

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 622.6:629.423.32:62-533.7

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-1-100-109

**Аниканов Дмитрий Сергеевич¹, Семыкина Ирина Юрьевна¹, Захарова Алла Геннадьевна^{1,*},
Кипервассер Михаил Вениаминович², Лебедев Геннадий Михайлович¹**

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

² Сибирский государственный индустриальный университет

* для корреспонденции: zag.eav@kuzstu.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА



Информация о статье

Поступила:

25 декабря 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

14 января 2026 г.

Принята к печати:
29 января 2026 г.

Опубликована:
02 марта 2026 г

Ключевые слова:

ленточный конвейер, электромеханический комплекс, восьмимассовая система, диагностика неисправности, асинхронный электродвигатель, ток статора

Аннотация.

Ленточные конвейеры являются важнейшим элементом производственных мощностей предприятий горнодобывающей и обрабатывающей отраслей. Надежность, ритмичность и безотказность работы оборудования ленточных конвейеров напрямую влияют на производственные показатели и экономическую эффективность предприятия.

В данной работе ленточный конвейер рассматривается как единый электромеханический комплекс, построение математической модели которого выполнено при помощи декомпозиции механизма ленточного конвейера с выделением отдельных механических узлов, наиболее подверженных возникновению аварийных режимов. Итоговая модель представляет собой восьмимассовую систему.

На основе полученных уравнений была сформирована модель электромеханической системы электропривода конвейера в среде MATLAB Simulink.

При моделировании были получены диагностические признаки аварийных режимов работы механизма ленточного конвейера, такие, как заклинивание роликов, защита приемного бункера и других.

Результаты исследования с использованием модели показали, что ток статора асинхронного двигателя характерным образом изменяется при возникновении аварийных ситуаций. Период, частота и форма колебаний тока зависят от конкретного вида неисправности в механической части ленточного конвейера. Для подтверждения полученных результатов были проведены натурные исследования на реальном объекте – ленточном конвейере типа НЕ-К. В ходе экспериментов фиксировалось действующее значение тока статора двигателя, частота и напряжение питающей сети, выходные частота и напряжение преобразователя частоты. Результаты исследования подтверждают возможность использования изменения тока статора асинхронного двигателя для диагностики аварийных режимов работы ленточного конвейера. Это позволяет повысить надежность и эффективность работы оборудования, а также снизить экономические потери, связанные с аварийными ситуациями.

Для цитирования: Аниканов Д.С., Семыкина И.Ю., Захарова А.Г., Кипервассер М.В., Лебедев Г.М. Формирование диагностических критериев аварийных режимов работы электромеханического комплекса ленточного конвейера путем адаптации математической модели в ходе экспериментальных испытаний реального оборудования // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 1 (183). С. 100-109. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-1-100-109, EDN: WDLCPH

Введение

Конвейеры различных технических и эксплуатационных характеристик являются ключевой со-

ставляющей производственных мощностей предприятий горнодобывающей и обрабатывающей

отраслей, существенно различаясь по мощности, размерам, конструкции и типу привода, причем наиболее распространенным транспортирующим компонентом является конвейерная лента [1–3]. От надежной, ритмичной и безотказной работы оборудования ленточных конвейеров напрямую зависят

производственные показатели и экономическая эффективность предприятия в целом [4, 5].

В работах [6–8] ленточный конвейер рассматривается как единый электромеханический комплекс в виде трехмассовой системы, включающей момент инерции якоря приводного асинхронного электро-

