

6. Senchenkov I.K., Ryabtsev I.A., Turyk E., Chervinko O.P. Ispol'zovanie teorii rastushchikh tel pri raschete napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia detalei, izgotavlivaemykh s primeneniem additivnykh naplavochnykh tekhnologii [The use of the theory of growing bodies in calculating the stress-strain state of parts manufactured using additive surfacing technologies]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 2016, no. 5-6, pp. 135-140. **Doi:10.15407/as2016.06.21.** (Rus.)
7. Ryabtsev I.A., Babinets A.A., Korzhik V.N., Siyko I.A., Chakan Yunen. Oborudovanie i tekhnologii antikorrozionnoi elektroshlakovoi naplavki dvumia lentami [Equipment and technologies for anti-corrosion electroslag surfacing with two tapes]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 2017, no. 8, pp. 55-60. **doi:10.15407/as2017.08.07.** (Rus.)
8. Perepletchikov E.F., Ryabtsev I.A., Lankin Yu.N., Semikin V.F., Misfire P.P. Modernizatsiia sistemy upravleniia plazmenno-poroshkovoi naplavki ustanovki A 1756 [Modernization of the control system of plasma-powder surfacing of installation A1756]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 2014, no. 12, pp. 46-49. (Rus.)
9. Ryabtsev I.A. *Naplavka detalei mashin i mekhanizmov* [Surfacing of machine parts and mechanisms]. Kiev, Ecotechnology Publ., 2004. 160 p. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 03.02.2019

УДК 621.791.92

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181401

© Иванов В.П.<sup>1</sup>, Щербаков С.В.<sup>2</sup>, Лещинский Л.К.<sup>3</sup>

### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

*Предложена функциональная схема системы управления процессом электродуговой наплавки, состоящая из регулятора и блока управления шаговым двигателем. Показано, что в системе управления целесообразно использовать шаговые двигатели с энкодером положения вала. С помощью специализированной интерактивной среды проведено тестирование программного обеспечения для управления скоростью вращения двигателей с применением широтно-импульсной модуляции. На базе программируемого микроконтроллера разработана схема управления коллекторными двигателями постоянного тока типа СЛ. Установлено, что согласованное управление всеми приводами установки позволяет управлять процессом нанесения слоя сложной конфигурации и переменного химического состава. Это открывает новые возможности повышения эффективности модернизации существующих и перспективных наплавочных установок.*

**Ключевые слова:** электродуговая наплавка, наплавочная установка, конфигурация наплавленного слоя, переменный химический состав, система управления, шаговый двигатель, широтно-импульсная модуляция, имитационная модель, интегрированная среда разработки, контроллер, персональный компьютер.

**Іванов В.П., Щербаков С.В., Лещинський Л.К. Розробка системи автоматизованого управління процесу електродугового наплавлення з використанням широ-**

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [ivanov\\_v\\_p@pstu.edu](mailto:ivanov_v_p@pstu.edu)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [matvivenkovn@gmail.com](mailto:matvivenkovn@gmail.com)

<sup>3</sup> д-р техн. наук, профессор, Бостон, США

*тно-імпульсної модуляції. Авторами запропоновано функціональну схему системи управління процесом електродугового наплавлення за двома ідентичними каналами, які містять регулятор і блок управління кроковим двигуном. Показано, що в системі керування доцільно використовувати крокові двигуни з енкодером положення вала. Інформація про його положення по кожному з каналів надходить на вхід регулятора для формування сигналів управління, пропорційних величині неузгодженості. За допомогою інтегрованого середовища розробки проведено тестування програмного забезпечення для управління швидкістю обертання двигунів із застосуванням широтно-імпульсної модуляції. З метою практичної реалізації моделі управління кроковим двигуном було розроблено програмно-технічний комплекс. До складу комплексу входять: персональний комп'ютер, програмований мікроконтролер і драйвер силової частини. На базі програмованого мікроконтролера була розроблена альтернативна схема управління колекторними двигунами постійного струму типу СЛ із застосуванням тиристорного перетворювача. Програмування мікроконтролера здійснюється із застосуванням персонального комп'ютера. Формування сигналів управління приводами подачі електродів з різним вмістом легуючих елементів здійснюється програмно відповідно до заданого закону (функціональною залежністю). Встановлено, що узгоджене управління всіма приводами установки дозволяє управляти процесом нанесення шару складної конфігурації і змінного хімічного складу. Це відкриває нові можливості підвищення ефективності модернізації існуючих наплавлювальних установок.*

