ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(8):92-107
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.647.2 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_92

# МОДЕЛИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПРИВОДНЫХ СТАНЦИЙ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

**Е.Г. Кузин[1], Б.Л. Герике[2], А.Ю. Захаров[3]**

[1] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске, Прокопьевск, Россия, e-mail: kuzinevgen@gmail.com
[2] Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения РАН, Институт угля СО РАН, Кемерово, Россия
[3] Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

***Аннотация:*** Рассмотрен системный подход к решению проблем обеспечения надежности и эффективности транспортных систем угольных шахт. Совокупность компонентов ленточных конвейеров органично встраивается в работу подземного горного предприятия, и при этом все они имеют разные темпы износа и надежность. Представлен анализ отказов основных компонентов ленточных конвейеров для горной промышленности. Предложен подход, представляющий приводные станции ленточных конвейеров как сложную техническую систему. Рассмотрены типовые схемы компоновки приводных станций и доли отказов укрупненных элементов приводных станций ленточных конвейеров. Выполнен анализ вероятных причин отказов этих элементов. Показано, что около 60% всех отказов составляют отказы частотно-преобразовательной станции, а суммарное годовое время простоев доходит до 362 ч. Представлена структурная схема приводной станции ленточного конвейера, выделены компоненты, на которые целесообразно воздействовать для управления надежностью. Определены наиболее информативные диагностические признаки, характеризующие техническое состояние приводных станций. Разработаны модели оценки предельного технического состояния основных элементов приводных станций ленточных конвейеров по совокупности диагностических признаков. Основными являются параметры вибрации, температуры, смазочного масла и электрические параметры изоляции электродвигателей. Применение данных моделей позволяет создать методологические основы управления надежностью сложных транспортных систем горных предприятий.

***Ключевые слова:*** ленточный конвейер, приводные станции, модели предельного состояния, редуктор, электропривод, частотно-преобразовательные станции, управление надежностью, вибродиагностика, тепловой контроль, параметры смазочного масла, предиктивное техническое обслуживание.

***Для цитирования:*** *Кузин Е. Г., Герике Б. Л., Захаров А. Ю.* Модели предельного состояния приводных станций ленточных конвейеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 8. – С. 92–107. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_92.

© Е.Г. Кузин, Б.Л. Герике, А.Ю. Захаров. 2024.

# Limiting state models for drive ends of belt conveyors

**E.G. Kuzin[1], B.L. Gerike[2], A.Y. Zakharov[3]**

[1] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk Branch, Prokopyevsk, Russia, e-mail: kuzinevgen@gmail.com
[2] Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Coal SB RAS, Kemerovo, Russia
[3] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

***Abstract:*** This study considers a systemic approach to the promotion of safety and efficiency of transport systems in coal mines. The ensemble of components of belt conveyors is intrinsically integrated in operation of an underground mine, while all these components have different reliability and rates of wear. The failure analysis of main components of belt conveyors in the mining industry is presented. The proposed approach represents the drive ends of belt conveyors as a complex engineering system. The typical layout schemes of the drive ends and the percent of failures in preassembled members of the drive ends are studied. The probable causes of failures of these members are analyzed. It is shown that 60% of all failures are the failures of the frequency converter, and the total annual dead time due to these failures reaches 362 h. The structure chart of a belt conveyor drive end is described, and the components advisable to be subjected to reliability control are identified. The most informative diagnostic indicators of the technical state of drive ends are determined. The valuation models of the limiting state of the main components in the drive ends of belt conveyors by a set of diagnostic indicators are developed. The chief indicators are the parameters of vibration, temperature, lubricant and electrical parameters of insulation of electric motors. Application of these models makes it possible to create a methodological framework for the control of reliability of complex transport systems in mines.

***Key words:*** belt conveyors, drive ends, limiting state models, reducing gear, electric motors, frequency converters, reliability control, vibration diagnostics, heat control, lubricant parameters, predictive maintenance support.

***For citation:*** Kuzin E. G., Gerike B. L., Zakharov A. Y. Limiting state models for drive ends of belt conveyors. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(8):92-107. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_92.

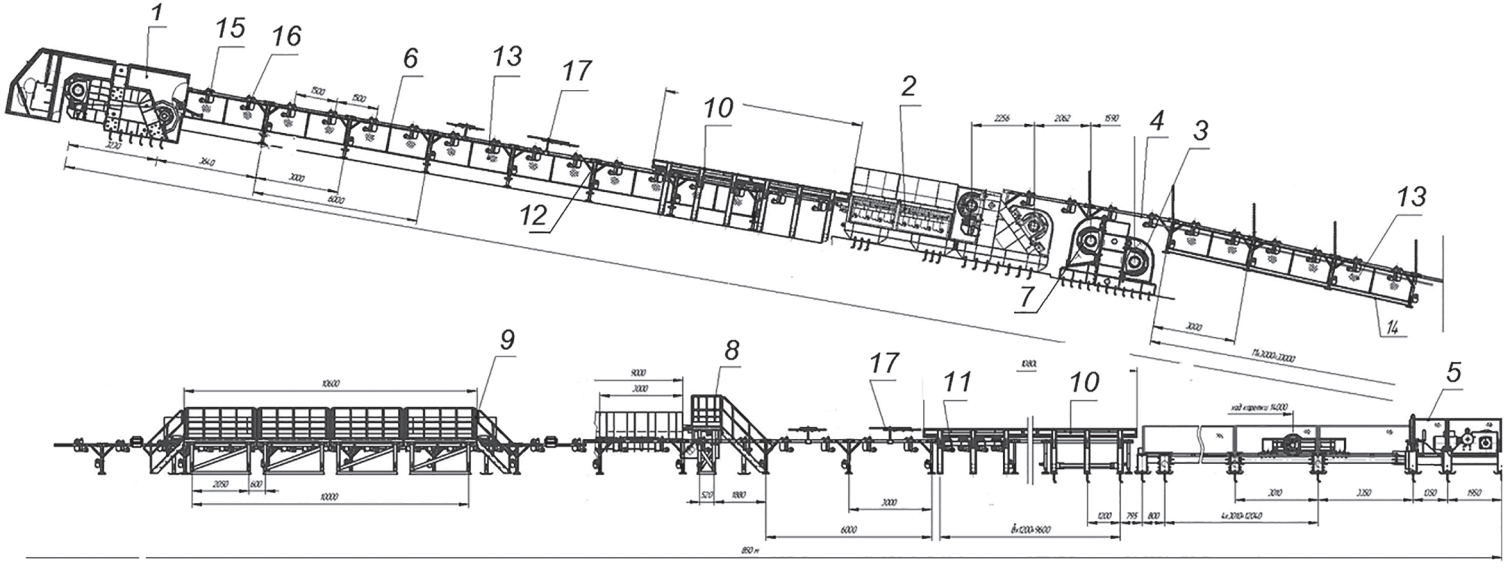
## Введение

Современные транспортные системы угольных шахт представлены скребковыми и ленточными конвейерами и перегружателями, хорошо согласующимися с проходческими и очистными комбайнами, позволяющими осуществлять поточную и циклично-поточную технологии выемки горной массы.

