

Министерство общего и профессионального образования РФ  
Нижегородский государственный технический университет  
Кафедра электрооборудования судов

**Тихомиров В.А.**

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СВАРОЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

Курс лекций

Нижний Новгород  
1999 год

# Содержание

## Введение

1. Электрооборудование для дуговой сварки
  - 1.1. Физические процессы в дуговом промежутке
  - 1.2. Зависимость напряжения дуги от длины дуги
  - 1.3. Зависимость напряжения дуги от тока
  - 1.4. Динамические характеристики
  - 1.5. Эластичность дуги
  - 1.6. Дуга переменного тока
    - 1.6.1. Питание дуги от источника с жесткой характеристикой
    - 1.6.2. Включение в сварочную цепь линейной индуктивности
    - 1.6.3. Устойчивость горения сварочной дуги при включении в сварочный контур индуктивности и емкости
    - 1.6.4. Динамическая характеристика сварочной дуги переменного тока.
  - 1.7. Трехфазная сварочная дуга.
  - 1.8. Требования к источникам питания
  - 1.9. Режимы работы источников питания (ИП)
  - 1.10. Единая система обозначений (ЕСО)
  - 1.11. Классификация источников питания
  - 1.12. Источники питания сварочной дуги переменного тока
  - 1.13. Сварочные выпрямители
    - 1.13.1. Конструкция трансформаторов в составе выпрямителей
    - 1.13.2. Схемы выпрямления
    - 1.13.3. Выпрямители, управляемые трансформаторы
    - 1.13.4. Тиристорные и транзисторные выпрямители
    - 1.13.5. Выпрямители с дросселем насыщения
    - 1.13.6. Инверторные выпрямители
  - 1.14. Многопостовые выпрямительные системы
    - 1.14.1. Источники с постовыми полупроводниковыми устройствами
    - 1.14.2. Постовой полупроводниковый регулятор
    - 1.14.3. Сварочные однопостовые генераторы постоянного тока
  - 1.15. Специализированные источники питания сварочной дуги
    - 1.15.1. Вспомогательные устройства
    - 1.15.2. Источник для сварки неплавящимся электродом

- 1.15.3. Источник питания дуги переменного тока промышленной частоты с реактивным сопротивлением в сварочном контуре
- 1.16. Полуавтоматы для дуговой сварки
- 1.17. Автоматы для дуговой сварки
- 2. Оборудование контактной сварки
  - 2.1. Образование сварных соединений
  - 2.2. Машины контактной сварки.
    - 2.2.1. Основные требования, предъявляемые к контактными машинам.
    - 2.2.2. Электрическая силовая часть машины
    - 2.2.3. Однофазная машина переменного тока
    - 2.2.4. Трехфазные низкочастотные машины
    - 2.2.5. Трехфазные машины постоянного тока (с выпрямлением тока во вторичном контуре)
    - 2.2.6. Конденсаторные машины.
  - 2.3. Аппаратура управления машинами контактной сварки
    - 2.3.1. Аппаратура для включения и регулирования сварочного тока
    - 2.3.2. Аппаратура для управления циклом сварки контактных машин
    - 2.3.3. Синхронные прерыватели
- 3. Установки для плазменной сварки

## Введение

Дисциплина «Электрооборудование сварочного производства» относится к базовым инженерным дисциплинам специальности 180500 «Электротехнологические установки и системы».

Целью изучения дисциплины является освоение принципов действия устройства и назначения электрооборудования, используемого в сварочном производстве.

В результате изучения дисциплины студенты приобретают знания типов основного оборудования, используемого в сварочном производстве, приобретают умения и навыки проведения выбора и расчета электрооборудования. Изложение содержания дисциплины базируется на изученных и освоенных ими ранее дисциплинах электротехнического цикла, элементах автоматики, электроники и преобразовательной техники.

## 1. Электрооборудование для дуговой сварки

Сваркой называется процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и расплавлении или пластическом деформировании. При электродуговой сварке для нагрева и плавления соединяемых металлов используется энергия электрического дугового разряда, возбуждаемого и поддерживаемого в пространстве между электродом и деталью. Энергия берется от электрической сети или от двигателей внутреннего сгорания.

При питании от электрической сети используются преобразователи:

1. Сварочные трансформаторы 380В/60В (понижающий).
2. Трансформатор + выпрямитель.

У сварочных трансформаторов стремятся уменьшить габариты и массу.

Источники с двигателями внутреннего сгорания - сварочные дизель - генераторы получили меньшее распространение.

Для источника питания дуга является нагрузкой. Пространство между электродом и изделием называется межэлектродным пространством (МЭП). Для создания проводимости в МЭП надо чтобы в электрическом поле имелись свободные электроны, ионизирующие дуговой промежуток и обеспечивающие первоначальное возбуждение дуги. Это достигается либо контактным способом касанием изделия сварочным электродом, либо бесконтактным с помощью осциллятора при сварке неплавящимся электродом.

