



Оригинальная статья

УДК 621.313

DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-382-388



РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХКООРДИНАТНЫМ СТАНКОМ СВАРКИ

К. В. Лицин¹, А. В. Цуканов²¹ Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)² Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС» (Россия, 426359, Оренбургская обл., Новотроицк, ул. Фрунзе, 8)

Аннотация. В статье рассматривается двухкоординатный станок сварки. Подобное оборудование используется с целью получения сварочных швов на различных элементах металлоконструкций высокого качества. Основным недостатком имеющегося оборудования заключается в том, что работа на данном станке в настоящее время выполняется вручную. Это операция является достаточно опасной и монотонной. Кроме того, в качестве основного привода системы используется гидропривод. Обоснована замена гидропривода двухкоординатного станка сварки на электропривод с целью повышения КПД всей системы. Выполнена разработка автоматизированного электропривода двухкоординатного станка сварки закладных, управляемого на базе программируемого логического контроллера. Проведено проектирование электропривода объекта. Реализован выбор необходимых элементов разработанной системы автоматизации. На основе технологического процесса разработан алгоритм, который позволяет автоматизировать процесс сварки закладных. Данный алгоритм предусматривает необходимые меры безопасности, осуществляя самодиагностику на этапе запуска системы. С целью проверки работоспособности разработанного алгоритма выполнено моделирование автоматизированного электропривода с помощью программного обеспечения Matlab Simulink. Система содержит два внутренних и три внешних контура, осуществляющих контроль необходимых параметров: скорости, тока, момента, потокосцепления и усилия. Получены динамические характеристики представленных параметров, подтверждающие работоспособность разработанной системы автоматизированного электропривода. Проведен экономический расчет предлагаемой к внедрению системы автоматизации. Суммарные затраты на модернизацию составят порядка 55 тыс. рублей при сроке окупаемости около одного года.

Ключевые слова: черная металлургия, трубная промышленность, двигатель переменного тока, двухкоординатный станок сварки, преобразователь частоты, электропривод, гидропривод, векторное управление

Для цитирования: Лицин К.В., Цуканов А.В. Разработка автоматизированного электропривода системы управления двухкоординатным станком сварки // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 382–388. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-382-388>

Original article

AUTOMATED ELECTRIC DRIVE FOR THE CONTROL SYSTEM OF TWO-COORDINATE WELDING MACHINE

K. V. Litsin¹, A. V. Tsukanov²¹ South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)² Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology “MISIS” (8 Frunze Str., Novotroitsk, Orenburg Region 426359, Russian Federation)

Abstract. Two-coordinate welding machine is used to obtain welds on various elements of high quality metal structures. The main disadvantage of the existing equipment is that the work on this machine is currently performed manually. This operation is quite dangerous and monotonous. In addition, hydraulic drive is used as the main drive of the system. Replacement of the hydraulic drive of a two-coordinate welding machine with an electric drive is substantiated in order to increase the efficiency of the entire system. The authors have developed an automated system for a two-coordinate machine for welding embeds, controlled on the basis of a programmable logic controller. A functional diagram of an automated electric drive for such machine was proposed. The design of the object's electric drive was carried out. The necessary elements of the developed automation system were selected. On the basis of the technological process, an algorithm has been developed that allows automating the process of embeds welding. The developed algorithm provides the necessary security measures, carrying out self-diagnostics at the stage of system startup. In order to check the performance of the developed algorithm, an automated electric drive was simulated using the MATLAB Simulink software. The developed system contains two internal and three external circuits that control the required parameters: speed, current, torque, flux linkage and force. The dynamic characteristics of the presented parameters are obtained, confirming the operability of the developed automated electric drive system. An economic calculation of the automation system proposed for implementation has been carried out. The total costs for the modernization will amount about 55 thousand rubles with a payback period of about one year.

Keywords: ferrous metallurgy, pipe industry, AC motor, two-coordinate welding machine, frequency converter, electric drive, hydraulic drive, vector control

For citation: Litsin K.V., Tsukanov A.V. Automated electric drive for the control system of two-coordinate welding machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 382–388. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-382-388>

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В современном мире в конкурентных условиях промышленные производители вынуждены по максимуму использовать свое оборудование [1 – 3]. Даже незначительное увеличение производительности рабочих машин может привести к росту прибыли предприятия [4]. Не исключением стала и черная металлургия, в которой особое внимание уделяется модернизации оборудования [5 – 7].

