УДК 62-7;622.6;629.08 DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-84-91

Мониторинг технического состояния рудничных установок главного подъема

Залазинский А. Г.[1]
[1] Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: zalaz@list.ru

Реферат

Введение. *Обеспечение безопасной эксплуатации скиповых и клетевых подъемных установок входит в число важнейших задач теоретических и экспериментальных исследований в области горной механики. Для достижения указанной цели необходимо прогнозное (проактивное) обслуживание. Оно заключается в выполнении необходимых ремонтных воздействий по снижению скорости развития или предотвращению неисправностей, выявленных на основе сведений о фактическом техническом состоянии оборудования. Проактивное обслуживание базируется на мониторинге технического состояния объекта, оно наиболее эффективно в плане предотвращения отказов и наименее затратно.*

Методика проведения исследований. *Важнейшим физико-механическим свойством компонентов подъемных установок с точки зрения надежности их функционирования является выносливость ответственных деталей и металлоконструкций. Для реализации системы мониторинга необходимы датчики, позволяющие получить наиболее достоверную информацию для прогнозирования изменения физико-механических свойств нагруженных элементов. Задача оценки технического состояния по действующим в материале напряжениям осложняется циклическим характером нагрузки. Недостаток широко используемого способа определения напряжений измерением деформации тензометром с последующим расчетом состоит в том, что напряжения получаются косвенным путем, с неизбежными погрешностями. К ошибке, связанной с вычислением значений по аналитическим зависимостям, добавляется ошибка, возникающая из-за невозможности учета действительного характера нагружения.*

Результаты. *В системе мониторинга целесообразно применять пленочные датчики деформации интегрального типа, позволяющие прогнозировать разрушение детали за счет выявления микротрещин на ее поверхности.*

Вывод. *Нагрузка на объекты мониторинга является результатом сложения колебаний разной частоты и амплитуды, и пленочные датчики деформации интегрального типа дадут возможность получить наиболее достоверную информацию о состоянии ответственных деталей механизмов и металлоконструкций.*

Ключевые слова: *главный подъем; техническое состояние; мониторинг; проактивное обслуживание; надежность; датчик интегрального типа.*

Введение. Обеспечение безопасной эксплуатации скиповых и клетевых подъемных установок входит в число важнейших задач теоретических и экспериментальных исследований в области горной механики [1–7]. Современные рудничные установки главного подъема включают ряд средств, позволяющих предотвратить перегрузки энергетических и механических компонентов, а их техническое обслуживание предусматривает осмотр и проверку состояния канатов, подвесных, прицепных и парашютных устройств, металлоконструкций и т. д. [8, 9].

В публикации [10] изложена концепция, в соответствии с которой стратегия технического обслуживания технологического оборудования включает следующие разновидности:

– *аварийное обслуживание* (*reactive maintenance*), т. е. проведение ремонта после отказа;

– *превентивное*, или планово-предупредительное *обслуживание* (*preventive maintenance*), основанное на техническом обслуживании оборудования до возникновения поломки по специальному регламенту;

– *обслуживание по состоянию* (*condition based maintenance*), подразумевающее обслуживание составных частей оборудования с наибольшим износом и риском аварии в определенный момент времени;

– *прогнозное* (*проактивное*) *обслуживание* (*predictive maintenance*), которое заключается в выполнении необходимых ремонтных воздействий по снижению скорости развития или устранению неисправностей, выявленных на основе сведений о фактическом техническом состоянии оборудования.

