

**РОСЖЕЛДОР**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Ростовский государственный университет путей сообщения»**  
**(ФГБОУ ВО РГУПС)**

---

Н.Г. Дюргеров

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Учебно-методическое пособие  
к лабораторным работам

Ростов-на-Дону  
2017

УДК 621.9(07) + 06

Рецензент – кандидат технических наук, доцент О.А. Ворон

**Дюргеров, Н.Г.**

Автоматизация технологических процессов: учебно-методическое пособие к лабораторным работам / Н.Г. Дюргеров; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – 20 с.

Содержатся методические материалы по учебному курсу «Автоматизация технологических процессов», предназначенные для подготовки к выполнению лабораторных работ.

Рассмотрены системы автоматического регулирования сварочных и наплавочных работ, вопросы динамики систем автоматического регулирования.

Предназначено для студентов специальностей, связанных с производством и ремонтом подвижного состава железных дорог, всех форм обучения, а также аспирантов.

Одобрено к изданию кафедрой «Технология металлов».

*Учебное издание*

**Дюргеров** Никита Георгиевич

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Печатается в авторской редакции  
Технический редактор Т.И. Исаева

Подписано в печать 23.10.17. Формат 60×84/16  
Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. 1,16.  
Тираж экз. Изд. № 90464. Заказ .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

---

Адрес университета: 344038, Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2.

© Дюргеров Н.Г., 2017  
© ФГБОУ ВО РГУПС, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Сварочная дуга как элемент электрической цепи в системе Д – ИП (дуга – источник питания) . . . . .	4
Лабораторная работа № 2. Изучение бесконтактного зажигания дуги при сварке плавящимся электродом . . . . .	7
Лабораторная работа № 3. Программирование режима контактной точечной сварки . . . . .	10
Лабораторная работа № 4. Автоматизация наплавки тел вращения . . . . .	12
Лабораторная работа № 5. Построение, структура и свойства системы саморегулирования сварочной дуги . . . . .	15
Лабораторная работа № 6. Построение и структура системы регулирования напряжения на дуге (АРНД) .	18
Библиографический список . . . . .	20

## СВАРОЧНАЯ ДУГА КАК ЭЛЕМЕНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ В СИСТЕМЕ Д – ИП (ДУГА – ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ)

При рассмотрении саморегулирования дуги, переходных процессов в системе Д – ИП, составлении ее эквивалентной схемы необходимо знать уравнение динамики дуги.

Примем допущения:

- рассматриваются относительно длинные дуги и процессы в ее столбе;
- столб дуги обладает цилиндрической симметрией;
- плазма столба дуги принимается термически равновесной;
- конвенция и излучение отсутствуют.

Известно, что порядок дифференциального уравнения системы определяется числом резервуаров ее энергии.

Рассмотрение основных форм энергии электрического тока в газе: магнитной, электрического поля, ионизации и кинетической энергии частиц показывают, что главное значение имеют кинетическая энергия частиц и энергия ионизации.

Кинетическая энергия единицы объема газа

$$W_k = \frac{3}{2}nkT,$$

где  $n$  – число частиц в единице объема;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·град<sup>-1</sup> – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура.

Энергия ионизации в единице объема газа

$$W_{ou} = n \cdot e \cdot U_j \alpha_u,$$

где  $e$  – заряд электрона;

$U_j$  – энергия ионизации;

$\alpha_u$  – степень ионизации.

Для дуги в парах железа  $T = 6000$  °К,  $\alpha_u = 0,02$ ,  $U_j = 7,83$  В,  
1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

$$\text{Отношение } \frac{W_k}{W_{ou}} = \frac{3kT}{2\alpha_u e U_j} = 5.$$

В качестве исходного используем уравнение баланса энергии (Эленбааса – Геллера)

$$\text{или } \frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{1}{C_p \gamma} \sigma E^2, \quad (1)$$

где  $\nabla^2$  – оператор Лапласа;

$a$  – коэффициент температуропроводности;

$\sigma$  – удельная проводимость;

$C_p$  – теплоемкость;

$\gamma$  – плотность;

$E$  – напряженность электрического поля.

Введем функцию обобщенной теплопроводности

$$S = \int_0^T \lambda \partial T,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Уравнение (1) в случае цилиндрической симметрии для стационарного случая можно записать в следующем виде

$$\sigma E^2 = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S}{\partial r} \right),$$

где  $r$  – текущий радиус дуги.

Граничные условия:  $\left. \frac{\partial S}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, S = S_0,$

$$\left. \frac{\partial S}{\partial r} \right|_{S=0} = -\frac{Q_c}{2\pi r}, \quad S|_{r=R} = 0, \quad S|_{t=0} = S_0,$$

где  $Q_c$  – мощность, приходящаяся на единицу длины столба дуги.

$S(r)$  получают из решения уравнения (2) для стационарного случая.

Из частного или обобщенного решения уравнения (2) получаем значение постоянной времени дуги

$$\tau_0 = \frac{S_0}{aE^2 \sigma_o^*}, \quad (3)$$

где  $\sigma_o^*$  – значение проводимости, соответствующей линейной функции  $\sigma(S)$  при  $S = S_0$ .

В случае, когда коэффициент теплопроводности  $\lambda$  в диапазоне рабочих температур может быть принят постоянным,

$$\tau_0 = \frac{C_p \gamma T_0}{E^2 \sigma_o^*} \quad (4)$$

Для дуги в азоте

$$T_0 = 7000^{\circ}\text{K}, \quad \gamma = 36 \cdot 10^{-6} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}, \quad C_p = 0,325 \text{ кал}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}, \quad \sigma_o^* = 150 \text{ м}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}, \\ E = 30 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}, \quad \tau_0 = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Для дуги в аргоне

$$T_0 = 8000^{\circ}\text{K}, \quad \gamma = 80 \cdot 10^{-6} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}, \quad C_p = 0,124 \text{ кал}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}, \quad \sigma_o^* = 100 \text{ м}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}, \\ E = 10 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}, \quad \tau_0 = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Экспериментальные данные, полученные различными методами «впрыскиванием» в дугу тока и наложением на дугу синусоидальных импульсов тока, дают такой же порядок значений постоянной времени дуги.

