

Научная статья

УДК 622.6:629.423.32:62-533.7

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-14-21

Кипервассер Михаил Вениаминович¹, Аниканов Дмитрий Сергеевич²,
Семыкина Ирина Юрьевна^{2,*}, Захарова Алла Геннадьевна²

¹ Сибирский государственный индустриальный университет² Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: arinasemykina@gmail.com

ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ В МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ МЕТОДОМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ТОКОВ ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**Информация о статье**

Поступила:

06 июня 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 июня 2025 г.

Принята к печати:

01 сентября 2025 г.

Опубликована:

09 октября 2025 г.

Ключевые слова:

ленточный конвейер, заклинивание роликов, диагностика неисправности, асинхронный электродвигатель, ток статора, вейвлет-анализ

Аннотация.

Интенсивные механические нагрузки, характерные для ленточных конвейеров, значительно увеличивают риск поломок, что приводит к значительным финансовым затратам на ремонт и реконструкцию оборудования. В данной статье рассматривается метод диагностики неисправностей роликов ленточных конвейеров с использованием анализа токов приводного асинхронного электродвигателя. Для выявления аварийных режимов работы ленточных транспортеров предлагается применять вейвлет-анализ токовых сигналов. Вейвлет-преобразование позволяет осуществлять частотно-временной анализ нестационарных сигналов, что обеспечивает возможность выявления признаков аварийных ситуаций даже в условиях высокой зашумленности, характерной для реальных условий эксплуатации. Исследование проведено с использованием математического и компьютерного моделирования. Разработана математическая модель ленточного конвейера как электромеханической системы, включающая восьмимассовую механическую модель и двухфазную модель асинхронного электродвигателя. Модель реализована в среде Matlab/Simulink. Анализ токов статора выполнен при возникновении аварийной ситуации, связанной с заклиниванием опорных роликов грузонесущей части. Исследование проведено на примере ленточного конвейера типа НЕ-К с приводным электродвигателем мощностью 22 кВт. Результаты показали, что колебательные процессы в сигнале тока зависят от количества заклиненных роликов, а также от амплитуды и периода колебаний. Установлено, что мгновенное заклинивание ролика приводит к локальному всплеску тока, который демпфируется инерционными элементами системы. Вейвлет-разложение позволяет эффективно выявлять и диагностировать такие аварийные ситуации.

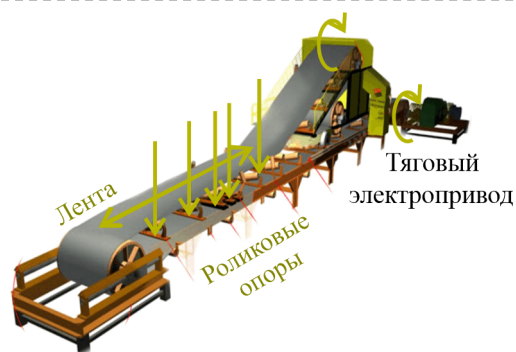
Для цитирования: Кипервассер М.В., Аниканов Д.С., Семыкина И.Ю., Захарова А.Г. Диагностика неисправностей в механической части ленточных конвейеров методом вейвлет-анализа токов приводного электродвигателя // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 5 (181). С. 14-21. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-14-21, EDN: YZBISZ

Введение

Ленточные конвейеры различной мощности, производительности и протяженности являются одним из основных элементов транспортной инфраструктуры предприятий минерально-сырьевого комплекса [1, 2]. От надежной работы этих агрегатов напрямую зависят производительность и другие экономические показатели работы предприятия в целом [3, 4].

Работа узлов и агрегатов ленточных конвейеров сопровождается интенсивным воздействием меха-

нических нагрузок, что неизбежно приводит к уменьшению времени полезного использования, увеличению затрат на ремонты и реконструкцию оборудования. Степень внезапности и сложности повреждения определяет продолжительность простоя оборудования, затраты на ремонт и размер операционных затрат на восстановительный ремонт оборудования [5]. В этой связи рациональным образом организованная диагностика состояния эксплуатируемого оборудования является одним из



Привод натяжения

Рис. 1. Конструкция ленточного конвейера

Fig. 1. Belt conveyor design

условий бесперебойной работы агрегатов и предприятия в целом [6, 7].

