

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.232.8.004(075.8)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-185-193>

## Моделирование системы управления электроприводом подъема экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях

© А.В. Сорокин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Основным средством механизации горных работ при вскрыше угольных месторождений в регионах Сибири являются шагающие экскаваторы. Надежность функционирования и производительность вскрышных экскаваторов-драглайнов определяют эффективность работы горных предприятий. Проведенные исследования показали, что большой процент выхода из строя механического оборудования угольных разрезов связан с поломками экскаваторов-драглайнов. Ограничение динамических нагрузок в кинематических элементах привода подъема драглайна ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях повышает эксплуатационную надежность. Был проведен анализ отказов механического оборудования экскаваторов ЭШ 20.90. Большая часть поломок горного оборудования связана с выходом из строя тяговых и подъемных механизмов, что показала обработка статистической информации. Количественное проявление отказов драглайнов, работающих в регионах Сибири, продемонстрировало, что необходимо снижать уровень нагрузки на кинематические узлы механической конструкции в зимние месяцы года для повышения их надежности. Также наиболее критичными являются осенние и весенние месяцы, имеющие наибольший градиент суточных температур. В ходе работы была исследована замкнутая система управления электроприводом подъема, реализованная по традиционному принципу. Моделирование показало недопустимый уровень динамических нагрузок, возникающих в кинематической схеме экскаватора, эксплуатирующегося при низких температурах. Разработана система управления привода подъема экскаватора ЭШ 20.90 с управлением момента двигателя в зависимости от скорости и стабилизацией постоянной мощности привода. Результаты исследований показали, что динамические напряжения в механической конструкции экскаватора, приводящие к разрушениям, существенно уменьшаются. Применение предлагаемой системы управления приводом подъема повышает эксплуатационную надежность оборудования. Также обоснована целесообразность применения предлагаемой системы управления для привода подъема экскаваторов-драглайнов.

**Ключевые слова:** система управления, электропривод, экскаватор, экскаватор-драглайн, снижение динамических нагрузок, ЭШ 20.90

**Информация о статье:** Дата поступления 2 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 8 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Сорокин А.В. Моделирование системы управления электроприводом подъема экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 185–193. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-185-193.

## Modeling a control system for the lifting drive of ESH 20.90 excavators operating in arduous mining conditions

© Alexander V. Sorokin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** Walking excavators (ESH) are the main mechanization means when developing coal fields in the regions of Siberia. The operational reliability and in-use performance of overburden dragline excavators determine the mining enterprises' capacity. The previous studies show that a large percentage of the failures of the mechanical equipment used in opencast mining is connected with the draglines. Reduction of the dynamic load in the kinematic elements of the ESH 20.90 lifting drive increases the operational reliability of the excavators operating in arduous conditions. The statistical analysis has shown that most of the excavators' breakdowns are connected with the

failures of their traction and lifting mechanisms. Therefore, to increase the draglines' reliability, it is necessary to limit the load on the kinematic elements of the mechanical structure in the periods of the year with a significant temperature gradient. For this purpose, a standard closed-loop control system of the lifting electric drive has been modelled. The modelling has shown an unacceptable level of the dynamic loads arising in the kinematic elements of the excavators operating at low temperatures. As a result, an advanced lifting drive control system for the ESH 20.90 excavator has been developed. The system allows to control the engine torque by the speed, and to stabilize the sustained power of the drive. The study has shown that the suggested system significantly reduces the dynamic stress in the mechanical elements and therefore, increases the excavator's operational reliability. The application of the developed control system for the lifting drives of dragline excavators has been substantiated.

**Keywords:** control system, electric drive, excavator, dragline, dynamic load reduction, ESH 20.90

**Information about the article:** Received April 2, 2019; accepted for publication May 8, 2019; available online June 27, 2019.

**For citation:** Sorokin A.V. Modeling a control system for the lifting drive of ESH 20.90 excavators operating in arduous mining conditions. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya sekcii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 2, pp.185–193. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-185-193.

