача) теплоты от среды с меньшей температурой к среде с более высокой температурой возможен лишь при затрате внешней энергии. Чаще всего для этого используют электрическую энергию. Перенос теплоты осуществляется с помощью промежуточных энергоносителей. В компрессионных и адсорбционных ТТ в качестве промежуточных энергоносителей используют низкотемпературные

жидкости:  $\text{NH}_2$  (температура кипения  $-33,4\text{ }^\circ\text{C}$ ), фреон-12 $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  (температура кипения  $-29,8\text{ }^\circ\text{C}$ ), фреон-22 и др.

Термоэлектрический ТТ представляет собой термоэлектрическую батарею (рис. 10.1) из последовательно соединенных термоэлементов, каждый из которых состоит из двух ветвей 1, изготовленных из полупроводниковых материалов. Одна ветвь обладает электронной ( $n$ ), а вторая дырочной ( $p$ ) проводимостью. Ветви соединены при помощи коммутационных пластин 2. Места соединения пластин называют спаями. Для повышения поверхности теплообмена с охлаждаемой и нагреваемой средами спай снабжают радиаторами 5.

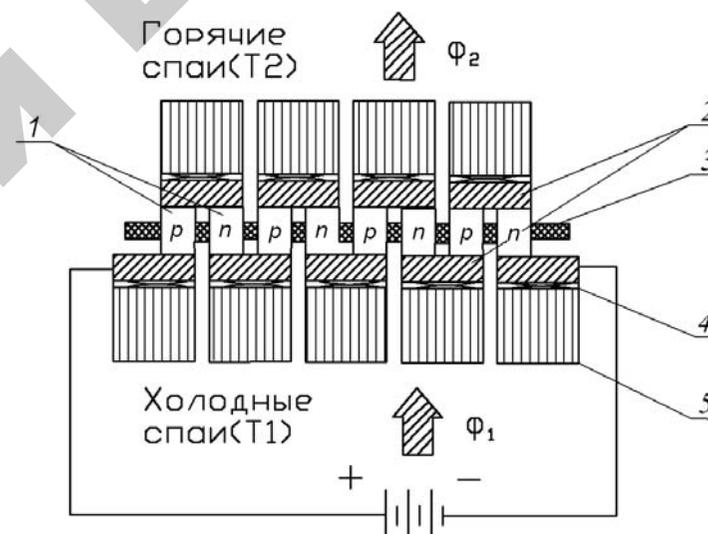


Рис. 10.1. Схема термоэлектрической батареи:

1 – ветви термоэлемента; 2 – коммутационные пластины; 3 – теплоизоляционная перегородка; 4 – электрическая изоляция; 5 – радиаторы

Принцип получения холода или теплоты с помощью термоэлементов основан на использовании эффекта Пельтье: при протекании постоянного тока  $I$  через спай разнородных (с  $n$ - и  $p$ -проводимостями) полупроводников он либо охлаждается и поглощает теплоту (теплоту Пельтье) из окружающей (или охлаждаемой) среды, либо нагревается и выделяет в окружающую (нагреваемую) среду теплоту Пельтье  $Q_n$ :

$$Q_{\text{П}} = \Pi I \tau = (\alpha_1 - \alpha_2) T I \tau, \quad (10.1)$$

где  $\Pi = (\alpha_1 - \alpha_2) T$  – коэффициент Пельтье, В;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты термоЭДС ветвей термоэлемента, В/К;  $T$  – температура спая, К;  $\tau$  – время протекания тока, с.

В основе физической природы теплоты Пельтье лежит возникновение в месте контакта разнородных полупроводников контактной разности потенциалов  $\Delta\phi_i$ , направленной так, что при движении электронов от  $n$ -полупроводника к  $p$ -полупроводнику скорость их и, следовательно, энергия снижаются – спай (контакт) охлаждается (холодный спай). При обратном направлении скорость движения электронов под действием  $\Delta\phi_i$  возрастает, энергия повышается – спай нагревается (горячий спай).

Поместив холодные спаи в холодильную камеру, а горячие спаи в нагреваемую (например, окружающую) среду, получим термоэлектрический холодильник. Если холодные спаи поместить в среду – источник теплоты (охлаждаемое молоко, почву, воду, поток дымовых газов и т. п.), то поглощаемая ими теплота будет переноситься током к горячим спаям и выделяться ими. Эту теплоту можно использовать для нагрева воды, отопления помещений и т. д. В этом случае термоэлектрический трансформатор теплоты работает как тепловой насос, «перекачивающий» теплоту от одной среды в другую.

При протекании тока по цепи термоэлемента сопротивлением  $R$  оба спая неизбежно нагреваются за счет выделения теплоты Джоуля:

$$Q_{\text{Д}} = I^2 R \tau. \quad (10.2)$$

Физическая природа теплоты Пельтье и Джоуля различна, различна и их зависимость от тока: теплота Джоуля пропорциональна току во 2-й степени (формула (10.2)), а теплота Пельтье – току в 1-й степени (формула (10.1)).

Построив на одном графике зависимости  $Q_{\text{П}} = f(I)$  и  $Q_{\text{Д}} = f(I)$ , алгебраически сложив координаты, получим результирующую кривую  $Q_{\text{рез}} = \Psi(I)$  (рис. 10.2), которая характеризует тепловой баланс холодного спая при различных значениях тока  $I$ . Из рис. 10.2 видно, что максимальное понижение температуры холодного спая имеет место при определенном значении тока. Дальнейшее увеличение тока приводит к превалированию теплоты Джоуля над теплотой Пельтье, в результате чего температура холодного спая начинает повышаться.

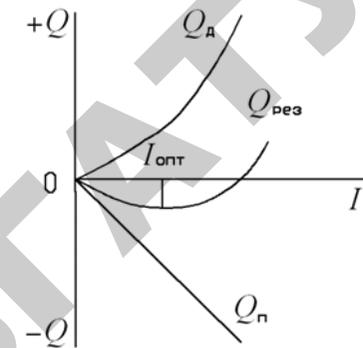


Рис. 10.2. Зависимость теплоты Пельтье ( $Q_{\text{П}}$ ), теплоты Джоуля ( $Q_{\text{Д}}$ ) и результирующего значения ( $Q_{\text{рез}}$ ) от величины тока в термоэлементах

Энергетическую эффективность трансформаторов теплоты характеризуют энергетическими параметрами, зависящими от режимов их работы (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Режимы работы и соответствующие им энергетические параметры трансформаторов теплоты

Режим работы	Оборудование	Энергетические параметры, характеризующие работу трансформатора теплоты
Охлаждение (получение холода)	Холодильные машины (холодильники)	Холодильный коэффициент: $\varepsilon = \frac{Q_x}{W}, \quad (10.3)$ <p>где <math>Q_x</math> – количество теплоты, отбираемое от охлаждаемой среды за один цикл работы; <math>W</math> – энергия, затраченная трансформатором теплоты за один цикл работы</p>
Нагрев (получение теплоты)	Тепловые насосы	Глубина охлаждения среды: $\Delta t = t_1 - t_2 \quad (10.4)$

Окончание табл. 10.1

Режим работы	Оборудование	Энергетические параметры, характеризующие работу трансформатора теплоты
Охлаждение и нагрев (получение холода и теплоты)	Тепловые насосы, работающие по совмещенному циклу	<p>Отопительный коэффициент:</p> $\varphi = \frac{Q_x + W}{W} = 1 + \varepsilon \quad (10.5)$ <p>Коэффициент преобразования энергии:</p> $\psi = \varepsilon + \varphi = 1 + 2\varepsilon \quad (10.6)$

*Примечание.* Значение  $\varepsilon$  находится в пределах 2,5–3, а  $\psi = 3$ –4 и более в зависимости от вида ТТ и режимов работы.

Настоящая работа посвящена изучению и исследованию автомобильного термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24, предназначенного для кратковременного хранения пищевых продуктов и напитков.

Холодильник состоит из корпуса 1 (рис. 10.3), съемной крышки 2, холодильной камеры 3, четырех термоагрегатов 4, вентилятора 5, электропроводки 6.

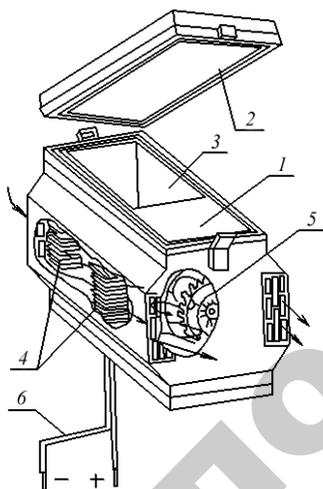


Рис. 10.3. Термоэлектрический холодильник ХАТЭ-24:  
1 – корпус; 2 – съемная крышка; 3 – холодильная камера;  
4 – термоагрегаты; 5 – вентилятор; 6 – электропроводка

Холодильная камера 3 представляет собой емкость для хранения продуктов, выполненную из алюминия. К двум противоположным стенкам камеры попарно крепятся термоагрегаты 4, соединенные между собой последовательно (рис. 10.4). Каждый термоагрегат представляет собой блок термоэлектрической батареи. Холодные спаи каждого термоблока прижаты к холодильной камере, охлаждающие ее. Горячие спаи термоблоков снабжены радиаторами – теплообменниками, предназначенными для отвода теплоты. Радиаторы охлаждаются воздухом, протягиваемым вентилятором 5. Электрическая схема холодильника приведена на рис. 10.4.

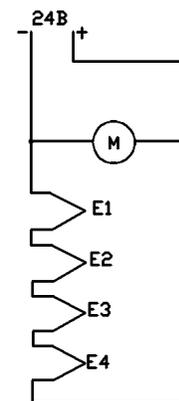


Рис. 10.4. Электрическая принципиальная схема термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24:  
М – электродвигатель; E1–E4 – термобатареи

Технические характеристики термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24:

Напряжение питания, В	24
Род тока	постоянный
Потребляемая мощность, Вт, не более	170
Перепад температур воздуха при окружающей температуре +30 °С, °С, не менее	28
Время выхода на перепад температур 25°С при окружающей температуре не менее 30°С, ч, не более	1
Внутренний объем холодильника, дм <sup>3</sup>	7
Масса, кг	15

## Методика выполнения работы

1. Изучить основы термоэлектрического преобразования энергии, используя рекомендованную литературу, конспект лекций, настоящие методические указания.

2. Изучить устройство термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24 на натуральном образце, нарисовать его эскиз и принципиальную электрическую схему.

3. Охладить алюминиевое тело, помещенное в камеру (рис. 10.5), при различной величине тока, протекающего через термобатарею. Работу произвести в следующей последовательности.

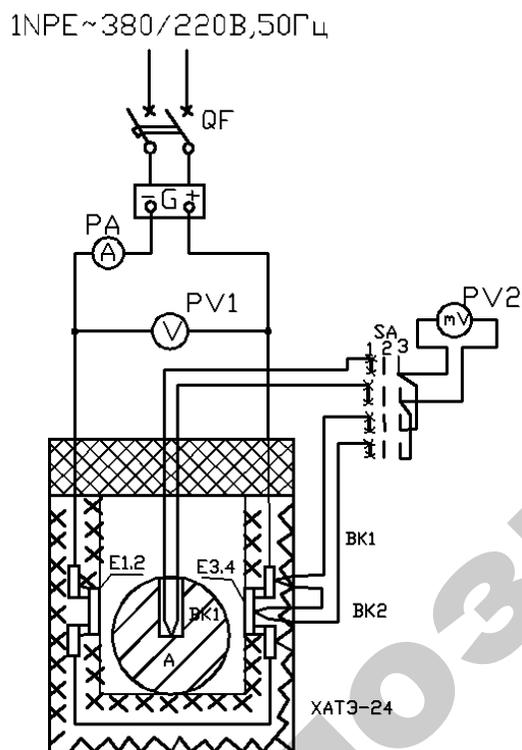


Рис. 10.5. Схема экспериментальной установки:  
 ХАТЭ-24 – холодильник; А – охлаждаемое тело;  
 E1, E2, E3, E4 – термобатареи; BK1, BK2 – термодатчики;  
 G – источник питания; SA – переключатель термодатчиков

3.1. Не включая холодильник, измерить температуру охлаждаемого тела  $t_1$  и разность температур горячих и холодных спаев  $\Delta t$  в начале опытов (при  $\tau = 0$ ).

3.2. Включить холодильник, установить ток  $I = 3$  А и через каждые 3 минуты в течение 15 минут охлаждения измерять и заносить в табл. 10.2 значения температуры охлаждаемого тела  $t_2$  и разности температур горячих и холодных спаев  $\Delta t$ .

Таблица 10.2

Результаты измерений и вычислений

Измерено					Вычислено				
$U$ , В	$I$ , А	$\tau$ , мин	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$\Delta t$ , °С	$W$ , Дж	$Q_x$ , Дж	$\varepsilon$ , о.е.	

3.3. Увеличить ток до 4 А, через 3 минуты (через 18 минут от начала охлаждения) записать значения  $t_2$  и  $\Delta t$  и так продолжать до 30 минут от начала процесса.

3.4. Следующий цикл измерений (от 31 до 45 минут) продолжать при токе 5 А, а затем заключительный цикл (от 46 до 60 минут) – при токе 6 А.

Энергия  $W$  (Дж), потребляемая холодильником для охлаждения содержимого камеры:

$$W = UI\tau, \quad (10.7)$$

где  $U$ ,  $I$ ,  $\tau$  – напряжение, ток и время каждого ( $i$ -го) опыта при токе соответственно 3, 4, 5 и 6 А.

Количество теплоты  $Q_x$  (Дж), уносимое из камеры в каждом опыте:

$$Q_x = mc(t_1 - t_2)_i, \quad (10.8)$$

где  $m = 1,5$  кг – масса охлаждаемого тела;  $c = 880$  Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость алюминия;  $t_1$ ,  $t_2$  – начальная и конечная температуры охлаждаемого тела в начале и конце  $i$ -го опыта, °С.

Холодильный коэффициент приближенно равен

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{W}.$$

## 11. ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

**Цель работы:** изучить устройство и работу генераторов импульсов, определить основные параметры импульсов.

### Задачи работы:

1. Изучить назначение, устройство, принципиальные электрические схемы генераторов импульсов ИЭ-200, ГИЭ-1, «Импульс», ИЭ-4.
2. Определить электрические и энергетические параметры импульсов, освоить способы регулирования частоты, силы импульсов генераторов ИЭ-200, «Импульс».
3. Опробовать работу генераторов ГИЭ-1, ИЭ-4 в автоматическом режиме.

### Общие сведения

Генераторы импульсов (ГИ) служат для создания импульсов электрической энергии требуемых параметров.

В сельскохозяйственном производстве ГИ применяют в электрических изгородях, установках электрогидравлической, электроэрозионной обработки материалов и т. д. В настоящей работе изучают генераторы импульсов электрических изгородей, применяемых для загона и пастбы скота, ограждения летних лагерей для животных, выгульных площадок, прогонов, посевов и т. п.

Наиболее распространены независимые (релаксационные) генераторы импульсов типа RC (рис. 11.1).

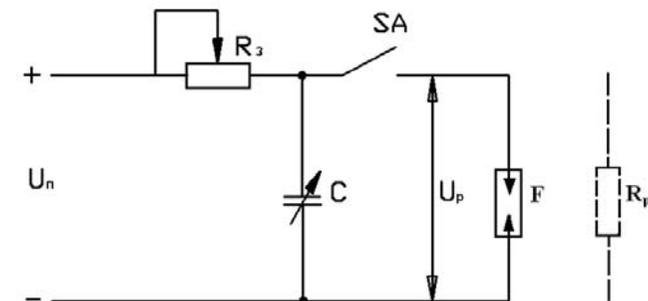


Рис. 11.1. Принципиальная схема простейшего релаксационного генератора импульсов RC:

$R_z$  – сопротивление зарядной цепи;  $C$  – конденсатор;  $F$  – разрядник;  $R_p$  – сопротивление разрядной цепи;  $SA$  – коммутирующее устройство

По результатам измерений и вычислений построить кривые охлаждения  $t = f(\tau)$  для каждого значения тока  $I$ . Определить постоянную времени охлаждения  $\tau_{\text{охл}}$  и установившуюся температуру охлаждения  $t_{\text{уст}}$ , используя графики 1-го ( $I = 3 \text{ A}$ ) и 3-го ( $I = 5 \text{ A}$ ) опытов. Способ определения этих параметров показан на рис. 10.6.

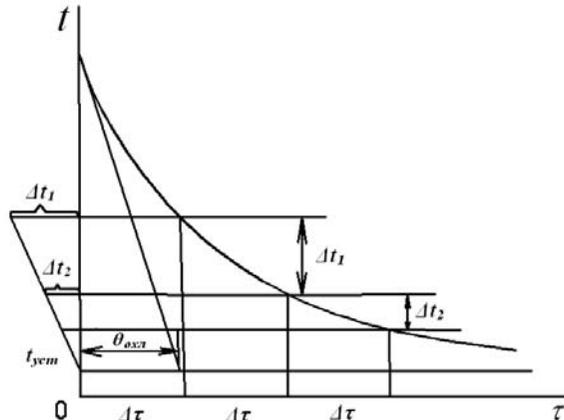


Рис. 10.6. Графическое определение установившейся температуры охлаждения  $t_{\text{уст}}$  и постоянной охлаждения  $\theta_{\text{охл}}$

### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Принципиальная схема термоэлектрической батареи.
3. Таблица измерений и вычислений.
4. Графические зависимости, построенные по результатам опытов.
5. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы:

1. Физическая природа теплоты Пельтье и ее зависимость от силы тока.
2. Устройство, электрическая схема и принцип действия термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24.
3. Энергетические параметры трансформатора теплоты в режиме холодильной машины, теплового насоса, в совмещенном цикле.
4. Экспериментальное определение энергетических параметров трансформатора теплоты.
5. Графическое определение установившейся температуры и постоянной времени охлаждения термоэлектрического холодильника.

Питание генератора осуществляют от источника постоянного тока. В конденсаторе  $C$  происходит периодическое накопление электрического заряда с последующим разрядом на сопротивление  $R_p$  при срабатывании коммутирующего устройства SA (рис. 11.2).

