

Семыкина Ирина Юрьевна, доктор техн. наук, доцент, **Тарнецкая Александра Викторовна**, аспирант

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА НА БАЗЕ БЕЗРЕДУКТОРНОГО СИНХРОННОГО МОТОР-БАРАБАНА

Аннотация:

Статья посвящена разработке системы управления для нового типа электропривода шахтных ленточных конвейеров – безредукторного мотор-барабана на основе тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), обеспечивающего регулирование скорости конвейера в зависимости от грузопотока. Рассмотрены преимущества безредукторного синхронного электропривода относительно традиционного асинхронного электропривода. Приведена модель тихоходного СДПМ мощностью 680 кВт, полученная с помощью метода конечных элементов в программной среде MagNet Infolytica и разработана модель системы векторного управления СДПМ, построенная по принципу полеориентированного управления. В заключительной части статьи смоделированы многомассовая механическая модель конвейера с двухдвигательным электроприводом и сформирована модель оценки грузопотока в пакете Matlab Simulink.

Ключевые слова: безредукторный мотор-барабан; синхронный двигатель с постоянными магнитами; регулируемый электропривод ленточного конвейера; двухдвигательный электропривод.

Информация о статье: принята 01 февраля 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-47-53

Введение и постановка задачи

Ленточные конвейеры – самый распространенный способ доставки полезных ископаемых из забоя. Из-за широкого распространения и большого энергопотребления вопрос энергоэффективности шахтных ленточных конвейеров уже многие годы остается актуальным. Наибольшие энергозатраты приходится на системы нерегулируемого электропривода с асинхронными двигателями и гидравлическими муфтами, несколько меньшие – системы асинхронного электропривода с устройствами плавного пуска [1].

Эффективность конвейера определяется его энергопотреблением и безопасностью работы. По данным [2] наиболее вероятными местами возникновения пожаров в процентном соотношении являются конвейерные штреки (25,1 %) и наклонные выработки с ленточными конвейерами (14,2 %). Причины возникновения пожаров неоднозначны и трудноустановимы, однако наибольшую возможность для возгорания представляют трение ленты при пробуксовке, электрические кабели и соединения, трущиеся механические передачи, легковоспламеняющиеся минеральные масла в гидромуфтах и смазочные материалы редуктора. Для улучшения пожаробезопасности электропривод ленточного конвейера должен быть оборудован взрывозащитным кожухом и специальной аппаратурой для контроля параметров окружающей среды. Однако даже при соблюдении всех требований массивный редуктор, расположенный сбоку от направляющего барабана,

представляет собой угрозу безопасности для обслуживающего персонала, затрудняет доступ к электродвигателю и барабану, а наличие смазочных материалов способствует разрастанию возгорания. Помимо увеличения массогабаритных показателей электропривода редуктор снижает КПД, а значит, и энергоэффективность ленточного конвейера, зубчатые передачи ограничивают выходную механическую мощность и нуждаются в дополнительных затратах на обслуживание и ремонт [3].

В логистической и легкой промышленности на конвейерах малой мощности уже несколько десятилетий применяются мотор-барабаны в герметичном корпусе, что снижает вероятность аварийных ситуаций при работе персонала, уменьшает попадание внутрь двигателя пыли и воздействие агрессивной среды. В асинхронных мотор-барабанах устанавливаются механические передачи для усиления механического момента асинхронных двигателей, но на рынке имеются уже и безредукторные мотор-барабаны, в основном представляющие собой тихоходный синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Безредукторные технологии применяются в горной промышленности уже с 70-х годов в рудничных подъемных и мельничных установках. Благодаря обратной конструкции и прямой передаче механического момента ротор двигателя выступает рабочим органом, например, корпусом мельницы. Первый безредукторный электропривод для ленточного конвейера был разработан подразделениями Orenstein &