### **Введение**

При разработке месторождений угля в регионах Сибири основным средством механизации работ являются шагающие экскаваторы. Надежность функционирования и производительность вскрышных экскаваторов-драглайнов определяет эффективность работы горных предприятий. Проведенные исследования показали, что 50–70 % отказов выхода из строя механического оборудования угольных разрезов связано с поломками экскаваторов-драглайнов [1–3]. Поэтому разработка системы управления экскаватора, повышающая эксплуатационную надежность, является актуальной задачей.

В работе [4] был предложен способ управления электроприводом постоянного тока одноковшового экскаватора, а также устройство для его осуществления. Проведенные исследования данного способа [5] показали его эффективность для снижения динамических нагрузок в металлоконструкциях экскаватора ЭКГ-15. Возможности применения данного способа управления на экскаваторах-драглайнах были отражены в работах [6–10] на примере привода тяги ЭШ 20.90. Данная работа посвящена использованию предлагаемого способа для системы управления электроприводом подъема

экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях.

### **Материал и методы исследования**

В исследовании применен статистический сбор и анализ информации по отказам механического оборудования разреза «Черемховуголь» ООО «Компания «ВостСибУголь»» за десять лет [11]. Обследованию подверглись шесть экскаваторов ЭШ 20.90. Большая часть поломок горного оборудования связана с выходом из строя тяговых и подъемных механизмов, что показала обработка статистической информации. Число поломок редукторов подъема и тяги экскаваторов ЭШ 20.90 в период с 2001 по 2010 г. представлено на рис. 1. Увеличение срока эксплуатации отрицательно сказывается на динамике поломок и приводит к возрастанию их количества, что является очевидным фактом, так как происходит постепенное исчерпание ресурса узлов.

Довольно часто после планового ремонта происходили повторные повреждения редукторов экскаваторов ЭШ 20.90. Было необходимо найти методы повышения эксплуатационной надежности механизмов экскаваторов. Встала задача выявить основные причины отказов оборудования. На основе проведения статистической обработки данных можно

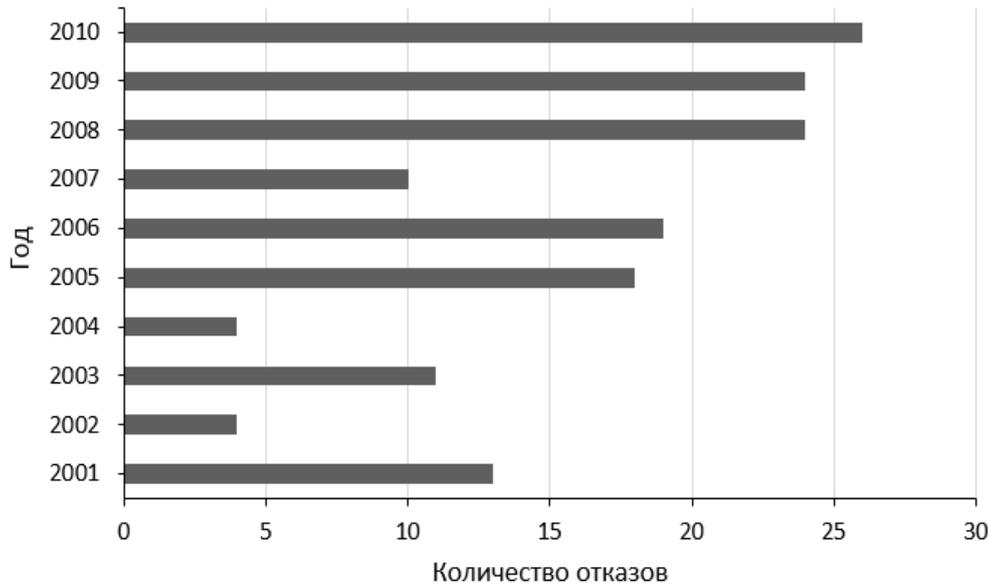


Рис. 1. Число отказов редукторов экскаваторов ЭШ 20.90 в период с 2001 по 2010 г.  
Fig. 1. Failure number for ESH 20.90 drive units, 2001–2010

получить распределение отказов механической части экскаваторов ЭШ 20.90 в течение года. На рис. 2 представлено распределение отказов редукторов и металлоконструкций экскаваторов по месяцам.

