

УДК 621.867.2:621.313

ДИАГНОСТИКА АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЛЕНТОЧНЫХ ТРАНСПОРТЕРОВ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Савельев А.Н.¹, к.т.н., доцент кафедры машин и агрегатов
технологического оборудования (Saveljev2000@mail.ru)

Кипервассер М.В.¹, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования
Аниканов Д.С.², инженер-наладчик, аспирант СибГИУ

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² ООО «Пусконаладочное управление объединенной компании «Сибшахтострой» (ООО «ПНУ ОК «СШС»)
(654000, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, Кузнецкое шоссе, 9)

Аннотация. В работе выявляется характер динамического взаимодействия между механическими и электрическими параметрами привода при возникновении в механической части конвейера внезапных повреждений. Дана оценка возможности использования характера изменения системы электрических параметров электродвигателя в качестве диагностирующего сигнала. Составлена совместная модель для исследования динамических процессов в системе питающая сеть – асинхронный двигатель – ленточный конвейер. Питающая сеть и асинхронный двигатель описаны моделью пространства состояний четвертого порядка с получением на выходе значения момента на валу электродвигателя. Для механической части ленточного конвейера были определены моменты инерции и податливости связей между звеньями. Путем постепенного выделения элементов с минимальным моментом инерции и распределения момента инерции этих элементов и податливостей между соседними элементами была получена 3-х массовая система, моделирующая механическую часть исследуемого агрегата. Составленная динамическая модель решена в среде Matlab Simulinc. Получены данные об энергетических показателях привода в динамических процессах, следующих за возникновением аварийных ситуаций в механизме.

Ключевые слова: конвейер, асинхронный электродвигатель, электромеханическое преобразование, динамическая модель.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-906-911

Конвейерно-транспортные машины различной мощности, производительности и протяженности являются одним из основных видов грузового транспорта на предприятиях по переработке исходных материалов в горно-металлургической промышленности. От надежной, ритмичной и безотказной работы этих агрегатов напрямую зависят производительность и другие экономические показатели деятельности предприятия в целом [1].

Работа узлов и деталей таких конвейерных линий сопровождается интенсивным воздействием механических нагрузок, что неизбежно приводит их в неработоспособное состояние. Степень внезапности и сложности повреждения определяет продолжительность простоя оборудования, затраты на ремонт, размер ущерба. В этой связи рациональным образом организованная диагностика состояния эксплуатируемого оборудования является одним из условий бесперебойной работы агрегатов и предприятия в целом [2, 3]. В случае применения диагностических средств к ленточным конвейерам необходимо иметь в виду, с одной стороны, тот факт, что во многих случаях конвейерные механизмы в течение эксплуатационных периодов работают без наблюдения персонала, либо при его малой численности. По этой причине сами аварии выявляются несвоев-

ременно, а их характер определяется зачастую неверно, что увеличивает потери производства. С другой стороны, набор элементов в конвейере, способных выходить из строя, чрезвычайно велик и установить необходимое количество частных диагностических устройств для их контроля практически невозможно. В силу сказанного выше в настоящей работе рассматривается возможность обеспечивать работоспособное состояние ленточного конвейера по величине потока энергии, передаваемой от системы питания конвейера электродвигателя, а затем механической его части. Возможность использования такого подхода частично была рассмотрена ранее [4, 5].

В работах [3, 5] изложена методика контроля аварийных ситуации в механической части конвейерного транспорта путем регистрации отклонения электрических параметров электродвигателей привода. Установлены зависимости, описывающие отклонения электрических параметров двигателя при возникновении различного рода повреждений элементов механической части. Однако полученные зависимости относятся только к установившемуся режиму работы машины и полных представлений о характере изменения электрических параметров привода при возникновении повреждений не дают. Таким образом, комплекс пере-

ходных процессов, возникающих в результате аварийной ситуации, остается пока не изученным.