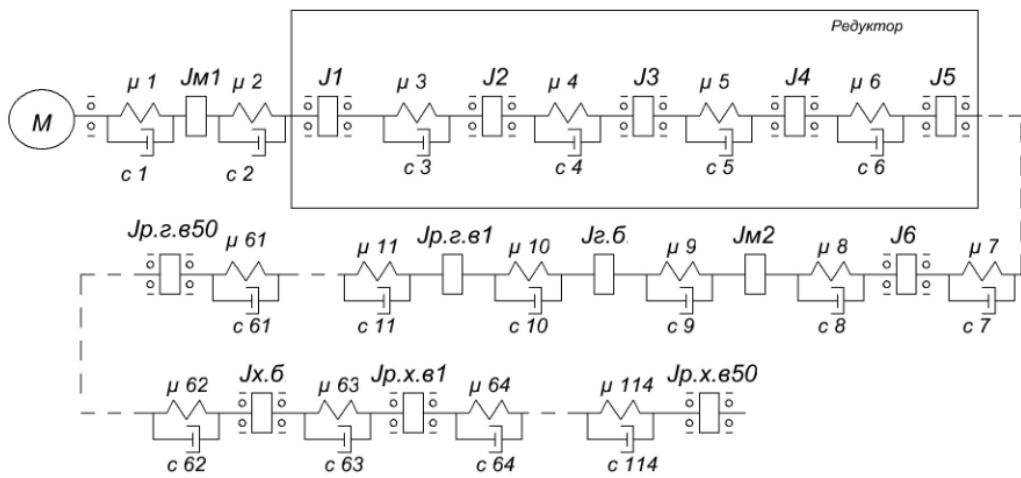


Рис. 1.1. Схема совмещенной модели электромеханического комплекса: J_1, \dots, J_n – момент инерции шестерней редуктора; J_{M1}, J_{M2} – моменты инерции муфт; $J_{\text{кол.б}}, J_{\text{хв.б}}$ – моменты инерции головного и хвостового барабанов; $J_{\text{пол.1}}, \dots, J_{\text{пол.2}}$ – моменты инерции грузонесущих роликов; $J_{\text{хол.1}}, \dots, J_{\text{хол.2}}$ – моменты инерции холостых роликов; $c_1, \dots, c_8, c_{11}, \dots, c_{17}$ – жесткости связей в редукторе и между роликоопорами; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \mu_m, \mu_k$ – коэффициенты демпфирования, $\varphi_{M1}, \varphi_{M2}$ – углы поворота муфт; $\varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{\text{хол.б}}, \varphi_{\text{гол.б}}, \varphi_{\text{пол.1}}, \dots, \varphi_{\text{пол.2}}$ – углы поворота шестерней редуктора и роликов грузонесущей и холостой ветви конвейера; $M_{\partial\theta}$ – момент, создаваемый электродвигателем; M_{M1}, M_{M2} – моменты на соединительных муфтах; M_2, \dots, M_n – моменты шестерней редуктора; $M_{\text{кол.б}}, M_{\text{хв.б}}$ – моменты головного и хвостового барабанов; $M_{\text{пол.1}}, \dots, M_{\text{пол.2}}$ – моменты на грузонесущих роликах; $M_{\text{хол.1}}, \dots, M_{\text{хол.2}}$ – моменты на холостых роликах

Fig. 1.1. Schematic diagram of the combined model of the electromechanical complex: J_1, \dots, J_n – moment of inertia of the gearbox gears; J_{M1}, J_{M2} – moments of inertia of the coupling; $J_{\text{кол.б}}, J_{\text{хв.б}}$ – moments of inertia of the head and tail drums; $J_{\text{пол.1}}, \dots, J_{\text{пол.2}}$ – moments of inertia of the load-carrying rollers; $J_{\text{хол.1}}, \dots, J_{\text{хол.2}}$ – moments of inertia of the idler rollers; $c_1, \dots, c_8, c_{11}, \dots, c_{17}$ – rigidity of the connections in the gearbox and between the roller supports; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \mu_m, \mu_k$ – damping coefficients, $\varphi_{M1}, \varphi_{M2}$ – angles of rotation of the coupling; $\varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{\text{хол.б}}, \varphi_{\text{гол.б}}, \varphi_{\text{пол.1}}, \dots, \varphi_{\text{пол.2}}$ – rotation angles of the gearbox pinions and rollers of the load-carrying and idle branches of the conveyor; $M_{\partial\theta}$ – torque generated by the electric motor; M_{M1}, M_{M2} – torques on the coupling couplings; M_2, \dots, M_n – moments of the gearbox pinions; $M_{\text{кол.б}}, M_{\text{хв.б}}$ – moments of the front and tail drums; $M_{\text{пол.1}}, \dots, M_{\text{пол.2}}$ – moments on the load-carrying rollers; $M_{\text{хол.1}}, \dots, M_{\text{хол.2}}$ – moments on the idle rollers

