

В.А. Лебедев

## К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

*Проаналізовано існуючі системи активного впливу на перенесення електродного металу при управлінні процесом дугового зварювання плавким електродом, в тому числі, і на основі імпульсної подачі електродного дроту. Особливо виділено новий спосіб зварювання – з керованими параметрами руху за рахунок введення в електропривод зворотних зв'язків за параметрами дугового процесу зварювання-наплавлення з дозованою подачею дроту. Розглянуто алгоритм реалізації зварювання з дозованою подачею. Обрано електропривод механізму подачі, який базується на спеціально розробленому швидкодіючому вентильному електродвигуні з комп'ютеризованим регулюванням. Для аналізу і вибору параметрів цієї системи запропоновано розглянути її в комплексі з дуговим процесом із застосуванням методів гармонійної лінеаризації. Бібл. 12, рис. 4.*

**Ключові слова:** зварювальний процес, електродний дріт, імпульсна подача, система управління, математичний опис, розрахунок.

*Проанализированы существующие системы активного влияния на перенос электродного металла при управлении процессом электродуговой сварки плавящимся электродом, в том числе, и на основе импульсной подачи электродной проволоки. Особо выделен новый способ сварки – с управляемыми параметрами движения за счёт введения в электропривод обратных связей по параметрам дугового процесса сварки-наплавки с дозированной подачей проволоки. Рассмотрен алгоритм реализации сварки с дозированной подачей. Выбран электропривод механизма подачи, который базируется на специально разработанном быстродействующем вентильном электродвигателе с компьютеризованным регулированием. Для анализа и выбора параметров этой системы предложено рассмотреть её в комплексе с дуговым процессом с применением методов гармонической линеаризации. Библ. 12, рис. 4.*

**Ключевые слова:** сварочный процесс, электродная проволока, импульсная подача, система управления, математическое описание, расчёт.

**Введение.** Дуговая механизированная и автоматическая сварка и наплавка плавящимся электродом является одним из самых распространённых технологических процессов с широкой сферой применения и прогнозируется, что и в дальнейшем будет развиваться, совершенствуясь во всех направлениях и сферах применения. Широкое применение дуговой механизированной сварки с использованием электродной проволоки как сплошного сечения, так и порошковых определяет поиск новых технических решений, направленных на совершенствование технологии процесса, а также на обновление парка механизированного и автоматического оборудования с новыми техническими возможностями [1].

Основные направления в совершенствовании технологии сварки и наплавки и соответствующих видах оборудования связаны с применением импульсных алгоритмов функционирования систем автоматом и полуавтоматов [2]. В последнее время технико-технологическое совершенствование автоматом и полуавтоматов связано с разработкой и конструированием одной из основных систем – системы подачи электродной проволоки с базовым узлом – механизмом подачи. Основные разработки в этом направлении связаны с применением импульсной подачи электродной проволоки. При этом имеются разработки как простых систем с практически отсутствием регулирования параметров импульсов, так и с достаточно совершенными механизмами и это подробно изложено в [3]. Можно отметить, что применение современного механизма подачи, обеспечивающего импульсное движение электродной проволоки позволяет при правильно выбранных параметрах реализовать управ-

ление переносом капель электродного металла, что в свою очередь позволяет (в основном) [4, 5]:

- существенно снизить потери электродного металла на угар и разбрызгивание;
- изменять геометрические размеры сварного шва и наплавленного валика, а также околошовной зоны;
- влиять на структуру металла сварного шва, улучшая его эксплуатационные свойства (прочность, износостойкость, в том числе и коррозионная и др.);
- снизить энергетические затраты на ведение процессов сварки и наплавки.

Дополнительно следует отметить малое значение инерционности электродвигателя.

Совершенствование системы подачи электродной проволоки разрабатываются с применением достижений элементной базы и технических решениях, базирующихся на них. Последние разработки механизмов с импульсными алгоритмами функционирования основываются на применении безредукторных электроприводов с бесколлекторными вентильными и шаговыми электродвигателями с микропроцессорным управлением частотой вращения их валов, а, следовательно, и движением электродной проволоки с высокими уровнями быстродействия. Такие системы постоянно совершенствуются в разных направлениях и в разных системах автоматического сварочно-наплавочного оборудования. Одно из них развивается достаточно интенсивно в системе подачи электродной проволоки и связано с введением в регулятор электропривода обратных связей по параметрам дугового процесса – то току или по напряжению. Такое решение позволило реализовать новый вид дугового

© В.А. Лебедев

процесса – сварка-наплавка с дозированной подачей электродной проволоки [6].