Различают два принципа сварки: 1) плавление и сварка металлов неплавящимся угольным электродом с дополнительной присадочной проволокой; 2) плавление и сварка металлов плавящимся металлическим электродом, который сам служит присадочной проволокой. Проволока электрода имеет определенный химический состав и покрыта специальной обмазкой. Благодаря обмазке расплавленный металл покрывается шлаками и газами, образующимися при расплавлении обмазки. Обмазка и газы предохраняют расплавленный металл от вредного влияния воздуха и обеспечивает требуемый состав и механические свойства сварного соединения.

Для предохранения расплавленного металла от контакта с воздухом применяется также сварка в защитном газе, подаваемом в зону сварки специальным устройством. Неплавящийся электрод изготавливается из вольфрамового прутка с температурой плавления

4500 град. С, а в качестве защитного газа используется аргон. При аргонодуговой сварке с помощью специальной горелки в зону сварки подается газ и присадочный металл. При сварке плавящимся электродом в качестве защитного газа используют углекислый газ. Плавящийся электрод в этом случае представляет собой тонкую проволоку, подаваемую по шлангу вместе с газом в зону сварки специальным механизмом.

На дугу действуют возмущения. Стабильная дуга обеспечивается постоянной длиной дуги, скоростью сварки и перпендикулярным положением электрода к поверхности. Все что отклоняет ее – возмущения:

1. Изменение длины дуги (т. е. изменяется напряжение, ток и получается некачественный шов).
2. Колебания напряжения сети (при питании от электрической сети).
3. Изменение скорости подачи проволоки (при сварке в  $\text{CO}_2$  плавящимся электродом).
4. Физические условия в разрядном промежутке (влажность, атмосферные воздействия, ржавчина на проволоке, и т. д. ).

Виды дуги:

1. Непрерывная (на постоянном или переменном токе, когда ток течет непрерывно).
2. Импульсная.

## 1.1 Физические процессы в дуговом промежутке

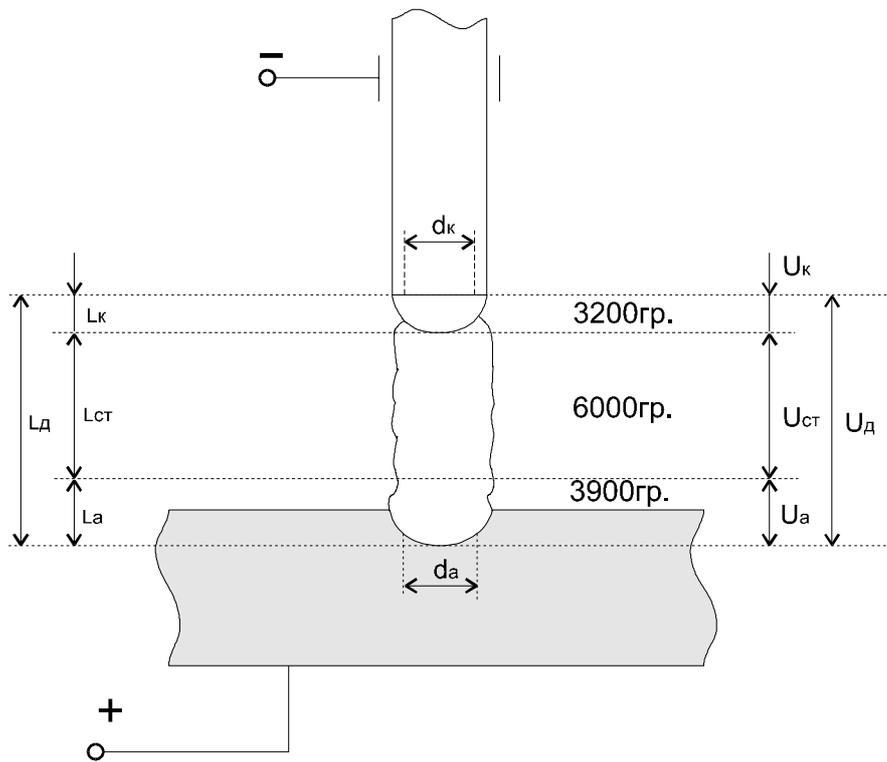
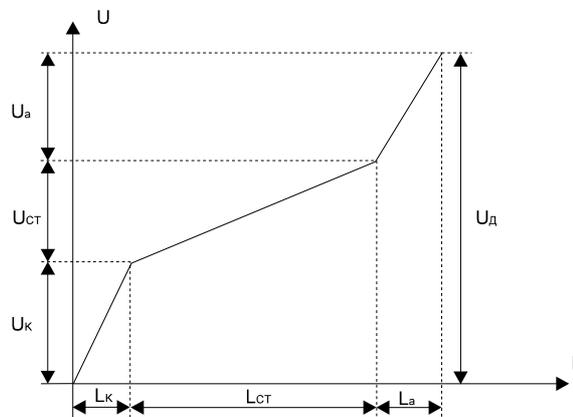


Рисунок 1 - Дуговой промежуток

Столб дуги – ионизированный газ, содержащий нейтральные атомы и молекулы газов и паров, свободные электроны и положительные ионы, возникающие при ионизации газов. Сварочный ток – ток проводимости обусловленный упорядоченным движением свободных электронов. Дуговой промежуток изображен на рисунке 1. На рисунке 2 показано распределение потенциалов по длине дуги.