Общий вид телескопического ленточного конвейера, предназначенного в том числе и для перевозки людей, типа ЛЛТ-1600 и описание основных компонентов представлено на рис. 1.

Анализ отказов основных укрупненных узлов ленточных конвейеров исследован в работе [1] и с учетом дополнительных данных по угольным предприятиям Кемеровской области за период с 2020 по 2023 гг. представлен на рис. 2, 3.

Анализ диаграмм на рис. 2, 3 показывает, что доля отказов приводных станций составляет порядка 4%, однако время восстановления работоспособно-




1 – секция разгрузочная, 2 – привод промежуточный, 3 – секция приводная, 4 – секция линейная переходная, 5 – секция телескопическая, 6 – секция линейная, 7 – приводной блок, 8 – площадка посадки людей, 9 – площадка схода людей, 10 – секция загрузки, 11 – загрузочное устройство, 12 – стойка, 13 – ограждение, 14 – ограждение нижнее, 15, 16 – роликоопоры, 17 – кронштейн оросителя

*Рис. 1. Общий вид телескопического конвейера типа ЛЛТ-1600*

*Fig. 1. General view of the LLT-1600 type telescopic conveyor*

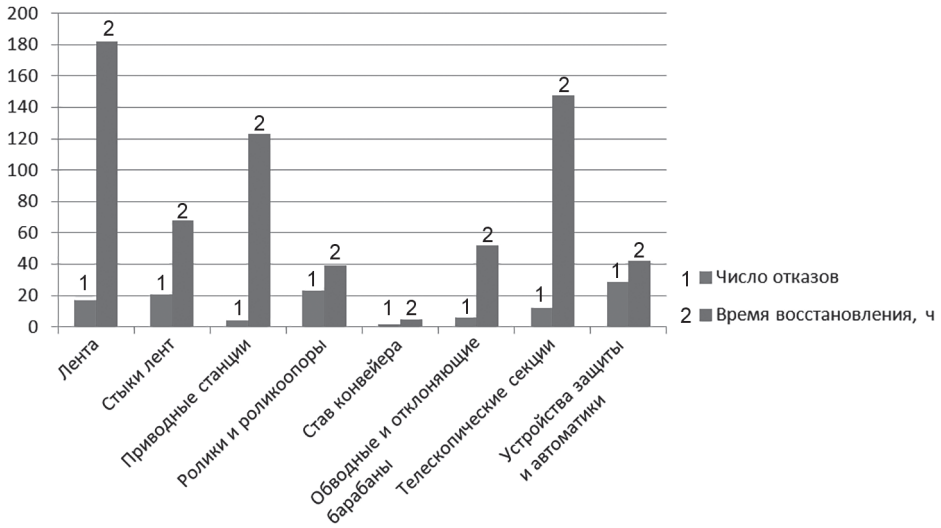



*Рис. 2. Анализ числа отказов и время восстановления основных узлов ленточных конвейеров на угольных предприятиях*

*Fig. 2. Analysis of the number of failures and recovery time of the main components of belt conveyors at coal enterprises*

го состояния доходит до 19% и превышает 120 ч в год (в этом исследовании отказы и сбои устройств защиты и автоматики вынесены отдельно). Важной особенностью оценки состояния приводных станций является то, что в горной промышленности системы приводов являются базовыми системами для мощных ленточных конвейеров, имеющих протяженную и пространственно слож-

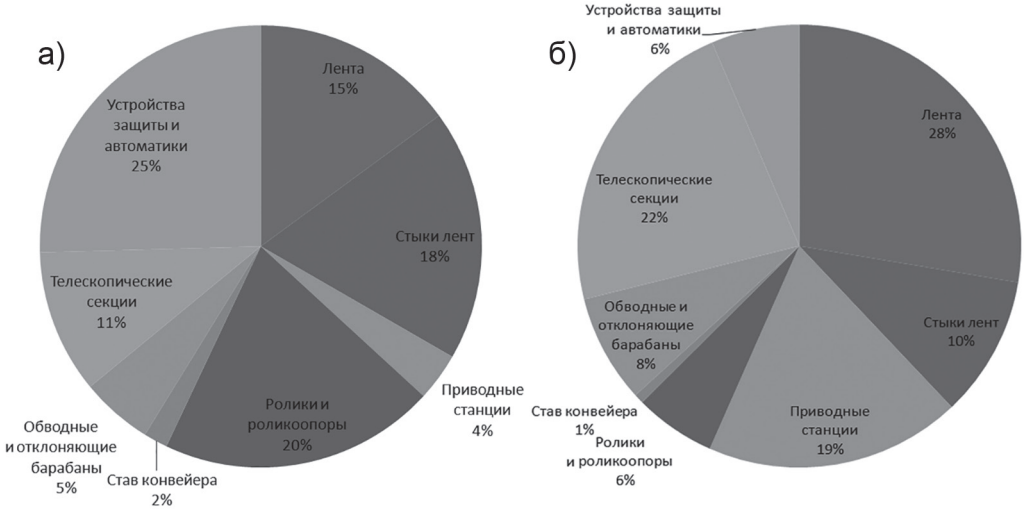



*Рис. 3. Усредненные диаграммы отказов основных узлов ленточных конвейеров в процентах: число отказов (а); время восстановления (б)*

*Fig. 3. Averaged failure diagrams of the main conveyor belt nodes as a percentage: the number of failures (a); recovery time (b)*

ную трассу перемещения транспортируемого груза [2, 3].

При выборе стратегии ремонтных воздействий, по данным исследований Л.И. Андреевой [4], обычно не используются понятия и показатели надежности. В другом исследовании отмечается, что повышение долговечности и надежности деталей горных машин связано не только с совершенствованием методов проектирования и изготовления, а также с условиями эксплуатации и ремонтного обслуживания [5].

Указанные особенности подтверждают актуальность направления исследования по повышению надежности приводных станций ленточных конвейеров путем развития стратегии предиктивного технического обслуживания.

**Описание объекта и методы исследования**

Приводные станции ленточных конвейеров представляют собой сложную техническую систему. При этом изменение параметров состояния каждого элемента этой системы в конечном итоге оказывает влияние на всю систему. Некоторые компоненты системы являются управляемыми, как с точки зрения выполнения производственных функций, так и с точки зрения надежности и эффективности.