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + \mu_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_{M1}) + C_1(\varphi_1 - \varphi_{M1}) = M_{\partial\theta}, \\ J_{M1} \frac{d\omega_{M1}}{dt} + \mu_2(\dot{\varphi}_{M1} - \dot{\varphi}_p) - \mu_3(\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_{M2}) - C_1(\varphi_1 - \varphi_{M1}) + C_2(\varphi_{M1} - \varphi_p) = -M_{M1}, \\ J_p \frac{d\omega_p}{dt} + \mu_3(\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_{M2}) - \mu_4(\dot{\varphi}_{M2} - \dot{\varphi}_2) - C_2(\varphi_{M1} - \varphi_p) + C_3(\varphi_p - \varphi_{M2}) = -M_p, \\ J_{M2} \frac{d\omega_{M2}}{dt} + \mu_4(\dot{\varphi}_{M2} - \dot{\varphi}_2) - \mu_5(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - C_3(\varphi_p - \varphi_{M2}) + C_4(\varphi_{M2} - \varphi_2) = -M_{M2}, \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + \mu_5(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - \mu_6(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - C_4(\varphi_{M2} - \varphi_2) + C_5(\varphi_2 - \varphi_3) = -M_2, \\ J_3 \frac{d\omega_3}{dt} + \mu_6(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - \mu_7(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_{\text{хол.р}}) - C_5(\varphi_2 - \varphi_3) + C_6(\varphi_3 - \varphi_4) = -M_3, \\ J_4 \frac{d\omega_4}{dt} + \mu_7(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_{\text{хол.р}}) - C_6(\varphi_3 - \varphi_4) + C_7(\varphi_4 - \varphi_{\text{хол.р}}) = -M_4, \\ J_{\text{хол.р}} \frac{d\omega_{\text{хол.р}}}{dt} - C_{n7}(\varphi_4 - \varphi_{\text{хол.р}}) = -M_{\text{хол.р}}. \end{array} \right.$$

*Рис. 1.2. Математическое описание механической восьми-массовой системы ленточного конвейера
Fig. 1.2. Mathematical description of the mechanical eight-mass conveyor belt system*

двигателя. При проведении математического моделирования удалось выявить диагностические признаки аварийных режимов работы механизма, такие, как заклинивание грузонесущих роликов, заштыбовка приемного бункера и т. д., и проверить полученные признаки в натурных испытаниях. Полученные результаты показали отклонение контролируемой величины от полученного аварийного признака более, чем на 20%. При детальном исследовании математической модели, а именно процесса приложения аварийного нагружочного момента, были выявлены факторы поглощения прилагаемого аварийного момента, которые вызывали сопоставимое отклонение измеряемой величины.

Методы

Для исключения данного эффекта и оптимизации предлагаемого метода с целью унификации использования алгоритма диагностики механического состояния ленточного конвейера на оборудовании разных типоразмеров было решено провести декомпозицию модели ленточного конвейера с выделением отдельных механических узлов, по статистике наиболее подверженных возникновению аварийных режимов. Схема совмещенной модели электромеханического комплекса представлена на Рис. 1.1 [9, 10].

В результате декомпозиции модели механической части ленточного конвейера и упрощений с суммированием малых масс получаем итоговую восьмимассовую модель. Математическое описание механической восьмимассовой системы ленточного

конвейера будет иметь следующий вид [11, 12]. (Рис. 1.2)

На основе полученных выше уравнений была сформирована модель электромеханической системы электропривода конвейера в среде моделирования MATLAB Simulink [13–15]. Схема модели (Рис. 2) составлена на базе стандартных блоков среды моделирования.

При моделировании были исследованы следующие режимы работы механизма ленточного конвейера:

1. Номинальный режим работы привода с последующим поочередным заклиниванием одного, двух и трех опорных роликов.

Моделирование заклинивания одного ролика реализуется путем скачкообразного приложения добавочного момента с помощью блока $St*10p$. Расчетная величина момента при заклинивании одного ролика составляет $M_{12}=1,5$ Н·м. Режимы с заклиниванием двух и трех опорных роликов в целом аналогичны режиму с заклиниванием одного ролика. Значение M_{12} , составляет 3 Н·м и 4,5 Н·м для ситуаций заклинивания двух и трех роликов. При заклинивании одного опорного ролика грузонесущей части ток увеличивается на 0,26 А, при заклинивании двух опорных – на 0,28 А, при заклинивании трех – на 0,18 А. При этом происходит уменьшение угловой скорости: для случая с заклиниванием одного опорного ролика на 50 об/мин, двух – на 28 об/мин и трех – на 20 об/мин. Время переходного режима составляет 0,21 с для первого