## Рисунок 2 – Распределение потенциалов по длине дуги

Под действием тока создается магнитное поле, которое действует на заряженные частицы с силой  $F$ . Направление силы определяется по правилу левой руки. При искривлении магнитного поля направление силы  $F$  изменяется. Радиальная составляющая силы при любом направлении тока направлена перпендикулярно к оси столба дуги и оказывает сжимающее действие на столб дуги (пинч-эффект). Сила, действующая вдоль столба дуги, направлена на отрыв капли от электрода. Изменение полярности дуги не изменяет направление  $F$ .

### 1.2 Зависимость напряжения дуги от длины дуги

$$U_d = \frac{I}{\gamma * S_{CT}} * l_d \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\delta_{CT}}{E}, \quad (3)$$

т. е.  $U_d = a + K_d * l_d$ , где  $a = U_K + U_a$ ;

$\gamma$  - отношение плотности тока в столбе дуги к напряженности;  
 $S_{CT}$  - площадь столба дуги.

Полагается, что  $S_{CT}$  и сварочный ток ( $I$ ) постоянны.

Для малоамперных дуг зависимость  $U_d = f(l_d)$  нелинейна.

### 1.3 Зависимость напряжения дуги от тока

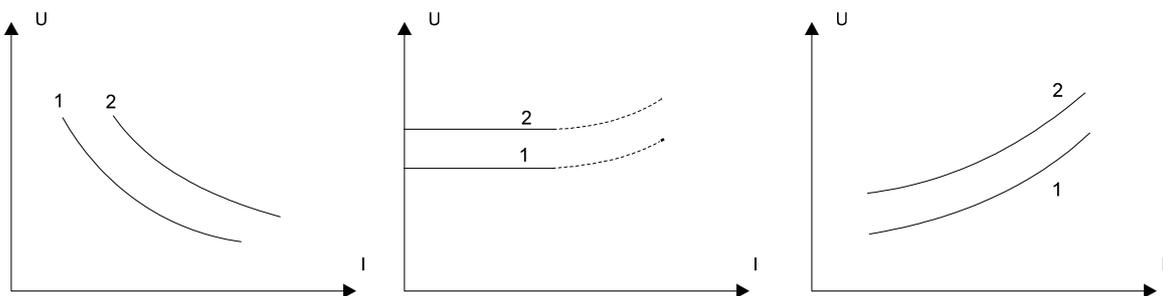


Рисунок 4

1 – для меньших  $l_d$  и проводимостей, т. е.  $l_{d1} < l_{d2}$  и  $G_{d1} < G_{d2}$ .

Вид внешних характеристик показан на рисунке 4.

Падающие характеристики – свободные малоамперные дуги, горящие в атмосфере воздуха и в среде аргона, при токе 70÷80 А.

Причина снижения  $U_d$  – уменьшение  $U_{CT}$  (т. е.  $U_k$  и  $U_a$  постоянны, а  $U_{CT}$  уменьшается). С ростом тока происходит ионизация и увеличение  $S_{CT}$ . Поэтому проводимость дуги увеличивается, а  $R_{\text{дифференциальное}} < 0$ .

Жесткие характеристики – сварочные дуги с токами более 80 А. При ручной дуговой и механизированной сварке под флюсом с током 300÷400 А ВАХ дуги полого возрастающая.

Круто возрастающая – при сварке плавящимся электродом в  $CO_2$  и сжатой дугой в среде аргона неплавящимся электродом.

## 1.4 Динамические характеристики

Форма динамических ВАХ определяется в основном свойствами источника питания. С помощью динамических ВАХ определяется пригодность данного источника для питания данной дуги.

Рассмотрим устойчивость системы «источники питания – дуга – ванна».

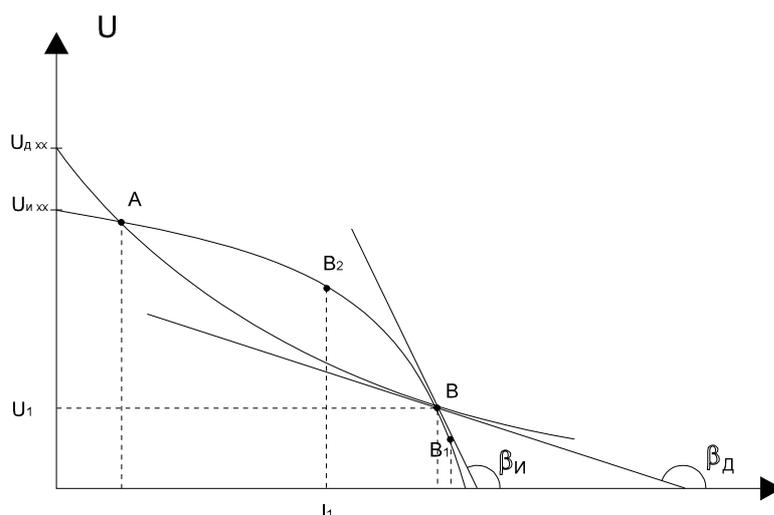


Рисунок 5

Точка А и точка В – равновесное состояние когда  $U_{и} = U_{д}$  (рисунок 5).