Инерционность дуги проявляется в виде петли гистерезиса при снятии динамических характеристик дуги. Образование петли гистерезиса соответствует скорости нарастания тока  $\frac{dI}{dt} \approx 2,5 \cdot 10^5 \text{ А} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Анализ полученных результатов по определению крутизны статических характеристик дуги ( $k_{\partial m} = R_{\partial}$ ), суммы приэлектродных падений напряжений и градиента потенциала в столбе дуги позволяет сделать некоторые обобщения.

Для исследования дуг с плавящимся электродом Al–Al, Fe–Fe, Fe–С в различных газовых средах статическая вольтамперная характеристика дуги является возрастающей  $dU_{\partial}/dI = k_{\partial m} > 0$ , и ее крутизна находится в пределах 0,01...0,05 В/А. В зависимости от материала электрода, состава защитной среды и режима сварки сумма приэлектродных падений напряжений составляет 13...25 В. Градиент потенциала в столбе дуги зависит от состава защитной среды: для дуги в аргоне между электродами из сплава АМг6 изменяется от 5,7 до 13,4 В/см, а в углекислом газе – от 16,6 до 33 В/см.

По полученным экспериментальным данным сумма приэлектродных падений напряжений возрастает с увеличением тока. Это хорошо согласуется с результатами исследований Д.М. Рабкина, по данным которого катодное падение напряжений пропорционально току, а анодное падение напряжения постоянно и составляет  $2,5 \pm 0,5$  В. Анодное падение напряжения с ростом тока может возрасть или уменьшаться в зависимости от направления действия результирующего плазменного потока в дуге.

Постоянная времени дуги согласно теоретическим и экспериментальным данным составляет 0,1...0,01 мс. Постоянная времени сварочной цепи обычно равна 10...1 мс, т.е. на один-два порядка больше. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев инерционностью сварочной дуги можно пренебречь и рассматривать ее как статическую модель.

В качестве такой модели дугу с плавящимся электродом можно представить в виде последовательно соединенных противо-ЭДС и сопротивления. В общем виде сопротивление дуги может быть положительным и отрицательным, однако экспериментами не обнаружено случаев, когда  $dU_{\partial}/dI < 0$  для плавящегося электрода. Уравнение статической характеристики дуги можно записать в следующем виде

$$U_{\partial} = E_{\partial} + k_{\partial m} I_{\partial}, \quad (5)$$

где  $E_{\partial}$  – противо-ЭДС дуги.

$$E_{\partial} = U_{\text{ка}} + k_{\partial} l_{\partial}$$

$U_{\text{ка}}$  и  $k_{\partial}$  условно соответствуют значению тока  $I_{\partial} = 0$ . Коэффициент  $k_{\partial m}$  характеризует возрастание суммы приэлектродных падений напряжения с ростом тока.

Если статическая вольтамперная характеристика дуги в общем случае является нелинейной, то линеаризация ее путем разложения функции  $U_{\partial} = f(I_{\partial})$  в ряд Тейлора приведет к тому же результату – формуле (5). Следует отметить, что введение понятия о противо-ЭДС или так называемой «поляризации» дуги

– чисто формальный прием, необходимый для линеаризации характеристик дуги и применения закона Ома к содержащим ее цепям.

Минимальный ток горения дуги – один из параметров, характеризующих ее физическую устойчивость. Знание минимального тока необходимо для оценки стабильности процесса при действии различных возмущений. Имеются данные о преддуговых токах для дуги переменного тока, пороговых и ячеечных токах для дуги постоянного тока.

Методика определения минимального тока дуги заключается в уменьшении сварочного тока путем введения в цепь резистора с активным сопротивлением. Измерения проводили по осциллограммам на участках, где  $dI/dt = 0$ , т.е. где устанавливался стационарный процесс горения малоамперной дуги. Время горения дуги выбирали 20 мс, что вполне достаточно для окончания переходных процессов в системе Д – ИП. При определенном сопротивлении время горения малоамперной дуги было меньше 20 мс, т.е. наблюдался обрыв дуги. За минимальный принимался ток, соответствующий максимальному сопротивлению, при котором еще наблюдается непрерывное горение дуги в течение 20 мс. Для фиксации малых токов была разработана специальная нелинейная полупроводниковая приставка.

Независимо от состава газовой среды, химического состава и диаметра электрода, полярности минимальный ток горения дуги изменяется в узких пределах.

Так, для дуги в углекислом газе электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,6 и 2 мм минимальный ток составляет 2...3 и 3...4 А, соответственно. Для дуги в аргоне электродной проволокой СвАМг61 минимальный ток равен 2...3 А. Значение минимального тока в среде углекислого газа практически не зависит от напряжения на дуге в диапазоне его изменения 25...45 В. Для сравнения пороговый ток дуги для стальных электродов равен 1,5 А, а для алюминиевых – 1 А.

*Рабочее задание:*

1 Построить диаграмму площадей динамических характеристик для различных газов.

2 Построить кривые перехода статической дуги в динамическую в зависимости от напряжения дуги.

*Лабораторная работа № 2*

## **ИЗУЧЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ЗАЖИГАНИЯ ДУГИ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

Известны случаи зажигания дуги электрическим пробоем межэлектродного промежутка высоким напряжением с помощью сварочных осцилляторов и генераторов импульсов, но не нашедших применения при

механизированной сварке плавящимся электродом из-за присущих им недостатков.

Показана экспериментально принципиальная возможность пробоя сокращающегося межэлектродного промежутка при механизированной сварке плавящимся электродом напряжением, не превышающим максимальных значений напряжения холостого хода сварочного источника питания.

При этом установление процесса сварки рассматривается как собственно зажигание дуги, ее развитие и переход к заданным параметрам режима сварки с непрерывным горением дуги - в случае сварки длинной дугой или с прерывистым горением дуги и непрерывным током – в случае сварки с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка.

Исследование механизма установления процесса сварки включает изучение физических процессов, протекающих при зажигании дуги, условий и механизма ее развития и собственно установления процесса с учетом физических свойств дуги и других явлений.

Механизм зажигания и развития дуги представляется весьма сложной и самостоятельной проблемой.