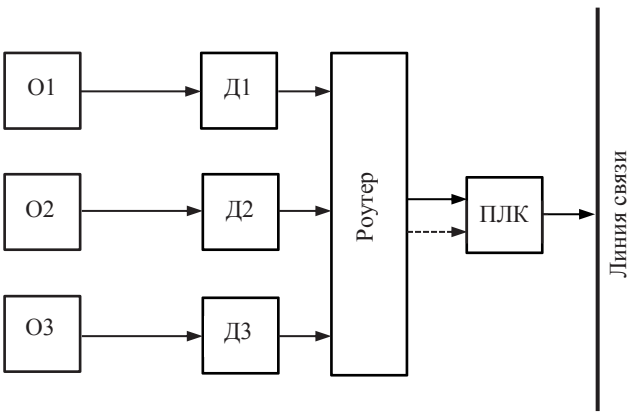

Рисунок 1. Нижний и средний уровни системы мониторинга
Figure 1. Lower and middle levels of the monitoring system

Анализ перечисленных разновидностей показал, что проактивное обслуживание наиболее эффективно в плане предотвращения отказов и наименее затратно, в связи с чем именно ему следует уделить пристальное внимание. Проактивное обслуживание базируется на мониторинге технического состояния оборудования, для которого, в свою очередь, необходимо внедрение новых датчиков, систем анализа собираемых данных и оперативного принятия решений [11].

Методика проведения исследований. Развитие аппаратуры получения, передачи и обработки информации достигло уровня, который позволяет реализовать единую систему мониторинга технического состояния установки главного подъема.

Важнейшими физико-механическими свойствами компонентов подъемных установок с точки зрения надежности их функционирования являются выносливость ответственных деталей и металлоконструкций, а также износостойкость футеровки барабанов и копровых шкивов. Контролю указанных свойств целесообразно уделить особое внимание, а в структуре системы мониторинга предусмотреть соответствующую подсистему.

Объекты мониторинга технического состояния делятся на две группы:

– расположенные на горизонтах (не перемещающиеся относительно ствола, или неподвижные);

– перемещающиеся вместе с сосудом или входящие в его металлоконструкцию (подвижные).

Пример организации нижнего и среднего уровней системы мониторинга показан на рис. 1.

Информация о состоянии неподвижных объектов О1…О3 (число объектов принято произвольно) от датчиков Д1…Д3 нижнего уровня поступает в маршрутизатор (роутер), а от него – в программируемый логический контроллер (ПЛК), т. е. на средний уровень системы. В соответствии с заложенной в него программой ПЛК анализирует поступившую информацию и результаты анализа по линии связи локальной сети отправляет на центральный диспетчерский пункт. Применительно к неподвижным объектам используется проводная связь роутера с ПЛК (сплошная стрелка), к подвижным – беспроводная (пунктирная стрелка). В настоящее время аппаратные средства управления и связи весьма многообразны, поэтому конкретный вариант системы мониторинга определяет разработчик.

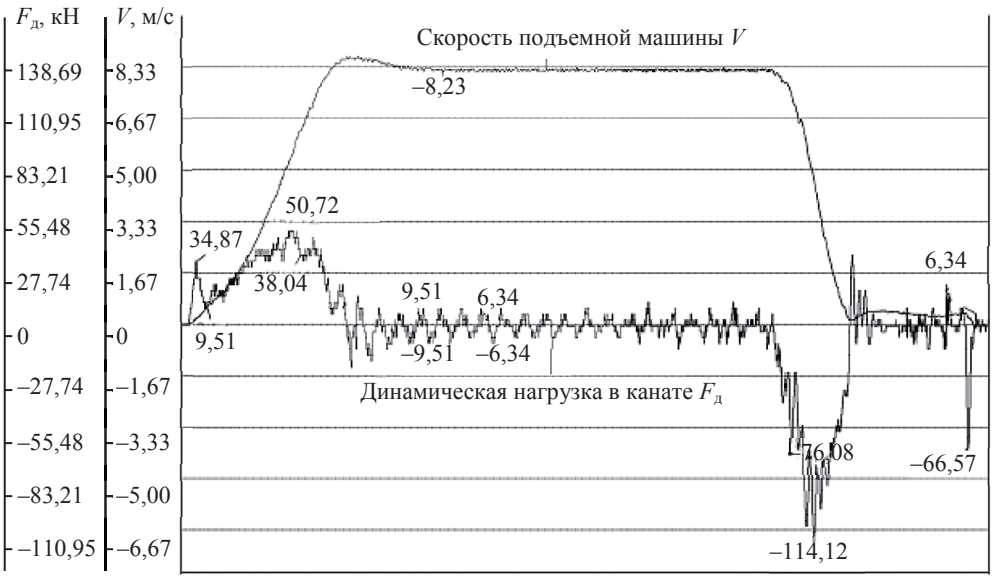

Рисунок 2. Динамические нагрузки в канате установки главного подъема
Figure 2. Dynamic loads in the rope of the main hoist installation

