

Разработка имитационной модели торможения шахтной подъемной установки в системе Matlab

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-10-50-54>

ГЫЛЫМУЛЫ С.

Аспирант НИТУ «МИСИС»,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: m1606832@edu.misis.ru

ТИАГАЛИЕВА Ж.А.

Аспирант, НИТУ «МИСИС»,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: m1707439@edu.misis.ru

БЕЛЯНКИНА О.В.

Доцент НИТУ «МИСИС»,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: belyankina.ov@misis.ru

БЕЛЯЕВ А.М.

Аспирант НИТУ «МИСИС»,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: al.m.belyaev@ya.ru

Модернизация шахтных подъемных установок может быть реализована за счет внедрения резинотросовых канатов взамен традиционных стальных. Это улучшит эксплуатационные параметры рудничного подъема, уменьшит массивность подъемных машин и увеличит срок службы тяговых органов.

При этом существенно изменятся конструктивные параметры основных узлов подъемных установок. В данной работе приводится имитационная модель торможения шахтной подъемной установки, разработанная в программе Matlab. Она позволяет оценивать кинематические и силовые параметры при торможении подъемной машины, которые могут быть применены при проектировании новых подъемных установок.

Ключевые слова: горное дело, шахтная подъемная установка, резинотросовые канаты, моделирование, математическая модель, предохранительный тормоз, рудничный подъем.

Для цитирования: Разработка имитационной модели торможения шахтной подъемной установки в системе Matlab / С. Гылымұлы, Ж.А. Тиғалиева, О.В. Белянкина и др. // Уголь. 2022. № 10. С. 50-54. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-50-54.

ВВЕДЕНИЕ

Технология добычи полезных ископаемых развивается на основе углубления знаний в области горного дела: о состоянии горных пород [1], об эффективных способах добычи [2] с применением высокопроизводительных добычных комплексов [3, 4, 5] при повышении безопасности ведения горных работ [6] и за счет разработки и внедрения новых транспортных систем, стационарного и вспомогательного оборудования [7, 8]. При этом важным звеном транспорта полезных ископаемых на подземных горнодобывающих предприятиях являются шахтные подъемные установки. Они применяются для подъема полезного ископаемого, а также для доставки персонала шахты, оборудования, материалов и других грузов.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТОРМОЖЕНИЯ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

Выход из строя подъемной установки нарушает производственные технологические процессы горного предприятия, а также может привести к аварийным ситуациям и к несчастным случаям на производстве [9].

С момента начала эксплуатации на горных предприятиях первых подъемных установок выполнен большой объем исследований, направленных на повышение их эффективности и на улучшение технических характеристик как отдельных узлов, так и подъемных установок в целом.

Подъемная установка является сложным энергомеханическим комплексом, в котором перемещаются как сосредоточенные, так и распределенные массы, что предопределяет необходимость совершенствования их кинематического ре-

жима, режима управления подъемной машиной и выбора для этих целей энергоэффективного электропривода [10, 11, 12]. Повышение надежности и безопасности подъемных установок решается за счет внедрения современных систем контроля параметров, которые позволяют получать сведения для оценки остаточного ресурса отдельных узлов подъемных установок [13]. Аварийные ситуации на подъемных установках могут происходить при значительных динамических нагрузках, возникающих в переходных режимах. В связи с этим выбор рациональных параметров пуска и торможения подъемных машин с целью снижения динамических нагрузок остается актуальной научной задачей.

Повышение требуемой производительности на шахтном подъеме влечет необходимость комплексной модернизации подъемных установок. Одним из кардинальных решений в этом направлении развития горной техники является внедрение на подъемных установках ленточных тяговых органов взамен традиционных стальных канатов. В качестве наиболее подходящих ленточных тяговых органов рассматривались стальные ленты [10], конвейерные резинокросовые ленты, но наиболее вероятными для применения представляются резинокросовые канаты, разработанные специально для шахтного подъема и эффективно применяемые в качестве хвостовых на подъемных установках [14, 15].

Применение резинокросовых канатов на подъемных установках обеспечит повышение их производительности за счет увеличения грузоподъемности скипов при снижении массивности подъемных машин и энергопотребления. Внедрение резинокросовых канатов влечет изменение основных узлов подъемных установок, в том числе тормозных систем, обоснованию параметров которых посвящены работы ученых из РФ, Украины, Китая [16].