Рассмотрим основные схемы приводных барабанов ленточных конвейеров в горной промышленности (рис. 4).

Приводные станции с одним барабаном (рис. 4, *а*, *г*) находят применение на конвейерах обогатительных фабрик, длина которых не превышает 150 — 200 м. На схеме рис. 4, *а* приводной барабан является одновременно и разгрузочным. На схеме рис. 4, *г* разгрузочный барабан выносится на консоль, а приводной барабан с обводным барабаном размещаются на раме в удобном месте. Схемы рис. 4, *б*, *в* широко используются на ленточных конвейерах шахт и разрезов и содержат 2, 3 или 4 приводных барабана в зависимости от необходимого тягового усилия, которое в свою очередь зависит от длины и ширины ленты.

Схемы рис. 4, *д*, *е* представляют собой схемы с промежуточным приводом типа «ложный сброс» и находят применение на протяженных ленточных конвейерах шахт и иногда разрезов. При этом возможна установка одного или двух двигателей с разных сторон приводного барабана.

Особенности схем и конструкций приводных барабанов исследовались в работах [6 — 9], основным выводом которых являются различные нагрузки и, следовательно, темпы износа основных элементов привода.

В работе [6] показано влияние «чистой» и «грязной» сторон ленты, вызывающей изменение коэффициента сцепления ленты и барабана, при котором «проскальзывающий» барабан передает часть нагрузки на барабаны с лучшим

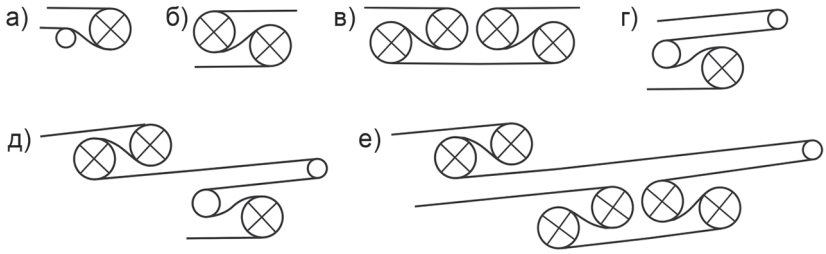



*Рис. 4. Схемы приводных барабанов ленточных конвейеров*
*Fig. 4. Diagrams of drive drums of belt conveyors*

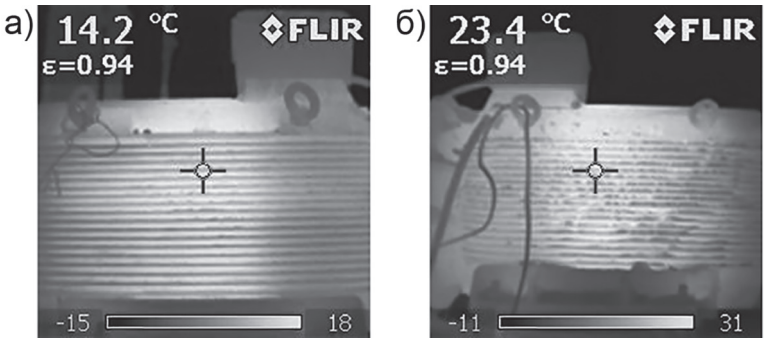



*Рис. 5. Термограммы двух электродвигателей одного конвейера: двигатель на «грязной» ветви (а); двигатель на «чистой» ветви (б)*

*Fig. 5. Thermograms of two electric motors of the same conveyor: the engine on the «dirty» branch (a); the engine on the «clean» branch (b)*

сцеплением, вызывая дополнительный нагрев их приводов. Термограммы электродвигателей одного конвейера, имеющие различную температуру, представлены на рис. 5.

В работе [7] показано накопление механических примесей (продуктов износа) узлов редукторов ленточного конвейера, характеризующего различные темпы износа подшипников и зубчатых передач в зависимости от места установки в схеме конвейера.

В работе [8] А.А. Реутов показывает, что при двухбарабанном приводе абразивный износ на втором барабане (на примере конвейера 2Л80) в 3,17 раза

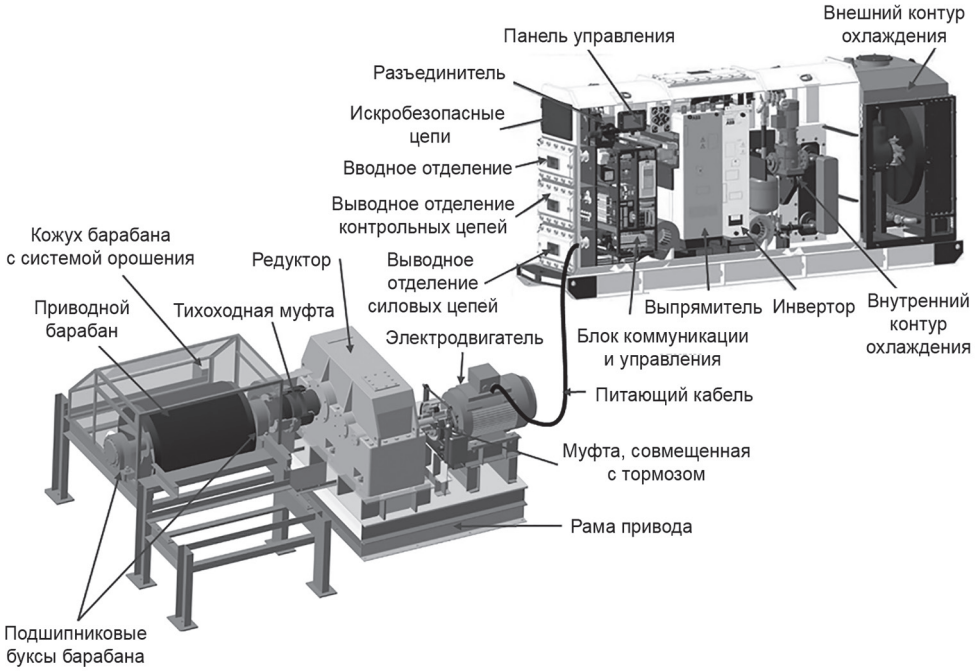



*Рис. 6. Система приводной станции ленточного конвейера и ее основные компоненты*

*Fig. 6. Belt conveyor drive station system and its main components*

*Рис. 7. Структурная схема приводной станции ленточного конвейера*
*Fig. 7. Block diagram of the belt conveyor drive station*

больше, чем на первом. А в следующем исследовании [9] на основе моделирования были обоснованы различные углы скольжения и относительного покоя в обхвате лентой приводных барабанов, с учетом усилий в набегающей и сбегающей ветвях, что в конечном итоге характеризует надежность приводной станции.