В настоящей работе выявляли характер динамического взаимодействия между механическими и электрическими параметрами при возникновении в механической части привода внезапных повреждений и дается оценка возможности использования характера изменения системы параметров электродвигателя в качестве диагностирующего сигнала. Исследование динамических процессов в электромеханической системе выполнялось путем численного эксперимента. Для этого был взят реальный конвейер марки НЕ-К (рис. 1) и разработана математическая модель, описывающая все процессы, происходящие в его электромеханической части. Конвейер представляет собой замкнутую ленту, огибающую приводной и натяжной барабаны. В промежутке между барабанами лента опирается на ряд роликовых опор, закрепленных на раме конвейера. Привод конвейера состоит из коническо-цилиндрического редуктора с асинхронным электродвигателем номинальной мощности 25 кВт. Двигатель питается от сети с линейным напряжением 380 В и имеет следующие внутренние параметры, полученные в результате расчета [6, 7]: сопротивление статора 4 Ом; индуктивность статора $2 \cdot 10^{-3}$ Гн; сопротивление ротора 2 Ом; индуктивность ротора $2 \cdot 10^{-3}$ Гн; взаимная индуктивность $10 \cdot 10^{-3}$ Гн; частота питающей сети 50 Гц; момент инерции $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. В состав механической части привода входят ротор электродвигателя, редуктор, приводной барабан, лента, опорные и поддерживающие ролики и натяжной барабан.

Для составления динамической модели привода конвейера был использован подход, описанный в работе [8], согласно которому все механические детали привода, включая и транспортную ленту, разделены на простые геометрические элементы. У каждого из элементов определены его момент инерции и податливость. Одновременно все эти участки деталей приведены к валу двигателя. В результате таких действий

у механической части привода конвейера выделены 25 простых элементов, которые и составили первоначальную динамическую модель. Затем путем постепенного выделения элементов с минимальным моментом инерции и распределения момента инерции этих элементов и податливостей между соседними сложная 25-массовая модель была приведена к 3-массовой (рис. 2) [9], где $J_1 = 0,153 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_2 = 0,392 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_3 = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{12} = 167,8 \text{ (Н} \cdot \text{м)/рад}$, $C_{23} = 141,4 \text{ (Н} \cdot \text{м)/рад}$.

Основываясь на принципе Даламбера, поведение полученной динамической модели описали системой следующих трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) &= M_{\text{дв}}; \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} - C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) &= -M_2; \\ J_3 \frac{d\omega_3}{dt} - C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) &= -M_3, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ и $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – скорости движения и углы поворота масс модели; C_{12} и C_{23} – жесткость связей между массами модели 1 и 2, 2 и 3; $M_{\text{дв}}$ – момент, создаваемый асинхронным двигателем; M_2 – момент от технологической нагрузки грузовой части ленты конвейера; M_3 – момент, создаваемый технологической нагрузкой холостой части ленты конвейера.

Для определения значений статических моментов M_2 и M_3 по методике, изложенной в работе [10], рассчитали диаграмму сил натяжения ленты конвейера. Значение разности сил натяжения ленты в точках 8 и 4 (рис. 1), умноженное на радиус барабана, а затем приведенное к валу двигателя, составило величину M_2 . Аналогичным образом, используя силы натяжения ленты в точках 1 и 4 (рис. 1), получили значение момента M_3 .

При математическом описании процессов электромеханического преобразования энергии электродвигателем синусоидальные изменения реальных пере-

