ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(11):80-95
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.313.334 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_80

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

В.В. Дмитриева[1], А.А. Собянин[1], П.Е. Сизин[2]

[1] РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина. Национальный исследовательский университет, Москва, Россия

[2] ИБО НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: mstranger@list.ru

Аннотация: Цель работы – исследование режимов торможения конвейерной ленты. При останове или торможении конвейера в ленте возникают волны сжатия и растяжения, распространение которых приводит к пробуксовке и проскальзыванию ленты. Это влечет за собой износ ленты и поломку другого оборудования, что требует дорогостоящего ремонта. В статье представлены результаты моделирования торможения конвейера в программах SimPowerToolbox и Simulink. Полученные результаты позволяют сравнивать свободный выбег конвейера и принудительное торможение. Основные результаты работы — полученные переходные процессы токов статора и ротора, скорости вращения двигателя при торможении конвейера, скорости движения конвейерной ленты, усилий в ленте и тягового фактора, КПД двигателя. Выводы: разработанная модель позволяет исследовать динамические режимы работы двигателя и механической части конвейера, анализировать усилия, возникающие в ленте при торможении, оценивать скольжение ленты и величину коэффициента тяги. На графиках хорошо видно увеличение скорости хвостового барабана, вызванное волной сжатия, поэтому можно рекомендовать предварительное торможение хвостового барабана, так, чтобы соблюдалось условие Эйлера. Величина тормозного усилия может быть рассчитана заранее с использованием пропорциональной зависимости между возникающими при торможении хвостового барабана силами сопротивления движению ленты и величиной силы трения между тормозной колодкой (или диском) и барабаном. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы при разработке системы регулирования скорости ленты в зависимости от объема случайного грузового потока, поступающего на конвейер.

Ключевые слова: пуско-тормозные режимы, тормозной момент, принудительное торможение, свободный выбег, управляемое натяжное устройство, тяговый фактор, динамические усилия в ленте, математическое моделирование.

Для цитирования: *Дмитриева В. В., Собянин А. А., Сизин П. Е.* Моделирование различных режимов торможения ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 80–95. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_80.

Modeling of various modes of belt conveyor braking

V.V. Dmitrieva[1], A.A. Sobyanin[1], P.E. Sizin[2]

[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia

[2] Institute of Basic Education, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru

© В.В. Дмитриева, А.А. Собянин, П.Е. Сизин. 2022.

Abstract: The purpose of the work is to consider the braking modes of the conveyor belt. When the conveyor is stopped or decelerated, compression and stretching waves occur in the belt, the propagation of which leads to slipping of the belt. This entails the wear of the tape and the breakdown of other equipment, which requires expensive repairs. The article presents the results of modelling conveyor braking in the programs SimPowerToolbox and Simulink. The results obtained allow us to compare the free run-out of the conveyor and the forced braking. The main results of the work are the obtained transient processes of the stator and rotor currents, the speed of rotation of the motor during braking of the conveyor, the speed of movement of the conveyor belt, the forces in the belt and the traction factor, the efficiency of the engine. Conclusions: the developed model allows us to investigate the dynamic operating modes of the engine and the mechanical part of the conveyor, to analyze the forces arising in the belt during braking, to evaluate the slip of the belt and the magnitude of the traction coefficient In both cases, the graphs clearly show an increase in the speed of the tail drum caused by a compression wave passing through the freight branch, then we can recommend preliminary braking of the tail drum so that the Euler condition is met. The amount of braking force can be calculated in advance using a proportional relationship between the forces of resistance to the movement of the belt that occur during braking of the tail drum and the amount of friction force between the brake pad (or disc) and the drum. In addition, the results obtained can be used in the development of a belt speed control system depending on the volume of random freight traffic entering the conveyor.

Key words: starting and braking modes of the conveyor belt, braking torque, forced braking, free run-out, controlled tensioner, traction factor, dynamic forces in the belt, mathematical modelling.

For citation: Dmitrieva V. V., Sobyanin A. A., Sizin P. E. Modeling of various modes of belt conveyor braking. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11):80-95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_80.

Введение

Ленточные конвейеры — это самый распространенный транспорт непрерывного действия на горных предприятиях, но, к сожалению, низкоэффективный. Работа ленточных конвейеров сопровождается такими явлениями, как проскальзывание ленты, ударные нагрузки в приводе, повышенный износ оборудования, перерасход электроэнергии при неполной загрузке и работе конвейера вхолостую. Все это требует оптимизации и автоматизации конвейерных установок для повышения эффективности их работы. Регулирование скорости движения ленты [1], управление пусковыми и тормозными режимами [2] и контроль проскальзывания ленты [3] существенно повышают эффективность использования транспортных машин [4].

При разгоне или торможении конвейера на приводном барабане могут возникать проскальзывания ленты. Это уменьшает срок службы и ленты, и привода. Этот фактор можно попытаться свести к минимуму, управляя натяжным устройством так, чтобы стабилизировать тяговую способность конвейера. Используя современные аппаратные и программные разработки [5], процесс управления можно сделать автоматическим [6], повысить производительность

конвейерных установок, увеличить срок их службы, исключить человеческий фактор [7].

Разработка модели конвейера с управляемым натяжным устройством

Расчетная схема конвейера длиной L приведена на рис. 1.

Напомним, что это конечномерная модель [8, 9], и такие модели используются для упрощения описания систем с распределенными параметрами [10]. В этой модели координатами состояния приняты перемещения и скорости сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства m_i, указанных на рис. 1. Вектор состояния: $X = (x_1, x_2, \ldots, x_{10})^{\mathrm{T}}$. Внутренняя модель движения ленты конвейера представляется авторами в виде системы из десяти нелинейных дифференциальных уравнений с тремя внешними сигналами:

$$\dot{X} = \tilde{A}X + \tilde{B}_1 \operatorname{sgn}(x_c - x_6) M_{\text{ПР}} + \\ + \tilde{B}_2 \operatorname{sgn} X + \tilde{B}_3 G_{\text{ну}} \quad (1)$$

где первое внешнее воздействие $U_1 = M_{\text{ПР}}$ — это управляющее воздействие, движущий момент, развиваемый приводом, второе внешнее воздействие $U_2 = \operatorname{sgn} X$ — силы сопротивления движению сосредоточенных масс ленты и натяжного устройства, третье внешнее воздействие $U_3 = G_{\text{ну}}$ — вес натяжного устройства.