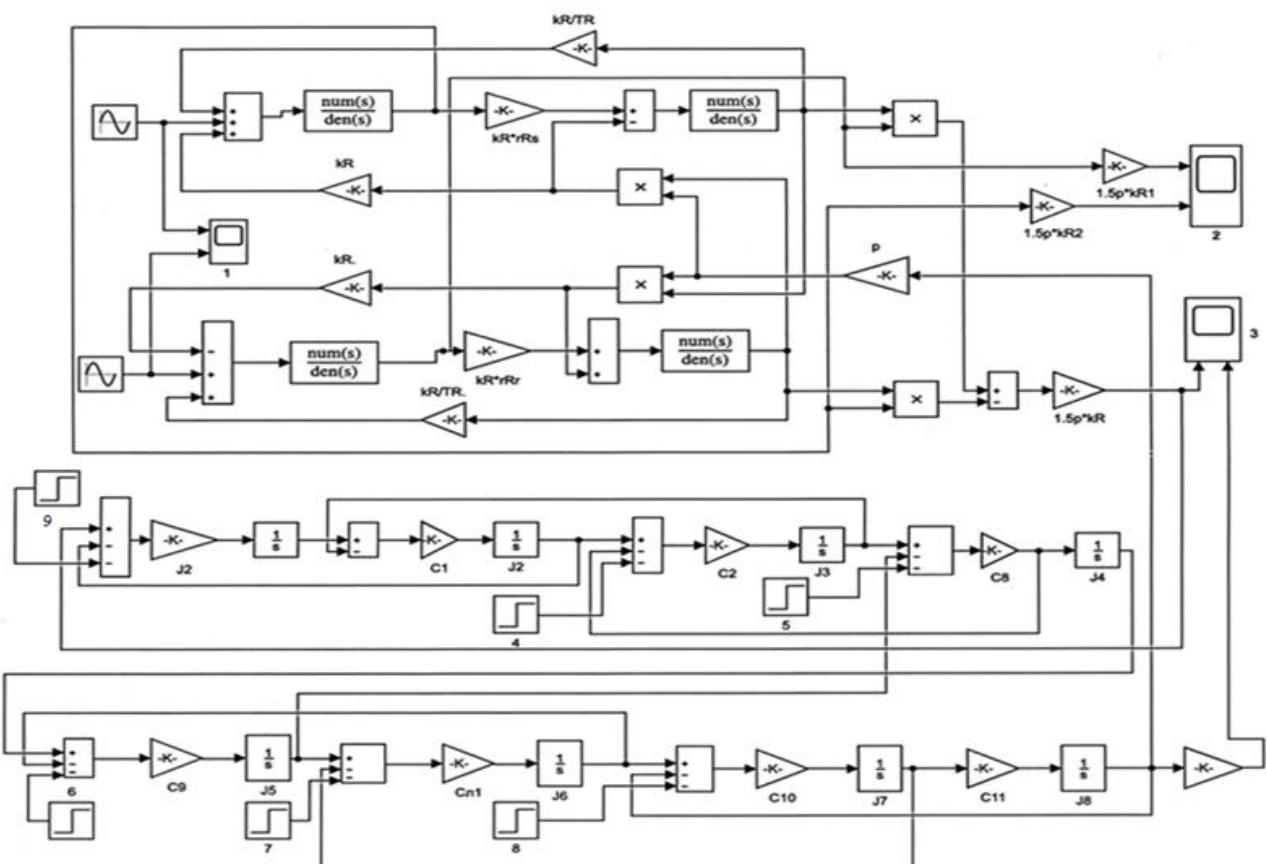


Рис. 2. Блок-схема модели электромеханической системы ленточного конвейера
Fig. 2. Block diagram of the electromechanical system model of a belt conveyor



Рис. 3. Функциональная схема фиксации регистрируемых параметров
Fig. 3. Functional diagram of recording of registered parameters