Многие исследования в области диагностики ленточных конвейеров направлены на разработку методов предиктивной диагностики, в том числе с применением искусственного интеллекта [8-10], однако задача разработки средств диагностирования отдельных неисправностей не потеряла своей актуальности [11-14].

Особенностью ленточных конвейеров предприятий минерально-сырьевого комплекса являются сложные условия эксплуатации, включающие за-

пыленность, шумы и вибрацию, спровоцированные резкопеременными нагрузками при добыче и транспортировке полезных ископаемых, а также работой крупного близкорасположенного оборудования. Все эти факторы снижают надежность методов диагностики неисправностей, основанных на измерительных сигналах датчиков, расположенных непосредственно на конвейере. Альтернативным подходом является использование в качестве источника диагностической информации электрических сигналов приводного двигателя. Такой косвенный метод применяется для диагностирования неисправностей различного механического оборудования [15, 16], в том числе для ленточных конвейеров [17]. Совершенствование этого подхода является задачей данной работы.

Методы

Метод диагностики повреждений элементов механической части ленточного конвейера, описанный в [17], основан на электромеханической взаимосвязи между отдельными элементами конструкции (Рис. 1) через конвейерную ленту и приводной механизм, включающий редуктор и электродвигатель. Неисправности в механизме вызывают изменение сил сопротивления на отдельных участках, что отражается в изменении момента на валу головного барабана и, соответственно, на валу электродвигателя. Эти изменения электромагнитного момента двигателя проявляются в изменении тока