На рис. 2 изображены два основных потока отказов: первый приходится на позднюю осень, второй – на раннюю весну. Количественное проявление отказов драглайнов, работающих в регионах

Сибири, продемонстрировало, что необходимо снижать уровень нагрузки на кинематические узлы механической конструкции в зимние месяцы года для повышения их надежности. Также наиболее критичными являются осенние и весенние месяцы, имеющие наибольший градиент суточных температур. Объясняется это изменением физико-механических свойств сталей [2].

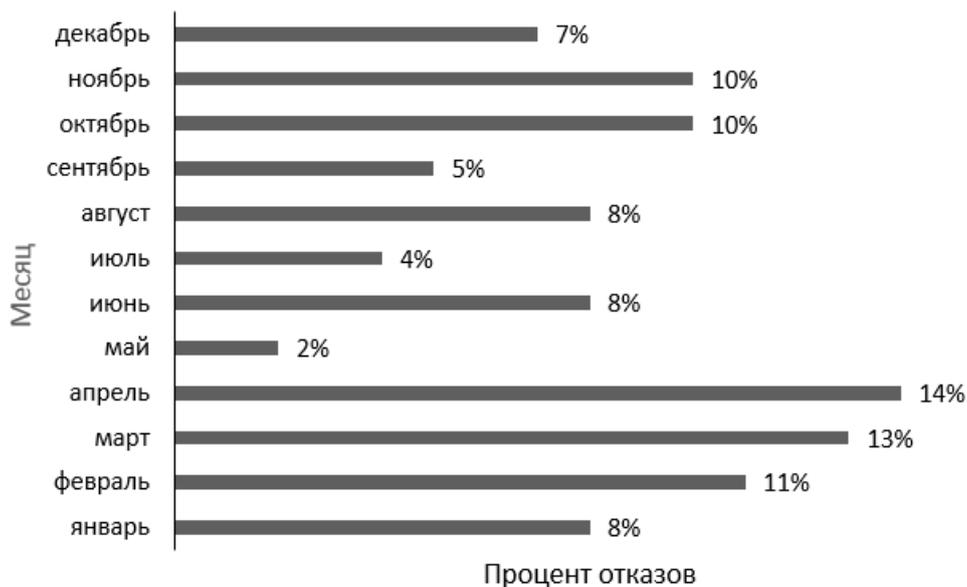


Рис. 2. Распределение отказов механической части экскаваторов ЭШ 20.90 в течение года  
Fig. 2. Distribution of mechanical failures for ESH 20.90 during the year

Неплановые ремонты, причиной которых является большое количество отказов редукторов главных приводов экскаваторов ЭШ 20.90, в 2,5–5 раз более длительны и затратны по сравнению с плановыми ремонтами. Анализ поломок драглайнов, работающих в регионах Сибири в тяжелых горнотехнических условиях, показал, что уровень нагрузки на кинематических узлах механической конструкции необходимо снижать не только в зимние месяцы, но и в осенние и весенние месяцы года для повышения их надежности [12–14].

Скорость износа узлов редукторов определяется режимами работы экскаватора. Детали редукторов подвержены усиленному износу в результате опасных нагрузок, возникающих в механизме привода подъема [6].

