

# ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

В. А. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>, Г. В. ЖУК<sup>1</sup>, И. В. ЛЕНДЕЛ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 15. E-mail: dktbpaton@gmail.com

<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе рассмотрена возможность применения в сварочном оборудовании электроприводов с шаговыми и вентильными электродвигателями. На основе примеров выполненных разработок механизированного и автоматического сварочно-наплавочного оборудования различного назначения показаны преимущества применения бесколлекторных электродвигателей в комплекте с компьютеризованными системами управления и регулирования в различных системах для выполнения тех или иных технологических функций. Особо подчеркнута эффективность применения шаговых и вентильных электроприводов для осуществления модулированной и импульсной подачи электродной проволоки. Отмечена перспективность развития оборудования применением электроприводов с шаговыми и вентильными электродвигателями. Библиогр. 11, рис. 8.

*Ключевые слова:* дуговая сварка-наплавка, механизированное оборудование, управление, электропривод, бесколлекторные электродвигатели

Постоянно приходящие новые задачи, выдвигаемые промышленностью, сварочным производством, требуют непрерывного внимания разработчиков и конструкторов к совершенствованию механизированного оборудования для дуговых процессов сварки и наплавки. Расширяются сферы применения оборудования с необходимостью ведения процессов в различных пространственных положениях, разных средах и условиях [1]. Распространенность такого оборудования предопределяет высокую степень экономической эффективности при получении новых технико-технологических преимуществ. Во многих случаях добиться новых результатов можно, совершенствуя механизированное оборудование, его системы и реализуя на этой основе новые технологические процессы.

Целью настоящей работы являлась оценка возможностей получения действенных результатов при сварке-наплавке с применением нового поколения регулируемых электроприводов с электродвигателями бесколлекторного типа в разных системах механизированного и автоматического оборудования. До недавнего времени в системах механизированного и автоматического оборудования для дуговой сварки-наплавки использовали преимущественно электроприводы с коллекторными электродвигателями постоянного тока, а также в небольших количествах асинхронные трехфазные электродвигатели.

Пределом возможностей влияния на технологический процесс электроприводов с коллекторными электродвигателями является реализация на их основе модулированных режимов работы при подаче электродных проволок с частотами до 2,0...2,5 Гц [2] и колебаний сварочного инструмента в том же диапазоне. Все это обусловлено инерционными свойствами электродвигателей и соответствующих преобразователей движения. Осуществить управляемый перенос электродного металла, используя систему подачи с коллекторными электродвигателями без дополнительных механических преобразователей движения практически невозможно, так как требуется обеспечить частоту импульсного движения электродной проволоки в управляемом режиме в диапазоне 10...60 Гц. Существенного улучшения динамических характеристик таких электроприводов нельзя достичь даже с весьма совершенными системами регулирования. Значительным недостатком применения таких электроприводов является наличие коллектора, что, в значительной мере, снижает показатели надежности оборудования (электроэрозия, механический износ). Особенно остро это сказывается на конструкции и работоспособности полуавтоматов для подводной сварки мокрым способом, где коллекторный узел электродвигателя работает в жидкой среде.

Трехфазные асинхронные электродвигатели с имеющими широкие возможности современными системами частотного управления и регулирования разных типов весьма привлекательны для применения в сварочном оборудовании.

Это может относиться к системам перемещения сварочного инструмента, свариваемого или наплавляемого изделия. Однако в системе подачи электродной проволоки механизированного оборудования (полуавтоматы для сварки и наплавки) применение трехфазных асинхронных электродвигателей (380 В) практически невозможно из-за уровня напряжения питания. Наши усилия изыскать рассматриваемые электроприводы с безопасным уровнем питания по напряжению успеха не имели. Имеются определенные сложности в их разработке.

Сравнительный анализ показывает, что по совокупности показателей могут быть применены два типа электроприводов — на основе шаговых и на основе вентильных электродвигателей.