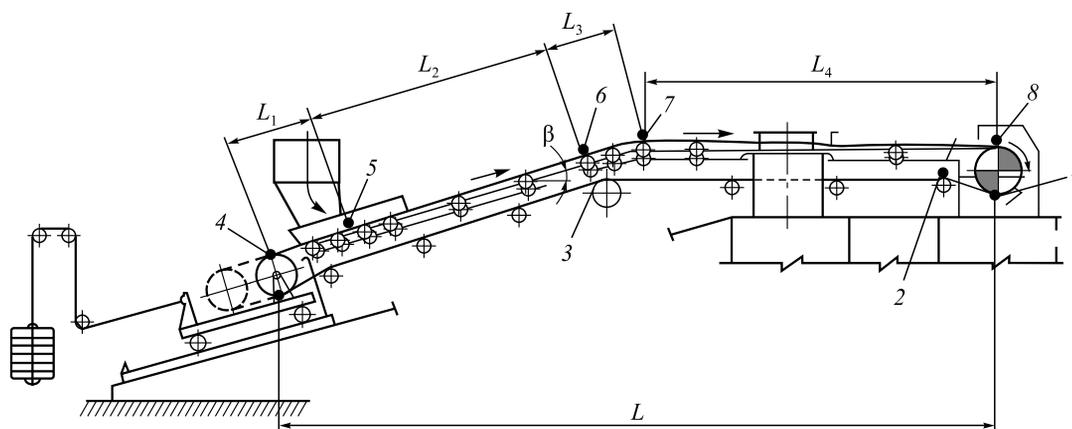


Рис. 1. Общий вид конвейера

Fig. 1. General view of the conveyor

менных электромашины преобразуются в постоянные величины.

Модель асинхронной машины включает в себя электрическую часть, представленную моделью пространства состояний четвертого порядка с описанием момента, возникающего на валу двигателя [11]. Все электрические переменные и параметры машины приведены к статору:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s &= R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_s; \\ 0 &= R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \bar{\psi}_r; \\ \bar{\psi}_s &= L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r; \\ \bar{\psi}_r &= L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r; \\ M_{дв} &= \frac{3}{2} pk_r Mod(\bar{\psi}_r \bar{i}_s); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_n, \end{aligned} \right\} (2)$$

где \bar{u}_s – напряжение питающей сети; R_s и R_r – сопротивление статора и ротора; $\bar{\psi}_s$ и $\bar{\psi}_r$ – потокосцепление статора и ротора; L_s и L_r , \bar{i}_s и \bar{i}_r – индуктивность и ток статора и ротора; $M_{дв}$ – момент двигателя; p – число пар полюсов асинхронного двигателя; L_m – взаимная индуктивность между статором и ротором; M_n – момент рабочего механизма, приведенный к валу; M – электромагнитный момент машины; J – момент инерции на валу машины; ω_m и ω_k – угловые скорости вала машины и системы координат; k_r – коэффициент соотношения взаимной индуктивности и индуктивности ротора.

После соответствующих преобразований уравнения примут вид

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s - r \bar{i}_s + L'_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j\omega_k L'_s \bar{i}_s - \frac{k_r}{T_r} \bar{\psi}_r + jk_r p \omega_m \bar{\psi}_r; \\ 0 = -k_r R_r \bar{i}_s + \frac{1}{T_r} \bar{\psi}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \bar{\psi}_r; \\ M = \frac{3}{2} pk_r Mod(\bar{\psi}_r \bar{i}_s); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n, \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\text{где } r = (R_s + k_r^2 R_r); L'_s = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right); k_r = \frac{L_m}{L_r}; T_r = \frac{L_r}{R_r}.$$

В неподвижной комплексной системе координат ($\omega_k = 0$) вещественная ось обозначается «а», а мнимая «β». Пространственные вектора в этом случае раскладываются по осям: $\bar{u}_s = u_{s\alpha} + ju_{s\beta}$, $\bar{i}_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}$, $\bar{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta}$. Подставив эти значения в уравнения и приравняв отдельно вещественные и мнимые части, операторная форма уравнений будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= r(1 + T'_s s) i_{s\alpha} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\alpha} - k_r p \omega_m \psi_{r\beta}; \\ u_{s\beta} &= r(1 + T'_s s) i_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\beta} + k_r p \omega_m \psi_{r\alpha}; \\ 0 &= -k_r R_r i_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\alpha} + p \omega_m \psi_{r\beta}; \\ 0 &= -k_r R_r i_{s\beta} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\beta} - p \omega_m \psi_{r\alpha}; \\ M_{дв} &= \frac{3}{2} pk_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}); \\ J s \omega_m &= M_{дв} - M_n = M_{дв} = C_{12} (\varphi_2 - \varphi_1), \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\text{где } T'_s = \frac{L'_s}{r}.$$