Предложенный в работе [5] способ управления электроприводом постоянного тока одноковшового экскаватора был проверен на системе двухканального управления главных приводов экскаватора ЭКГ-15. Было подтверждено, что изменение режима работы привода экскаватора в зависимости от воздействия неблагоприятных факторов внешней среды позволит снизить уровень динамических нагрузок и за счет этого уменьшить преждевременный износ оборудования экскаватора. Проведено исследование возможности применения данного способа управления на экскаваторах-драглайнах. В источниках [7, 11] была исследована система управления электроприводом тяги экскаватора ЭШ 20.90 в тяжелых горнотехнических условиях. В данной работе выполняется проверка возможности организации системы управления привода подъема по тому же принципу.

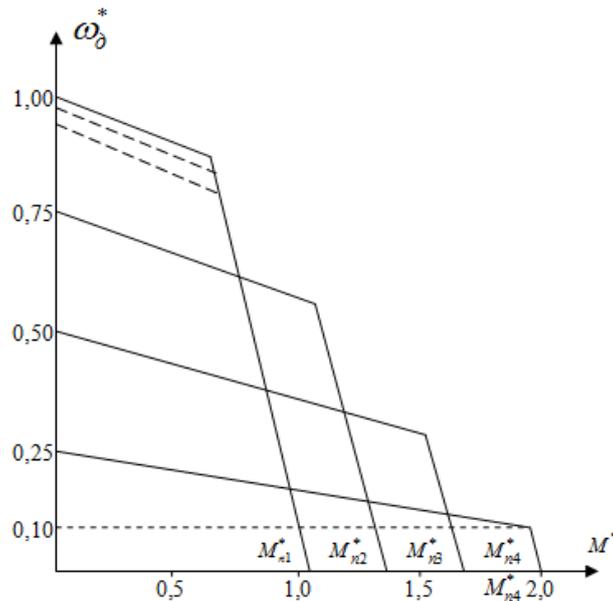
Система управления электроприводом экскаватора основана на изменении задания скорости в соответствии с технологией экскавации и одновременном изменении магнитного потока возбуждения

двигателя. Данное управление учитывает ветер и температуру окружающей среды. Система управления регулирует запас кинетической энергии в механической части экскаватора, что дает возможность повышать надежность узлов путем снижения динамических нагрузок.

Регулирование момента двигателя привода подъема экскаватора ЭШ 20.90 изменением возбуждения одновременно с изменением задания скорости позволяет сформировать необходимые механические характеристики и обеспечить работу на малых скоростях с моментами, достаточными для эффективного функционирования. При данных режимах привод работает на скоростях ниже номинальной при работе на естественной механической характеристике и нагрузках, превышающих номинальные, что приводит к уменьшению динамических нагрузок, так как запас кинетической энергии оказывается меньше.

В период сезонной наладки система управления приводом подъема настраивается таким образом, чтобы формировались механические характеристики с ослабленным током возбуждения, представленные на рис. 3.

В начальный момент времени система управления устанавливает номинальный ток возбуждения двигателя привода подъема. В этом случае развиваемый двигателем момент – максимально возможный при работе на малых скоростях, что обеспечивает хорошие пусковые характеристики. При увеличении скорости возбуждение двигателя привода подъема уменьшается, что ведет к уменьшению момента двигателя. Момент двигателя составляет 0,85 от номинального на основной характеристике. Пуск привода подъема осуществляется с меньшими ускорениями, что ведет к меньшим динамическим нагрузкам. При ослаблении магнитного поля при работе на основной характеристике скорость двигателя оказывается ниже



**Рис. 3. Механические характеристики привода с системой двухканального управления, представленные в относительных единицах**  
**Fig. 3. Mechanical characteristics of the drive with a dual-channel control system, in relative units**

номинальной. Аварийный режим стопорения начинается при пониженных нагрузках и скоростях, что определяет меньший запас кинетической энергии и снижает динамическую нагрузку, оказываемую на кинематику привода. Когда температура окружающей среды опускается ниже нуля градусов, система управления, учитывающая уровень отрицательной температуры и ветровую нагрузку, уменьшает скорость двигателя (пунктирные характеристики), что дополнительно снижает динамические нагрузки при работе экскаватора.