Рассмотрим точку В.

Пусть под воздействием факторов напряжение дуги меняется. Пусть  $U_{д}$  уменьшается (т. В<sub>1</sub>). В ней  $U_{д} < U_{и}$ , а  $I_{д} = I_{и}$  и из этого следует, что  $P_{и} > P_{д}$ , поэтому напряжение на дуге будет увеличиваться, чтобы поглотить излишнюю мощность (точка В).

Пусть  $U_{д}$  увеличивается (т. В<sub>2</sub>).  $U_{д} > U_{и}$ , поэтому  $P_{и} < P_{д}$ , следовательно напряжение дуги будет уменьшаться до точки В.

В точке А при отклонении процесса в любую сторону он будет продолжать развиваться (т. е. наоборот). Устойчивость характеризуется коэффициентом устойчивости:

$$K_y = R_{\text{оуф}} - R_{\text{иоуф}} = \left( \frac{dU_d}{dI} - \frac{dU_u}{dI} \right) > 0, \quad (4)$$

т. е.  $\beta_{\text{и}}$  должна быть больше  $\beta_{\text{д}}$ .

$\beta_{\text{и}} > \beta_{\text{д}}$  – условие устойчивости дуги при отсутствии корректирующих связей. Однако практика показывает, что при питании от источника с жесткой или полого возрастающей характеристикой процесс протекает более устойчиво, чем при питании от источников с падающей и полого падающей характеристикой.

Причины:

1. При выводе условия устойчивости не была учтена инерционность источника энергии.
2. Не учитывалось явление саморегулирования сварочной дуги.
3. Фактически процесс сварки плавящимся электродом заменен процессом сварки с неплавящимся электродом.

Т.о. при сварке под флюсом устойчивость горения дуги выше, если источник питания обладает жесткой или возрастающей характеристикой.

## 1.5 Эластичность дуги

Дуга считается эластичной, если дуговой разряд продолжает существовать при значительном увеличении длины дуги  $l_d$ . Критерием эластичности является наибольшая длина дуги  $l_{\text{д}}$ , к которой можно получить без ее обрыва.

Если электромагнитная инерция источника незначительна, а его динамические свойства высоки, то при уменьшении тока и увеличении длины дуги, быстро увеличивается ЭДС источника, благодаря чему увеличивается его выходное напряжение, напряжение на разрядном промежутке и напряженность электрического поля в нем. Таким образом, сохраняются условия для поддержания дугового разряда.

При уменьшении тока возрастает ЭДС самоиндукции, которая приводит к увеличению напряженности электрического поля разрядного промежутка.

## 1.6 Дуга переменного тока

### 1.6.1 Питание дуги от источника с жесткой характеристикой

Принципиальная схема источника приведена на рисунке 6.

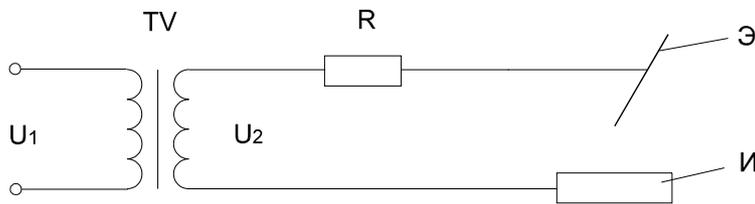


Рисунок 6

График изменения величин изображен на рисунке 7.