**Целью работы** является уточнение методики разработки (синтеза) эффективной системы управления электроприводом с управляемыми регуляторами релейного типа для организации дозированной подачи электродной проволоки с использованием параметров дугового процесса с возможностью использования в конструкторской практике и практике технологического применения.

**Постановка задачи.** На рис. 1 схематически показано формирование обратной связи по дуговому процессу. В данном случае – по току сварки в процессе с короткими замыканиями дугового промежутка в моменты включения и отключения привода подачи электродной проволоки в зависимости от желаемых (требуемых) результатов технологических процессов сварки и наплавки. Времена переключения на графике рис. 1 отмечены точками «с» ( $I_{w \min}$ ) и «b» ( $I_{w \max}$ ).

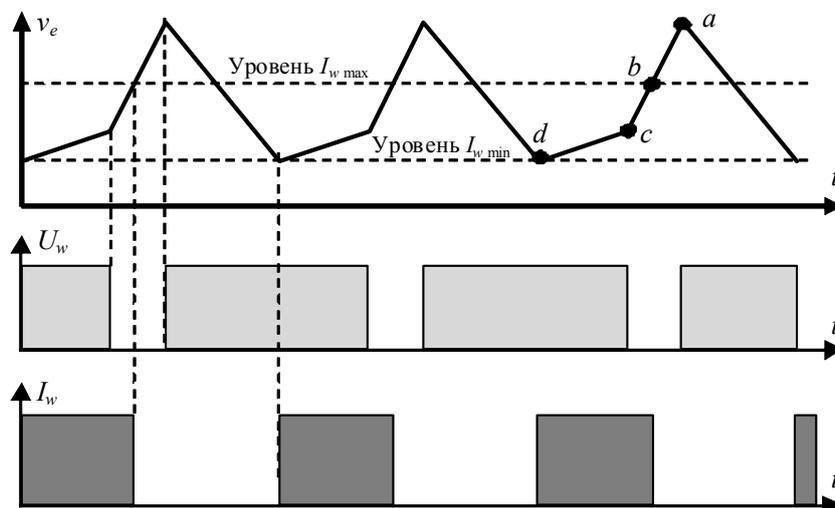


Рис. 1. Алгоритм работы системы управления переносом электродного металла связанный с параметрами тока дугового процесса:  $I_w$  – ток сварки;  $U_w$  – напряжение сварки;  $v_e$  – скорость подачи электродной проволоки;  $a$  – переход капли в ванну;  $b$  – пауза в скорости подачи;  $c, d$  – пуск подачи

Для синхронизации (совпадения) механических импульсов (импульсов подачи) с частотой коротких замыканий дугового промежутка в систему управления введена информационная обратная связь по параметрам дуги таким образом, чтобы пауза в подаче всегда начиналась после короткого замыкания.

Следует отметить, информационная обратная связь по току дугового процесса более эффективна, чем связь по напряжению ввиду того, что используемые в сварочно-наплавочном процессе источники питания дуги, имея, как правило, жёсткие внешние вольтамперные характеристики менее чувствительны по напряжению сварочного процесса в обратной связи. Могут существовать условия, когда обратная связь по напряжению будет приоритетной.

Обратная связь даёт возможность автоматической самонастройки электропривода механизма подачи по параметрам соответствующим естественной (физической) природе сварочной дуги и, что, исключает трудоёмкий выбор частоты и скважности следования механических импульсов, параметры которых предопределять весьма сложно.

На рис. 2 схематически представлена система дозированной управления процессом дуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка, включающая основные звенья системы с передаточными элементами:  $W_d$  – вентиляльный электродвигатель;  $W_s$  – процесс дуговой сварки;  $W_r$  – регулятор электропривода;  $W_{nl}$  – нелинейное звено, определяющее моменты переключения тока сварки при минимальном  $i_{w \min}$  и максимальном  $i_{w \max}$  токах сварочного процесса.

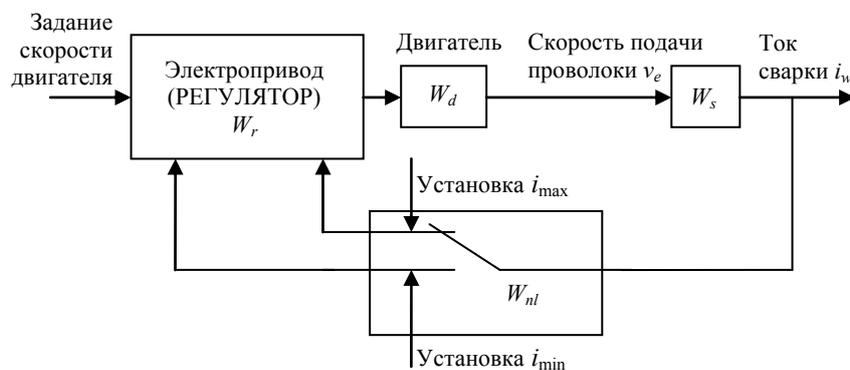


Рис. 2. Структурная схема системы управления процесса сварки с дозированной подачей электродной проволоки с нелинейным переключающим звеном

Выражения для определения передаточных отношений звеньев определяются следующим образом.