Процесс бесконтактного зажигания дуги при сближении электродов проходит две стадии: электрический пробой межэлектродного промежутка с возникновением и развитием НИР (НИР – низковольтный импульсный разряд) и переход к сварочной дуге с заданными параметрами режима.

В настоящем разделе рассматривается первая стадия процесса, когда при сближении электродов под напряжением, не превышающим сварочное, между ними до их физического контакта возникает и развивается НИР.

Осциллограммы, иллюстрирующие процесс бесконтактного зажигания дуги, рис. 1, основной характеристикой которого является  $U_p$  – напряжение НИР, получены при одинаковой, равной 253 м/ч скорости подачи электрода диаметром 1,6 мм.

Осциллограмма, рис. 1, а, характеризует первую стадию процесса и получена при сближении электродов на экспериментальной установке.

Осциллограмма, рис. 1, б, характеризует первую и вторую стадии процесса бесконтактного зажигания дуги и переход к процессу с заданными параметрами режима сварки с периодическими замыканиями дугового промежутка.

На основании анализа литературных и экспериментальных данных определены факторы, которые могут оказать влияние на процесс возникновения и развития НИР. Рассмотрены факторы: напряжение на электродах, индуктивность сварочной цепи, состояние поверхности электродов, скорость подачи электрода, материал и диаметр электрода, защитная среда.

Анализ полученных зависимостей показывает, что минимальное напряжение, при котором наступает пробой с возникновением НИР, существенно зависит от индуктивности сварочной цепи. При индуктивности, близкой к нулю, минимальное напряжение пробоя с возникновением НИР колеблется в зависимости от состояния поверхности электродов от 14 до 40 В.



При наибольшей индуктивности, равной  $675 \cdot 10^6$  Гн, минимальное напряжение возникновения пробоя в зависимости от состояния поверхности составляет 110...240 В.

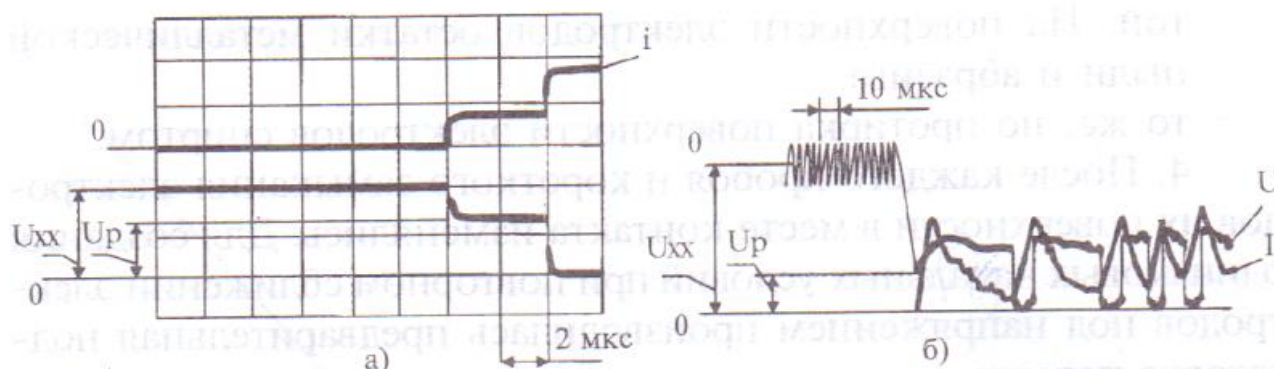


Рисунок 1 – Осциллограммы, характеризующие 1-ю и 2-ю стадии процесса бесконтактного зажигания дуги в  $\text{CO}_2$ : *а* – возникновение и развитие НИР:  $U_p = 14$  В; *б* – НИР и переход к сварочной дуге с заданными параметрами режима сварки:  $U_p = 24$  В;  $U_{xx} = 45$  В;  $L = 40 \cdot 10^6$  Гн.

Таким образом, процесс бесконтактного зажигания дуги при сварке происходит по следующей схеме:

1. Электрический пробой и возникновение НИР;
2. Развитие НИР;
3. Развитие дугового разряда;
4. Переход дугового разряда к параметрам процесса сварки.

Этапы 1 и 2 образуют первую стадию процесса бесконтактного зажигания дуги. Этапы 3 и 4 образуют вторую стадию процесса бесконтактного зажигания дуги.

Возможны случаи, когда НИР начинается с взрывообразного разрушения микроперемычки между сближаемыми электродами. Замыкание микроперемычек происходит, когда локальная напряженность поля на вершине микровыступа не достаточна для пробоя межэлектродного промежутка, т.е.  $h \gg b$ .

Длительность НИР в данном случае составляет  $0,75 \cdot 10^{-4}$  с. Взрыв микроперемычки создает благоприятные условия для пробоя межэлектродного промежутка.

#### *Рабочее задание*

Изучить и определить напряжения электрического пробоя при возникновении НИР.

## ПРОГРАММИРОВАНИЕ РЕЖИМА КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Точечная сварка – одна из основных разновидностей контактной сварки.

Машины для точечной и рельефной сварки не имеют принципиальных различий и классифицируются по следующим признакам:

- по числу одновременно свариваемых точек;
- по приводу сжатия электродов. В настоящее время распространены машины с пневматическим приводом (типа МТП);
- по роду действия: неавтоматические и автоматические;
- по способу монтажа: стационарные и передвижные;
- по способу управления.

Обычно для точечной сварки применяют машины со схемой управления (регуляторами), обеспечивающей постоянство времени сварки  $t_{св} = const$ .

В аппаратуре управления для контактной сварки широко используются различные регуляторы времени. Они служат для задания выдержки времени сварочного цикла и отдельных операций, а также для включения и выключения различных устройств управления (например, пневмоклапанов).

По принципу действия регуляторы времени делятся на непрерывные и дискретные. На непрерывном принципе с использованием процесса разряда конденсатора работают регуляторы времени типа РВЭ.

Завод «Электрик» серийно выпускает регулятор времени типа РВЭ-7, представляющий собой четырехпозиционный регулятор и предназначенный для управления сварочным циклом («Сжатие», «Сварка», «Проковка», «Пауза»). На базе РВЭ-7 выпускаются различные модификации этого регулятора.