Задача первостепенной важности, которая должна быть решена на стадии проектирования, состоит в выборе информационных устройств – датчиков. Выбор осуществляется в зависимости от подлежащей измерению характеристики состояния объекта.

Результаты. Выносливость элемента, воспринимающего переменные нагрузки, может быть оценена как экспериментально-теоретическим путем на основе расчета *запаса усталостной прочности* и сравнения его с допускаемой величиной, так и непосредственной регистрацией *изменений в структуре материала*, произошедших за установленный период времени.

Принятая в сопротивлении материалов методика проверки по запасу усталостной прочности детали в случае ее нагружения циклическими нормальными и касательными напряжениями заключается в следующем [12].

Вычисляют запас n_σ усталостной прочности по нормальным напряжениям

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{K\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}, \qquad (1)$$

запас n_τ усталостной прочности по касательным напряжениям

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{K\tau_a + \psi_\tau \tau_m}, \tag{2}$$

а затем полный запас n усталостной прочности

$$n = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}}. \tag{3}$$

В выражениях (1)–(3) σ_{-1}, τ_{-1} – предел выносливости при симметричном цикле нагружения по нормальным и касательным напряжениям соответственно; K – коэффициент снижения предела выносливости; σ_a, τ_a – амплитудное нормальное и амплитудное касательное напряжение соответственно; ψ_σ, ψ_τ – коэффициент асимметрии цикла нагружения нормальными и касательными напряжениями соответственно; σ_m, τ_m – среднее нормальное и среднее касательное напряжение соответственно.

Объект считается удовлетворяющим требованию усталостной прочности, если выполняется условие

$$n \geq [n],$$

где $[n]$ – допускаемый запас прочности.

Следует учитывать, что зависимость напряжения в элементах установки главного подъема от времени представляет собой результат сложения колебаний различных частот, поэтому амплитудные значения напряжений не являются постоянными. На рис. 2 показан график зависимости динамической нагрузки в канате в течение рабочего цикла установки [13].

Наибольшая нестабильность амплитуды колебаний нагрузки в канате наблюдается в режимах разгона и торможения сосуда. Кроме сил тяжести и инерции на величине натяжения сказываются усилия, имеющие вид колебаний и вызванные рядом факторов, таких как [14]:

– волновой характер передачи движущей силы по канату от барабана или шкива трения к сосуду в начале подъема (рывок);

– погрешности размеров и формы барабана или шкива трения;

– деформация проводников;

– вход сосуда в разгрузочные кривые и др.

Получая от датчика сигнал с переменной амплитудой, ПЛК выполняет его математическую обработку с целью приведения сложных колебаний к эквивалентным одночастотным.

Традиционный способ определения напряжений в материале основан на измерении деформации объекта с последующим расчетом по формуле, описывающей связь деформации с напряжением. Для измерения деформаций наиболее широко применяют тензодатчики (тензометры), чувствительный элемент которых наклеивают на поверхность объекта в зоне предположительно наивысших напряжений [15]. Методы тензометрии отработаны и во многих случаях показали достаточно высокую достоверность.

Недостаток же тензометрии несущих деталей установок главного подъема состоит в том, что напряжения получаются косвенным путем, с неизбежными

погрешностями. К ошибке, связанной с вычислением значений по аналитическим зависимостям, добавляется ошибка, возникающая из-за невозможности учета действительного характера нагружения.