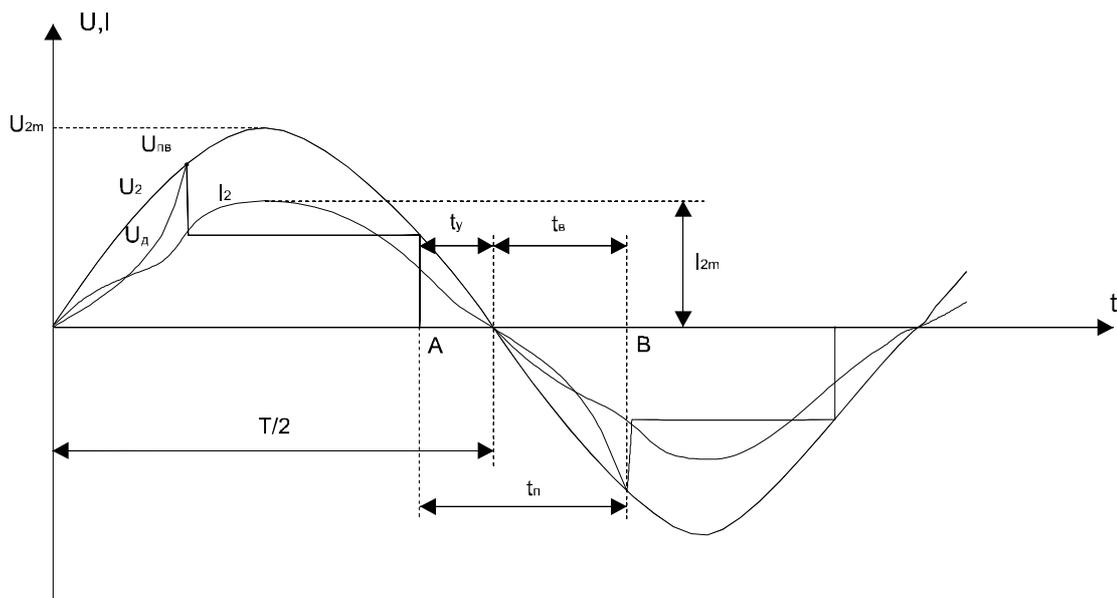


Рисунок 7

$I_2$  – мгновенное значение сварочного тока.

В точке А дуга гаснет и повторно зажигается в точке В (рисунок 7).

$t_n$  – время перерыва горения дуги;  $t_y$  – время угасания;  $t_b$  – время возбуждения. На интервале  $t_n$   $I_2 \neq 0$ , т.к. в дуговом промежутке активное пятно катода еще способно излучать электроны и еще продолжают существовать плазменные потоки. В дуговом промежутке наблюдается тлеющий разряд, а не дуговой.

Нелинейность графиков  $I_2$  и  $U_d$  объясняется тем, что нагрузкой трансформатора является нелинейная среда разрядного промежутка. Первоначальное возбуждение осуществляется при большом напряжении. Напряжение  $U_{пв}$  – напряжение повторного возбуждения дуги зависит от физико-химических свойств среды между изделием и электродом. Стремятся уменьшить  $t_{п}$ . Это можно сделать:

1. Изменением физико-химических свойств среды.

Надо вводить элементы, обладающие низким потенциалом ионизации. Это осуществляется путем покрытия слоем, содержащем требуемые элементы. При механизированной сварке вводить их в состав флюса или фитиля, находящегося внутри полой порошковой проволоки.

2. Изменением свойств источника питания.

а) Повышение частоты питания.

Экспериментально установлено оптимальное значение частоты, которая составляет 250-450 Гц. Но сварочная дуга повышенной частоты издает резкий звенящий звук и неблагоприятно воздействует на сварщика.

б) Увеличение вторичного напряжения сварочного трансформатора.

Для ручной дуговой сварки плавящимся электродом для устойчивого горения дуги необходимо выполнение следующего условия:

$\frac{U_{2хх}}{U_d} \approx 1.8 \div 2.5$ . Но увеличение напряжения уменьшает

безопасность работы с источником питания.

в) Увеличение индуктивного сопротивления сварочного контура .

г) Использование осцилляторов и импульсных источников.

### 1.6.2 Включение в сварочную цепь линейной индуктивности

Источник питания имеет жесткую характеристику, но в цепь включается линейная индуктивность, не зависящая от тока  $R \ll L$  - рисунок 8.

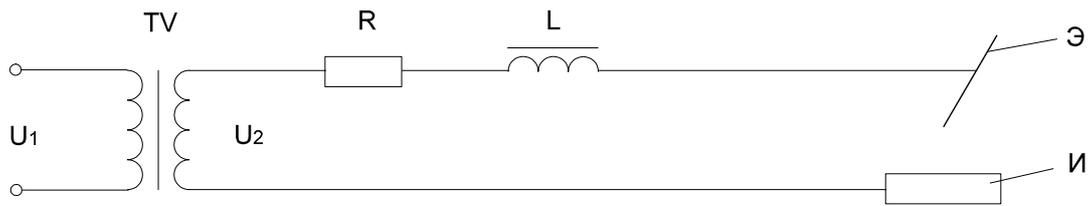


Рисунок 8

На рисунке 9 показаны диаграммы для этой цепи.

