УДК 622.621.311.21

Шевченко Никита Анатольевич, аспирант, Плащинский Вячеслав Алексеевич, доцент, Иванов Сергей Леонидович, профессор

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Nikita Anatolyevich Shevchenko, PhD student, Vyacheslav Alekseevich Plashchinsky, Associate Professor, Sergey Leonidovich Ivanov, Professor

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

ПРИНИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ СМАЗЫВАНИЯ ДРОБИЛЬНО-СОРТРОВОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ

DESIGN PRINCIPLES OF AN ADAPTIVE LUBRICATION SYSTEM FOR CRUSHING AND SCREENING COMPLEXES UNDER SIBERIAN CONDITIONS

Аннотация

В статье рассмотрены предпосылки перехода от регламентированной подачи смазочных материалов к управлению смазыванием по фактическому состоянию узлов дробильно-сортировочных комплексов. Предложена четырехуровневая архитектура системы смазывания, объединяющая защиту поверхностей трения, подготовку и подачу смазочного материала, диагностический контроль и расчетное сопровождение работы оборудования. Определенны возможности использования анализа масла, вибродиагностики и методов машинного обучения. Предложение носит концептуальный характер, его эффективность должна быть установлена при стендовых испытаниях и опытно-промышленной эксплуатации.

Abstract

The article discusses the rationale for transitioning from scheduled lubricant supply to condition-based lubrication management of the components in crushing and screening complexes. A four-level architecture of the lubrication system is proposed, integrating friction surface protection, lubricant preparation and supply, diagnostic monitoring, and computational support for equipment operation. The potential for using oil analysis, vibration diagnostics, and machine learning methods is identified. The proposal is conceptual in nature, and its effectiveness must be verified through bench testing and pilot industrial operation.

Введение

Конкурентоспособность горнодобывающих предприятий Сибири и Кузбасса напрямую зависит от надежности дробильно-сортировочных комплексов (ДСК). На это оборудование приходится свыше 40 % капитальных и более 60 % эксплуатационных затрат [1]. При экстремально

низких температурах (до -50°С), воздействии абразивной пыли и влаги из систем гидрообеспыливания традиционная система планово-предупредительных ремонтов (ППР) исчерпала свои возможности. По статистике, некачественное смазывание вызывает около 80 % повреждений подшипников, а ошибки в этом процессе приводят к 64 % всех отказов [2]. Внеплановые простои составляют до 20 % операционных затрат. Внезапные аварии, в том числе заклинивание эксцентриков и разрушение станин, создают прямые риски для промышленной безопасности. Цель работы - обосновать переход к адаптивной системе смазывания ДСК и предложить ее структуру, которая станет основой цифрового двойника и позволит качественно повысить безопасность производства.

Постановка проблемы

Надежность трибоузлов ДСК снижается прежде всего из-за скрытой физико-химической деградации смазочного материала и разрушения гидродинамического клина при ударных нагрузках, превышающих номинальные значения в 1,6-1,8 раза [3]. Влага из систем гидрообеспыливания катализирует распад противоизносных присадок. В то же время субмикронные частицы загрязнений реагируют с активными элементами масла и образуют твердые абразивные фосфаты [4]. При этом вязкость является запаздывающим индикатором: обводнение масла до 2,0 % может протекать на фоне нормальной вязкости, но при этом необратимо разрушает трибопленку [5]. Существующие автоматизированные централизованные системы смазки (АЦСС) работают по жесткому, заранее заданному алгоритму. Они не могут диагностировать текущее состояние узла или интерпретировать изменения параметров смазывания в реальном времени [2]. Модели процесса дробления и трибологические модели узлов трения при этом не связаны между собой. Без такой связи невозможно прогнозировать пиковые нагрузки и подстраивать под них подачу смазки.

Предлагаемые решения

Для карьерных условий Сибири предложена четырехуровневая адаптивная система смазывания. Она объединяет трибологические решения, предиктивную аналитику и киберфизические технологии.

Первые два уровня отвечают за физико-химическую защиту узлов. Для эксцентриковых подшипников конусных дробилок применяют ультразвуковую нанокристаллическую модификацию (UNSM) баббитовых сплавов с легированием 0,08 % иттрия. Такая обработка повышает пластичность материала до 43,5 % и снижает износ на 20-32 % [6, 7]. Для автоматизированных централизованных систем смазки (АЦСС), работающих в условиях Крайнего Севера, рекомендованы сульфонат-кальциевые смазки. Они сохраняют прокачиваемость при температурах до -45°С. Предпусковой подогрев масла до 60-80°С оптимизирует

гидродинамику узла и гарантирует образование прочной адсорбционной пленки еще на холостом ходу горной машины.

Третий уровень объединяет управление чистотой смазочных материалов (LCM) и предиктивную аналитику. Вместо традиционной линейной экстраполяции здесь применяют интегральные алгоритмы машинного обучения: XGBoost и Random Forest. SHAP-анализ показал, что главный индикатор предотказного состояния - кинематическая вязкость при 100°C (значение SHAP ≈ 0,9), а не концентрация железа. По этому показателю можно своевременно выявить химическую деградацию масла и предотвратить механическое разрушение узлов [5]. Обратную связь в контуре управления обеспечивают AIoT-модули на базе алгоритма Gradient Boosting Regressor. Они контролируют целостность смазочных магистралей в реальном времени [2]. Для вибродиагностики грохотов используют вейвлет-фильтрацию с биортогональным вейвлетом bior2.2. Она эффективно подавляет негауссовский импульсный шум, который возникает при падении горной породы [8].