Полученная в процессе составления динамической модели система уравнений была решена в среде программирования Matlab [12 – 14]. Для этого была составлена функциональная схема (рис. 3), включающая блок источника питания 1, блок моделирования асинхронного двигателя 2 и блок моделирования механической трехмассовой части ленточного конвейера 3. В блоке 1 смоделирован трехфазный источник переменного напряжения $U = 380$ В стандартной частоты $f = 50$ Гц. Блок 2 содержит модель асинхронного электродвигателя, составленную при помощи стандартных блоков из библиотеки Simulink, с учетом соотношений параметров, показанных в системе уравнений (4). Механическая трехмассовая система в блоке 3 составлена при помощи блоков Integrator, имеющих расчетные моменты инерции и охваченных обратными связями расчетной жесткости. Связь между блоками происходит при помощи сумматоров [15].

В процессе моделирования режима выхода элементов конвейера из строя рассматривались три случая:

- режим работы конвейера без повреждений под воздействием номинальной нагрузки (рис. 2);
- процесс работы конвейера с заклиниванием одного опорного ролика грузовой части ленты конвейера и скачкообразного увеличения на 1,5 Н·м нагрузки, приложенной ко второй массе динамической модели конвейера;
- процесс работы конвейера с выходом двух опорных роликов грузовой части ленты конвейера из строя и скачкообразного увеличения на 3 Н·м нагрузки, приложенной ко второй массе динамической модели конвейера.

Характер изменения тока статора при моделировании вышеперечисленных вариантов показан на рис. 4, откуда видно, что при возникновении поломок с различной степенью увеличения нагрузки возникает скачкообразный рост потребляемой энергии статором двигателя, что выражается в повышении тока в обмотке статора. Значение этого увеличения в каждом из опытов численного эксперимента показано на графиках (рис. 4).