В данной работе рассматривается сварочный комплекс, установленный на предприятии АО «Рифар» (г. Гай, Оренбургская область) [8]. Объектом исследования является двухкоординатный станок сварки закладных, в котором выявлена проблема существенных потерь при эксплуатации гидравлического привода и отсутствия системы автоматики для управления процессом сварки. На данном станке можно изготавливать продукцию, которая может эксплуатироваться в черной металлургии. Закладные детали всегда применяются при строительстве нового объекта или опор освещения, что неизбежно на предприятии любой отрасли. К примеру, для монтажа опор освещения часто используются трубные закладные элементы (типа ФТ) и закладные фундаментальные блоки. Они представляют собой металлоконструкцию, состоящую из трубы определенного сечения с приваренным к ней фланцем [9]. Целью данной работы является разработка автоматизированного электропривода двухкоординатного станка варки, что позволит улучшить качество швов и сократить время цикла сварки. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать и реализовать замену гидропривода на электропривод для двухкоординатного станка сварки закладных;
- разработать алгоритм работы двухкоординатного станка сварки закладных;
- разработать и исследовать модель электропривода прижима двухкоординатного станка сварки закладных.

ОПИСАНИЕ СХЕМЫ УСТАНОВКИ

На рис. 1 представлен внешний вид и элементы двухкоординатного сварочного станка, который предназначен для сварки половинок закладной под действием контактной сварки [10].

Станок работает на основе гидравлического привода, который состоит из трех гидравлических цилиндров и пяти гидроклапанов – одного клапана безопасности, трех рабочих, идущих на гидроцилиндры, и одного ре-

зервного. Также станок оборудован электроприводом для приведения в движение задвижки правой половины закладной [11].

Среди недостатков гидропривода можно выделить:

- сложность конструкции и высокие требования к технологии изготовления отдельных элементов гидравлического привода;
- достаточно высокую сложность коммуникаций высокого давления;
- прихотливость в эксплуатации и высокую стоимость.

Поэтому замена гидропривода на электропривод, лишенного указанных недостатков, является необходимым шагом.

Электрический привод двухкоординатного станка для сварки закладных должен соответствовать следующим требованиям:

- точность позиционирования и останова;
- минимальное время разгона и торможения (не более 0,5 с);

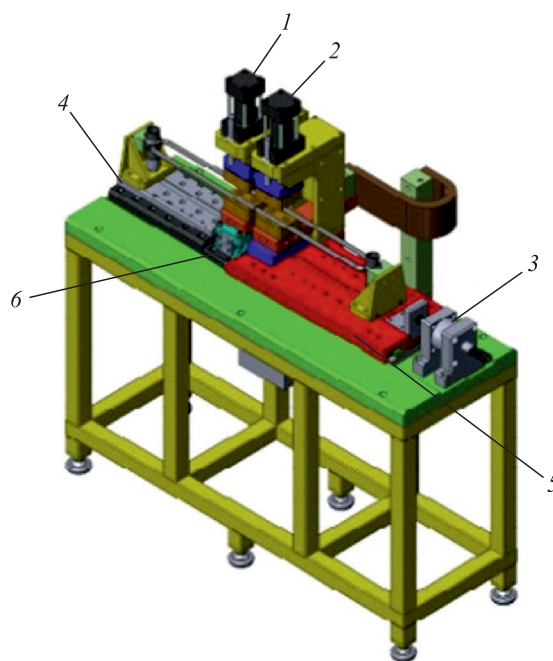


Рис. 1. Общий вид двухкоординатного станка сварки закладных: 1 – цилиндр блокиратора левой половины; 2 – цилиндр блокиратора правой половины; 3 – цилиндр прижима правой половины; 4 – ложемент левой половины; 5 – ложемент правой половины; 6 – сварочный коллектор

Fig. 1. General view of a two-coordinate machine for embeds welding: 1 – left half blocker cylinder; 2 – right half blocker cylinder; 3 – cylinder for pressing the right half; 4 – lodgment of the left half; 5 – lodgment of the right half; 6 – welding manifold

- обеспечение усилия, соответствующего силовым характеристикам процесса;
- широкий диапазон рабочих температур;
- безотказность;
- обеспечение надежности работы;
- обеспечение требуемого уровня автоматизации;
- стойкость к ударным вибрационным нагрузкам;
- обеспечение работоспособности под воздействием постоянного магнитного и переменных полей сетевой частоты [12].

