УДК 621.315.62:621.879.3 © С.И. Малафеев, В.И. Коняшин, А.А. Новгородов, 2019

Экскаватор ЭКГ-20: новое техническое решение мехатронного комплекса

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-7-4-7

МАЛАФЕЕВ
Сергей Иванович
Доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ООО Компания «Объединенная Энергия», профессор Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 111672, г. Москва, Россия, тел.: +7 (495) 544-46-47, e-mail: sim@jpc.ru

КОНЯШИН
Владимир Игоревич
Канд. техн. наук, старший научный сотрудник ООО Компания «Объединенная Энергия», 111672, г. Москва, Россия, тел.: +7 (495) 544-46-47, e-mail: solytonik@yandex.ru

НОВГОРОДОВ
Андрей Александрович
Руководитель отдела проектирования мехатронных систем ООО Компания «Объединенная Энергия», 111672, г. Москва, Россия, тел.: +7 (495) 544-46-47, e-mail: novgorodov@jpc.ru

В статье приведены результаты проектирования и промышленной эксплуатации новых мехатронных систем для экскаватора ЭКГ-20 (ЭКГ-18) производства ПАО «Уралмашзавод». В разработке применены инновационные технические решения: электроприводы переменного тока с векторным управлением; преобразователи на основе IGBT транзисторов пятого поколения; активные выпрямители для электропитания системы приводов; стабилизированная система электропитания электрооборудования собственных нужд; компьютерная информационно-диагностическая система; система удаленного мониторинга. Новые экскаваторы эксплуатируются в настоящее время на российских добывающих предприятиях: Лебедиском ГОКе, разрезе «Нерюнгринский» и в ООО «Эльгауголь».

Ключевые слова: *экскаватор, мехатроника, двигатель, транзистор, преобразователь, привод, контроллер.*

ВВЕДЕНИЕ

Обновление техники и технологий открытых горных работ опирается на ускоренное проектирование и производство для российских предприятий новых горных машин, по техническому уровню превосходящих лучшие отечественные и зарубежные образцы. Тяжелые климатические условия России определяют повышенные требования к горной технике в отношении надежности, удобства эксплуатации и обслуживания. Техническое состояние экскаватора, качество управления и уровень обеспечения технического обслуживания являются важнейшими факторами эффективного использования машин [1]. В современных экскаваторах используются мехатронные системы с двигателями постоянного и переменного тока с транзисторными и тиристорными силовыми преобразователями энергии [2, 3, 4]. Применение новых приводных систем с двигателями переменного тока обеспечивает значительное повышение производительности экскаваторов и снижение электропотребления [3, 5, 6].

В настоящей работе представлены результаты проектирования и освоения производства низковольтных комплектных устройств для экскаваторов ЭКГ-20 (ЭКГ-18) ПАО «Уралмашзавод», выполненных ООО Компания «Объединенная Энергия» (г. Москва).

НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ МЕХАТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Мехатронный комплекс ЭКГ-20 реализован на основе типовой функциональной схемы, разработанной Компанией

«Объединенная Энергия» для карьерных экскаваторов [2]. Первый приоритет в этом комплексе имеет система электропитания, которая обеспечивает его эффективную работу в разных режимах.

Ячейка высоковольтного ввода ЯВВ-6-250-УХЛ2 [7] экскаватора полностью отвечает требованиям РД 05-334-99, утвержденным Госгортехнадзором России. Повышенная безопасность эксплуатации ячейки обеспечивается взаимной блокировкой разъединителей, исключением доступа в отсек при включенном разъединителе, индикацией высокого напряжения на вводе и состояния вакуумного контактора. Устройство содержит полный комплект специальных микроконтроллерных защит с функцией тестирования и индикацией причины срабатывания защитного отключения, органы местного и дистанционного управления, контроллер регистрации аварийных событий. Ячейка оснащена тремя многофункциональными приборами учета расхода электроэнергии типа «Знак+». Ресурс коммутационной аппаратуры ячейки составляет 750 000 циклов.