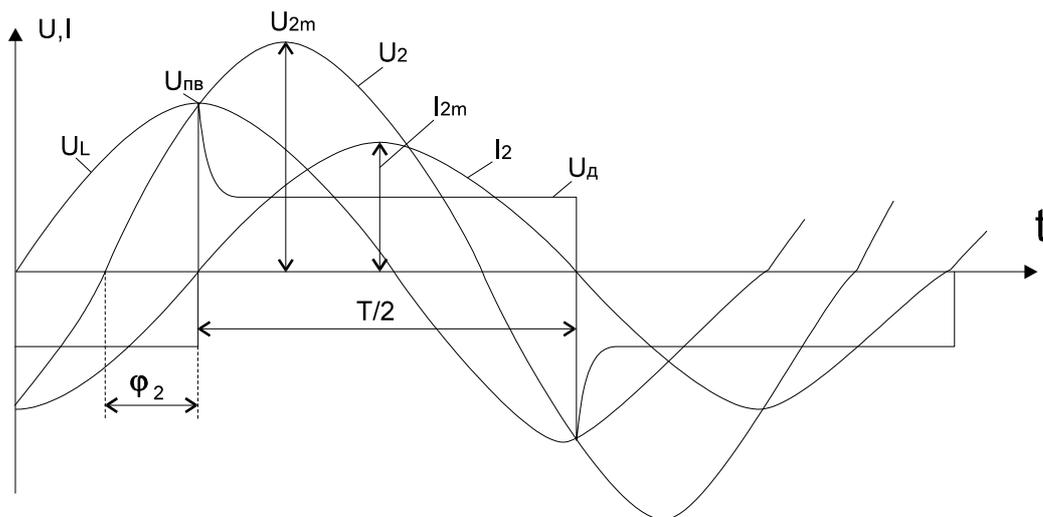


Рисунок 9

$U_L$  – напряжение на индуктивности;  $U_d$  – напряжение дуги;  $I_2$  – сварочный ток.

Напряжение  $U_2$  опережает  $i_2$  на  $\varphi_2$  (рисунок 9). Для вторичной цепи пренебрегаем  $U_R$ . Следовательно,  $U_2 = U_L + U_d$ . При включении в сварочную цепь линейной индуктивности для устойчивого горения дуги необходимо чтобы  $U_2$  ( $U_2 = U_{2m} \cdot \sin \varphi_2$ ), было не меньше напряжения повторного возбуждения дуги  $U_{пв}$ . При данном действительном значении тока  $i_2$  величина  $U_2$  определяется углом  $\varphi_2 = \arctg \frac{\omega L}{R + R_d} \approx \arctg \frac{\omega L}{R_d}$ . Недостаток: низкий

$\cos \varphi$  сварочного трансформатора.

Условие устойчивого горения дуги переменного тока при включенной последовательно с дугой индуктивности можно сформулировать так: амплитуда напряжения ( $X_L I_{2m}$ ) должна быть не меньше напряжения повторного возбуждения дуги ( $U_{пв}$ ) дуги для данного способа сварки.

### 1.6.3 Устойчивость горения сварочной дуги при включении в сварочный контур индуктивности и емкости

Электрическая схема приведена на рисунке 10.

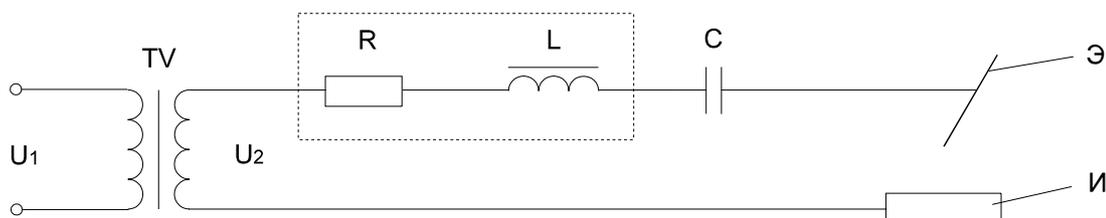


Рисунок 10

$$U_2 = U_d + U_L + U_C ; (U_R = 0) . \quad (5)$$

При переходе тока через ноль напряжение на конденсаторе  $U_{Cm} = I_{2m} X_C$ , т. е. дополнительно к напряжению противоЭДС индуктивности прибавляется напряжение накопленное на конденсаторе, следовательно, увеличивается устойчивость горения дуги.

### 1.6.4 Динамическая характеристика сварочной дуги переменного тока. Зависимость между мгновенными значениями $U_d$ и $I_d$

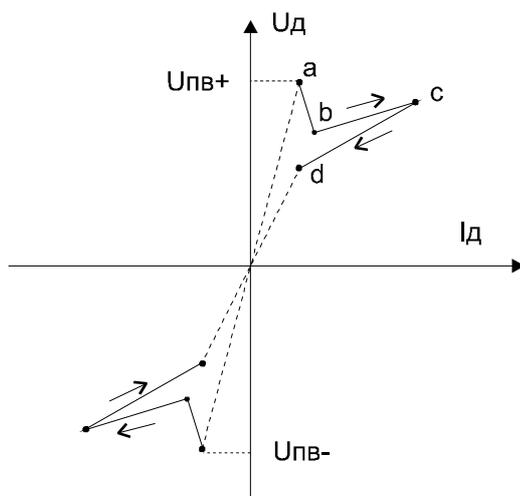


Рисунок 11

Участков, обозначенных пунктирной линией практически нет, просто соединение (рисунок 11). При увеличении и уменьшении тока процессы идут по разным ветвям. Заметное расхождение этих ветвей наблюдается: у дуг горящих в среде с примесью паров легко ионизирующихся элементов (K, Ca, Na, ); у дуг, горящих в средах с высокими потенциальными ионизаторами (Ar); с ростом частоты напряжения, питающего дугу. Расхождения больше у дуг при сварке меньшими токами.