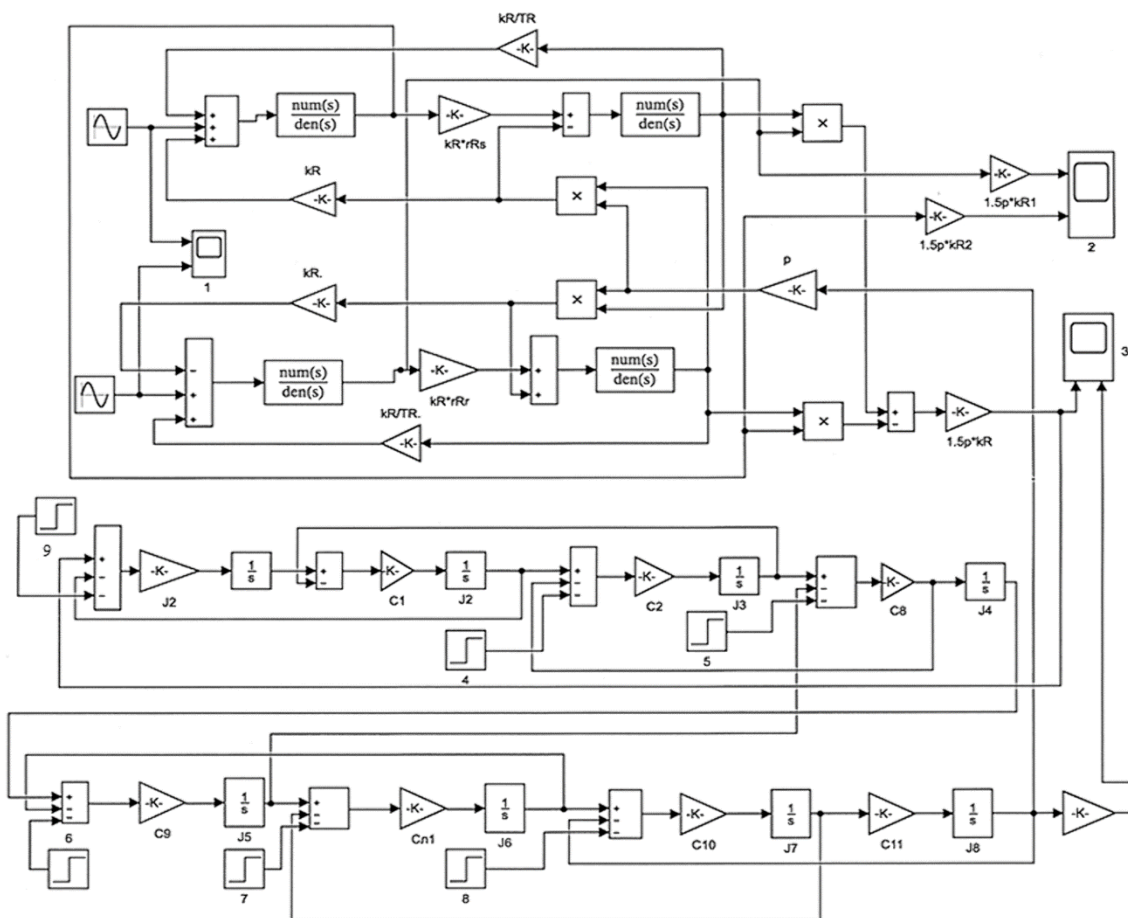


Рис. 2. Компьютерная модель электромеханической части ленточного конвейера

Fig. 2. Computer model of the electromechanical part of the belt conveyor

статора. Таким образом, контроль аварийных ситуаций в механической части ленточного конвейера осуществляется путем анализа токов приводных асинхронных электродвигателей.

В силу сложности, нелинейности и многокомпонентности системы переходные процессы тока статора асинхронного электродвигателя при возникновении аварийных режимов имеют сложную форму, при этом выделение диагностических признаков при малых амплитудах и периодах гармонической составляющих является сложной технической задачей. Инструментом для решения может выступать метод оконного преобразования Фурье и вейвлет-анализ. Однако следует учитывать, что для точного воспроизведения нестационарных сигналов требуется бесконечное количество гармонических составляющих. При анализе периодических сигналов, таких как меандр, эффект Гиббса, проявляющийся в виде осцилляций вблизи разрывов функции, не устраняется с увеличением числа гармоник, однако частота этих осцилляций возрастает, что приводит к уменьшению их амплитуды [18]. В таких условиях результаты применения оконного преобразования Фурье обычно содержат существенные по величине погрешности, так как невозможно получить одновременное хорошее разрешение по времени и частоте, и улучшение одного из параметров приводит к ухудшению другого [19], а применение вейвлет-анализа позволяет производить частотно-временной анализ нестационарных процессов с достаточной точностью, благодаря чему применяется в диагностике неисправностей для других типов электромеханического оборудования [20, 21].

Исходя из сказанного, наиболее подходящим методом косвенной диагностики повреждений элементов механической части ленточного конвейера будет непрерывное прямое вейвлет-преобразование токов статора приводного электродвигателя.

Непрерывное прямое вейвлет-преобразование производится на основе следующего выражения:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \alpha^{-1/2} \psi \left(\frac{(t-a)}{b} \right) dt, \quad (1)$$

где $C(a, b)$ – вейвлет-коэффициенты; a – параметр масштаба; b – параметр времени; $\Psi_{a,b}$ – базисная функция.

Условие конечности ограничивает набор функций, которые можно использовать в качестве вейвлетов:

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} \right) d\omega < \infty. \quad (2)$$

В рамках данной работы вейвлет-преобразование токов статора производилось с помощью инструментов вейвлет-анализа, реализованных в Wavelet Toolbox программного пакета Matlab.

Результаты и обсуждение

Для проведения исследований использовался метод компьютерного моделирования. С учетом рекомендаций [22] разработана математическая

модель электромеханической системы ленточного конвейера, включающая восьмимассовую модель механической подсистемы и двухфазную модель асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат.

Модель реализована в Matlab Simulink (Рис. 2). Аварийные режимы имитируются путем ступенчатого увеличения момента сопротивления, прикладываемого к одной из сосредоточенных масс модели, соответствующей месту возникновения неисправности. Модель позволяет имитировать заклинивание опорных грузонесущих роликов, заштыбровку приемного бункера, глухое заклинивание редуктора, поломку чистителя ленточного полотна и нарушение соосности передач редуктора. В качестве объекта для исследования выбран ленточный конвейер типа НЕ-К с приводным электродвигателем мощностью 22 кВт.

Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим вейвлет-анализ токов статора при возникновении аварийной ситуации заклинивания опорных роликов. В качестве вариантов вейвлетов рассматривались вейвлеты Хаара, симлеты, биортогональные вейвлеты и др. Наиболее детальное разложение токового сигнала было получено в результате применения метода Мейера. Результаты вейвлет-преобразования амплитуды обобщенного вектора тока статора для рассматриваемого аварийного режима приведены на Рис. 3, где обозначено: I_{ds} – исходный токовый сигнал; a_5 – тренд токового сигнала; d_1 – токовый сигнал с коэффициентом детализации 2300; d_2 – токовый сигнал с коэффициентом детализации 1195; d_3 – токовый сигнал с коэффициентом детализации 628; d_4 – токовый сигнал с коэффициентом детализации 344.