Электроприводы главного движения экскаваторов (напора, подъема и поворота), а также электропривод хода выполнены по системе инвертор напряжения – асинхронный двигатель. Для электропитания приводов используется локальная сеть постоянного тока, организованная группой из четырех активных выпрямителей и емкостным накопителем энергии. Регулирование электроприводов главного движения происходит путем изменения частоты и напряжения на якорных обмотках приводных двигателей с использованием векторного алгоритма управления. Активные выпрямители также обеспечивают электромагнитную совместимость экскаватора и питающей электрической сети [2, 8]. Коэффициент мощности поддерживается постоянным и равным 1, коэффициент искажений потребляемого тока не превышает 5%.

В активных выпрямителях и инверторах применены новые IGBT-транзисторы пятого поколения FF1800R17IP5 [9]. Отличительная особенность IGBT-модулей FF1800R17IP5 Infineon – это уникальное сочетание передовых технологий, обеспечивающих низкие тепловые потери в кристаллах (технология Trench-Field Stop); эффективное охлаждение кристаллов (технология Prime PACK) и термостабильные и надежные медные шины, соединяющие кристаллы в приборах (технология XT). Благодаря новым решениям удельная мощность полупроводниковых приборов увеличена на 25%; тепловые потери снижены на 30-35%, а срок службы транзисторов (количество циклов «нагрев-охлаждение») увеличено в 5 раз по сравнению с традиционными приборами. Использование новых транзисторов в составе мехатронных систем позволило повысить предельные параметры и надежность приводов главного движения экскаватора, а также улучшить температурные режимы преобразователей.

Для управления транзисторными инверторами напряжения приводов главного движения использован алгоритм векторного регулирования скорости асинхронного двигателя с нелинейным ограничением тока, обеспечивающий повышенные энергетические характеристики системы [2]. В разработанной системе управления асинхронным двигателем лежит принцип трансвекторного управления с ориентацией по полю [10]. В качестве адаптивного наблюдателя использован наблюдатель Р. Калмана. В приводах подъема, напора и поворота применены импульсные датчики скорости; привод хода – бездатчиковый.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

В мехатронном комплексе применены специальные асинхронные двигатели серии АДЧРЭ производства Концерна Русэлпром (Сафоновский электромашиностроительный завод) [11]. Двигатели новой экскаваторной серии разработаны с учетом особенностей работы при управлении с помощью преобразователей частоты, специфики нагрузок и условий работы [12]. Двигатели подъема, напора и поворота содержат встроенные импульсные датчики скорости (зубчатое колесо и датчик D1820.19S22HW). Степень защиты двигателей – IP54 по ГОСТ IEC 60034-5-2011. Степень защиты на входе воздуха – IP23; на выходе воздуха – IPW24, силовой и клеммной коробки выводов – IP55 по ГОСТ 14254.

Применение электроприводов переменного тока обеспечивает повышенную надежность электромеханического оборудования экскаватора и снижение эксплуатационных расходов вследствие применения электрических машин без скользящих контактов.

ИННОВАЦИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для электропитания вспомогательного электрооборудования применен специальный (120 кВт) трехфазный стабилизатор напряжения [7]. Цепи управления получают питание от отдельного преобразователя с дополнительным емкостным накопителем энергии для сохранения работоспособности системы управления при отключении силовой сети. Тиристорные коммутационные устройства с алгоритмом «мягкого» пуска применены вместо контакторов и пускателей для управления компонентами вспомогательного оборудования экскаватора и обеспечивают повышенную надежность аппаратуры в условиях вибраций и пыли. Силовые кабели для электропитания оборудования типа H07RN-F Premium 4G4 (Германия) имеют диапазон рабочих температур от -50 до +90°С. Безгалогенная резиновая компаундная изоляция кабеля не поддерживает горение и обеспечивает повышенную пожаробезопасность. Электробезопасность оборудования обеспечивается приборами контроля сопротивления изоляции «АРГУС».