Учитывая многообразие факторов, влияющих на ресурс элементов приводных станций, следует использовать комплексный подход к оценке параметров состояния системы [10].

На рис. 6 представлены основные компоненты приводной станции современного шахтного ленточного конвейера. Для этой системы входным компонентом надсистемы является общешахтная питающая сеть, а выходным — конвейерная лента с находящимся на ней грузом (влияние отказов этих компонентов в дальнейшем анализе не учитывалось).

Представим систему приводной станции в виде структурной схемы, для которой проводился анализ отказов (рис. 7). Частотно-преобразовательная станция шахтная (ЧПСШ) сама является сложной технической системой, при этом обладающей достаточно высокой надежностью. В отказах ЧПСШ рассмотрены силовые блоки, система управления, к ней же отнесены все устройства системы обеспечения безопасности и исключения ненормальных режимов работы (датчики контроля схода ленты (КСЛ), кабель-тросовые выключатели (КТВ), датчики скорости (ДС), установка пожаротушения ленточного конвейера (УПТЛК) и т.д. Система охлаждения электродвигателей и редукторов в подземных условиях выделена отдельно. Следует отметить, что на некоторых приводных станциях существуют раздельные системы охлаждения электродвигателя и редуктора, которые могут быть как жидкостные, так и воздушные; с самоохлаждением или с принудительной вентиляцией.

В структурной схеме выделены компоненты, на которые возможно оказывать значительные управляющие воздействия: ЧПСШ (перераспределение тяговых моментов, управление системой охлаждения); электродвигатель (смазывание подшипников, охлаждение, центровка); редуктор (система смазки пар трения, система охлаждения, центровка, балансировка). На барабан и раму привода также возможно оказывать не-

значительные воздействия — протяжка крепежа, смазывание подшипников, ремонт футеровки.

**Результаты исследования**

Анализ отказов ведется еженедельно с описанием причин простоя и учитывает технологические простои (невостребованность смежной ленты) и простои, связанные с проведением плановых профилактических работ. Пример таблицы учета простоев за неделю по шахте им. В.Д. Ялевского представлен в табл. 1. В этом анализе представлены данные по коэффициенту готовности в соответствии с ГОСТ Р 27.102-2021.

Примером комплексного показателя надежности служит коэффициент готовности, стационарное значение которого определяют по формуле

$$K_г = \frac{T}{T + T_в}, \qquad (1)$$

где $T$ — средняя наработка между отказами; $T_в$ — среднее время восстановления.

Коэффициент использования оборудования отражает экономические показатели и в данном анализе характеризует оценку загруженности оборудования по фактически отработанному времени:

Таблица 1

***Фрагмент таблицы учета простоев за неделю***
***A fragment of the weekly downtime table***

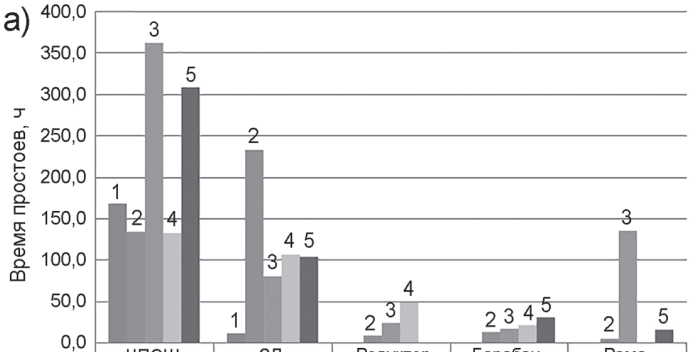
| Лента | Причина остановки | Число месяца | | | | | | | Итого, мин | Итого, ч |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | |
| Лента № 5 | Потеря связи | | 5 | | | | | 33 | 38 | 0,6 |
| | Подрезка хлыста | | | | | | 7 | | 7 | 0,1 |
| | Остановка по датчику скорости | | 5 | | | | | | 5 | 0,1 |
| | Остановка по датчику КТВ | 25 | 10 | 10 | 10 | | | 5 | 60 | 1,0 |
| | Остановка по датчику КСЛ | | | | 5 | | 8 | 15 | 28 | 0,5 |
| | Остановка по датчику УПТЛК | | 9 | | | | | | 9 | 0,2 |
| | Мотор 5.1. Перегрев | | 17 | | | | 17 | | 34 | 0,6 |
| | Ошибка 108 низкое напряжение М5.3 | | 5 | | | | | | 5 | 0,1 |
| | Ошибка 108 низкое напряжение М5.4 | | | | | | | 5 | 5 | 0,1 |
| | Концевая станция | | | | 28 | | | | 28 | 0,5 |
| | Подрезка хлыста | | | | | 5 | | | 5 | 0,1 |
| | ТОиППР, перешивка стыков. | | | | 118 | | 107 | | 225 | 3,8 |
| | Остановка по предыдущему конвейеру | 209 | 165 | 148 | 20 | 71 | 47 | 129 | 789 | 13,2 |
| | Работа при отсутствии связи | | | | | | | 34 | 34 | 0,6 |
| | Отсутствие электроэнергии | | | 30 | | | | | 30 | 0,5 |
| | Итого: Аварийные простои + время ТОиППР, мин | | | | | | | | 449 | |
| | Итого: Простои, мин | 234 | 216 | 188 | 181 | 76 | 186 | 221 | 1302 | 21,7 |
| | Итого: Трансмаш, мин | 174 | 156 | 168 | 108 | 60 | 156 | 150 | 972 | 16,2 |
| | Параметры $K_г$ / $K_{ио}$ | | | | | | | | 95,5/87,1 | |

$$K_{ио} = \frac{T_ф}{T_н}, \qquad (2)$$

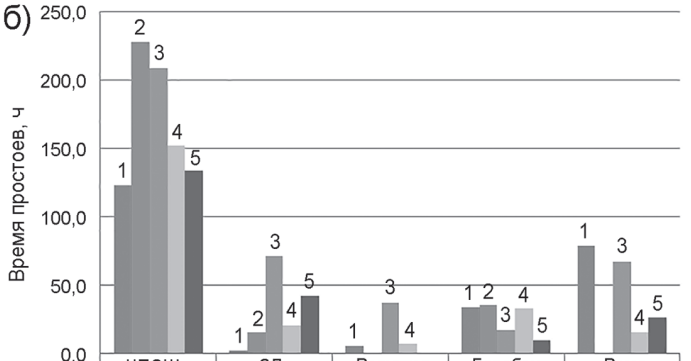
где $T_ф$ — фактически отработанное оборудованием время в часах; $T_н$ — нормативный фонд времени в часах [11].