Для электрического привода двухкоординатного станка сварки закладных выбрана система электропривода «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД), как обладающая наибольшими преимуществами в сравнении с другими системами электропривода [13 – 16].

С целью отслеживания состояния элементов, осуществляющих движение, в разработанной автоматической системе двухкоординатного станка имеются датчики для левого и правого прижима, верхнего домашнего положения и нижнего рабочего положения и два датчика, отслеживающих наличие закладных. В качестве датчиков используется бесконтактный индуктивный выключатель с увеличенным расстоянием срабатывания компании «Сенсор» серии ВБИ-М12-60Р-1113-С.51 [17].

На схеме системы управления двухкоординатного станка сварки, которая представлена на рис. 2, изоб-

ражен объект управления и средства его автоматизации.

Разработан алгоритм работы двухкоординатного станка сварки закладных. В процессе запуска системы с целью проверки готовности станка к работе осуществляется опрос аварийных кнопок. На следующем этапе реализуется опрос готовности системы частотных преобразователей. Далее следует проверка готовности сварочного инвертора.

Алгоритм дальнейших действий подробно представлен на рис. 3. Непосредственно в процессе работы осуществляется опрос датчиков правого прижима. Полученный сигнал готовности поступает на сварочный коллектор, разрешая осуществление сварки закладных. После процесса сваривания идет опрос сварочного инвертора об окончании, вследствие чего происходит процесс разблокировки закладной и отвод прижимов в исходное положение. На этом процесс сварки подходит к концу, и оператор может вытаскивать закладную для ее дальнейшей транспортировки.

Три электропривода, представленных на рис. 2, работают согласно единому алгоритму (рис. 3). Однако с целью проведения дальнейших исследований и удовлетворения требованиям, представленным выше, а также реализации большего числа действий алгоритма, наибольший интерес представляет электропривод прижима правой половины, содержащий в своем составе

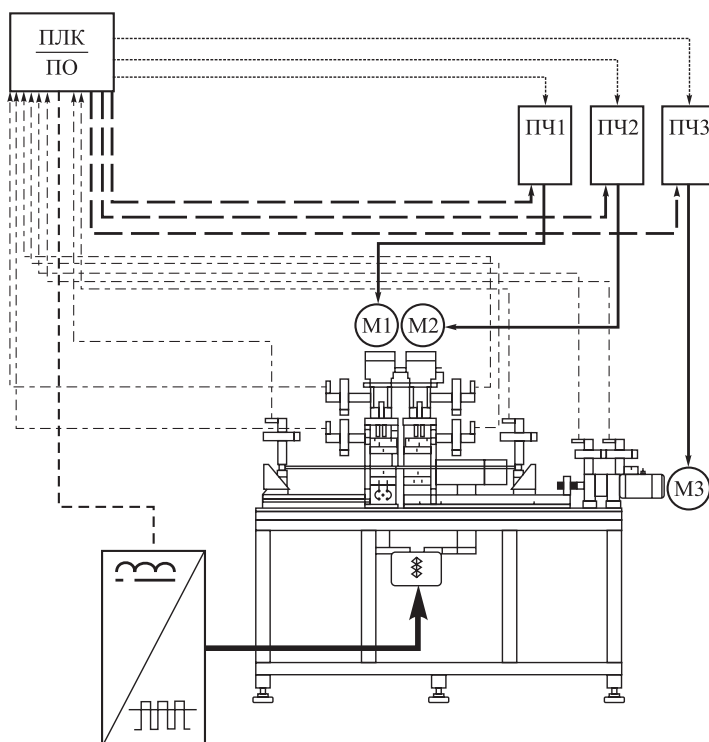


Рис. 2. Система управления двухкоординатным станком сварки:

ПЛК/ПО – программируемый логический контроллер и программное обеспечение; ПЧ – преобразователь частоты; М – электрический двигатель

Fig. 2. Control system for two-coordinate welding machine:

ПЛК/ПО – programmable logic controller and software; ПЧ – frequency converter; М – electric motor