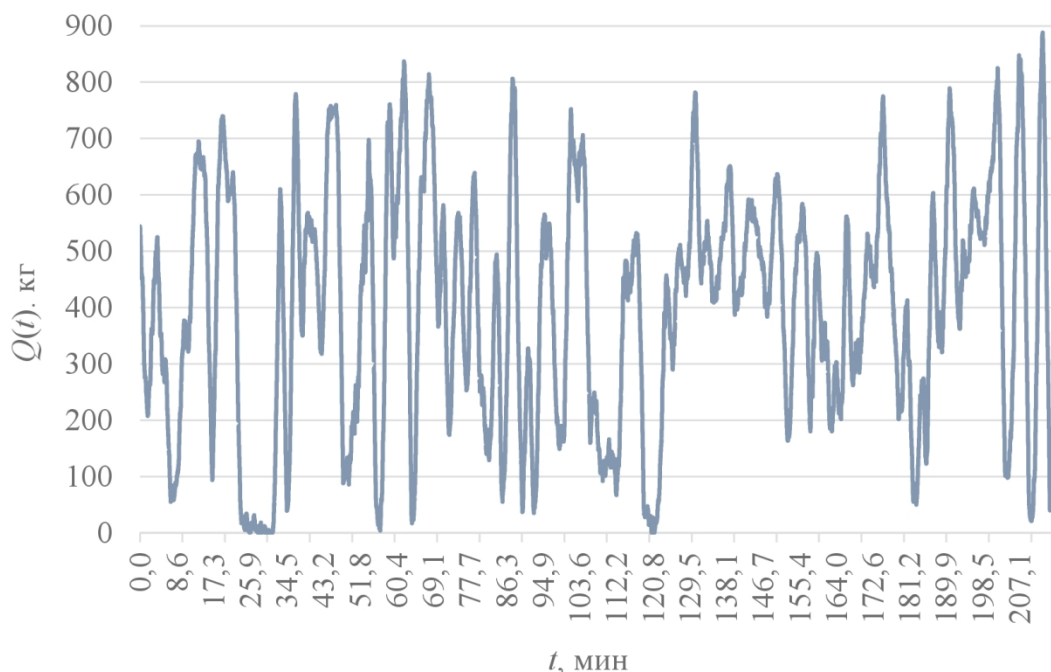


Рис. 1. Пример типичного грузопотока магистрального ленточного конвейера
Fig. 1. A typical example of mine belt conveyor load

Koppel (O&K) и Siemens для угольной шахты Прогер-Ханиэль (Германия) [4]. Система электропривода, которая по сей день функционирует на конвейере длиной 3,8 км, состоит из двух синхронных двигателей суммарной мощностью 3,1 кВт, работающих на скорости 46,9 об/мин, и непосредственных преобразователей частоты (циклоконвертеров). Номинальная производительность конвейера 1,800 т/ч. Но, несмотря на опыт успешного внедрения в 1985 г., широкого распространения эти системы не получили из-за сложности и дороговизны изготовления специальных циклоконвертеров.

В наши дни с учетом развития преобразовательной техники, значительного удешевления преобразователей частоты и массовости их производства безредукторные электроприводы активно внедряются на магистральные ленточные конвейеры. В 2015 г. Корпорации Siemens и Thyssen-Krupp установили на самом длинном в мире ленточном конвейере на медном руднике в Антапаккай (Перу) систему безредукторного электропривода с двумя СДПМ суммарной мощностью 6,2 МВт, а в 2018 г. компания ABB представила на рынке первую серию высокомоментных СДПМ для ленточных конвейеров средней мощности (1-3 МВт) [5]. Однако прецеденты использования безредукторных мотор-барабанов на подземных горных выработках в России до сих пор отсутствуют.

Помимо отсутствия редуктора и связанных с этим преимуществ, регулируемый безредукторный электропривод на основе СДПМ способствует повышению энергоэффективности ленточного конвейера за счет регулирования скорости ленты в зависимости от грузопотока. В среднем ленточные конвейеры могут быть недогруженными до 90 % от времени рабочей смены [6]. При регулировании и движении

конвейера с пониженной скоростью обеспечивается максимальное сечение груза на всем протяжении ленты и снижение энергопотребления [7]. В качестве примера на рис. 1 показан суммарный по минуте грузопоток $Q(t)$ магистрального конвейера на шахте им. С.М. Кирова (г. Ленинск-Кузнецкий), зафиксированный с начала смены. Изменения грузопотока на графике имеют типичный резкопеременный характер с периодами минимальной загрузки ленты длительностью от единиц до десятков минут.