Анализ показывает, что коэффициент готовности приводных станций ленточных конвейеров (недельный) колеблется от 0,879 до 0,992 и в среднем за 2023 г. составляет $K_{гср}$ = 0,962, а коэффициент использования оборудования колеблется от 0,220 до 0,921 и среднегодовой составляет $K_{ио.ср}$ = 0,753. Фрагмент еженедельного учета простоев приведен в табл. 1. В таблице приняты следующие сокращения: КТВ — кабель-тросовый выключатель; КСЛ — датчик контроля схода ленты; УПТЛК — установка пожаротушения ленточногоконвейера; ТОиППР — техническое обслуживание и планово-предупредительный ремонт.

На предприятии имеется внутренняя нумерация ленточных конвейеров от забоя до поверхности — по порядку от «Ленты 1» до «Ленты 5».




| | ЧПСШ | ЗД | Редуктор | Барабан | Рама |
|---|---|---|---|---|---|
| Лента 1 | 168,3 | 11,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Лента 2 | 134,4 | 233,0 | 8,9 | 14,1 | 5,1 |
| Лента 3 | 362,5 | 81,0 | 24,0 | 17,8 | 135,2 |
| Лента 4 | 133,1 | 107,1 | 48,7 | 21,5 | 0,0 |
| Лента 5 | 307,9 | 104,4 | 0,0 | 31,2 | 15,6 |




| | ЧПСШ | ЗД | Редуктор | Барабан | Рама |
|---|---|---|---|---|---|
| Лента 1 | 123,2 | 2,0 | 5,8 | 33,8 | 79,0 |
| Лента 2 | 228,0 | 15,6 | 0,0 | 35,7 | 0,0 |
| Лента 3 | 208,5 | 71,4 | 36,9 | 17,2 | 67,1 |
| Лента 4 | 152,4 | 20,8 | 6,9 | 33,2 | 15,6 |
| Лента 5 | 134,1 | 42,3 | 0,0 | 9,8 | 26,0 |

*Рис. 8. Анализ времени простоев по компонентам приводных станций: по пласту 50 (а); по пласту 52 (б)*
*Fig. 8. Analysis of downtime by components of drive stations: for reservoir 50 (a); for reservoir 52 (b)*

Анализ отказов компонентов приводных станций приведен на рис. 8, 9. Нумерация лент соответствует расположению лент, начиная от очистного забоя. При этом «Лента 1» установлена в конвейерном штреке, является телескопической и периодически сокращается по мере движения очистного забоя.

Анализ данных по простоям приводных станций показывает, что, несмотря на высокую надежность самой частотно-преобразовательной станции, многочисленные короткие сбои (около 5—10 мин) по причине срабатывания датчиков составляют более половины всех простоев. Кроме того, часть ремонтных работ по замене роликов или подрезки хлыстов ленты проводится после принудительной остановки конвейера кабельтросовым выключателем (КТВ). Беседа с обслуживающим персоналом по эксплуатации ленточных конвейеров показывает также частые случаи исчезновения связи приводов с горным диспетчером, по причине нарушения контактов в системе управления.

На втором месте по доле отказов находится электрический двигатель (в данном исследовании сюда же входит отказ питающего кабеля). По данным исследований [12], от 70 до 80% отказов двигателя вызывались коротким замыканием обмоток. В работе [13] авторами рассмотрено влияние натяжных станций на пусковую динамику многоприводных ленточных конвейеров для обоснования возможности применения мотор-барабана с тихоходным синхронным двигателем.

В отказах барабанов большую часть составляют нарушения крепления кожухов и ограждений, футеровка отказывает гораздо реже, и еще реже — подшипниковые буксы. Поломка вала барабана зафиксирована вообще всего один раз за последние пять лет.

По мнению авторов исследований [14—16], система управления надежностью должна базироваться на совокупном анализе статистических данных, результатах систематического мониторинга и периодических диагностических исследованиях, основанных на различных физических явлениях.

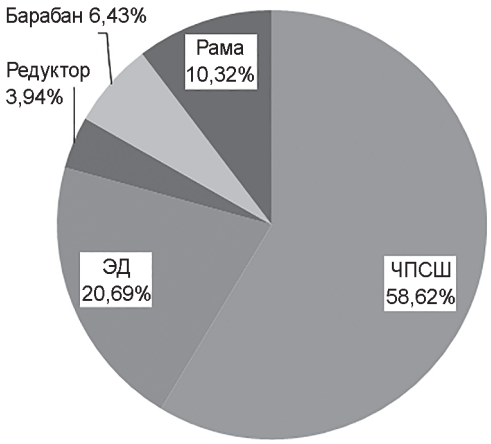



*Рис. 9. Анализ времени простоев по компонентам приводных станций*

*Fig. 9. Analysis of downtime by components of drive stations*

В работе [1] была разработана методика оценки технического состояния редуктора по характерным диагностическим признакам, включающим параметры вибрации, температуры и характеристик смазочного масла (табл. 2).

Зоны, приведенные в таблице, соответствуют следующему техническому состоянию: A — отлично (новое изделие); B — хорошо (годен); C — удовлетворительно (ограниченно годен); D — предельно допустимое (необходима дополнительная диагностика, подготовка к ремонту); E — недопустимое состояние (немедленный останов, замена).

При этом значения диагностических признаков в зоне D рассматриваются как предельно допустимые, а в зоне E — как предельное недопустимое состояние, при котором оборудование должно быть немедленно остановлено и выведено в ремонт (заменено).

Таблица 2

***Уровни значений диагностических параметров редуктора [1]***
***The levels of values of the diagnostic parameters of the gearbox [1]***