Рассмотрим возможности регулируемых электроприводов с шаговыми и вентильными электродвигателями в различных системах сварочного оборудования с последующей оценкой их вероятного применения. При этом должна быть решена задача исключения редуктора. Рабочий орган механизма сварочного оборудования (подающий ролик) должен быть установлен непосредственно на валу бесколлекторного электродвигателя, любого из указанных типов.

*Электропривод с шаговым электродвигателем.* Так как в Украине отсутствуют производители этого вида оборудования, то электроприводы с шаговыми электродвигателями выбирались комплектно (электродвигатель и контроллер), серийно производимые достаточно большим числом фирм. С целью минимизации затрат предпочтение отдавалось электродвигателю с необходимым моментом для соответствующего механизма сварочного оборудования, без встроенной системы обратных связей.

*Электропривод с вентильным электродвигателем.* В этом случае использовалась специальная разработка украинских специалистов, которые при содействии ГП «ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ» спроектировали и произвели электропривод, где реализованы системы управления и регулирования с целенаправленно выбранными свойствами [3]. Данный электропривод обеспечивает максимально возможное быстрое действие и минимальное искажение воспроизведения формы заданного алгоритма движения электродной проволоки при приемлемых массогабаритных характеристиках как самого электродвигателя, так и блока управления.

В реальных разработках оборудования для дуговой механизированной сварки и наплавки различных объектов, в том числе и при ведении процессов под водой мокрым способом, использовали компьютеризированный электропривод с бипо-

лярным шаговым электродвигателем фирм Kinco и Schneider Electric. Приведем примеры нескольких успешных технических решений.

В оборудовании для подводной автоматической сварки есть опыт применения электроприводов с шаговыми электродвигателями для решения ряда задач. Электропривод программировался для осуществления модулированных режимов работы за счет специально выбранного по условиям кристаллизации сварочной ванны алгоритма (уровня и времени импульса и паузы) подачи электродной проволоки. Также применялся для осуществления колебаний сварочного инструмента с управляемыми параметрами и получения шва с необходимыми характеристиками при негарантированной величине зазора. На рис. 1 представлены сравнительные результаты наплавки валиков под водой мокрым способом. Данные валики выполняли полуавтоматом с шаговым электродвигателем, на вертикальной плоскости при обычной и модулированной подаче порошковой проволоки диаметром 1,6 мм на токах 200...220 А и напряжении 25...27 В. Модулирование осуществлялось со специально, в данном случае, экспериментально выбранными параметрами: импульс 0,7 с, пауза 0,5 с. Следует отметить, что выполнение мокрой подводной сварки или наплавки на вертикальной плоскости проблематично. Использование модулированного процесса позволяет существенно улучшить качество шва и облегчить задачу сварщика-водолаза.

На рис. 2 представлен результат применения управляемых колебаний сварочного инструмента шаговым электроприводом в автомате, предназначенном для глубоководной (более 200 м) подводной сварки мокрым способом. Специаль-



Рис. 1. Внешний вид наплавленных валиков: 1 — подача проволоки обычная; 2 — модулированная



Рис. 2. Внешний вид доньшка трубы с сваренной заглушкой. *L* — реальный зазор между доньшком и трубой

но разработанный автомат с компьютеризованным управлением, представленный фрагментом на рис. 3, обеспечил качественное решение задачи приварки доньшек в трубе малого внутреннего диаметра [4] с зазором между стенкой трубы и заглушкой в диапазоне 2...5 мм, на токах 180...200 А и напряжении 24...26 В.

Следует отметить, что в описанных системах, во избежание влияния помех на работу компьютеризованного электропривода, применялись электродвигатели без встроенных систем формирования и передачи сигналов обратной связи положения ротора электродвигателя.

Необходимо особо выделить, что шаговые электродвигатели, при выполнении определенных условий, способны долговременно работать в среде изолирующих, смазочных жидкостей полуавтоматов для подводной сварки мокрым способом.

Полуавтоматы с применением шаговых электродвигателей выпускаются мелкими партиями и используются для сварки и резки на объектах водного хозяйства в пресной и морской воде.

