

**В. А. ЛЕБЕДЕВ, А. М. ХАЛИМОВСКИЙ**

### **ИЗЫСКАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ МЕХАНИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ-НАПЛАВКИ**

Учитывая большое количество технических решений способов сварки и наплавки с применением импульсной подачи электродной проволоки в различных вариантах исполнения предложена их классификация по наиболее характерным признакам реализации этого движения. При помощи математического моделирования определена возможность обеспечить отработку желаемых перемещений электродной проволоки в диапазоне частот импульсов задания от 50 до 100 Гц при использовании в качестве привода подачи векторно-управляемого синхронного электропривода.

**Ключевые слова:** сварка, импульсная подача проволоки, система автоматического управления, векторное управление.

**В. О. ЛЕБЕДЕВ, О. М. ХАЛИМОВСКИЙ**

### **ПОШУК МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНІЗМУ ПОДАЧІ МЕХАНІЗОВАНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ-НАПЛАВЛЕННЯ**

З огляду на велику кількість технічних рішень способів зварювання і наплавлення із застосуванням імпульсної подачі електродного дроту в різних варіантах виконання запропоновано їх класифікацію за найбільш характерними ознаками реалізації цього руху. За допомогою математичного моделювання визначена можливість забезпечити відпрацювання бажаних переміщень електродного дроту в діапазоні частот імпульсів завдання від 50 до 100 Гц при використанні у якості приводу подачі векторно-керованого синхронного електроприводу.

**Ключові слова:** зварювання, імпульсна подача дроту, система автоматичного управління, векторне керування.

**V. O. LEBEDJEV, O. M. KHALIMOVSKY**

### **RESEARCH OF THE OPPORTUNITIES FOR PERFORMANCE IMPROVEMENT FOR ELECTRIC DRIVE MECHANISM FOR SUPPLY OF MECHANIZED EQUIPMENT FOR ARC WELDING AND SURFACING**

Taking into account a large number of technical solutions for welding and surfacing methods under use of pulsed supply of electrode wire in various implementation versions, their classification is offered according to the most important characteristics of this movement. It was concluded that the further development of techniques and technologies for arc welding and surfacing is constrained by the already obtained capabilities of the deployed step and valve electric drives. It was noted an implementation based on the available technical solutions of the full algorithm of controlled pulse feed of the most complex variant with the reverse movement of the electrode wire in a pulse of movement is very problematic. An analysis of main research focuses and technical solutions was carried out aimed to obtaining a wider range of control frequencies for the pulsed wire feeding process. For the research of the possibility of specified displacements in the frequency range of the pulse supply of the electrode wire, a system of vector control of the speed of the synchronous motor was used. The researches have been carried out aimed to the processing of the impulses for speed control of the feed in a range of frequencies from 50 to 100 Hz. The system worked out the impulse signal of the control throughout the whole frequency range. At the same time, the average wire feed speed varied from 216 m/h to 864 m/h.

**Keywords:** welding, pulsed wire feed, automatic control system, vector control.

**Введение.** Расширение возможностей электродуговой сварки и наплавки в последнее время в основном связывается с использованием импульсных алгоритмов работы систем сварочного оборудования: источник сварочного тока, подача защитного газа, подача электродной проволоки. Большинство из них направлено на решение задачи управления переносом электродного металла [1, 2]. Для повышения эффективности сварочно-наплавочных работ необходимо повышать частоту импульсной подачи электродной проволоки до 80÷100 Гц. Существующие системы подачи могут обеспечить частоту подачи проволоки только до 50÷60 Гц. Поэтому задача изыскания возможностей повышения быстродействия электропривода механизма подачи механизированного оборудования для дуговой сварки-наплавки является актуальной.

**Целью работы** является изыскание направлений совершенствования электроприводов механизмов подачи электродной проволоки для повышения их быстродействия и улучшения условий эксплуатации.