Работоспособность системы управления приводом подъема экскаватора ЭШ 20.90 была проверена с помощью компьютерного моделирования. Были исследованы электромеханические процессы, протекающие в элементах электропривода.

Электропривод подъема экскаватора имеет ряд особенностей, затрудняющих создание математической модели. Влияние на работу экскаватора оказывает также ряд случайных факторов, учет которых возможен только путем вероят-

ностных оценок. Поэтому модель системы управления экскаватора может быть построена только с некоторыми допущениями.

Данная работа посвящена определению динамических нагрузок в рабочем оборудовании экскаватора. Механические части экскаватора являются взаимосвязанной многомассовой системой, но в ходе рассмотрения работы отдельных приводов принимается допущение: многомассовые системы представляются изолированными двухмассовыми.

Математическая модель привода подъема имеет несколько существенных особенностей:

- изменение в процессе работы параметров механической части экскаватора, являющихся нелинейными;
- изменение магнитного поля двигателя постоянного тока, зависящего от скорости;
- формирование экскаваторной характеристики;
- учет уровня температуры окружающей среды и ветровой нагрузки.

Модель описана системой дифференциальных и алгебраических уравнений. Дифференциальные уравнения были записаны в нормальной форме Коши и решены относительно первых производных. Для моделирования использовалось специализированное программное обеспечение DifSis.

#### **Результаты исследования и их анализ**

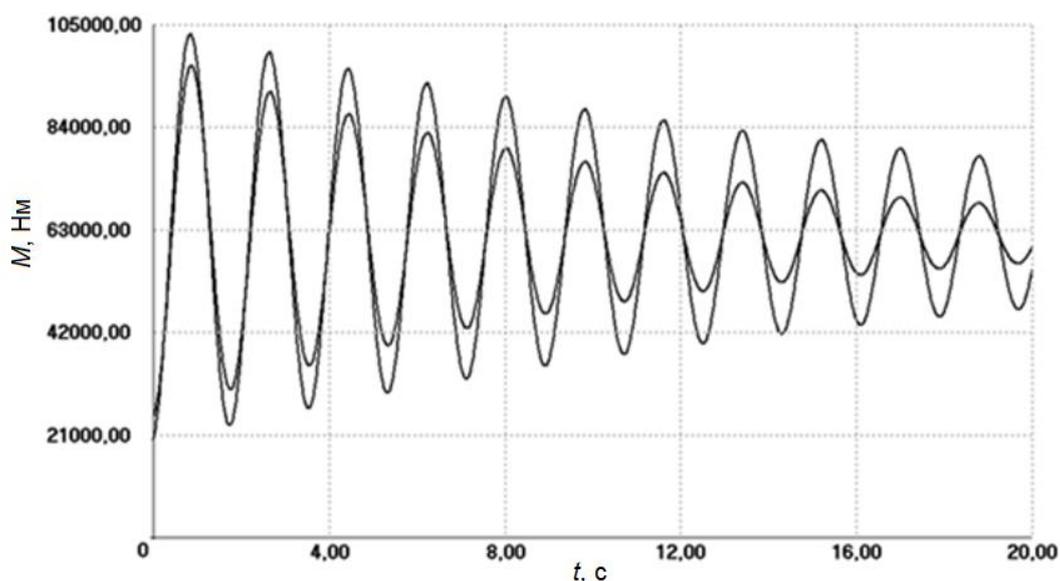
Внешние и управляющие воздействия определяют процессы, протекающие в механической подсистеме. Угловые скорости, положения и упругие моменты элементов системы определяют ее внутреннее состояние.