Анализ поведения отдельных составляющих амплитуды обобщенного вектора тока статора при заклинивании разного количества опорных роликов ленточного конвейера на графиках с разным детализирующим коэффициентом показал, что при возникновении аварийной ситуации в случае последовательного заклинивания одного, двух и трех опорных роликов грузонесущей части ленточного конвейера в сигнале тока появляется колебательный процесс контролируемой величины. При этом основными отличительными признаками сигналов тока статора на всех кривых с различными детализирующими коэффициентами (d_1 – d_5) является амплитуда и период колебаний. При этом для кривых (d_1 , d_2) значение амплитуды больше, чем для кривых (d_4 , d_5). Период колебаний исследуемого сигнала больше для кривых (d_4 , d_5). Очевидно, что сигнал на уровнях (d_4 , d_5) наиболее информативен и дает представление о диагностическом признаке.

Конкретные значения составляющих тока статора при моделировании аварийных режимов представлены в Таблице 1.

Аналогичный вейвлет-анализ тока статора выполнен и при моделировании оставшихся неисправностей ленточного конвейера, при этом наибольшую информативность продемонстрировали составляющие (d_2 , d_5).

Для реализации предлагаемого подхода к диагностированию неисправностей механической части ленточного конвейера из полученных результатов была сформирована библиотека, где характерным значениям для каждого признака соответствует определенная неисправность.

Заключение

Изменение во времени отдельных составляющих амплитуды обобщенного вектора тока статора приводного асинхронного электродвигателя ленточного конвейера, полученных с помощью вейвлет-преобразования методом Мейера, в случае неисправности на всех уровнях разложения имеет колебательный характер с последующим затуханием и переходом к нормальному режиму. Это связано с тем, что маховая масса неисправного элемента, в частности заклиненного ролика, несоизмеримо мала по сравнению с маховой массой всей механической подсистемы ленточного конвейера. По этой причине неисправность провоцирует локальный всплеск, который в дальнейшем демпфируется.

С использованием характерных значений составляющих тока в работе для каждого признака получены критерии возникновения аварийных событий в механической части ленточного конвейера, таких как заштыбровка приемного бункера, нарушение соосности передач редуктора или биение в опорных подшипниках шестерней, поломка чистителя, срезание «пальцев» соединительной муфты, глухое заклинивание редуктора, заклинивание ро-

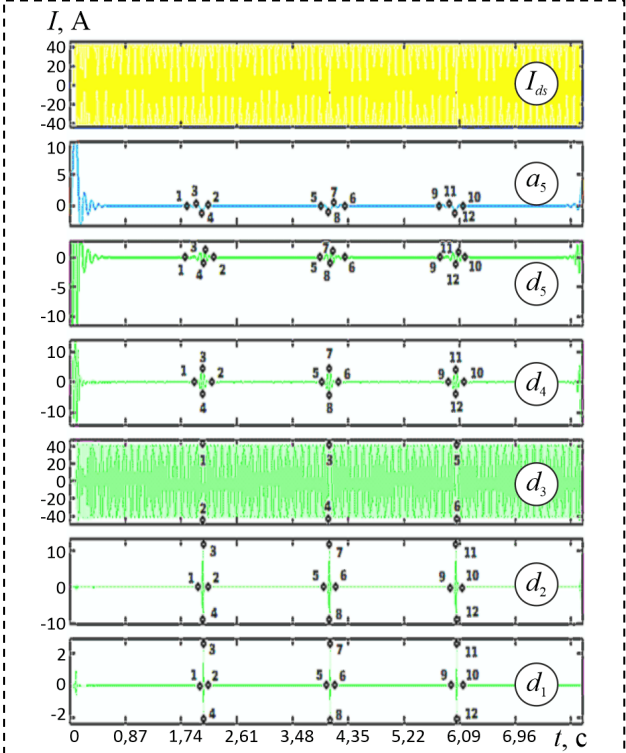


Рис. 3. Ток статора при заклинивании опорных роликов и его разложение на составляющие
Fig. 3. Stator current under jamming of support rollers and its decomposition into components