При пуске и торможении конвейера в ленте возникают динамические нагрузки, вызывающие изменения усилий в грузовой и порожней ветвях [11]. Это может привести к пробуксовке, которая увеличивает износ ленты. При пробуксовке на приводном барабане тяговый фактор превышает критическое значение. Для компенсации этого управляют натяжным устройством, изменяя его вес либо положение каретки [12]. Натяжные устройства создают в ленте конвейера натяжение, которого хватает для передачи ленте трением тяговой силы привода при стабильном движении и запуске конвейера, они уменьшают провисание ленты между роликоопорами, выбирают растяжение ленты, появляющееся в процессе работы конвейера, и сохраняют некоторый запас ленты, необходимый для ее перестановки при повреждениях. Модель конвейера, описанная в предыдущих работах авторов [8, 13], не позволяет осуществлять управление натяжным устройством. Чтобы иметь возможность изменять эти параметры, разделим полученную модель конвейера на две связанных между собой модели — модель движения ленты и модель движения натяжного устройства.

Кроме того, сразу введем в модель возможность использования тормозного устройства. Остановить движение конвейера можно простым отключением

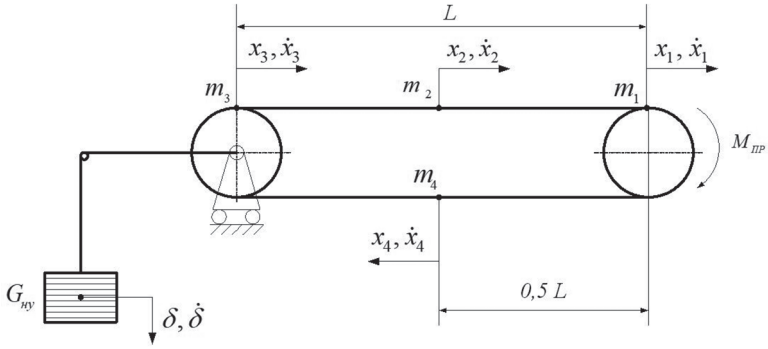

Рис. 1. Расчетная схема конвейера с пятью сосредоточенными массами
Fig. 1. Design diagram of a conveyor with five concentrated masses

привода (свободный выбег) или отключением привода с одновременным торможением барабанов конвейера с помощью тормозных устройств. Второй способ обычно применяется для экстренного останова конвейера, либо в случае, если свободный выбег занимает значительное время. При использовании тормозного устройства к валу барабана, торможение которого производится, прикладывается дополнительный (тормозной) момент, направленный противоположно направлению движения конвейера. Для учета этих управляющих воздействий модель конвейера, полученную в [8], необходимо модифицировать.

Заметим, что размерность системы при исключении из описания натяжного устройства естественным образом уменьшится. В модели конвейера переменными являются перемещения x_1, x_2, x_3, x_4, скорости $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4$ и ускорения $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3, \ddot{x}_4$ четырех сосредоточенных масс; в модели натяжного устройства — скорость и перемещение натяжных грузов или каретки натяжного устройства: $\delta = z_1$, $\dot{\delta} = z_2 = \dot{z}_1$. В модели конвейера сигналы, связанные с ходом натяжного устройства δ, станут внешними воздействиями U_1, кроме того, как говорилось выше, мы вводим $U_3 = M_{\text{ТОР}}$ — тормозной момент. Если торможение осуществляется тормозными колодками на головном барабане, то изменится первое уравнение, если тормозные колодки располагаются на хвостовом барабане, то дополнительное слагаемое попадет в третье уравнение системы:

$$\left(2m_г + 2m_п + m_{пр}\right)\ddot{x}_1 + m_г\ddot{x}_2 + m_п\ddot{x}_4 + 2Cx_1 - Cx_2 - Cx_4 + \left(0{,}5G_п\, lw + 0{,}5G_г\, lw\right)\operatorname{sgn}\dot{x}_1 +$$
$$+2\eta\,\dot{x}_1 - \eta\,\dot{x}_2 - \eta\,\dot{x}_4 = \frac{M_{\text{ПР}}}{R_6}\operatorname{sgn}\left(\dot{x}_c - \dot{x}_1\right) - \frac{M_{TOP}}{R_6}\operatorname{sgn}\left(0 - \dot{x}_1\right)$$

$$m_г\ddot{x}_1 + 4m_г\ddot{x}_2 + m_г\ddot{x}_3 - Cx_1 + 2Cx_2 - Cx_3 + G_г\, lw\operatorname{sgn}\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_1 + 2\eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_3 = 0\,,$$

$$m_г\ddot{x}_2 + \left(2m_г + 2m_п\right)\ddot{x}_3 + m_п\ddot{x}_4 - Cx_2 + \left(2C + 0{,}25C_K\right)x_3 - \left(C + 0{,}25C_K\right)x_4 -$$
$$-0{,}5C_K U_1 - \eta\dot{x}_2 + 2\eta\dot{x}_3 - \eta\dot{x}_4 + \left(0{,}5G_г lw + 0{,}5G_п lw\right)\operatorname{sgn}\dot{x}_3 = -\frac{M_{TOP}}{R_6}\operatorname{sgn}\left(0 - \dot{x}_3\right) \qquad (2)$$

$$m_г\ddot{x}_2 + \left(2m_г + 2m_п\right)\ddot{x}_3 + m_п\ddot{x}_4 - Cx_2 + \left(2C + 0{,}25C_K\right)x_3 - \left(C + 0{,}25C_K\right)x_4 -$$
$$-0{,}5C_K U_1 - \eta\dot{x}_2 + 2\eta\dot{x}_3 - \eta\dot{x}_4 + \left(0{,}5G_г lw + 0{,}5G_п lw\right)\operatorname{sgn}\dot{x}_3 = 0,$$

$$m_п\ddot{x}_1 + m_п\ddot{x}_3 + 4m_п\ddot{x}_4 - Cx_1 - \left(2C + 0{,}25C_K\right)x_3 + \left(C + 0{,}25C_K\right)x_4 +$$
$$+0{,}5C_K U_1 - \eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_3 + 2\eta\,\dot{x}_4 + G_п lw\operatorname{sgn}\dot{x}_4 = 0$$

где $M_{\text{ПР}}$ — момент двигателя, приведенный к валу приводного барабана, Нм; R_6 — радиус приводного барабана, м; l — длина участка ленты, м; $m_г$, $m_п$, $m_{пр}$, — масса участка грузовой и порожней ветвей, масса привода, кг; w — коэффициент сопротивления движению; η — вязкость ленты с грузом, Н/м; C, $C_К$ — жесткость ленты и канатов натяжного устройства, Н/м; $G_г$, $G_п$ — погонный вес движущихся частей соответственно груженой и порожней ветви, Н.