Известно, что передаточную функцию вентильного электродвигателя в операторной форме можно отождествить с передаточной функцией электродвигателя постоянного тока [7] и записать в несколько упрощённом виде

$$W_d(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K}{T_m p + 1}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота вращения вала;  $U$  – напряжение питания;  $K$  – величина обратно пропорциональная конструктивной постоянной электродвигателя;  $T_m$  – электромеханическая постоянная фазы электродвигателя с учётом инерционных характеристик безредукторного механизма подачи (роликов).

Для передаточной функция звена описывающего в операторной форме дуговой процесс сварки с короткими замыканиями дугового промежутка предлагается выражение, полученное нами в работе [8].

$$W_{nl}(p) = \frac{i_w(p)}{\omega(p)} \cdot \frac{E}{T \cdot p^2 + p + k}$$

или

$$W_{nl}(p) = \frac{i_w(p)}{\omega(p)} \cdot \frac{S}{T_1^2 \cdot p^2 + p + k}, \quad (2)$$

где

$$T = \frac{L}{R + 0,5 \cdot b_1}; \quad k = \frac{A \cdot H \cdot E}{R + 0,5 \cdot b_1},$$

в свою очередь  $L$ ,  $R$  – индуктивность и эквивалентное сопротивление сварочной цепи соответственно;  $b_1$  – коэффициент, характеризующий наклон статической характеристики дуги к оси токов;  $E$  – напряжённость электрического поля в столбе дуги;

$$A = \frac{1}{M \cdot \pi \cdot r^2}; \quad H = U_i(0,285 - 0,0052 \cdot U),$$

где  $U_i$  – напряжение холостого хода источника сварочного тока;  $M$  – коэффициент, определяющий тепловое состояние электродного металла

$$M = C_n \cdot \gamma_n \cdot T_n - C_o \cdot \gamma_o \cdot T_o + r_n \cdot \gamma_o,$$

где  $C_n$ ,  $C_o$  – теплоёмкость металла при температурах плавления и окружающей среды соответственно;  $\gamma_n$ ,  $\gamma_o$  – плотность металла при температурах плавления и окружающей среды соответственно;  $r_n$  – скрытая теплота плавления;  $T_n$ ,  $T_o$  – температура плавления электродного металла и температура окружающей среды соответственно;

$$S = \frac{E}{R + 0,5 b_1}.$$

Обычно для регулятора электропривода с обеспечением дополнительных качеств регулирования (минимальное перерегулирование, минимально возможное время изменения частоты вращения вала электродвигателя в переходных процессах и др.) используют различные структуры, например, ПИ-регуляторы, релейные регуляторы тока и пр. В нашем случае для упрощения рассмотрения системы дозированного управления без ущерба для сущно-

сти анализа примем передаточную функцию регулятора в операторном представлении в следующем виде

$$W_p(p) = \frac{U_{sv}(p)}{U(p)} = \frac{K_p}{T_p \cdot p + 1}, \quad (3)$$

где  $U_{sv}$  – напряжение питания;  $K_p$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_p$  – постоянная времени регулятора.

Описание передаточной функции нелинейного звена, обеспечивающего переключение уровней напряжения пропорциональных току сварочного процесса представляет некоторые сложности, в частности, потому, что нелинейность имеет несимметричный характер.

Может быть предложено несколько вариантов анализа такой нелинейной системы. Наиболее простым и эффективным может быть вариант с применением математического моделирования. Однако такое решение не всегда возможно для применения в конструкторской и особенно технологической практике при выборе параметров нелинейного звена в цепи обратной связи, определяющих характеристики переноса капель электродного металла.