Перспективным, по нашему мнению, является применение компьютеризованных электроприводов для получения управляемых колебаний наплаваемых изделий с целью расширения зоны наплавки, а также обеспечения благоприятной структуры металла наплавленного валика [5].

Весьма привлекательной является задача получения управляемого импульсного движения электродной проволоки с частотами до 50...60 Гц для решения комплекса технико-технологических задач с результатами, представленными, например, в работе [6].

Применение шаговых электродвигателей для импульсной подачи электродной проволоки описано в работе [7], где показаны результаты экспериментального исследования технологии автоматической сварки под флюсом конструкционной стали с применением механизма подачи электродной проволоки на основе шагового двигателя. От-

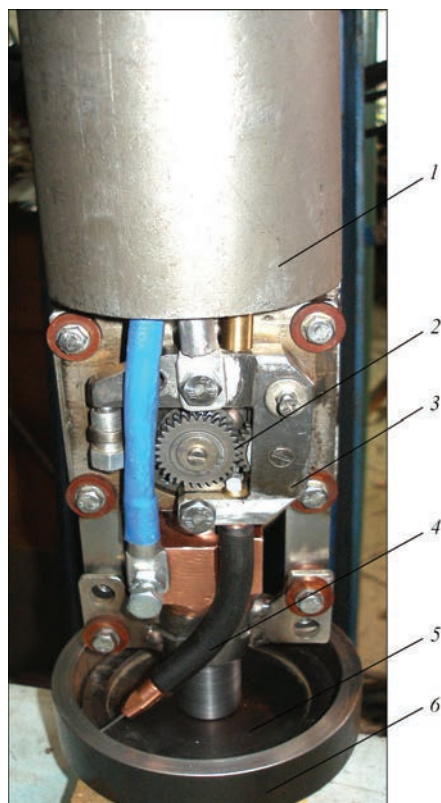


Рис. 3. Сварочная часть аппарата для глубоководной сварки: 1 — корпус; 2 — механизм подачи; 3 — механизм колебаний; 4 — сварочная горелка; 5 — заглушка; 6 — фрагмент трубы

мечено влияние параметров режима импульсной подачи проволоки на процесс формирования капли на торце электрода, коэффициент наплавки и геометрические характеристики наплавленного валика. Строго говоря, полученный достаточно хороший результат не является следствием желаемой управляемой импульсной подачи — он базируется на воздействии на каплю электродного металла пачки импульсов подачи, генерируемых шаговым электродвигателем, о чем свидетельствуют характерные для этого процесса осциллограммы (рис. 4). Можно констатировать, что полученный процесс — это некоторый переходной вариант от модуляции к импульсной подаче электродной проволоки.

Экспериментирование с разными типами шаговых электродвигателей, производимых серийно и имеющих встроенные регуляторы частоты вращения, при комплексном подходе к массогабаритным характеристикам, тяговым возможностям, частотным свойствам, до настоящего времени не привели к выбору оптимального варианта для получения управляемой импульсной подачи электродной проволоки. Работы в этом направлении продолжаются.

Решить в полном объеме задачу получения управляемой импульсной подачи электродной проволоки оказалось возможным в настоящее время лишь при применении специальной разработ-

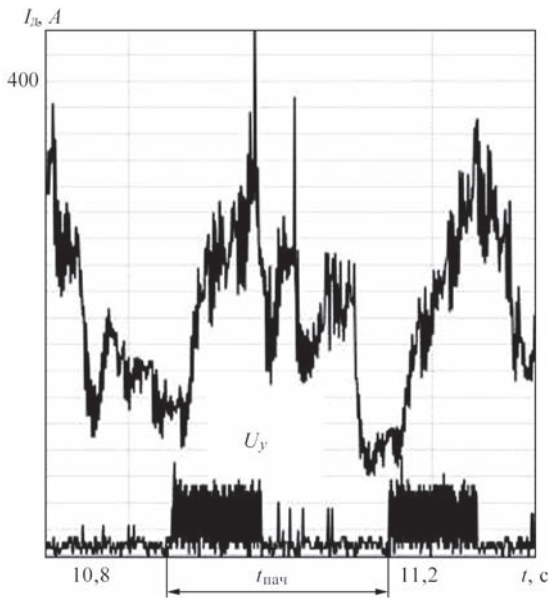


Рис. 4. Оциллограммы тока и управляющего напряжения на шаговом электродвигателе при сварке пачками импульсов ( $t_{пач}$  — период действия пачки импульсов;  $U_y$  — управляющее напряжение)