Запишем систему в виде

$$M\ddot{X} + N\dot{X} + CX + S\operatorname{sgn}\dot{X} + B_1U_1 = P_1\operatorname{sgn}\left(\dot{X}_c - \dot{X}_1\right)M_{\square} - P_2\operatorname{sgn}\left(0 - \dot{X}_i\right)M_{TOP}\,, \qquad (3)$$

где матрицы имеют следующий вид:

$$M=\begin{bmatrix} 2m_г+2m_п+m_{пр} & m_г & 0 & m_п \\ m_г & 4m_г & m_г & 0 \\ 0 & m_г & 2m_г+2m_п & m_п \\ m_п & 0 & m_п & 4m_г \end{bmatrix};\ N=\begin{bmatrix} 2\eta & -\eta & 0 & 0 \\ -\eta & 2\eta & -\eta & 0 \\ 0 & -\eta & 2\eta & -\eta \\ -\eta & 0 & -\eta & 2\eta \end{bmatrix};$$

$$C=\begin{bmatrix} 2C & -C & 0 & -C \\ -C & 2C & -C & 0 \\ 0 & -C & 2C+0,25C_K & -C-0,25C_K \\ -C & 0 & -C-0,25C_K & 2C+0,25C_K \end{bmatrix};$$

$$S=\begin{bmatrix} 0,5G_г\,lw+0,5G_п\,lw & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_г lw & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5G_г\,lw+0,5G_п\,lw & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_п lw \end{bmatrix};$$

$$P_1=\begin{bmatrix} R_б^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};\ P_2=\begin{bmatrix} R_Б^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & R_Б^{-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix};\ B_1=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0,5C_К \\ 0,5C_К \end{bmatrix}.$$

Здесь $R_Б$ — расстояние от оси вала приводного барабана конвейера до точки приложения тормозного усилия (плечо). Примем его равным радиусу приводного барабана $R_б$ для упрощения вычислений. В общем случае оно будет отличаться от радиуса приводного барабана и будет равно радиусу тормозного диска (в случае использования дискового тормозного устройства) или радиусу тормозного барабана (в случае использования барабанного тормозного устройства).

Запишем систему уравнений, описывающих движение ленты конвейера:

$$\dot{X}=AX+B_{ПР}M_{ПР}+B_{ТОР}M_{ТОР}+B_1U_1+B_S\,\mathrm{sgn}\,X\ . \qquad (4)$$

Матрица состояния системы A представляет собой блочную матрицу:

$$A_{8\times8}=\begin{bmatrix} 0_{4\times4} & E_{4\times4} \\ M^{-1}N_{4\times4} & M^{-1}C_{4\times4} \end{bmatrix}.$$

Матрицы управления также блочные:

$$B_{ПР}=\begin{bmatrix} 0_{4\times1} \\ M^{-1}P_{1_{4\times1}} \end{bmatrix},\ B_S=\begin{bmatrix} 0_{4\times8} \\ M^{-1}S_{4\times8} \end{bmatrix},\ B_1=\begin{bmatrix} 0_{4\times1} \\ M^{-1}B_{1_{4\times1}} \end{bmatrix},\ B_{ТОР}=\begin{bmatrix} 0_{4\times1} \\ M^{-1}P_{2_{4\times1}} \end{bmatrix}.$$

Для модели натяжного устройства переменными являются перемещение, скорость движения и ускорение натяжных грузов $\delta,\ \dot{\delta}, \ddot{\delta}$:

$$\frac{G_{ну}}{g}\ddot{\delta}-0,5C_Kx_3+0,5C_Kx_4+C_K\delta+G_{ну}+G_{ну}f\,\mathrm{sgn}\,\dot{\delta}=0\ . \qquad (5)$$

где $G_{ну}$ — вес груза натяжного устройства, Н; f — коэффициент сопротивления движению натяжных грузов.

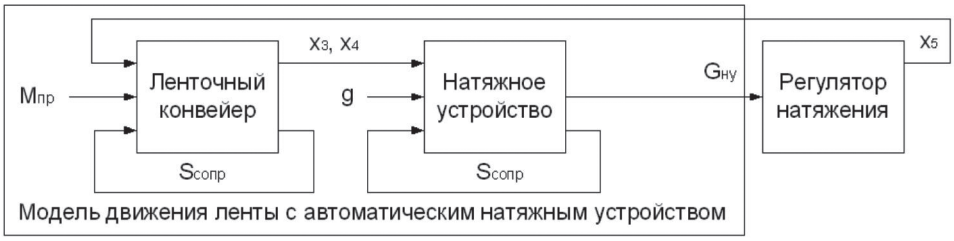

Рис. 2. Структурная схема связи моделей конвейера и натяжного устройства для синтеза регулятора натяжения

Fig. 2. Block diagram of the connection between conveyor models and a tensioner for the synthesis of a tension regulator

В уравнении (5) сигналы, связанные с перемещениями сосредоточенных масс ленты x_3 и x_4, расположенных на хвостовом барабане и на порожней ветви конвейера, считаем внешними воздействиями U_3 и U_4:

$$\frac{G_{ну}}{g}\ddot{\delta}+C_K\delta-0{,}5C_KU_3+0{,}5C_KU_4+G_{ну}+G_{ну}f\,\mathrm{sgn}\,\dot{\delta}=0\ . \qquad (6)$$

Введем вектор состояния $Z = (z_1, z_2)^T$: $z_1 = \delta$, $\dot{z}_1 = z_2 = \dot{\delta}$ и модель натяжного устройства запишется в следующем виде:

$$\dot{z}_1=z_2,\ \dot{z}_2=-\frac{C_Kg}{G_{ну}}z_1+0{,}5\frac{C_Kg}{G_{ну}}U_3-0{,}5\frac{C_Kg}{G_{ну}}U_4-g-\frac{f}{g}\mathrm{sgn}\,z_2\ . \qquad (7)$$

Управляющие воздействия здесь: сила тяжести, действующая на груз натяжного устройства $g = U_1$; сопротивление движению натяжных грузов $\mathrm{sgn}z_2 = U_2$; перемещение сосредоточенной массы хвостового барабана $x_3 = U_3$; перемещение сосредоточенной массы порожней ветви $x_4 = U_4$. Для (7) матричная запись:

$$A_{ну}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -\frac{C_Kg}{G_{ну}} & 0\end{bmatrix},\ B_{ну}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & -\frac{f}{g} & 0{,}5\frac{C_Kg}{G_{ну}} & -0{,}5\frac{C_Kg}{G_{ну}}\end{bmatrix}.$$

Связь между моделями ленты и натяжного устройства представлена на рис. 2.

Кроме использованных обозначений x_i, представляющих собой перемещения сосредоточенных масс, расположенных на порожней ветви, на хвостовом барабане и на натяжном устройстве, момента привода $M_{ПР}$, веса натяжного устройства $G_{ну}$ и ускорения свободного падения g, в системе присутствуют силы сопротивления движению $S_{СОПР}$ ленточного конвейера и натяжного устройства.

Моделирование свободного выбега конвейера

В этой модели можно реализовать торможение и управление натяжным устройством. Анализ процесса останова конвейера преследует следующие цели: оценка параметров переходных процессов, определение максимально допустимых усилий тормозных устройств, обеспечивающих экстренное торможение, определение натяжения грузовой ветви, при котором не происходит потери ее поперечной устойчивости [14, 15], определение алгоритмов управления и методов, необходимых для оптимизации переходных процессов останова и торможения [16].