Из литературы известно, что для анализа динамических усилий в переходных режимах принято использовать многомассовые расчетные схемы, в которых сосредоточенные массы соединены упругими элементами, имитирующими тяговые органы [17, 18]. Для разработки модели торможения подъемной машины была принята расчетная схема двухконцевой подъемной установки, которой соответствует трехмассовая эквивалентная схема (рис. 1).

В расчетной схеме масса подъемной машины m_x и массы подъемных сосудов m_y, m_z соединены упругими звеньями (канатами), обладающими жесткостью c_y, c_z . На массу подъемной машины m_x действуют движущее $F_{дв}$ и тормозное F_T усилия.

Движение подъемной системы на основании расчетной схемы и с учетом ее эквивалентной схемы может быть описано дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} \left(m_x + \frac{m_{TOz}}{3} + \frac{m_{TOy}}{3}\right)\ddot{x} + \frac{m_{TOz}}{6}\ddot{z} + \frac{m_{TOz}}{6}\ddot{y} + c_z(x-z) + c_y(x-y) = F_{дв} - F_T \\ \left(m_z + \frac{m_{TOz}}{3}\right)\ddot{y} + \frac{m_{TOz}}{6}\ddot{x} + c_z(z-x) = 0 \\ \left(m_z + \frac{m_{TOy}}{3}\right)\ddot{z} + \frac{m_{TOy}}{6}\ddot{x} + c_z(y-x) = 0 \end{cases}, (1)$$

где m_{TOz} и m_{TOy} – массы набегающей и сбегающей ветвей тягового органа.

$$m_{TOz} = p \cdot l_z; \quad m_{TOy} = p \cdot l_y, \quad (2)$$

где p – масса тягового органа, l_z, l_y – длина поднимающейся и опускающейся ветвей тягового органа.

При составлении дифференциальных уравнений движения подъемной установки приняты допущения: подъемные сосуды свободно подвешены на тяговом органе, а сопротивления движению в шахтных проводниках и сопротивления воздуха не учитываются; вязкость в канатах принимается равной 0, а их длина считается постоянной.

Посредством перемещений x, y, z сосредоточенных масс подъемной системы можно определить деформации u_z и u_y поднимаемой и опускаемой ветвей тягового органа соответственно:

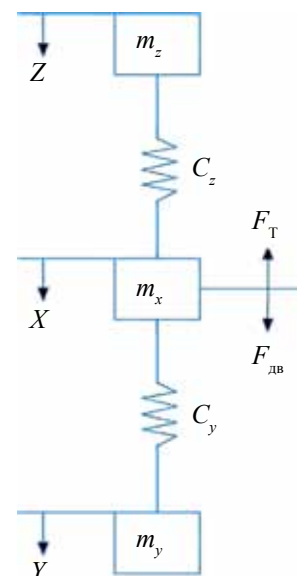
$$\begin{cases} u_z = x - z \\ u_y = x - y, \end{cases} \quad (3)$$

После преобразования, системы уравнений (1) приведем в удобную для моделирования форму:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{\frac{m_{TOz}}{6}\ddot{u}_z - \frac{m_{TOz}}{6}\ddot{u}_y - c_z u_z + c_y u_y + F_{дв} - F_T}{\left(m_x + \frac{m_{TOz}}{2} + \frac{m_{TOy}}{2}\right)} \\ \ddot{u}_z = \frac{-c_z u_z + \left(m_z + \frac{m_{TOz}}{2}\right)\ddot{x}}{m_z + \frac{m_{TOz}}{3}} \\ \ddot{u}_y = \frac{-c_y u_y - \left(m_y + \frac{m_{TOy}}{2}\right)\ddot{x}}{m_y + \frac{m_{TOy}}{3}} \end{cases}, (4)$$

Решение уравнений (4) можно осуществлять при помощи численных методов в современных математических пакетах программ [17, 18]. Часто для этих целей прини-

Рис. 1. Эквивалентная схема подъемной установки с резинокросовым канатом
Picture 1. Design scheme of the mine hoist machine with a rubber cable