**Анализ основных достижений.** Разработано достаточно большое число способов применения импульсных алгоритмов управления переносом, но наибольшее распространение получили процессы с использованием импульсных алгоритмов работы современных инверторных источников сварочного тока, которые в различных вариантах функционирования применяются во многих конструкциях аппаратов для сварки и наплавки – полуавтоматов и автоматов [3]. Импульсная подача защитных газов может быть весьма ограниченной, так как имеются процессы сварки и наплавки с применением порошковых электродных проволок, где защитная газовая среда не всегда используется [4].

Развиваются способы сварки и наплавки с применением импульсной подачи электродной проволоки в различных вариантах исполнения [5]. Все варианты технических решений с применением импульсных систем подачи электродной проволоки можно укрупненно сгруппировать следующим образом:

© В. А. Лебедев, А. М. Халимовский, 2019

1. С заранее заданными (установленными) параметрами формирования импульсов движения;
2. С управляемыми алгоритмами импульсной подачи;
3. С использованием обратных связей по параметрам дугового процесса, вводимых в электропривод механизма подачи.

Импульсную подачу с установленными и неизменяемыми параметрами можно получить, применяя механические преобразователи вращательного движения вала приводного электродвигателя в импульсное перемещение движителей электродной проволоки [6].

Управляемая импульсная подача, в том числе с использованием обратных связей по току или напряжению дуги с получением дозированной подачи [7] может быть реализована лишь с применением быстродействующих электроприводов.

В настоящее время в системах управляемой импульсной подачи применяются шаговые и в большей степени вентильные электродвигатели [8] в безредукторном варианте с компьютеризованными системами управления и регулирования. С применением таких систем подачи электродной проволоки получены частоты импульсной подачи порядка  $40 \div 50$  Гц [9]. При этом достигнуты достаточно показательные технологические результаты при сварке и наплавке сталей и сплавов алюминия, которые представлены в работе [10]. Дальнейшее развитие техники и технология дуговой сварки и наплавки сдерживается уже полученными возможностями используемых шаговых и вентильных электроприводов.

На рис. 1 схематически представлен полный алгоритм управляемой импульсной подачи в наиболее сложном варианте с реверсом движения электродной проволоки в импульсе движения. На частотах порядка 50 Гц и выше реализовать такое движение с уже имеющимися техническими решениями весьма проблематично.

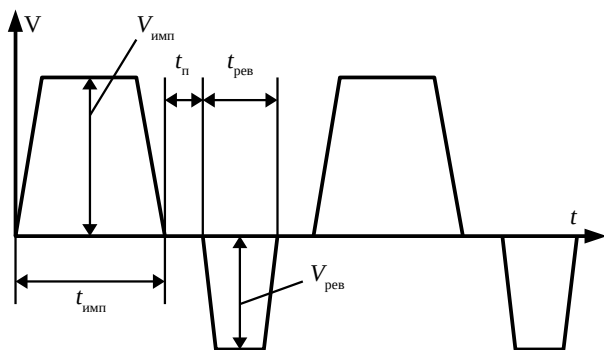


Рисунок 1 – Графический алгоритм импульсной скорости подачи проволоки:  $V_{\text{имп}}$ ,  $V_{\text{рев}}$  – скорости движения в импульсе и реверсе;  $t_{\text{имп}}$ ,  $t_{\text{п}}$ ,  $t_{\text{рев}}$  – времена движения в импульсе, паузе и реверсе

В настоящее время в исследовательской и производственной практике применяются вентильные электроприводы специальной разработки, выполненной в Украине. Они могут быть использованы как в обычных условиях, так и для высокоэффективной сварки в водной среде, производимой мокрым способом [11].

Для получения большего диапазона частот импульсной работы такого электропривода в настоящее время рассмотрено ряд направлений. В работе [12] для способа дозированной подачи предложено использовать прогнозирование для получения сигнала обратной связи (предиктивное управление), что позволило улучшить условия функционирования электропривода, а также несколько улучшить его частотные свойства, что уже оценено на ведении реального процесса наплавки. В этом направлении необходимо продолжать исследования, так как эффективность уже полученных результатов при ведении сварочно-наплавочных работ очевидна.