ки компьютеризированного электропривода с вентильным электродвигателем, имеющим момент на валу, достаточный для подачи проволоки даже в импульсном режиме [8]. Комплект вентильного электропривода специальной разработки для сварочного оборудования представлен на рис. 5. Электродвигатель вентильного типа встраивается в механизм подачи любого сварочного оборудования, при этом массогабаритные характеристики этого узла в 1,5...2,9 раза ниже, чем в традиционных системах. Регулятор такого электропривода, в отличие от электроприводов с шаговыми двигателями, синтезирован целенаправленно для обеспечения максимального быстродействия с минимальным перерегулированием при пуске и реверсе. Оциллограмма скорости импульсного движения электродной проволоки, обеспечивае-

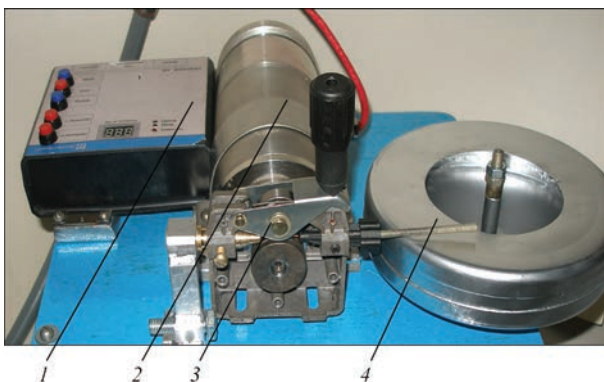


Рис. 5. Импульсный механизм подачи на основе вентильного электропривода: 1 — блок цифрового управления; 2 — вентильный электродвигатель; 3 — устройство прижима прижимного ролика к подающему ролику; 4 — кассета для проволоки

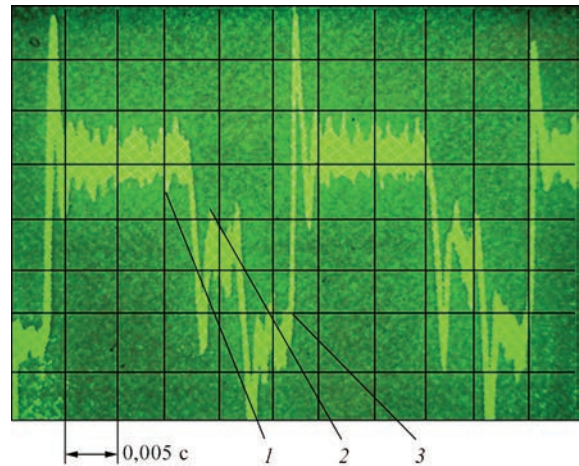


Рис. 6. Оциллограмма скорости импульсной подачи: 1 — импульс; 2 — пауза; 3 — реверс

мая рассматриваемым типом электропривода, в режиме подачи представлена на рис. 6.

Результатами применения электропривода с вентильным электродвигателем являются существенные улучшения практически всех показателей результатов сварки-наплавки. Это относится к формированию валика, проплавлению, зоне термического влияния, структуре металла шва, санитарно-гигиеническим характеристикам.

Для примера на рис. 7 представлены макрошлифы наплавленных в  $CO_2$  валиков при различных значениях частот, амплитуд, скважностей импульсов подачи проволоки Св-08Г2С при одинаковых интегральных значениях тока и напряжения процесса (160 А, 24 В). Очевидны существенные изменения в геометрии валиков, глубине проплавления при изменении управляемых параметров импульсной подачи. Обеспечивается значительная экономия материальных и энергетических ресурсов (снижение потерь электродного металла на разбрызгивание и затрат электроэнергии на ведение процесса).