Регулирование скорости конвейера в системе с безредукторным мотор-барабаном в функции грузопотока может осуществляться только посредством преобразователя частоты. Исходя из вышесказанного, для создания нового типа электропривода шахтных ленточных конвейеров на базе безредукторного мотор-барабана необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать тихоходный СДПМ для мотор-барабана специальной конструкции;
- 2) разработать систему векторного управления (СВУ) тихоходным СДПМ, соответствующую требованиям, предъявляемым динамикой работы ленточного конвейера;
- 3) разработать компьютерную модель для полученного электропривода, учитывающую многомассовую расчетную схему механической части ленточного конвейера для объективного отображения переходных процессов при регулировании скорости;
- 4) предложить регулятор скоростей ленточного конвейера, приводимого в движение полученным электроприводом, работающий в функции грузопотока.

Система векторного управления безредукторным мотор-барабаном

Таблица. Параметры разработанного тихоходного СДПМ мощностью 680 кВт

Table. Parameters of PMSM with special construction and capacity of 680 kW

U, В	P _н , кВт	R _s , Ом	L _d , Гн	L _q , Гн	M _н , Н·м	Ψ _{PM} , Вб	p _n	J, кг·м	cosφ	η
6000	680	2,367	0,579	0,496	110330	52,49	12	0,025	0,72	93,8

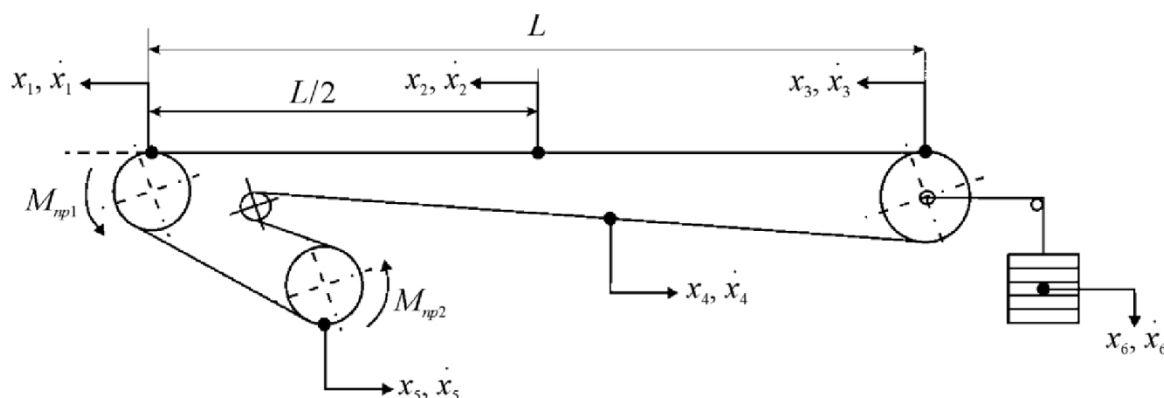


Рис. 2. Расчетная схема механической части ленточного конвейера с двумя двигателями и натяжным устройством

Fig. 2. The design model of a belt conveyor's mechanics with two engines and a tension device

При разработке тихоходного СДПМ для мотор-барабана специальной конструкции за основу были приняты характеристики электропривода ленточного конвейера шахты Талдинская-Кыргайская (г. Новокузнецк). Конструкция и параметры данного СДПМ были получены с помощью метода конечных элементов с использованием программного обеспечения MotorSolve и MangetForce. Параметры разработанного тихоходного СДПМ мощностью 680 кВт указаны в таблице 1.

Из-за высокой коэрцитивной силы неодимовых магнитов и перемагничивания зубцовых зон статора и ротора тихоходные СДПМ отличаются значительным зубцовым моментом, в конструкцию двигателя необходимо закладывать его компенсацию [8]. Моделирование работы данного тихоходного СДПМ для электропривода с параметрами реального ленточного конвейера шахты Талдинская-Кыргайская более детально представлено в [9].

При формировании структуры системы управления для электропривода ленточного конвейера на базе разработанного тихоходного СДПМ были учтены следующие требования:

1. Широкий диапазон регулирования момента для обеспечения управляемости при переменных динамических нагрузках, обеспечение плавного пуска и плавного торможения;
2. Высокая точность регулирования для управления на низких и близких к нулю скоростях вращения;
3. Быстродействие управления для устойчивого управления при частых переходных процессах [10, 11].