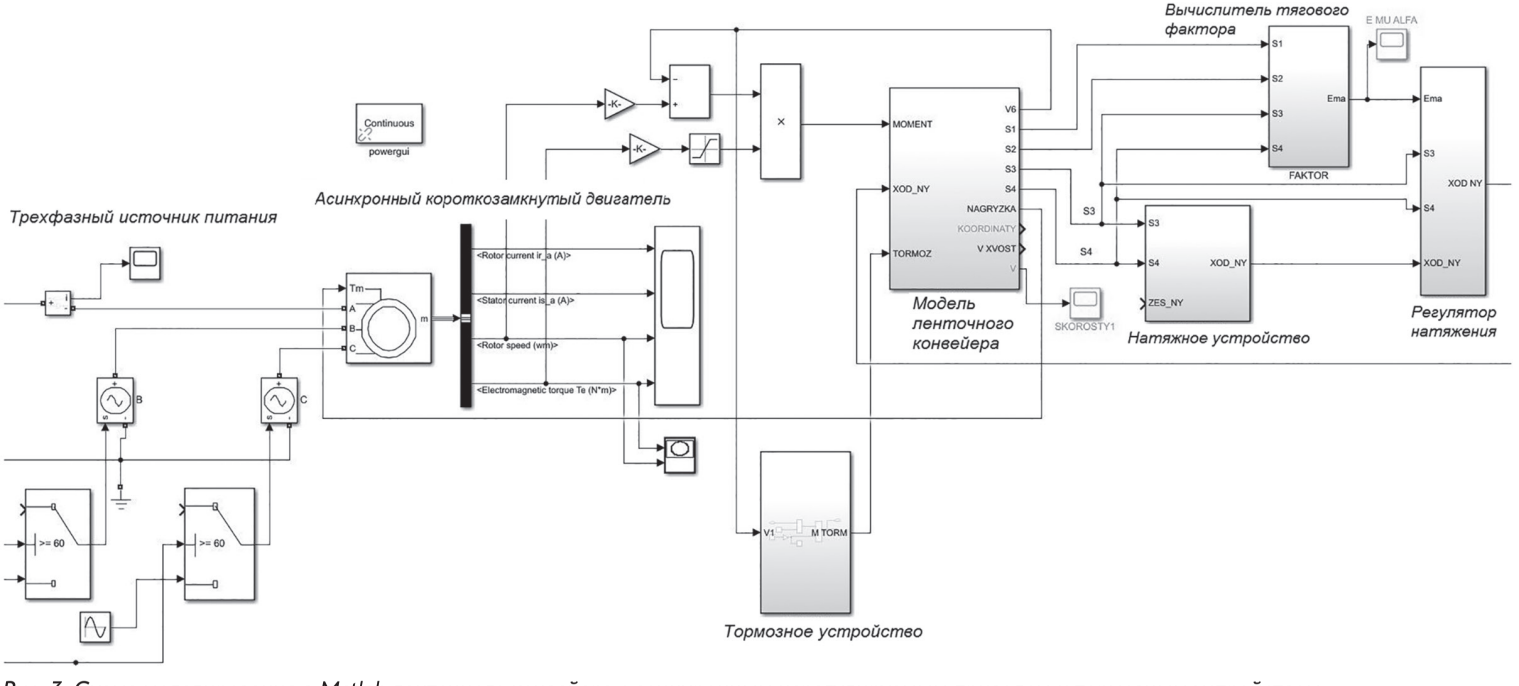

Рис. 3. Схема моделирования в Matlab ленточного конвейера с асинхронным нерегулируемым приводом и тормозным устройством
Fig. 3. Matlab simulation diagram of a conveyor belt with asynchronous non-regulated drive and braking device

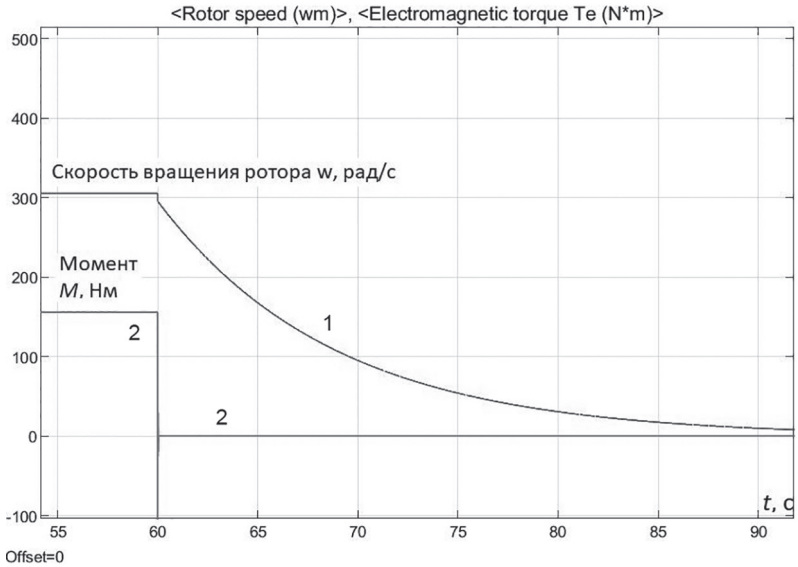

Рис. 4. Изменение технологических измеряемых переменных двигателя
Fig. 4. Change of technological measured variables of the engine

Моделирование проведем в Matlab. На рис. 3 представлена схема моделирования, основные элементы модели конвейерной установки — это асинхронный короткозамкнутый двигатель, источник трехфазного питания, модель движения ленты конвейера, регулятор натяжения ленты, вычислитель величины тягового фактора и модель тормозного устройства [13, 17, 18].

Все эти блоки представлены и обозначены на схеме моделирования.

Рассмотрим останов конвейера без применения торможения (свободный выбег). Технологически эта операция осуществляется отключением привода. После отключения лента некоторое время продолжает движение под действием сил инерции, скорость движения постепенно уменьшается. Проведем модели-

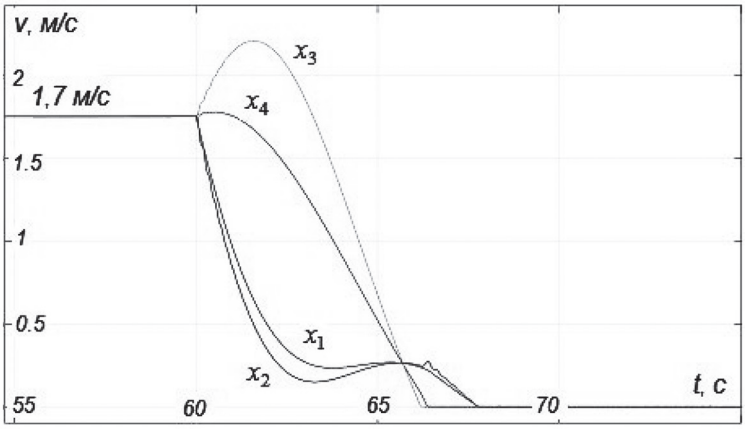

Рис. 5. Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс при свободном выбеге конвейера
Fig. 5. Transients in the velocities of concentrated masses during free run-out of the conveyor

рование останова конвейера при скорости движения ленты, равной 2 м/с.