Таблица 1. Значения составляющих сигнала в характерных точках при моделировании заклинивания роликов грузонесущей части ленточного конвейера
Table 1. Values of signal components at characteristic points when simulating jamming of rollers of the load-bearing part of a belt conveyor

Составляющие тока статора								
Величина			a_5	d_5	d_4	d_3	d_2	d_1
Точки на графиках (рис. 3) в моменты заклинивания роликов грузонесущей ветви ленточного конвейера	1	t, c	1.06	1.06	1.94	2.06	2	2.05
		I, A	0	0	0	44.28	0	0
	2	t, c	2.49	2.49	2.31	2.07	2.15	2.12
		I, A	0	0	0	-46.88	0	0
	3	t, c	1.98	2.12	2.06	4.04	2.08	2.09
		I, A	0.27	0.99	3.98	44.28	13.17	2.93
	4	t, c	2.06	2.08	2.08	4.02	2.08	2.08
		I, A	-0.86	-1.06	-4.48	-46.54	-9.94	-2.31
	5	t, c	3.78	3.78	3.9	6.03	3.98	4
		I, A	0	0	0	44.28	0	0
	6	t, c	4.62	4.62	4.28	6.02	4.13	4.1
		I, A	0	0	0	-46.88	0	0
	7	t, c	4.12	4.09	4.02	-	4.05	4.07
		I, A	0.32	1.17	3.84	-	13.38	2.94
	8	t, c	4.05	4.05	4.04	-	4.05	4.05
		I, A	-0.83	-0.98	-4.44	-	-10.02	-2.36
	9	t, c	5.51	5.51	5.86	-	5.97	5.99
		I, A	0	0	0	-	0	0
	10	t, c	6.41	6.41	6.23	-	6.11	6.08
		I, A	0	0	0	-	0	0
	11	t, c	5.94	6.06	6.02	-	6.03	6.03
		I, A	0.32	1.02	3.84	-	13.38	2.94
	12	t, c	6.03	6.03	6.05	-	6.03	6.03
		I, A	-0.86	-1.03	-4.39	-	-10.06	-2.36