**Ключові слова:** електродугове наплавлення, наплавлювальна установка, конфігурація наплавленого шару, змінний хімічний склад, система управління, кроковий двигун, широтно-імпульсна модуляція, імітаційна модель, інтегроване середовище розробки, контролер, персональний комп'ютер.

**V.P. Ivanov, S.V. Scherbakov, L.K. Leshchinskiy. Development of the automated control system of the electric arc surfacing with application of width-pulse modulation.** A functional diagram of a control system for controlling the process of electric arc surfacing along two identical channels that contain a controller and a control unit for a stepper motor, is proposed. It is shown that in the control system it's advisable to use stepper motors with a shaft position encoder. Information about its position on each of the channels is fed to the input of the controller for generating control signals proportional to the value of the mismatch. On a simulation model including virtual module, software was tested to control the rotation speed of motors using width-pulse modulation. For the purpose of practical implementation of the simulation model of stepper motor control, a software and hardware complex has been developed. It consists of a personal computer, a programmable microcontroller, a driver of the power unit. Based on the programmable microcontroller, a control circuit for the DC collector motors has been developed. Programming the controller and managing the system is carried out using a personal computer. A standard converter was used to generate current pulses for controlling the supply drives of electrodes with different content of alloying elements. It was found that the coordinated management of all drives of the installation allows the process control of applying a layer of complicated configuration and variable chemical composition. This opens up new possibilities for improving the efficiency of modernization of existing and promising surfacing installation.

**Keywords:** electric arc surfacing, surfacing installation, deposited layer, complicated configuration, variable chemical composition, control system, stepper motor, width-pulse modulation, simulation model, virtual module, programmable microcontroller, personal computer.

**Постановка проблеми.** Изготовление и восстановление изделий путём формирования швов сложной формы с изменяющимся химическим составом требует разработки системы управления процессом наплавки. Применительно к наплавочной установке автоматизированная система управления должна обеспечивать согласованную работу приводов перемещения

наплавочного аппарата, подачи электродов, вращения наплавляемого изделия, а также возможность управления по периодически или произвольно изменяющемуся закону.

**Анализ последних исследований и публикаций.** При использовании блоков управления электроприводами наплавочного аппарата и вращения изделия, не связанных между собой и обеспечивающих лишь стабилизацию скорости движения, возможна наплавка сплошных слоёв из валиков, укладываемых по винтовой линии или по схеме «слалома». В этом случае начальная и конечная точки каждого витка должны выставляться и контролироваться вручную [1, 2]. В отличие от этого, при нанесении валиков под заданным углом к образующей [3], а также с зазором между ними [4], синхронное с перемещением наплавочного аппарата вращение изделия обеспечивается за счёт введения следящей обратной связи. С этой целью с валами приводов связаны датчики угла поворота, сигналы с которых позволяют контролировать процесс синхронизации [5]. С усложнением технологии наплавки изменяются требования к разрабатываемой системе управления. В наибольшей мере требования к её функциональным характеристикам возрастают в случае, если задача получения наплавленного слоя сложной геометрической формы сочетается с необходимостью изменения его химического состава [6] или тепло- и массопереноса по заданному закону [7]. От способности системы соответствовать этим требованиям зависит результат работы.

**Цель статьи** – разработка системы автоматизированного управления процессом электродуговой наплавки с использованием широтно-импульсной модуляции.

**Изложение основного материала.** Функциональная схема системы управления наплавочной установкой представлена на рис. 1. Она включает несколько (два) идентичных канала, состоящих из регулятора и схемы управления шаговым электродвигателем. Информация о положении изделия поступает от датчиков положения (инкрементных энкодеров). По каждому из каналов информация о положении поступает на вход регулятора для формирования сигналов управления, пропорциональных величине рассогласования. Один из двигателей работает в реверсивном режиме, в направлении уменьшения величины рассогласования положений изделия – электрод. Блоки управления электроприводами могут работать и по независимым законам управления как с использованием энергонезависимой памяти контроллера, так и напрямую с управляющего ПК.