На рис. 4 представлены графики переходных процессов в асинхронном приводе конвейера. Питающее напряжение отключалось на 60-й с.

Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс ленты приведены на рис. 5. Останов конвейера длится 7 с.

Из рис. 5 видно, что скорость первой сосредоточенной массы, находящейся в точке набегания ленты на приводной барабан, падает по экспоненциальному закону. Падение скоростей остальных сосредоточенных масс происходит медленнее за счет наличия упругих деформаций в ленте конвейера.

Натяжное устройство в момент отключения привода начинает движение и перемещается примерно на 3 м, что приводит к перемещению хвостового барабана в сторону, совпадающую с направлением движения ленты. На графиках хорошо видно увеличение скорости перемещения массы m_3. Вызванная перемещением натяжного устройства волна сжатия в грузовой ветви приводит к ускорению через 2 с масс m_1 и m_2, что тоже видно на рис. 5. Перемещение хвостового барабана объясняет падение натяжений в ленте конвейера и снижение тягового фактора и, как следствие — проскальзывание ленты и пробуксовку привода [19].

На рис. 6 представлено изменение усилий в точках набегания $S_{наб}$, Н, и сбегания ленты $S_{сб}$, Н, с приводного барабана (см. рис. 1) при торможении. Поскольку это изменение приводит к изменению величины тягового фактора, представим его тоже. При торможении конвейера тяговый фактор определяется формулой:

$$\frac{S_{сб}}{S_{наб}} \le \frac{1}{e^{\mu\alpha}}, \qquad (8)$$

где $e^{\mu\alpha}$ — тяговый фактор конвейера; μ — коэффициент сцепления ленты с барабаном; α — угол охвата лентой приводного барабана.

При останове конвейера без применения тормозных устройств в момент отключения привода натяжение в точке набегания ленты на приводной барабан $S_{наб}$ (на графике S_4) уменьшается до величины 56 640 Н, натяжение в точке сбегания ленты $S_{сб}$ (на графике S_1) уменьшается до 30 750 Н. Результирующее значение тягового фактора, определяемое экспериментально, увеличивается и становится больше 0,45, что говорит о проскальзывании ленты конвейера в течение всего времени останова.

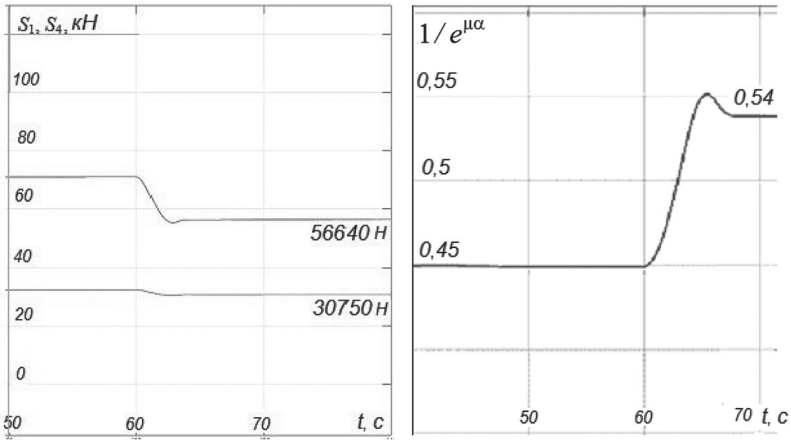

Рис. 6. Изменение усилий и тягового фактора при свободном выбеге
Fig. 6. Change of forces and traction factor during free run-out

Моделирование принудительного торможения конвейера

Рассмотрим теперь торможение конвейера с использованием тормозных колодок, применяемое при экстренном останове или при останове груженого наклонного конвейера. В данной статье будем рассматривать тормоз, расположенный на головном барабане. Рассчитаем максимально допустимую величину тормозного момента, необходимую для уменьшения проскальзывания ленты [20, 21]. Для этого найдем сначала максимально допустимую величину тормозного усилия:

$$F_{торм} = \frac{0{,}5G_{ну} \cdot k_т - \left(0{,}5G_{ну} + W_0\right)\exp(\mu\alpha) + W_0\left[1 - \exp\left(\frac{-2 \cdot \rho_Г \cdot L}{m_{прив}}\right)\right]}{1 - \exp\left(\frac{-2 \cdot \rho_Г \cdot L}{m_{прив}}\right)}, \qquad (9)$$

где $k_т$ = 1,15 — коэффициент запаса сил трения на приводном барабане; $W_0 = S_{наб}$ — — $0{,}5G_{ну}$ — натяжение грузовой ветви, Н, которое вычисляется как разность между усилием в точке набегания на приводной барабан и усилием на хвостовом барабане; $\exp(\mu\alpha)$ — величина тягового фактора конвейера; $\rho_Г$ — плотность груза, кг/м^3; $m_{прив}$ — приведенная к радиусу приводного барабана масса движущихся частей конвейера, кг, рассчитываемая по формуле:

$$m_{прив} = \frac{J}{R_б^2} + L\left(\rho_Г + \rho_П\right), \qquad (10)$$

где $\rho_П$ — плотность порожней ветви конвейера, кг/м^3; $R_б$ — расстояние от оси вала приводного барабана конвейера до точки приложения тормозного усилия (плечо), м; J — момент инерции привода, кг·м^2. При следующих числовых данных: масса натяжного устройства 8000 кг; плотность донецкого угля $\rho_Г$ = 900 кг/м^3; длина конвейера L = 1000 м; величина тягового фактора для одноприводного конвейера $\exp(\mu\alpha)$ = 2,5; J = 0,1326 кг·м^2, $m_{прив}$ = 900,5 кг — получена максимально допустимая величина тормозного усилия, равная 3252 Н. Момент найдем по формуле [19, 20]:

$$M_{ТОРМ} = F_{ТОРМ}R_Б. \qquad (11)$$

Предельное значение тормозного момента $M_{ТОРМ}$ = 64 500 Нм.

Время торможения определим по формуле

$$t_{торм} = \frac{m_{пр}\omega}{g\left(M_{ТОРМ} + M_{СТ}\right)}, \qquad (12)$$

где $M_{СТ}$ — статический тормозной момент, Н; $M_{ТОРМ}$ — момент, создаваемый тормозным устройством, Н.

На рис. 7, 8, 9 приведены графики переходных процессов в приводе конвейера, изменения скоростей сосредоточенных масс, усилий и величины тягового фактора.