Информационно-диагностическая система (ИДС) «Пульсар 7» реализована на основе стандартных технических средств автоматизации и типового и специализированного программного обеспечения [7]. Данные, поступающие из ИДС и преобразованные по специальным алгоритмам, выводятся на монитор и сохраняются на сервере. Данные, получаемые с машины, используются разработчиком оборудования для уточнения моделей при проектировании новых машин, а также коррекции параметров машин, находящихся в эксплуатации. Обслуживающий персонал имеет возможность отслеживать все основные показатели работы экскаватора: угол наклона экскаватора; состояние всех компонентов; температуру электрических машин, подшипников, преобразователей, воздуха в кабине и за бортом, масла; параметры подводимой электроэнергии, состояние изоляции электрооборудования; данные о производительности экскаватора; информацию о неисправностях на экскаваторе и др. Функция интеллектуальной

Экскаватор ЭКГ-20 на Лебединской ГОКе

диагностики ИДС «Пульсар-7» обеспечивает автоматическое обнаружение неисправностей оборудования и отображение причины аварийных отключений на мониторе.

Телекоммуникационная система обеспечивает удаленный мониторинг и управление через сеть Интернет с любого персонального компьютера или мобильного устройства (телефона, планшетного компьютера) при помощи программы удаленного администрирования, установленной на компьютере информационно-диагностической системы. Программа позволяет наблюдать процессы и управлять экранами системы, а также имеет возможность пересылки файлов-архивов на компьютер или мобильное устройство удаленного пользователя. Предусмотрена дистанционная настройка приводов, активных выпрямителей и другого оборудования [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭКСКАВАТОРОВ ЭКГ-20

Экскаваторы ЭКГ-20 (*см. рисунок*) введены в эксплуатацию с 2018 г. на разрезе «Нерюнгринский», Лебединском ГОКе (две машины) и в ООО «Эльгауголь». По данным службы эксплуатации на Лебединском ГОКе, определены следующие основные характеристики экскаватора ЭКГ-20:

– время цикла – 27-29 с;

– удельная энергоемкость экскавации (с учетом рекуперированной энергии) – 0,24 кВт·ч/м^3;

– среднее значение потребленной за цикл экскавации энергии – 29 кВт·ч;

– среднее значение рекуперированной за цикл экскавации энергии – 4,8 кВт·ч;

– коэффициент мощности на вводе экскаватора – не менее 0,9;

– коэффициент технической готовности – 0,96.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мехатронные системы экскаватора ЭКГ-20 реализованы на основе современных достижений электромашиностроения, силовой электроники, микропроцессорной техники и телекоммуникаций. Интеллектуальное управление движением механизмов обеспечивает высокие энергетические и динамические характеристики и индивидуальную коррекцию приводов, исключающую удары и выходы в аварийные зоны.

Применение новых полупроводниковых приборов в составе активных выпрямителей и инверторов позволило повысить динамические и энергетические характеристики приводов главного движения. Коэффициент мощности экскаватора во всех режимах работы поддерживается постоянным и равным заданному значению, за счет чего обеспечивается оптимальная электромагнитная совместимость экскаватора и питающей электрической сети. Применение стабилизатора напряжения для электропитания собственных нужд повышает качество электрической энергии и обеспечивает гарантированное электропитание ответственных систем управления при отключении питающей сети.

ИДС «Пульсар-7» с модулем удаленного мониторинга обеспечивает полный контроль всех основных рабочих параметров, нагрузок на рабочие органы и диагностику основных компонентов оборудования. Информационная телекоммуникационная система удаленного наблюдения за работой экскаватора и всех его компонентов обеспечивает создание из отдельных фрагментов единых информационных полей для машинистов, работников добывающих предприятий, разработчиков и изготовителей экскаваторов.

Новый мехатронный комплекс гарантирует высокую производительность и качество работы экскаватора. Высокие технические и эксплуатационные характеристики экскаватора подтверждены промышленной эксплуатацией в тяжелых климатических условиях.