Принципиальная схема регулятора РВЭ-7 показана на рис. 1. Схема работает следующим образом. При подаче напряжения конденсатор СП заряжается через сопротивление R11, сеточную цепь левой половины лампы Л1 и сопротивление R13 так, что к сетке лампы прикладывается отрицательный потенциал. Конденсаторы С21, С31 и С41 заряжаются аналогично.

При нажатии на педаль П срабатывают реле Р5 и Р6, обеспечивая замыкание анодной цепи левой половины лампы Л1 и включение электропневматического клапана давления.

Конденсатор С11 разряжается на сопротивление R12, потенциал сетки повышается и через некоторое время срабатывает реле Р1. Выдержка времени первой операции «Сжатие» задается потенциометром R11, который определяет напряжение заряда конденсатора С11.

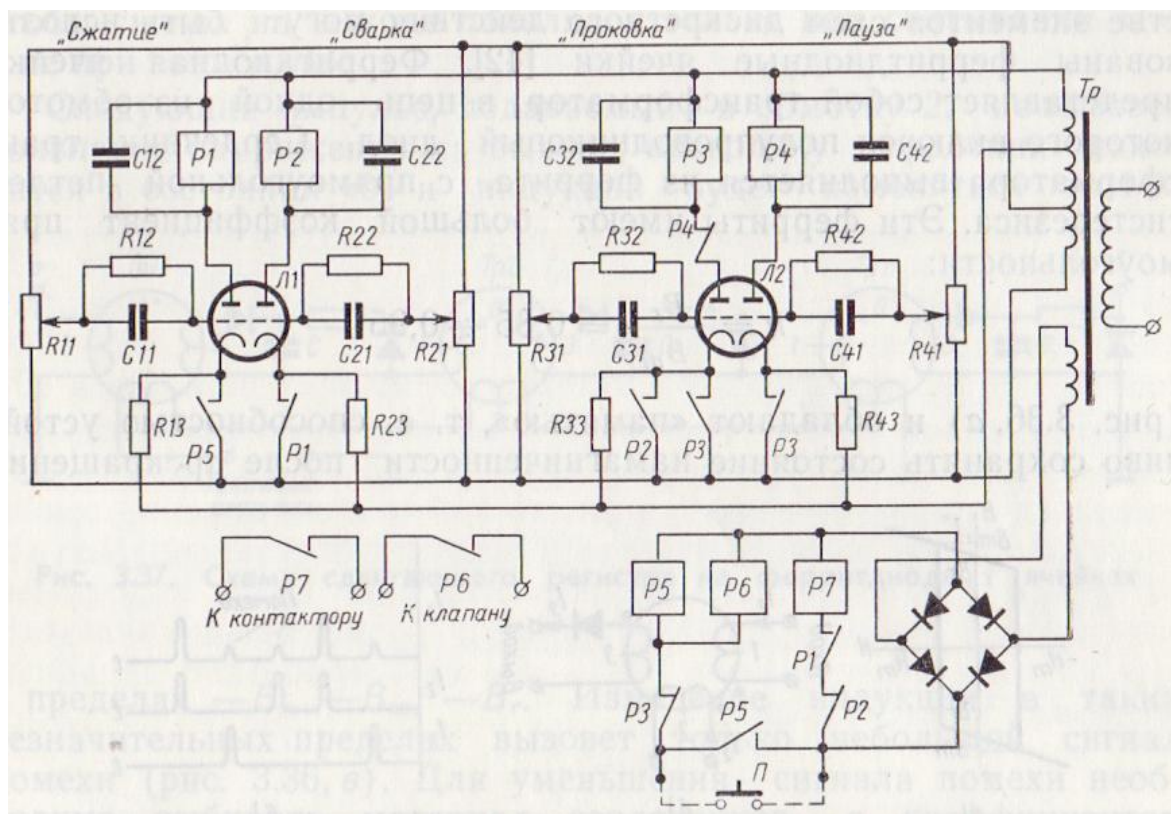


Рисунок 1 – Принципиальная схема регулятора времени РВЭ-7

После срабатывания реле Р1 включается реле Р7, которое включает игнитронный контактор. Выдержка времени операции «Сварка» определяется временем разряда конденсатора С21 и задается потенциометром R21. После окончания выдержки времени операции «Сварка» реле Р2 срабатывает и выключает реле Р7.

Затем аналогично обрабатывается время операций «Проковка» и «Пауза». После окончания времени операции «Проковка» отключается катушка пневмоклапана и снимается усилие с электродов машины. Электрические цепи выдержек времени первых двух операций возвращаются в исходное положение. После окончания времени операции «Пауза» срабатывает реле Р4 и, если педаль отпущена, цикл работы схемы заканчивается. При нажатой педали цикл работы регулятора и соответственно сварочной машины автоматически повторяется.

Для повышения точности задания и отсчета длительности различных операций сварочного цикла применяются устройства, основанные на дискретном принципе действия. Выдержка времени операций определяется количеством поступающих импульсов, жестко связанных с частотой напряжения питающей сети.

*Рабочее задание:*

Составить временную диаграмму управления циклом (циклограмму) контактной точечной сварки.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ НАПЛАВКИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Наплавка наружных поверхностей тел вращения возможна тремя способами:

- отдельными валиками вдоль образующей;
- кольцевыми валиками;
- по винтовой линии.

Первые два способа характеризуются перерывами (процесс наплавки прерывистый). Наплавка по винтовой линии является непрерывным процессом и рекомендуется в случае его автоматизации.

Возможна наплавка тел вращения под флюсом, в углекислом газе и порошковой проволокой.

Минимальный диаметр наплавляемой детали под флюсом составляет 50 мм из-за необходимости предотвращения стекания металла и флюсовой ванны.

Зависимость частоты вращения детали от ее диаметра и скорости наплавки показана на рис. 1.

Режимы наплавки под флюсом и в углекислом газе – в таблицах 1 и 2.