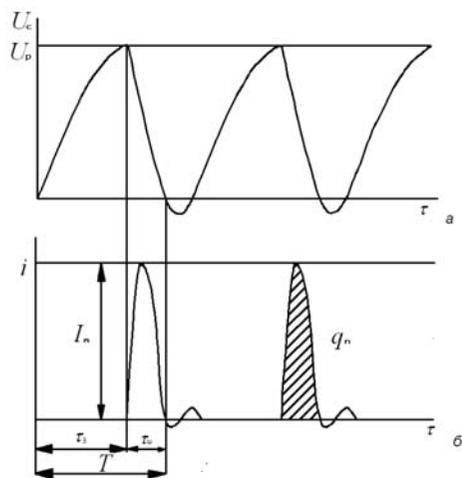


Рис. 11.2. Графики изменения напряжения на конденсаторе (а) и импульсов тока в разрядной цепи (б)

Основными параметрами ГИ и импульсов являются:

$W$  – энергия импульса, Дж:

$$W = \frac{1}{2} C U_p^2, \quad (11.1)$$

где  $C$  – емкость конденсатора, Ф;  $U_p$  – напряжение разряда, В;

$q_n$  – количество электричества в импульсе (сила импульса), Кл:

$$q_n = \int_0^{\tau_n} i(\tau) d\tau, \quad (11.2)$$

где  $i(\tau)$  – изменение тока импульса во времени;  $\tau_n$  – продолжительность импульса, с;

$I_m$  – амплитудное значение тока разряда, А:

$$I_m = \frac{U_p}{R_p}, \quad (11.3)$$

где  $R_p$  – сопротивление разрядной цепи, Ом;

$f$  – частота следования импульсов, Гц:

$$f = \frac{1}{\tau_3 + \tau_n} \approx \frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{RC \ln \frac{U_H}{U_H - U_p}}, \quad (11.4)$$

где  $\tau_3$  – время зарядки конденсатора, с;  $R$  – сопротивление зарядной цепи, Ом;  $U_H$  – напряжение источника питания, В;

$T$  – период колебаний, с:

$$T = \frac{l}{f}; \quad (11.5)$$

$S$  – скважность импульсов:

$$S = \frac{T}{\tau_n}. \quad (11.6)$$

В работе представлены генераторы импульсов ИЭ-200, ГИЭ-1, «Импульс», ИЭ-4. Принципиальная электрическая схема генератора ИЭ-200 показана на рис. 11.3. Питание генератора осуществляют либо от сети переменного тока 220 В через выпрямитель, включающий диоды VD1, VD2, сопротивления R1, R2, конденсатор C1, либо от батареи сухих элементов G1–G4 (12 В). Включение производят выключателем SA1. Генератор работает в двух режимах: автоматическом, непрерывно подавая импульсы на токоведущую линию (ТВЛ), независимо от прикосновения к ней животного, и ждущем, когда импульсы подаются только при прикосновении животного к изгороди. Режим работы задают переключателем SA3: верхнее положение – автоматический режим, нижнее – ждущий. Частоту и силу импульсов изменяют величиной емкости конденсаторов C2–C4 и резисторами R4, RP1, RP2.

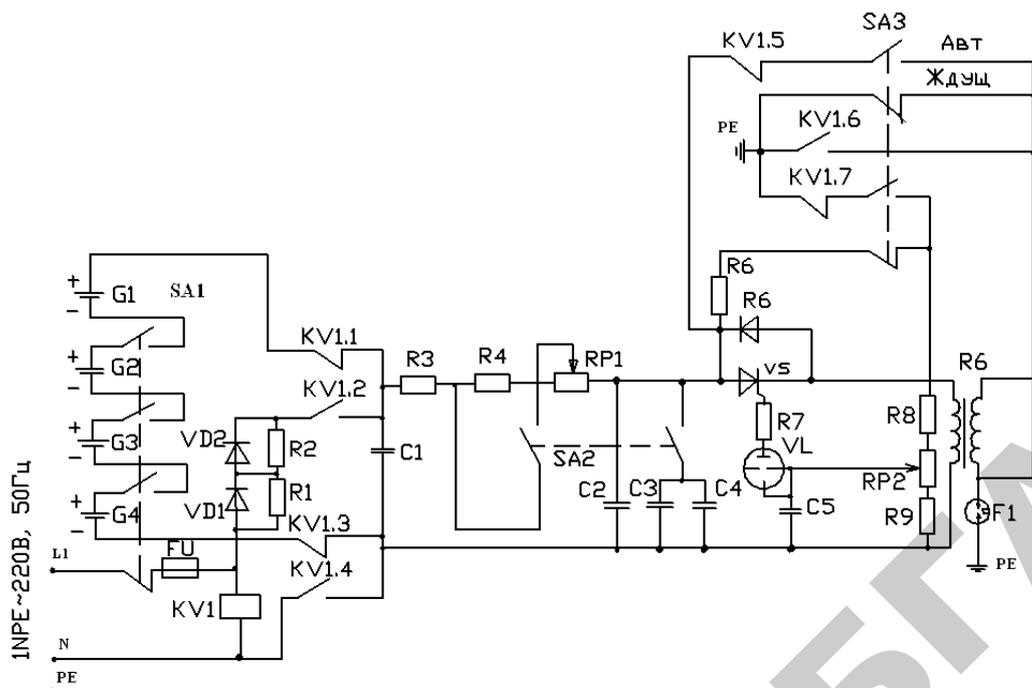


Рис. 11.3. Принципиальная электрическая схема генератора импульсов ИЭ-200

В автоматическом режиме при включении SA1 происходит зарядка конденсатора C2 (или C2, C3, C4 при включенном SA2). Одновременно напряжение от источника питания подается через резистор R6 и нижний (размыкающий) контакт SA3 на делитель напряжения на резисторах R8, RP2, R9. С делителя снимается часть напряжения для зарядки конденсатора C5. По мере зарядки C5 на нем возрастает напряжение до тех пор, пока не достигнет величины зажигания тиратрона VL. При открытии тиратрона конденсатор C5 разряжается через VL и ограничивающий резистор R7 на управляющий электрод тиристора VS, последний открывается, и конденсатор C2 разряжается через первичную обмотку повышающего трансформатора TV1, вызывая во вторичной обмотке импульс высокого напряжения. Вторичная обмотка заземлена через разрядник F1 и при прикосновении животного к проволоке ограждения оно попадает под напряжение и получает «электрический удар».

Ждущий режим включают после «привыкания» животного к изгороди, выработки у него условного рефлекса боязни изгороди. Напряжение от источника питания (только батарея сухих элементов G1–G4) подается через верхний (замыкающий) контакт SA3 на вторичную обмотку трансформатора и через нее на ТВЛ изгороди. При прикосновении животного к ТВЛ возникает ток величиной 0,1 мА, протекающий по цепи: источник питания – замыкающий контакт SA3 – вторичная обмотка трансформатора TV1 – ТВЛ – тело животного – земля – резисторы R8, RP2, R9. Конденсатор C5 заряжается, после чего образуется импульс высокого напряжения (последовательность изложена выше), поступающий в линию до тех пор, пока животное касается проволоки. Импульсы в ТВЛ появляются через 0,2 с.

Работа генератора импульсов ГИЭ-1 (рис. 11.4) основана на изменении сопротивления между ТВЛ и землей. Источником питания генератора служат батарея сухих элементов GB1–GB12, аккумуляторная батарея 12 В или сеть переменного тока 220 В, избираемых переключателем SA1. ГИЭ-1 содержит следующие блоки: блок питания A1 (батарея GB1–GB12 или трансформатор TV1 и выпрямитель UZ1); стабилизатор напряжения A2 (стабилитрон VD3, транзисторы VT2, VT4, VT5, резистор R6); преобразователь постоянного напряжения A3 (резисторы R13, R14, конденсатор C5, транзисторы VT8, VT9, трансформатор TV2, выпрямитель UZ2); емкостной накопитель энергии A4 (конденсаторы C7, C8); пороговое устройство A5 (транзисторы VT1, VT3); исполнительный элемент A6 (транзисторы VT6, VT7). Режим работы задают переключателем SA2 (верхнее положение – автоматический, нижнее – ждущий).

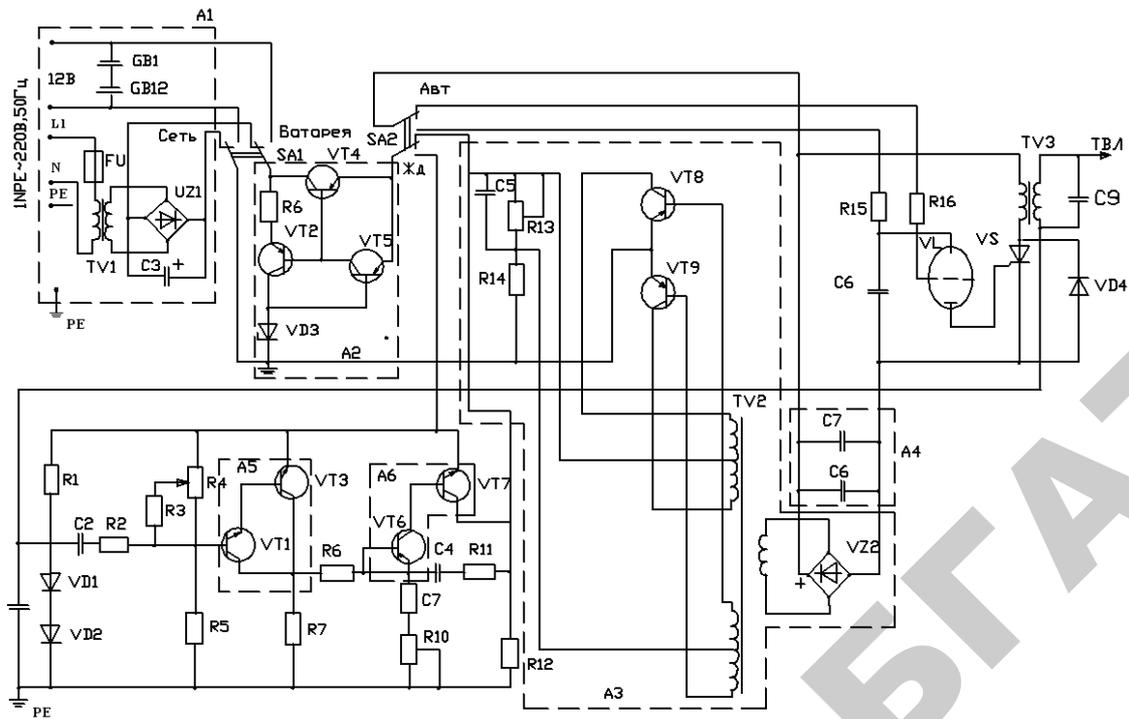


Рис. 11.4. Принципиальная электрическая схема генератора импульсов ГЭИ-1:

A1 – блок питания; A2 – стабилизатор напряжения; A3 – преобразователь постоянного напряжения;  
A4 – емкостной накопитель энергии; A5 – пороговое устройство; A6 – исполнительный элемент

В автоматическом режиме напряжение с выхода стабилизатора А2 подается в преобразователь постоянного напряжения А3 и через выпрямитель заряжается емкостной накопитель энергии А4. Одновременно происходит зарядка конденсатора С6 через резистор R16. При достижении напряжения на С6 значения напряжения открытия тиратрона VL, последний открывается, и конденсатор С6 разряжается через тиратрон VL на управляющий электрод тиристора VS. Тиристор открывается, емкостной накопитель разряжается на первичную обмотку повышающего высоковольтного трансформатора TV3, во вторичной обмотке которого возникает импульс, поступающий в ТВЛ электроизгороди (один вывод вторичной обмотки соединен с ТВЛ, другой – заземлен через цепочку стабилитронов VD1 и VD2).

В ждущем режиме с выхода стабилизатора так называемое дежурное напряжение порядка 7 В подается через резистор R1 и вторичную обмотку трансформатора TV3 на ТВЛ изгороди. При контакте животного с ТВЛ сопротивление между ТВЛ и землей резко изменяется, что приводит к появлению напряжения между ТВЛ и землей и формированию сигнала, поступающего на вход порогового устройства А5, которое усиливает поступающий сигнал и передает его на исполнительный элемент А6 (несимметричный мультивибратор). Через цепочку коллектор–эмиттер выходного транзистора VT7 подается напряжение от стабилизатора к преобразователю постоянного напряжения. Далее схема работает как в автоматическом режиме.

Конденсатор С9, включенный параллельно вторичной обмотке трансформатора TV3, служит для повышения КПД генератора импульсов. Шунтирующий диод VD4 защищает тиристор от обратного перенапряжения при переходном процессе во время разрядки накопителя. Стабилитроны VD1, VD2 защищают устройство обнаружения контакта животного с ТВЛ от попадания высоковольтного импульса. В ждущем режиме эти стабилитроны создают разрыв в цепи и не влияют на формирование сигнала, возникающего при прикосновении животного к ТВЛ. При появлении высоковольтного импульса в ТВЛ стабилитроны VD1 и VD2 проводят ток, замыкая на землю один из выводов вторичной обмотки трансформатора TV3. При этом на вход устройства обнаружения контакта животного

с ТВЛ попадает только напряжение стабилизации, возникающее на стабилитронах.

Генератор «Импульс» (рис. 11.5) включает источник питания А1, состоящий из батареи солнечных элементов типа БС-4, 5-5; блокинг-генератора А2 (транзистор VT1, трансформатор TV1), преобразующего постоянное напряжение в переменное; выпрямителя с удвоением напряжения А3 (диоды VD1, VD2, конденсаторы C2, C3), накопительного конденсатора C4, динисторов VD3, VD4, высоковольтного трансформатора TV2. Переменное напряжение, получаемое от блокинг-генератора, преобразуется в постоянное выпрямителем, от которого происходит зарядка конденсатора C4 до тех пор, пока напряжение на нем не превысит напряжение пробоя динисторов. При пробое последних, конденсатор C4 разряжается через динисторы на первичную обмотку высоковольтного трансформатора, во вторичной обмотке которого индуцируется импульс высокого напряжения, подаваемый на ТВЛ изгороди. После разрядки конденсатора динисторы восстанавливаются, начинается новый процесс зарядки C4, цикл повторяется.

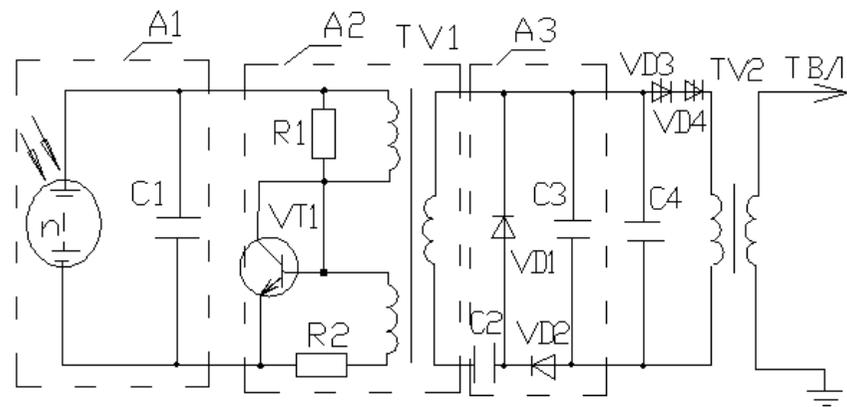


Рис. 11.5. Принципиальная электрическая схема генератора «Импульс»: А1 – источник питания; А2 – блокинг-генератор; А3 – выпрямитель с удвоением напряжения

Генератор импульсов ИЭ-4 (рис. 11.6) работает аналогично генератору «Импульс».

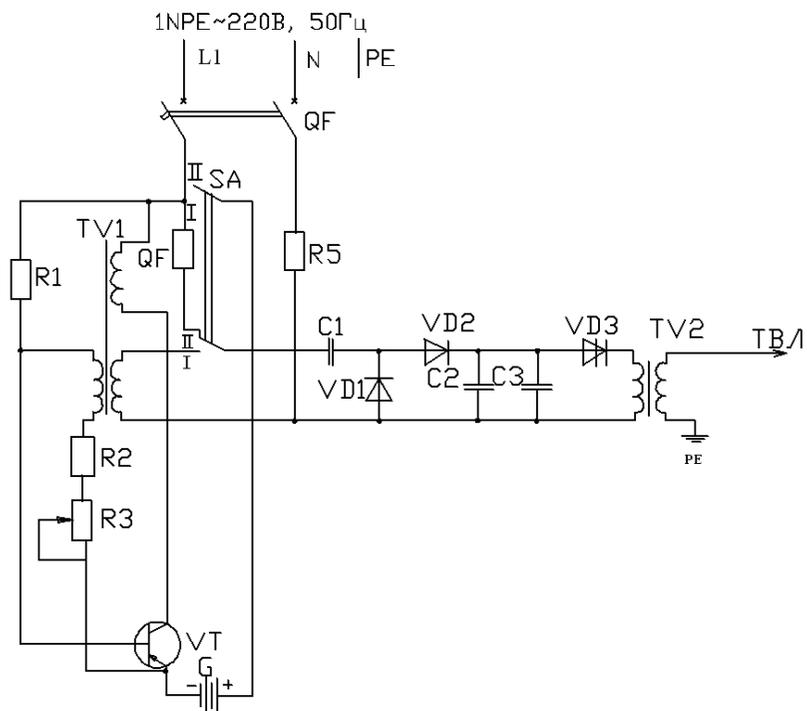


Рис. 11.6. Принципиальная электрическая схема генератора импульсов ИЭ-4

### Методика выполнения работы

1. Изучить назначение, устройство, принципиальные электрические схемы генераторов импульсов ИЭ-200, ГИЭ-1, «Импульс», ИЭ-4 по образцам, установленным в лаборатории, и рекомендуемой литературе.

Определить амплитудное значение тока  $I_m$ , количество электричества в импульсе  $q_n$ , частоту  $f$  и период  $T$  следования импульсов, скважность  $S$  для генератора ИЭ-200.

Для этого последовательно включить автоматический выключатель QF на стенде и осциллограф тумблером «Сеть» (рис. 11.7). При появлении на экране горизонтальной светящейся линии включить генератор ИЭ-200, устанавливая переключатель SA1 в положение I.

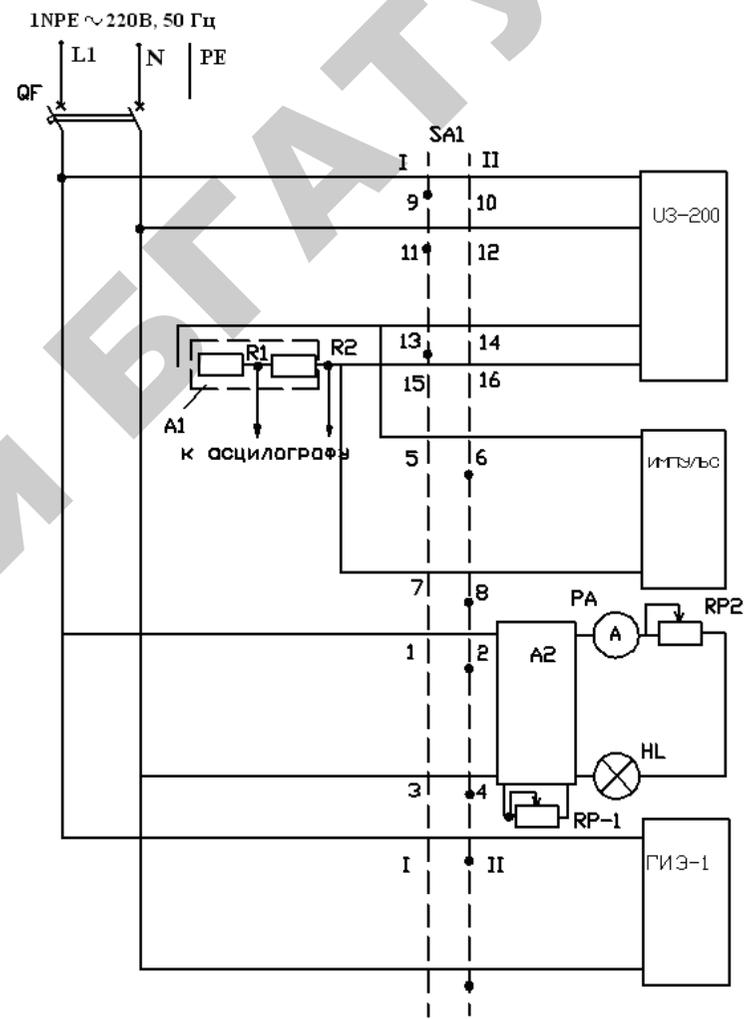


Рис. 11.7. Электрическая схема экспериментальной установки:  
A1 – делитель напряжения; A2 – тиристорный регулятор напряжения;  
RP1 – задатчик тока

Настроить генератор на работу с силой импульса «Меньше» и минимальной, а затем максимальной частотой, определяя частоту следования импульсов  $f$  при помощи осциллографа. Результаты представить в виде табл. 11.1.