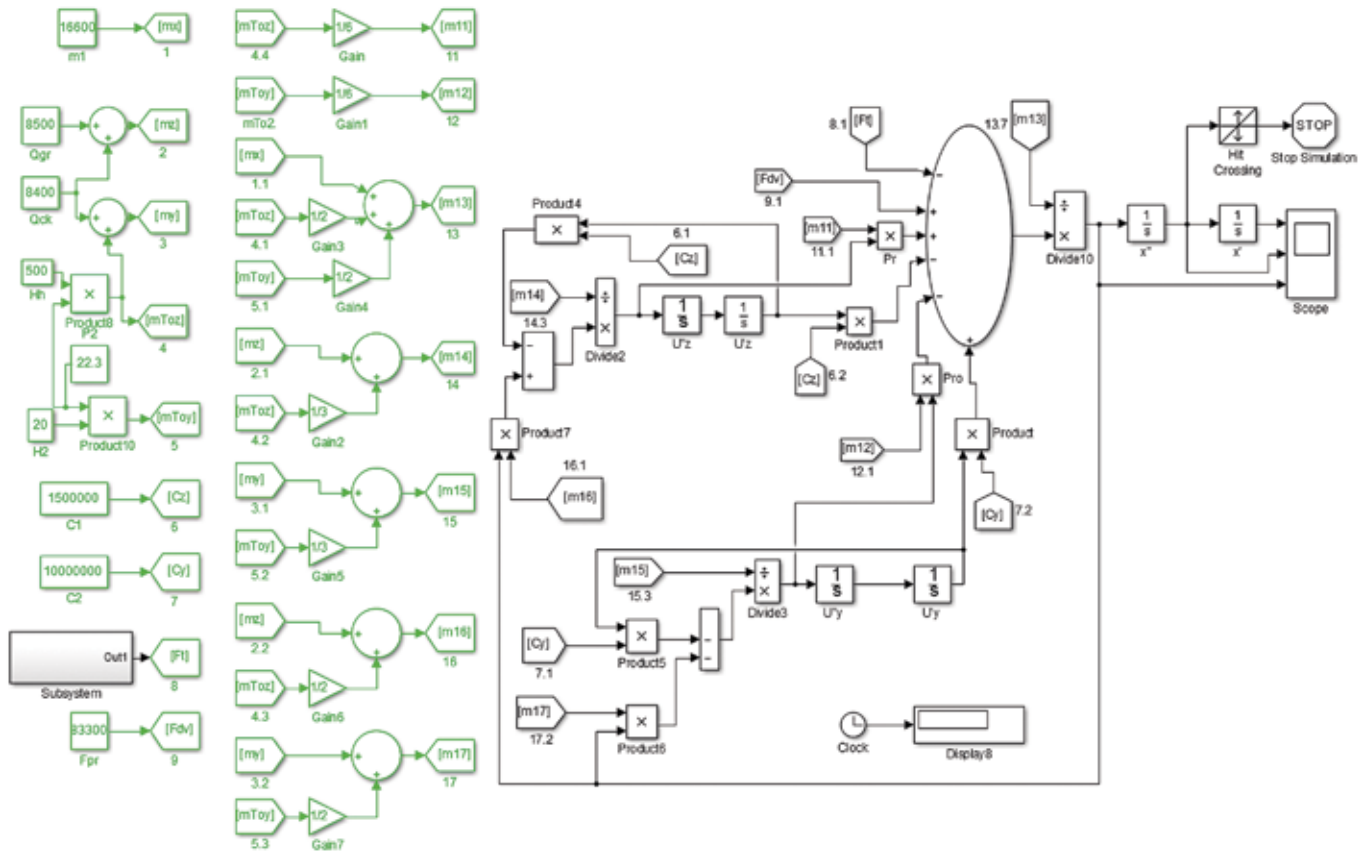


Рис. 2. Структурная модель подъемной системы
 Picture 2. Structural model of the hoist system