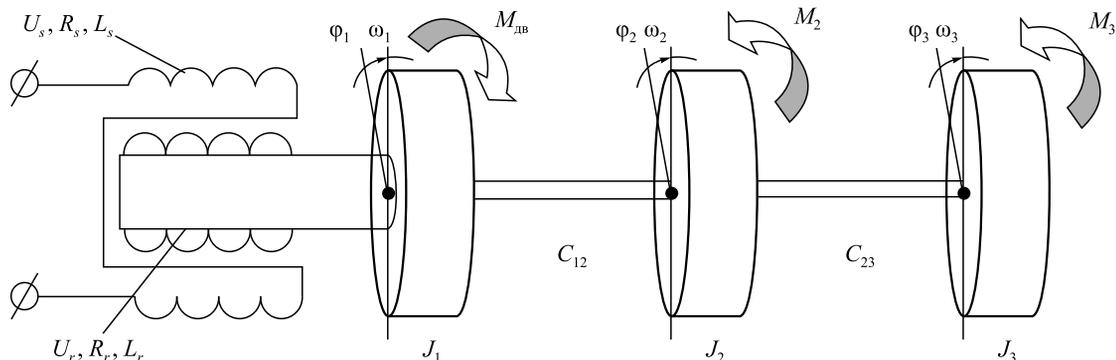


Рис. 2. Динамическая модель привода конвейера

Fig. 2. Dynamic drive model of the conveyor

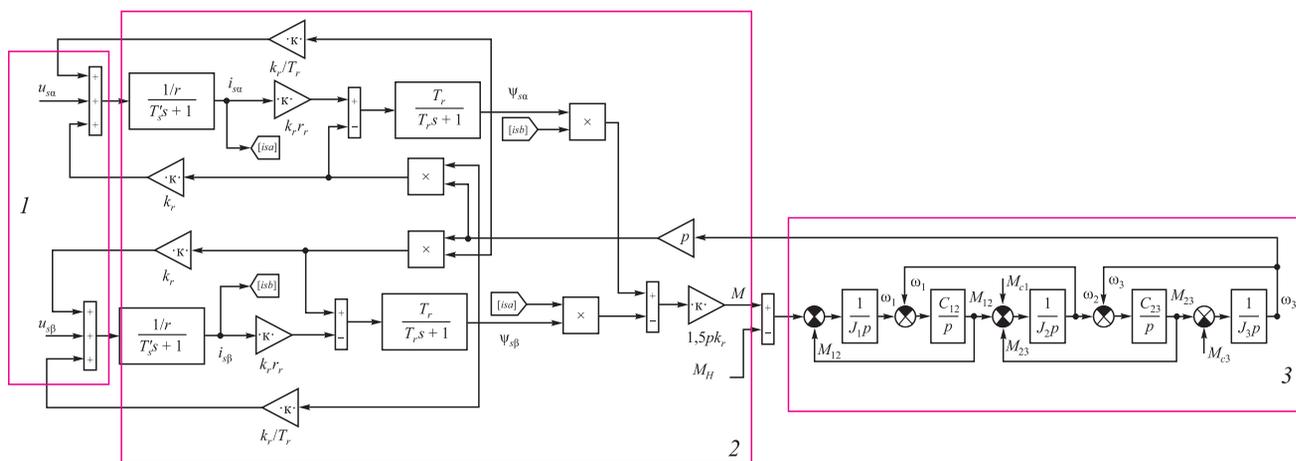


Рис. 3. Функциональная схема

Fig. 3. Functional scheme

Выводы. Повреждения конвейера типа заклинивания грузонесущих роликов вызывают увеличение потребляемой конвейером энергии, что проявляется в изменении параметров потребляемой из сети электрической мощности. При моделировании возникновения повреждения посредством приложения дополнительного момента к одной из движущихся масс переходный процесс в цепи статора длится 0,024 с. Скорость двигателя при этом снижается на 0,04 %. Ток статора электродвигателя возрастает на 0,45 – 0,52 % от текущих значений в нормальном режиме. При поломке двух роликов длительность переходного процесса остается прежней, снижение скорости составляет 0,08 %, ток статора двигателя возрастает на 0,91 – 1,03 % от текущих значений в нормальном режиме. Такое изменение параметров электродвигателя достаточно четко может быть выделено существующей на сегодняшний день измерительной аппаратурой и идентифицировано аппаратными средствами, контролирующими систему питания привода. Таким образом, постоянное отслеживание моментов изменения тока статора и сопоставление их со скоростными условиями работы

привода может быть использовано в качестве диагностического сигнала, предупреждающего о возникновении аварийной ситуации на транспортном участке конвейера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков А.С. Углеобогащительные и брикетные фабрики. – Л.: Углетехиздат, 1982. – 240 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
3. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2012. – 384 с.
4. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Ананьев Д.С. К обоснованию комплексного метода оценки работоспособности современных технологических объектов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 37 – 41.
5. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Ананьев Д.С., Реморов В.Е. Об использовании метода контроля состояния машин технологических агрегатов по энергетическим параметрам привода // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 31 – 33.
6. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
7. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
8. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 696 с.