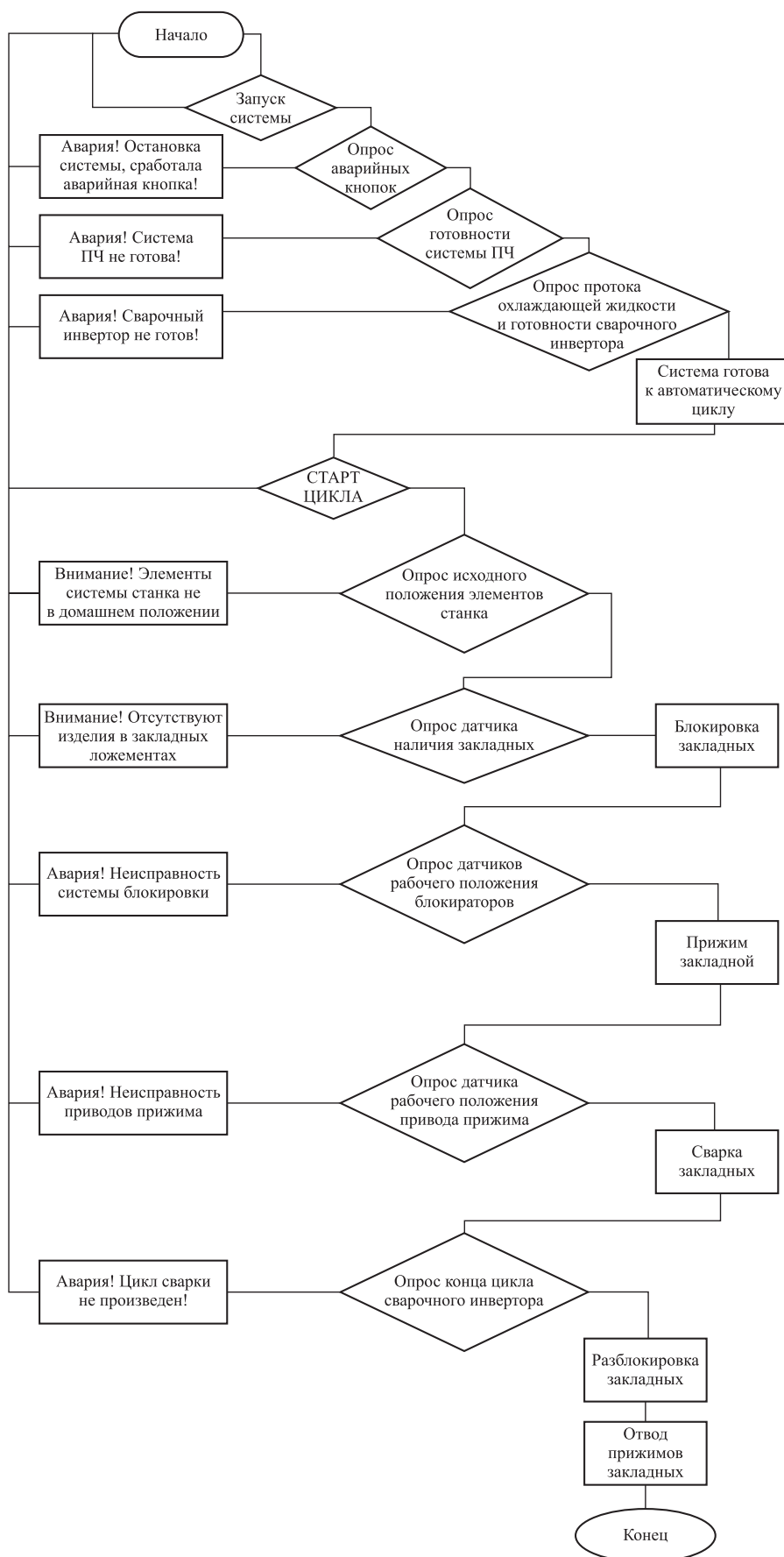


Рис. 3. Алгоритм работы станка

Fig. 3. Algorithm of the machine operation

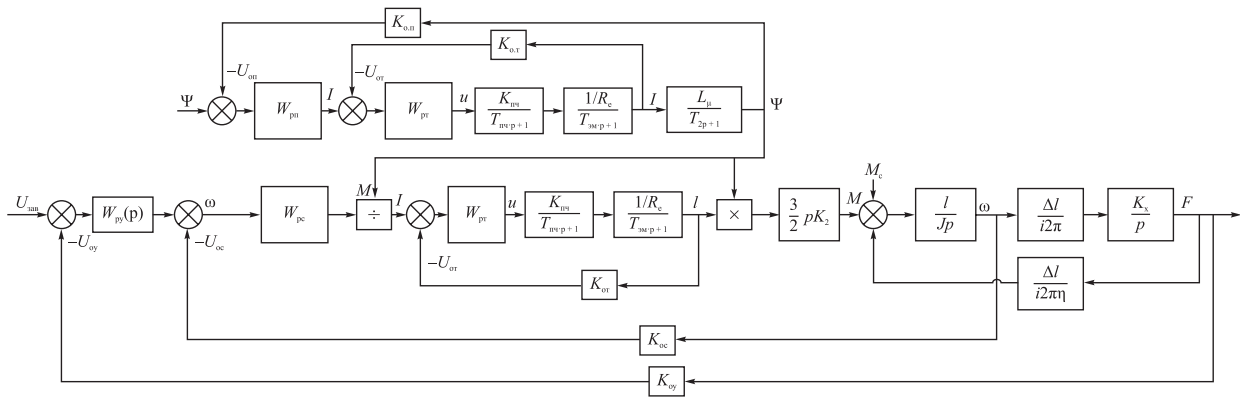


Рис. 4. Структурная схема электропривода:

W_{pc} – передаточная функция регулятора скорости; W_{pi} – передаточная функция регулятора тока; W_{py} – передаточная функция регулятора усилия; $K_{пч}$ – пропорциональный коэффициент преобразователя частоты; $T_{эм}$ – электромеханическая постоянная времени двигателя; $T_{пч}$ – постоянная времени преобразователя частоты; R_c – активное сопротивление двигателя; J – момент инерции; i – передаточное число; Δl – величина относительного перемещения; K_x – жесткость пружины

Fig. 4. Block diagram of the electric drive:

W_{pc} – transfer function of the speed controller; W_{pi} – transfer function of the current regulator; W_{py} – transfer function of the force regulator; $K_{пч}$ – proportional coefficient of the frequency converter; $T_{эм}$ – electromechanical time constant of the engine; $T_{пч}$ – time constant of the frequency converter; R_c – active resistance of the motor; J – moment of inertia; i – gear ratio; Δl – value of the relative displacement; K_x – stiffness of the spring

электродвигатель М3 (см. рис. 2). В программе Matlab Simulink на основе известных методик [18 – 20] разработана структурная схема электропривода (рис. 4). Схема включает в себя два внутренних контура регулирования по току с коэффициентом обратной связи $K_{от}$, а также три внешних контура регулирования: потокосцепления с коэффициентом обратной связи по потокосцеплению $K_{оу}$, скорости с коэффициентом обратной связи по скорости $K_{ос}$ и контур регулирования усилия с коэффициентом обратной связи по усилию $K_{оу}$.