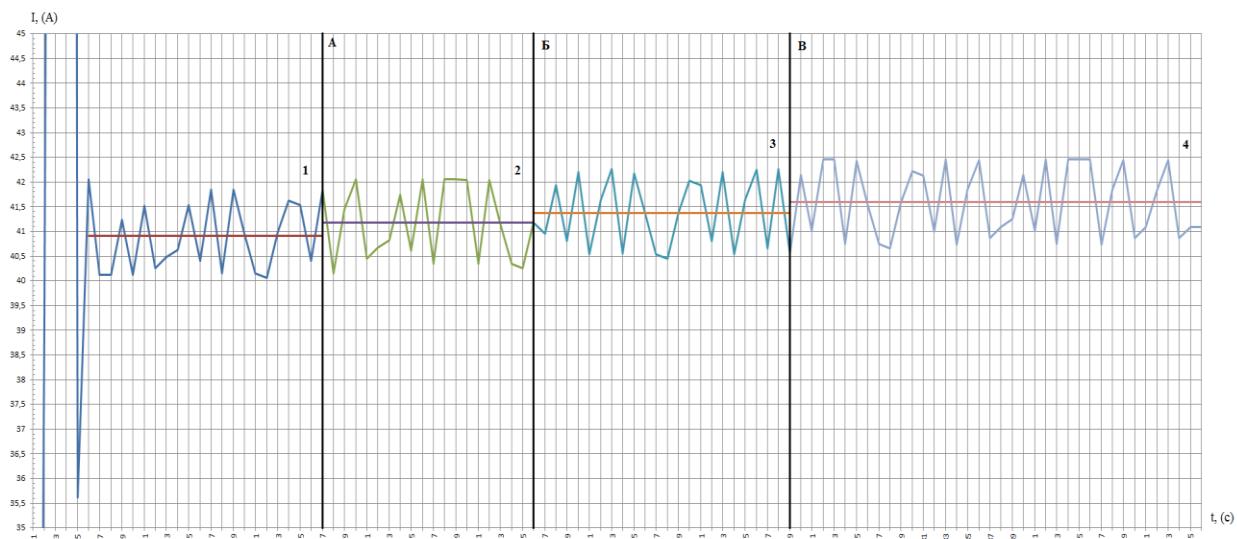


Рис. 4. Изменение тока статора асинхронного двигателя: 1 – при отсутствии неисправностей при 100% загрузке; 2 – заклинивание одного опорного ролика; 3 – заклинивание двух опорных роликов; 4 – заклинивание одновременно третьего опорного ролика; А – время заклинивания первого опорного ролика (37 с); Б – время заклинивания второго опорного ролика (56 с); В – время принудительного заклинивания третьего опорного ролика (78 с)

Fig. 4. Change in the stator current of an asynchronous motor 1 – in the absence of faults at 100% load; 2 – jamming of one support roller; 3 – jamming of two support rollers; 4 – simultaneous jamming of the third support roller; A – jamming time of the first support roller (37 s); B – jamming time of the second support roller (56 s); C – forced jamming time of the third support roller (78 s)

моделируемого режима, 0,45 с во втором случае и 0,62 с при трех заклинившихся роликах.

2. Заштыбовка приемного бункера. Процесс сопровождается накоплением транспортируемого материала в приемном бункере с его последующим переполнением. Место приложения добавочного момента в рассматриваемой модели – блок St*10р 8. Величина прилагаемого момента принята 89 Н·м. При заштыбовке приемного бункера происходит скачок тока статора на 1,8 А. При этом происходит снижение угловой скорости на 928 об/мин. Время переходного режима составляет 1,86 с.

3. Глухое заклинивание редуктора. Такое заклинивание обычно вызывается попаданием ино-родных тел между зубцами передач, критическим нарушением соосности, выкрашиванием зубьев шестерней. Место приложения добавочного момента в рассматриваемой модели – блок St*10р 9. Величина прилагаемого момента оценена как 140

Н·м. Глухое заклинивание редуктора сопровождается ростом тока статора на 19 А. При этом происходит снижение угловой скорости до отрицательных значений. Время переходного режима составляет 1,35 с.

4. Поломка чистителя возникает вследствие неправильной установки чистителя, значительного его износа, а также налипания на него транспортируемого материала в зимние периоды эксплуатации. Место приложения добавочного момента в рассматриваемой модели соответствует блоку St*10р 9. Величина прилагаемого момента оценена как 71 Н·м. По результатам моделирования режима поломки чистителя рост тока статора составил 1,71 А. Одновременно с ростом тока происходит снижение угловой скорости на 1070 об/мин. Время переходного процесса составляет 1,01 с. Далее следует возврат нормального режима работы приводного двигателя без нагрузки с пятой секунды моде-

лирования. Время переходного режима составляет 1,5 с.

5. Нарушение соосности передач редуктора обычно вызвано износом опорных подшипников передач редуктора, а также неправильной центровкой в момент сборки агрегата на заводе-изготовителе. Место приложения добавочного момента в рассматриваемой модели соответствует блоку St*10р 9. Величина прилагаемого момента оценена как 66 Н·м. При моделировании режима нарушения соосности передач редуктора рост тока статора составил 1,7 А. При этом происходит снижение угловой скорости на 710 об^{-1} . Время переходного режима составляет 0,95 с. Далее следует возврат нормального режима работы асинхронного электродвигателя без нагрузки с 5 с моделирования. Время переходного режима составляет 1,5 с.

Результаты и обсуждение

Таким образом, исходя из результатов модельного исследования, можно сделать вывод о том, что ток статора АД характерным образом изменяется при возникновении аварийных ситуаций и, следовательно, отслеживание его изменения может быть использовано для выявления этих ситуаций. При этом период, частота и форма колебаний тока зависят от конкретного вида неисправности, произошедшего в механической части ленточного конвейера.

Для подтверждения полученных результатов были проведены натурные исследования полученных диагностических признаков на реальном объекте, а именно ленточном конвейере типа НЕ-К. Конвейер используется для транспортировки угольного концентрата на обогатительной фабрике «Черниговская-Коксовая» ЗАО «Черниговец».