В этом опыте привод по-прежнему останавливается свободным выбегом. Кроме анализа процессов в ленточном конвейере (см. рис. 5, 6, 8, 9) необходимо исследовать работу привода. Это может быть необходимо для обеспечения оптимального использования электропривода, в случае применения многодвигательного привода — для рационального распределения нагрузок между приводами [22]. Дополнительно проведем анализ изменения мощностей, потерь мощности и КПД

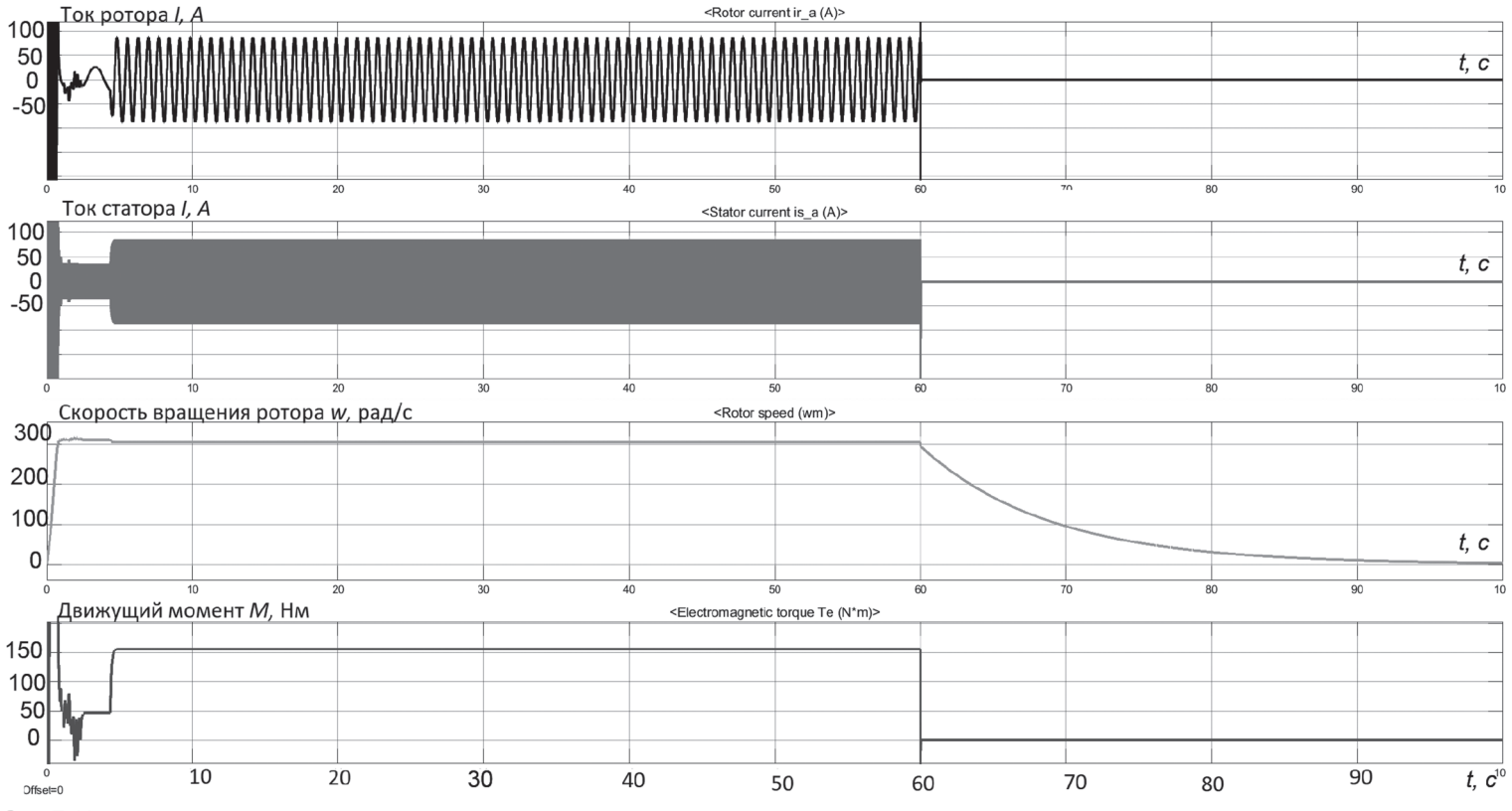

Рис. 7. Изменение технологических измеряемых переменных двигателя

Fig. 7. Change of technological measured variables of the engine

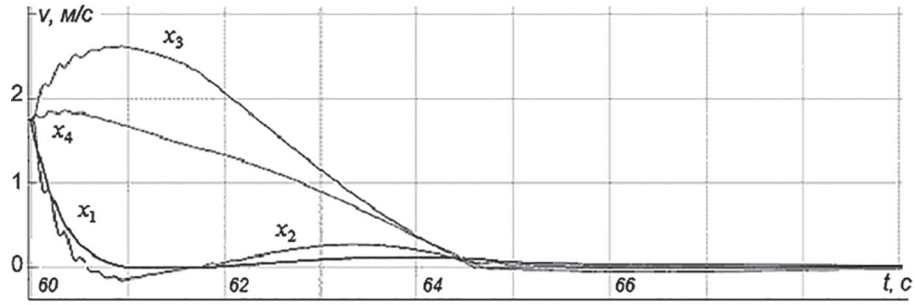

Рис. 8. Изменение скоростей сосредоточенных масс при использовании тормоза
Fig. 8. Change in the velocities of concentrated masses when using the brake

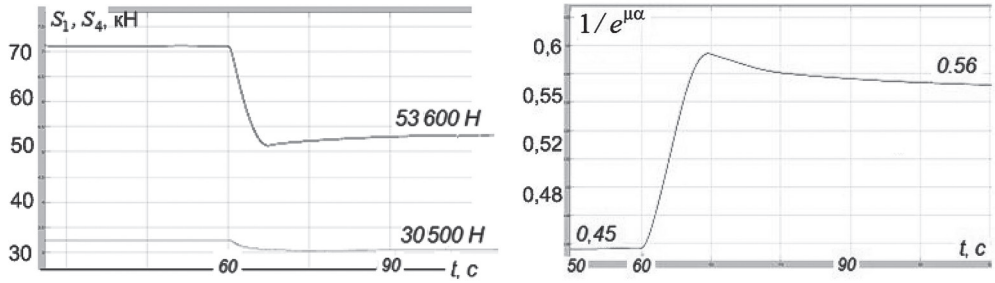

Рис. 9. Изменение усилий в ленте и тягового фактора при торможении
Fig. 9. Change in belt forces and traction factor during braking