Управление тихоходным СДПМ на низкой скорости затруднено высокими пульсациями момента и большой остаточной ЭДС намагниченности. Кроме того, требуется оценивать угол отклонения ротора θ с помощью инкрементального энкодера. Одним из эффективных методов управления СДПМ на низкой

скорости является полеориентированное управление (ПОУ), при котором электромагнитный момент и потокосцепление статора контролируются косвенно посредством управления составляющими вектора тока статора. Для подачи импульсов необходимой величины на ключи инвертора используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Более подробно выбор метода векторного управления и схемы СВУ тихоходным СДПМ обоснован в [9].

Моделирование ленточного конвейера

Для моделирования ленточного конвейера используется принцип кусочно-линейной аппроксимации, заключающийся в условном разбиении контура ленты на некоторое количество участков, в границах которых закон изменения скорости деформации по длине предполагается линейным [12, 13].

На рис. 2 показана расчетная схема механической части ленточного конвейера с двумя двигателями и натяжным устройством. Для систем с безредукторными мотор-барабанами однодвигательная схема не подходит для применения из-за особенностей СДПМ – высокие пульсации момента при переходных процессах вызывают упругие волны в ленте, и при наборе скорости конвейер может быстро терять управляемость.

Многомассовая расчетная схема ленточного конвейера моделируется на основе уравнений Лагранжа и представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} + \frac{\partial A}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия участка конвейера; Π – потенциальная энергия участка; A – работа внешних сил на участке.

В качестве обобщенных координат принимаются перемещения точек x_i и скорости перемещения \dot{x}_i . Система описывается вектором состояний с двенадцатью координатами $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, \dot{x}_5, \dot{x}_6]$, где индексами 1-5 обозначены

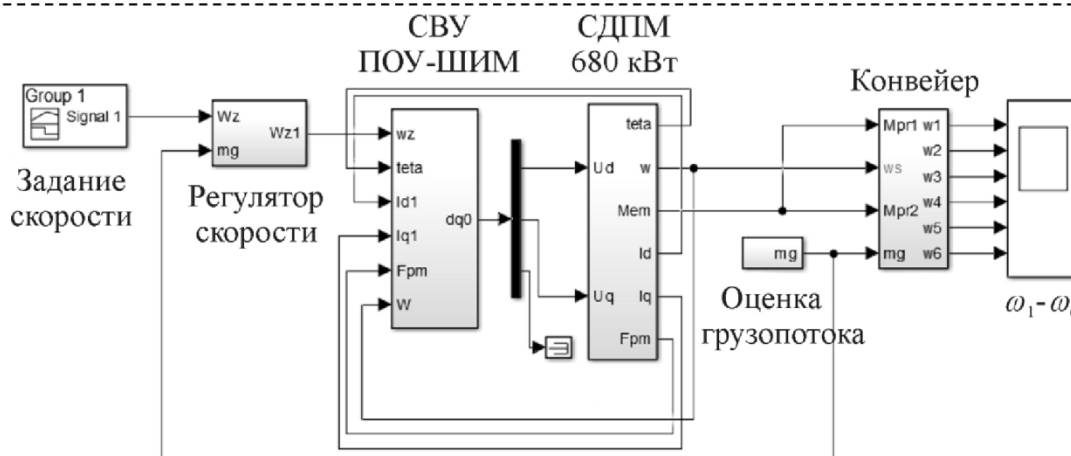


Рис. 3. СВУ регулируемым безредукторным мотор-барабаном
Fig. 3. The vector control system of the gearless drum motor