Важно отметить, что в данном случае импульсная подача обеспечивала процесс сварки с управляемыми короткими замыканиями.

Вентильный электродвигатель оснащается инкрементальным датчиком положения ротора, сигнал которого, по защищенным от помех каналам, вводится в компьютеризованный электропривод.

Вентильный электропривод для сварочного оборудования имеет возможность введения различных сигналов обратной связи по параметрам дугового процесса, что в значительной степени расширяет как функциональные возможности системы, так и упрощает настройку параметров импульсной подачи.

Путем набора и обработки результатов экспериментальных исследований с использованием оциллограмм установлено, что наиболее эффективным для изменения интегральной скорости по-



Рис. 7. Микрошлифы наплавленных валиков при импульсной подаче электродной проволоки

дачи проволоки будет изменение шага перемещения в импульсе в соответствии с соотношением

$$I_{св} = k_1 v_{п} = k_1 f_{и} h,$$

где  $h$  — шаг подачи в импульсе;  $k_1$  — коэффициент, определяющий зависимость между силой тока сварки  $I_{св}$  и скоростью подачи  $v_{п}$ ;  $f_{и}$  — частота импульсной подачи.

Именно это изменение шага принято при реализации зависимости  $U_{св} = f(I_{св})$ , а в качестве сигнала обратной связи принят параметр  $U_{св}$ . Это техническое решение, по своей сути, является одним из видов синергетического управления процессом дуговой сварки по аналогии с импульсными источниками питания дуги с синергетическим управлением [9], но уже основанным на импульсных алгоритмах подачи электродной проволоки [10].

В настоящее время разрабатывается новый способ сварки на основе применения вентильного электропривода. Этот способ с дозированной по параметрам дугового процесса подачей электродной проволоки реализуется как с короткими замыканиями, так и без них. Способ позволяет вести процесс сварки-наплавки порошковыми самозащитными и используемыми в защитных газах электродными проволоками с управляемым переносом капель электродного металла.

По-прежнему актуальной является задача получения процесса сварки с одновременным использованием импульсных алгоритмов функционирования источников сварочного тока и механизма с импульсной подачей электродной проволоки.

Такие электроприводы применяются для обеспечения других движений сварочного инструмента. Примером применения вентильного электропривода с обеспечением двухкоординатного перемещения суппорта со сварочным инструментом и механизмом подачи электродной проволоки является сварочно-наплавочный автомат, который показан на рис. 8. Такой автомат может осуществлять программируемые перемещения в горизонтальной или вертикальной плоскости по сигналам встроенных инкрементальных датчиков [11].

## Выводы

1. Опыт применения вентильных и шаговых электроприводов в сварочном оборудовании позволяет судить об их высокой эффективности и целесообразности широкого применения в механизированном и автоматическом сварочном оборудовании. При этом следует вести постоянные