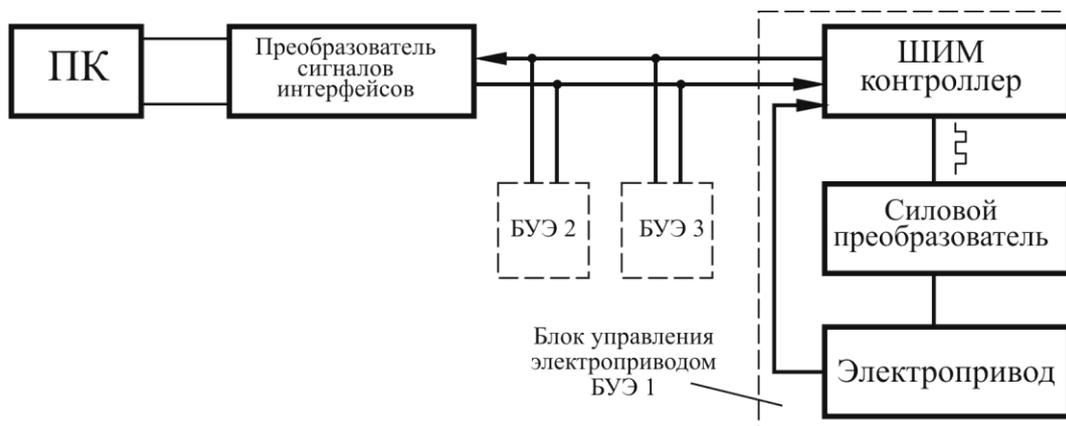


Рис. 1 – Функциональная схема системы управления наплавочной установкой

Программируемый контроллер предназначен для управления приводами, может работать как автономно, так и от ПК. Осуществляет синхронное управление работой приводов, подключенных к блоку управления, обеспечивая требуемую конфигурацию наплавляемых валиков (швов). Структура блока управления электроприводом (БУЭ) реализует подчиненное многоконтурное регулирование с обратной связью по положению для улучшения точности и гибкости управления. Силовой преобразователь реализован на базе мостового драйвера двигателей постоянного тока (шаговых двигателей). Преобразователь сигналов интерфейсов необходим для подключения устройств различного типа – аналоговых и цифровых, например, конечных выключателей, датчиков реверса, аварийных, термодатчиков и т. п.

В качестве электроприводов могут быть использованы широко применяемые в сварочных установках двигатели постоянного тока типа СЛ с обмоткой возбуждения. Однако более целесообразно использовать для управления шаговые двигатели с энкодером положения вала в типоразмере стандарта NEMA 17 (23). Использование шаговых двигателей позволяет реализовывать дополнительные функции управления процессом наплавки:

- задавать и обрабатывать необходимое количество шагов либо осуществлять непрерывное вращение;
- осуществлять выбор направления вращения двигателей;
- определять взаимное положение изделия и электрода;
- осуществлять выбор (задание функции изменения) скорости перемещения по линейному, периодическому и ступенчато (дискретно) изменяющемуся закону;
- определять число фактически обработанных шагов, время и скорость движения в онлайн режиме.

Использование дополнительного модуля (БУЭ) позволяет изменять функциональную зависимость скорости подачи электрода по любому закону (в рамках возможности источника питания).

Тестирование программного обеспечения для управления скоростью вращения двигателей с применением широтно-импульсной модуляции проводилось на имитационной модели. С целью практической реализации имитационной модели управления шаговым двигателем по заданному закону изменения скорости вращения был разработан программно-технический комплекс в составе персонального компьютера, программируемого микроконтроллера, драйвера силовой части и специализированного программного обеспечения для программирования микроконтроллера. На рис. 2 представлена структурная схема программно-технического комплекса.