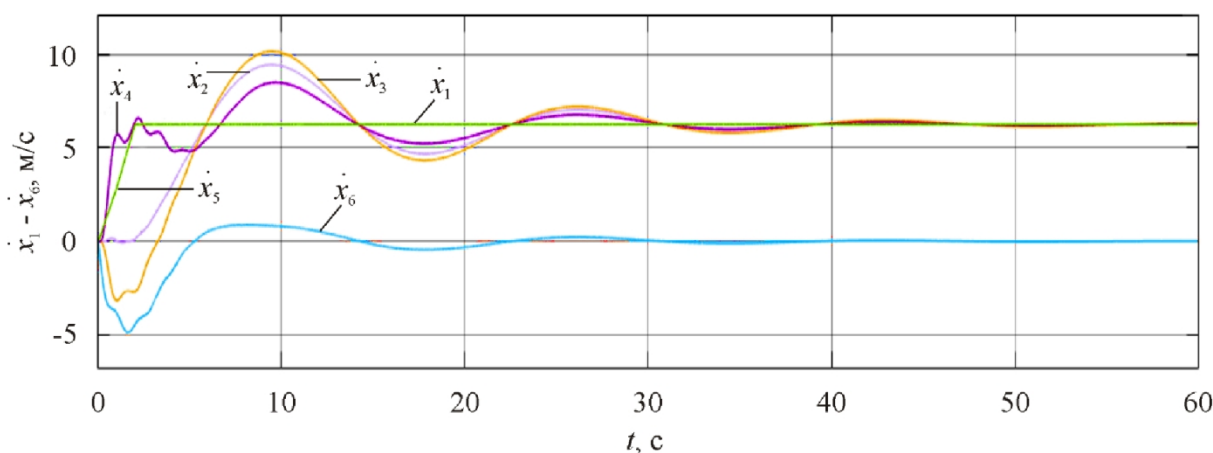


Рис. 4. Переходные процессы при плавном пуске
Fig. 4. Belt conveyor transients at soft starting

координаты состояния ленточного полотна, а индексом 6 – координаты состояния натяжного устройства.

Подробные преобразования уравнения Лагранжа к матричному представлению для моделирования с использованием программного обеспечения Matlab представлены в [13, 14]. В качестве масс приводов принимаются массы мотор-барабанов, которые идентичны и имеют одинаковый радиус $R_b = 0,5$ м. На рис. 3 показана схема СВУ регулируемым безредукторным мотор-барабаном ленточного конвейера, реализованная в Matlab Simulink, а на рис. 4 приведены переходные процессы скоростей перемещения $\dot{x}_1 \dots \dot{x}_6$ при плавном пуске СДПМ с загруженной лентой. Во избежание упругих ударов и распространения колебаний вдоль ленты принято время нарастания задания до номинальной скорости вращения $\omega = 6,28$ рад/с – 4 с.

Регулирование скорости конвейера в зависимости от грузопотока

Грузопоток ленточных конвейеров принято описывать как непрерывный случайный процесс во времени [14-17]. В работе [14] случайный грузопоток описывается с помощью эмпирических характеристик и законов распределения Гаусса и Пирсона.

Также при изучении временных рядов шахтных грузопотоков было отмечено, что грузопоток зачастую можно представить как поток импульсов единичной высоты, характеризующий интервалы максимального поступления (1) и отсутствия груза (0). Для оценки грузопотока необходимо вычлнить низкие и высокие составляющие случайной величины грузопотока в заданном интервале сглаживания.

Из рис. 4 можно определить, что переходный процесс плавного запуска конвейера до номинальной скорости вращения длится около 60 с, поэтому для составления модели грузопотока рассматривались только его поминутные значения, что в достаточной мере описывает характер динамики изменения грузопотока и согласуется с графиком на рис. 1.

Для моделирования грузопотока был использован высокочастотный фильтр с узкой полосой пропускания, описываемый следующей передаточной функцией:

$$W(j\omega) = \sqrt{\frac{\alpha D}{\pi}} \frac{j\omega + \sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2}}{j\omega^2 + 2j\omega\alpha + (\omega_0^2 + \alpha^2)^2}, \quad (2)$$

где α – математическое ожидание случайного распределения грузопотока; D – дисперсия, ω_0 – частота среза.

