

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ ЛЕНТЫ ДВУХПРИВОДНОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

КАУНГ ПЬЕЙ АУНГ, КУБРИН С. С., ПЕВЗНЕР Л. Д., ДМИТРИЕВА В. В.

В работе представлены результаты разработки адекватной математической модели двухприводного ленточного конвейера с натяжным устройством, дополненной моделью управляемых электроприводов ленточного конвейера, и результаты моделирования, которые позволяют определять скорости движения и натяжения в характерных точках модели ленточного конвейера, что дает возможность синтезировать систему управления скоростью движения конвейерной ленты при отсутствии пробуксовки на приводных барабанах при любой скорости движения конвейера. Математическая модель позволяет наблюдать переходные процессы объекта при разных режимах работы модели движения ленты конвейера и модели натяжного устройства. Переходные процессы по скоростям сосредоточенных масс модели движения ленты конвейера получены с помощью компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование разработанной системы проведено программными средствами Simulink.

Ключевые слова: ленточный конвейер; моделирование; движение конвейерной ленты; натяжное устройство; переходные процессы.

Ленточный конвейер является системой с распределенными параметрами. Для создания математической модели его движения принята идея кусочно-линейной аппроксимации непрерывной ленты в виде системы сосредоточенных масс, предложенная в шестидесятых годах прошлого столетия. В расчетную схему модели входят конечное число сосредоточенных масс на грузовой ветви и конечное число сосредоточенных масс на порожней ветви ленты конвейера. Модель движения ленты конвейера дополняется моделью управляемых электроприводов ленточного конвейера и моделью натяжного устройства [1–6].

Пользуясь методом кусочно-линейной аппроксимации, опишем движение конвейера системой из шести дифференциальных уравнений второго порядка, составленных по общей схеме уравнения Лагранжа второго рода. Расчетная схема для модели ленточного конвейера с двумя приводами и натяжным устройством в хвостовой части представлена, как показано на рис. 1, шестью сосредоточенными массами, три из которых m_1, m_2, m_3 расположены на грузовой ветви, две m_4, m_5 – на порожней, а m_6 представляет собой массу натяжного устройства [1–7].

Каунг Пьей Аунг – аспирант кафедры автоматизированных систем управления. 119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». E-mail: kaungpyae05@gmail.com

Кубрин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией геотехнологических рисков освоения недр. 111020, г. Москва, Крюковский туп., 4, Институт проблем комплексного освоения недр РАН. E-mail: s_kubrin@mail.ru

Певзнер Леонид Давидович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем. 119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78, Московский институт радиотехники, электроники и автоматики. E-mail: lpevzner@msmu.ru

Дмитриева Валерия Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности. 119991, г. Москва, Ленинский просп., 65, Российский государственный университет нефти и газа. E-mail: dm_valeriya@msmu.ru

В качестве переменных в расчетной схеме приняты координаты положения шести масс и их скоростей $s_i(t)$, $\dot{s}_i(t)$, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, в том числе s_6 , \dot{s}_6 – положение и скорость перемещения натяжного груза. В качестве обобщенных координат x_i приняты перемещения s_i и скорости перемещения \dot{s}_i сосредоточенных масс m_i , $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

Конечномерная математическая модель движения конвейера с грузом описывается в обобщенных координатах перемещения и скорости перемещения сосредоточенных масс соответственно: $x_i(t) = s_i(t)$, $\dot{x}_i(t) = \dot{s}_i(t)$, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Модель составлена по общей схеме уравнений Лагранжа второго рода, но с учетом того, что для расчетной схемы, представленной на рис. 1, кинетическая энергия системы является функцией только обобщенных скоростей, поэтому для применения метода Лагранжа использованы уравнения в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{s}_i} T(x_i, \dot{x}_i) \right) + \frac{\partial}{\partial s_i} \Pi(x_i) + \frac{\partial}{\partial s_i} A(x_i) = 0, \quad i = \overline{1, 6},$$

где $T(\dot{x}_i)$ – кинетическая энергия i -го участка; $\Pi(x_i)$ – потенциальная энергия этого участка; $A(x_i)$ – работа внешних сил на этом участке.