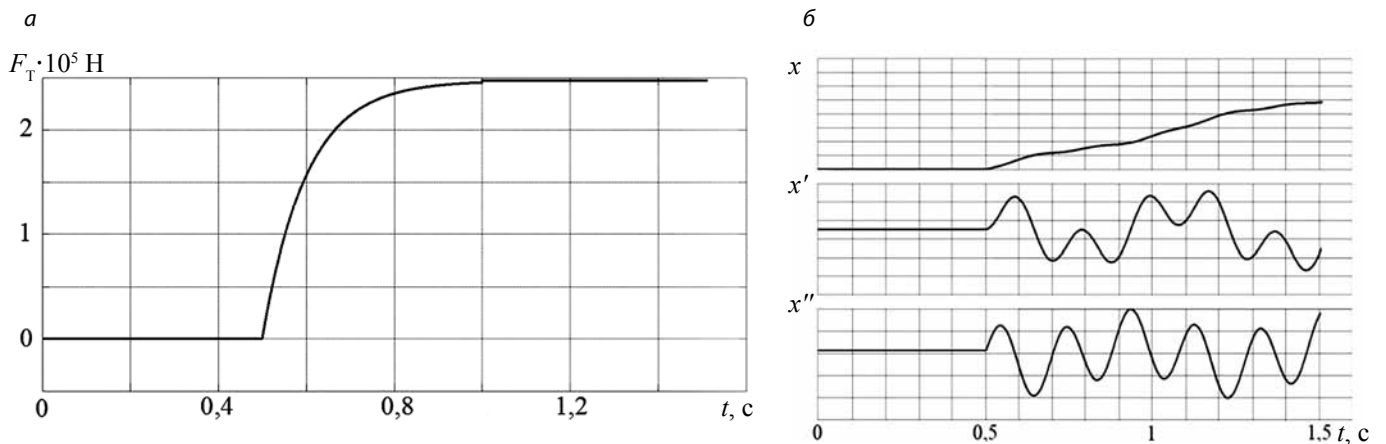


Рис. 3. График нарастания тормозного усилия F_m (а) и осциллограммы перемещений x , скорости \dot{x} и ускорений \ddot{x} при торможении подъемной машины (б)
 Picture 3. Graph of the increase in the braking force F_T (a) and oscillograms of displacements x , velocity \dot{x} and accelerations \ddot{x} during braking of the hoist machine (б)

мают аналоговые структурные схемы в модуле Simulink среды моделирования Matlab. С применением этого ресурса с учетом уравнений (4) была составлена структурная модель, имитирующая движение подъемной системы во время торможения (рис. 2).

Осуществление предохранительного торможения включает три основных этапа: холостой ход тормозной колодки, нарастание тормозного усилия и этап с установившим-

ся тормозным усилием. В соответствии с этим тормозная характеристика в функции от времени $F_m(t)$ имеет вид (рис. 3, а). В модели он описывается блоком «subsystem».

Объединение блоков рассматриваемой модели и выполнение моделирования процесса торможения позволили получить осциллограммы кинематических параметров подъемной машины (см. рис. 3, б). На осциллограммах видны колебательные процессы, возникающие на приво-

дном шкиве за период предохранительного торможения вплоть до его полной остановки.

На основании разработанной структурной модели можно осуществлять оценку максимальных динамических усилий, возникающих в механических узлах подъемных установок во время предохранительного торможения. Это позволит более точно оценивать нагрузки на элементы тормозной системы подъемной машины: диски, колодки, тормозные постаменты, с помощью чего можно обосновать их рациональные параметры при использовании различных тяговых органов и в широком диапазоне эксплуатационных и режимных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена математическая модель, описывающая эксплуатационные режимы шахтной подъемной установки, в том числе режим предохранительного торможения. На основании данной модели в модуле Simulink математической среды Matlab разработана аналоговая структурная схема, при помощи которой можно моделировать процесс механического торможения подъемной машины при ее различных конструктивных, эксплуатационных и режимных параметрах, что позволяет оценить кинематические и силовые параметры предохранительного торможения шахтных подъемных установок. Результаты моделирования могут применяться при проектировании новых подъемных установок с ленточными тяговыми органами и для конструирования их основных узлов: подъемных машин, тормозных систем, подвесных устройств.