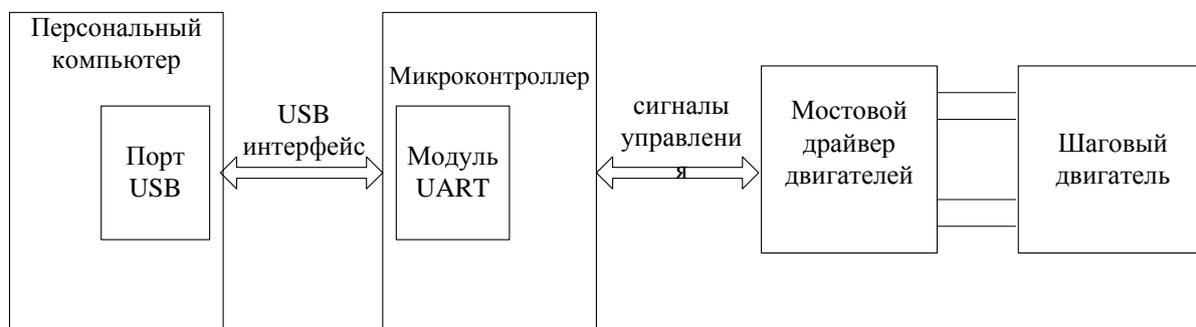


Рис. 2 – Структурная схема программно-технического комплекса

Модуль программного управления представлен платой Arduino Uno на базе микроконтроллера ATmega328P (рис. 3). В его состав входит: 14 цифровых входов/выходов (из них 6 могут использоваться в качестве ШИМ-выходов), 6 аналоговых входов, кварцевый резонатор на 16 МГц, разъем USB, разъем питания, разъем для программирования (ICSP) и кнопка сброса. Arduino Uno предоставляет ряд возможностей для осуществления связи с компьютером, еще одним Arduino или другими микроконтроллерами. В контроллере ATmega328 используется встроенный конвертер интерфейсов USB-UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Данный узел реализует асинхронный последовательный способ приема-передачи информации, применяемый при подключении большинства цифровых устройств. Коммутация сигналов модуля конвертера интерфейсов и микроконтроллера выполнена на одной плате, что позволяет реализовать прямое соединение с компьютером через USB порт.

Результатом выполнения программы является формирование на дискретных выходах контроллера сигналов управления мостовым драйвером двигателя. Модуль силовой части реализован с помощью специализированной микросхемы L298N для управления двунаправленными нагрузками (двигателями постоянного тока, шаговыми двигателями). С помощью драйвера L298N можно подавать на обмотки двигателя импульсы управления с заданной величиной, формой и временными характеристиками, изменять направление и скорость вращения двигателей.