Список литературы

1. Иванов С.Л. Изменение наработки современных отечественных экскаваторов ЭКГ от условий их функционирования // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 692-700. doi: 10.18454/PMI.2016.5.692.

2. Malafeev S.I., Novgorodov A.A. Design and implementation of electric drives and control systems for mining excavators // Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87. Issue 10. Pp. 560–565. doi: 10.3103/S1068371216100035.

3. Casson M. Dragline Retrofit for AC Motion Power / "SYMPHOS 2013". 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate. Procedia Engineering 83. 2014. Pp. 86-89. doi: 10.1016/j.proeng.2014.09.017.

4. Real-Time Power Quality Meashurements from a Conventional AC Dragline / P. Pandit, J. Mazumdar, T. May, W.G. Koellner // IEEE Transactions on Industry Applications. 2010. Vol. 46. N 5. Pp. 1755-1763. doi: 10.1109/TIA.2010.2057470.

5. Awuah-Offei K. Energy efficiency in the Minerals Industry: Best Practices and Research Directions. Springer, 2017. 333 p. doi: 10.1007/978-3-319-54199-0.

6. Агеев С.С., Реймер А.В. Горное оборудование Уралмашзавода. Екатеринбург: ООО «Форт Диалог-Исеть». 2016. 120 с.

7. Малафеев С.И., Серебренников Н.А. Повышение энергетической эффективности карьерных экскаваторов на основе модернизации электрооборудования и систем управления // Уголь. 2018. № 10. С. 30-34. URL: http://www.ugolinfo.ru/Free/102018.pdf (дата обращения: 15.06.2019).

8. Ponnusamy M., Maity T., Dharmaraj M. Dual Loop Controller for Active Front End Rectifier / Proc. IEEE Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS 2018). Mahendra Engineering College. Tamilnadu. India. 2018. Pp. 137-141.

9. Русу А. Пятое поколение IGBT-модулей Infineon – новая эпоха в силовой электронике // Новости электроники. 2019. № 1. URL: https://www.compel.ru/lib/ne/2019/1/7-pyatoe-pokolenie-igbt-moduley-infineon-novaya-epoha-v-silovoy-elektronike. (дата обращения: 15.06.2019).

10. Boldea I., Nasar S.A. Electric Drives. CRC Press. 2016. 640 p.

11. Малафеев С.И., Захаров А.В., Сафроненков Ю.А. Новая серия асинхронных частотно-регулируемых двигателей для карьерных экскаваторов // Электротехника. 2019. № 4. С. 7-12.

12. Захаров А.В. Алгоритмы расчета скоростных характеристик регулируемых асинхронных двигателей и возможности их использования в задачах энергетического анализа // Электротехника. 2015. № 3. С. 28-34.

UDC 621.315.62:621.879.3 © S.I. Malafeev, V.I. Konyashin, A.A. Novgorodov, 2019
ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2019, № 7, pp. 4-7

Title
EXCAVATOR EKG-20: NEW TECHNICAL SOLUTION OF MECHATRONIC COMPLEX

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-7-4-7

Authors
Malafeev S.I.[1], Konyashin V.I.[1], Novgorodov A.A.[1]
[1] "Joint Power Co., Ltd., Moscow, 111672, Russian Federation

Authors' Information
Malafeev S.I., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Scientific Officer, Professor of Vladimir state university named after Alexander and Nikolay Stoletovs, tel.: +7 (495) 544-46-47, e-mail: sim@jpc.ru
Konyashin V.I., PhD (Engineering), Senior Researcher, tel.: +7 (495) 544-46-47, e-mail: solytonik@yandex.ru
Novgorodov A.A., Head of the Department of Design of Mechatronic Systems, tel.: +7 (495) 544-46-47, e-mail: novgorodov@jpc.ru

Abstract
The paper presents the results of the design and industrial operation of the new mechatronic systems for the EKG-20 (EKG-18) excavator of Uralmashzavod. Innovative technical solutions are applied in the development: AC motors with vector control; 5th generation IGBT transistors; active rectifiers for powering the drive system; stabilized power supply system for electrical equipment of own needs; computer information and diagnostic system; remote monitoring system. New excavators are currently in operation at Russian mining enterprises: Lebedinsky GOK; "Nerungrinskiy" open-pit mine and "Elgaugol".