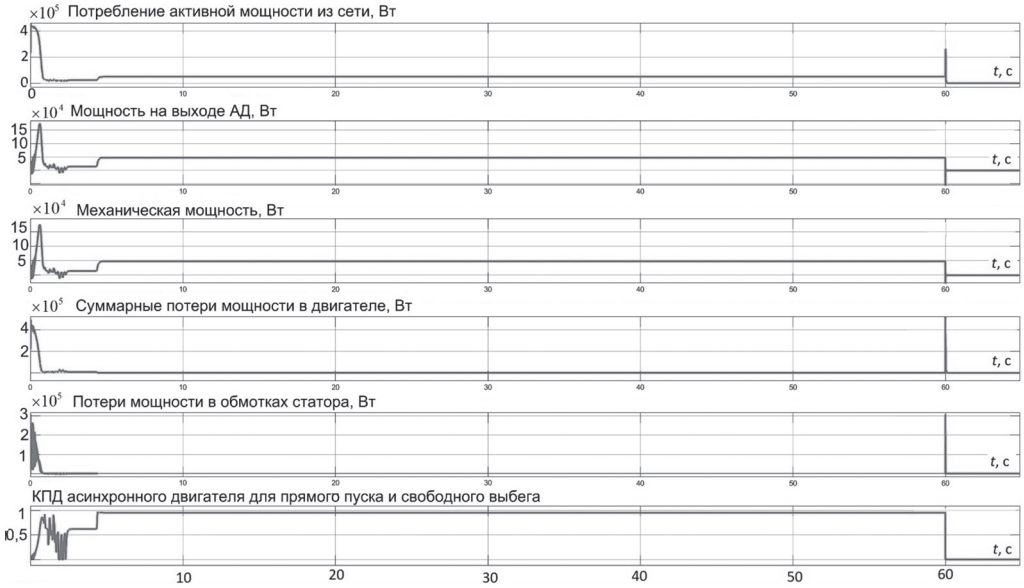

Рис. 10. Изменение мощностей, потерь мощности в двигателе, потерь мощности в обмотках статора, КПД двигателя при прямом пуске и свободном выбеге
Fig. 10. Power changes, power losses in the engine, power losses in the stator windings, engine efficiency during direct start-up and free run-out

привода при разгоне двигателя прямым пуском и свободном выбеге. Результаты определения мощностей представлены на рис. 10.

Анализ полученных осциллограмм позволяет определить следующее:

- машина потребляет из сети 50 кВт активной мощности; номинальная мощность данного двигателя составляет 37 кВт, однако это допустимо, так как машина развивает больший крутящий момент;
- максимальная мощность на валу ротора в момент пуска составляет 110 кВт;
- максимальная механическая мощность двигателя в момент пуска составляет 113 кВт;
- суммарные потери мощности в пике могут достигать 35 кВт, в среднем при пуске суммарные потери изменяются в пределах 10–30 кВт;
- КПД в процессе пуска плавно нарастает до номинального значения в 0,92;
- После отключения питания на графиках видно, что возникает переходный процесс, длящийся 80 мс, после этого все показатели принимают значение 0.

Независимо от типа торможения (свободный выбег или торможение колодками) вид графиков не изменяется.

Выводы

В результате моделирования в Matlab`e получены временные зависимости скоростей сосредоточенных масс, усилий и тягового фактора ленточного конвейера при двух способах торможения: свободном выбеге и торможении тормозными колодками, расположенными на головном барабане. Установлено, что даже применение управляемого натяжного устройства не дает возможности полностью устранить проскальзывание ленты на приводном барабане. Этот фактор можно минимизировать, применяя различные дополнительные способы управления, которые основаны на своевременном изменении натяжений в ветвях конвейера. Одним из способов является заведомое увеличение натяжений ленты в статических режимах для создания запаса по величине тягового фактора. Однако использование такого режима, когда лента 90% времени находится в перетянутом состоянии, ведет к ее быстрому износу. Вторым способом может являться предварительное торможение хвостового барабана — так, чтобы соблюдалось условие Эйлера. Величина тормозного усилия может быть рассчитана заранее с использованием пропорциональной зависимости между возникающими при торможении хвостового барабана силами сопротивления движению ленты и величиной силы трения между тормозной колодкой (или диском) и барабаном. При торможении хвостового барабана изменяются усилия S_1 и S_4 до требуемых величин и стабилизируется тяговый фактор до технологически необходимого значения, что позволит осуществить снижение скорости, останов или торможение конвейера без проскальзывания ленты на приводном барабане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bebic V., Ristic L.* Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical considerations // Advancts in Electrical and Computer Engineering. 2018, vol. 18, no. 1, pp. 51—60. DOI: 10.4316/AECE.2018.01007.

2. *Ke Qian Key* Technology of starting and braking for downward belt conveyor with large inclination // Mine Engineering. 2020, vol. 08, no. 04, pp. 451—454. DOI: 10.12677/ME.2020.84056.

3. *Гончаров К. А.* Установление закономерностей совместной работы приводов ленточного конвейера при наличии случайных отклонений скольжения их электродвигателей //

Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2020. — № 2. — С. 218—229. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-218-229.

4. *Sarathbabu N. V.*, *Murthy C. S. N.*, *Mangalpady A.* Minimization of specific energy of a belt conveyor drive system using space vector modulated direct torque control // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019, vol. 8, no. 4, pp. 505—511. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-2-3-10.

5. *Дмитриев В. Г.*, *Чередник П. Н.* Программный комплекс для тягового расчета и анализа пусковых и тормозных режимов ленточных конвейеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 2. — С. 35—45.

6. *Ещин Е. К.* Управление динамической нагруженностью забойных скребковых конвейеров // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 570—575. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.570.

7. *Клебанов А. Ф.* Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 8—11.

8. *Дмитриева В. В.*, *Сизин П. Е.* Анализ моделей ленточного конвейера при различном числе аппроксимирующих масс // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 34—46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_34.

9. *Запенин И. В.*, *Бельфор В. Е.*, *Селищев Ю. А.* Моделирование переходных процессов ленточных конвейеров. — М.: Недра, 1969. — 56 с.

10. *Wen-Qiang Zhand, Guang-Fu Bin, Xue-Jun Li, Qiang-Kia Han* The dynamic analysis of belt conveyor driving drum based on finite element model / 2015 International Conference on Energy and Mechanical Engineering. 2016, pp. 1046—1053. DOI: 10.1142/9789814749503_0124.

11. *Галкин В. И.*, *Сазанкова Е. С.* Влияние физико-механических свойств на пусковые процессы ленточных конвейеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № S6. — С. 19—35.

12. *Shengyong M.* Research on the control system of the multi-point driving belt conveyor tension device / International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE 2020). 2020, pp. 321—326. DOI: 10.1109/ICBAIE49996.2020.00074.

13. *Дмитриева В. В.*, *Собянин А. А.*, *Сизин П. Е.* Моделирование плавного пуска для асинхронного двигателя ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6. — С. 77—92. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_77.

14. *Xi Pingyuan, Song Yandong* Dynamic simulation on the belt conveyor on emergency braking / Intelligent Computation Technology and Automation International Conference. 2009, pp. 34—36. DOI: 10.1109/ICICTA.2009.245.

15. *Бухаров Р. А.* Разработка и компьютерное моделирование алгоритма управления для оптимизации процесса торможения магистрального ленточного конвейера // Горные науки и технологии. — 2014. — № 3. — С. 27—38.