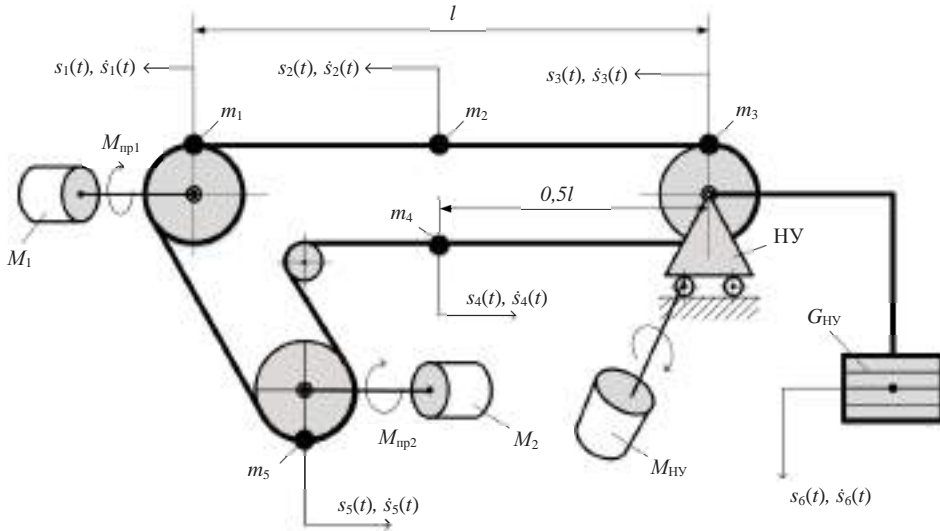


Рис. 1. Расчетная схема ленточного конвейера с двумя приводами:
НУ – натяжное устройство

Кинетическая энергия ленты и груза, равномерно распределенного на соответствующем участке между точками i и $j = i + 1$, представлена выражением:

$$T(\dot{x}_i, \dot{x}_j) = \frac{G_{ij}}{6g} (\dot{x}_i^2 + \dot{x}_i \dot{x}_j + \dot{x}_j^2),$$

где G_{ij} – вес ленты, роlikоопор и груза на участке между точками i и j ; l_{ij} – длина участка; g – ускорение свободного падения. Потенциальная энергия участка ij длиной l_{ij} складывается из энергии упругих деформаций и потенциальной энергии замкнутого контура ленты с распределенной массой:

$$\Pi_{ij}(x_i, x_j) = c_{ij} \frac{(x_i - x_j)^2}{2} + G_{ij} l_{ij} \frac{x_i + x_j}{2} \sin \beta,$$

где c_{ij} – жесткость участка; β – угол наклона конвейера к горизонту.

Работа внешних сил на участке ij определяется суммой сил сопротивления движению и движущей силы привода, которая находится из выражений:

$$A_{ij}(x_i, x_j) = G_{ij} l_{ij} \mu \frac{x_i + x_j}{2} \cos \beta; \quad A_{\text{пр}} = -\frac{M_{\text{пр}1}}{R_{61}} x_1 - \frac{M_{\text{пр}2}}{R_{62}} x_5,$$

где μ – коэффициент сопротивления движению; $M_{\text{пр}1}$ и $M_{\text{пр}2}$ – движущие моменты приводов, приведенные к радиусам R_{61} , R_{62} приводных барабанов.

Работа сил внутреннего трения на участке ij определяется из предположения, что силы внутреннего трения пропорциональны скоростям деформации:

$$A_{ij}(x_i, \dot{x}_i) = 0,5\eta \left[(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})(x_i - x_{i+1}) + (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})(x_i - x_{i-1}) \right],$$

где η – коэффициент вязкости ленты.

После соответствующих преобразований математическая модель движения загруженной ленты конвейера с двумя приводами и натяжным устройством может быть представлена системой из шести нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} (2m_r + 2m_m + m_{\text{пр}1})\ddot{x}_1 + m_r\ddot{x}_2 + m_n\ddot{x}_5 + 2\eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_5 + 2Cx_1 - Cx_2 - Cx_5 + \\ + 0,5(G_r l + G_n l_m)\mu \operatorname{sgn} \dot{x}_1 = \frac{M_{\text{пр}1}}{R_6} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1); \\ m_r\ddot{x}_1 + 4m_r\ddot{x}_2 + m_r\ddot{x}_3 - \eta\dot{x}_1 + 2\eta\dot{x}_2 - \eta\dot{x}_3 - Cx_1 + 2Cx_2 - Cx_3 + G_r l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_2 = 0; \\ m_r\ddot{x}_2 + (2m_r + 2m_n)\ddot{x}_3 + m_n\ddot{x}_4 - \eta\dot{x}_2 + 2\eta\dot{x}_3 - \eta\dot{x}_4 - Cx_2 + (2C + 0,25C_k)x_3 - \\ - (C + 0,25C_k)x_4 - 0,5C_k x_6 + 0,5(G_r + G_n)l\mu \operatorname{sgn} \dot{x}_3 = 0; \\ m_n\ddot{x}_3 + 4m_n\ddot{x}_4 + m_n\ddot{x}_5 - \eta\dot{x}_3 + 2\eta\dot{x}_4 - \eta\dot{x}_5 - (C + 0,25C_k)x_3 + (2C + 0,25C_k)x_4 - \\ - Cx_5 + G_n l \mu \operatorname{sgn} \dot{x}_4 = 0; \\ m_m\ddot{x}_1 + m_n\ddot{x}_4 + (2m_n + 2m_m + m_{\text{пр}2})\ddot{x}_5 - \eta\dot{x}_1 - \eta\dot{x}_4 + 2\eta\dot{x}_5 - Cx_1 - Cx_4 + 2Cx_5 + \\ + 0,5(G_n l + G_n l_m)\mu \operatorname{sgn} \dot{x}_5 = \frac{M_{\text{пр}2}}{R_6} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c2} - \dot{x}_5); \\ \frac{G_{\text{гв}}}{g} \ddot{x}_6 - 0,5C_k x_3 + 0,5C_k x_4 + C_k x_6 + G_{\text{гв}} + G_{\text{гв}} f \operatorname{sgn} \dot{x}_6 = 0, \end{array} \right.$$