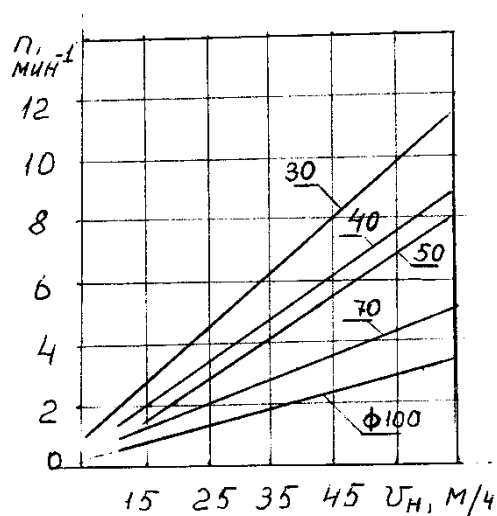


Рисунок – 1 Зависимость частоты вращения от диаметра детали и скорости наплавки

Шаг наплавки определяет гладкость наплавленной поверхности. Слишком большой шаг вызывает неровности и повышенное разбавление основным металлом металла сварного шва, а слишком малый шаг – дефекты в виде подворотов и непроваров. Обычно шаг наплавки составляет 0,4...0,75 от ширины валика. В случае неудовлетворительной отделимости шлаковой корки можно осуществлять наплавку с удвоенным шагом (так называемыми «раздвинутыми валиками»).

Скорость охлаждения в процессе и после наплавки во многом определяет структуру металла шва. Несоблюдение режима охлаждения металла

может вызвать образование трещин и нежелательное изменение механических свойств металла: твердости, износостойкости и др.

При ремонте локомотивов и вагонов восстанавливаются валы диаметром 30...120 мм. Применяемые способы наплавки: вибродуговая наплавка в охлаждающей жидкости и под флюсом, наплавка под флюсом, наплавка в углекислом газе проволокой сплошного сечения и порошковой проволокой. Процесс наплавки ведется обычно короткой дугой (с частыми периодическими замыканиями дугового промежутка).

Таблица 1

Режимы наплавки под флюсом

Диаметр наплавл. детали, мм	Ток I, А	Диаметр эл-да d <sub>э</sub> , мм	Напряжение на дуге U, В	Режим наплавки				
				Скорость подачи электрода V <sub>п</sub> , мм	Скорость наплавки V <sub>н</sub> , м/ч	Шаг наплавки, мм	Вылет электрода h <sub>э</sub> , мм	Смещение с зенита, мм
50÷60	110÷130	1,2÷1,6	23÷25	125÷80	18÷23	4	15	4÷5
60÷75	150÷170	1,6÷2,0	24÷27	100÷75	18÷26	4	20	5÷6
75÷100	180÷200	2,0	25÷28	80÷85	18÷30	5	20	5÷7

Таблица 2

Режимы наплавки в углекислом газе

Диаметр детали, мм	Диаметр эл-да, мм	Ток наплавки I, А	Напряжение на дуге U, В	Вылет эл-да, мм	Шаг напл., мм	Смещ. эл-да, мм	Расход CO <sub>2</sub> , л/мин
20	0,8	70÷80	17÷18	7÷10	2,5	2÷4	6÷8
20÷30	0,8	80÷90	18÷19	7÷10	2,8	3÷5	6÷8
30÷40	0,8÷1,0	100÷110	19÷20	10	3,0	5÷6	8÷10
40÷50	1,0	110÷140	20÷21	10	3,5	6÷8	8÷10
50÷60	1,0÷1,2	120÷150	20÷21	10÷12	3,5	6÷8	10÷12
60÷70	1,2÷1,4	120÷160	21÷22	10÷15	4,0	6÷8	10÷12
70÷80	1,4	150÷170	21÷22	15	4,0	6÷8	12÷14
80÷90	1,6	170÷180	22	14÷18	4,0	8÷10	14÷16
90÷100	1,6÷2,0	180÷190	23	15÷20	4,5	8÷10	15÷18
100÷150	2,0	190÷210	22÷24	15÷20	4,5	8÷12	18÷20

Примечание:

1. Приведенные режимы являются ориентировочными и служат для определения исходных расчетных данных.
2. Линейная скорость наплавки 10÷25 м/ч.

## Расчет параметров режима наплавки

*Исходные данные:* необходимо восстановить наплавкой валик из малоуглеродистой стали диаметром 40 мм и длиной 30 мм. Износ по радиусу равен  $h_{и} = 2,0$  мм.

1 Определяем способ наплавки.

Для валиков диаметром менее 50 мм целесообразно принять механизированную наплавку в углекислом газе.

2 Определяем высоту наплавленного слоя  $h_{н}$

$$h_{н} = h_{и} + h_{м},$$

где  $h_{м}$  – припуск на механическую обработку. Обычно  $h_{м} = 1,0 \div 1,5$  мм.

$$h_{н} = 2,0 + 1,5 = 3,5 \text{ мм.}$$

3 Минимальный и максимальный диаметры восстанавливаемого валика

$D_1$  – диаметр после наплавки;

$D_2$  – диаметр до наплавки;

$D_0$  – альбомный размер.  $D_0 = 40$  мм.

$$D_1 - D_2 = 2h_{н}.$$

$$D_1 = D_0 + 2h_{м} = 43.$$

$$D_2 = D_0 - 2h_{и} = 36.$$

4 Определим высоту одиночного валика  $g$

$$g = \frac{h_{н}}{K_{вы}},$$

где  $K_{вы}$  – коэффициент высоты усиления, отражающий увеличение  $g$  благодаря перекрытию валиков. При  $\Pi = 0,5 \cdot e$ ,  $K_{вы} = 1,3 \div 1,5$  принимаем  $K_{вы} = 1,4$ .

$$\text{Тогда } g = \frac{3,5}{1,4} = 2,5 \text{ мм.}$$

5 Из условия удержания металла от стекания в зависимости от диаметра детали выбираем сварочный ток и диаметр электрода (табл.2). Принимаем  $d_{э} = 1,0$  мм марки Св-08Г2С, ток  $I = 110$  А.

6 Для приведенных значений тока и диаметра электрода определяем коэффициенты наплавки  $\alpha_{н}$  и расплавления  $\alpha_{р}$ , рис.3.