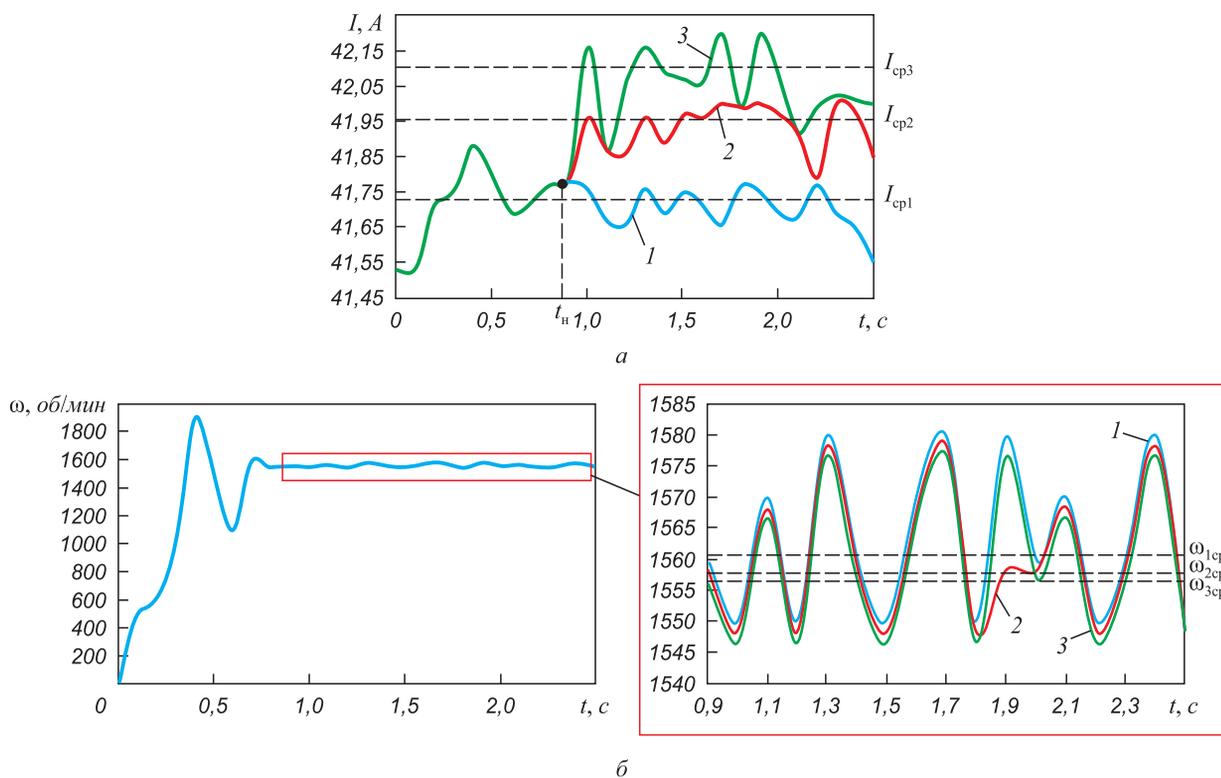


Рис. 4. Характер поведения тока статора асинхронного двигателя (а) и угловой скорости (б) при отсутствии неисправностей в конвейерной системе (1), выходе из строя поддерживающего ленту опорного ролика (2) и выходе из строя одновременно двух роликов (3): I_{cp1} и ω_{cp1} , I_{cp2} и ω_{cp2} , I_{cp3} и ω_{cp3} – средние значения тока и угловой скорости при отсутствии неисправностей конвейерной системы, при выходе из строя поддерживающего ленту опорного ролика и при выходе из строя одновременно двух роликов; t_n – время появления дефекта для случаев 1 и 2

Fig. 4. Behavior pattern of stator current of an asynchronous motor (a) and angular velocity (б) at the absence of defects in a conveyor system (1), at the failure of a bearing roller supporting the belt (2) and the failure of two rollers simultaneously (3): I_{cp1} and ω_{cp1} , I_{cp2} and ω_{cp2} , I_{cp3} and ω_{cp3} – average values of current and angular velocity at the absence of the defects in a conveyor system, at the failure of a bearing roller supporting the belt, as well as the failure of two rollers simultaneously; t_n – defect onset time for cases 1 and 2

9. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1988. – 639 с.
 10. Иванченко Ф.К. Расчет грузоподъемных и транспортирующих машин. – Киев: Вища школа, 1975. – 571 с.
 11. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
 12. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. – СПб: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
 13. Дьяконов В.П. SIMULINK 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 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. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 292 с.

Поступила 13 февраля 2015 г.