**Основная часть.** В рассматриваемой системе, путем переключения изменяются связи между элементами в зависимости от ее состояния, следовательно, такую систему можно вполне отнести к системе с переменной структурой [9]. Структурная схема такой системы меняется в течение переходного процесса таким образом, чтобы обеспечить качественное выполнение задач управления сварочным процессом путём влияния на перенос капель электродного металла. Серьезным препятствием применения аналитических методов и вычислительных средств для построения эффективных алгоритмов управления современными техническими объектами, к числу которых можно отнести и дуговые сварочные процессы, в том числе и с дозированной подачей является широкий спектр их характеристик, как по составу компонентов системы, так и по воздействиям. Перспективным методом в решении задач описания систем с переменной структурой может быть использование методик анализа скользящих режимов. Однако очевидная сложность получения аналитических выражений для этого способа исследования системы с переменной структурой также не может быть применима как в конструкторской, так и в технологической практике.

Два вышеотмеченных способа анализа системы с нелинейным элементом являются достаточно точными, однако очевидно сложными для прикладного применения. Следует рассмотреть приближённые способы получения математического описания нелинейных звеньев [10, 11]. Ряд этих способов рассмотрен в монографии [12]. Нам представляется, что метод гармонического баланса будет наиболее приемлем для рассматриваемой системы управления.

На рис. 3 в формализованном виде показан нелинейный несимметричный релейный элемент соответствующий звену  $W_{nl}$  на рис. 2.

Очевидно, что нелинейность неоднозначна, что должно отразиться на передаточной функции нелинейного звена.

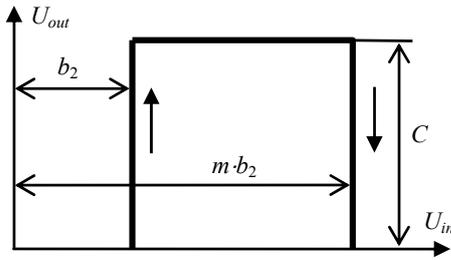


Рис. 3. Формализованное представление релейного несимметричного звена (обозначение по тексту)

Передаточная функция нелинейного звена по рис. 3 состоит из эквивалентного комплексного передаточного коэффициента, которое включает в себя постоянную составляющую  $F^0$  и коэффициенты гармонической линеаризации  $q$  и  $q'$

$$W_{nl} = F^0(A, x^0) + q(A, x^0) + q'(A), \quad (4)$$

где  $F^0$  – постоянная составляющая;  $A$ ,  $x^0$  – амплитуда и смещение центра колебаний, которые, согласно [10], можно определить как

$$F^0(A, x^0) = \frac{c}{2} - \frac{c}{2\pi} \left( \arcsin \frac{b_2 - x^0}{A} + \arcsin \frac{m \cdot b_2 - x^0}{A} \right);$$

При

$$A \geq |b_2 - x^0|, \quad A \geq |x^0 - m \cdot b_2|, \quad (5)$$

где  $c$ ,  $b$ ,  $m$  – максимальное значение релейного импульса; период, в который импульс выключается; часть периода, при которой импульс включается соответственно

$$q(A, x^0) = \frac{c}{\pi A} \left[ \sqrt{1 - \frac{(b_2 - x^0)^2}{A^2}} + \sqrt{1 - \frac{(m \cdot b_2 - x^0)^2}{A^2}} \right], \quad (6)$$

при

$$A \geq |b_2 - x^0|, \quad A \geq |x^0 - m \cdot b_2|,$$

$$q'(A) = -\frac{c \cdot b_2}{\pi \cdot A} (1 - m),$$

при

$$A \geq |b_2 - x^0|, \quad A \geq |x^0 - m \cdot b_2|, \quad (7)$$

С учетом (4) – (7), а также несложными алгебраическими преобразованиями получим приближенную линейную зависимость выходной переменной нелинейного звена от его входной переменной: с передаточной функцией

$$W_{nl}(p) = c \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2 \cdot \pi} \left( \arcsin \frac{b_2 - x^0}{A} + \arcsin \frac{m \cdot b_2 - x^0}{A} \right) + \frac{1}{\pi \cdot A} \left[ \sqrt{1 - \frac{(b_2 - x^0)^2}{A^2}} + \sqrt{1 - \frac{(m \cdot b_2 - x^0)^2}{A^2}} \right] - \frac{b_2 \cdot p}{\pi \cdot \omega \cdot A} (1 - m) \right\}. \quad (8)$$

Таким образом, под действием гармонических колебаний нелинейное звено как бы линеаризуется и может рассматриваться приближенно как линейное звено. Коэффициенты  $q$  и  $q'$ , указанные выше, можно назвать гармоническими коэффициентами усиления нелинейного звена. Из формул для коэффициентов

видно, что  $F^0$ ,  $q$  и  $q'$  зависят от амплитуды входного сигнала. Эта зависимость отражает нелинейные свойства звена и из-за нее принцип суперпозиции неприменим для гармонически линеаризованного нелинейного звена.