Примем  $\alpha_{р} = 12 \frac{\text{г}}{\text{А} \cdot \text{ч}}$ , а  $\alpha_{н} = \alpha_{р} \cdot \psi = 11,4 \frac{\text{г}}{\text{А} \cdot \text{ч}}$ ;  $\psi = 5\%$  – потери на угар и разбрызгивание.

7 Зная  $g$  и  $\psi_{в} = \frac{e}{g}$  – коэффициент формы усиления  $\psi_{в} = 2,5 \div 7$ .

Численное значение  $\psi_{в}$  определяется напряжением на дуге. Принимаем минимальное значение  $\psi_{в} = 2,5$ , тогда  $e = \psi_{в} \cdot g = 6,25$  мм.

8 По  $e$  и  $g$  находим  $F_{н}$  – площадь наплавленного металла валика

$$F_n = 0,75 \text{ eg} = 0,75 \cdot 6,25 \cdot 2,5 = 11,7 \text{ мм}^2.$$

9 Определим скорость подачи электрода

$$V_n = \frac{4 \alpha_n I}{\pi d_0^2 \rho} = 318 \text{ м/ч}.$$

10 Определим линейную скорость наплавки  $V_n$  из соотношения

$$\frac{F_n}{F_0} = \frac{V_n}{V_n},$$

откуда 
$$V_n = \frac{F_0 \cdot V_n}{F_n} = \frac{0,64 \cdot 318}{11,7} = 17,4 \text{ м/ч}.$$

11 Зная  $V_n$  и диаметр наплавляемой детали, определим частоту ее вращения

$$n = \frac{1000 V_n}{60 \pi D_0} = 2,34 \text{ об/мин}.$$

Зависимость частоты вращения детали от ее диаметра и скорости наплавки приведены на рис.4.

12 Определим шаг наплавки  $S = \frac{e}{2} = 3,125 \text{ мм}.$

13 Выбираем вылет электрода 10 мм, табл.2.

14 Расход  $\text{CO}_2$  8÷10 л/мин, табл.2.

15 Время наплавки  $t_{гд}$  (основное)

$$t_{гд} = \frac{L \cdot i}{S \cdot n} = \frac{50}{3,1 \cdot 2,34} = 6,89 \text{ мин},$$

где  $i$  – число наплавляемых слоев.

### *Рабочее задание*

Осуществить наплавку вала в  $\text{CO}_2$  диаметром 40 мм. Износ по радиусу 2,0 мм. Припуск на механическую обработку после наплавки 1,5 мм. Определить время наплавки участка вала длиной 50 мм. Расчет параметров режима.

### *Лабораторная работа № 5*

## **ПОСТРОЕНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ**

Явление саморегулирования сварочной дуги с плавящимся электродом было обнаружено В.И. Дятловым в 1942 году.

Большое значение для теории саморегулирования имели исследования дуги под флюсом, выполненные Б.Е. Патоном и А.М. Макаров. Б.Е. Патоном изучены свойства различных систем регулирования дуги под флюсом. Впервые введено понятие «кривые устойчивой работы головок с постоянной скоростью»

подачи электрода» - статические характеристики системы саморегулирования дуги.

Саморегулированием (самовыравниванием) сварочной дуги с плавящимся электродом принято считать свойство системы дуги – источник питания (Д-ИП) с постоянной скоростью подачи электрода восстанавливать устойчивое энергетическое состояние процесса сварки без применения регулирующих устройств после действия возмущений, благодаря зависимости скорости плавления электрода от тока и напряжения дуги, величина которых меняется под действием этих возмущений, а также непрерывному удалению расплавленного металла с торца электрода.

Такое саморегулирование названо нами идеальным. Оно происходит при мелкокапельном или струйном переносе металла и характеризуется тем, что процессы плавления и переноса металла совмещены во времени.

Например, при случайном удлинении дуги сварочный ток уменьшается, уменьшается связанная и обусловленная током скорость плавления электрода, что при постоянной скорости его подачи приводит к восстановлению длины дуги. Аналогично можно рассмотреть процессы при уменьшении длины дуги.

Возмущениями принято считать различные внешние и внутренние воздействия на процесс сварки, приводящие к изменению параметров режима. Возможны возмущения по длине дуги, напряжению питающей системы, вылету электрода, скорости его подачи и др.

Система саморегулирования дуги отрабатывает различные возмущения: по длине дуги, питающему напряжению, сопротивлению сварочной цепи, вылету электрода. Исключение составляют возмущения по скорости подачи электрода, поскольку скорость подачи электрода является задающим параметром системы.

По существу, рассмотренный процесс саморегулирования дуги является саморегулированием длины дуги, обеспечивающим с определенной точностью стабилизацию сварочного тока.

Реализация обнаруженного В.И. Дятловым свойства саморегулирования дуги произвела революцию в области сварочного электрооборудования: замене относительно сложных автоматов непрерывного и прерывистого действия, в том числе с ионным приводом, обеспечивающим, как правило, поддержание постоянного напряжения на дуге и использующих в качестве привода двигателя постоянного тока, предельно простым нерегулируемым в процессе сварки приводом постоянного или переменного тока. В последнем случае используются, как правило, трехфазные асинхронные двигатели мощностью до 0,3 кВт, имеющие жесткую механическую характеристику. Настройка необходимой скорости подачи электрода осуществляется в этом случае изменением передаточного отношения редуктора сварочной головки с помощью сменных шестерен.

Необходимо отметить, что обнаруженное явление саморегулирования сварочной дуги при автоматической сварке под флюсом имеет место и при сварке в защитных газах, порошковой проволокой, т.е. для всех случаев сварки



плавящимся электродом и даже для бездугового процесса электрошлаковой сварки.

Для анализа поведения объекта при действии различных возмущений необходимо составить структурную схему объекта регулирования и определить нужную передаточную функцию.