## 1.7 Трехфазная сварочная дуга

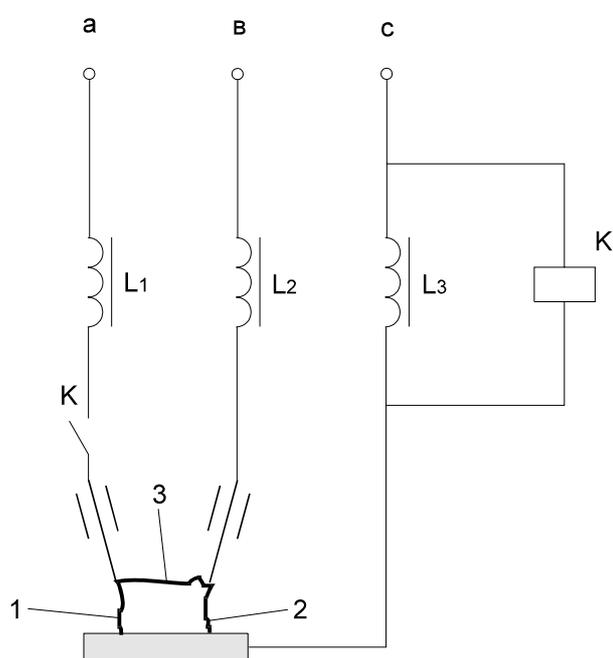


Рисунок 12

Трехфазной называют сварочную дугу, полученную при питании от трехфазной силовой цепи. Производительность сварки в 2 – 2,5 раза выше, чем при сварке однофазной дугой. Это три дуги, горящих в общей газовой среде и имеющих общее плавильное пространство. На рисунке 12 показаны:

1, 2 – дуги прямого действия ; 3 – косвенного действия (между фазами А и В).

При трехфазном питании возможны другие варианты горения:

- только две дуги прямого действия, имеющие общее плавильное пространство.

- Две дуги, имеющие разделенные парогазовые среды и разделенное плавильное пространство (двухдуговая сварка).

В цепь фазы С включен контактор К. Замыкающий контакт К включен в цепь одного из электродов (т. к. при обрыве одной из дуг прямого действия гасит дугу косвенного действия). Возбуждение дуги контактное (касание). Условия горения дуги лучше, чем у однофазной. Повторное возбуждение тоже лучше, т. к. всегда одна из двух горит. Лучше cosφ, габариты меньше. Но широкого применения трехфазная дуга не нашла, т. к. варит толстые изделия и не конкурентно способна по сравнению с шлаковой сваркой.

## 1.8 Требования к источникам питания

Источник должен выполнять следующие функции:

1. Зажигание дуги.
2. Поддержание устойчивого горения дуги.
3. Используется для настройки (регулирования режима сварки).
4. Источник воздействует на сварное соединение через дугу, способствует благоприятному переносу металла, обеспечивает качественное формирование шва.

Сварочные свойства источника – способность при прочих благоприятных условиях сварки обеспечить получение качественного сварного соединения. Критерии оценки: непосредственный, косвенный.

Непосредственный – по качеству дуги или шва.

Пример: характер переноса металла оценивается по величине коэффициента потерь на разбрызгивание. Чем меньше разбрызгивание, тем лучше источник.

Косвенный – оценка по собственным электрическим параметрам источника, существенно влияющим на качество сварки (скорость нарастания тока при повторном возбуждении дуги; скорость нарастания тока при коротком замыкании дугового промежутка).

Если ток возрастает быстро, то под действием пинч-эффекта – разрыв перемычки и, поэтому, увеличивается разбрызгивание. Если медленно, то тоже плохо т.к. получается кривой шов.

Различают объективный и субъективный методы оценки свойств сварного соединения.

Объективный метод предполагает количественную оценку свойств (разрывная длина дуги в см).

При субъективном методе выполняется качественная оценка свойств (может быть в баллах по пяти бальной системе). Оценку производят сварщики эксперты. Оценка сварочных свойств производится по ГОСТ 25616-83 «Источники питания для дуговой сварки, методы испытания сварочных свойств». При испытании источников для ручной дуговой сварки принята методика субъективной оценки по непосредственным критериям. Оценка выполняется по пятибальной системе по пяти свойствам:

1. Надежность зажигания.
2. Стабильность (устойчивость) процесса.
3. Эластичность дуги (устойчивость при значительном удлинении).
4. Разбрызгивание металла (характер переноса электродного металла).
5. Характер формирования шва (глубина, ширина, качество).

Испытание источников для механизированной сварки в основном осуществляется по объективным оценкам.