Следует отметить, что для существенного расширения технико-технологических возможностей системы импульсной подачи электродной проволоки необходима частота  $80 \div 100$  Гц и возможность воспроизведения алгоритма, представленного на рис. 1 с учётом реверсивного движения электродной проволоки, которое в уже действующем оборудовании в широком диапазоне частот практически не воспроизводится.

В настоящее время рассматриваются несколько направлений на повышение быстродействия вентильного электропривода, среди которых нами рассматриваются:

- модернизация вентильного электродвигателя с целью снижения его инерционных свойств с целенаправленным повышением быстродействия системы подачи электродной проволоки в целом;
- синтез системы регулирования вентильного электропривода на основе моделирования основных звеньев и системы в целом с изысканием наиболее быстродействующего варианта при минимальных затратах и переработке уже апробированных решений, возможно на программном уровне;
- поиск новых типов электродвигателей и регуляторов к ним, применение которых в механизмах подачи повысит быстродействие системы в целом.

Модернизация вентильного электродвигателя постоянно проводится с достаточно перспективными результатами, однако нам понятно, что без существенного изменения структуры регулятора приблизиться или достичь необходимого результата не представляется возможным.

Рассмотрим для примера некоторые возможные технические и программные решения, которые могут быть использованы в системах подачи электродной проволоки сварочно-наплавочного оборудования для расширения возможностей импульсного движения и улучшения условий функционирования электродвигателей.

Исследование динамических свойств математической модели САУ. Для вентильного электропривода с учётом выводов работы [13] получены результаты моделирования двухконтурной системы автоматического управления (САУ) [14] показавшие возможность обеспечения дозированной импульсного перемещения проволоки со средней скоростью подачи в диапазоне от 100 до 700 м/ч при частоте повторения импульсов 100 Гц.

Учитывая высокودинамические свойства синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) их использование для повышения частоты импульсной подачи электродной проволоки может быть одним из возможных альтернативных направлений совершенствования электроприводов механизмов подачи. Надёжность работы синхронного двигателя (СД) с постоянными магнитами небольшой мощности обусловила их применение в самолётах, автомобилях и других областях техники. Преимуществами СД по сравнению с асинхронным двигателем являются: высокий коэффициент полезного действия; меньшая зависимость от падения напряжения питания и др. Так же, как известно, широкое распространение СД получили из-за хороших пусковых и рабочих свойств. Требования к электроприводу и экономической целесообразности определяют выбор схемы управления СДПМ. Наиболее распространёнными схемами реализации управления синхронным электроприводом являются схемы скалярного и векторного управления. На низких скоростях вращения и переменной нагрузке на валу скалярное управление не подходит. Учитывая требования технологического процесса обеспечить высокودинамичное управление координатами СД, в качестве привода САУ импульсной подачей электродной проволоки был выбран векторно-управляемый синхронный электропривод.

Для оценки возможности достижения желаемых динамических показателей качества системы управления скорости (коэффициент демпфирования  $\zeta = 1$ ) применялась стандартная настройка ПИ регулятора скорости САУ для двигателя MSK030B с номинальным моментом  $M = M_n = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Структурная схема системы векторного управления СД с возбуждением от постоянных магнитов представлена на рис. 2.

На рисунке использованы стандартные обозначения:  $u_a, u_b, u_c$  – напряжения на статоре СД;  $u_{1a}, u_{1b}$  – расчётные компоненты вектора напряжения системы координат статора (a-b) после преобразования Парка-

Горева компонент  $u_{1d}, u_{1q}$  в системе координат (d-q);  $i_a, i_b$  – ток статора;  $i_{1a}, i_{1b}, i_{1d}, i_{1q}$  – ток статора в стационарной и вращающейся системах координат (a-b), (d-q) соответственно;  $\dot{\omega}^*$  – производная задания скорости  $\omega$ ;  $\tilde{i}_{1d} = i_{1d}^* - i_{1d}, \tilde{i}_{1q} = i_{1q}^* - i_{1q}$  – ошибки отработки токов  $i_{1d}^*, i_{1q}^*$  соответственно.