16. *Дмитриева В. В.* Моделирование пуско-тормозных режимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 3. — С. 65—72.

17. *Ещин Е. К.* Расчеты динамических режимов работы электроприводов самоходных горных машин // Записки Горного института. — 2018. — Т. 233. — С. 534—538. DOI: 10.31897/pmi.2018.5.534.

18. *Dmitrieva V. V.*, *Sizin P. E.*, *Sobyanin A. A.* Application of the soft starter for the asynchronous motor of the belt conveyor // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 942, no. 1, article 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012003.

19. *Sakharwade S., Nagpal S.* Analysis of transient belt stretch for horizontal and inclined belt conveyor system // International Jornal of Mathematical, Engineering and Management Sciences. 2019, vol. 4, no. 5, pp. 1169—1179. DOI: 10.33889/IJMEMS.2019.4.5-092.

20. *Дмитриев В. Г.*, *Шахмейстер Л. Г.* Теория и расчет ленточных конвейеров. — М.: Машиностроение, 1987. — 336 с.

21. *Дмитриев В. Г., Вержанский А. П.* Основы теории ленточных конвейеров. — М.: Изд-во «Горная книга», 2017. — 590 с.

22. *Алиев С. Б., Брейдо И. В., Данияров Н. А. Калисбеков А. К.* Управление распределением нагрузок между электроприводами многодвигательного пластинчатого конвейера при бесперегрузочной доставке угля в условиях открытых горных работ // Уголь. — 2020. — № 9. — С. 14—17. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-14-17. ГИАБ

REFERENCES

1. Bebic V., Ristic L. Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical considerations. *Advancts in Electrical and Computer Engineering*. 2018, vol. 18, no. 1, pp. 51—60. DOI: 10.4316/AECE.2018.01007.

2. Ke Qian Key Technology of starting and braking for downward belt conveyor with large inclination. *Mine Engineering*. 2020, vol. 08, no. 04, pp. 451—454. DOI: 10.12677/ME.2020.84056.

3. Goncharov K. A. Establishing patterns of joint operation of belt conveyor drives in the presence of random sliding deviations of their electric motors. *Scientific and Technical Journal of Bryansk State University*. 2020, no. 2, pp. 218—229. [In Russ]. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-218-229.

4. Sarathbabu N. V., Murthy C. S. N., Mangalpady A. Minimization of specific energy of a belt conveyor drive system using space vector modulated direct torque control. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019, vol. 8, no. 4, pp. 505—511. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-2-3-10.

5. Dmitriev V. G., Cherednik P. N. Softwar package for tractive calculation and analysis of the starting and braking modes of belt conveyors. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 2, pp. 35—45. [In Russ].

6. Eshchin E. K. Control of dynamic loading of face scraper conveyors. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 570—575. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.570.

7. Klebanov A. F. Automation and robotization of open pit mining: digital transformation experience. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 1, pp. 8—11. [In Russ].

8. Dmitrieva V. V., Sizin P. E. The analysis of belt conveyor models at different number of approximating masses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 34—46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_34.

9. Zapenin I. V., Belfor V. E., Selishchev Yu. A. *Modelirovanie perekhodnykh protsessov lentochnykh konveyerov* [Modeling of transient processes of belt conveyors], Moscow, Nedra, 1969, 56 p.

10. Wen-Qiang Zhand, Guang-Fu Bin, Xue-Jun Li, Qiang-Kia Han The dynamic analysis of belt conveyor driving drum based on finite element model. *International Conference on Energy and Mechanical Engineering 2015.* 2016, pp. 1046—1053. DOI: 10.1142/9789814749503_0124.

11. Galkin V. I., Sazankova E. S. Influence of physical and mechanical properties of belts on the starting processes of belt conveyors. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. S6, pp. 19—35. [In Russ].

12. Shengyong M. Research on the control system of the multi-point driving belt conveyor tension device. *International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE 2020)*. 2020, pp. 321—326. DOI: 10.1109/ICBAIE49996.2020.00074.

13. Dmitrieva V. V., Sobyanin A. A., Sizin P. E. Modeling soft start of belt conveyor induction motor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 77—92. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_77.

14. Xi Pingyuan, Song Yandong Dynamic simulation on the belt conveyor on emergency braking. *Intelligent Computation Technology and Automation International Conference*. 2009, pp. 34—36. DOI: 10.1109/ICICTA.2009.245.

15. Bukharov R. A. Development and computer simulation of a control algorithm for optimizing the braking process of a main belt conveyor. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2014, no. 3, pp. 27 – 38. [In Russ].

16. Dmitrieva V. V. Simulation of starting-braking regimes of a belt conveyor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 3, pp. 65 – 72. [In Russ].

17. Eshchin E. K. Calculations of dynamic modes of operation of electric drives of self-propelled mining machines. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 233, pp. 534 – 538. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2018.5.534.

18. Dmitrieva V. V., Sizin P. E., Sobyanin A. A. Application of the soft starter for the asynchronous motor of the belt conveyor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 942, no. 1, article 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012003.

19. Sakharwade S., Nagpal S. Analysis of transient belt stretch for horizontal and inclined belt conveyor system. *International Jornal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2019, vol. 4, no. 5, pp. 1169 – 1179. DOI: 10.33889/IJMEMS.2019.4.5-092.

20. Dmitriev V. G., Shakhmeyster L. G. *Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov* [Theory and calculation of belt conveyors], Moscow, Mashinostroenie, 1987, 336 p.

21. Dmitriev V. G., Verzhansky A. P. *Osnovy teorii lentochnyh konvejerov* [Fundamentals of the theory of belt conveyors], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2017, 590 p.

22. Aliev S. B., Brejdo I. V., Daniyarov N. A., Kalisbekov A. K. Control of the distribution of loads between the electric drives of a multi-engine apron conveyor for non-reloading delivery of coal in open-cast mining. *Ugol'*. 2020, no. 9, pp. 14 – 17. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-14-17.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриева Валерия Валерьевна[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
Собянин Алексей Андреевич[1] — магистр,
e-mail: sobyanin99@yandex.ru,
Сизин Павел Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук,
ИБО НИТУ «МИСиС», e-mail: mstranger@list.ru,
[1] РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина (НИУ).
Для контактов: Сизин П.Е., e-mail: mstranger@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Dmitrieva[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
A.A. Sobyanin[1], Magister,
e-mail: sobyanin99@yandex.ru,
P.E. Sizin, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),
Institute of Basic Education, National University
of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru,
[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas
(National Research University), 119991, Moscow, Russia.
Corresponding author: P.E. Sizin, e-mail: mstranger@list.ru.

Получена редакцией 09.06.2022; получена после рецензии 10.08.2022; принята к печати 10.10.2022.
Received by the editors 09.06.2022; received after the review 10.08.2022; accepted for printing 10.10.2022.