При учете упругостей в механической подсистеме появляются дополнительные внутренние связи. Адекватным описанием механической части привода тяги экскаватора ЭШ 20.90 является двухмассовое представление. Приведенный коэффициент жесткости между первой и второй массой для привода подъема  $C = 1500$  Нм/рад. Математическое описание электропривода подъема экскаватора было приведено в виде пространства состояний и описывалось

системой дифференциальных уравнений 13-го порядка с обычными ограничениями и допущениями, принятыми в электромеханических системах.

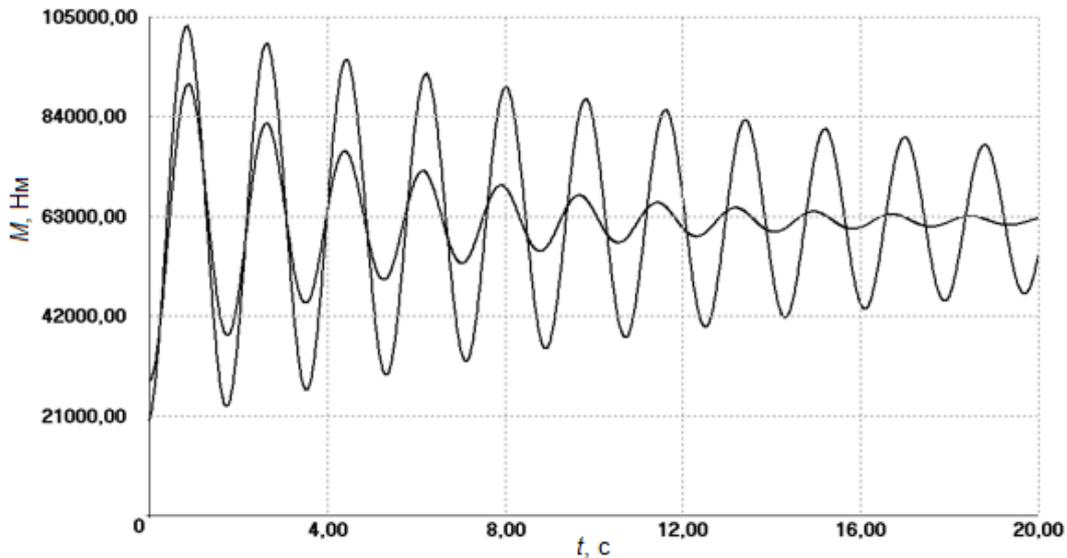
Проведенное исследование замкнутой системы управления электропривода подъема, реализованной по классическому принципу, отразило электромеханические процессы, протекающие в элементах экскаватора. Полученные результаты совпали с реальным обследованием экскаватора ЭШ 20.90 разреза «Черемховуголь», что подтвердило адекватность модели.

На рис. 4 и 5 представлен переходной процесс упругого момента привода подъема. В данном режиме происходит процесс увеличения нагрузки при заданной скорости. Данный процесс характеризует обмен энергии в упругих элементах кинематической части привода. Внешняя кривая характеризует процессы, протекающие в приводе с номинальным магнитным потоком двигателя (традиционная система управления), вторая кривая – процессы в приводе с ослабленным магнитным потоком, равным 75 и 50 % от номинального соответственно.



**Рис. 4. Упругий момент привода подъема в режиме наброса нагрузки при установившейся скорости с ослаблением магнитного потока до 75 % от номинального**

**Fig. 4. Moment of elasticity of the lifting drive in the mode of load surge at a steady speed, with the magnetic flux attenuation to 75 % of nominal**



**Рис. 5. Упругий момент привода подъема в режиме наброса нагрузки при установившейся скорости с ослаблением магнитного потока до 50 % от номинального**  
**Fig. 5. Moment of elasticity of the lifting drive in the mode of load surge at a steady speed, with the magnetic flux attenuation to 50 % of nominal**

Как видно из рисунков, динамический момент имеет колебательный характер с наложенными вынужденными колебаниями, обусловленными двухмассовой системой кинематической схемы электропривода. Он принимает опасное значение, которое может привести к разрушению редуктора привода подъема.