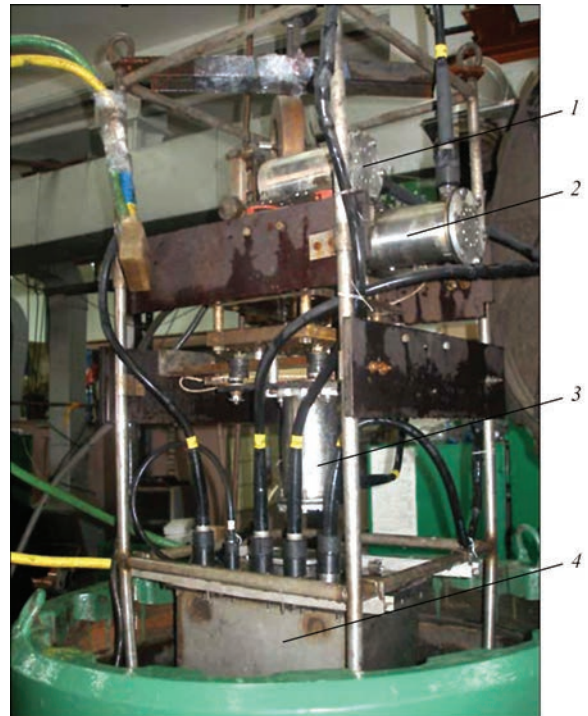


Рис. 8. Автомат для сварки-наплавки под водой с электродвигателями механизмов: 1 — продольного; 2 — поперечного перемещения; 3 — подачи электродной проволоки; 4 — блок управления погружной

работы по его совершенствованию в части конструкции и системы управления, с целью их упрощения, удешевления, дальнейшего повышения надежности, например, при работе с длинными линиями передачи сигналов.

2. Наиболее эффективным объектом применения электроприводов с бесколлекторными электродвигателями являются механизмы подачи электродной проволоки, где достигнуты достаточно весомые результаты по формированию валиков, проплавлению, зоне термического влияния, решению задач энерго- и ресурсосбережения.

3. Применение электроприводов на базе вентильных и шаговых электродвигателей дает возможность автоматизировать сварочные работы, в том числе под водой на глубине 200 м и ниже.

4. Результаты, достигнутые при применении в сварочном оборудовании шаговых и вентильных электроприводов, служат основой для дальнейших изысканий в совершенствовании техники и технологии дуговой механизированной и автоматической сварки.

## Список литературы

1. Патон Б. Е. (2008) *Избранные труды*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, 896.
2. Кузнецов В. Д., Скачков И. О., Красношапка В. В. (1993) Использование привода постоянного тока для импуль-

- сной подачи присадочной проволоки. *Автоматическая сварка*, **9**, 53–54.
3. Lebedev V., Rymsha V., Lendel I. (2014) BLDC electric drive in the mechanism of pulse feed of electrode wire. *The Journal Electromechanic and Computer Systems*, **16**(92), 26–31.
  4. Максимов С. Ю., Лебедев В. А., Лендел И. В. (2015) Герметизация труб теплообменников «мокрой» сваркой на глубине 200 м. *Вопросы материаловедения*, **1**, 199–204.
  5. Лебедев В. О., Максимов С. Ю., Лендел И. В. (2013) *Универсальный манипулятор с возможностью низкочастотной вибрационной обработки зварювальної ванни*, Україна, Пат. на корисну модель 80 823 МПК 20113.01 В 23К 13/00.
  6. Lebedev V., Reisgen U., Lendel I. (2016) Study of technological opportunities of GMA welding and surfacing with pulse electrode wire feed. *Welding in the World*, February, 9.
  7. Лебедев В. А., Драган С. В., Трунин К. К. (2016) Автоматическая сварка под флюсом с импульсной подачей шаговым двигателем электродной проволоки. *Сварочное производство*, **2**, 27–34.
  8. Лебедев В. А., Гулый М. В. (2014) Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки. *Мехатроника. Автоматизация. Управление*, **6**, 47–51.
  9. Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Ланкин Ю. Н. (1999) Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов (Обзор). *Автоматическая сварка*, **6**, 25–32.
  10. Лебедев В. А. (2016) Механизированная синергетическая сварка с импульсной подачей электродной проволоки. *Наукоемкие технологии в машиностроении*, **2**, 19–24.
  11. Лебедев В. А., Максимов С. Ю. (2015) Механизированное оборудование нового поколения для подводной мокрой сварки и резки металлоконструкций. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, **10**, 30–32.