Способ отслеживания изменений структуры материала, в отличие от тензометрии, позволяет непосредственно наблюдать появление и развитие микродефектов и своевременно предотвращать усталостное разрушение детали.

Рисунок 3. Характерный вид датчика деформаций интегрального типа после длительного циклического нагружения образца
Figure 3. Characteristic view of the integral type strain gauge after prolonged cyclic loading of the sample

В научно-технической литературе описаны пленочные датчики деформации интегрального типа, позволяющие прогнозировать разрушение детали за счет выявления микротрещин на ее поверхности [16–18].

Датчик изготавливается в виде пленки из металлической фольги толщиной 10–40 мкм по специальной технологии. В материале пленки даже при малых по величине циклических деформациях происходят необратимые смещения слоев зерен, которые выглядят как полосы и пятна, отражающие изменения структуры поверхности, на которой размещена пленка (рис. 3).

Предложены различные способы анализа числа, размеров и формы пятен, позволяющие оценить динамику развития поверхностных микродефектов. Один из способов основан на измерении отражательной способности пленки.

Информация, получаемая с помощью датчика интегрального типа, прямо указывает на стадию разрушения детали, в чем и состоит существенное преимущество данного средства по сравнению с тензометром. Измерения, в которых используется датчик интегрального типа, можно считать более достоверными.

Степень изношенности футеровки шкивов трения, согласно действующим правилам, устанавливается путем измерения линейкой, и сведений о средствах аппаратного контроля обнаружить не удалось. В то же время задача создания соответствующего информационного устройства представляется вполне разрешимой даже на уровне механики.

Выводы. Надежность и безопасность эксплуатации рудничных установок главного подъема наилучшим образом обеспечивается проактивным обслуживанием на базе мониторинга технического состояния ответственных элементов оборудования. Эффективность системы мониторинга определяется достоверностью информации, поступающей от датчиков. Нагрузка на объекты мониторинга является результатом сложения колебаний различной частоты и амплитуды, поэтому для получения наиболее достоверной информации о состоянии ответственных деталей механизмов и металлоконструкций целесообразно использовать пленочные датчики деформации интегрального типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mine 2011. The game has changed. Review of global trends in mining industry. PWC 2011. URL: https://www.pwc.kz/en/events/assets/mine_2011_eng.pdf (дата обращения: 18.09.2021).

2. Outlook: Prospects for recovery in the global mining industry. KPMG, 2010. URL: https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2012/08/building-business-value-part-2.pdf. (дата обращения: 18.09.2021).

3. Johansson B., Steinarson A. A new method for automatic reduction of catenary oscillations in drum hoist installations // HOIST & HAUL 2015. 2015. P. 125–139.

4. Kratz T., Martens P. N. Optimization of mucking and hoisting operation in conventional shaft sinking // Glückauf. 2015. No. 2. P. 16–22.

5. Townsend B. Control of catenary rope oscillation on a Blair multi-rope winder by unbalancing the load sharing between the hoist ropes // HOIST & HAUL 2015. 2015. P. 43–52.

6. Копытов А. И., Першин В. В., Вети А. А. Исследование влияния изменения параметров свободного падения скипа на устойчивость предохранительных полков при углубке вертикальных стволов // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 8. С. 133–142. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-133-142

7. Тимухин С. А., Плотников А. М., Дмитриев Д. С. К вопросу обоснования скоростей движения подъемных сосудов комплексов шахтного подъема // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. № 4(44). С. 60–62.

8. Неисправности шахтных подъемных установок / В. Р. Бежок [и др.]. М.: Недра, 1991. 366 с.

9. Бобровицкий В. И., Сидоров А. В. Совершенствование системы ТОиР оборудования в условиях централизации ремонтной службы предприятия // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2011. № 1(24). С. 23–28.

10. Подходы к техническому обслуживанию: как правильно выбрать и избежать ошибок. URL: https://vc.ru/offline/128918-podhody-k-tehnicheskomu-obsluzhivaniyu-kak-pravilno-vybrat-i-izbezhat-oshibok (дата обращения: 11.10.2021).