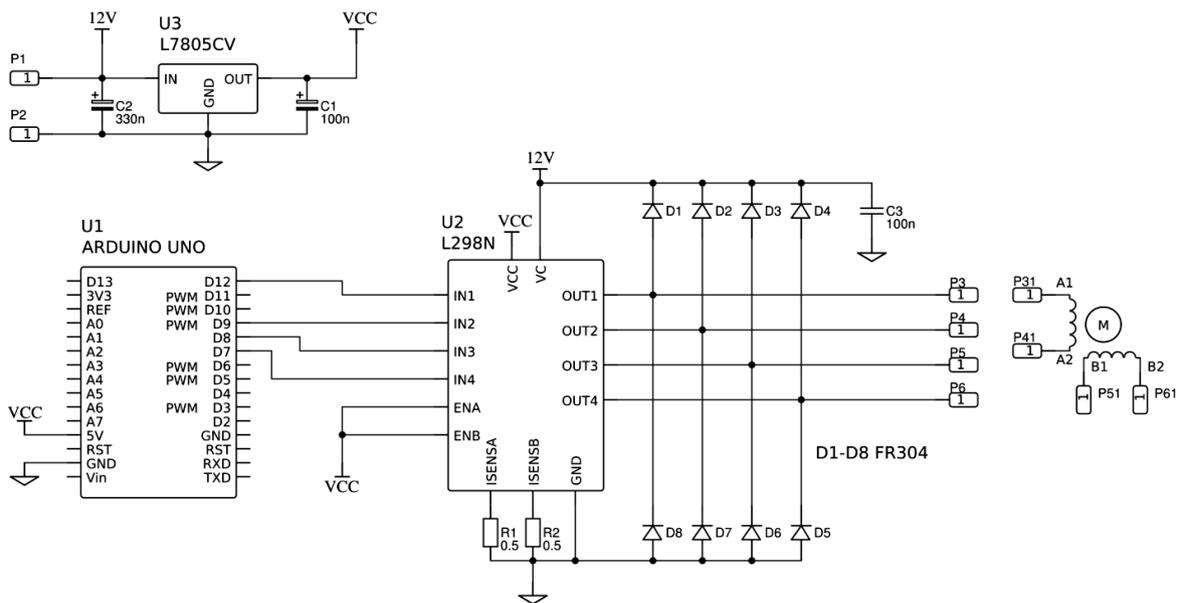


Рис. 3 – Схема управління біполярним шаговим двигателем: U1 – мікросхема контролера Arduino Uno; U2 – мікросхема мостового драйвера шагового двигателю; U3 – мікросхема стабилизатора напруги блока живлення; М – шаговий двигачель; А, В – обмотки шагового двигачеля; VCC – стабилизованне напруге +5В; конденсатор С1 – стабилизация напруги при резком изменении тока нагрузки, уменьшение степени пульсаций; конденсатор С2 – компенсация ВЧ помех при подаче входного напруги; конденсатор С3 – уменьшение степени пульсаций напруги живлення; сопротивления R1, R2 – ограничение максимального тока обмоток двигачеля; диоды D1-D8 – защита микросхемы драйвера от повышенных напруг при переключении обмоток двигачеля

Особенностью подключения шагового двигателя (см. рис. 3) является то, что он имеет минимум две обмотки. Одна обмотка соединена с выходом моста А (OUT1, OUT2), другая – с выходом моста В (OUT3, OUT4) драйвера U2. Работа мостов разрешена постоянно поддержанием на входах En А и En В сигналов высокого уровня. Управление скоростью и направлением вращения двигателя осуществляется путем подачи на входы IN1, IN2, IN3, IN4 драйвера U2 сигналов управления фазами (А, В, С, D) с одновременной ШИМ модуляцией.

В качестве аппаратного обеспечения для разработки и отладки программного кода используется модуль Arduino Uno с макетной платой для выполнения коммутаций (рис. 4). Результатом работы микроконтроллера является формирование импульсов управления обмотками шагового двигателя и скоростью вращения.

Формирование базовых сигналов управления реализуется благодаря наличию в среде разработки Arduino IDE стандартной библиотеки Stepper.h для работы с шаговыми двигателями. В тексте программы выполнено конфигурирование дискретных выходов контроллера для управления двигателем в режиме полного шага. Также написаны функции получения ШИМ-сигнала управления скоростью вращения двигателя по заданным алгоритмам.

Для возможности модернизации наплавочных установок и вальценаплавочных станков (УМН-4, УМН-10, КЖ-9705, КЖ-9708) разработана схема управления коллекторными двигателями постоянного тока типа СЛ на базе программируемого микроконтроллера ATmega328P (рис. 5). Программирование контроллера и управление работой системы осуществляется с применением персонального компьютера, подключенного с помощью встроенного конвертера интерфейсов USB-UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Для формирования импульсов тока управления приводами подачи электродов с разным содержанием легирующих элементов использован стандартный тиристорный преобразователь. Переменное напруге живлення схемы выпрямляется и модулируется сигналами ШИМ, поступающими на управляющий вывод тиристора с дискретного выхода контроллера. Это позволяет обеспечить согласо-

ванное управление всеми приводами наплавочной установки для нанесения наплавленного слоя сложной конфигурации и управление скоростью подачи электрода(-ов) по любому заданному закону изменения.