Список литературы

1. Вознесенский А.С., Кидима-Мбомби Л.К. Формирование синтетических структур и текстур горных пород при их моделировании в среде COMSOL Multiphysics // Горные науки и технологии. 2021. Т. 6. № 2. С. 65-72.
2. Формализация процесса выбора технологий отработки месторождений полезных ископаемых / П.А. Каунг, В.В. Зотов, М.А. Гаджиев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 2. С. 124-138.
3. Gubanov S., Petsyk A., Komissarov A. Simulation of stresses and contact surface of disk rolling cutters with the rock when sinking in mixed soils / E3S Web of Conferences: 18, Ekaterinburg, 2-11 april 2020. Ekaterinburg, 2020. P. 03008.
4. Муминов Р.О., Райханова Г.Е., Кузиев Д.А. Повышение надежности и долговечности буровых станков за счет понижения динамических нагрузок // Уголь. 2021. № 5. С. 32-36. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-32-36.
5. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов для безвзрывной послонной выемки прочных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 2. С. 123-128.
6. Кобылкин С.С., Тимченко А.Н., Кобылкин А.С. Применение компьютерного моделирования при выборе параметров работы пылеотсоса, встраиваемого в проходческие комбайны // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 3. С. 21-27.
7. Мельник В.В., Сухарьков И.Н., Хажиев В.А. Формирование конкурентоспособного технического сервиса обеспечения работоспособности горнотранспортного оборудования // Уголь. 2019. № 6. С. 10-14. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-6-10-14.
8. Нусс С.В., Трифанов М.Г. Организация постоянного контроля за эксплуатационными параметрами ключевых элементов шахтных подъемных установок // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. 2019. № 1. С. 32-36.
9. Risk-forming dynamic processes in units of mine hoists of vertical shafts / S.R. Ilin, V.I. Samusya, D.L. Kolosov et al. // Науковий вісник національно-гогірничого університету. 2018. № 5. С. 64-71.
10. Control system for electrohydraulic drive of a mobile sinking hoisting plant / A. Kurochkin, V. Vagin, A. Karpesh et al. / MATEC web of conferences: 2018 international conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol, 10-14 september 2018. Sevastopol: EDP Sciences. 2018. P. 02009.
11. Пути повышения энергетической эффективности подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт / С.С. Кубрин, А.А. Мосиевский, И.М. Загоршменный и др. // Уголь. 2022. № 2. С. 4-9. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-4-9.
12. Reshetnyak S., Maksimenko Yu., Zakharova A. Investigation of the electric drive system of the lifting unit with parallel coordinate correction / E3S Web of Conferences: 11th International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, 19-21 october, 2021. Kemerovo: EDP Sciences. 2021. P. 03028.
13. Опыт эксплуатации шахтных подъемных установок, оснащенных системами непрерывного контроля / Г.Д. Трифанов, А.А. Князев, А.П. Филатов и др. // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 6. С. 52-58.
14. Перекутнев В.Е., Зотов В.В. Моделирование приводных шкивов подъемных установок с резинотросовыми канатами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 6. С. 105-114.
15. Перекутнев В.Е., Зотов В.В. Сравнительная оценка резинотросовых канатов для рудничных вертикальных подъемных установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 7. С. 85-93.
16. Цифровая модель тормозного постамент рудничной подъемной установки с резинотросовым тяговым органом / С. Гылымұлы, Л.И. Кантович, Ж.А. Тиагалиева и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 6. С. 62-76.
17. Дмитриева В.В., Собянин А.А., Сизин П.Е. Моделирование плавного пуска для асинхронного двигателя ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 6. С. 77-92.
18. Дмитриева В.В., Авхадиев И.Ф., Сизин П.Е. Использование современных программно-технических комплексов для автоматизации конвейерных линий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 2. С. 150-163.

Original Paper

UDC 622.673 © S. Gylymuly, Zh.A. Tiagalieva, O.V. Belyankina, A.M. Belyaev, 2022
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 10, pp. 50-54
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-10-50-54>

Title**DEVELOPING A SIMULATION MODEL FOR BRAKING A MINE HOIST IN THE MATLAB SOFTWARE****Authors**

Gylymuly S.¹, Tiagalieva Zh.A.¹, Belyankina O.V.¹, Belyaev A.M.¹

¹ National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation

Authors information

Gylymuly S., Postgraduate, e-mail: m1606832@edu.misis.ru

Tiagalieva Zh.A., Postgraduate, e-mail: m1707439@edu.misis.ru

Belyankina O.V., Associate Professor, e-mail: belyankina.ov@misis.ru

Belyaev A.M., Postgraduate, e-mail: al.m.belyaev@ya.ru

Abstract

Upgrading of mine hoists can be achieved through introduction of the rubber and steel ropes to replace the traditional steel wire ropes. This will improve the operational parameters of the mine hoists, reduce the size of the hoisting machines and increase the service life of the traction devices.

At the same time, the design parameters of the main hoist components will change significantly. This paper presents a simulation model of braking a mine hoist that was developed in the Matlab software. It allows the estimation of kinematic and force parameters when braking the hoisting machine, which can be used in designing new hoisting units.

Keywords

Mining, Mine winder, Rubber and steel ropes, Simulation, Mathematical model, Safety brake, Mine hoist.