Передаточная функция замкнутой системы управления процессом дуговой сварки с дозированной подачей электродной проволоки может быть записана в виде уравнение в операторной форме следующим образом.

$$\frac{i(p)}{U_{vt}(p)} = \frac{W_p(p) \cdot W_d(p) \cdot W_w(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_d(p) \cdot W_w(p) \cdot W_{nl}(p)}, \quad (9)$$

где  $U_{vt}$  – напряжение задания.

Введем обозначения

$$D = c \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2\pi} \left( \arcsin \frac{b_2 - x^0}{A} + \arcsin \frac{m \cdot b_2 - x^0}{A} \right) + \frac{1}{\pi A} \left[ \sqrt{1 - \frac{(b_2 - x^0)^2}{A^2}} + \sqrt{1 - \frac{(m \cdot b_2 - x^0)^2}{A^2}} \right] \right\}; \quad (10)$$

$$N = -\frac{b_2}{\pi \cdot \omega \cdot A} (1 - m). \quad (11)$$

С учётом (1) – (3), (9) – (11) получим полное выражение для определения искомой зависимости

$\frac{i(p)}{U_{vt}(p)}$  в операторной форме:

$$\frac{i(p)}{U_{vt}(p)} = \frac{K_p \cdot K_d \cdot S}{(T_p \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1) \cdot (T_1^2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + k) + K_p \cdot K_d \cdot S(D - N \cdot p)} \quad (12)$$

Решение операторного уравнения (12) в виде получения аналитической зависимости  $i = f(U_{vt})$  представляет определённые сложности, в том числе и из-за высокого порядка  $p$ . Такая возможность представляется при использовании машинных способов исследования и с применением математического моделирования.

Современная математика не позволяет простыми методами решать в общем виде уравнения выше третьего порядка, поэтому будем искать способы понижения порядка неизвестного  $p$  максимальный порядок которого  $p^4$ .

Для исследования системы с линеаризованным звеном используются некоторые инженерные методы расчётов. Прежде всего, учтём, что постоянная времени регулятора весьма мала и передаточная функция звена (3) может быть исключена или входить в состав передаточной функции с коэффициентом усиления, который учитывается звеном (1). Учитывая изложенное уравнение (12) можно переписать в упрощенном виде

$$\frac{i(p)}{U_{vt}(p)} = \frac{K_d \cdot S}{T_d \cdot T_1^2 \cdot p^3 + (T_1^2 + T_d \cdot T_2) \cdot p^2 + (T_d \cdot k + T_2) \cdot p + k + K_d \cdot S(D - N \cdot p)}. \quad (13)$$

Исследование линеаризованного уравнения (13) будем вести с использованием одного из инженерных методов – по частотному методу Е.П. Попова.

Из выражения (13) определим характеристическое уравнение

$$T_d \cdot T_1^2 \cdot p^3 + (T_1^2 + T_d \cdot T_2) \cdot p^2 + (T_d \cdot k + T_2) \cdot p + k + K_d \cdot S(D - N \cdot p) = 0. \quad (14)$$

Разделим уравнение (14), подставив  $p = j \cdot \omega$  на действительную и мнимую часть как это показано ниже

$$(k + K_d \cdot S \cdot D - (T_1^2 + T_d \cdot T_2) \cdot \omega^2) = 0; \quad (15)$$

$$(T_d \cdot k + T_2 + K_d \cdot S \cdot N) \cdot \omega + k - T_d \cdot T_1^2 \cdot \omega^2 = 0. \quad (16)$$

Частота периодического процесса  $\omega$  определяется при решении квадратного уравнения (16). Дискриминант уравнения (16)

$$(T_d \cdot k + T_2 + K_d \cdot S \cdot N)^2 - 4 \cdot T_d \cdot T_1^2 \cdot k = 0. \quad (17)$$

Из выражения (17) следует важный вывод что автоколебания с частотой  $\omega$  могут иметь место при условии