Таблица 11.1

Параметры импульсов генератора ИЭ-200

Положение переключателя «Сила импульса»	Частота, Гц		Амплитудное значение тока $I_m$ , мА	Кол-во эл-ва в импульсе $q_n$ , мКл	Период колебаний, $T$ , с	Скважность импульса $S$
	$f_{\min}$	$f_{\max}$				
«Меньше»						
«Больше»						

Зарисовать с экрана осциллографа кривую импульса тока, предварительно определив масштаб изображения импульса на экране с помощью переключателей «Время» и «Напряжение». При определении масштаба напряжения учесть сопротивление делителя напряжения  $R1:R2 = 100$ , через который подключен осциллограф.

Произвести аналогичные исследования, настроив генератор на работу с силой импульса «Больше». Результаты занести в табл. 11.1.

По кривым импульса тока рассчитать параметры импульсов:

– амплитудное значение тока  $I_m$  (формула (11.3)). В расчетах принять  $R_p$  равным сопротивлению входа осциллографа, а  $U_p$  равным амплитудному значению напряжения;

– количество электричества в импульсе  $q_n$  (формула (11.2)) вычисляются графически, интегрированием площади, ограниченной кривой импульса тока и осью абсцисс (ось времени). Упрощенно можно определить по формуле

$$q_n = \frac{U_p}{R_p} \tau_n,$$

– период колебаний  $T$  (формула (11.5));

– скважность импульса  $S$  (формула (11.6)).

3. Получить зависимость частоты  $f$  следования импульсов от освещенности  $E$  приемника фотоэлектрического преобразователя генератора «Импульс», включая его в работу переключателем SA1 в положение II (рис. 11.7). Освещенность изменить задатчиком RP1, устанавливая ток 1,2–1,8 А. Результаты представить в виде табл. 11.2. Построить графическую зависимость частоты импульсов  $f$  от освещенности  $E$ .

Таблица 11.2

Зависимость частоты  $f$  следования импульсов от освещенности  $E$  генератора «Импульс»

Ток $I$ , А	1,8	1,6	1,4	1,2
Освещенность $E$ , лк	220	150	110	80
Частота импульсов $f$ , Гц				

4. Опробовать работу генераторов ГИЭ-1, ИЭ-4 в автоматическом режиме.

#### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Принципиальная электрическая схема релаксационного генератора импульсов РС.
3. Таблица результатов исследований.
4. Рассчитанные параметры генератора ИЭ-200.
5. Графическая зависимость частоты импульса  $f$  от освещенности  $E$ .
6. Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы:

1. Назначение, устройство, области применения ГИ в сельскохозяйственном производстве.
2. Работа простейшего релаксационного генератора импульсов типа РС.
3. Принципиальные электрические схемы генераторов импульсов ИЭ-200, ГИЭ-1, «Импульс», ИЭ-4.
4. Способы регулирования частоты и силы импульса.
5. Основные параметры ГИ и импульсов.

## 12. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЕПАРАТОР СЕМЯН СДЛ-1

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия, электрическую схему диэлектрического сепаратора семян СДЛ-1.

### Задачи работы:

1. Усвоить физические основы разделения семян в электрическом поле диэлектрических сепараторов.
2. Изучить устройство, электрическую схему, принцип действия сепаратора СДЛ-1.
3. Произвести испытание сепаратора в работе и установить технологическую эффективность разделения семян.

### Общие сведения

Семена сельскохозяйственных культур отличаются физико-механическими свойствами (размерами, формой, массой и др.), на которых основаны механические способы сепарации семян. Однако семена, имеющие одинаковые физико-механические свойства, могут заметно отличаться по биохимическому составу (степени зрелости, химическому составу, влажности и др.) и, следовательно, по электрическим свойствам (диэлектрической проницаемости, электрической проводимости, способности воспринимать и удерживать электрический заряд и т. д.). На этом основаны электрические способы разделения семян, которые позволяют отбирать семена по качеству. В этом коренное отличие методов сепарации семян в электрических полях от механических способов. Совокупность физико-механических, электрических и биохимических свойств, по которым производят разделение семян, составляет признак делимости семян. Для каждого вида сепараторов он выражается определенной аналитической зависимостью.

Разделение семян в электрических полях осуществляют в электрических сепараторах (электросепараторах) зерна.

Электросепараторы классифицируют:

- по виду электрического поля: коронные, электростатические, с переменным полем, комбинированные;
- по способу зарядки частиц: ионной зарядки, электродной (контактной) зарядки, зарядки поляризацией (диэлектрические), зарядки трением (трибоэлектрические), комбинированные;
- по конструкции: камерные, барабанные, транспортные (ленточные), решетчатые и др.

В работе представлен электросепаратор СДЛ-1 (сепаратор диэлектрический лабораторный однокамерный), предназначенный

для разделения биологически ценных семян зерновых и других культур по их электрофизическим и иным свойствам с целью повышения посевных качеств. По конструктивному исполнению он относится к сепараторам барабанного типа.

Разделение частиц сыпучих смесей в электросепараторах основано на использовании механических сил электрического поля, которые возникают вследствие взаимодействия поля со свободными или связанными электрическими зарядами частиц смеси. Поэтому для разделения частиц (например, семян) их необходимо предварительно зарядить, сообщив им свободные заряды (коронные, электростатические сепараторы), или сместить связанные заряды вещества в противоположные стороны (положительные – по направлению действия поля, отрицательные – в обратном направлении).

В диэлектрическом сепараторе СДЛ-1 рабочим органом служит барабан 7 (рис. 12.1) из диэлектрического материала, на который намотаны бифилярно вплотную (виток к витку) два изолированных проводника (рис. 12.2, в), являющихся электродами. К ним подводится высокое напряжения (до 5 кВ) от повышающего маломощного трансформатора. Между проводниками-электродами создается неоднородное электрическое поле, используемое для разделения семян.

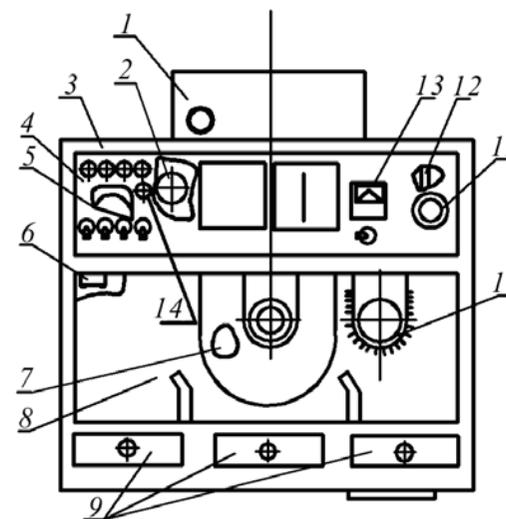


Рис. 12.1. Диэлектрический лабораторный сепаратор семян СДЛ-1 (общий вид): 1 – бункер; 2 – электродвигатель; 3 – корпус; 4 – панель управления; 5 – мотор-редуктор; 6 – конечный выключатель; 7 – барабан; 8 – защитные стекла; 9 – лотки-кассеты; 10 – щетка; 11 – автотрансформатор; 12 – высоковольтный трансформатор; 13 – вольтметр; 14 – кнопка (о) реверсирования загрузочного валика

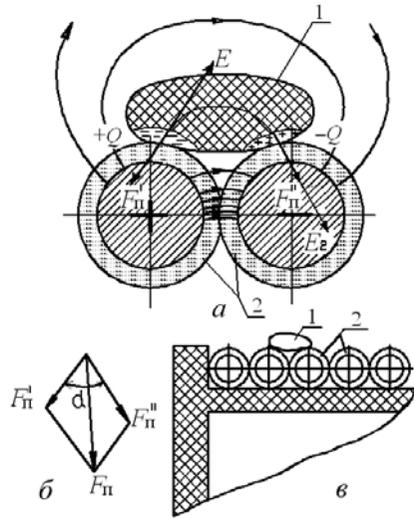


Рис. 12.2. Схема действия поляризованных сил  $F_n'$  и  $F_n''$  (а), результирующая сила  $F_n$  (б), фрагмент барабана (в): 1 – семя; 2 – проводники-электроды

Семя, поступающее на проводники-электроды, поляризуется: в нем наводятся заряды  $+Q$  и  $-Q$ . При взаимодействии между ними и электрическим полем создается поляризационная сила  $F_n$ , притягивающая частицу к проводникам-электродам и, следовательно, к барабану.

Поляризационная сила может быть выражена следующими двумя адекватными зависимостями:

$$F_n = \frac{1}{2} \int_V E^2 \text{grad} \epsilon_a dV = \int_V n \bar{p} (\text{grad} E) dV, \quad (12.1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества зерна, Ф/м;  $V$  – объем частицы, м<sup>3</sup>;  $n$  – число диполей в единице объема вещества зерна, 1/м<sup>3</sup>;  $\bar{p}$  – электрический момент поляризованной молекулы зерна, Кл·м.

Как видно из формулы (12.1), сила  $F_n$  зависит от напряженности электрического поля, его неоднородности, поляризуемости семян, а последняя – от биологического состояния, химического состава, физических параметров. Необходимое условие возникновения силы  $F_n$  – неоднородность электрического поля, которая и создается между проводниками-электродами сепаратора (рис. 12.2, а).

В неоднородном поле на поверхности семян, обращенной к положительно заряженному электроду, наводится отрицательный заряд  $-Q$ , а на противоположной стороне – положительный  $+Q$  (рис. 12.2, а).

На эти заряды действует поле и, если оно неоднородно ( $\bar{E}_1$  не равно  $\bar{E}_2$ ), возникают две равные по направлению и величине силы (рис. 12.2, б):

$$\bar{F}_n' = Q\bar{E}_1, \quad \bar{F}_n'' = Q\bar{E}_2, \quad (12.2)$$

где  $\bar{E}_1, \bar{E}_2$  – векторы напряженности электрического поля в местах нахождения зарядов  $-Q$  и  $+Q$ .

Результирующая поляризационная сила равна:

$$\bar{F}_n = \bar{F}_n' + \bar{F}_n''. \quad (12.3)$$

Значение силы  $F_n$  зависит от соотношения диэлектрической проницаемости частицы  $\epsilon_1$  и среды  $\epsilon_2$ . При  $\epsilon_1 > \epsilon_2$  частица втягивается в область наибольшей напряженности поля, возникающей в точке соприкосновения проводников-электродов, а при  $\epsilon_1 < \epsilon_2$  выталкивается из этой области. Диэлектрическая проницаемость семени  $\epsilon_1$  больше диэлектрической проницаемости воздуха  $\epsilon_2$ , поэтому семя притягивается к электродам.

Используя теорему косинусов, получим:

$$F_n = \sqrt{(F_n')^2 + (F_n'')^2 + 2F_n'F_n'' \cos \alpha}. \quad (12.4)$$

Из формулы (12.4) следует, что чем меньше расстояние между электродами (угол  $\alpha$ ), тем больше результирующая поляризационная сила.

Таким образом, поляризационная сила зависит от напряженности электрического поля, диэлектрической проницаемости семян, других физико-химических параметров, а также от расстояния между электродами.

Так как поляризационная сила пропорциональна квадрату напряженности электрического поля:

$$\bar{F}_n = k\bar{E}^2, \quad (12.5)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, то при питании электродов переменным напряжением направление силы не меняется, но величина ее изменяется во времени с удвоенной частотой сети.

Среднее значение силы  $F_{\text{п}}$  остается неизменным, если действующее значение переменного напряжения равно постоянному. Переменное напряжение предпочтительнее, так как в этом случае нет необходимости использования выпрямляющего устройства. Отличительная особенность диэлектрических сепараторов состоит в том, что близкое расположение проводников-электродов позволяет создать высокую напряженность электрического поля в зоне разделения семян при сравнительно низких напряжениях питания, меньших по сравнению с электростатическими и коронными сепараторами. Поэтому они более безопасны в эксплуатации и имеют меньшую стоимость.

В общем случае помимо поляризационной силы  $F_{\text{п}}$  на семя могут действовать и другие механические силы электрического поля. Результирующую силу  $F_{\text{эл}}$ , которую в отличие от механических сил неэлектрического происхождения (центробежной  $F_{\text{цб}}$ , силы тяжести  $F_{\text{т}}$ , силы трения  $F_{\text{тр}}$  – рис. 12.3), называют электрической, можно представить в виде

$$F_{\text{эл}} = k_1 F^n, \quad (12.6)$$

где  $k_1$  – постоянная, не зависящая от  $E$ ;  $n$  – показатель степени ( $1 < n < 2$ ).

Общий вид сепаратора представлен на рис. 12.2, а технические данные – в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Основные технические данные  
и характеристики сепаратора СДЛ-1

Характеристики	Значение
Производительность, кг/ч, не менее:	
семена зерновых культур,	10
семена овощных культур	7
семена травяных культур	5
Напряжение питающей сети, В	220
Частота питающей сети, Гц	50
Максимальное напряжение на обмотке, кВ	5
Потребляемая мощность, кВт	0,5
Частота вращения барабана, Гц	0,33
Масса, кг	70
Количество обслуживающего персонала, чел.	1

Основным узлом сепаратора является барабан 7 (см. рис. 12.1). Бункер 1 предназначен для загрузки семян и обеспечения равномерной их подачи на барабан. Мотор-редуктор 5 осуществляет вращение барабана 7 и щетки 10, которая очищает барабан от пыли и неполноценных зерен. Кассеты 9 предназначены для приема семян после сепарации. Конечные выключатели 6 обеспечивают отключение сепаратора от сети при незакрытых защитных стеклах 8, снятых верхней и задней крышках. Розетка-блокировка, которая находится на задней стенке аппарата (на рис. 12.2 не показана), обеспечивает отключение от сети при снятии задней стенки. Вольтметр 13 контролирует величину высокого напряжения, подаваемого на рабочий орган барабана от высоковольтного трансформатора 12. Величину напряжения регулируют с помощью автотрансформатора 11. На панели управления 4 размещены органы управления и измерительные приборы. Электродвигатель 2 приводит во вращение загрузочный валик бункера.

Технологическая схема разделения (сортирования) семян представлена на рис. 12.3. Семена из бункера поступают через щель, образованную стенкой бункера и задвижкой 7, подаются на вращающийся загрузочный валик 2 и затем на рабочий орган барабана 3.

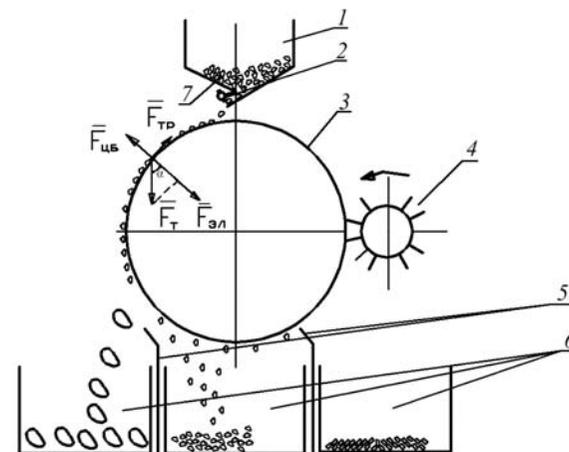


Рис. 12.3. Технологическая схема

процесса сортирования семян на сепараторе СДЛ-1:

1 – бункер; 2 – загрузочный валик; 3 – барабан; 4 – щетка; 5 – перегородки;

6 – приемные устройства; 7 – задвижка;  $\vec{F}_{\text{эл}}$  – электрическая сила;

$\vec{F}_{\text{цб}}$  – центробежная сила;  $\vec{F}_{\text{т}}$  – сила тяжести;  $\vec{F}_{\text{тр}}$  – сила трения

В общем случае на семена, находящиеся на барабане, действуют силы (рис. 12.3): электрическая  $\bar{F}_{эл}$ , центробежная  $\bar{F}_{цб}$ , сила тяжести  $\bar{F}_T$ , сила трения  $\bar{F}_{тр}$ . Соотношение этих сил определяет траекторию семян. Так, электрическая сила стремится прижать их к электродам, а центробежная – оторвать. Поскольку семена разнокачественные, т. е. различаются по физико-химическим и биохимическим свойствам, то при одном и том же напряжении на электродах будут действовать разные по величине электрические силы.

Условие равновесия семени на рабочем органе барабана имеет следующий вид:

$$F_{эл} + F_T \cos \alpha = F_{цб}. \quad (12.7)$$

Нарушение этого условия приводит к отрыву семени от барабана под тем или иным углом, называемым углом отрыва  $\alpha_{отр}$  (рис. 12.3):

$$\cos \alpha_{отр} = \frac{F_{цб} - F_{эл}}{F_T} = \frac{F_{цб} - F_{эл}}{mq}, \quad (12.8)$$

где  $m$  – масса семени, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ .

Следовательно, самые крупные и плотные семена слабее удерживаются на поверхности обмотки и падают в первую фракцию, менее крупные – во вторую. Самые же легкие и мелкие, т.е. семена с меньшей плотностью и массой, а следовательно, и с меньшей энергией прорастания и всхожестью, сильнее притягиваются к поверхности электродов, они очищаются щеткой и попадают в третью фракцию.

Принципиальная электрическая схема сепаратора приведена на рис. 12.4. Сепаратор включают выключателем SA1, при этом загорается индикатор VD1. Выключателем SA2 подают напряжение на мотор-редуктор M1. Конденсатор C3 обеспечивает однофазное включение трехфазного электродвигателя M1. Выключателем SA3 «Дозатор» включают электродвигатель M2 привода загрузочного валика бункера, при этом загорается индикатор VD3. Так как рабочее напряжение двигателя M2 составляет 127 В, питание его осуществляется через делитель C1-C4. Необходимое смещение фазы питающего напряжения в обмотке возбуждения осуществляется конденсатором C2.