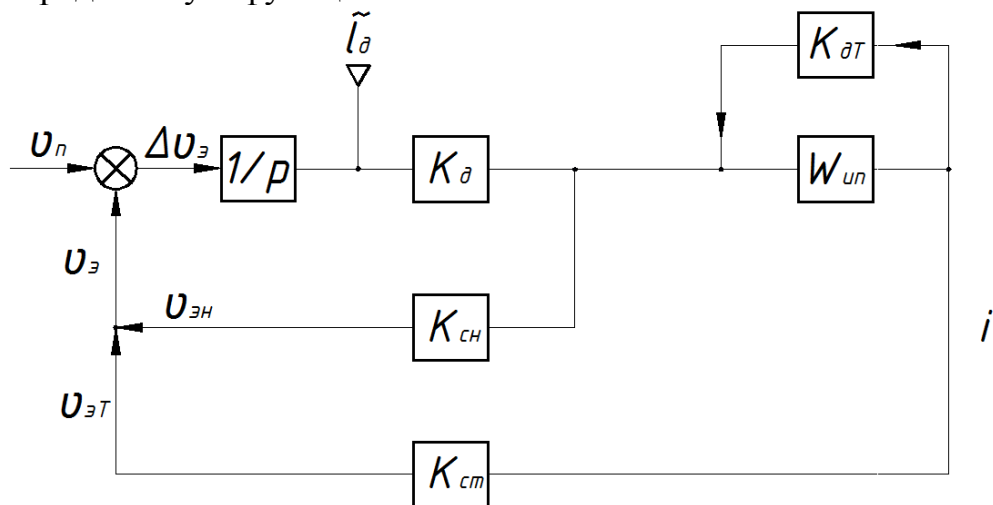


Рисунок 1 – Структурная схема системы саморегулирования дуги

$V_n$  – задающий параметр;  $K_{om} = \frac{dU_\delta}{dI}$ ;  $k_\delta = \frac{dU_\delta}{dl}$ ;  $1/p$  – интегрирующее звено;  $W_{ин}$  – передаточная функция источника питания; Входной величиной этого звена является  $\Delta V_\delta$ , а входной величиной  $\Delta I_\delta$ ;  $K_{ст}$  – коэффициент саморегулирования по току;  $K_{сн}$  – коэффициент саморегулирования по напряжению.

Определим изменение тока  $i(p)$  при возмущениях по длине дуги  $\Delta l$

$$i(p) = - \frac{p \cdot K_\delta \cdot \Delta l}{p^2 \cdot L + p \cdot (K_y + K_\delta \cdot K_{сн} \cdot L) + K_\delta \cdot K_{ст} + K_{сн} \cdot K_y} \quad (1)$$

где  $L$  – индуктивность сварочной цепи;

$p$  – оператор Лапласа;

$K_y$  – полное сопротивление системы дуга – источник питания.

Характеристическое уравнение системы имеет вид

$$Lp^2 + K_y + K_\delta K_{сн} L p + K_\delta K_{ст} + K_{сн} K_y = 0. \quad (2)$$

Получены два условия устойчивости

$$K_{ст} + K_{сн} K_y > 0; \quad (3)$$

$$K_y + K_\delta K_{сн} L > 0. \quad (4)$$

Из уравнения (3) получим выражение для крутизны статической характеристики системы саморегулирования дуги  $K_{дс}$

$$\frac{K_{ст} + K_{дт}K_{сн}}{K_{сн}} = K_{дт} = \frac{dU_p}{dt}.$$

*Рабочее задание*

- 1 Построить структуру системы саморегулирования дуги и определить экспериментально крутизну статических характеристик системы  $K_{дс}$ .
- 2 Сравнить теоретические и экспериментальные значения  $K_{дс}$ .

*Лабораторная работа № 6*

**ПОСТРОЕНИЕ И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДУГЕ (АРНД)**

Рассмотрим систему с плавящимся электродом на примере сварочного автомата АДС-1000.

Уравнение статической характеристики регулятора

$$V_n = K_{но} \cdot U_0 - U_3, \tag{1}$$

где  $V_n$  – скорость подачи электрода;

$K_{но}$  – коэффициент усиления регулятора.

Скорость плавления электрода при  $K_{дт} = 0$

$$V_3 = K_{ст} \cdot I_0 - K_{си} \cdot U_0, \tag{2}$$

где  $K_{ст}$  – коэффициент саморегулирования по току дуги;

$K_{дт}$  – крутизна статической характеристики дуги.

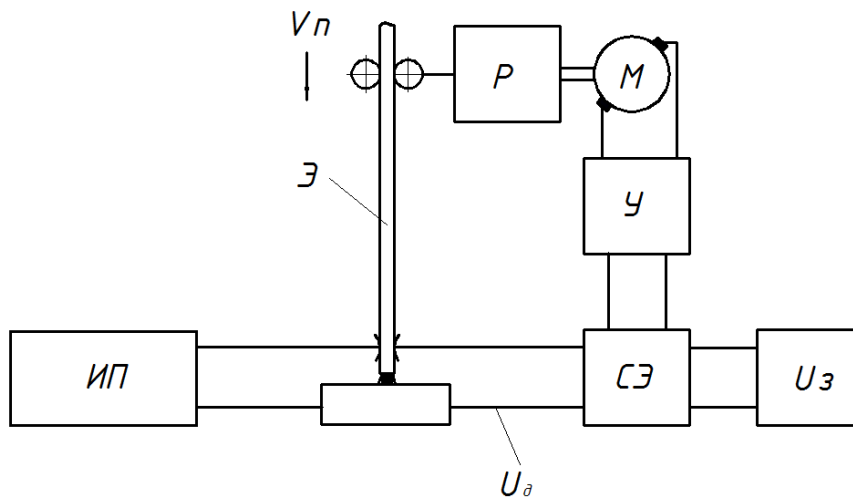


Рисунок 1 – Настройка системы АРНД на сварочном автомате АДС-1000: ИП – источник питания;  $U_0$  – напряжение на дуге; СЭ – орган сравнения;  $U_3$  – задающее напряжение; У – усилитель; М – исполнительный двигатель; Р – редуктор; Э – электрод

Пренебрегая влиянием напряжения дуги на скорость плавления электрода

$$F_3 \cdot V_n \cdot \gamma = \alpha_p \cdot I_\partial, \quad (3)$$

где  $\alpha_p$  – коэффициент расплавления электрода,  $\frac{2}{A \cdot \text{ч}}$ ;

$d_3$  – диаметр электрода, мм;

$\gamma$  – плотность металла,  $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .