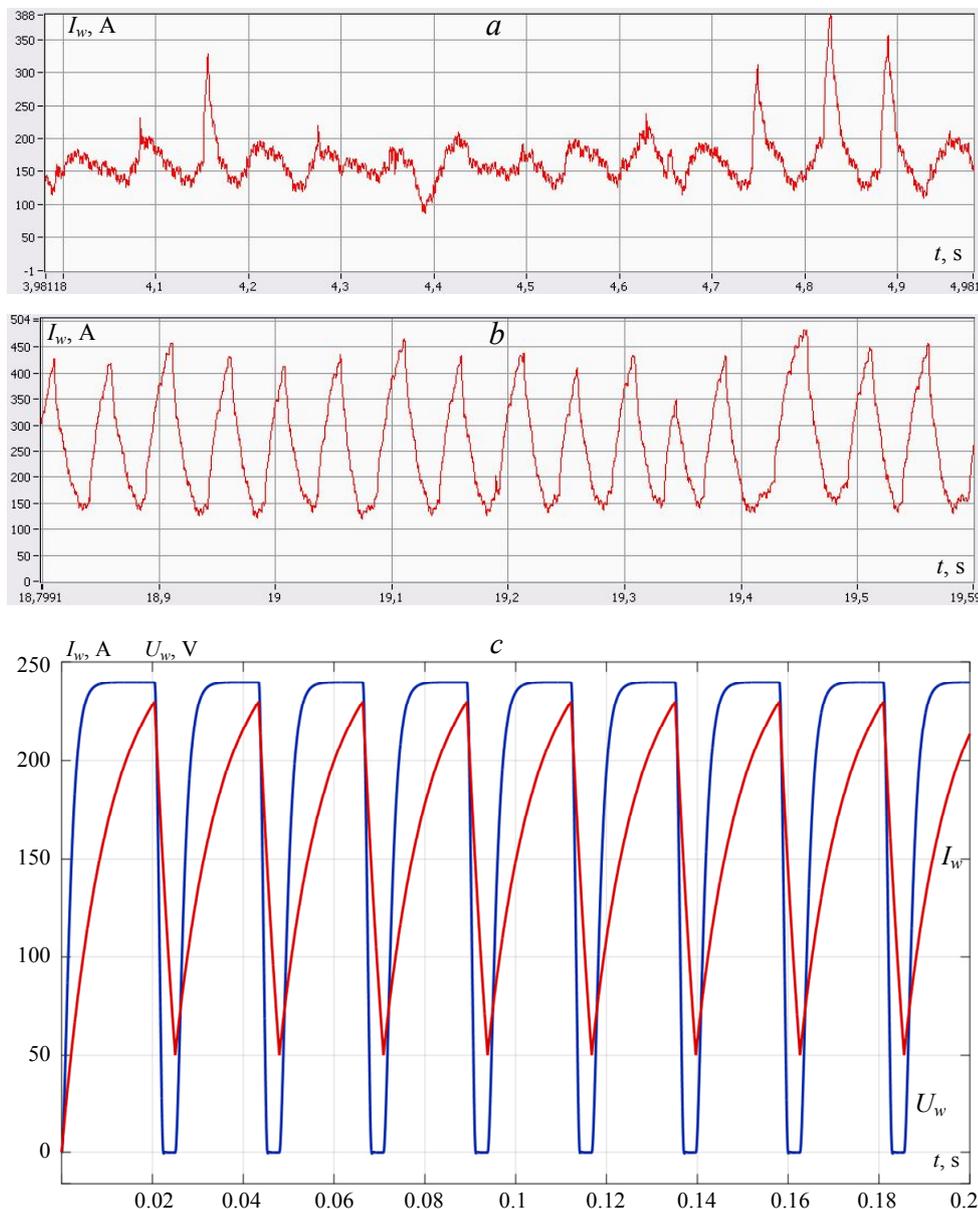
$$(T_d \cdot k + T_2 + K_d \cdot S \cdot N)^2 \geq 4 \cdot T_d \cdot T_1^2 \cdot k. \quad (18)$$

Определив из уравнения (15) частоту  $\omega$  и подставив её в уравнение (16) можно определить и амплитуду автоколебаний.

Так как, кроме всего прочего, частота и амплитуда автоколебаний определяются и значениями  $b_2$  и  $m \cdot b_2$ , что практически соответствует минимальному  $i_{w \min}$  и максимальному  $i_{w \max}$  значениям тока дугового процесса, что в свою очередь определяет характер переноса электродного металла, от которого зависят результаты сварки с применением дозированной подачи электродной проволоки.

**Проверка полученных результатов.** Оценку и достоверность полученных результатов проводили путём сравнения осциллограмм тока дугового процесса с результатами, которые получены при математическом моделировании с одинаковыми исходными данными.

На рис. 4 представлены несколько вариантов представлений токов и напряжений при механизированной электродуговой сварке в среде защитных газов при подаче электродной проволоки обычным способом (рис. 4,а) и с использованием алгоритмов дозированной подачи (рис. 4,б).



Сравнение реальных осциллограмм тока и напряжения с данными, полученными при компьютерном моделировании с использованием среды MATLAB (Simulink) (рис. 4,с), свидетельствуют о достаточно близком результате по частоте переноса электродного металла.