| **Зона** | **Общий уровень вибрации $V_{скз}$, мм/с** | **Виброскорость на частоте сепаратора $f_{сеп}$, мм/с** | **Виброскорость на частоте наружного кольца $f_{н}$к, мм/с** | **Виброскорость на зубцовой частоте 1 вала $f_{z1}$, мм/с** | **Виброскорость на зубцовой частоте 2 вала $f_{z2}$, мм/с** |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 0 – 2,8 | 0 – 0,25 | 0 – 0,05 | 0 – 0,5 | 0 – 0,25 |
| B | 2,8 – 4,5 | 0,25 – 0,5 | 0,05 – 0,15 | 0,5 – 0,8 | 0,25 – 0,5 |
| C | 4,5 – 7,1 | 0,5 – 0,75 | 0,15 – 0,25 | 0,8 – 1,5 | 0,5 – 0,75 |
| D | 7,1 – 11,2 | 0,75 – 1,0 | 0,25 – 0,5 | 1,5 – 2,0 | 0,75 – 1,0 |
| E | >11,2 | >1,0 | >0,5 | >2,0 | >1,0 |
| | **Fe, г/т** | **Si, г/т** | **Cu, г/т** | **Al, г/т** | **Cr, г/т** |
| A | 0 – 20 | 0 – 5 | 0 – 3,75 | 0 – 1,7 | 0 – 1,25 |
| B | 20 – 50 | 5 – 10 | 3,75 – 7,5 | 1,7 – 3,5 | 1,25 – 2,5 |
| C | 50 – 100 | 10 – 20 | 7,5 – 11,25 | 3,5 – 5,0 | 2,5 – 3,75 |
| D | 100 – 200 | 20 – 30 | 11,25 – 15 | 5,0 – 7,0 | 3,75 – 5,0 |
| E | >200 | >30 | >15 | >7,0 | >5 |
| | **Sn, г/т** | **Отклонение вязкости $\Delta\nu$, мм²/с** | **Температура вспышки масла $T_{всп}$, °C** | **Температура масла $T_{м}$, °C** | **Температурная аномалия $\Delta T$, °C** |
| A | 0 – 1,25 | 8 | 255 – 250 | 80 | 0 – 5 |
| B | 1,25 – 2,5 | 16 | 250 – 240 | 80 – 90 | 5 – 10 |
| C | 2,5 – 3,75 | 24 | 240 – 230 | 90 – 100 | 10 – 15 |
| D | 3,75 – 5,0 | 32 | 230 – 220 | 100 – 110 | 15 – 20 |
| E | >5 | >32 | <220 | >110 | >20 |

Для электродвигателя диагностическими признаками являются параметры вибрации и температуры, при этом предотвратить недопустимое тепловое состояние позволяют датчики тока и датчики температуры обмоток (охлаждающей жидкости). Вместо контроля смазочного масла для электропривода вводятся электрические методы контроля. Так, старение изоляции приводит к уменьшению сопротивления изоляции, а также к уменьшению индекса поляризации. Чем интенсивнее в диэлектрике под воздействием электрического поля движутся заряженные частицы, тем ниже индекс поляризации. В рудничных условиях высокая влажность, увлажнение изоляции характеризуется коэффициентом абсорбции $K_а$, и при его снижении менее 1,2 высока вероятность пробоя изоляции и дорогостоящая перемотка статорных обмоток.

Электрические методы защиты электродвигателей достаточно полно изучены и находят свое применение в рудничных электроприводах. При этом тепловые переходные процессы на два порядка медленнее электромагнитных, что обуславливает необходимость раздельного контроля чисто электрических и тепловых параметров [17, 18]. Превышение номинальных токов само по себе не яв-

Таблица 3

***Предельные значения диагностических параметров электродвигателя***
***Limit values of diagnostic parameters of the electric motor***

| Зона | Общий уровень вибрации $V_{скз}$, мм/с | Виброскорость на оборотной частоте ротора $f_г$, мм/с | Виброскорость второй гармоники оборотной частоты ротора $2{\times}f_г$, мм/с | Индекс поляризации $PI = R_{600} / R_{60}$ |
|---|---|---|---|---|
| D | 7,1 – 11,2 | 2,8 – 4,5 | 1,8 – 2,8 | 3,0 – 2,0 |
| E | >11,2 | >4,5 | >2,8 | <2,0 (менее) |
| | **Температурная аномалия $\Delta T$, °C** | **Температура статора $T$ °C** | **Сопротивление изоляции, $R_{из}$, МОм** | **Коэффициент абсорбции $K_а = R_{60} / R_{15}$** |
| D | 10 – 15 | 90 – 100 | 3,0 – 1,0 | 1,3 – 1,2 |
| E | >20 | >110 | <1,0 (менее) | <1,2 (менее) |

ляется диагностическим параметром предельного состояния двигателя, но частые перегревы снижают качество изоляции [19, 20].

Предельные значения диагностических параметров электродвигателей, включенные в модель предельного состояния приводной станции конвейера, приведены в табл. 3.

## Выводы и обсуждения

Анализ темпов деградации смазочного масла показывает наличие периода приработки, при котором сначала довольно интенсивно накапливаются механические примеси, затем процесс замедляется. Период приработки для редукторов, оснащенных частотно-регулируемыми приводами, составляет около 8 – 11 тыс. ч (рис. 10, 11).

Далее процессы износа становятся более интенсивными (увеличивается крутизна графика на рис. 10), однако в дальнейшем на протяжении последующей эксплуатации они стабилизируются и составляют для железа порядка 19,6 г/т за каждые 1000 ч работы. Точки, имеющие низкие значения уровней железа (рис. 10) и других, преимущественно цветных металлов (см. рис. 11), соот-

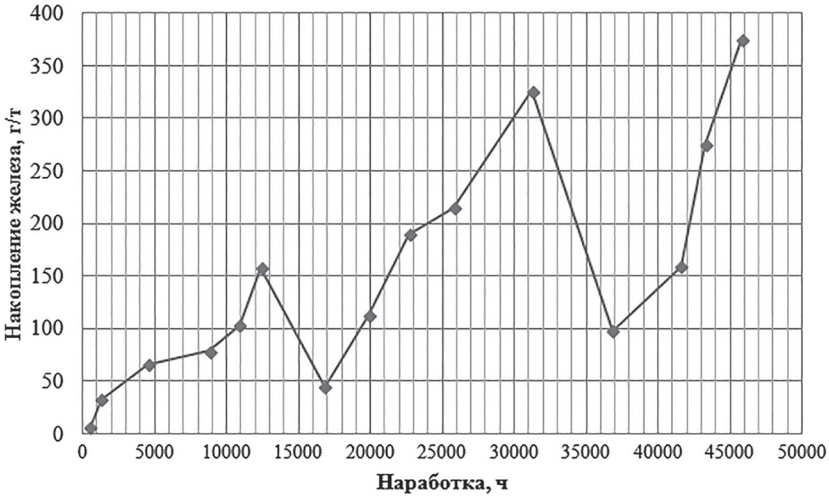



*Рис. 10. Диаграмма накопления железа в масле редуктора от наработки*
*Fig. 10. Diagram of iron accumulation in gearbox oil from operating time*