## References

1. Paton, B.E. (2008) *Selected works*. Kiev: PWI.
2. Kuznetsov, V.D., Skachkov, I.O., Krasnoshapka, V.V. (1993) Application of direct current drive for pulse filler wire feed. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 53–54.
3. Lebedev, V., Rymsha, V., Lendel, I. (2014) BLDC electric drive in the mechanism of pulse feed of electrode wire. *The J. Electromechanic and Computer Syst.*, **16**(92), 26–31.
4. Maksimov, S.Yu., Lebedev, V.A., Lendel, I.V. (2013) Sealing of heat exchangers pipes using “wet” welding at the depth of 200 m. *Voprosy Materialovedeniya*, **1**, 199–204.
5. Lebedev, V.O., Maksimov, S.Yu., Lendel, I.V. *Universal manipulator with possibility of low-frequency vibratory processing of welding pool*. Utility model pat. 80823, Ukraine, Int. Cl. 20113.01 В 23 К 13/00.
6. Lebedev, V., Reisgen, U., Lendel, I. (2016) Study of technological opportunities of GMA welding and surfacing with pulse electrode wire feed. *Welding in the World*, February, 9.
7. Lebedev, V.A., Dragan, S.V., Trunin, K.K. (2016) Automatic submerged-arc welding with pulse electrode wire feed by step motor. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 27–34.
8. Lebedev, V.A., Guly, M.V. (2014) High-speed valve electric drive for mechanized arc welding equipment. *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie*, **6**, 47–51.
9. Voropaj, N.M., Ilyushenko, V.M., Lankin, Yu.N. (1999) Peculiarities of pulse-arc welding with synergic control of mode parameters (Review). *Avtomatich. Svarka*, **6**, 25–32.
10. Lebedev, V.A. (2016) Mechanized synergic welding with pulse electrode wire feed. *Naukoyomkie Tekhnologii v Mashinostroenii*, **2**, 19–24.
11. Lebedev, V.A., Maksimov, S.Yu. (2015) New generation mechanized equipment for wet underwater welding and cutting of metal structures. *Montazhnye i Spets. Raboty v Stroitelstve*, **10**, 30–32.

В. О. Лебедев<sup>1</sup>, Г. В. Жук<sup>1</sup>, И. В. Лендел<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОКТЬ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 15.  
E-mail: dktbpaton@gmail.com

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

## ЗАСТОСУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З БЕЗКОЛЕКТОРНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

В роботі розглянута можливість застосування в зварювальному обладнанні електроприводів з кроковими та вентильними електродвигунами. На основі прикладів виконаних розробок механізованого та автоматичного зварювально-наплавлювального обладнання різного призначення показані переваги застосування безколекторних електродвигунів в комплекті з комп'ютеризованими системами управління і регулювання в різних системах для виконання тих або інших технологічних функцій. Акцентовано увагу на ефективності застосування крокових і вентильних електроприводів для здійснення модульованої і імпульсної подачі електродного дроту. Відзначено перспективність розвитку обладнання при застосуванні електроприводів з кроковими та вентильними електродвигунами. Бібліогр. 11, рис. 8.

*Ключові слова:* дугове зварювання-наплавлення, механізоване обладнання, управління, електропривід, безколекторні електродвигуни

V. A. Lebedev<sup>1</sup>, G. V. Zhuk<sup>1</sup>, I. V. Lendel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Experimental Design-Technological Bureau  
of the E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the NAS of Ukraine. 15 Kazimir Malevich str., 03680.  
E-mail: dktbpaton@gmail.com

<sup>2</sup>E. O. Paton Electric Welding Institute of NASU.  
11 Kazimir Malevich str., 03680.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

## APPLICATION OF ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVES WITH BRUSHLESS ELECTRIC MOTORS IN ARC WELDING

The paper deals with the possibility of application of electric drives with step and valve motors in welding equipment. Examples of performed developments of mechanized and automatic welding-surfacing equipment for various purposes are used to demonstrate the advantages of application of brushless motors as a set with computerized systems of control and regulation in different units to perform diverse technological functions. Effectiveness of application of step and valve electric drives for modulated and pulsed feed of electrode wire is particularly emphasized. Goods prospects for development of equipment with application of electric drives with step and valve electric motors are noted. 11 Ref., 8 Figures.

*Keywords:* arc welding-surfacing, mechanized equipment, control, electric drive, brushless electric motors

Поступила в редакцію 15.03.2017