11. Куликов Р. С. Мониторинг горно-шахтного оборудования для обеспечения гео- и газодинамической безопасности ведения горных работ на угольных шахтах // ГИАБ. 2013. № S5. С. 113–118.

12. Фесик С. П. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Будівельник, 1982. 308 с.

13. Трифанов Г. Д., Зверев В. Ю., Вагин Е. О., Архипов Е. В. Оценка влияния кинематических параметров подъемных установок на динамические нагрузки в канатах // ГИАБ. 2017. № 7. С. 103–110.

14. Зверев В. Ю. Обоснование параметров тахограммы скиповых подъемных установок, обеспечивающих снижение нагрузок в головных канатах: дис. … канд. техн. наук. Пермь, 2018. 117 с.

15. Системы для тензометрических измерений и сбора данных. URL: https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie/tenzometricheskie-sistemyi-sbora-dannyih (дата обращения: 11.10.2011).

16. Котельников А. П. Специальные датчики усталостных повреждений для прогнозирования ресурса металлоконструкций и деталей машин // Памяти профессора С. А. Ляпцева: матер. Всерос. науч.-техн. конф., 21–22 мая 2021 г. Екатеринбург: УГГУ, 2021. 75 с.

17. Змызгова Т. Р. Развитие методов диагностики усталостных повреждений деталей металлоконструкций по показаниям датчиков деформации интегрального типа // Актуальные вопросы технических наук. 2009. № 7-1. С. 103–109.

18. Сызранцев В. Н., Сызранцева К. В. Определение напряжений и остаточного ресурса по показаниям датчика интегрального типа переменной чувствительности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг ресурсов. 2017. Т. 328. № 9. С. 82–93.

Поступила в редакцию 9 ноября 2021 года

Сведения об авторах:

Залазинский Александр Георгиевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории системного моделирования Института машиноведения УрО РАН. E-mail: zalaz@list.ru; https://orcid.org/0000-0001-8352-5475

DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-84-91

Monitoring the technical condition of the main mine hoist

Aleksandr G. Zalazinskii[1]
[1] Institute of Engineering Science UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Ensuring the safe operation of skip and cage hoisting installations is one of the most important tasks of theoretical and experimental research in the field of mining mechanics. To achieve this goal, predictive (proactive) maintenance is required. It consists in performing the necessary repair actions to reduce the rate of development or prevent malfunctions identified on the basis of information about the actual technical condition of the equipment. Proactive maintenance is based on monitoring the technical condition of an object, it is the most effective in terms of preventing failures and the least expensive.*

Methods of research. *The most important physical and mechanical properties of the components of hoisting equipment from the point of view of the reliability of their functioning are the endurance*

of critical parts and metal structures. To implement the monitoring system, sensors are needed to obtain the most reliable information for predicting changes in the physical and mechanical properties of loaded elements. The task of assessing the technical state from the stresses acting in the material is complicated by the cyclical nature of the load. The disadvantage of the widely used method for determining stresses by measuring the deformation with a tensometer with subsequent calculation is that the stresses are obtained indirectly with inevitable errors. An error arising from the impossibility of taking into account the actual nature of the loading is added to the error associated with calculating values from analytical dependencies.
Results. *In the monitoring system, it is advisable to use integral-type film strain gauges, which make it possible to predict the destruction of a part by detecting microcracks on its surface.*
Conclusion. *The load on the monitoring objects is the result of the addition of vibrations of different frequencies and amplitudes, and integral-type film strain gauges will make it possible to obtain the most reliable information about the state of critical parts of mechanisms and metal structures.*

Keywords: *main hoist; technical condition; monitoring; proactive maintenance; reliability; integral type sensor.*

REFERENCES

1. Mine 2011. The game has changed. Review of global trends in mining industry. PWC 2011. Available from: https://www.pwc.kz/en/events/assets/mine_2011_eng.pdf [Accessed 18 September 2021].