ликов грузонесущей части. Таким образом, на основе вейвлет-анализа тока статора ленточного конвейера может быть построена эффективная система косвенного диагностирования неисправностей механических элементов ленточного конвейера.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu X., Zhang X., Wang L., Qu F., Shao A., Zhao L., Wang H., Yue X., Li Y., Yan W., He J. Research progress and prospects of intelligent technology in underground mining of hard rock mines // Green and Smart Mining Engineering. 2024. Vol. 1. № 1. Pp. 12–26.
2. Zeng B., Yang X., Hu P., Wang Y., Dong H., Gong D., Ye X. Towards a Digitally Enabled Intelligent Coal Mine Integrated Energy System: Evolution, Conceptualization, and Implementation // Technologies and Assessments. 2024. Vol. 73. P. 104128.
3. Hrabovsky L., Fedorko G., Molna, V. Measurement of the Bulk Material Distribution Length on a Conveyor Belt Surface Guided on a Three-roller Idler Housing // Measurement. 2025. Vol. 253. P. 117849.
4. Gunckel P. V., Lobos G., Rodríguez F. K., Bustos R. M., Godoy D. Methodology Proposal for the Development of Failure Prediction Models Applied to Conveyor Belts of Mining Material Using Machine Learning // Reliability Engineering & System Safety. 2025. Vol. 256. P. 110709.
5. Фомичев С. Г., Антонов А. В., Лукьянов И. И. Методика расчета технико-экономических показателей работы конвейерного транспорта // Прорывные научные исследования как двигатель науки: сборник статей Международной научно-практической конференции, Саранск, 03 мая 2016 года. Т. 2. Саранск : ООО «ОМЕГА САЙНС», 2016. С. 55–57.
6. Geitner F. K., Bloch H. P. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting Practical Machinery Management for Process Plants. Vol. 2. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2012. 743 p.
7. Horst Czichos. Handbook of Technical Diagnostics. Fundamentals and Application to Structures and Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 566 p.
8. Yuan C. J., Chung Ee J. Y., Heng C. K., Kumar K., Hong W. S. Long-term Predictive Maintenance System with Application and Commercialization to Industrial Conveyors // Machine Intelligence in Mechanical Engineering. 2023. Pp. 179–191.
9. Shandookh A. A., Farhan Ogaili A. A., Al-Haddad L. A. Failure Analysis in Predictive Maintenance: Belt Drive Diagnostics with Expert Systems and Taguchi Method for Unconventional Vibration Features // Heliyon. 2024. Vol. 10. № 13. P. e34202.
10. Bondoc A. E., Tayefeh M., Barari A. LIVE Digital Twin: Developing a Sensor Network to Monitor the Health of Belt Conveyor System // IFAC-PapersOnLine. 2021. Vol. 55. № 19. Pp. 49–54.
11. Кузин Е. Г. Оценка технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров методами неразрушающего контроля: дис. ... к.т.н. Кемерово, 2020. 141 с.
12. Zhang M., Zhang Y., Zhou M., Jiang K., Shi H., Yu Y., Hao N. Application of Lightweight Convolutional Neural Network for Damage Detection of Conveyor Belt // Applied Sciences. 2020. Vol. 11. № 16. P. 7282.
13. Сайдულიн Е. Г., Рукин М. В., Шелемба И. С., Вожаков И. С., Чеверда В. В. Автоматическое обнаружение неисправных роликов ленточных конвейеров волоконно-оптическим тепловым датчиком ТОРЕКС // Горная промышленность. 2020. № 4. С. 54–57.
14. Захарова А. Г., Захаров А. Ю., Лобур И. А., Шаулева Н. М. Устройство для обнаружения продольного порыва конвейерной ленты с использованием ультразвуковых датчиков // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 4(162). С. 62–70.
15. Gu F., Shao Y., Hu N., Naid A., Ball A. Electrical Motor Current Signal Analysis Using a Modified Bispectrum for Fault Diagnosis of Downstream Mechanical Equipment // Mechanical Systems and Signal Processing. 2010. Vol. 25. № 1. Pp. 360–372.
16. Guan B., Bao X., Qiu H., Yang D. Enhancing Bearing Fault Diagnosis Using Motor Current Signals: A Novel Approach Combining Time Shifting and CausalConvNets // Measurement. 2024. Vol. 226. P. 114049.
17. Аниканов Д. С., Кипервассер М. В., Симаков В. П. Предиктивная диагностика ленточных конвейеров на основе контроля электрических параметров приводного электродвигателя // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2021. № 7. С. 272–277.
18. Гуренко В. В., Климов С. М., Пролетарский А. В., Смирнова Е. В., Сотников А. А., Сюзев В. В. Методы имитации сигналов в научных задачах моделирования информационно-управляющих систем реального времени. М. : ООО «Русайнс», 2021. 326 с.
19. Иванов В. Э., Чье Е. У. Модульные дискретно-аналоговые вейвлет-фильтры. М. : ООО «Издательство «КноРус», 2021. 168 с.
20. He W., Zi Y., Chen B., Wu F., He Z. Automatic Fault Feature Extraction of Mechanical Anomaly on Induction Motor Bearing Using Ensemble Super-wavelet Transform // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 54–55. Pp. 457–480.
21. Tang S., Jiang Y., Su H., Zhu Y. A Fault Identification Method of Hydraulic Pump Fusing Long Short-term Memory and Synchronous Compression Wavelet Transform // Applied Acoustics. 2025. Vol. 232. P. 110553.
22. Лагерева А. В., Толкачев Е. Н., Гончаров К. А. Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров. Брянск: Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского, 2017. 384 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Кипервассер Михаил Вениаминович, доцент, кафедра электротехники, электропривода и промышленной электроники, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.), к.т.н, доцент, e-mail: kipervasser2012@yandex.ru

Аниканов Дмитрий Сергеевич, научный сотрудник, лаборатория цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), аспирант, e-mail: ad988@yandex.ru

Семыкина Ирина Юрьевна, старший научный сотрудник, лаборатория цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), д.т.н, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6874-1735>, e-mail: arinasemykina@gmail.com

Захарова Алла Геннадьевна, профессор, кафедра электропривода и автоматизации, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), д.т.н, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0046-7976>, e-mail: zaharovaag@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Кипервассер Михаил Вениаминович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.

Аниканов Дмитрий Сергеевич – сбор и анализ данных (моделирование).

Семыкина Ирина Юрьевна – концептуализация исследования, написание текста, выводы.

Захарова Алла Геннадьевна – сбор и анализ данных (анализ информативности диагностических признаков).