Особенностью представленной структурной схемы электропривода является наличие контура регулирования усилия, который позволяет добиться плавности прикладываемого усилия (без ударов и перерегулирования) с целью устранения повреждений заготовки. В результате моделирования в программной среде Matlab

Simulink был получен график скорости режима работы станка, который представлен на рис. 5.

Из графика, представленного на рис. 5 следует, что величина перерегулирования в процессе перемещения прижима правой половины равна нулю. Скорость нарастания процесса плавная, без колебаний. Следовательно, достигается требование по обеспечению усилия, соответствующего силовым характеристикам процесса. Достижение номинальной величины скорости (время регулирования) не превышает 0,5 с, что удовлетворяет требованиям по точности позиционирования и времени разгона.

Выводы

Обоснована замена гидравлического привода на электрический, основанная на недостатках гидропривода.

Разработанный алгоритм работы двухкоординатного станка сварки исследован на созданной математической модели электропривода прижима правой половины. Достоверность расчетов и построения модели подтверждается полученным графиком скорости. Полученный переходный процесс скорости, отсутствие перерегулирования, время переходного процесса разгона, равного 0,27 с, плавность разгона и торможения по причине отсутствия колебаний подтверждают правомерность проведенных расчетов и возможность использования разработанного алгоритма на двухкоординатном станке сварки.

При внедрении предлагаемого решения на базе АО «Рифар» суммарные затраты на модернизацию составят порядка 55 тыс. рублей при сроке окупаемости один год.