Выражение (3) можно представить

$$V_n = K_{cm} \cdot I,$$

где  $K_{cm} = \frac{4 \cdot \alpha_p}{\pi \cdot d_3^2 \cdot \gamma} = 0,00453 \frac{\alpha_p}{d_3}, \frac{\text{см}}{A \cdot \text{с}}$ .

Из (1), (2) и (3)

$$U_\partial = U_{зр} + I_\partial \cdot \left( \frac{K_{cm}}{K_{ю} + K_{cm}} \right)$$

где  $U_{зр}$  – комплексный задающий параметр.

$$U_\partial = U_{зр} + I_\partial \cdot \left( \frac{K_{cm}}{K_{ю} + K_{cm}} \right),$$

где  $U_{зр} = U_3 \cdot \left( \frac{K_{ю}}{K_{ю} + K_{cm}} \right)$ .

Настройка системы по напряжению производится изменениями задающего приведенного напряжения  $U_{зр}$ , по току – изменением внешней характеристики источника питания (рис. 2).

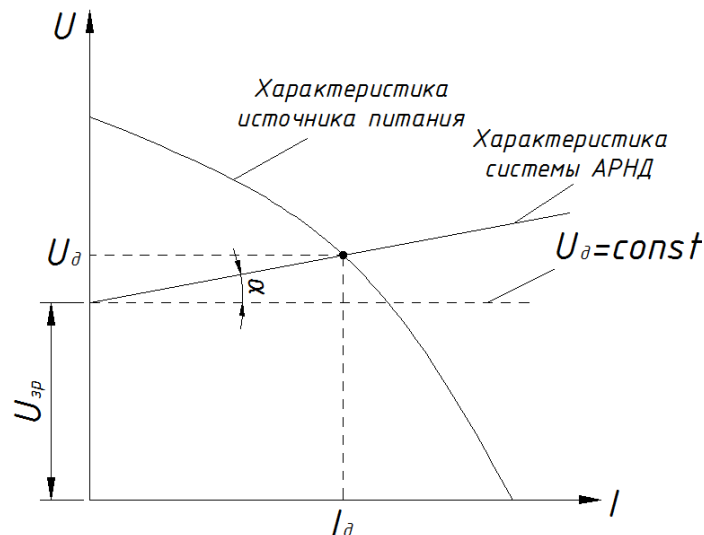


Рисунок 2 – Настройка системы АРНД

$$\alpha = \arctg \left( \frac{K_{cm}}{K_{ю} + K_{cm}} \right).$$

### Рабочее задание

Построить структуру системы регулирования и определить задающий комплексный параметр системы  $U_{зр}$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 **Сагиров, Х.Н.** Зажигание сварочной дуги / Х.Н. Сагиров, Н.Г. Дюргеров, И.С. Морозкин. – Ростов н/Д : Гефест, 1999. – 200 с.
- 2 **Дюргеров, Н.Г.** Саморегулирование в процессах дуговой сварки / Н.Г. Дюргеров. – Ростов н/Д : РГУПС, 2005. – 102 с.
- 3 **Ленивкин, В.А.** Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров. – М. : НАКС, 2011. – 267 с.
- 4 **Гитлевич, А.Д.** Механизация и автоматизация сварочного производства / А.Д. Гитлевич, Л.А. Этингоф. – М. : Машиностроение, 1972. – 278 с.
- 5 Механизированная наплавка поверхностей с помощью копировальных систем / Х.Н. Сагиров, Н.Г. Дюргеров, Д.Х. Сагиров, В.Н. Белавский // Сварочное производство. – 1999. – № 9. – С. 31–33.
- 6 **Бесекерский, В.А.** Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М. : Изд-во «Наука», 1975. – 767 с.
- 7 **Сагиров, Х.Н.** Технично-экономическое обоснование выбора автомата для наплавки / Х.Н. Сагиров, Н.Г. Дюргеров, Д.Х. Сагиров. – Ростов н/Д : РГУПС, 2001. – 20 с.
- 7 Механизация и автоматизация восстановления деталей грузовых вагонов / Х.Н. Сагиров, Н.Г. Дюргеров, В.И. Белявский, И.А. Бочкарев // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 31–33.
- 8 Автоматизация наплавки фрикционных клиньев / Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров, В.И. Белявский, Н.А. Бочкарев // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 4. – С. 51–52.
- 9 Механизация ремонта корпусов букс грузовых вагонов / Н.А. Бочкарев, В.И. Белявский, В.А. Харьковский, Х.Н. Сагиров, Н.Г. Дюргеров // Сварочное производство. – 2011. – № 7. – С. 48–49.
- 10 **Чвертко, А.И.** Оборудование для механизированной дуговой сварки и наплавки / А.И. Чвертко, В.Е. Патон, В.А. Тимченко. – М. : Машиностроение, 1981. – 263 с.
- 11 **Севбо, П.И.** Комбинированные машины для сварочного производства / П.И. Севбо. – Киев : Наукова думка, 1975. – 243 с.
- 12 **Патон, Б.Е.** Промышленные работы для сварки / Б.Е. Патон, Г.А. Спыну, В.Г. Тимошенко. – Киев : Наукова думка, 1977. – 225 с.
- 13 **Даровской, Г.В.** Ремонт трибологических узлов методом дополнительных деталей / Г.В. Даровской, Н.Г. Дюргеров, К.В. Шеховцов // Трибология – машиностроению: Тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. – М. : Институт компьютерных исследований, 2016. – С. 63.
- 14 Ремонт трибоузлов методом дополнительных деталей / Н.Г. Дюргеров, В.А. Ленивкин, Г.В. Даровской, К.В. Шеховцов // Труды РГУПС. – 2016. – № 2 (35). – С. 18–24.
- 15 **Ленивкин, А.В.** Энергетический баланс процесса сварки короткой дугой / А.В. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Г.В. Даровской // Сварка и диагностика. – 2016. – № 4. – С. 32–35.
- 16 **Ленивкин, А.В.** Особенности анодных процессов дуги при сварке плавящимся электродом в защитных газах / А.В. Ленивкин, Д.В. Киселев, Н.Г. Дюргеров, Г.В. Даровской // Сварка и диагностика. – 2016. – № 6. – С. 25–31.