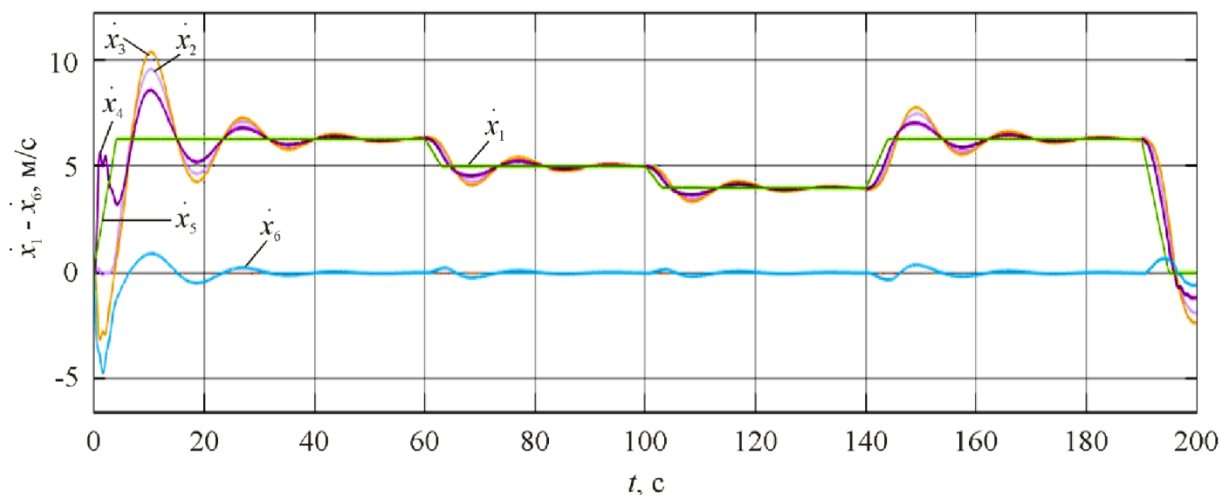


Рис. 5. Переходные процессы при регулировании скорости
Fig. 5. Belt conveyor transients at speed adjustment

В качестве входного сигнала фильтра выступает случайный сигнал с равномерным распределением величин от 0 до 1, на выходе фильтра формируется случайная величина с заданными параметрами. Грузопотоку ленточного конвейера, показанному на рис. 1, соответствуют следующие параметры фильтра – $\alpha=0,473$, $D=0,226$, $\omega_0=0,05$.

Переходные процессы в ленте при плавном пуске, регулировании скорости и торможении показаны на рис. 5. Регулирование скорости вращения СДПМ реализовано ступенчатым образом: при массе груза $m_g < 400$ кг скорость мотор-барабана устанавливается $\omega_1 = 4$ рад/с; в случае $400 \text{ кг} < m_g < 600$ кг – $\omega_2 = 5$ рад/с; при $m_g > 600$ кг устанавливается номинальная скорость вращения СДПМ. Диапазон регулирования при необходимости может быть увеличен, однако не рекомендуется значительно снижать нижний порог скорости вращения СДПМ, поскольку при работе на близких к нулю скоростях повышается вероятность «залипания» ротора в магнитном поле статора при положениях угла θ , кратных 30° , а установление нижней границы по скорости вращения с устойчивой работой является предметом дальнейших исследований.

Анализ переходных процессов на рис. 5 показывает, что средняя длительность переходных процессов при переключении скорости составляет 30 с, в то же время согласно рис. 1 среднее время качественного изменения грузопотока 1-10 мин. Таким образом, длительность переходных процессов по скорости ленточного конвейера существенно меньше периода изменения нагрузки, а значит, выполняются требования, предъявленные к электроприводу при его разработке.

При необходимости частого регулирования и наличии требований по снижению времени переходных процессов, связанных с повышенным зубцовым моментом СДПМ и колебаниями ротора из-за перемagnetивания материала статора, рекомендуется проводить подстройку тягового фактора конвейера.

Заключение

Разработана система управления для электропривода шахтных ленточных конвейеров, построенная на базе безредукторного мотор-барабана на основе тихоходного СДПМ. Данная конструкция электропривода повышает эффективность конвейера за счет отсутствия редуктора в составе привода и регулирования скорости конвейера в зависимости от грузопотока. Работоспособность предложенных решений проверена компьютерным моделированием, по результатам которого система управления соответствует требованиям, предъявляемым динамикой работы ленточных конвейеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семькина И.Ю. Современное состояние и тенденции развития энергосберегающих электроприводов горных машин // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 9. – С. 23-29.
2. Малашкина В.А. Анализ факторов, определяющих возгорание на шахтных ленточных конвейерах на ранней стадии / В.А. Малашкина, С.С. Перекатов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №11.
3. Тарнецкая А.В. Актуальность разработки безредукторного мотор-барабана с синхронным двигателем для шахтных ленточных конвейеров / А.В. Тарнецкая, И.Ю. Семькина // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, 2-4 декабря 2015. – Кемерово: КузГТУ, 2015.
4. Fiscor S. Xstrata Invests in Gearless Conveyor Drives // Engineering & Mining Journal. – 2011. – № 6.
5. Kanaris A. The Energy Savings & Performance gains between two Conveyor Drive Designs // Van der Graaf, Drum-motors, 6 April 2016. – Berlin.
6. Папоян Р.Л. Повышение эффективности использования шахтных конвейерных линий автоматическим регулированием скорости и определением грузопотоков: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1967. – 213 с.