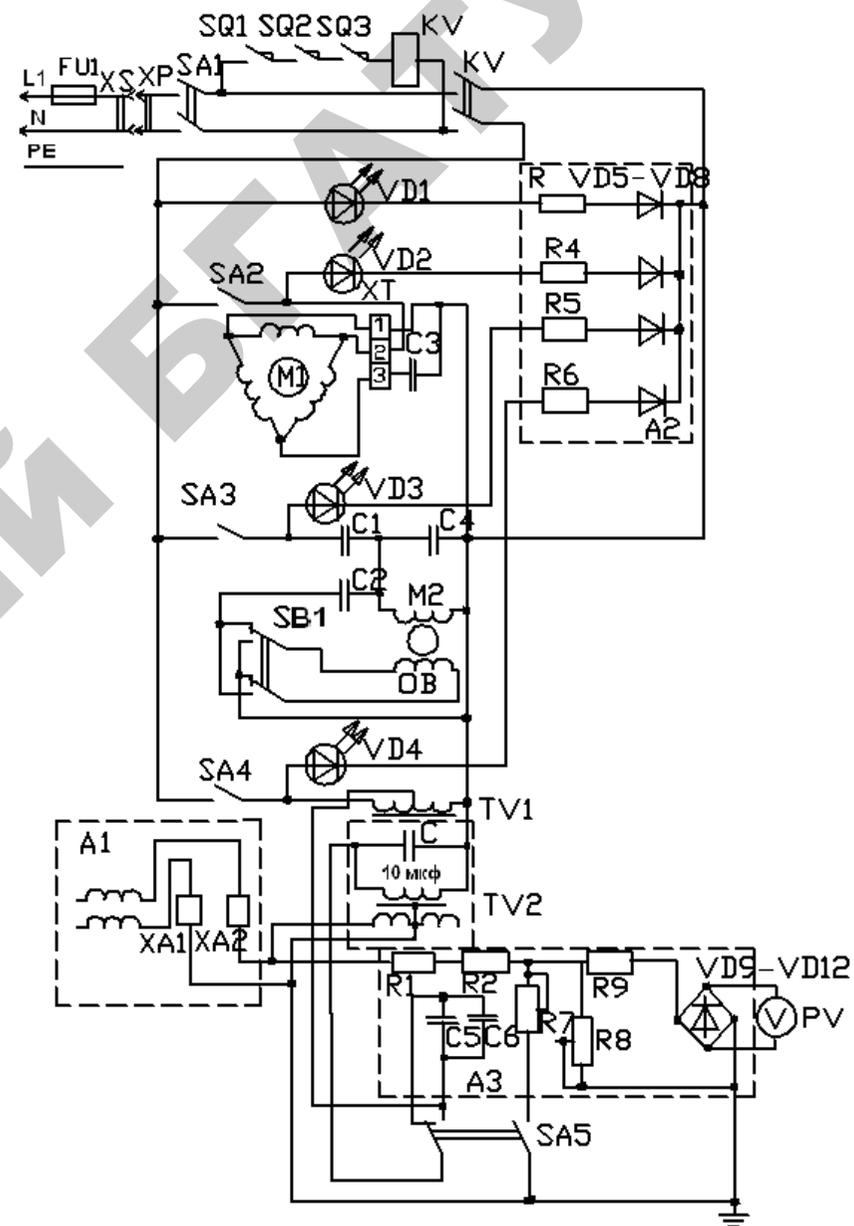


Рис. 12.4. Принципиальная электрическая схема сепаратора СДЛ-1

Напряжение на барабан подается выключателем SA4 «Сепарация», при этом загорается индикатор VD4, включается автотрансформатор TV1 и подается напряжение на повышающий трансформатор TV2. Величину выходного напряжения регулируют (в пределах 0–1 кВ и 0–5 кВ) переключателем SA5 «Режим».

Диапазон 0–1 кВ получают при включении первичной обмотки TV2 через конденсаторы C5 и C6. Резисторами R7, R8, R9 осуществляют тарировку  $pV$  в диапазонах 0–1 кВ и 0–5 кВ.

Напряжения подводят к обмотке барабана с помощью скользящих контактов XA1, XA2.

Порядок включения и работы сепаратора:

1. Убедиться в том, что защитные стенки закрыты полностью.
2. Включить сетевой шнур в розетку, установить выключатель «Сеть» в положение «Включено».
3. Установить выключатель «Сепаратор» в положение «Выключено». В зависимости от культуры семян по таблице, расположенной на панели управления, установить вращением ручки автотрансформатора напряжение сепарации, контролируя напряжение по вольтметру.
4. Засыпать в бункер семена и установить выключатели «Барабан» и «Бункер» в положение «Включено».
5. Отрегулировать положение заслонки бункера таким образом, чтобы семена поступали на рабочий орган барабана равномерно в один слой.
6. В тех случаях, когда после одного пропуска через сепаратор не удается получить желаемый результат, рекомендуется двух- или трехкратная обработка семян.
7. Для окончательного удаления семян из бункера нажатием кнопки (о) (см. рис. 12, позиция 14,) реверсировать загрузочный валик.
8. После очистки бункера установить выключатели «Сеть», «Сепаратор», «Барабан», «Дозатор» в положение «Выключено», ручку автотрансформатора повернуть против часовой стрелки до упора.
9. Отключить сепаратор от сети.

### Методика выполнения работы

1. Пункты 1, 2 и 3 задач работы (см. с. 127) выполняют при подготовке к лабораторной работе, используя настоящие методические указания и рекомендованную литературу. К работе допускаются студенты, изучившие физические основы разделения семян

в диэлектрическом сепараторе, принцип устройства и электрическую схему сепаратора.

2. На рабочем месте изучить устройство сепаратора, правила техники безопасности, последовательность операций по его подготовке к работе, включению и регулированию режимов. Необходимо проверить целостность заземления корпуса сепаратора, наличие диэлектрического резинового коврика.

3. После проверки правил безопасности и обслуживания включить сепаратор в сеть и убедиться в исправной работе механизмов (подачи семян, регулирования напряжения на рабочем органе и др.). Установить положение заслонки бункера, обеспечивающее поступление семян на барабан равномерно в один слой.

4. Провести опыты по определению эффективности разделения семян в сепараторе, в зависимости от напряженности электрического поля и числа повторностей обработки, для семян укропа. Напряженность поля изменить, регулируя напряжение, подводимое к обмотке.

Исследования провести в следующей последовательности:

4.1. Смешать и взвесить всю партию семян, представленную в опытах, определить их суммарную массу и записать в табл. 12.2.

Таблица 12.2

Эффективность сепарирования семян в зависимости от напряжения на электродах

$U$ , кВ	Общая масса семян $m_{\Sigma}$ , г	Фракции						$C$
		I		II		III		
		$m_{I}$ , г	$\bar{m}_{I}$ , %	$m_{II}$ , г	$\bar{m}_{II}$ , %	$m_{III}$ , г	$\bar{m}_{III}$ , %	
0,2								
0,3								
0,4								
0,5								

4.2. Засыпать семена в бункер, обработать их, выполняя операции в последовательности, приведенной в разделе «Порядок включения и работы сепаратора».

4.3. После обработки отключить сепаратор, аккуратно собрать и взвесить семена каждой фракции ( $m_I$ ,  $m_{II}$ ,  $m_{III}$ ), их массу записать в табл. 12.2.

4.4. Смешать семена всех фракций, снова взвесить, установить новое значение напряжения на электродах, сепарировать, повторить все операции предыдущего пункта и так для всех 4-х значений напряжения на электродах.

4.5. Произвести трехкратную обработку семян при одном и том же напряжении на электродах 0,5 кВ. Первый раз обработать как в предыдущем случае, в последующем – только семена первой фракции, полученные при предшествующей обработке. Данные записать в табл. 12.3.

Таблица 12.3

Эффективность сепарирования семян  
в зависимости от числа повторностей обработки

U, кВ	Общая масса семян $m_{\Sigma}$ , г	Фракции						C
		I		II		III		
		$m_I$ , г	$\bar{m}_I$ , %	$m_{II}$ , г	$\bar{m}_{II}$ , %	$m_{III}$ , г	$\bar{m}_{III}$ , %	
1								
2								
3								

Обработать результаты и определить:

1. Распределение семян (в %) по фракциям (классам) для каждого значения  $U$  на электродах. Для  $i$ -ой фракции:

$$\bar{m}_I = \frac{m_I}{m_{\Sigma}} \cdot 100. \quad (12.9)$$

2. Степень очистки  $C$  (в относительных единицах) для каждого значения  $U$ , которую упрощенно определить по качеству отсепарированных малоценных семян и примесей, считая семена первой фракции наиболее качественными:

$$C = \frac{m_{\Sigma} - m_I}{m_{\Sigma}}. \quad (12.10)$$

В реальных условиях степень очистки определяют по массе 1000 отсепарированных семян по сравнению с массой 1000 семян до очистки.

3. Построить графические зависимости:
- степени очистки от напряжения на электродах  $C = f(U)$  по данным табл. 12.2;
  - степени очистки от числа повторностей обработки  $C = f(n)$  по данным табл. 12.3;

#### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Технологическая и электрическая схемы сепаратора.
3. Таблицы наблюдений и вычислений.
4. Графические зависимости.
5. Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы:

1. Отличие электрических сепараторов семян от механических.
2. Природа механических сил электрического поля, действующих на семена в диэлектрическом сепараторе.
3. Технологический процесс в сепараторе СДЛ-1, условие удержания семени на барабане сепаратора.
4. Устройство, принцип работы сепаратора СДЛ-1.
6. Принципиальная электрическая схема сепаратора СДЛ-1.

### 13. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРООЧИСТКИ И ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА

**Цель работы:** изучить устройство и принцип действия установок электроочистки и ионизации воздуха.

#### Задачи работы:

1. Изучить действие электрических полей на заряженные частицы, способы зарядки частиц и ионизации воздуха.

2. Изучить устройство и принцип работы установок электроочистки и ионизации воздуха.

3. Исследовать влияние напряженности электрического поля на величину заряда частицы и степень очистки воздуха. Определить мощность фильтра, диапазон регулирования напряжения на электродах, расход энергии на очистку воздуха.

4. Определить зависимость потока аэроионов от напряжения на разрядной линии, мощность установки и расход энергии на ионизацию воздуха. Рассчитать длину разрядной линии и напряжение на ней применительно к аэроионизатору и помещению, показанным на рис. 13.2.

#### Общие сведения

Электроочистку воздуха относят к электронно-ионной технологии. В ее основе лежит механическое действие электрического поля на заряженные частицы с целью придания им упорядоченного движения, необходимого для осуществления технологического процесса. Например, сортировка и очистка зерносмеси, осаждение пестицидов, красок, лекарственных препаратов, фильтрация воздуха и др.

На заряженную частицу, находящуюся в воздушной среде в электрическом поле, действуют:

– сила тяжести:

$$F_T = mg; \quad (13.1)$$

– сила электрического действия:

$$F_э = qE; \quad (13.2)$$

– сила, обусловленная неравномерностью электрического поля для сферической частицы:

$$F_H = 2\pi\epsilon_0 a^3 \text{grad} E^2 (\epsilon_q - 1) / (\epsilon_q + 2); \quad (13.3)$$

– сила сопротивления среды:

$$F_c = 0,5 C_x \rho_{cp} (v_q - v_{cp})^2 S_q, \quad (13.4)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $q$  – электрический заряд частицы, Кл;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная;  $\epsilon_q$  – относительная диэлектрическая проницаемость частицы;  $a$  – радиус частицы, м;  $\rho_{cp}$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $S_q = \pi a^2$  – площадь миделева сечения для сферической частицы, м<sup>2</sup>;  $v_q, v_{cp}$  – скорость движения частицы и среды, м/с;

Коэффициент сопротивления среды:

$$C_x = \frac{24(1 + 0.167 Re^{2/3})}{Re}, \quad (13.5)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса; в электрофильтрах  $Re = (2-8) \cdot 10^3$ .

Суммарная сила

$$\bar{F} = \bar{F}_T + \bar{F}_э + \bar{F}_H + \bar{F}_c \quad (13.6)$$

может перемещать или ориентировать частицу в электрическом поле и тем самым способствовать определенному технологическому процессу. Например, направлять заряженные частицы аэрозоли краски на окрашиваемое изделие.

Существуют различные способы зарядки частиц. Наиболее распространенный – путем осаждения ионов на поверхности частицы в поле коронного разряда. Осаждение ионов происходит под действием внешнего электрического поля, поля поляризации частицы, сил зеркального отображения и т. д. Предельный (максимальный) заряд наступает в тот момент, когда сила отталкивания между зарядами, находящимися на частице, равна сумме сил, притягивающих приближающиеся заряды.

Для непроводящих частиц размером более 2 мкм:

$$q_m = 4\pi\epsilon_0 k_{\Sigma} a^2 E, \quad (13.7)$$

для проводящих:

$$q_m = 12\pi\epsilon_0 a^2 E, \quad (13.8)$$

где  $k_\Sigma = 1 + 2(\epsilon_q - 1)/(\epsilon_q + 2), \quad (13.9)$

Заряд сферических частиц, находящихся на электроде в электрическом поле:

$$q_m = \frac{2\pi^3 E a^2}{3}. \quad (13.10)$$

Реальные значения заряда существенно ниже предельного из-за влияния контактного сопротивления, концентрации частиц, стекания заряда и других факторов.

Основной характеристикой электрофильтров является степень очистки газов  $\eta$ :

$$\eta = 1 - \exp(-\chi v_{oc} S / \omega), \quad (13.11)$$

где  $v_{oc}$  – скорость движения частиц к осадительному электроду, м/с;  $S$  – площадь осадительных электродов, м<sup>2</sup>;  $\omega$  – объемный расход воздуха (газа), м<sup>3</sup>/с;  $\chi = 1, 1-1,3$  – поправочный коэффициент.

Скорость осаждения частиц в пластинчатых электрофильтрах:

$$v_{oc} = B_K q_{cp} E_{oc}, \quad (13.12)$$

где  $B_K$  – подвижность частицы с учетом поправок, м<sup>2</sup>/(В·с);  $q_{cp} = 0,5q_m$  – средний заряд частицы;  $E_{oc}$  – напряженность поля у осадительного электрода, В/м.

Ионизация воздуха также относится к области электронно-ионной технологии. В ее основе лежит искусственное придание отрицательного заряда молекулам кислорода с целью положительного влияния на продуктивность сельскохозяйственных животных и птицы.

В воздухе имеют место положительно и отрицательно заряженные молекулы кислорода и частицы пыли, влаги и т. д. Последние названы «легкими» аэроионами. Благоприятное воздействие на животных оказывают отрицательно заряженные молекулы кислорода (легкие, отрицательные аэроионы), которые стимулируют биологические процессы в организме животных.

Уровень естественной ионизации воздуха составляет вне помещений (700–1000)·10<sup>6</sup> легких отрицательных ионов в 1 м<sup>3</sup> воздуха, а в помещении может быть менее 100·10<sup>6</sup> ион/м<sup>3</sup>.

Приведенные в табл. 13.1 концентрации и режимы являются ориентировочными. Предельная концентрация аэроионов составляет не более 10<sup>12</sup> ионов в 1 м<sup>3</sup>.

Таблица 13.1

Зоотехнические рекомендации  
по дозам ионизации воздуха в помещениях

Виды животных, птиц	Концентрация отрицательных аэроионов, 10 <sup>11</sup> ион/м <sup>3</sup>	Режим аэроионизации
Телята до 11 месяцев	2–3	Ежедневно по 6–8 ч
Коровы	2–3	В течение 15–20 дней по 5–8 ч/сут.
Быки-производители	2,5	В течение 2 месяцев по 8–10 ч/сут., перерыв на 20–30 дней, повтор
Поросята, свиньи	3–5	В течение 3–4 недель по 0,5 ч 2 раза в день, повтор через 1 месяц
Цыплята 3–60 дней	0,25	Ежедневно по 1–4 ч
Бройлеры	0,6–0,7	С 3-х по 65-е сутки продолжительность увеличивают с 0,5 до 3 ч/сут., 7 дней – воздействие, 5 дней – пауза
Молодняк птицы 2–5 месяцев	0,2–1,6	Увеличение продолжительности аэроионизации с возрастом от 0,5 до 9–12 ч/сут.
Куры-несушки	1,5–2,5	Увеличение продолжительности аэроионизации с возрастом от 4 до 12 ч/сут. Чередование: 1 месяц – ионизация, 1 месяц – перерыв
Инкубаторы	0,13	19 дней круглосуточно

Существуют различные способы ионизации. Наиболее распространенный – электрическая ионизация в поле коронного разряда.

Коронный разряд возникает между электродами, к которым приложено напряжение определенной величины (13.13). С уменьшением радиуса электрода снижается напряженность поля образования короны:

$$E_i = 3,04 \cdot 10^6 \left[ \delta + 0,0311 \sqrt{\delta/R_1} \right], \quad (13.13)$$

где  $E_i$  – критическая (минимальная) напряженность возникновения коронирующего разряда, В/м;  $\delta = \rho/\rho_0$  – относительная плотность воздуха;  $R_1$  – радиус коронирующего электрода, м.

Корона может быть как отрицательной, так и положительной. Чаще используют отрицательную корону, поскольку в этом случае напряжение возникновения разряда ниже.

У поверхности коронирующего электрода при достаточной величине напряженности электрического поля возникают условия для ударной ионизации. Любой свободный заряд ускоряется в этом электрическом поле и за время свободного пробега приобретает кинетическую энергию, достаточную для ионизации молекулы воздуха при взаимодействии с ней. Кроме того, происходит возбуждение молекул воздуха, которые испускают оптическое излучение, в том числе и в видимой области спектра. Поток электронов и ионов у коронирующего электрода нарастает. Часть электронов попадает из коронирующего, приэлектродного слоя во внешнюю область короны и в среднем через  $2 \cdot 10^5$  столкновений с молекулами воздуха за время  $10^{-8}$  с присоединяется к нейтральным молекулам кислорода и образует отрицательные аэроионы  $O_2^-$ . Далее отрицательные аэроионы перемещаются в электрическом поле к осадительному электроду и с окружающим воздухом попадают в дыхательные пути животных и птицы.

В общем случае ионизатор воздуха состоит из коронирующего (разрядного) устройства и источника питания высокого напряжения (15–25 кВ) постоянного тока.

Разрядное устройство может быть выполнено в виде набора острых игл (рис. 13.1) или металлического провода с хлопчатобумажной оплеткой типа ПБД, ПВБД (рис. 13.2), расположенных в помещении. Для получения отрицательных аэроионов к иглам или металлической жиле провода подключают отрицательный полюс высоковольтного источника питания, а положительный полюс заземляют. Коронный разряд возникает у острия игл или у ворсинок хлопчатобумажной оплетки провода. Осадительным электродом, к которому направляются отрицательные аэроионы, служат элементы помещения (пол, стены) и технологическое оборудование.