**Результаты математического моделирования работы САУ.** Анализ результатов математического моделирования переходных процессов САУ, представленных на рис. 3 показывает удовлетворительную отработку системой управления последовательности следования сигналов задания  $\omega^*$  с частотой 50 Гц (рис. 3, а, в, д) и 100 Гц (рис. 3, б, г, е) для 20-процентной длительности импульса в периодах обоих вариантов. При этом шаг подачи электродной проволоки  $L$  на частотах 50 Гц и 100 Гц составил соответственно 1,2 мм (рис. 3, д) и 0,6 мм (рис. 3, е). По данным результатов исследований шаг дозированной подачи проволоки с увеличением длительности времени импульсов задания до 80 % на частоте 50 достиг значения 2,6 мм, а на частоте 100 Гц – 2,5 мм.

**Выводы.** С целью расширения технико-технологических возможностей применяемых электроприводов в механизмах импульсной подачи электродной проволоки определены приоритетные направления разработок по повышению их быстродействия. Результаты математического моделирования системы векторного управления скоростью СДПМ подтвердили возможность использования такой системы управления для дозированной импульсной подачи электродной проволоки в диапазоне частот 80÷100 Гц. Учитывая высокودинамические свойства СДПМ, их использование в приводах подачи может быть одним из возможных альтернативных направлений совершенствования электроприводов механизмов подачи.