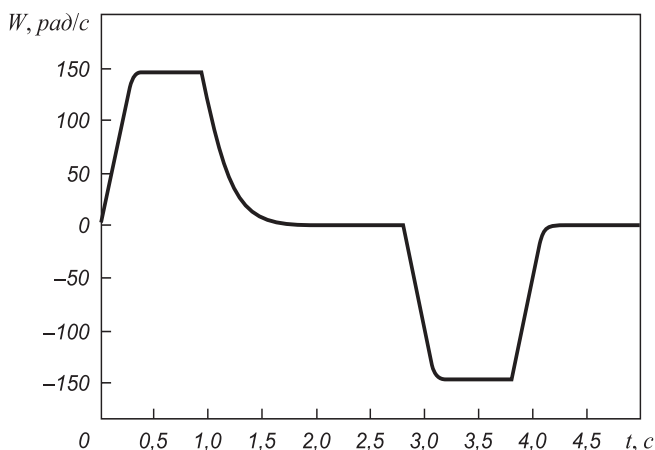


Рис. 5. График скорости режима работы станка

Fig. 5. Speed graph of the machine operating mode

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Pancrecius J.K., Ulaeto S.B., Ramya R., Rajan T.P.D., Pai B.C. Metallic composite coatings by electroless technique – A critical review // *International Materials Reviews*. 2018. Vol. 63. No. 8. P. 488–512. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1506692>
- Setareh M., Parniani M., Aminifar F. An analytic methodology to determine generators redispatch for proactive damping of critical electromechanical oscillations // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2020. Vol. 123. Article 106301. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106301>
- Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61. No. 5. P. 315–360. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
- Wu Q., Xu W., Zhang L. Machining of particulate-reinforced metal matrix composites: An investigation into the chip formation and subsurface damage // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 274. Article 116315. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116315>
- Li Y., Han Q., Horvath I., Zhang G. Repairing surface defects of metal parts by groove machining and wire + arc based filling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 274. Article 116268. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116268>
- Yang J., Hu A., Li Y., Chandra Saha D., Yu Z. Heat input, intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 272. P. 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.004>
- Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61. No. 5. P. 315–360. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
- Официальный сайт АО «Рифар». Режим доступа: <https://rifar.ru/>
- Соколов В.А., Саяпин Ю.А., Шестель Л.А. Контроль сварных соединений при сварке труб, сваренных при помощи закладных нагревателей // *Техника и технологии машиностроения: Материалы VIII Международной научно-технической конференции*. 2019. № 7. С. 131–133.
- Зыкина Е.А., Букреев М.В., Чепик А.А. Модернизация учебного сварочного оборудования для повышения качества подготовки специалистов сварочного производства в нефтегазовой отрасли // *Вестник современных исследований*. 2018. № 4.2(19). С. 233–234.
- Buyuk M., Inci M., Tan A., Tumay M. Improved instantaneous power theory based current harmonic extraction for unbalanced electrical grid conditions // *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol. 177. Article 106014. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106014>
- Онищенко Г.Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок. М.: РАСХН, 2001. 509 с.
- Басков С.Н., Лицин К.В., Радионов А.А. Определение углового положения ротора синхронного двигателя в режиме векторно-импульсного пуска // *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2014. № 4. С. 3–8.
- Mao H., Xiao J. Real-time conflict resolution of task-constrained manipulator motion in unforeseen dynamic environments // *IEEE Transactions on Robotics*. 2019. Vol. 35. No. 5. P. 1276–1283. <https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2924556>
- Hong J., Wang Z., Zhang T., Zhang Y., Li Y. Research on integration simulation and balance control of a novel load isolated pure electric driving system // *Energy*. 2019. Vol. 189. Article 116220. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116220>
- Baskov S.N., Litsin K.V. Determination of the angular position of the rotor of asynchronous motor by connecting a high-frequency signal in the excitation winding // *Proceedings of 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)*. 2015. <http://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7146993>
- Pancrecius J.K., Ulaeto S.B., Ramya R., Rajan T.P.D., Pai B.C. Metallic composite coatings by electroless technique – A critical review. *International Materials Reviews*. 2018, vol. 63, no. 8, pp. 488–512. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1506692>
- Setareh M., Parniani M., Aminifar F. An analytic methodology to determine generators redispatch for proactive damping of critical electromechanical oscillations. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2020, vol. 123, article 106301. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106301>
- Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*. 2016, vol. 61, no. 5, pp. 315–360. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
- Wu Q., Xu W., Zhang L. Machining of particulate-reinforced metal matrix composites: An investigation into the chip formation and subsurface damage. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, vol. 274, article 116315. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116315>
- Li Y., Han Q., Horvath I., Zhang G. Repairing surface defects of metal parts by groove machining and wire + arc based filling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, vol. 274, article 116268. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116268>
- Yang J., Hu A., Li Y., Chandra Saha D., Yu Z. Heat input, intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, vol. 272, pp. 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.004>
- Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*. 2016, vol. 61, no. 5, pp. 315–360. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
- Official site of JSC “Rifar”. Available at URL: <https://rifar.ru/>
- Sokolov V.A., Sayapin Yu.A., Shestel’ L.A. Inspection of welded joints when welding pipes welded with embedded heaters. In: *Materials of the VIII Int. Sci. and Tech. Conf. “Engineering and Technology of Mechanical Engineering”*. 2019, no. 7, pp. 131–133. (In Russ.)
- Zykina E.A., Bukreev M.V., Chepik A.A. Modernization of educational welding equipment to improve the quality of training of welding specialists in the oil and gas industry. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2018, no. 4.2(19), pp. 233–234. (In Russ.)
- Buyuk M., Inci M., Tan A., Tumay M. Improved instantaneous power theory based current harmonic extraction for unbalanced electrical grid conditions. *Electric Power Systems Research*. 2019, vol. 177, article 106014. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106014>
- Onishchenko G.B. *Automated Electric Drive of Industrial Plants*. Moscow: RAAS, 2001, 509 p. (In Russ.)
- Baskov S.N., Litsin K.V., Radionov A.A. Determination of angular position of synchronous motor rotor in the mode of vector-pulse start. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2014, no. 4, pp. 3–8. (In Russ.)
- Mao H., Xiao J. Real-time conflict resolution of task-constrained manipulator motion in unforeseen dynamic environments. *IEEE Transactions on Robotics*. 2019, vol. 35, no. 5, pp. 1276–1283. <https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2924556>
- Hong J., Wang Z., Zhang T., Zhang Y., Li Y. Research on integration simulation and balance control of a novel load isolated pure electric driving system. *Energy*. 2019, vol. 189, article 116220. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116220>
- Baskov S.N., Litsin K.V. Determination of the angular position of the rotor of asynchronous motor by connecting a high-frequency signal in the excitation winding. *Proceedings of 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)*. 2015. <http://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7146993>