Keywords
Excavator, Mechatronics, Motor, Transistor, Converter, Drive, Controller.

References
1. Ivanov S.L. Izmenenie narabotki sovremennyh otechestvennyh ekskavatorov EKG ot uslovij ih funkcionirovaniya [Changing the performance of modern domestic EKG excavators on the conditions of their operation]. *Zapiski Gornogo instituta – Notes of Mining institute,* 2016, Vol. 221, Pp. 692-700. doi: 10.18454/PMI.2016.5.692.
2. Malafeev S.I. & Novgorodov A.A. Design and implementation of electric drives and control systems for mining excavators. *Russian Electrical Engineering*, 2016, Vol. 87, Issue 10, Pp. 560–565. doi: 10.3103/S1068371216100035.
3. Casson M. Dragline Retrofit for AC Motion Power / "SYMPHOS 2013". 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate. Procedia Engineering 83, 2014, Pp. 86-89. doi: 10.1016/j.proeng.2014.09.017.
4. Pandit P., Mazumdar J., May T. & Koellner W.G. Real-Time Power Quality Meashurements From a Conventional AC Dragline. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 2010, Vol. 46, No. 5, Pp. 1755-1763. doi: 10.1109/TIA.2010.2057470.
5. Awuah-Offei K. Energy efficiency in the Minerals Industry: Best Practices and Research Directions. Springer, 2017, 333 p. doi: 10.1007/978-3-319-54199-0.
6. Ageev S.S. & Reymer A.V. *Gornoe oborudovanie Uralmashzavoda* [Mining equipment of Uralmashzavod]. Ekaterinburg, "Fort Dialogue-Iset" LLC, 2016, 120 p.
7. Malafeev S.I. & Serebrennikov N.A. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti karyernyh ekskavatorov na osnove modernizacii elektrooborudovaniya i sistem upravleniya [Improving the energy efficiency of mining excavators based on the modernization of electrical equipment and control systems]. *Ugol' – Russian Coal Journal*, 2018, No. 10, Pp. 30-34. Available at: http://www.ugolinfo.ru/Free/102018.pdf (accessed 15.06.2019).
8. Ponnusamy M., Maity T. & Dharmaraj M. Dual Loop Controller for Active Front End Rectifier / Proc. IEEE Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS 2018), Mahendra Engineering College, Tamilnadu, India, 2018, Pp. 137-141.
9. Rusu A. Pyatoe pokolenie IGBT-moduley Infineon – novaya epoha v silovoy elektronike [The Fifth Generation of Infineon IGBT Modules – A New Era in Power Electronics]. *Novosti elektroniki – Electronics news*, 2019, No. 1. Available at: https://www.compel.ru/lib/ne/2019/1/7-pyatoe-pokolenie-igbt-moduley-infineon-novaya-epoha-v-silovoy-elektronike (accessed 15.06.2019).
10. Boldea I. & Nasar S.A. Electric Drives. CRC Press, 2016, 640 p.
11. Malafeev S.I., Zakharov A.V. & Safronenkov Yu.A. Novaya seriya asinhronnyh chastotno-reguliruemyh dvigateley dlya karyernyh ekskavatorov [New series of asynchronous frequency-controlled motors for mining excavators]. *Elektrotekhnika – Electrical equipment*, 2019, No. 4, Pp. 7-12.
12. Zakharov A.V. Algoritmy rascheta skorostnyh harakteristik reguliruemyh asinhronnyh dvigateley i vozmozhnosti ih ispolzovaniya v zadachah energeticheskogo analiza [Algorithms for calculating the speed characteristics of adjustable asynchronous motors and the possibility of their use in the tasks of energy analysis]. *Elektrotekhnika – Electrical equipment*, 2015, No. 3, Pp. 28-34.