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-14-21

Mikhail V. Kiperwasser¹, Dmitry S. Anikanov², Irina Yu. Semykina^{2,*}, Alla G. Zakharova²

¹ Siberian State Industrial University

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: arinasemykina@gmail.com

FAULTS DIAGNOSTICS IN THE MECHANICAL PART OF BELT CONVEYORS BY THE WAVELET ANALYSIS OF DRIVE MOTOR CURRENTS



Article info

Received:

06 June 2025

Accepted for publication:

30 June 2025

Accepted:

01 September 2025

Published:

09 October 2025

Keywords: belt conveyor, roller jamming, fault diagnostics,

Abstract.

Intensive mechanical loads typical of belt conveyors significantly increase the risk of breakdowns, leading to significant financial costs for repairing and reconstructing equipment. This article discusses a method for diagnosing belt conveyor roller faults using the analysis of currents of the drive asynchronous electric motor. It is proposed to use wavelet analysis of current signals to identify emergency modes of belt conveyors. Wavelet transform allows for frequency-time analysis of non-stationary signals, which makes it possible to identify signs of emergencies even in high noise conditions typical of real operating conditions. The study was conducted using mathematical and computer modeling. A mathematical model of a belt conveyor as an electromechanical system has been developed, including an eight-mass mechanical model and a two-phase model of an asynchronous electric motor. The model is implemented in the MATLAB/Simulink environment. The analysis of stator currents was performed in the event of an emergency related to the jamming of the support rollers of the load-bearing part. The study was conducted using the example of a belt conveyor of the NE-K type with a 22 kW drive electric motor. The results showed that the oscillatory processes in the current signal depend on the number of jammed

asynchronous electric motor, stator current, wavelet analysis.

rollers, as well as on the amplitude and period of oscillations. It was found that instant jamming of a roller leads to a local surge in current, which is damped by the inertial elements of the system. Wavelet decomposition allows for the effective detection and diagnosis of such emergencies.

For citation: Kiperwasser M.V., Anikanov D.S., Semykina I.Yu., Zakharova A.G. Faults diagnostics in the mechanical part of belt conveyors by the wavelet analysis of drive motor currents. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2025; 5(181):14-21 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-14-21, EDN: YZBISZ