7. Lauhoff H. Speed Control on Belt Conveyors – Does it Really save Energy // Bulk Solids Handling. – 2005. – № 6.

8. Тарнецкая А.В. Компенсация зубцового момента высокомоментного тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами / А.В. Тарнецкая, И.Ю. Семькина // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы III Всероссийской научно-практической конференции, 13-15 декабря 2017. – Кемерово: КузГТУ, 2017.

9. Semykina I.U. Magnet Synchronous Machine of Mine Belt Conveyor Gearless Drum-Motor / I.U. Semykina, A.V. Tarnetskaya // E3S Web of Conferences. – 2018. – № 41.

10. Галкин В.И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, В.П. Дьяченко, И.В. Запенин, Е.Е. Шешко. – М.: Изд-во МГТУ, 2005. – 543 с.

11. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. для вузов / М.П. Белов, А.Д. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Академия, 2007. – 576 с.

12. Дьяков В.А. Ленточные конвейеры в горной промышленности / В.А. Дьяков, Л.Г. Шахмистер, В.Г. Дмитриев и др.; под редакцией чл. кор.

АН СССР А.О. Спиваковского. – М.: Недра, 1982. – 349 с.

13. Дмитриева В.В. Разработка математической модели ленточного конвейера с двухдвигательным приводом / В.В. Дмитриева, С.В. Гершун // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 8.

14. Дмитриева В.В. Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2005.

15. Дьяченко В.П. Методы описания величины случайного грузопотока ленточных конвейеров горных предприятий на основе ее эмпирических распределений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №3.

16. Петков О.Н. Разработка и исследование системы автоматического управления скоростью ленточного конвейера по входному грузопотоку: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1984.

17. Мерцалов Р.В. Исследование подземных грузопотоков и установление способов повышения эффективности использования шахтных конвейеров: дис. ... канд. техн. наук. – Караганда, 1968. – 159 с.

Irina Y. Semykina, Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Aleksandra V. Tarnetskaya**, Postgraduate

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesenniyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation.

THE CONTROL SYSTEM OF ADJUSTABLE-SPEED GEARLESS PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS DRUM-MOTOR FOR BELT CONVEYOR

Abstract: The article is devoted to development a new type of electric drive for mining belt conveyor that consists of a gearless drum-motor based on the slow-moving permanent magnet synchronous motor (PMSM) which ensures adjustment of conveyor speed depending on load. The advantages of the gearless synchronous electric drive are reviewed in comparison to a traditional asynchronous one. Further sections present the model of PMSM with special construction and capacity of 680 kW created by finite elements method in MagNet Infolytica software and the vector control system of PMSM using the field oriented control approach. The final part of the article contains simulation results. The simulation in Matlab Simulink software includes a multi-mass model of belt conveyor mechanics with a double drum-motor drive and stochastically determined load.

Keywords: gearless drum-motor; permanent magnet synchronous motor; controlled electric drive for mining belt conveyor; double drum-motor drive.

Article info: received February 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-47-53

REFERENCES

1. Semykina I.Yu. Sovremennoe sostoyanie i tendencii razvitiya energosberegayushchih elektroprivodov gornykh mashin [Modern State and Trends of Energy Saving Electric Drives of Mining Machines] // Gornoe Oborudovanie i Elektromekhanika, 2012, No. 9, pp. 23-29. (rus)

2. Malashkina V.A., Perekatov S.S. Analiz faktorov, opredelyayushchih vozгорание na shahtnykh

lentochnykh konveierakh na rannei stadii [Analysis of Early Stage Causes of Belt Conveyor Combustion in Mines]. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2013. No. 11. (rus)

3. Tarnetskaya A.V., Semykina I.U. Aktualnost razrabotki bezreduktornogo motor-barabana s sinhronnym dvi-gatelem dlya shahtnykh lentochnykh konveierov [The relevance of developing a gearless motor-

drum with a synchronous motor for mine belt conveyors]. *Energetika i energosberejenie, teoriya i praktika* [Energy and energy saving, theory and practice], Kemerovo, December 2–4, 2015. (rus)

4. Fiscor S. Xstrata Invests in Gearless Conveyor Drives. *Engineering & Mining Journal*, 2011, No. 6.

5. Kanaris A. The Energy Savings & Performance gains between two Conveyor Drive Designs. Van der Graaf, Drum-motors, Berlin, April 6, 2016.