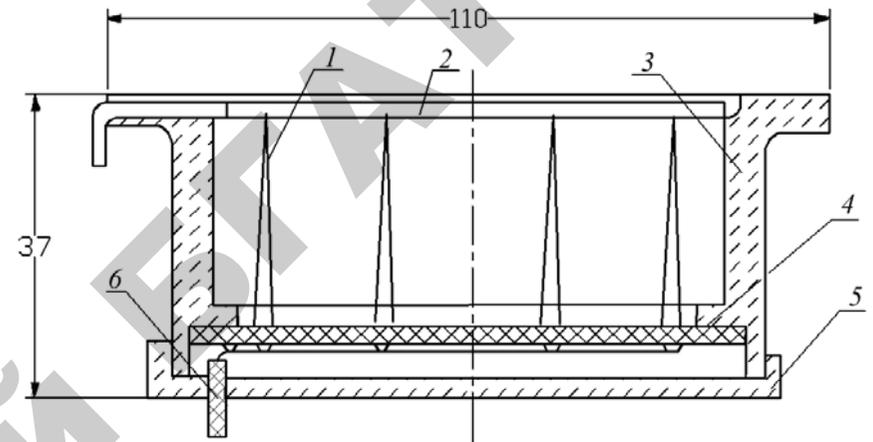


Рис. 13.1. Игольчатый электроразрядник:  
1 – швейная игла №3; 2 – экранирующий провод; 3 – корпус;  
4 – основание для крепления игл; 5 – изоляционная крышка;  
6 – токоподводящий провод

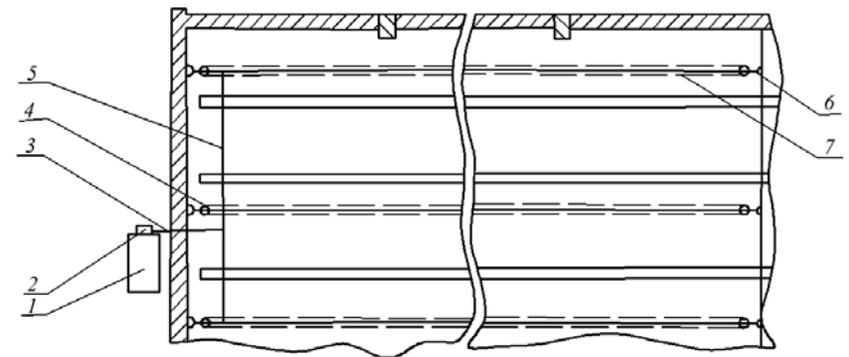


Рис. 13.2. Схема размещения аэроионизационной установки  
в животноводческом помещении:  
1 – силовой щит; 2 – блок питания аэроионизатора; 3, 5 – кабель РК-75-17-21,  
соединяющий блок питания с разрядной линией; 4 – изоляторы;  
6 – трос; 7 – разрядная линия (провод ПБД 1×2)

Источниками питания установок фильтрации и ионизации воздуха служат высоковольтные выпрямители, собранные по схеме умножения напряжения (рис. 13.3). Сетевое напряжение повышается трансформатором TV1 до  $U_2$  и схемой умножения C1–C6 и VD1–VD6 до  $n\sqrt{2U_2}$ , где  $n$  – число конденсаторов, образующих схему умножения. Сопротивление  $R$  ограничивает ток источника питания до величины, безопасной для человека (4 мА). Мощность коронного разряда составляет от сотых до десятых долей ватта. Мощность блока питания не превышает 3–5 Вт.

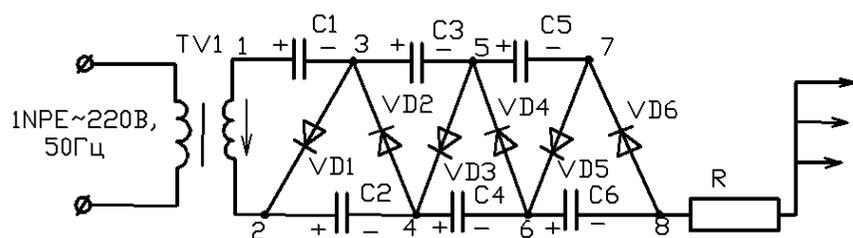


Рис. 13.3. Схема умножения напряжения

Минимальное напряжение  $U_i$  на разрядной линии (рис. 13.2), необходимое для зажигания коронного разряда:

$$U_i = 30,3 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{R_1}}\right) R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (13.14)$$

где  $R_1, R_2$  – радиусы кривизны коронирующего и собирающего электродов, м.

Напряжение, необходимое для создания требуемой концентрации  $n$  аэроионов:

$$U = U_i + \frac{neR_2^2}{4\epsilon_0}, \quad (13.15)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд аэроиона, принятый равным заряду электрона;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

Напряжение на разрядной линии с учетом падения напряжения на сопротивлении, ограничивающем ток в самой линии:

$$U_0 = \frac{U^2}{(1-C)(2U-U_i)}, \quad (13.16)$$

где  $C = 0,4$  – коэффициент стабильности разряда.

Разрядный ток на единицу длины линии:

$$i = \frac{8\pi\epsilon_0 k U (U - U_i)}{R_2^2 \ln R_2 / R_1}, \quad (13.17)$$

где  $k = 1,84 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/(В·с) – подвижность отрицательных ионов кислорода.

Ток разрядной линии:

$$I = il, \quad (13.18)$$

где  $l$  – длина линии, м.

Поток аэроионов с единицы длины коронирующего электрода:

$$N = \frac{i}{l}. \quad (13.19)$$

Установка электроочистки и ионизации воздуха (рис. 13.4, а) сочетает электрофильтрацию и ионизацию воздуха. Предназначена для использования в птицеводческих и животноводческих помещениях.

Запыленный воздух из помещения проходит между заряжающими и осадительными пластинами фильтра, очищается и поступает опять в помещение. Частицы пыли получают заряд в заряжающей секции и оседают на электродах осадительной секции. Пыль удаляют с пластин путем их периодической мойки водой из шланга.

Нижние кромки стальных электродов выполнены в виде острых зубьев, провоцирующих коронный разряд, в поле которого происходит ионизация воздуха.

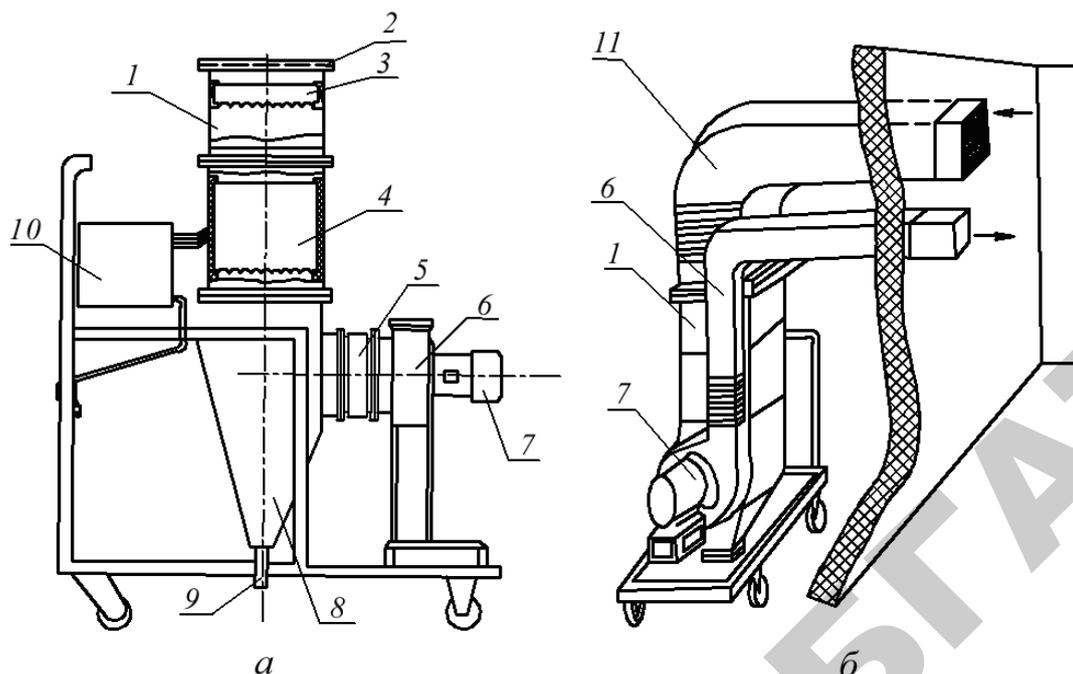


Рис. 13.4. Установка электроочистки и ионизации воздуха УОВ-1 (а) и схема размещения ее в помещении (б):  
 1 – электрофильтр-аэроионизатор; 2 – защитная сетка; 3 – пластина заряжающей секции; 4 – пластина осадительной секции;  
 5 – виброгасительная вставка; 6 – нагнетательный воздуховод; 7 – электропривод вентилятора; 8 – пылеуловитель;  
 9 – патрубок удаления пыли; 10 – блок управления и питания; 11 – заборный воздуховод

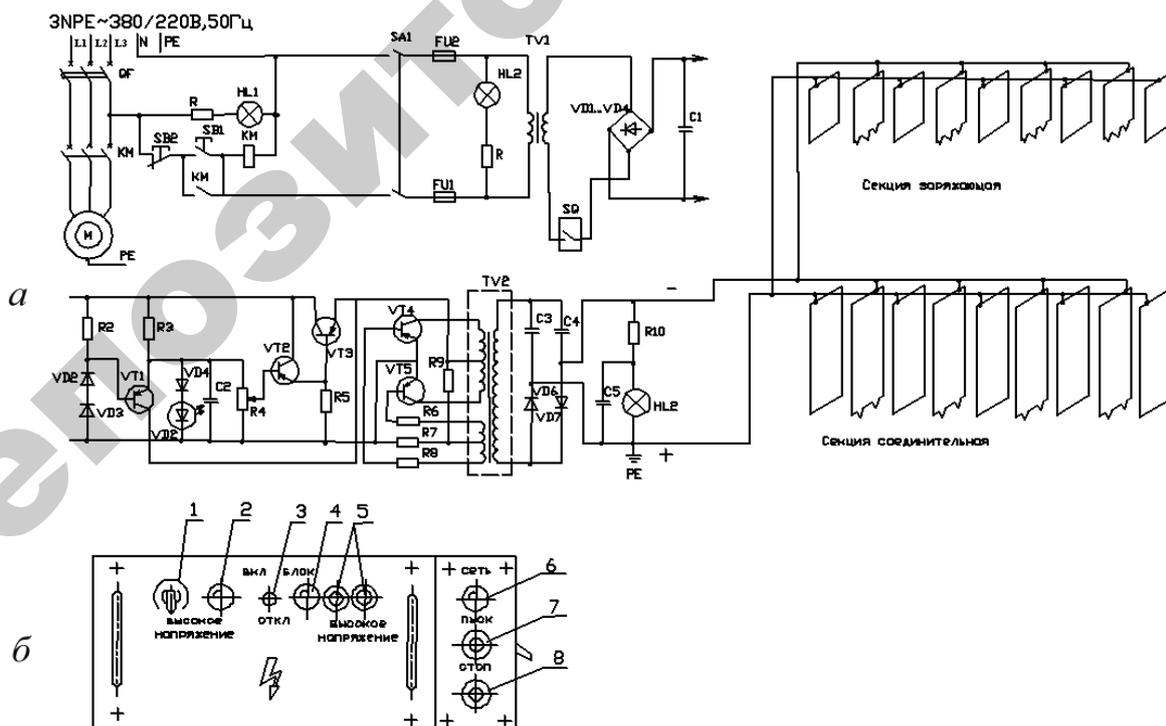


Рис. 13.5. Принципиальная электрическая схема (а) и блок управления (б) установки УОВ-1:  
 1 – регулятор напряжения; 2 – лампа «Высокое напряжение»; 3 – тумблер включения блока; 4 – лампа «Блок высоковольтный»;  
 5 – предохранители; 6 – лампа «Сеть»; 7, 8 – кнопки включения электродвигателя вентилятора

Блок управления установкой (рис. 13.5) состоит из панели управления работой вентилятора и блока повышения сетевого напряжения до 8 кВ. Высоковольтный блок содержит: понижающий трансформатор TV1 220/32 В; выпрямитель UZ; конденсатор C1, сглаживающий пульсацию выпрямленного напряжения; стабилизатор-регулятор напряжения со схемой защиты от перегрузки и короткого замыкания, выполненный на транзисторах VT1, VT2, VT3; преобразователь постоянного тока в ток повышенной частоты на транзисторах VT4, VT5 и трансформаторе TV2; схему удвоения напряжения, выполненную на конденсаторах C3, C4 и диодах VD5, VD6. Высокое напряжение регулируют резистором R5.

Установку размещают или в помещении, где очищают воздух, или в подсобном помещении (рис. 13.4, б), в котором желательно иметь водопровод для промывки фильтра один раз в две недели и слив загрязненной воды.

### Методика выполнения работы

1. Изучить действие электрического поля на заряженные частицы в воздухе, способы зарядки частиц и молекул кислорода изучить по описанию работы и литературе. Знать факторы, влияющие на заряд частицы и действующие на нее силы. Уметь определить напряжение, необходимое для получения требуемой степени очистки газов или создания необходимой концентрации аэроионов в воздухе.

2. Изучить на лабораторном оборудовании и по рисункам устройство и принцип работы установок. Измерить конструктивные параметры установки очистки и ионизации воздуха УОВ-1 и электрического ионизатора, необходимые для дальнейших расчетов (табл. 13.2).

Таблица 13.2

Конструктивные и технологические параметры установки УОВ-1

Установка очистки воздуха				Ионизатор воздуха		
$S_1, \text{м}^2$	$n_3, \text{шт.}$	$d, \text{м}$	$\omega, \text{м}^3/\text{ч}$	$R_1, \text{м}$	$R_2, \text{м}$	$L, \text{м}$

В табл. 13.2:  $S$  – площадь электрода осадительной секции;  $n_3$  – число электродов осадительной секции;  $d$  – расстояние между электродами в осадительной секции;  $\omega = 1200 \text{ м}^3/\text{ч}$  – подача воздуха;  $R_1, R_2$  – радиусы кривизны коронирующего и осадительного электродов.

Радиус коронирующего электрода  $R_1$  принять равным радиусу волокон хлопчатобумажной оплетки разрядного провода. Замерить микрометром. Радиус осадительного электрода  $R_2$  принять равным высоте подвеса разрядной линии.

3. Определить влияние напряженности электростатического поля  $E$  на степень очистки воздуха и величину заряда частицы  $q_{\text{ср}}$  расчетным методом по формулам (13.3), (13.7), (13.12). Принять  $B_K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $\epsilon_{\text{ч}} = 2-6$ ,  $a = (1-4) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Значения  $\eta$  и  $q_{\text{ср}}$  найти для 3-4 значений  $E$ . Напряжение на электродах регулировать в диапазоне от  $U_{\text{min}}$  до  $U_{\text{max}}$  резистором R4 (рис. 13.5).

Мощность фильтра (в Вт):  $P = UI$ , где  $U, I$  – напряжение и ток фильтра.

Расход энергии на фильтрацию воздуха (в Дж/м<sup>3</sup>):

$$W = \frac{P}{\omega} \quad (13.20)$$

Результаты расчетов представить в виде табл. 13.3.

Таблица 13.3

Зависимость степени очистки воздуха от напряженности электрического поля

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$E, \text{В/м}$	$q_{\text{ср}}, \text{Кл}$	$U_{\text{ос}}, \text{м/с}$	$\eta, \text{о.е.}$	$P, \text{Вт}$	$W, \text{Дж/м}^3$

5. Зависимость потока  $N$  аэроионов от напряжения на разрядной линии  $U$ , мощность  $P$  аэроионизатора и расход энергии  $W$  определить расчетным и экспериментальными методами, используя формулы (13.17), (13.18). Результаты расчетов записать в табл. 13.4.

Таблица 13.4

Зависимость потока аэроионов, мощности и расхода на ионизацию от напряжения на разрядной линии

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$i, \text{А/м}$	$N, \text{ион/м}$	$n, \text{ион/м}^3$	$P, \text{Вт}$	$W, \text{Дж/м}^3$	$l_p, \text{м}$

В табл. 13.4:  $I$  – ток разрядной линии;  $i$  – разрядный ток на единицу длины линии;  $n = Nl_p/V$  – средняя концентрация аэроионов

в помещении объемом  $V$ ;  $P = UI$  – мощность аэроионизатора;  $W = P\tau / V$  – расход энергии на ионизацию воздуха. Расчетная длина разрядной линии в помещении (рис. 13.2):

$$l_p = \frac{n_p V_n}{N}, \quad (13.20)$$

где  $n_p$  – рекомендуемая концентрация аэроионов в помещении, ион/м<sup>3</sup> (принять из табл. 14.1);  $V_n$  – объем помещения, м<sup>3</sup>. Размеры помещения принять из рис. 13.2, высота помещения составляет 4 м.

Напряжение на разрядной линии в помещении (рис. 13.2) определить по формулам (13.13)–(13.15).

#### Содержание отчета:

1. Цель, задачи работы.
2. Таблицы с результатами исследований.
3. Графические зависимости  $\eta$ ,  $q_{cp}(E)$ ;  $N$ ,  $n(U)$ .
4. Мощность и расход энергии на фильтрацию и аэроионизацию.

Расчетные значения  $l_p$  и  $U_0$  для разрядной линии в помещении (рис. 13.2).

5. Выводы по задачам и результатам работ.

#### Контрольные вопросы:

1. Способы зарядки частиц.
2. Силы, действующие на заряженные частицы в электрическом поле.
3. Физические основы электрофильтрации и ионизации воздуха.
4. Устройство и принцип работы установки УОВ-1.
5. Принципиальная электрическая схема управления УОВ-1, схема умножения напряжения.

## 14. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ УСТАНОВКИ

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия, электрические схемы технологических ультразвуковых установок, приобрести навыки по их обслуживанию и испытанию.

#### Задачи работы:

1. Изучить природу, характеристики, технологические свойства, области применения ультразвука.
2. Изучить устройство, принцип действия, электрические схемы генераторов УЗГ-3-04 с ванной лужения, УЗВЛ-0,4 и ультразвуковой установки УЗУ-0,25; приобрести навыки работы с ними.
3. Настроить генератор УЗГ-3-04 на оптимальный режим работы и определить основные энергетические параметры установки.
4. Исследовать интенсивность ультразвуковых колебаний в ванне установки УЗУ-0,25, провести опыты по некоторым технологическим проявлениям ультразвука.

#### Общие сведения

Ультразвук представляет собой периодические механические колебания в твердых, жидких и газообразных средах, обладающих упругими свойствами, с частотой, лежащей выше порога слышимости человеческого уха (выше 16 кГц). Верхний предел частоты ультразвуковых колебаний составляет  $10^{10}$  Гц.

Возбуждают ультразвук с помощью вибраторов (преобразователей), которые преобразуют механическую или электрическую энергию в механические колебания частиц среды путем создания в ней периодических повторяющихся упругих напряжений. Эти напряжения, в свою очередь, возбуждают колебания соседних частиц и т. д. Ультразвуковые колебания распространяются от частицы к частице, каждая из которых колеблется около некоторого среднего положения равновесия. Колебание частицы во времени имеет волновой характер и в первом приближении подчиняется синусоидальному закону:

$$b = B \sin \omega t, \quad (14.1)$$

где  $b$  – смещение частиц относительно положения равновесия;  $B$  – амплитуда смещения;  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$  – круговая частота ( $T = 1/f$  – период);  $t$  – время.

Как физическое явление ультразвук относится к области акустики: излучение, распространение и поглощение упругих колебаний в различных средах подчиняются общим законам акустики. Но ультразвуковая технология (использование ультразвука в технологических процессах) является частью электротехнологии, так как получение ультразвука основано преимущественно на преобразовании электрической энергии в энергию механических (акустических) колебаний упругих сред.