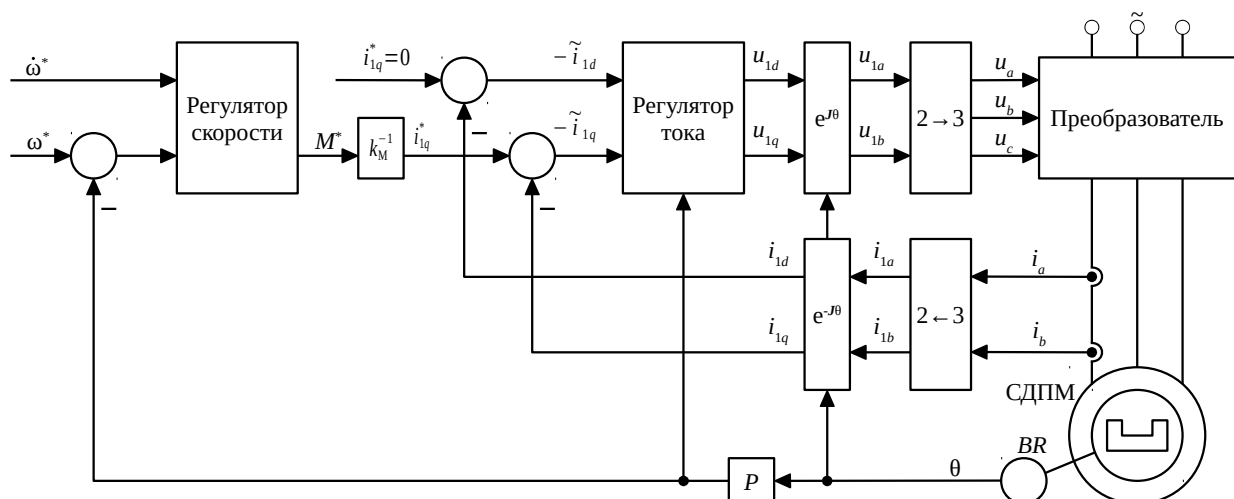


Рисунок 2 – Структурная схема системы векторного управления СДПМ

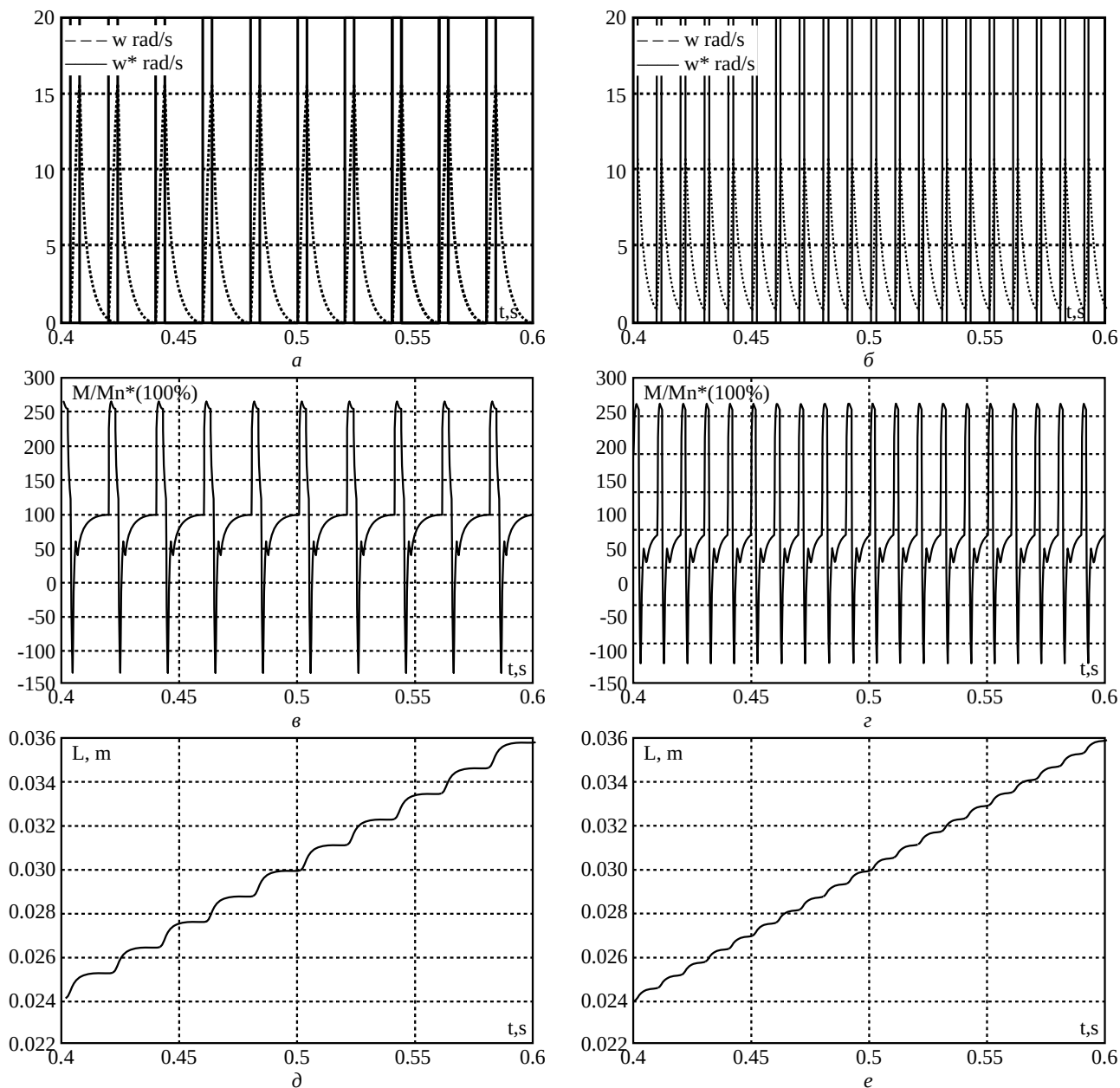


Рисунок 3 – Результаты математического моделирования работы САУ

## Список литературы

1. Патон Б. Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций. *Автоматическая сварка*. Киев: Издательский дом «Патон». 2003, №10-11(607). С. 7-13.
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. Praveen P., Yarlagadda P. K. D. V., Kangb M. J. Advancements in pulse gas metal arc welding, *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 164-165. pp. 1113-1119.
4. Md. Ibrahim Khan. *Welding science and technology*. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007. 278 p.
5. Лебедев В. А., Притула С. И. Современные механизмы подачи электродной проволоки в аппаратах для механизированной сварки, наплавки и резки. *Автоматическая сварка*. Киев: Издательский дом «Патон». 2006, № 4. С. 53-56.
6. Крампит Н. Ю. Способы управления плавлением и переносом электродного металла (обзор). *Сварочное производство*. Москва: Издательский центр Технология машиностроения. 2009, № 3. С. 31-35.
7. 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*. Москва: Фонд НПО ЦНИИТМАШ. 2017, №6. С. 27-32.
8. Патон Б. Е., Лебедев В. О., Жук Г. В. Алгоритмы управления электродуговой механизированной и автоматической сваркой-наплавкой с импульсной подачей электродной проволоки. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Київ: Техніка. 2019, № 30. С. 9-18.
9. Лебедев В. А., Рымша В. В., Радимов И. Н. Современные вентильные электроприводы в системах механизированного сварочного оборудования. *Електромашинобудування та електрообладнання*. Київ: Техніка. 2009, Вип. 74. С. 22-24.
10. Лендел И. В., Лебедев В. А., Максимов С. Ю., Жук Г. В. и др. Автоматизация сварочных процессов с использованием механического сварочного оборудования. *Автоматическая сварка*. Киев: Издательский дом «Патон». 2017, №5-6. С. 99-104.
11. Lebedev V. Automatic arc for deep underwater welding wet process in the conditions of a rigid space is limited. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. 11-13 жовтня 2017*. Миколаїв: НУК, 2017. С. 156-158.