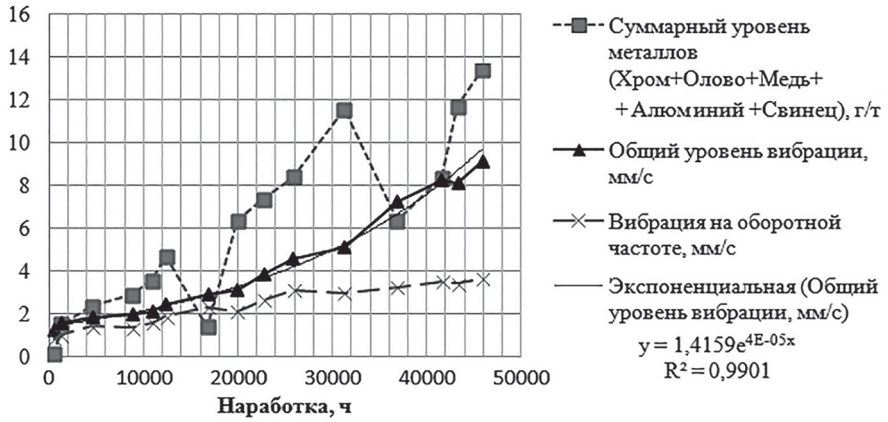



*Рис. 11. Диаграмма накопления механических примесей металлов и уровни виброскорости от наработки*

*Fig. 11. Diagram of accumulation of mechanical impurities of metals and levels of vibration velocity from operating time*

ветствующие наработке около 17 000 ч (первый спад) и около 37 000 ч (второй спад), обусловлены заменой смазочного масла. При этом можно сделать вывод, что полностью восстановить показатели чистого масла не удается — примеси откладываются в различных элементах конструкции редукторов, промывка при операции замены масла не предусмотрена.

Крутизна графиков (интенсивность) накопления механических примесей от замены до замены масла, вероятно, зависит от нагрузочных режимов и требует дополнительного исследования.

Общий уровень вибрации изменяется по графику, близкому к экспоненциальной зависимости, с уровнем корреляции $R^2$ = 0,99. Причем доля вибрации на оборотной частоте в общем уровне вибрации с наработкой более 40 000 ч снижается (см. рис. 11).

Повышение ресурса приводных станций, основанное на моделях предельного состояния, включающего диагностические признаки вибрации и температуры, реализуется при комбинированном подходе. Комбинированный подход включает стационарные системы мониторинга уровня вибрации и температуры, а также электрических параметров (ток, напряжение, сопротивление изоляции), системы периодических осмотров (проверка наличия кожухов, ограждений, протяжка крепежа и т.п.), дополняемых контрольными измерениями вибрации, тепловых параметров и параметров смазочного масла.

Практика показывает, что рекомендуемая в процессе эксплуатации периодичность контрольных измерений диагностических признаков приводных станций, в зависимости от данных стационарных систем мониторинга, должна составлять:

- для зоны D «предельное состояние» — не более 7 суток;
- для зоны C «ограниченно годен» — не более 1 месяца;
- для зоны B «допустимо» — не более 3 месяцев.

Совершенствование технического обслуживания приводных станций базируется на предиктивном техническом сервисе, учитывающем максимальное количество диагностических признаков и анализ темпов их изменения, а также историю проведенных сервисных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Кузин Е. Г.* Оценка технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров методами неразрушающего контроля: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Кемерово: КузГТУ, 2020. — 20 с.

2. *Лагерев А. В.*, *Толкачев Е. Н.*, *Гончаров К. А.* Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров: Монография. — Брянск: РИО БГУ, 2017. — 384 с.

3. *Лагерев А. В.*, *Толкачев Е. Н.*, *Бословяк П. В.* Проектирование и исследования конвейеров с подвесной грузонесущей лентой. — Брянск: РИО БГУ, 2016. — 303 с.

4. *Андреева Л. И.* Выбор стратегии ремонтного обслуживания горной техники // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2021. — № 4. — С. 83—91. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91.

5. *Андреева Л. И.*, *Данилкин А. А.* Оценка факторов, оказывающих влияние на работоспособность техники, работающей в условиях развития горнотехнических систем // Горное оборудование и электромеханика. — 2023. — № 4(168). — С. 20—27. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27.

6. *Кузин Е. Г.* О влиянии расположения приводных редукторов в схеме конвейера на степень их износа / Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции. — Прокопьевск, 2014. — С. 49—52.

7. *Кузин Е. Г.*, *Герике Б. Л.* Диагностика технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 8. — С. 7—55. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-47-55.

8. *Реутов А. А.*, *Мясников А. А.* Управление приводами ленточных конвейеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2006. — № 2. — С. 250—254.

9. *Реутов А. А.* Моделирование стационарных режимов работы многоблочных приводов ленточных конвейеров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 2(62). — С. 40—47. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).40-47.

10. *Gerike B., Drozdenko Yu., Kuzin E., Ananyin I., Kuziev D.* Formation of comprehensive service system of belt conveyor gearboxes // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 41, article 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103011.

11. *Кулай С. В.* Разработка методики оценки социально-экономического положения моно-профильных муниципальных образований // Экономика и предпринимательство. — 2021. — № 12(137). — С. 399—404. DOI: 10.34925/EIP.2021.137.12.078.

12. *Burduk A., Więcek D., Zajačko I., Jurdziak L., Błażej R.* Analysis and risk assessment of the supply of copper ore in the belt conveyor system in an underground mine // Acta Montanistica Slovaca. 2020, vol. 25, no. 2, pp. 236—249. DOI: 10.46544/AMS.v25i2.10.

13. *Семыкина И. Ю.*, *Тарнецкая А. В.* Система управления электроприводом ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана // Горное оборудование и электромеханика. — 2019. — № 1(141). — С. 47—53. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-47-53.

14. *Blazej R., Jurdziak L., Kirjanów-Błażej A., Kozłowski T.* Identification of damage development in the core of steel cord belts with the diagnostic system // Scientific Reports. 2021, no. 11, article 12349. DOI: 10.1038/s41598-021-91538-z.

15. *Nikitin Y., Božek P., Turygin A.* Vibration diagnostics of spiroid gear // Management Systems in Production Engineering. 2022, vol. 30, no. 1, pp. 69—73. DOI: 10.2478/mspe-2022-0009.

16. *Karpov D., Pavlov M., Mukhametova L., Mikhin A.* Features and results of assessment the thermal conductivity of building materials and products by the active method of thermal non-destructive testing // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 220, article 01053. DOI: 10.1051/e3sconf/202022001053.

17. *Capone M., Guelpa E., Verda V.* Numerical model for the analysis of thermal transients in district heating networks // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 197, article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202019701004.

18. *Kumaraguru Prabakar* Testing and evaluation methods for protection systems / Power System Protection in Future Smart Grids Achieving Reliable Operation with Renewable Energy, Electric Vehicles and Distributed Generation. 2024, pp. 167—188. DOI: 10.1016/B978-0-323-91780-3.00002-7.