Функциональная схема фиксации регистрируемых параметров с помощью преобразователя частоты и ПЛК представлена на Рис. 3.

В ходе натурных экспериментов на реальном объекте воспроизвелись следующие режимы:

1. Номинальный режим работы ленточного конвейера при полной загрузке. Режим работы сопровождается транспортировкой расчетного объема транспортируемого материала. Дефекты в узлах и агрегатах механизма отсутствуют.

2. Работа ленточного конвейера при 100% загрузке концентратом и последовательное заклинивание одного, двух, трех опорных роликов грузонесущей части конвейерного става. Регистрация контролируемых параметров приводного электродвигателя производилась после принудительной остановки одного, двух и трех роликов.

3. Сход ленты в процессе работы с номинальной загрузкой и задевание защитного желоба разгрузочной телеги. Уход ленты со штатной траектории воспроизводился путем изменения положения вертикального направляющего ролика.

4. Заклинивание одного опорного ролика грузонесущей ветви и ослабление натяжения ленточного полотна. Ослабление натяжения ленты достигалось за счет ослабления усилия трения фрикционного натяжителя.

В ходе экспериментов при помощи преобразователя частоты Altivar 71 фиксировались следующие величины: действующее значение тока статора двигателя, частота и напряжение питающей сети, выходные частота и напряжение преобразователя. В качестве регистрирующих элементов в преобразователе используются датчики тока (LAH 100-P) с точностью измерения $\pm 0,25\%$. Замер контролируемых величин реализуется преобразователем с частотой один раз в секунду.

Моделирование режимов заклинивания одного, двух и трех роликов грузонесущей части конвейерного става при 100% загрузке ленточного конвейера представлено на Рис. 4.

Фиксируемые частотным преобразователем значения фазного тока статора – с момента пуска в нормальном режиме работ со стопроцентной нагрузкой и далее, при последовательном заклинивании одного, двух и трех опорных роликов. Изменение величины действующего значения тока статора составило порядка $\approx 0,2$ А при заклинивании одного опорного ролика. При заклинивании двух и трех опорных роликов увеличение значение тока статора ставило $\approx 0,4$ А и $\approx 0,6$ А соответственно. Время протекания переходного процесса изменения контролируемой величины тока статора после заклинивания опорных роликов составляет $\approx 3 \div 4$ с при установленной частоте замера тока один раз в секунду.

Сход ленты в процессе работы с номинальной загрузкой и задевание защитного желоба разгрузочной телеги

Процесс связан с задеванием ленточным полотном разгрузочного желоба. Отклонение ленточного полотна от прямолинейной траектории достигается кратковременным изменением положения направляющей системы роликов в течение 5 с. Такое отклонение приводит к изменению траектории движения ленты и ее касания разгрузочного желоба. Процесс характеризуется возрастанием отклонения и последующим возвратом к прямолинейному движению ленточного полотна. Задевание ленточным полотном разгрузочного желоба в опыте длится 10 с. В процессе схода ленты и задевания лентой защитного желоба разгрузочной телеги происходит изменение нагружочного момента и соответствующее ему увеличение тока статора машины на 2,5 А.

При возникновении аварийной ситуации ток статора увеличивается по мере увеличения отклонения ленточного полотна от прямолинейной траектории и увеличения усилия соприкосновения ленты с желобом. При возврате ленты к прямолинейному движению значения тока статора возвращаются к номинальным.

Заклинивание одного грузонесущего ролика с сопутствующим ослаблением натяжения ленты

Процесс воспроизведения аварийного режима ослабления ленточного полотна и последующего заклинивания одного опорного ролика выполнен посредством ослабления натяжения ленты натяжительной станцией. Номинальное усилие натяжения ленточного полотна составляет 7161 Н. В процессе воспроизведения аварийной ситуации натяжение

Таблица 1. Характеристика сходимости при моделировании заклинивания роликов грузонесущей части
Table 1. Convergence characteristics in modeling the jamming of the rollers of the load-bearing part

Наименование	Выражение	Значение для Р для 1-го за- клиниченного ролика	Значение для Р для 2-го за- клиниченного ролика	Значение для Р для 3-го за- клиниченного ролика
Статистическое среднее значение	$\bar{x} = \frac{\sum(n_i \cdot x_i)}{\sum n_i}$	33,86	35,99	37,14
Выборочные корреляционные моменты	$K_x = \frac{\sum n_{ij} \cdot x_i}{\sum n_{ij}} - \bar{x}$	13,11	15,52	17,14
Коэффициент линейной корреляции	$r_x = \frac{K_x}{\sigma_x}$	0,27	0,31	0,33

ленточного полотна снижалось до значений (6250-6439 Н). Контроль осуществлялся динамометром.