6. Papoyan R.L. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya shahtnyh konveiernykh linii avtomaticheskim regulirovaniem skorosti i opredeleniem gruzopotokov [Improving efficiency of mine conveyor lines by automatic speed control and the determination of traffic flows]. Moscow, PhD thesis, 1967, 213 p. (rus)

7. Lauhoff H. Speed Control on Belt Conveyors – Dose it Really Save Energy. *Bulk Solids Handling*, 2005, No. 6.

8. Tarnetskaya A.V., Semykina I.U. Kompensaciya zubcovogo momenta vysokomoschnogo tihohodnogo sinhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami [Compensation of the cog torque of a high-power low-speed permanent magnets synchronous motor]. *Energetika i energosberejenie, teoriya i praktika* [Energy and energy saving, theory and practice], Kemerovo, December 13–15, 2017. (rus)

9. Semykina I.U., Tarnetskaya A.V. Magnet Synchronous Machine of Mine Belt Conveyor Gearless Drum-Motor. *E3S Web of Conferences*, 2018, No. 41.

10. Galkin V.I., Dmitriev V.G., Diyachenko V.P., Zapenin I.V., Sheshko E.E. Sovremennaya teoriya lentochnykh konveierov gornyyh predpriyatii [Modern theory of belt conveyors of mining enterprises]. Moscow, MGGU Publ., 2005, 543 p. (rus)

11. Belov M.P., Novikov A.D., Rassudov L.N. Avtomatizirovannyi elektroprivod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tehnologicheskikh kompleksov [Automated electric drive of standard production

mechanisms and technological complexes]. Moscow, “Akademiya” Publ., 2007, 576 p. (rus)

12. Dyakov V.A., Shakhmeister L.G., Dmitriev V.G. and others. Lentochnye konveiry v gornoj promyshlennosti [Belt conveyors in mining industry]. Moscow, “Nedra” Publ., 1982, 349 p. (rus)

13. Dmitrieva V.V., Gershun S.V. Razrabotka matematicheskoi modeli lentochnogo konveiera s dvuhdvigatel'nyim privodom [Development of the mathematical model of the belt conveyor with double-motor drive]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2008, No. 8. (rus)

14. Dmitrieva V.V. Razrabotka i issledovanie sistemy avtomaticheskoi stabilizatsii pogonnoi nagruzki magistral'nogo konveiera [Development and research of the automatic stabilization system of the linear load of the main conveyor]. Moscow, Synopsys of PhD thesis, 2005. (rus)

15. Dyachenko V.P. Metody opisaniya velichiny sluchainogo gruzopotoka lentochnykh konveierov gornyyh predpriyatii na osnove ee empiricheskikh raspredelenii [Methods of magnitude describing of random loads for belt conveyor in mining enterprises based on its empirical distributions]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2007, No. 3. (rus)

16. Petkov O.N. Razrabotka i issledovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu lentochnogo konveiera po vhodnomu gruzopotoku [Development and research of the automatic speed control system for belt conveyors via input traffic flow]. Moscow, Synopsys of PhD thesis, 1984. (rus)

17. Mercalov R.V. Issledovanie podzemnykh gruzopotokov i ustanovlenie sposobov povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya shahtnykh konveierov [Study of underground traffic flow and determining the ways to improve the efficiency of mine conveyors]. Karaganda, Synopsys of PhD thesis, 1968. (rus)

Библиографическое описание статьи

Семькина И.Ю., Тарнецкая А.В. Система управления электроприводом ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана // Горное оборудование и электромеханика — 2019. — № 1 (141). — С. 47–53.

Reference to article

Semykina I.Y., Tarnetskaya A.V. The control system of adjustable-speed gearless permanent magnet synchronous drum-motor for belt conveyor. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2019, no. 1 (141), pp. 47–53.