#### **Обсуждение результатов**

Проведенные исследования подтвердили предположение о снижении динамических нагрузок в кинематической части привода подъема экскаватора ЭШ 20.90 при ограничении мощности двигателя в осенний, весенний и зимний периоды. Применение предлагаемой системы управления приводом предъема повышает эксплуатационную надежность оборудования.

Хотя длительность цикла экскавации несколько увеличивается, за счет сокращения простоев оборудования, вызванных внеплановыми ремонтами, годовая производительность остается неизменной.

#### **Заключение**

Функционирование экскаватора ЭШ 20.90 в тяжелых горнотехнических и климатических условиях предъявляет особые требования к системе управления основными приводами.

Разработанная система управления, ограничивающая динамические нагрузки в элементах электропривода подъема экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях, повышает эксплуатационную надежность, которая определяет общую эффективность работы горных предприятий.

#### **Библиографический список**

1. Шадрин А.И., Махно Д.Е., Авдеев А.Н., Макаров А.П. Хладноломкость и хладостойкость металлоконструкций горных машин в условиях Севера. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2010. 232 с.  
2. Макаров А.П., Красноштанов С.Ю. Хладноломкость и хрупкость металлов и конструкций карьерных экскаваторов // Известия высших

учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 5. С. 66–69.

3. Махно Д.Е., Красноштанов С.Ю., Ишков А.М., Викулов М.А. Технология и техника горных предприятий Севера. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. 216 с.

4. Пат. № 2255184, Российская Федерация, МКИ Е 02 F9/20, Н 02 Р 5/00. Способ управления электроприводом постоянного тока одноковшового экскаватора и устройство для его осуществления / С.С. Леоненко, Д.Е. Махно, А.В. Сорокин, А.С. Леоненко, М.В. Павлов. Заявл. 13.05.2004; опубл. 27.06.2005. Бюл. № 18.

5. Сорокин А.В. Двухканальная система управления приводов экскаваторов, эксплуатирующихся при низких температурах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 2 (42). С. 126–130.

6. Иов И.А., Сорокин А.В., Леоненко А.С. Снижение уровня динамических нагрузок в элементах редуктора привода тяги экскаваторов-драглайнов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 8 (91). С. 22–26.

7. Сорокин А.В. Иов И.А., Леоненко А.С. Исследование системы управления электроприводом тяги экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 7 (102). С. 91–96.

8. Kuznetsov N.K., Makhno D.E., Iov I.A. Damping elastic oscillations of digging mechanism // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87 (2). [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/2/022011/pdf> (17.05.2019).

9. Кузнецов Н.К., Иов И.А., Иов А.А. Разработка электромеханической модели механизма тяги шагающего экскаватора // Вестник Иркут-

ского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11. С. 53–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-11-53-66.

10. Kuznetsov N.K., Iov I.A., Iov A.A. Investigation of dynamics of excavator digging mechanism with additional drive // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 193 (3) [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/194/3/032014/pdf> (17.05.2019).

11. Иов И.А. Исследование надежности редукторов шагающих экскаваторов ЭШ 20.90 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 5 (88). С. 29–33.

12. Broido V.L., Krasnoshtanov S.U. Improvement of operation stability of crucial parts and constructions when repairing dredges and other mining machines exploited in conditions of North // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327 [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/3/032012/pdf> (17.05.2019).

13. Пат. № 152922, Российская Федерация, МПК E02F9/20. Устройство управления тяговой лебедкой экскаватора-драглайна / Е.А. Дмитриев, М.В. Корняков, А.И. Найденев, С.Ю. Красноштанов. Заявл. 09.09.2014; опубл. 02.06.2015. Бюл. № 17.

14. Пат. № 167811, Российская Федерация, МПК G02B 21/06. Портативный цифровой микровизор / Е.О. Гурков, А.Н. Шевченко, М.В. Корняков, С.Ю. Красноштанов. Заявл. 28.04.2016; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1.