References

1. Voznesensky A.S. & Kidima-Mbombi L.K. Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics. *Gornye nauki i tekhnologii*, 2021, Vol. 6, (2), pp. 65–72. (In Russ.).
2. Kaung P.A., Zotov V.V., Gadzhiev M.A., Artemov S.I. & Gireev I.A. Formalization of selection procedure of mineral mining technologies. *Gornyj informatsionno-analyticheskij bulletin*, 2022, (2), pp. 124–138. (In Russ.).
3. Gubanov S., Petsyk A. & Komissarov A. Simulation of stresses and contact surface of disk rolling cutters with the rock when sinking in mixed soils. E3S Web of Conferences 18, Ekaterinburg, 2020, p. 03008.
4. Muminov R.O., Rayhanova G.E. & Kuziev D.A. Experimental research and analysis of a quarry drilling rig. *Ugol'*, 2021, (5), pp. 32–36. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2021-5-32-36](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-5-32-36).
5. Klement'eva I.N. & Kuziev D.A. Actual status and prospects for future development of surface miners, designed for forblastless lit-by-lit excavation of solid rock. *Gornyj informatsionno-analyticheskij bulletin*, 2019, (2), pp. 123–128. (In Russ.).
6. Kobylkin S.S., Timchenko A.N. & Kobylkin A.S. Use of computer simulation in the selection of operating parameters for the dust extractor built into the roadheader. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2021, (3), pp. 21–27. (In Russ.).
7. Melnik V.V., Sukharkov I.N. & Khazhiev V.A. Organization of competitive technical service of ensuring operability of the mining-transport equipment. *Ugol'*, 2019, (6), pp. 10–14. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2019-6-10-14](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-6-10-14).

8. Nuss S.V. & Trifanov M.G. Establishing monitoring of operational parameters of key elements of shaft hoisting installations. *Aktual'nye problem povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gornoshakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya*, 2019, (1), pp. 32–36. (In Russ.).

9. Ilin S.R., Samusya V.I., Kolosov D.L., Ilina I.S. & Ilina S.S. Risk-forming dynamic processes in units of mine hoists of vertical shafts. *Научковий вісник національно гозірничого університету*, 2018, (5), pp. 64–71.

10. Kurochkin A., Vagin V., Karpesh A. & Dyorina N. Control system for electrohydraulic drive of a mobile sinking hoisting plant. MATEC web of conferences: 2018 international conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol, EDP Sciences, 2018, P. 02009.

11. Kubrin S.S., Mosievsky A.A., Zakorshmeny I.M., Reshetnyak S.N. & Maksimenko Yu.M. Ways to improve the energy efficiency of underground electric networks of high-performance coal mines. *Ugol'*, 2022, (2), pp. 4–9. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2022-2-4-9](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-2-4-9).

12. Reshetnyak S., Maksimenko Yu. & Zakharova A. Investigation of the electric drive system of the lifting unit with parallel coordinate correction. E3S Web of Conferences: Vth International Innovative Mining Symposium, Kemerovo: EDP Sciences, 2021, P. 03028.

13. Trifanov G.D., Knyazev A.A., Filatov A.P. & Laschuk V.V. Operational experience of mine lifting installations equipped with continuous monitoring systems. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2019, (6), pp. 52–58. (In Russ.).

14. Perekutnev V.E. & Zotov V.V. Modeling drive wheels of hoisting machines with rubber cables. *Gornyj informatsionno-analyticheskij bulletin*, 2020, (6), pp. 105–114. (In Russ.).

15. Perekutnev V.E. & Zotov V.V. Comparative assessment of rubber steel cables for vertical mine hoists. *Gornyj informatsionno-analyticheskij bulletin*, 2020, (7), pp. 85–93. (In Russ.).

16. Gylymuly S., Kantovich L.I., Tiagalieva Z.A. & Belyankina O.V. Digital model of brake plinth of mine hoist with rubber cable pulling equipment. *Gornyj informatsionno-analyticheskij bulletin*, 2022, (6), pp. 62–76. (In Russ.).

17. Dmitrieva V.V., Sobyanyin A.A. & Sizin P.E. Modeling soft start of belt conveyor induction motor. *Gornyj informatsionno-analyticheskij bulletin*, 2022, (6), pp. 77–92. (In Russ.).

18. Dmitrieva V.V., Avkhadiev I.F. & Sizin P.E. Use of advance hardware/software in multiple conveyor system automation. *Gornyj informatsionno-analyticheskij bulletin*, 2021, (2), pp. 150–163. (In Russ.).

For citation

Gylymuly S., Tiagalieva Zh.A., Belyankina O.V. & Belyaev A.M. Developing a simulation model for braking a mine hoist in the Matlab software. *Ugol'*, 2022, (10), pp. 50–54. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2022-10-50-54](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-10-50-54).

Paper info

Received June 28, 2022

Reviewed July 20, 2022

Accepted September 26, 2022