В среде, в которой возбуждается ультразвук, создается ультразвуковое поле. Основными параметрами, характеризующими ультразвуковое поле, являются: звуковое давление  $P$ , плотность энергии  $W$ , интенсивность ультразвука  $I$ , скорость распространения ультразвуковой волны  $c$ .

Давление ультразвуковой волны в некоторой точке поля, определяемой координатой  $x$ , является переменным, изменяясь по гармоническому закону:

$$P = \rho c B \omega \cos \omega(\tau - x/c) = P \cos \omega(\tau - x/c), \quad (14.2)$$

где  $P = \rho c B \omega = z_a U$  – амплитудное значение давления, Па;  $V = B \omega$  – амплитуда скорости смещения частиц, м/с;  $z_a = \rho c$  – удельное акустическое сопротивление среды, (Па·с)/м;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость распространения ультразвуковой волны, м/с;  $x$  – текущая координата. Величину  $\omega(\tau - x/c)$  называют фазой волны.

Скорость распространения продольной ультразвуковой волны:  
– в жидких средах:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \beta}}; \quad (14.3)$$

– в твердых телах:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (14.4)$$

где  $\beta$  – сжимаемость среды (для воды  $\beta = 47 \cdot 10^{-11}$  Па<sup>-1</sup>), Па<sup>-1</sup>;  $E$  – модуль упругости Юнга (для железа  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па), Па.

Плотность энергии (средняя за период колебаний  $T$ ):

$$W = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \rho B^2 \omega^2. \quad (14.5)$$

Интенсивность (сила) ультразвука – поток ультразвуковой энергии в единицу времени через единичную поверхность, расположенную перпендикулярно направлению распространения ультразвуковой волны:

$$I = \frac{1}{2} P V = \frac{1}{2} \rho c V^2 = \frac{1}{2} z_a V^2. \quad (14.6)$$

Интенсивность ультразвуковых колебаний, используемых в технике, изменяется от 10<sup>-2</sup> Вт/м<sup>2</sup> до 10<sup>6</sup> Вт/м<sup>2</sup>, а в установках специального назначения достигает 10<sup>7</sup> Вт/м<sup>2</sup>.

Ультразвук используют в технологических процессах и измерительной технике в соответствии с его проявлениями (эффектами), наблюдаемыми в средах при возбуждении в них ультразвука. Основными из них являются акустические, механические, термические и биологические.

Акустические проявления заключаются в том, что ультразвук распространяется, частично или полностью поглощается, отражается (на границах раздела фаз) в соответствии с законами акустики. Эти свойства ультразвука используют в измерительной технике и дефектоскопии, применяя слабые интенсивности колебаний (10<sup>-2</sup>–10<sup>2</sup> Вт/м<sup>2</sup>).

Механические проявления ультразвука наблюдаются в газообразных и жидких средах. К ним относятся переменное давление и переменный поток частиц, радиационное давление, кавитация (в жидких средах), поверхностное трение, диспергирование твердых тел, коагуляция частиц, разделение частиц, дегазация жидкостей и т. д.

Термические проявления состоят в том, что среда, в которой происходит распространение колебаний, поглощает часть энергии колебаний, которая переходит в тепловую и нагревает среду, а также расходуется на изменение структуры вещества.

Биологические проявления заключаются во влиянии ультразвука на изменение скорости протекания физиологических процессов в биологических объектах (высших и низших). При высокой интенсивности ультразвука это может привести к необратимым повреждениям и даже отмиранию тканей.

В технологических процессах используют, главным образом, механические проявления ультразвука при высокой его интенсивности (более  $10^3$  Вт/м<sup>2</sup>). Области технологического использования ультразвука чрезвычайно обширны: очистка и мойка деталей; сверление, фрезерование, резка, долбление глухих отверстий в материалах, обладающих большой ударной хрупкостью (стекло, керамика, кварц, сверхтвердые сплавы); сварка и пайка металлов (в том числе и алюминия), пластмасс с металлами, очистка дымовых газов; смешивание несмешивающихся жидкостей (масел с водой и т. п.), приготовление эмульсий; пастеризация и гомогенизация молока; предпосевная обработка семян и др.

Ультразвуковые преобразователи предназначены для преобразования электрической энергии ультразвуковой частоты в энергию механических колебаний и подвода их к объекту воздействия. Бывают пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи. Магнитострикционные преобразователи основаны на магнитострикционном эффекте, состоящем в изменении геометрических размеров тел, выполненных из магнитострикционных материалов (железо, никель, сплавы альфер, пермендиур и др.) в переменном магнитном поле. Пьезоэлектрические преобразователи основаны на обратном пьезоэлектрическом эффекте, состоящем в изменении геометрических размеров некоторых тел (кристаллы кварца, керамика, титанат бария, цирконат, титанат свинца (ЦТС) и др.) в переменном электрическом поле.

Конструктивное выполнение преобразователей может быть весьма разнообразно в зависимости от технологического назначения, мощности, частоты, условий работы. Некоторые виды преобразователей приведены на рис. 14.1.

Ультразвуковые генераторы предназначены для преобразования электрической энергии промышленной частоты в энергию переменного тока ультразвуковой частоты, необходимой для питания преобразователей (магнитострикционных или пьезоэлектрических). Генератор может питать различные по назначению преобразователи, дополнительные устройства и приспособления (ультразвуковые ванны, механизмы подачи и др.). Генераторы могут быть ламповыми, транзисторными, тиристорными, машинными. В лаборатории представлены ультразвуковой генератор УЗГ-3-04 и ультразвуковая установка УЗУ-0,25.

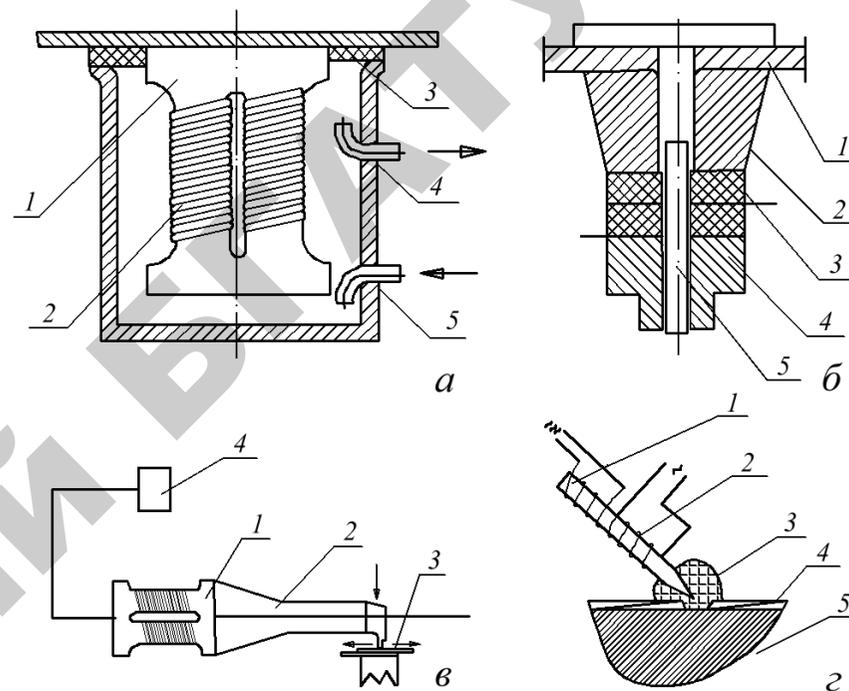


Рис. 14.1. Некоторые виды ультразвуковых преобразователей:

*а* – магнитострикционный преобразователь типа ПМС: 1 – магнитострикционный пакет; 2 – обмотка; 3 – излучающая пластина; 4, 5 – выход и вход охлаждающей воды; *б* – пьезокерамический преобразователь: 1 – дно или стенка оборудования; 2, 4 – накладки; 3 – пьезокерамическая пластина; 5 – стяжной болт с излучающей головкой; *в* – магнитострикционный преобразователь с концентратором для ультразвуковой сварки: 1 – магнитострикционный пакет с обмоткой; 2 – концентратор ультразвука; 3 – свариваемые детали; 4 – генератор; *г* – схема ультразвукового паяльника: 1 – магнитострикционный пакет с обмоткой, питаемой от ультразвукового генератора; 2 – нагревательная обмотка; 3 – припой; 4 – окисная пленка; 5 – деталь

Генератор УЗГ-3-04 является источником электрической энергии ультразвуковой частоты для питания ванн очистки и лужения, сварочного пистолета, паяльника.

Ультразвуковая установка УЗУ-0,25 предназначена для очистки мелких деталей. Технические характеристики приведенного оборудования представлены в табл. 14.1

Генератор УЗГ-3-04 изготовлен в соответствии с принципиальной электрической схемой (рис. 14.2) и состоит из следующих узлов:

автогенератора, анодного выпрямителя, выпрямителя тока подмагничивания, выпрямителя экранной сетки, феррорезонансного стабилизатора напряжения накала, цепей управления и защиты. Автогенератор выполнен на тетроиде VL1 по схеме двухконтурного автогенератора. Контур в цепи управляющей сетки лампы, включающий элементы L1, C13–C18, используется для получения обратной связи. В зависимости от рода работы переключатель SA4 устанавливают в одно из следующих положений: ВО – ванна для очистки, ВЛ – ванна для лужения, ПС – для сварочного пистолета, П – для паяльника. Каждому из положений соответствуют свои параметры сеточного контура и, следовательно, частота, приведенная в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Технические характеристики  
ультразвукового оборудования

Параметры	УЗГ-3-04	УЗУ-0,25
Мощность генератора, кВт:		
– выходная	0,4	0,25
– потребляемая	1,1	0,45
Напряжение, В:		
– выходное	20–220	–
– питающее сетевое	220	220
Преобразователь	магнитострикционный	пьезоэлектрический
Частота, Гц:		
– питающей сети	50	50
– генератора:		
в положении ВО	$(17,5–19,3) \cdot 10^3$	$18 \cdot 10^3$
в положении ВЛ	$(20,4–23,0) \cdot 10^3$	–
в положении П и ПС	$(39,6–45,0) \cdot 10^3$	–
Ток подмагничивания, А	2–6	–
Масса, кг	60	30

Анодный колебательный контур образован первичной обмоткой выходного трансформатора TV4 и конденсаторами C9, C10. Напряжение вторичной обмотки трансформатора TV4 через разделительный конденсатор C12 подается на нагрузку и контролируется вольтметром pV.

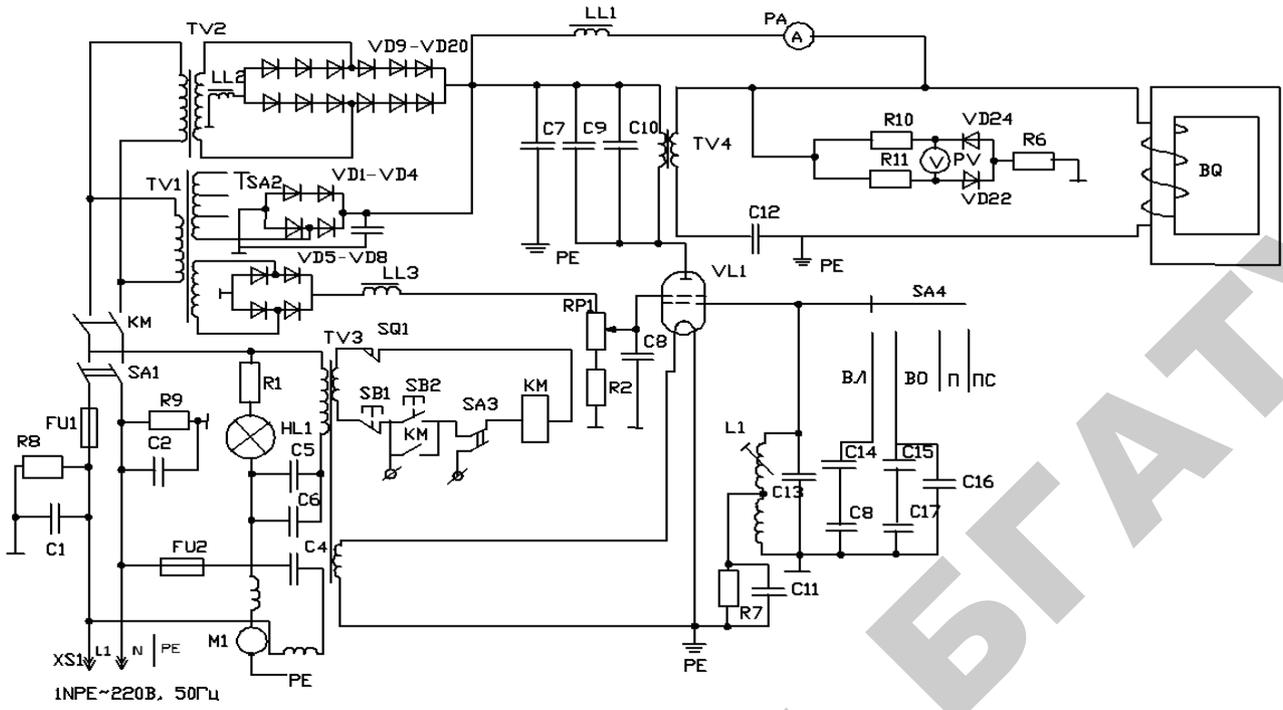


Рис. 14.2. Принципиальная электрическая схема генератора УЗГ-3-04

Выходное напряжение регулируется плавно (переменным резистором RP1) и ступенчато (переключением витков вторичной обмотки TV2). Смещение на управляющую сетку автоматическое, за счет падения напряжения от постоянной составляющей катодного тока на резисторе R7. Анодный выпрямитель собран по однофазной мостовой схеме на выпрямительных столбах VD9–VD20. В каждом плече моста включено по три последовательно соединенных столба. Выпрямитель питает автогенератор выпрямленным напряжением при токе 0,35 А (напряжение 2,5 В). Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения применен фильтр C7, LL2.

Выпрямитель тока подмагничивания служит для обеспечения эффективной работы магнитострикционного преобразователя. Он собран на диодах VD1–VD4 по однофазной мостовой схеме и рассчитан на выпрямленный ток от 2 до 5 А. В схеме предусмотрена ступенчатая регулировка тока подмагничиванием магнитострикционного преобразователя путем постановки пакетного переключателя SA2 в положение, соответствующее подключенному технологическому оборудованию.

Выпрямитель экранной сетки собран по однофазной мостовой схеме на кремниевых диодах VD5–VD8. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения имеется фильтр (LL3, C8). Выпрямленное напряжение регулируют переменным резистором RP1 в пределах от 60 до 220 В.

Для поддержания напряжения накала генераторной лампы и напряжения обмотки реле КМ в допустимых пределах при произвольных изменениях напряжения в сети в генераторе имеется феррорезонансный стабилизатор напряжения. Для стабилизации используется свойство глубокого насыщения сердечника трансформатора TV3. Напряжение накала лампы VL1 подают выключателем SA1. Анодное экранное напряжение и ток подмагничивания включают нажатием кнопки SB2 «Пуск».

Микровыключатель SQ1 служит для защиты от включения высокого напряжения генератора при снятом кожухе.

Выключатель SA3 имеет два положения: «Местное» и «Дистанционное». В первом из этих положений оператор включает колебания с передней панели генератора, а во втором – с места установки технологического оборудования.

Ультразвуковая установка УЗУ-0,25 состоит из генератора и ванны. Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 14.3.

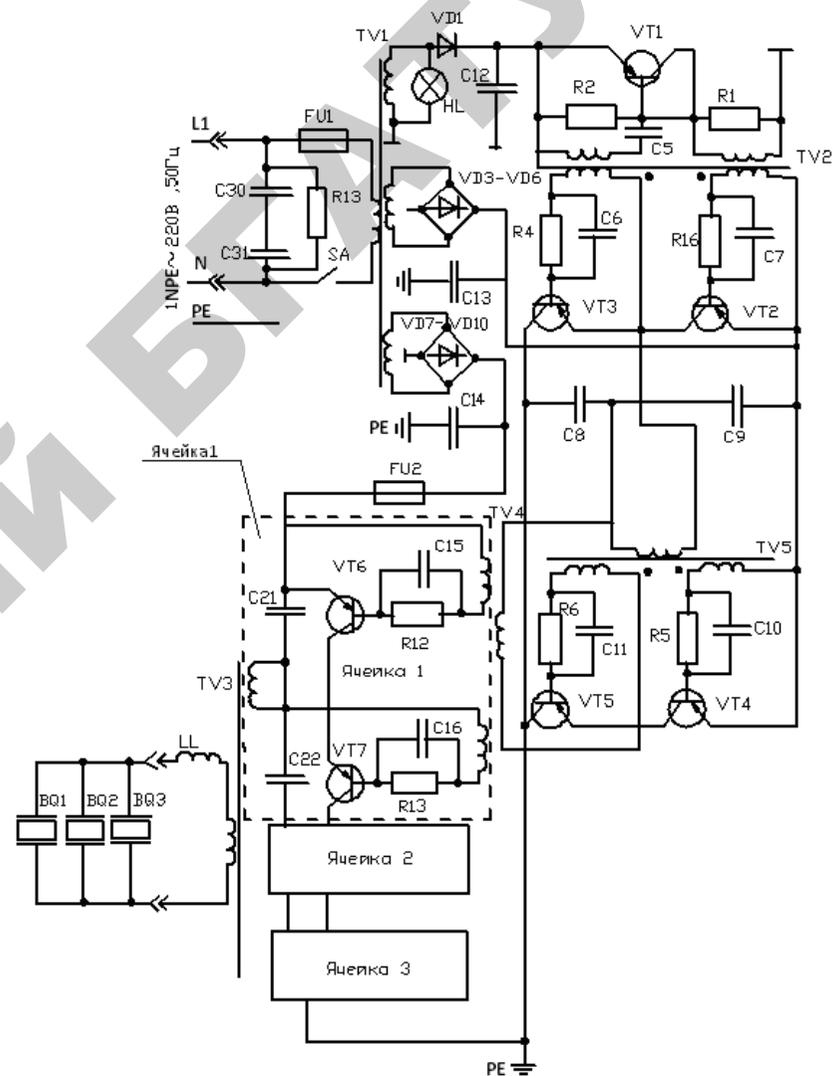


Рис. 14.3. Принципиальная электрическая схема генератора УЗУ-0,25

Включение установки производят выключателем SA. Питание от трансформатора TV1 подается через диод VD1 на задающий генератор, собранный на транзисторе VT1 по схеме с индуктивной обратной связью и колебательным контуром.

Электрические колебания ультразвуковой частоты, возникающие в задающем генераторе, подаются на вход предварительного усилителя мощности трансформатором TV2.

Предварительный усилитель мощности состоит из двух ступеней, одна из которых собрана на транзисторах VT2, VT3, вторая – на транзисторах VT4, VT5. Обе ступени предварительного усиления мощности собраны по последовательно-двухтактной схеме, работающей в режиме переключения. Ключевой режим работы транзисторов позволяет получить достаточно высокий КПД.