12. Лебедев В. А., Новиков С. В. Гипотеза формирования структуры наплавленного металла при наплавке на основе применения прогностического алгоритма управления скоростью подачи электродной проволоки. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. Запоріжжя: ЗНТУ. 2017, №2. С. 100-102.
13. Лебедев В. О., Халімовський О. М. Оцінка ефективності використання FUZZY регулятора в швидкодіючому електроприводі механізму подачі автоматизованого зварювального обладнання. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Київ: Техніка. 2019, № 30. С. 26-33.
14. Анучин А. С. Структуры цифрового ПИ-регулятора для электропривода. *Электротехника*. Москва: Знак. 2014, №7. С. 02-06.
8. Paton B. E., Lebedev V. O., ZHuk G. V. *Algoritmy upravleniya elektrodugovoy mekhanizirovannoy i avtomaticheskoy svarkoj-naplavkoj s impul'snoj podachej elektrodnoj provoloki* [Control algorithms for electric arc mechanized and automatic fusion welding with pulsed electrode wire feed]. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy* [Electrotechnic and Computer Systems]. Kyiv: Tekhnika. 2019, № 30. pp. 9-18.
9. Lebedev V. A., Rymsha V. V., Radimov I. N. *Sovremennye ventilye elektroprivody v sistemah mekhanizirovannogo svarochnogo oborudovaniya* [Modern valve electric drive in systems of mechanized welding equipment]. *Elektromashynobuduvannia ta elektroobladnannia* [Electrical machine-building and electrical equipment]. Kyiv: Tekhnika. 2009, vyp. 74. pp. 22-24.
10. Lendel I. V., Lebedev V. A., Maksimov S. YU., ZHuk G. V. i dr. *Avtomatizaciya svarochnyh processov s ispol'zovaniem mekhanicheskogo svarochnogo oborudovaniya* [Automation of welding processes using mechanical welding equipment]. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. Kiev: Izdatel'skij dom «Paton». 2017, №5-6. pp. 99-104.
11. Lebedev V. Automatic arc for deep underwater welding wet process in the conditions of a rigid space is limited. *Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi: Materialy Mizhnar. nauk.- tekhn. konf. 11-13 zhovtnia 2017 r., Mykolaiv* [Innovations in shipbuilding and ocean engineering. Materials of the international scientific and technical conference. October 11-13, 2017. Mykolaiv]. Mykolaiv: NUK, 2017. pp. 156-158.
12. Lebedev V. A., Novikov S. V. *Gipoteza formirovaniya struktury naplavlennogo metala pri naplavke na osnove primeneniya prognosticheskogo algoritma upravleniya skorost'ju podachi jelektrodnoj provoloki* [The hypothesis of the formation of the structure of the weld metal during surfacing based on the application of the predictive algorithm for controlling the feed rate of the electrode wire]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni* [Innovative materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering]. Zaporizhzhia: ZNTU. 2017, №2. p.p. 100-102.
13. Lebedev V. O., Halimovskiy O. M. *Ocinka efektyvnosti vykorystannya FUZZY reguljatora v shvydkodijuchomu elektroprivodi mehanizmu podachi avtomatyzovanogo zvarjuval'nogo obladnannja* [Estimation of efficiency of use of FUZZY regulator in high-speed electric drive of the mechanism of submission of automated welding equipment]. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy* [Electrotechnic and Computer Systems]. Kyiv: Tekhnika. 2019, № 30. p.p. 26-33.
14. Anuchin A. S. *Struktury cifrovogo PI-regulyatora dlya elektroprivoda* [The structure of the digital PI controller for the electric drive]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. Moskva: Znak. 2014, №7. pp. 02-06.
1. Paton B. E. *Sovremennye napravleniya issledovanij i razrabotok v oblasti svarki i prochnosti konstrukcij* [Modern directions of research and development in the field of welding and structural strength]. *Avtomaticheskaja svarka* [Automatic welding]. Kiev: Izdatel'skij dom «Paton». 2003, №10-11(607). pp. 7 - 13.
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. Praveen P., Yarlagadda P. K. D. V., Kangb M. J. *Advancements in pulse gas metal arc welding*, *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, vol. 164-165. pp. 1113-1119.
4. Md. Ibrahim Khan. *Welding science and technology*. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007. 278 p.
5. Lebedev V. A., Pritula S. I. *Sovremennye mehanizmy podachi jelektrodnoj provoloki v apparatah dlja mehanizirovannoj svarki, naplavki i rezki* [Modern electrode wire feeders in apparatus for mechanized welding overlaying and cutting]. *Avtomaticheskaja svarka* [Automatic welding]. Kiev: Izdatel'skij dom «Paton». 2006, № 4. pp. 53-56.
6. Krampit N. YU. *Sposoby upravleniya plavleniem i perenosom elektrodnoogo metalla (obzor)* [Ways to control the melting and transfer of electrode metal]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production]. Moskva: Izdatel'skij centr Tekhnologiya mashinostroeniya. 2009, № 3. pp. 31-35.
7. Lebedev V. A., ZHuk G. V. *Upravlenie perenosom elektrodnoogo metala na osnove impul'snyh algoritmov funkcionirovaniya sistem s dozirovaniem podachi elektrodnoj provoloki pri mekhanizirovannoj dugovoj svarkie* [Electrode metal transfer control based on pulsed algorithms of systems functioning with metering of electrode wire feed in mechanized arc welding]. *Tyazhyoloe Mashinostroenie* [Russian Journal of Heavy Machinery]. Moskva: Fond NPO CNIIT-MASH. 2017, №6. pp. 27-32.

#### References (transliterated)

Поступила 26.05.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Лебедев Володимир Олександрович (Лебедев Владимир Александрович, Lebedev Volodymyr Oleksandrovych)** – доктор технічних наук, професор, головний конструктор «Дослідницьке конструкторсько-технологічне бюро Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України», м. Київ, Україна; e-mail: valraton@ukr.net

**Халімовський Олексій Модестович (Халимовский Алексей Модестович, Khalimovskyy Oleksi Modestovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу; м. Київ, Україна; e-mail: o.khalimovskyy@ukr.net