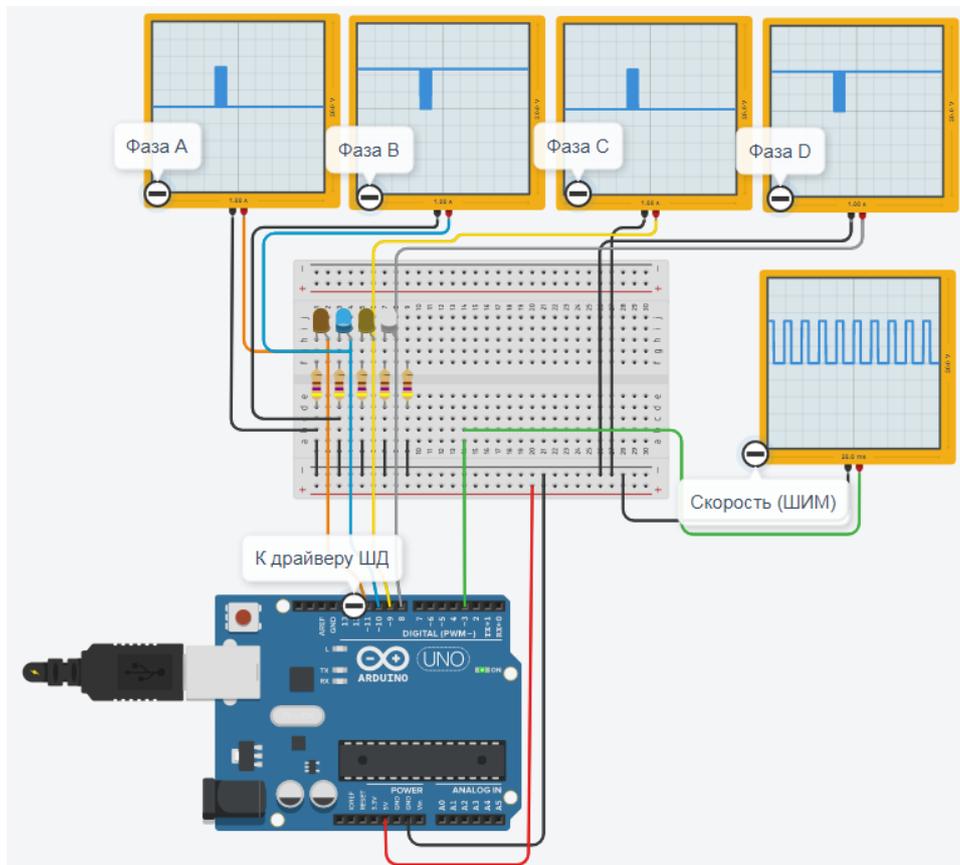


Рис. 4 – Интерактивная среда для тестирования программного обеспечения

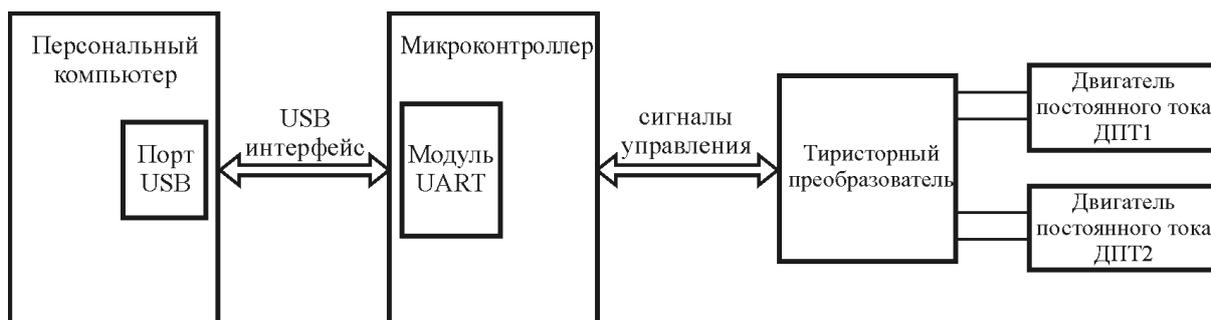


Рис. 5 – Функциональная схема модернизации существующих наплавочных установок

### Выводы

1. Использование разработанных унифицированных и модернизированных стандартных модулей в составе системы управления наплавочной установки даёт возможность реализовать широкий спектр вариантов технологии наплавки слоя разной конфигурации с изменяющимся составом и свойствами.