Цепи баз транзисторов первой и второй ступеней усиления мощности подключены к отдельным, включенным встречно обмоткам возбуждения TV2, TV5. Это обеспечивает двухтактную работу транзисторов, т. е. поочередное включение.

Автоматическое смещение транзисторов обеспечивается резисторами R3–R6 и конденсаторами C6, C7 и C10, C11, включенными в цепь базы каждого транзистора.

Переменное напряжение возбуждения подается на базу через конденсаторы C6, C7 и C10, C11, а постоянная составляющая базового тока, проходя через резисторы R3–R6, создает на них падение напряжения, обеспечивающее надежное открытие и закрытие транзисторов.

Вторая ступень усилителя мощности состоит из трех ячеек, каждая из которых собрана на двух транзисторах, работающих в режиме переключения. Возбуждение от предварительного усилителя мощности подается на каждый транзистор с отдельной обмоткой трансформатора TV4, причем в каждой ячейке эти напряжения противофазны. С трансформаторных ячеек переменное напряжение подается на обмотки трансформатора TV3, где происходит сложение мощностей, и с выходной обмотки трансформатора напряжение подается на пьезоэлектрические преобразователи BQ1–BQ3.

Так как транзисторы работают в режиме переключения, то выходное напряжение имеет прямоугольную форму, содержащую гармоники. Для выделения 1-й гармоники напряжения на преобразователе к выходной обмотке трансформатора TV3 последовательно с преобразователем включена катушка LL, индуктивность которой рассчитана таким образом, что с собственной емкостью преобразователя она составляет колебательный контур, настроенный на 1-ю гармонику напряжения. Это позволяет получить на нагрузке синусоидальное напряжение, не меняя энергетически выгодного режима транзисторов.

## Методика выполнения работы

Изучение электрических схем и конструкций установок, правил настройки и обслуживания, а также основных применений ультразвука производится предварительно при подготовке к лабораторной работе по рекомендованной литературе и в соответствии с настоящими указаниями.

В данной работе ультразвуковой генератор УЗГ-3-04 укомплектован ванной лужения УЗВЛ-0,4 с магнитострикционным преобразователем, поэтому переключатель SA4 устанавливают в положение ВЛ. Припой помещают в ванночку, соединенную с магнитострикционным преобразователем. Припой плавят с помощью специального (встроенного в УЗВЛ-0,4) электрического нагревателя. В расплавленном припое возбуждаются ультразвуковые колебания, которые снимают окисные пленки со спаиваемых, например, алюминиевых деталей, и надежно их залуживают.

По условиям охраны труда работу с припоем в учебной лаборатории производить нельзя. Вместо припоя в ванночку помещают другой материал (по указанию преподавателя). Для проведения испытаний установка оборудована необходимыми приборами (рис. 14.4). Последовательность операций по вводу установки в работу такова. Посредством штепсельной вилки XS1 и шнура на генератор подают питание от сети 220 В, 50 Гц. Одновременно с включением вилки в сеть начинает работать электродвигатель M1 вентилятора (рис. 14.2).

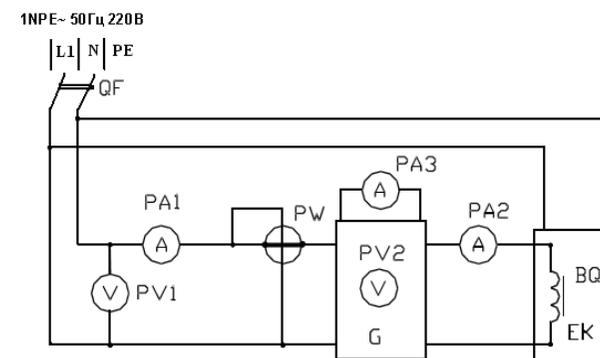


Рис. 14.4. Схема экспериментальной установки:  
G – ультразвуковой генератор УЗГ-3-04; EK – ванна лужения УЗВЛ;  
BQ – обмотка магнитострикционного преобразователя

Выключателем SA1 подают напряжение накала и генераторной лампы VL1, о чем сигнализирует лампочка HL1 «Накал». Через 3–5 минут после включения накала кнопкой SB2 «Пуск» включают высокое напряжение. В исправном генераторе одновременно с включением высокого напряжения должны возникнуть колебания.

При работе с ванной лужения включение генератора в работу осуществляют выключателем «Колебания» на передней панели ванны. При этом переключатель SA3 (см. рис. 14.2) генератора переводят в положение «Д» (дистанционно).

Ручкой RP1 «Регулировка частоты» по минимуму выходного напряжения устанавливают частоту, соответствующую резонансной частоте преобразователя.

Ручкой SA2 «Регулировка напряжения» устанавливают выходное напряжение, контролируемое вольтметром PV2.

После окончания работы выключателем «Колебания» (или кнопкой SB1) выключают напряжение.

Спустя 5 минут после выключения накала генератор отключают от сети, а затем для разрядки конденсаторов C1 и C2 вилку питания замыкают накоротко.

Экспериментальные исследования проводят после выполнения пунктов 1 и 2 задач работы (см. с. 152).

А. Установка с генератором УЗГ-3-04 и ванной лужения УЗВЛ-0,4:

1. Заполнить ванночку для припоя водой (50 г) или другим материалом по указанию преподавателя.

2. Выполнить все операции по вводу установки в работу в последовательности, приведенной выше. Ток подмагничивания (амперметр PA3) не должен превышать 8 А.

3. Включив установку, ручкой RP1 «Регулировка частоты» настраивают генератор на оптимальный режим, устанавливаемый по минимуму выходного напряжения. Параметры, соответствующие оптимальному режиму: силу входного тока  $I_1$  (PA1), потребляемую мощность  $P_1$  (PW), ток подмагничивания  $I_3$  (PA3), входное напряжение  $U_2$  (PV2) и ток  $I_2$  (PA2) – заносят в табл. 14.2 для значений входного напряжения  $U_2$ , указанных ниже.

Таблица 14.2

Энергетические характеристики установок с генератором УЗГ-3-04

Измерено										Вычислено				
$U_1$ , В	$P_1$ , Вт	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$U_2$ , В	$m$ , кг	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$P_{ак}$ , Вт	$\cos\varphi$	$\eta_{ак}$	$\eta_{г}$	$\eta_{у}$	

4. Для оптимального режима работы установить входное напряжение 100, 140, 180, 220 В и при каждом из них обрабатывать («озвучивать») материал в течение 3–10 минут. Температуру обрабатываемого материала измерять термопарой или термометром (в последнем случае ОБЯЗАТЕЛЬНО необходимо отключить ультразвуковые колебания).

5. По результатам измерений определить:

– приближенное значение акустической мощности  $P_{ак}$  преобразователя, полагая, что ультразвуковая энергия, поглощаемая в материале, преобразуется в тепловую:

$$P_{ак} = \frac{mc(t_2 - t_1)}{\tau\eta_{п}}, \quad (14.7)$$

где  $m$  – масса, кг;  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/кг·°С;  $t_1$ ,  $t_2$  – начальная и конечная температуры материала, °С;  $\tau$  – время «озвучивания» материала, с;  $\eta_{п}$  – КПД преобразователя, который можно принять равным 0,54;

– коэффициент мощности установки:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}; \quad (14.8)$$

– мощность, потребляемую преобразователем, полагая, что в оптимальном режиме (при резонансе) сопротивление рабочего колебательного контура и, следовательно, его элемента ВQ (см. рис. 14.2) является активным. В этом случае

$$P_2 = U_2 I_2; \quad (14.9)$$

– акустический КПД  $\eta_{ак}$ , КПД генератора  $\eta_{г}$  и КПД установки  $\eta_{у}$ :

$$\eta_{ак} = \frac{P_{ак}}{P_{г}}; \quad \eta_{г} = \frac{P_2}{P_1}; \quad \eta_{у} = \frac{P_{ак}}{P_1}. \quad (14.10)$$

Построить графические зависимости вычисленных величин (табл. 14.2) в функции выходного напряжения  $U_2$ .

Б. Установка УЗУ-0,25 используется для измерения интенсивности ультразвука и проведения демонстрационных опытов.

Перед включением установки ванну заполняют измеренным количеством воды до уровня 120–130 мм. Включение генератора производят штепсельной вилкой и тумблером SA (см. рис. 14.4).

1. «Озвучить» воду в течение  $\tau = 10\text{--}15$  минут, записав в табл. 14.3 ее массу  $m$ , объем  $V$ , начальную  $t_1$  и конечную  $t_2$  температуры. Плотность энергии (в Дж/м<sup>3</sup>), поглощенной водой:

$$W = \frac{mC(t_2 - t_1)}{V}, \quad (14.11)$$

где  $C = 4190$  Дж/(кг·°C) – удельная теплоемкость воды.

Согласно формулам (14.5) и (14.6), интенсивность ультразвука:

$$I = cW, \quad (14.12)$$

где  $c = 1495$  м/с – скорость ультразвука в воде.

Измерения и вычисления проделать с трехкратной повторностью (табл. 14.3), не меняя воду в ванной.

Таблица 14.3

Плотность ультразвуковой энергии  
и интенсивность ультразвука в ванне установки УЗУ-0,25

Измерено					Вычислено	
$m$ , кг	$V$ , м <sup>3</sup>	$\tau$ , с	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$W$ , Дж/м <sup>3</sup>	$I$ , Вт/м <sup>2</sup>

2. С помощью трубки (капилляра) исследовать поле радиационного давления в ванне. Радиационное давление  $S$  складывается из звукового давления и эффекта взаимодействия ультразвука с невозмущенной средой (дно и стенки емкости, излучатели и др.), оно пропорционально интенсивности ультразвука  $I$ :

$$I = \frac{1}{2} Sc = \frac{1}{2} \rho g h c, \quad (14.13)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – высота уровня жидкости в капилляре над уровнем

в ванне, м. Эти зависимости используют как один из методов измерения интенсивности ультразвуковых колебаний в жидких средах.

3. Поместить в ванну пробирку, заполненную водой и трансформаторным маслом, и наблюдать явление смешивания жидкостей. Пробирку, заполненную маслом, несколько раз энергично встряхнуть, поместить в ванну и наблюдать эффект дегазации жидкости.

#### Содержание отчета:

1. Цель и задачи работы.
2. Электрические принципиальные схемы установок УЗГ-3-04, УЗУ-0,25.
3. Результаты измерений и расчетов.
4. Графические зависимости  $P_{ак}$ ,  $\cos\varphi$ ,  $\eta_{ак}$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_y$  в функции  $U_2$ .
5. Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы:

1. Технологические свойства ультразвука и области применения в сельскохозяйственном производстве.
2. Параметры ультразвукового поля и способы их определения.
3. Физические принципы, на которых основаны ультразвуковые преобразователи.
4. Принципиальная электрическая схема ультразвукового генератора УЗГ-3-04.
5. Принципиальная электрическая схема ультразвуковой установки УЗУ-0,25.

## 15. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** изучить устройство, принцип действия, электрические схемы представленных в лаборатории установок магнитной обработки материалов, приобрести навыки по их обслуживанию.

### Задачи работы:

1. Изучить параметры, характеризующие магнитное поле и определяющие его энергию, технологические свойства, механические действия (силы).

2. Ознакомиться с технологией магнитной очистки зерна, зернопродуктов, кормов, магнитной обработки воды, устройством и принципом действия производственных установок.

3. Изучить технологию магнитной очистки семян, устройство, принцип действия, электрическую схему семяочистительной машины К-295, приобрести навыки по ее обслуживанию.

4. Провести экспериментальное исследование машины К-295 и установить зависимость эффективности ее работы от МДС магнитного отделителя.

### Общие сведения

В установках магнитной обработки материалов для технологических целей используют энергию магнитного поля непосредственно или путем ее преобразования в другие виды (механическую, тепловую, химическую и др.).

Объемная энергия магнитного поля в вещественной среде, Дж/м<sup>3</sup>:

$$W = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu H^2, \quad (15.1)$$

где  $B$  и  $H$  – магнитная индукция (Тл) и напряженность магнитного поля (А/м) – основные величины, характеризующие магнитное поле. Они связаны известной зависимостью

$$\bar{B} = \mu_0 \mu_a \bar{H} = \mu_0 H, \quad (15.2)$$

где  $\mu_0 = 2 \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость вещества, Гн/м;  $\mu = \mu_a / \mu_0$  – относительная магнитная проницаемость вещества.

Основными технологическими свойствами магнитного поля являются: механические (электродинамические) силы поля; электромагнитная индукция; физико-химическое действие; биологическое действие.

В данной работе изучаются установки, основанные на использовании механических сил и физико-химического действия магнитного поля.

Механические силы магнитного поля используются в установках магнитной очистки зерна, зернопродуктов, кормов.

Насыщение сельскохозяйственного продукта средствами механизации приводит к засоренности зерна, продуктов его переработки, кормов различными металлическими (в основном ферромагнитными) предметами и частицами, попадающими в кормоприготовительные машины и пищеварительный тракт животных. Это неблагоприятно сказывается как на работе машин, так и на организме животных. Например, на животноводческих комплексах по откорму молодняка КРС на 10 тысяч голов из потока стебельчатых кормов, в зависимости от способа их закладки и хранения, извлекается в среднем в год от 3000 до 6500 ферромагнитных предметов общей массой от 120 до 180 кг.

Законы механики определяют силу как частную производную энергии по некоторой координате  $x$ , в направлении которой находят силу поля. Прделав эту операцию с выражением (15.1), получим формулу для плотности механических сил поля, Н/м<sup>3</sup>:

$$f = \frac{B}{\mu_0 \mu} \text{grad} B = \mu_0 \mu H \text{grad} H, \quad (15.3)$$

где  $\text{grad} B = \partial B / \partial x$ . Равенство  $\text{grad} B = \text{grad} H$  имеет место лишь в средах, где зависимость  $B = f(H)$  линейна (в неферромагнитных средах). Из формулы (15.3) видно, что механические (пондематорные) силы поля имеют место лишь в неоднородных магнитных полях, так как в противном случае  $\text{grad} B = 0$  и  $f = 0$ .

На тело объемом  $V$  (м<sup>3</sup>) действует сила  $F$ :

$$\bar{F} = \frac{\bar{B}}{\mu_0 \mu} V \text{grad} \bar{B}. \quad (15.4)$$

Установки магнитной очистки различают по назначению (для зерна, комбикормов, стебельчатых кормов и т. д.), виду магнитных систем (с постоянными магнитами, электромагнитами), способу транспортирования материала и др. На рис. 15.1 приведена технологическая схема установки магнитной очистки зерна БКМ2-3.

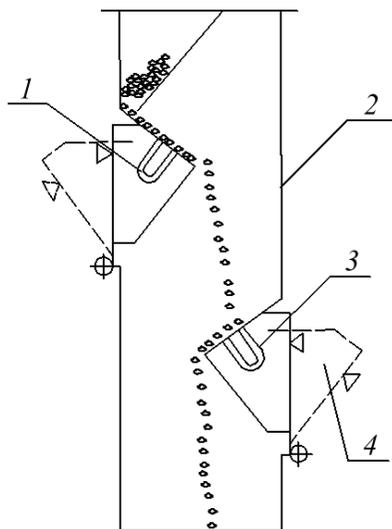


Рис. 15.1. Технологическая схема установки магнитной очистки зерна БКМ2-3:  
1, 3 – магниты; 2 – смотровое окно; 4 – магниты в положении для очистки от металлических частиц

Магнитные колонки типа БКМ (рис. 15.1) имеют модификации БКМ2-1,5; БКМ2-3; БКМП2-3; БКМА2-500 и предназначены для выделения ферромагнитных примесей из продуктов переработки зерна. Первая цифра в марке колонки обозначает число магнитных линий, вторая – длину одной магнитной линии в метрах. Колонки оборудованы постоянными магнитами.

Электромагнитный сепаратор ЭМ-10А предназначен для удаления ферромагнитных примесей и состоит из питающего устройства, электромагнита, механизма очистки магнитных полюсов от примесей, привода. Неподвижный электромагнит питается постоянным током от выпрямителя, мощность которого составляет 0,8 кВт.

Электромагнитный сепаратор А1-ДЭС устанавливают перед дробилками в технологических линиях комбикормовых предприятий. Сепаратор состоит из корпуса, внутри которого расположены питающее

устройство, вращающийся барабан, электромагнитная система, устройство для вывода сырья и ферромагнитных примесей, привода. Ферромагнитные тела притягиваются электромагнитом к вращающейся обечайке из немагнитного материала в нерабочую зону, где экран нейтрализует магнитное поле, и металлические частицы удаляются с помощью щетки. Мощность электромагнита составляет 0,45 кВт.

Установки магнитной очистки семян применяют для отделения семян таких сорняков, как повилика, горчак, василек, лебеда, герань и др., а также от семян культурных растений: клевера, люцерны, льна и других мелкосеменных культур. Обычными, механическими способами их разделить практически невозможно, так как они имеют примерно одинаковую массу, парусность и другие признаки, на которых основано разделение в механических установках. Однако, в отличие от семян культурных растений, имеющих гладкую поверхность, семена сорных растений имеют шероховатую поверхность, обусловленную биологической приспособляемостью видов.

Принцип магнитной очистки семян заключается в том, что в результате предварительной обработки зерновой смеси магнитным порошком шероховатая поверхность семян сорняков легко покрывается частицами ферромагнитного порошка, благодаря чему они притягиваются к магнитам (электромагнитам), на гладкой же поверхности семян культурных растений порошок не удерживается, и магнитное поле на них не воздействует. Для улучшения обволакивания зерновой смеси магнитным порошком при смешивании добавляется масло или вода.

Технические данные некоторых магнитных семяочистительных машин приведены в табл. 15.1, общий вид – на рис. 15.2.

Таблица 15.1

Технические данные магнитных семяочистительных машин

Показатель	ЭМС-1А	СМЦ-0,4	К-295
1. Производительность, кг/ч:			
по клеверу	180–200	400	10
по льну	–	500	15
2. Расход (в % к массе неочищенных семян):			
магнитного порошка	1–2,5	1,1–2,5	0,3–1,3
воды	–	0,2–1,1	–
масла	–	0,025–0,07	–

Окончание табл. 15.1

Показатель	ЭМС-1А	СМЩ-0,4	К-295
3. Чистота очистки, %	95–96	98	96–98
4. Магнитная система	Электромагнит	Постоянный магнит	Электромагнит
5. Установленная мощность, кВт	2,5	2,6	0,27
6. Масса, кг	1100	806	165

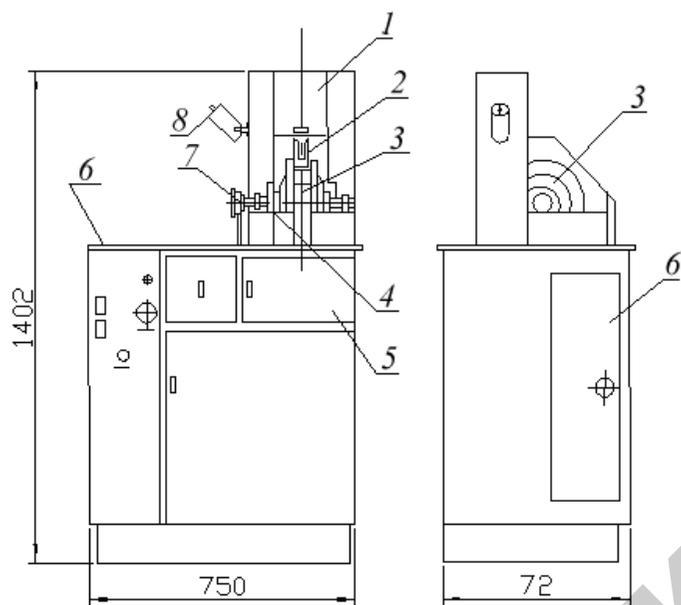


Рис. 15.2. Электромагнитная сеяочистительная машина К-295:

1 – загрузочный бункер; 2 – вибратор; 3 – магнитный барабан; 4 – привод барабана; 5 – ящики классификатора; 6 – панель управления; 7 – токопровод электромагнита; 8 – смеситель семян с магнитным порошком

Технологический процесс во всех типах машин идентичен (рис. 15.3, а): в семенную смесь добавляют воду (или масло), магнитный порошок, все перемешивают и подают на магнитный барабан. Далее процесс протекает, как упоминалось выше. Машины различаются лишь степенью механизации операций и производительностью.