Аварийный режим сопровождается значительными колебаниями контролируемой величины тока по причине возникновения провиса ленты между роликоопорами. Колебания в ленточном полотне появляются в результате выбирания провиса ленточного полотна между роликоопорами, что приводит к колебанию момента на валу электродвигателя.

На интервале времени воспроизведения ослабления натяжения ленточного полотна колебания тока характеризуется следующими величинами: период одного полного колебания 10-12 с; максимальное отклонение от номинального значения составляет 2,2 А.

На интервале времени воспроизведения ослабления натяжения ленточного и одновременное заклинивание одного опорного ролика увеличивается среднее значение тока статора на 0,28 А. Колебания тока характеризуется следующими величинами: период одного полного колебания 9-11 с; максимальное отклонение от номинального значения составляет 1,85 А.

Заключение

Данные, полученные при натурном эксперименте, подтверждают сходимость предлагаемого метода диагностики с данными математической модели восьмимассовой электромеханической системы ленточного конвейера с приводным асинхронным электродвигателем. Дополнительно проведены исследования предлагаемого метода диагностики путем корреляционного анализа контролируемой величины тока статора у ленточных конвейеров различной мощности с различными технологическими особенностями (длина ленточного конвейера, мощность приводного электродвигателя и т. д.). В расчетах участвовали восемь конвейеров с различной мощностью от 4-200 кВт, а также длиной става от 5 до 500 метров.

Числовые характеристики распределений величин мощности приводного электродвигателя и увеличение тока статора при появлении одного закли-

ненного ролика грузонесущей части приведена в Таблице 1.

Согласно шкале Чеддока, связь между мощностью приводного электродвигателя и увеличением тока статора весьма умеренная.

Полученные коэффициенты корреляции в Таблице 1 позволяют прогнозировать увеличение действующего значения тока статора приводного асинхронного электродвигателя при заклинивании одного, двух и трех роликов грузонесущей части. При последовательном заклинивании роликов грузонесущей части виден рост связи между мощностью электродвигателя и током статора от слабой к умеренной.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галкин В. И. Современные ленточные конвейеры. Справочное пособие. М. : Горная книга, 2024. 316 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

6. Савельев А. Н., Кипервассер М. В., Аниканов Д. С. Диагностика аварийных режимов ленточных транспортеров в горно-металлургической промышленности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. №12. С. 906–910.

7. Савельев А. Н., Кипервассер М. В., Аниканов Д. С. Метод обнаружения неисправностей ленточных транспортеров горной промышленности // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов : сборник научных статей / Сибирский государственный индустриальный университет. Новокузнецк, 2016. С. 340–343.

8. Савельев А. Н., Кипервассер М. В., Аниканов Д. С. К обоснованию комплексного метода оценки работоспособности современных технологических объектов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. №12 . С. 37–41.

9. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. М. : Наука, 1988. 639с.

10. Иванченко Ф. К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. Киев : Высшая школа, 1978. 576с.

11. Копылов И. П. Проектирование электрических машин. М. : Энергия, 1980. 495 с.

12. Ключев В. И. Теория электропривода. М. : Энергоатомиздат, 1985. 696 с.

13. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. СПб. : «КОРОНА прнт», 2001. 320 с.

14. Дьяконов В. П. MATLAB 6/5 SP1/7+Simulin 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». М. : СОЛОН-Пресс, 2005. 800 с.

15. Гуренко В. В., Климов С. М., Пролетар-ский А. В., Смирнова Е. В., Сотников А. А., Сю-зев В. В. Методы имитации сигналов в научных задачах моделирования информационно-управляющих систем реального времени. М. : ООО «Русайнс», 2021. 326 с.

© 2026 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

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), 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: zag.eav@kuzstu.ru

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

Лебедев Геннадий Михайлович, профессор, кафедра электроснабжения горных и промышленных предприятий, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), д.т.н., доцент, e-mail: lgm.egpp@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

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

Семыкина Ирина Юрьевна – сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы.

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

Кипервассер Михаил Вениаминович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.

Лебедев Геннадий Михайлович – сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-1-100-109

Dmitry S. Anikanov¹, Irina Yu. Semykina¹, Alla G. Zakharova^{2,*}; Mikhail V. Kiperwasser¹, Gennady M. Lebedev¹

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

² Siberian State Industrial University

* for correspondence: zag.eav@kuzstu.ru

DEVELOPING DIAGNOSTIC CRITERIA FOR EMERGENCY OPERATING MODES OF A BELT CONVEYOR ELECTROMECHANICAL COMPLEX

Abstract.