К технико-экономическим показателям относятся:

- КПД;
- $\cos\varphi$ ;
- габариты;
- масса;
- показатели надежности;
- эргономические и технологические показатели конструкции;
- соответствие правилам техники безопасности.

## 1.9 Режимы работы источников питания (ИП)

ИП рассчитывают на определенную нагрузку, при которой он работает, не перегреваясь выше установленных норм. ИП рассчитывают также на заданную величину напряжения, которая определяет класс применяемых изоляционных материалов. Напряжение, ток и мощность, на которые рассчитан ИП, называются номинальными ( $U_N$ ,  $I_N$ ,  $P_N$ ) и записываются в инструкцию по эксплуатации. При эксплуатации происходит нагрев частей ИП. Для характеристики вводят перегрев.

Перегрев – превышение температуры ( $T$ ) ИП над температурой окружающей среды ( $T_0$ ).

Различают следующие режимы работы:

1. Продолжительный.
2. Перемежающийся.
3. Повторно-кратковременный.

1 – режим, при котором ИП успевает нагреться до установившейся температуры  $\theta_y$  (рисунок 13).

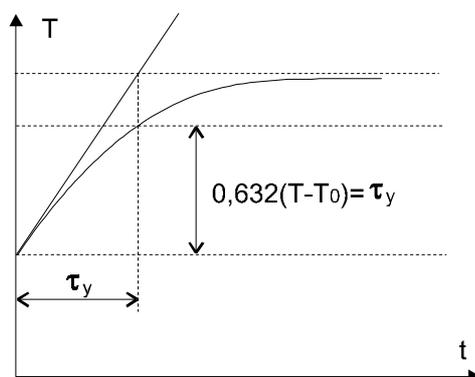


Рисунок 13

2 – режим, при котором время работы чередуется с паузами (рисунок 14). Среднее значение между  $T_1$  и  $T_2$  принимается как  $T_{\text{доп}}$  и является расчетным. Перемежающийся режим для нагрузки циклического типа характеризуется относительной продолжительностью нагрузки за время цикла  $t_u = t_p + t_n$ .

$$ПН\% = \frac{t_p}{t_u} 100\% .$$

3 – режим, который отличается от перемежающегося тем, что ИП во время пауз отключается от сети.

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_u} * 100\% = \frac{t_p}{t_p + t_n} * 100\% . \quad (6)$$

Длительность цикла работы источников предназначенных для ручной дуговой сварки, имеющих перемежающийся и повторно-кратковременный режимы принято равным пяти минутам, а источников для механизированной сварки и универсальных – 10 минут. Если величина ПН (ПВ) отличается от номинальной приведенной в паспорте установки, то величину сварочного тока соответствующую другому значению ПВ (ПН) можно найти с помощью формулы:

$$I = I_H \sqrt{\frac{ПН\%}{ПН_H\%}} = I_H \sqrt{\frac{ПВ\%}{ПВ_H\%}} . \quad (7)$$

Ток не должен превышать тока  $I_{\text{max}}$ , указанного для источника.

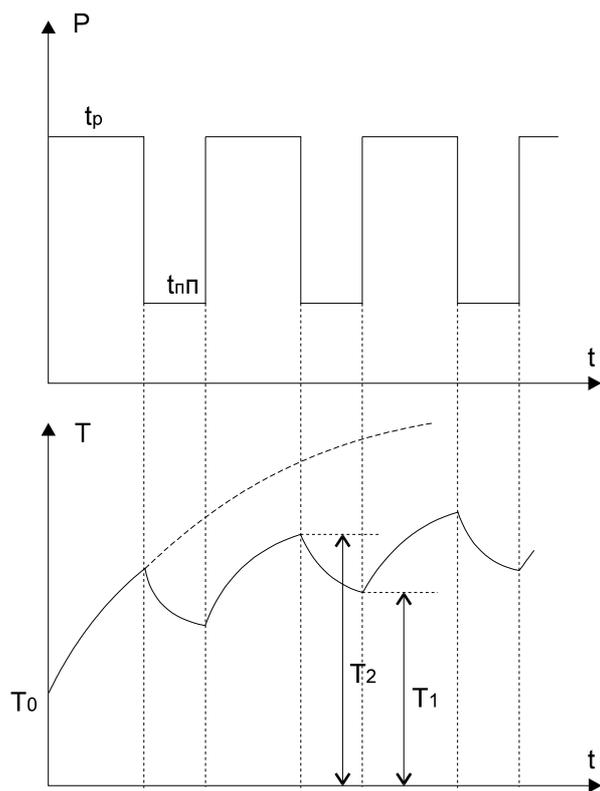


Рисунок 14

Источники питания для стран с умеренным климатом изготавливаются в климатическом исполнении У с категорией размещения 2 и 3; а также УХЛ 4 по ГОСТ 15150-69. Источники питания для стран с тропическим климатом изготавливаются в климатическом исполнении Т с категорией размещения 2, 3; по ГОСТ 15160-69, ГОСТ 15969-70.

### 1.10 Единая система обозначений (ЕСО).