THE ASSESSMENT OF POWER CHANGES IN MOTOR PARAMETERS IN CASE OF EMERGENCIES IN THE MECHANICAL PART OF BELT CONVEYOR

A.N. Savel'ev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Machinery and Technological Equipment (Savelyev2000@mail.ru)

M.V. Kipervasser¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Electrical Engineering and Electrical Units

D.S. Anikanov², Service Engineer, Postgraduate

¹Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

²LLC Commissioning Division of the United Company "Sibshakhtostroï" (9, Kuznetskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo region, 654000, Russia)

Abstract. The paper reveals the nature of the dynamic interaction among mechanical and electric parameters of the drive when arising in mechanical part of conveyor of the sudden damages. The estimation of the possibility to use the behavior of the system of electric parameters of electric motor as a diagnosing signal is given. The joint model was formed to study the dynamic processes in the system "supplying network – anisochronous engine – belt conveyor". The supplying network

and anisochronous engine are described by the model of problem space of the fourth order with the reception on withdrawal of the moment value on the electric motor shaft. The certain moments of inertias and softness of the relationships between sections have been defined for the mechanical part of the belt conveyor. Using the way of the gradual separation element since the minimum moment of the inertias and sharing the moment of the inertias of these elements and softness between the nearby elements, a 3-h mass system has been received. It simulates the mechanical part of the experimental unit. The formed dynamic model was solved in ambience of Matlab Simulinc. The article also presents the received data on energy factors of the drive in dynamic processes, following the emergencies in mechanisms.

Keywords: conveyor, induction motor, electromechanical conversion, dynamic model.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-906-911

REFERENCES

1. Bol'shakov A.S. *Ugleobogatitel'nye i briketnye fabriki* [Coal-cleaning and briquetting plants]. Leningrad: Uglemettekhizdat, 1982, 240 p. (In Russ.).
2. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 240 p. (In Russ.).
3. Nosov V.V. *Diagnostika mashin i oborudovaniya: Uchebnoe posobie* [Machine and equipment diagnostics]. St. Petersburg: Lan', 2012, 384 p. (In Russ.).
4. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S. To the validation of the complex method of performance assessment of modern technological facilities. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 12, pp. 37–41. (In Russ.).
5. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S., Remorov V.E. On the use of the method of monitoring the condition of machinery technological units by the energy parameters of the drive. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 12, pp. 31–33. (In Russ.).
6. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electric machine design]. Moscow: Energiya, 1980, 495 p. (In Russ.).
7. Bolotin V.V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruktzii* [Forecasting of machine and construction resources]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 312 p. (In Russ.).
8. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 696 p. (In Russ.).
9. Artobolevskii I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow: Nauka. 1988, 639 p. (In Russ.).
10. Ivanchenko F.K. *Raschet gruzopod'emnykh i transportiruyushchikh mashin* [Calculation of load-lifting and transport vehicles]. Kiev: Vishcha shkola, 1975, 571 p. (In Russ.).
11. *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Reference book on automated electric drive]. Eliseev V.A., Shinyanskii A.V. eds. Moscow: Energoatomizdat, 1983, 616 p. (In Russ.).
12. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovykh system* [Computer modeling of semiconductor systems]. St. Petersburg: KORONA print, 2001, 320 p. (In Russ.).
13. D'yakonov V.P. *SIMULINK 4. Spetsial'nyi spravochnik* [SIMULINK 4. Special reference book]. St. Petersburg: Piter, 2002, 528 p. (In Russ.).
14. D'yakonov V.P. *MATLAB 6/5 SP1/7+Simulin 5/6. Osnovy primeneniya. Seriya "Biblioteka professionala"* [MATLAB 6/5 SP1/7+Simulin 5/6. Application basics. Series "Library of a professional"]. Moscow: SOLON-Press, 2005, 800 p. (In Russ.).
15. Terekhin V.B. *Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink: Uchebnoe posobie* [System modeling of electric drive in Simulink: Teaching aid]. Tomsk: Izd-vo TPU, 2010, 292 p. (In Russ.).

Received February 13, 2015