19. *Kassi Koutoua, Fofana Issouf, Meghnefi Fethi, Yéo Zié* Impact of local overheating on conventional and hybrid insulations for power transformers // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 2015, vol. 22, no. 5. DOI: 10.1109/TDEI.2015.005065.

20. *Hemmati R., Wu F., El-Refaie A.* Survey of insulation systems in electrical machines / IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC 2019). 2019, San Diego, USA, pp. 2069—2076. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785099. ГИАБ

## REFERENCES

1. Kuzin E. G. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya reduktorov shakhtnykh lentochnykh konveyerov metodami nerazrushayushchego kontrolya* [Assessment of the technical condition of gearboxes of mine belt conveyors by non-destructive testing methods], Candidate's thesis, Kemerovo, KuzGTU, 2020, 20 p.

2. Lagerev A. V., Tolkachev E. N., Goncharov K. A. *Modelirovanie rabochikh protsessov i proektirovanie mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov*: Monografiya [Modeling of work processes and design of multi-drive belt conveyors, Monograph], Bryansk, RIO BGU, 2017, 384 p.

3. Lagerev A. V., Tolkachev E. N., Boslovyak P. V. *Proektirovanie i issledovaniya konveyerov s podvesnoy gruzonesushchey lentoy* [Design and research of conveyors with suspended load-bearing belt], Bryansk, RIO BGU, 2016, 303 p.

4. Andreeva L. I. The choice of a strategy for the repair maintenance of mining equipment. *Minerals and Mining Engineering*. 2021, no. 4, pp. 83—91. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91.

5. Andreeva L. I., Danilkin A. A. Assessment of factors influencing the performance of equipment operating in the conditions of development of mining engineering systems. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2023, no. 4(168), pp. 20—27. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27.

6. Kuzin E. G. On the influence of the location of drive gearboxes in the conveyor scheme on the degree of their wear. *Perspektivy innovatsionnogo razvitiya ugol'nykh regionov Rossii: Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects for innovative development of coal regions of Russia: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference], Prokop'evsk, 2014, pp. 49—52. [In Russ].

7. Kuzin E. G., Gerike B. L. Technical diagnosis of mine belt conveyor gearbox. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 8, pp. 47—55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-47-55.

8. Reutov A. A., Myasnikov A. A. Control of belt conveyor drives. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2006, no. 2, pp. 250—254. [In Russ].

9. Reutov A. A. Modeling of stationary modes of operation of multiblock drives of belt conveyors. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2019, no. 2(62), pp. 40—47. [In Russ]. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).40-47.

10. Gerike B., Drozdenko Yu., Kuzin E., Ananyin I., Kuziev D. Formation of comprehensive service system of belt conveyor gearboxes. *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 41, article 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103011.

11. Kulai S. V. Development of a methodology for assessing the socio-economic situation of single-industry municipalities. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2021, no. 12(137), pp. 399—404. [In Russ]. DOI: 10.34925/EIP.2021.137.12.078.

12. Burduk A., Więcek D., Zajačko I., Jurdziak L., Błażej R. Analysis and risk assessment of the supply of copper ore in the belt conveyor system in an underground mine. *Acta Montanistica Slovaca*. 2020, vol. 25, no. 2, pp. 236—249. DOI: 10.46544/AMS.v25i2.10.

13. Semykina I. Yu., Tarnetskaya A. V. The control system for the electric drive of a belt conveyor based on a gearless synchronous motor drum. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019, no. 1(141), pp. 47—53. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-47-53.

14. Blazej R., Jurdziak L., Kirjanów-Błażej A., Kozłowski T. Identification of damage development in the core of steel cord belts with the diagnostic system. *Scientific Reports*. 2021, no. 11, article 12349. DOI: 10.1038/s41598-021-91538-z.

15. Nikitin Y., Božek P., Turygin A. Vibration diagnostics of spiroid gear. *Management Systems in Production Engineering*. 2022, vol. 30, no. 1, pp. 69—73. DOI: 10.2478/mspe-2022-0009.

16. Karpov D., Pavlov M., Mukhametova L., Mikhin A. Features and results of assessment the thermal conductivity of building materials and products by the active method of thermal non-destructive testing. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 220, article 01053. DOI: 10.1051/e3sconf/202022001053.

17. Capone M., Guelpa E., Verda V. Numerical model for the analysis of thermal transients in district heating networks. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 197, article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202019701004.

18. Kumaraguru Prabakar Testing and evaluation methods for protection systems. *Power System Protection in Future Smart Grids Achieving Reliable Operation with Renewable Energy, Electric Vehicles and Distributed Generation*. 2024, pp. 167 – 188. DOI: 10.1016/B978-0-323-91780-3.00002-7.

19. Kassi Koutoua, Fofana Issouf, Meghnefi Fethi, Yéo Zié Impact of local overheating on conventional and hybrid insulations for power transformers. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. 2015, vol. 22, no. 5. DOI: 10.1109/TDEI.2015.005065.

20. Hemmati R., Wu F., El-Refaie A. Survey of insulation systems in electrical machines. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC 2019)*. 2019, San Diego, USA, pp. 2069 – 2076. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785099.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Кузин Евгений Геннадьевич* — канд. техн. наук, доцент,
доцент, Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске,
e-mail: kuzinevgen@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-8737-7577,
*Герике Борис Людвигович* — д-р техн. наук,
профессор, главный научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр угля
и углехимии Сибирского отделения РАН,
Институт угля СО РАН, e-mail: gbl_42@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9586-8723,
*Захаров Александр Юрьевич* — д-р техн. наук,
профессор, профессор, Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
e-mail: zaharovAU@kuzstu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1690-5069.
**Для контактов**: Кузин Е.Г., e-mail: kuzinevgen@gmail.com.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.G. Kuzin*, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Assistant Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State
Technical University, Prokopyevsk Branch,
653039, Prokopyevsk, Russia,
e-mail: kuzinevgen@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-8737-7577,
*B.L. Gerike*, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Chief Researcher, Federal Research Center for Coal
and Coal Chemistry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Institute of Coal SB RAS, 650065, Kemerovo,
Russia, e-mail: gbl_42@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9586-8723,
*A.Y. Zakharov*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
653000, Kemerovo, Russia, e-mail: zaharovAU@kuzstu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1690-5069
**Corresponding author**: E.G. Kuzin, e-mail: kuzinevgen@gmail.com.

Получена редакцией 27.02.2024; получена после рецензии 01.04.2024; принята к печати 10.07.2024.
Received by the editors 27.02.2024; received after the review 01.04.2024; accepted for printing 10.07.2024.