REFERENCES

1. Liu X., Zhang X., Wang L., Qu F., Shao A., Zhao L., Wang H., Yue X., Li Y., Yan W., He J. Research progress and prospects of intelligent technology in underground mining of hard rock mines. *Green and Smart Mining Engineering*. 2024; 1(1):12–26.
2. Zeng B., Yang X., Hu P., Wang Y., Dong H., Gong D., Ye X. Towards a Digitally Enabled Intelligent Coal Mine Integrated Energy System: Evolution, Conceptualization, and Implementation. *Technologies and Assessments*. 2024; 73:104128.
3. Hrabovsky L., Fedorko G., Molna, V. Measurement of the Bulk Material Distribution Length on a Conveyor Belt Surface Guided on a Three-roller Idler Housing. *Measurement*. 2025; 253:117849.
4. Gunckel P.V., Lobos G., Rodríguez F.K., Bustos R.M., Godoy, D. Methodology Proposal for the Development of Failure Prediction Models Applied to Conveyor Belts of Mining Material Using Machine Learning. *Reliability Engineering & System Safety*. 2025. Vol. 256. P. 110709.
5. Fomichev S.G., Antonov A.V., Lukyanov I.I. Methodology for calculating technical and economic indicators of conveyor transport. *Breakthrough scientific research as an engine of science: collection of articles from the International scientific and practical conference*. Saransk, May 3, 2016. Vol. 2. Saransk: OMEGA SCIENCES: 2016. Pp. 55–57.
6. Geitner F. K., Bloch H. P. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting Practical Machinery Management for Process Plants. Vol. 2. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2012. 743 p.
7. Horst Czichos. Handbook of Technical Diagnostics. Fundamentals and Application to Structures and Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 566 p.
8. Yuan C.J., Chung Ee J.Y., Heng C.K., Kumar K., Hong W.S. Long-term Predictive Maintenance System with Application and Commercialization to Industrial Conveyors. *Machine Intelligence in Mechanical Engineering*. 2023. Pp. 179–191.
9. Shandookh A.A., Farhan Ogaili A.A., Al-Haddad L.A. Failure Analysis in Predictive Maintenance: Belt Drive Diagnostics with Expert Systems and Taguchi Method for Unconventional Vibration Features. *Helvion*. 2024; 10(13):e34202.
10. Bondoc A.E., Tayefeh M., Barari A. LIVE Digital Twin: Developing a Sensor Network to Monitor the Health of Belt Conveyor System. *IFAC-PapersOnLine*. 2021; 55(19):49–54.
11. Kuzin E.G. Assessment of the technical condition of gearboxes of mine belt conveyors using non-destructive testing methods: Cand. Sc. Engineering Thesis. Kemerovo, 2020. 141 p.
12. Zhang M., Zhang Y., Zhou M., Jiang K., Shi H., Yu Y., Hao N. Application of Lightweight Convolutional Neural Network for Damage Detection of Conveyor Belt. *Applied Sciences*. 2020; 11(16):7282.
13. Saydulin E.G., Rukin M.V., Shelemba I.S., Vozhakov I.S., Cheverda V.V. Automatic detection of faulty conveyor belt rollers using TOREX fiber optic thermal sensor. *Mining Industry*. 2020; 4:54–57.
14. Zakharova A.G., Zakharov A.Y., Lobur I.A., Shauleva N.M. Ultrasonic based device to detect longitudinal tears on conveyor belts. *Mining equipment and electromechanics*. 2022; 4(162):62–70.
15. Gu F., Shao Y., Hu N., Naid A., Ball A. Electrical Motor Current Signal Analysis Using a Modified Bispectrum for Fault Diagnosis of Downstream Mechanical Equipment. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010; 25(1):360–372.
16. Guan B., Bao X., Qiu H., Yang D. Enhancing Bearing Fault Diagnosis Using Motor Current Signals: A Novel Approach Combining Time Shifting and CausalConvNets. *Measurement*. 2024; 226:114049.
17. Anikanov D.S., Kiperwasser M.V., Simakov V.P. Predictive diagnostics of belt conveyors based on monitoring the electrical parameters of the drive electric motor. *Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources*. 2021; 7:272–277.
18. Gurenko V.V., Klimov S.M., Proletarsky A.V., Smirnova E.V., Sotnikov A.A., Syuzev V.V. Methods of signal imitation in scientific problems of modeling real-time information and control systems. Moscow: Rusains; 2021. 326 p.
19. Ivanov V.E., Chye E.U. Modular discrete-analog wavelet filters. Moscow: "Izdatelstvo KnoRus"; 2021. 168 p.
20. He W., Zi Y., Chen B., Wu F., He Z. Automatic Fault Feature Extraction of Mechanical Anomaly on Induction Motor Bearing Using Ensemble Super-wavelet Transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015; 54–55:457–480.
21. Tang S., Jiang Y., Su H., Zhu Y. A Fault Identification Method of Hydraulic Pump Fusing Long Short-term Memory and Synchronous Compression Wavelet Transform. *Applied Acoustics*. 2025; 232:110553.
22. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. Work processes modeling and design of multi-drive belt conveyors. Bryansk: Bryansk State Academician I.G. Petrovskii University; 2017. 384 p.

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Mikhail V. Kiperwasser, Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Electric Drives and Industrial Electronics, Siberian State Industrial University (654007, Russia, Kemerovo region – Kuzbass, Novokuznetsk, Str. Ki-rova, 42.), C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kipervasser2012@yandex.ru

Dmitry S. Anikanov, Researcher, Mining Industry Digital Transformation Laboratory, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), postgraduate student, e-mail: ad988@yandex.ru

Irina Yu. Semykina, Senior Researcher, Mining Industry Digital Transformation Laboratory, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6874-1735>, e-mail: arinasemykina@gmail.com

Alla G. Zakharova, Professor, Department of Electric Drives and Automation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), Dr. Sc. (Engineering), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0046-7976>, e-mail: zaharovaag@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Mikhail V. Kiperwasser – formulation of a research task, scientific management.

Dmitry S. Anikanov – data collection and analysis (simulation).

Irina Yu. Semykina – conceptualization of research, writing text, conclusions.

Alla G. Zakharova – data collection and analysis (analysis of the informativeness of diagnostic features).

The claimed contribution of the authors:

Authors have read and approved the final manuscript.