Belt conveyors are a critical element of production capacity in mining and manufacturing industries. The reliability, smoothness, and trouble-free operation of belt conveyor equipment directly impact the production performance and economic efficiency of the enterprise. In this paper, a belt conveyor is considered as a single electromechanical system. A mathematical model for this system was developed by decomposing the belt conveyor mechanism, identifying individual mechanical components most susceptible to failure. The resulting model represents an eight-mass system. Based on the resulting equations, a model of the conveyor's electromechanical drive system was created in the MATLAB Simulink environment. The modeling yielded diagnostic indicators of belt conveyor failure modes, such as roller jamming, receiving hopper blockage, and others. The results of a model-based study showed that the stator current of an asynchronous motor changes characteristically during emergency situations. The period, frequency, and shape of the current oscillations depend on the specific type of fault in the mechanical component of the belt conveyor. To confirm these results, field studies were conducted on a real-world object—a type HE-K belt conveyor. During the experiments, the RMS value of the motor stator current, the frequency and voltage of the power supply network, and the output frequency and voltage of the frequency converter were recorded. The results of the study confirm the feasibility of using changes in the stator current of an asynchronous motor to diagnose emergency operating conditions of a belt conveyor. This allows for increased reliability and efficiency of equipment operation, as well as a reduction in economic losses associated with emergency situations.



Article info

Received:

25 December 2025

Accepted for publication:

14 January 2026

Accepted:

29 January 2026

Published:

02 March 2026

Keywords: belt conveyor, electromechanical unit, eight-mass system, fault diagnosis, induction motor, stator current.

For citation: Anikanov D.S., Semykina I.Yu., Zakharova A.G., Kiperwasser M.V., Lebedev G.M. Developing diagnostic criteria for emergency operating modes of a belt conveyor electromechanical complex by adaptation of a mathematical model during experimental tests of real equipment. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 1(183):100-109 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-1-100-109, EDN: WDLCPH

REFERENCES

1. Galkin V.I. Sovremennye lentochnye konvejery. Spravochnoe posobie. M.: Gornaya kniga; 2024. 316 s.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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; 256:110709.
6. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S. Diagnostika avarijnyh rezhimov lentochnyh transporterov v gorno-metallurgicheskoy promyshlennosti. *Izv.vuz. Chernaya metallurgiya*. 2015; 58(12):906–910.
7. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S. Metod obnaruzheniya neispravnostej lentochnyh transporterov gornoj promyshlennosti // *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov : sbornik nauchnyh statej*. Sibirsij gosudarstvennyj industrial'nyj universitet. Novokuzneck, 2016. S. 340–343.
8. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S. K obosnovaniyu kompleksnogo metoda ocenki rabotosposobnosti sovremennoy tekhnologicheskikh ob"ektov. *Izv.vuz. Chernaya metallurgiya*. 2012. № 12. S. 37–41.

9. Artobolevskij I.I. Teoriya mekhanizmov i mashin. M.: Nauka, 1988. 639s.
10. Ivanchenko F.K. Raschety gruzopod'emnyh i transportiruyushchih mashin. Kiev : Vysshaya shkola, 1978. 576s.
11. Kopylov I.P. Proektirovanie elektricheskikh mashin. M. : Energiya, 1980. 495s.
12. Klyuchev V.I. Teoriya elektroprivoda. M. : Energoatomizdat, 1985. 696s.
13. German-Galkin S.G. Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyh sistem. SPb. : «KORONA print», 2001. 320 s.

14. D'yakonov V.P. MATLAB 6/5 SP1/7+Simulin 5/6. Osnovy primeneniya. Seriya «Biblioteka profesionala». M. : SOLON-Press, 2005. 800 s. c.
15. Gurenko V. V., Klimov S. M., Proletarskij A. V., Smirnova E. V., Sotnikov A. A., Syuzev V. V. Metody imitacii signalov v nauchnyh zadachah modelirovaniya informacionno-upravlyayushchih sistem real'nogo vremeni. M. : OOO «Rusajns», 2021. 326 s.

© 2026 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

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

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. Kirova, 42.), C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kipervasser2012@yandex.ru

Gennady M. Lebedev Professor, Department of Power Supply for Mining and Industrial Enterprises, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lgm.egpp@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Dmitry S. Anikanov – data collection and analysis (modeling), research conceptualization.

Irina Yu. Semykina – data collection and analysis, review of relevant literature, conclusions.

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

Mikhail V. Kiperwasser – setting research problems, scientific management.

Gennady M. Lebedev – data collection and analysis, conclusions, writing.

Authors have read and approved the final manuscript.