2. Outlook: Prospects for recovery in the global mining industry. KPMG, 2010. Available from: https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2012/08/building-business-value-part-2.pdf. [Accessed 18 September 2021].

3. Johansson B., Steinarson A. A new method for automatic reduction of catenary oscillations in drum hoist installations. *HOIST & HAUL 2015*. 2015; 125–139.

4. Kratz T., Martens P. N. Optimization of mucking and hoisting operation in conventional shaft sinking. *Glückauf*. 2015; 2: 16–22.

5. Townsend B. Control of catenary rope oscillation on a Blair multi-rope winder by unbalancing the load sharing between the hoist ropes. *HOIST & HAUL 2015*. 2015; 43–52.

6. Kopytov A. I., Pershin V. V., Veti A. A. Research on free fall skip parameters variation impact on pentice stability when sinking vertical shafts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 8: 133–142. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2019-8-133-142 (In Russ.)

7. Timukhin S. A., Plotnikov A. M., Dmitriev D. S. On the question of substantiating the movement speeds of conveyances of hoisting complexes. *Izvestiia Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2016; 4(44): 60–62. (In Russ.)

8. Bezhok V. R. et al. *Mine hoisting installations malfunctions*. Moscow: Nedra Publishing: 1991. (In Russ.)

9. Бобровицкий В. И., Сидоров А. В. Improving of equipment MRO system in the conditions of enterprise maintenance service centralization. *Vibratsiia mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita = Vibration Machines: Measurement, Reduction, Protection*. 2011; 1(24): 23–28. (In Russ.)

10. *Approaches to maintenance: how to choose and how to avoid mistakes*. Available from: https://vc.ru/offline/128918-podhody-k-tehnicheskomu-obsluzhivaniyu-kak-pravilno-vybrat-i-izbezhat-oshibok [Accessed 11 October 2021]. (In Russ.)

11. Kulikov R. S. Monitoring of mining equipment for geodynamic and gasdynamic mine safety in coal mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2013; S5: 113–118. (In Russ.)

12. Fesik S. P. *Reference book on the strength of materials*. Kiev: Budivelnik Publishing; 1982. (In Russ.)

13. Trifanov G. D., Zverev V. Iu., Vagin E. O., Arkhipov E. V. Estimation of influence exerted by kinematic parameters of hoisting machines on the dynamic loads in cables. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 7: 103–110. (In Russ.)

14. Zverev V. Iu. *Substantiating the parameters of skip hoisting plants tachogram that insure reduced loads in main ropes: PhD in Engineering diss*. Perm: 2018. (In Russ.)

15. *Systems for strain gauge measurements and data collection*. Available from: https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie/tenzometricheskie-sistemyi-sbora-dannyih [Accessed 11 October 2021]. (In Russ.)

16. Kotelnikov A. P. Special fatigue damage sensors for steel work and machine component resource prediction. In: *In memory of Professor S. A. Liaptsev: Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference, 21–22 May 2021*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2021. (In Russ.)

17. Zmyzgova T. R. Developing the methods of diagnosing the fatigue damage of steel work components according to the integral type sensors. *Aktualnye voprosy tekhnicheskikh nauk = Burning Questions of Engineering Sciences*. 2009; 7-1: 103–109. (In Russ.)

18. Syzrantsev V. N., Syzrantseva K. V. Determination of stresses and residual life in accordance with indications of variable-sensitivity integral strain gauge. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017; 328(9): 82–93. (In Russ.)

Received 9 November 2021

Information about authors:

Aleksandr G. Zalazinskii – DSc (Engineering), Professor, senior researcher of the System Modelling Laboratory, Institute of Engineering Science UB RAS. E-mail: zalaz@list.ru; https://orcid.org/0000-0001-8352-5475

Для цитирования: Залазинский А. Г. Мониторинг технического состояния рудничных установок главного подъема // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 1. С. 84–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-84-91
For citation: Zalazinskii A. G. Monitoring the technical condition of the main mine hoist. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 1: 84–91 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-84-91