2. Система программного управления скоростью вращения двигателей с применением широтно-импульсной модуляции позволяет реализовать технологию наплавки, которая ранее была труднореализуема даже при условии разработки и создания уникальной структуры управления, при этом только для конкретного варианта технологии.

## Список использованных источников:

1. Крылов С.В. Установка АДФ-1000 для дуговой наплавки / С.В. Крылов // Сварка и металлоконструкции. – 2017. – № 2 (12). – С. 19-22.
2. Improvement in operating efficiency of continuous casting machine slab rolls / E.I. Vozyanov, O.V. Korobka, O.V. Karaulanov, L.K. Leshchinskii, V.N. Matvienko // *Metallurgist*. – 2018. – Vol. 62 (7-8). – Pp. 681-685. – Mode of access: DOI: 10.1007/s11015-018-0708-9.
3. Lavrova E. Controlling the depth of penetration in the case of surfacing with a strip electrode at an angle to the generatrix / E. Lavrova, V. Ivanov // *Materials and Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 938. – Pp. 27-32. – Mode of access: DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.938.27.
4. Домбровский Ф.С. Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф.С. Домбровский, Л.К. Лещинский. – Киев : Институт электросварки им. Е.О. Патона, 1995. – 198 с.
5. Разработка технологии наплавки для увеличения ресурса роликов машин непрерывного литья заготовок / Л.К. Лещинский, В.Н. Матвиенко, В.П. Иванов, Е.И. Возьянов, О.В. Карауланов // *Технология машиностроения*. – 2019. – № 7. – С. 19-23.
6. Пат. 124035 Україна, МПК В 23 К 9/04. Спосіб наплавлення шару змінного хімічного складу / Л.К. Лещинський, В.П. Иванов. – № u201711596; заявл. 27.11.17; опубл. 12.03.18, Бюл. № 5.
7. Ivanov V.P. Improving the efficiency of strip cladding by the control of electrode metal transfer / V.P. Ivanov, E.V. Lavrova // *Applied mechanics and materials*. – 2014. – Vol. 682. – Pp. 266-269. – Mode of access: DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.266.

## References:

1. Krylov S.V. Ustanovka ADF-1000 dlia dugovoi naplavki [ADF-1000 installation for arc surfacing]. *Svarka i metallokonstruktsii – Welding and metalwork*, 2017, no. 2 (12), pp. 19-22. (Rus.)
2. Vozyanov E.I., Korobka O.V., Karaulanov O.V., Leshchinskii L.K., Matvienko V.N. Improvement in operating efficiency of continuous casting machine slab rolls. *Metallurgist*, 2018, vol. 62 (7-8), pp. 681-685. doi: 10.1007/s11015-018-0708-9.
3. Lavrova E., Ivanov V. Controlling the depth of penetration in the case of surfacing with a strip electrode at an angle to the generatrix. *Materials and Technologies in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 938, pp. 27-32. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.938.27.
4. Dombrovskiy F.S., Leshchinskiy L.K. *Rabotosposobnost' naplavlennykh rolikov mashin nepreryvnogo lit'ia zagotovok* [Operability overlaid rollers continuous casting machines]. Kiev, Institute of welding named by E.O. Paton Publ., 1995. 198 p. (Rus.)
5. Leshchinskii L.K., Matvienko V.N., Ivanov V.P., Voz'ianov E.I., Karaulanov O.V. Razrabotka tekhnologii naplavki dlia uvelicheniia resursa rolikov mashin nepreryvnogo lit'ia zagotovok [Development of surfacing technology to increase the resource of rollers of continuous casting machines]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 2019, no. 7, pp. 19-23. (Rus.)
6. Leshchinskii L.K., Ivanov V.P. *Sposib naplavlennia sharu zminnogo khimichnogo skladu* [Method of surfacing a layer of variable chemical composition]. Patent UA, no. 124035, 2018. (Ukr.)
7. Ivanov V.P., Lavrova E.V. Improving the efficiency of strip cladding by the control of electrode metal transfer. *Applied mechanics and materials*, 2014, vol. 682, pp. 266-269. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.266.

Рецензент: В.И. Щетинина  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛПТУ»

Статья поступила 04.08.2019