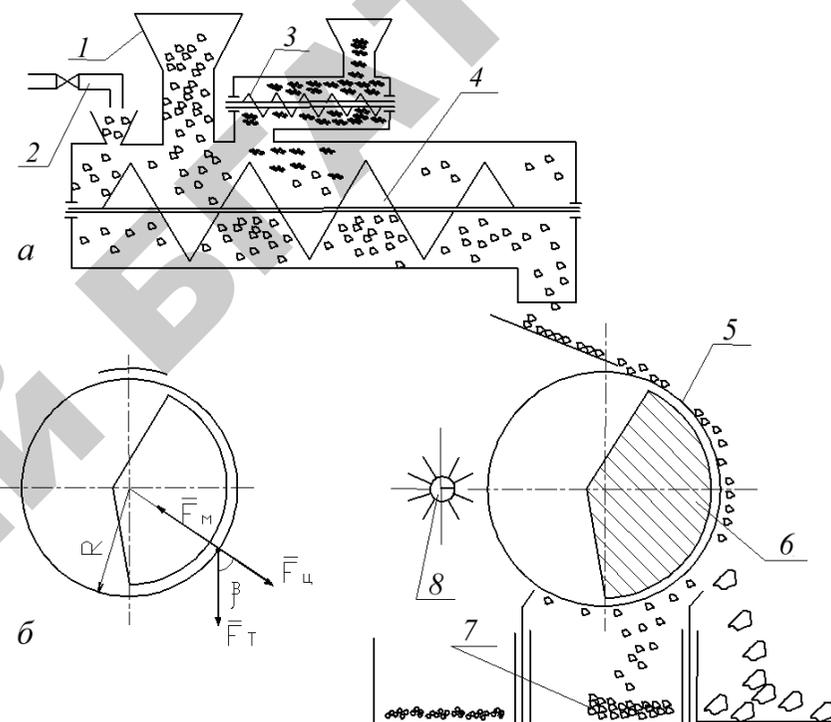
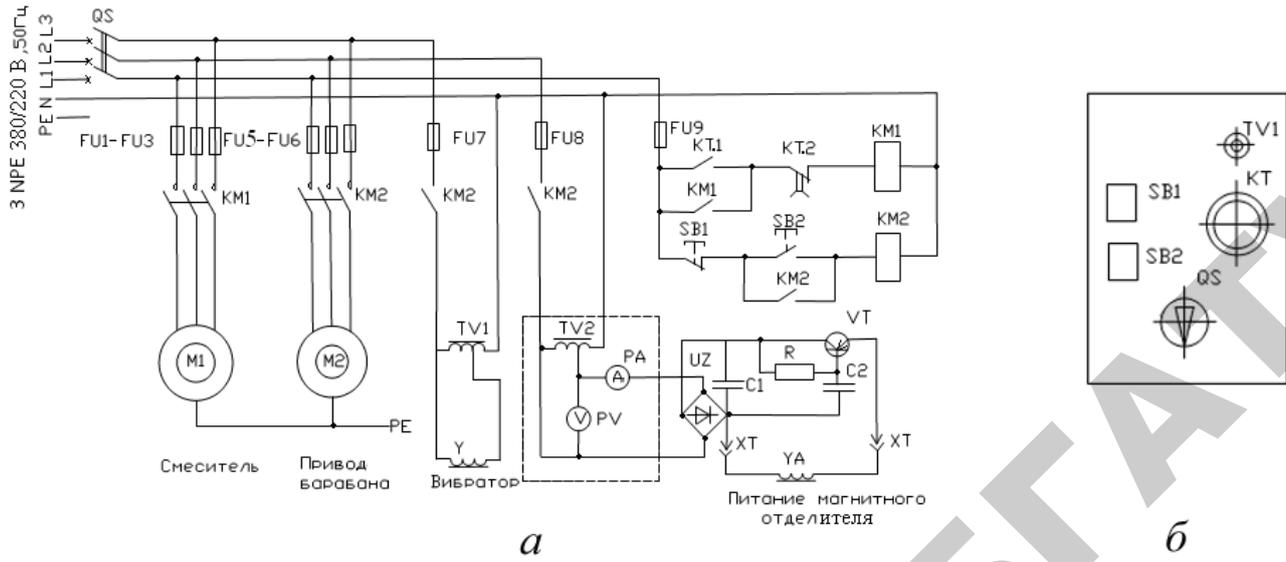


Рис. 15.3. Технологическая схема магнитной сеяочистительной машины (а) и схема сил, действующих на семя, покрытое магнитным порошком (б): 1 – бункер с зерновой смесью; 2 – подача воды; 3 – подача магнитного порошка; 4 – смешивающий шнек; 5 – барабан; 6 – неподвижный магнитный сектор; 7 – классификатор фракции зерновой смеси; 8 – щетка

В лаборатории представлена машина К-295 (рис. 15.2) небольшой производительности, предназначенная для селекционных центров. Зерновую смесь засыпают в сосуд для смешивания 8, впрыскивают воду, добавляют магнитный порошок. Приготовленную смесь засыпают в загрузочный бункер 1.

Электрическая схема машины приведена на рис. 15.4. Вибратор У обеспечивает подачу смеси на барабан. Интенсивность вибрации регулируют автотрансформатором TV1, ручка которого выведена на лицевую сторону панели управления.



Примечание. Узел, обведенный пунктиром, введен для целей исследования машины, КТ – механическое реле времени.

Рис. 15.4. Принципиальная электрическая схема магнитной сеячистой машины К-295 (а) и расположение ее элементов управления (б)

Питание магнитного барабана осуществляется от выпрямителя UZ, имеющего на выходе фильтр из конденсатора C1 и узла, собранного на транзисторе VT, резисторе R и конденсаторе C2. Питание подводится к катушке электромагнита с помощью щеток и колец ХТ. Время работы смесителя задают механическим реле времени КТ путем вращения часовой стрелки крышки-задатчика, выведенной на панель управления. После поворота задатчика на некоторый угол, соответствующий задаваемому времени, замыкается контакт КТ.1, получает питание КМ1 и включается электродвигатель смесителя М1. Отключение после отработки заданного времени производится контактом КТ.2. Пуск и остановку магнитного барабана и одновременно с ним подачу питания в вибратор и электромагнит YA осуществляют кнопками SB1 и SB2, выведенными на лицевую сторону панели управления. Смесь по лотку вибратора подается на барабан магнитного отделителя, где происходит разделение семян. Разделенные семена попадают в классификационные отсеки ящика 5 (рис. 15.2), из которого в последующем извлекаются и подвергаются качественному и количественному анализу.

По санитарным условиям применение порошка в условиях учебной лаборатории не рекомендуется (мелкий железный порошок засоряет приборы и оборудование, вследствие чего для обслуживающего персонала требуется использовать спецодежду), поэтому работа производится с относительно крупными металлочастицами. Принципы работы машины и физические основы процесса при этом не меняются.

На семя, находящееся на поверхности вращающегося магнитного барабана, действуют следующие силы (рис. 15.3, б):

– сила тяжести:

$$F_T = mg, \quad (15.5)$$

где  $m$  – масса семян с порошком, кг;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;

– центробежная сила:

$$F_{ц} = \frac{mv^2}{R}, \quad (15.6)$$

где  $v$  – линейная скорость барабана, м/с;  $R$  – радиус барабана, м;

– сила, удерживающая семя, покрытое магнитным порошком:

$$F_M = \frac{m_{п}}{\rho} \cdot \frac{B}{\mu_0 \mu} \text{ grad} B, \quad (15.7)$$

где  $m_{п}$  – масса порошка на семени, кг;  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>.

Условие удержания семени на барабане:

$$F_M > F_T \cos \beta + F_{ц}. \quad (15.8)$$

Неравенство (15.8) служит основой для расчета параметров установок магнитной очистки материалов.

Установки магнитной обработки воды основаны на использовании физико-химического действия магнитного поля и предназначены для «умягчения» технической воды с высокой концентрацией растворенных солей. Процесс магнитной обработки воды заключается в пропускании ее через рабочий зазор установки, в котором создают магнитные поля чередующейся направленности. Под действием знакопеременного магнитного поля определенных параметров в движущейся воде происходит ряд сложных физико-химических изменений, в результате которых при нагреве такой воды в энергетических установках (водонагревателях, водогрейных и паровых котлах и др.) на их греющих поверхностях (а также на электродах при прямом нагреве воды) не образуется трудноудаляемая накипь. Это существенно повышает экономические показатели установок, увеличивает сроки их службы. Считается, что под действием поля ионы растворенных в воде солей образуют центры кристаллизации. При использовании необработанной воды центры кристаллизации находятся на греющих поверхностях установок, где там отлагаются соли, образующие накипь. Обработанная в магнитном поле вода обладает и другими биологическими качествами, например, при поливе растений такой водой, замачивании семян и т. п. возрастает энергия прорастания, урожайность культур и др.

Эффективность магнитной обработки воды зависит от напряженности магнитного поля, количества знакопеременных магнитных зон, пересекаемых потоком воды, скорости движения воды в рабочем зазоре аппарата, состава воды и др. После воздействия магнитного поля в последующем наблюдается ослабление приобретенных свойств, и способность воды к накипобразованию становится такой же, как и у необработанной. Период релаксации

составляет 18–24 часа. Параметры аппаратов устанавливают, в основном, экспериментально. К ним относятся:

- напряженность магнитного поля, А/м  $(120–150) \cdot 10^3$ ;
- скорость воды в зазоре, м/с 0,5–2;
- длина пути воды в магнитном поле, м 0,15–0,55;
- величина зазора для протекания воды, мм 9,5–10.

Удельная установленная мощность электромагнитов для обработки воды составляет 10–40 Вт/м<sup>3</sup>.

Устройство для магнитной обработки воды выполняют с постоянными магнитами и электромагнитами. Первые проще конструктивно, однако с течением времени наблюдается их размагничивание, особенно при неблагоприятных условиях эксплуатации (механических ударах, сильном нагреве).

На рис. 15.5 приведена схема электромагнитного аппарата и его включение в сеть питательной воды энергетических установок. Магнитный сердечник 3 с обмоткой подмагничивания 4 помещен в латунный кожух 2 и залит трансформаторным маслом. Образующиеся магнитные потоки чередующейся полярности замыкаются через воду и внешний стальной корпус 1. Питание установки осуществляется от блока питания 9.

При определении места установки аппарата стремятся к тому, чтобы путь воды после обработки до защищаемого от накипи оборудования был наиболее коротким. Для исключения образования в аппаратах воздушных пузырей его следует устанавливать вертикально, с направлением движения воды снизу вверх.

### Методика выполнения работы

1. Пункты 1 и 2 задач работы (см. с. 167) выполняют при подготовке к занятиям, используя рекомендованную литературу, конспект лекций, настоящие методические указания.

2. Пункт 3 выполняют при подготовке к занятиям и на рабочем месте путем практического изучения устройства, его работы, электрических схем, правил обслуживания представленных в лаборатории установок. Зарисовывают технологическую схему процесса очистки семян и схему действующих на частицу сил (рис. 15.3), электрическую схему машины К-295 (рис. 15.4), разрез аппарата магнитной обработки воду (рис. 15.5).

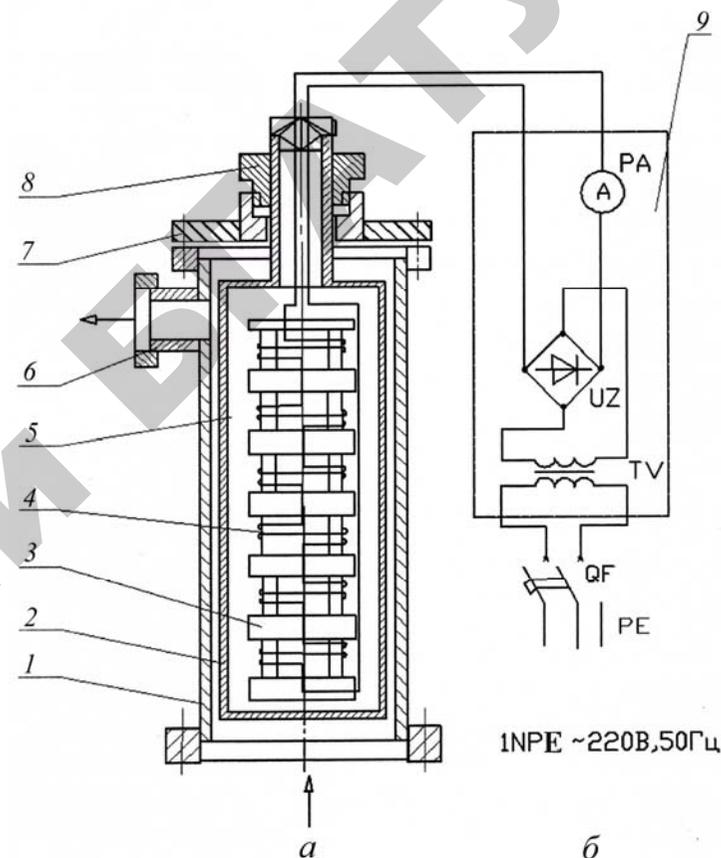


Рис. 15.5. Схема электромагнитного аппарата

для обработки воды (а) и схема включения его в сеть (б):

- 1 – стальной корпус; 2 – латунный кожух; 3 – магнитный сердечник;
- 4 – обмотка подмагничивания; 5 – трансформаторное масло; 6 – выходной патрубок; 7 – крышка; 8 – гайка уплотнения; 9 – блок питания

3. Экспериментальные исследования выполняют после усвоения порядка обслуживания машины, правил техники безопасности и получения разрешения преподавателя на включение.

Обработку смеси зерна с металломагнитными частицами проводят при различной МДС магнитного отделителя путем изменения силы тока  $I$ , подаваемого в катушку электромагнитного барабана ( $W_m = IN$ , где  $N$  – число витков катушки). При этом изменяется

магнитная индукция  $B$  системы и в соответствии с формулой (15.7) величина магнитной силы  $F_m$ , удерживающей металломагнитную частицу на поверхности барабана. В зависимости от величины силы  $F_m$  частицы попадают в ту или иную секцию классификатора фракции зерновой смеси 7 (см. рис. 15.3). Силу тока в обмотке электромагнита регулируют автотрансформатором TV2 (рис. 15.4).

Последовательность выполнения операций с машиной К-295.

1. Взвесить 100 г незасоренного зерна и 50 г металлических частиц, смешать их и высыпать в приемный бункер.
2. Отрегулировать зазор вибратора-питателя 2 (рис. 15.2), обеспечивающий свободную подачу зерновой смеси в один слой.
3. С разрешения преподавателя включить машину, опробовать ее в работе, освоить операции обслуживания, подготовиться к проведению основных опытов.
4. Очистить машину от зерна и частиц, перемешать содержимое всех секций классификатора, взвесить смесь и данные внести в табл. 15.2.

Таблица 15.2

Влияние напряжения на сортировку семян

Режим обработки		Общая масса смеси, г	Распределение материала по классам				
U, В	I, А		I		II		
			г	%	г	%	

5. Установить автотрансформатором TV2 силу тока, указанную преподавателем.
6. Засыпать смесь в бункер, включить машину и произвести очистку зерна от металлических частиц.
7. После обработки взвесить содержимое каждой секции классификатора и записать в табл. 15.2.
8. Повторить опыты при других значениях тока, указанных преподавателем. После завершения опытов очистить машину, зерно и металлические частицы поместить в емкости для их хранения, убрать рабочее место.

Данные табл. 15.2 выразить в процентах от суммарной массы смеси до обработки ( $K_i, \%$ ) и построить зависимость  $K_i = f(I)$  для всех классов зерновой смеси.

**Содержание отчета:**

1. Цель и задачи работы.
2. Принцип устройства аппаратов магнитной очистки зерна.
3. Технологическая и электрическая схемы машины К-295.
4. Силы, действующие на частицу с порошком в магнитном поле.
5. Таблицы наблюдений и вычислений.
6. Графические зависимости.
7. Выводы по работе.

**Контрольные вопросы:**

1. Технологические свойства магнитного поля.
2. Принцип магнитной очистки зерна, зернопродуктов, кормов.
3. Устройство, принцип действия и электрическая схема электромагнитной семяочистительной машины К-295.
4. Силы, действующие на семя, покрытое магнитным порошком в машинах магнитной очистки семян.
5. Принцип и назначение магнитной обработки воды.

## ЛИТЕРАТУРА

ДЛЯ ЗАМЕТОК

1. Электротермическое оборудование : справ. / под ред. А. П. Альтгаузена. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергия, 1980. – 416 с.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В. А. Волосатова. – Л. : Машиностроение, 1988. – 719 с.
3. Электротехнология : учеб. пособие / В. А. Карасенко [и др.]. – М. : Колос, 1992. – 304 с.
4. Электротермическое оборудование сельскохозяйственного производства : учеб. пособие / Л. С. Герасимович [и др.]; под ред. Л. С. Герасимовича. – Мн. : Ураджай, 1995. – 416 с.
5. Расчеты электротехнологического оборудования : учеб. пособие / Е. М. Заяц, В. А. Карасенко, И. Б. Дубодел; под ред. Е. М. Зайца. – Минск : Технопринт, 2001. – 238 с.
6. Электротехнологические установки : практикум к лабораторным работам по дисциплине «Электротехнология» / Е. М. Заяц, В. А. Карасенко; под ред. Е. М. Зайца. – Минск : Технопринт, 2002. – 186 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

Учебное издание

## ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

*Лабораторный практикум*

Составители:

**Зяц** Евгений Михайлович,  
**Карасенко** Владимир Алексеевич,  
**Дубодел** Инесса Борисовна и др.

Ответственный за выпуск И. Б. Дубодел  
Редактор Ю. П. Каминская  
Компьютерная верстка Ю. П. Каминской  
Дизайн обложки И. А. Усенко

Подписано в печать 28.12.2010. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 10,23. Тираж 250 экз. Заказ 1232.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
ЛИ № 02330/0552841 от 14.04.2010.  
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.