Получено совпадение в пределах 10-15 % и это приемлемый результат для технологий механизированных и автоматических процессов сварки – наплавки с импульсными алгоритмами подачи электродной проволоки и подтверждения работоспособности предложенной методики.

Рис. 4. Сравнительные результаты исследования процесса дуговой сварки и наплавки:  
а – ток обычного процесса;  
б – ток процесса с дозированной подачей электродной проволоки;  
с – моделирование процесса сварки (качественное представление)

Предложенная методика расчёта параметров работы электропривода в системе технической реализации способа сварки и наплавки с дозированной подачей электродной проволоки на основе введения регулируемой обратной связи по току дугового процесса имеет весьма важное практическое применение и позволяет определить сочетания минимального  $i_{w \min}$  и максимального  $i_{w \max}$  значений тока сварочного процесса которые определяют частоту и амплитуду импульсов тока дуги и в итоге управляемую частоту переноса капель электродного металла и тем самым обеспечивают качественные показатели получаемых сварных швов и наплавленных слоев (разбрызгивание, тепловложение, формирование, проплавление, затраты электроэнергии и др.). Экспериментальным путём выбрать параметры установок обратной связи достаточно сложно, так как на практике применяются различные типы и диаметры электродной проволоки, используются разные режимы процессов и др.

#### Выводы.

1. Система управления процессом дуговой сварки с дозированной импульсной подачей электродной проволоки, включающая в себя математическое представление процесса сварки, содержит существенно нелинейное звено в цепи обратной связи по току дугового процесса, которое для исследования системы может быть линеаризовано. При этом для задач выбора параметров управления переносом электродного металла наиболее применим метод гармонической линеаризации, при котором нелинейный элемент может быть представлен несимметричным релейным звеном.

2. Исследование разработанной системы управления целесообразней всего можно вести используя методы операционного исчисления, применение которого позволяет получить применимые в конструкторской и технологической практике результаты, и определяющие результаты дугового процесса.

3. Проверка применённых методов исследования разработанной системы управления процессом сварки с применением дозированной подачи электродной проволоки, проведённая с применением компьютерного моделирования и получением характерных осциллограмм подтверждает адекватность выбранных методов исследования

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патон Б.Е. Проблемы сварки на рубеже веков. *Автоматическая сварка*, 1999, № 1, С. 4-14.
2. Harris I. Transfer of heat and mass to the base metal in gas metal arc welding. *Welding, Brazing, and Soldering*, 2011, vol. 6, pp. 82-88.
3. Патон Б.Е., Лебедев В.А., Пичак В.Г., Полосков С.Ю. Эволюция систем импульсной подачи проволоки для сварки и наплавки. *Сварка и диагностика*, 2009, № 3, С.46-51.
4. Zhao Y., Lee P.-S., Chung H. Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass*

*Transfer*, 2019, vol. 129, pp. 1110-1122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037>.

5. Nadzam J. Tandem GMAW: The Flexibility of Pulsed Spray Transfer. *Welding Innovation*, 2002, vol. 19, no. 2, pp. 18-21.
6. Лебедев В.А., Жук Г.В. Управление переносом электродного металла на основе импульсных алгоритмов функционирования систем с дозированием подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке. *Тяжёлое машиностроение*, 2017, № 6, С. 27-31.
7. Лебедев В.А., Гулый М.В. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2014, № 6, С.47-51.
8. Лебедев В.А. Повышение эффективности сварочного оборудования на основе исследования импульсных воздействий в системе подачи электродной проволоки. Дисс. ... докт. техн. наук. – Киев, 2010.
9. Емельянов С.В. Теория систем с переменной структурой. – М.: Издательство «Наука», 1970. – 592 с.
10. Abu-Khalaf M., Huang J., Lewis F.L. *Nonlinear H2/H-Infinity Constrained Feedback*. Control Springer, 2006. 203 p.
11. Agachi P.S., Cristea M.V., Csavdari A.A., Szilagyi B. *Advanced process engineering control*. Walter de Gruyter GmbH, Berlin, Germany, 2017. 412 p.
12. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Издательство «Наука», 1975. – 768 с.