Четвертый уровень системы предполагает создание цифрового двойника. Для этого калиброванную модель Уиттена для конусных дробилок объединяют с данными подсистемы LCM. Модель прогнозирует гранулометрический состав (P80) с погрешностью менее 2 % [9]. Цифровой двойник на ее основе прогнозирует загрузку дробилки и рассчитывает пиковые нагрузки на подшипниковые узлы. По результатам расчетов система адаптивно корректирует подачу смазки и предотвращает срыв гидродинамического масляного клина.

Баланс продуктов изнашивания, накапливающихся в масле, описывает уравнение:

$$\frac{dM_\omega}{dt} = m_\pi - m_\beta, \qquad (1)$$

где M_ω - масса продуктов изнашивания в масляной системе, m_π - интенсивность их образования (поступления), m_β - скорость их удаления из системы [10]. Переход к техническому обслуживанию по фактическому состоянию согласно методологии RCM II позволяет обоснованно и безопасно увеличивать межсервисные интервалы замены масла [5].

Обеспечение промышленной безопасности

Адаптивная система существенно повышает промышленную безопасность. Предиктивная диагностика выявляет деградацию смазки в P-F интервале - от потенциального до функционального отказа. Это позволяет предотвратить катастрофические сценарии: переход подшипника скольжения в режим сухого трения, заклинивание главного вала с медной втулкой при росте тока двигателя свыше 260 А [3] и последующее разрушение станины дробилки с выбросом фрагментов. Мониторинг на базе

AIoT предотвращает перегрев и возгорание масла при частичной закупорке магистралей. Обслуживание по фактическому состоянию в сочетании с контурной (kidney-loop) фильтрацией также существенно сокращает объем отработанных масел и снижает экологическую нагрузку на территорию карьера.

Заключение

Разработанная адаптивная система смазывания ДСК объединена с цифровым двойником на базе модели Уиттена и AIoT-модулями. Она решает критические задачи эксплуатации оборудования в суровых условиях Сибири. Предложенные решения повышают коэффициент технической готовности (КТГ) с 0,85 до 0,96. Экономический эффект складывается из снижения удельных затрат на ТОиР с 1054 до 522 руб./т и сокращения расхода смазочных материалов на 16,6 % [11]. Переход к предиктивному обслуживанию существенно снижает риски катастрофических отказов, повышает промышленную безопасность и уменьшает экологическую нагрузку на территорию карьера.

Список литературы

1. Бочкова К. В., Потапов В. Я., Комиссаров А. П. и др. Повышение эффективности дробильного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 6 (176). – С. 15-25. DOI:10.26730/1816-4528-2024-6-15-25.

2. Khumaidi A., Darmawan R., Aditya L., Hamka W. H., Al Jihad H. Smart autolube: Optimized machine learning-based pressure prediction for AIoT lubrication systems // Applied Computer Science. – 2026. – Vol. 22, no. 1. – P. 171-183. DOI:10.35784/acs_7947.

3. Белов Н. В., Бородина М. Б., Смирнова О. А., Часовских А. С. Анализ отказов элементов конусных дробилок и причин их возникновения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3. – С. 17-27. DOI:10.25018/0236-1493-2021-3-0-17-27.

4. Cortes-Morales M.C., Benavides V., Naveira Suarez A., Larsson R., Marklund P. Qualitative Analysis of Submicron Particles in Degraded Lubricant // Tribology Transactions. – 2025. – Vol. 68, № 3. – P. 690-700. DOI:10.1080/10402004.2025.2503842.

5. Chambi N., Sanga C., Sanga A. et al. Machine Learning-Based Oil Analysis for Underground Mining Equipment // Signals. – 2026. – Vol. 7, 58. DOI:10.3390/signals7030058.

6. Ren X., Chang Y., Chen S., Chen N., Shi Z., Zhang Y., Chen H., Guo Z., Hu J., Zhang G., Xu H. Effect of Rare Earth Y on the Microstructure, Mechanical Properties and Friction of Sn-Babbitt Alloy // Coatings. – 2024. – Vol. 14, no. 10. – 1325. DOI:10.3390/coatings14101325.

7. Amanov A., Ahn B., Lee M. G., Jeon Y., Pyun Y.-S. Friction and Wear Reduction of Eccentric Journal Bearing Made of Sn-Based Babbitt for Ore

Cone Crusher // Materials. – 2016. – Vol. 9, no. 11. – Art. 950. DOI:10.3390/ma9110950.

8. Duda-Mróz N., Anufriev S., Stefaniak P. Application of Wavelet Filtering to Vibrational Signals from the Mining Screen for Spring Condition Monitoring // Minerals. – 2021. – Vol. 11, 1076. DOI:10.3390/min11101076.

9. Duarte R. A., Yamashita A. S., da Silva M. T. et al. Calibration and Validation of a Cone Crusher Model with Industrial Data // Minerals. – 2021. – Vol. 11, 1256. DOI:10.3390/min11111256.

10. Mamaeva M., Kuzin E. Development of Innovative Methods for the Assessment of the Technical Condition of the Gearboxes of the Mine Belt Conveyors in the Parameters of the Lubricating Oil // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 297. – Art. 03006. DOI:10.1051/matecconf/201929703006.

11. Ackah A. M., Nyarko F. K. A., Ghosh T. et al. Enhancing Mining Equipment Reliability and Lubrication Cost Optimization through Oil Analysis-Based Predictive Maintenance // World Journal of Engineering and Technology. – 2026. – Vol. 14, no 3. – P. 560-575. DOI:10.4236/wjet.2026.143034.