## References

1. Shadrin A.I., Makhno D.E., Avdeev A.N., Makarov A.P. *Khladnolomkost' i khladostoičnost' metallokonstruktsii gornykh mashin v usloviyakh Severa* [Cold brittleness and cold resistance of mining machines' steel structures in the conditions of the North]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2010, 232 p. (In Russ.).

2. Makarov A.P., Krasnoshtanov S.Yu. Cold brittleness and brittleness of metals and structures of mining excavators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2010, no. 5, pp. 66–69. (In Russ.).

3. Makhno D.E., Krasnoshtanov S.Yu., Ishkov A.M., Vikulov M.A. *Tekhnologiya i tekhnika gornykh predpriyatii Severa* [Technology and equipment of mining enterprises of the North]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2015, 216 p. (In Russ.).

4. Leonenko S.S., Makhno D.E., Sorokin A.V., Leonenko A.S., Pavlov M.V. *Sposob upravleniya elektroprivodom postoyannogo toka odnokovshovogo ekskavatora i ustroystvo dlya ego*

*osushchestvleniya* [Control method and control device for DC electric drive of single-bucket excavator]. Patent RF, no. 2255184, 2005. (In Russ.).

5. Sorokin A.V. Two-channel system to control excavator drives operating at low temperatures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2010, no. 2 (42), pp. 126–130. (In Russ.).

6. Iov I.A., Sorokin A.V., Leonenko A.S. Dynamic load reduction in dragline gear traction drive elements. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 8 (91), pp. 22–26. (In Russ.).

7. Sorokin A.V., Iov I.A., Leonenko A.S. Study of ЭШ 20.90 excavator traction electric drive control system at arduous mining conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 7 (102), pp. 91–96. (In Russ.).

8. Kuznetsov N.K., Makhno D.E., Iov I.A. Damping elastic oscillations of digging mechanism. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science, 2017, vol. 87 (2). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/2/022011/pdf> (accessed 17 May 2019).

9. Kuznetsov N.K., Iov I.A., Iov A.A. Developing electromechanical model of walking dragline traction mechanism. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 11, pp. 53–66. (In Russ.). DOI: 10.21285/1814-3520-2017-11-53-66.

10. Kuznetsov N.K., Iov I.A., Iov A.A. Investigation of dynamics of excavator digging mechanism with additional drive. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 193 (3). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/194/3/032014/pdf> (accessed 17 May 2019).

11. Iov I.A. Reliability study of walking dragline ESh 20.90 reduction gear. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 5 (88), pp. 29–33. (In Russ.).

12. Broido V.L., Krasnoshtanov S.U. Improvement of operation stability of crucial parts and constructions when repairing dredges and other mining machines exploited in conditions of North. IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 327. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/3/032012/pdf> (accessed 17 May 2019).

13. Dmitriev E.A., Korniyakov M.V., Naidenov A.I., Krasnoshtanov S.Yu. *Ustroistvo upravleniya tyagovoi lebedkoi ekskavatora-draglaina* [Traction winch control device for dragline excavator]. Patent RF, no. 152922, 2015. (In Russ.).

14. Gurkov E.O., Shevchenko A.N., Korniyakov M.V., Krasnoshtanov S.Yu. *Portativnyi tsifrovoy mikrovizor* [Portable digital microvizor]. Patent RF, no. 167811, 2017.

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Сорокин А.В. написал статью, имеют на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.  
Alexander V. Sorokin is the author of the article, holds the copyright and bears a sole responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of the article.

#### Сведения об авторе / Information about the author



##### **Сорокин Александр Васильевич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры горных машин и электромеханических систем,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: sorokinav@bgu.ru

##### **Alexander V. Sorokin,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor, Department of Mining Machines and Electromechanical Systems,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: sorokinav@bgu.ru