#### REFERENCES

1. Paton B.E. Welding problems at the turn of the century. *Automatic welding*, 1999, no. 1, pp. 4-14. (Rus).
2. Harris I. Transfer of heat and mass to the base metal in gas metal arc welding. *Welding, Brazing, and Soldering*, 2011, vol. 6, pp. 82-88.
3. Paton B.E., Lebedev V.A., Pichak V.G., Poloskov S.Yu. The evolution of pulsed wire feed systems for welding and surfacing. *Welding and Diagnostics*, 2009, no. 3, pp. 46-51. (Rus).
4. Zhao Y., Lee P.-S., Chung H. Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 129, pp. 1110-1122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037>.
5. Nadzam J. Tandem GMAW: The Flexibility of Pulsed Spray Transfer. *Welding Innovation*, 2002, vol. 19, no. 2, pp. 18-21.
6. Lebedev V.A., Zhuk G.V. Transferal control of electrode metal on the basis of pulsed-type algorithms of system operation with dosing activity of continuous electrode by mechanized arc welding. *Heavy Engineering*, 2017, no. 6, pp. 27-32. (Rus).
7. Lebedev V.A., Guly M.V. The high-speed valve electric drive for the equipment of the mechanized arc welding. *Mechatronics, automation, control*, 2014, no. 6. pp. 47-51. (Rus).
8. Lebedev V.A. *Povyshenie effektivnosti svarochnogo oborudovaniia na osnove issledovaniia impul'snykh vozdeistvii v sisteme podachi elektrodnoi provoloki*. Diss. dokt. techn. nauk [Increasing the efficiency of welding equipment based on the study of impulse effects in the electrode wire feed system. Doc. tech. sci. diss.]. Kyiv, 2010. (Rus).
9. Emelyanov S.V. *Teoriya sistem s peremennoi strukturoj* [Theory of systems with variable structure]. Moscow, Science Publ. House, 1970. 592 p. (Rus).
10. Abu-Khalaf M., Huang J., Lewis F.L. *Nonlinear H2/H-Infinity Constrained Feedback*. Control Springer, 2006. 203 p.
11. Agachi P.S., Cristea M.V., Csavdari A.A., Szilagyi B. *Advanced process engineering control*. Walter de Gruyter GmbH, Berlin, Germany, 2017. 412 p.

12. Besekersky V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control systems]. Moscow, Science Publ. House, 1975. 768 p. (Rus).

Поступила (Received) 04.09.2020

Принята (Accepted) 10.11.2020

Опубликована (Published) 25.02.2021

Лебедев Владимир Александрович, д.т.н., проф.,  
Государственное предприятие  
«Опытное конструкторско-технологическое бюро  
Института электросварки им. Е.О.Патона  
Национальной академии наук Украины»,  
03150, Киев, ул. Боженко, 7,  
e-mail: valpaton@ukr.net

V.A. Lebedev

SF «Experimental Design-Technological Office  
of the E.O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine»,  
7, Bogenko Str., Kiev, 03150, Ukraine.

**On the solution of the problem of synthesis of the control system for the process of dosed feed of electrode wire for arc welding equipment.**

**Goal.** Refinement of the methodology for the development of an effective control system for an electric drive with controlled relay-type regulators for organizing a metered feed of an electrode wire using the parameters of the arc process with the possibility of using it in design practice and practice of technological application. **Methodology.** The proposed method for the mathematical description (mathematical model) of the system of the developed structure electric drive - arc process with current feedback of welding with a variable structure device is based on the theory of automatic control as applied to nonlinear elements, the application of the theory of operational calculus. At the same time, a selection and description of a nonlinear node in

the feedback circuit in the form of a relay element with a certain structure and subsequent linearization of this element was made. As an electric motor of the electrode wire feeder, a new development of a specialized valve electric motor is used, which is used in the system with a microprocessor controller. **Results.** Due to the presence of a substantially nonlinear link, the calculation of the valve electric drive system – the arc process can be found on the basis of a system of nonlinear differential equations, which is practically impossible for practical application. In this work, these complications are overcome on the basis of a rational choice of the description of the nonlinear link, its harmonic linearization and obtaining on this basis a mathematical description of the system, from which, using the methodology of operational calculus, the relations necessary for calculating the parameters of the system are determined in analytical form. **Originality.** The problem of calculating a rather complex problem of mathematical description of the valve electric drive system – a technological link in the form of an arc process with a substantially nonlinear link in the feedback circuit in the work is solved with the effective use of a set of methodological methods, which include as a means of representing individual links, including nonlinear links selected simplifications and solutions of the obtained differential equations using original methods of operational calculus. The proposed method (mathematical model) is tested in two directions – oscillography of a real system, as well as system simulation. **Practical significance.** Using the developed methods for describing the control system, it is possible to calculate its characteristics and, on their basis, select the parameters for setting the electric drive controller, which allows, without additional experimental research, to obtain the necessary character of the transfer of electrode metal, and, consequently, the quality of the result of the arc process. References 12, figures 4.

**Key words:** welding process, electrode wire, pulse feed, control system, mathematical description, calculation.