17. Бурулько Л.К., Дементьев Ю.Н. Электрооборудование промышленности. Электроприводы промышленных механизмов и устройств: Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 180 с.
18. Zhou L., Tokekar P. Sensor assignment algorithms to improve observability while tracking targets // *IEEE Transactions on Robotics*. 2019. Vol. 35. No. 5. P. 1206–1219.
<https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2920749>
19. Стаценко А.В. Модель асинхронного двигателя для анализа энергетических показателей в программной среде MATLAB Simulink // *Colloquium-Journal*. 2018. № 1–1(12). P. 27–33.
20. Лицин К.В., Гусев А.А., Ковальчук Т.В. Исследование электропривода системы подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок // *Известия вузов. Электромеханика*. 2018. Т. 61. № 5. С. 38–43.
17. Burul'ko L.K., Dement'ev Yu.N. *Industrial Electrical Equipment. Electric Drives of Industrial Mechanisms and Devices: A tutorial*. Tomsk: TPU, 2012, 180 p. (In Russ.).
18. Zhou L., Tokekar P. Sensor assignment algorithms to improve observability while tracking targets. *IEEE Transactions on Robotics*. 2019, vol. 35, no. 5, pp.1206–1219.
<https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2920749>
19. Statsenko A.V. Model of an asynchronous motor for analyzing energy performance in the MATLAB Simulink software environment. *Colloquium-Journal*. 2018, no. 1–1(12), pp. 27–33. (In Russ.).
20. Litsin K.V., Gusev A.A., Koval'chuk T.V. Electric drive for the system of slag-forming mixture supply into a CCM mold. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 2018, vol. 61, no. 5, pp. 38–43. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лицин Константин Владимирович, к.т.н., доцент кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет
E-mail: k.litsin@rambler.ru

Цуканов Андрей Витальевич, студент, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
E-mail: 03-06-2000@mail.ru

Litsin V. Konstantin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Mechatronics and Automation”, South Ural State University
E-mail: k.litsin@rambler.ru

Tsukanov V. Andrei, Student, Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: 03-06-2000@mail.ru

Поступила в редакцию 21.10.2020
После доработки 04.04.2021
Принята к публикации 16.04.2021

Received 21.10.2020
Revised 04.04.2021
Accepted 16.04.2021