где буквы «г», «п», «м» в индексе обозначают соответственно «грузовой», «порожный», «промежуточный»; f – коэффициент сопротивления движению натяжных грузов.

В целях дальнейшего использования для задач синтеза систем управления составлено матричное представление этой математической модели относительно обобщенного вектора перемещения: $X = (x_1, x_2, \dots, x_6)^T$, которое принимает вид:

$$M\ddot{X} + N\dot{X} + CX + S \operatorname{sgn} \dot{X} + VG_{\text{гв}} = P_1 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1)M_{\text{пр}1} + P_2 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - X_5)M_{\text{пр}2},$$

где

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2m_r + 2m_m + m_{pp1} & m_r & 0 & 0 & m_m & 0 \\ m_r & 4m_r & m_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_r & 2m_r + 2m_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_n & 4m_n & m_n & 0 \\ m_m & 0 & 0 & m_n & 2m_n + 2m_m + m_{pp2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G_{HY}}{g} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 2\eta & -\eta & 0 & 0 & -\eta & 0 \\ -\eta & 2\eta & -\eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\eta & 2\eta & -\eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\eta & 2\eta & -\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\eta & 2\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2C & -C & 0 & 0 & -C & 0 \\ -C & 2C & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C & 2C + 0,25C_k & -C - 0,25C_k & 0 & -0,5C_k \\ 0 & 0 & -C - 0,25C_k & 2C + 0,25C_k & -C & 0,5C_k \\ -C & 0 & 0 & -C & 2C & 0 \\ 0 & 0 & -0,5C_k & 0,5C_k & 0 & C_k \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{S} = \text{diag}(0,5(G_r l + G_n l_m)\mu \quad G_r l\mu \quad 0,5(G_r + G_n)l\mu \quad G_n l\mu \quad 0,5(G_n l + G_n l_m)\mu \quad G_{HY}f),$$

$$\mathbf{P}_1 = [R_6^{-1} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad \mathbf{P}_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad R_6^{-1} \quad 0]^T,$$

$$\mathbf{V} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T.$$

В этом представлении: l – длина конвейера; G_{HY} – вес натяжного устройства; M_{pp1} и M_{pp2} – движущие моменты приводов и барабанов; M_{HY} – движущий момент привода натяжного устройства; η – коэффициент вязкости ленты; C – коэффициент жесткости ленты; μ – коэффициент сопротивления движению; C_k – коэффициент жесткости каната; R_6 – радиусы приводных барабанов; l_m – длина каната натяжного устройства.

Для последующего синтеза системы управления и упрощения процедуры моделирования выполнено представление модели движения конвейерной ленты в пространстве состояний согласно каноническому правилу Коши в виде нелинейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\dot{X} = -\mathbf{M}^{-1}((\mathbf{N} + \mathbf{C})X + \mathbf{S} \text{sgn} X + \mathbf{V}G_{HY} + \mathbf{P}_1 \text{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1)M_{pp1} + \mathbf{P}_2 \text{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_5)M_{pp2}).$$

В модели внешними воздействиями являются движущие моменты, развиваемые двумя приводами $u_1(t) = M_{pp1}(t)$; $u_2(t) = M_{pp2}(t)$, силы сопротивления движению конвейерной ленты $u_3(t) = \text{sgn} \dot{x}(t)$ и вес натяжного устройства $u_4(t) = G_{HY}(t)$.

В этом случае матрица $-\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{N} + \mathbf{C}) = \mathbf{A}$ является матрицей состояния системы, а матрицы $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}_1 = \mathbf{B}_1$; $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}_2 = \mathbf{B}_2$; $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{S} = \mathbf{B}_3$; $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{V} = \mathbf{B}_4$ – это составляющие матрицы управления.

Матричное представление математической модели движения ленточного конвейера принимает вид:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1)u_1 + \mathbf{B}_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_5)u_2 + \mathbf{B}_3u_3 + \mathbf{B}_4u_4,$$

в которой

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{E}_{6 \times 6} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_{6 \times 6} & -\mathbf{M}\mathbf{N}_{12 \times 12} \end{pmatrix}; \mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}_{1 \ 6 \times 1} \end{pmatrix}_{12 \times 1};$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}_{2 \ 6 \times 1} \end{pmatrix}_{12 \times 1}; \mathbf{B}_3 = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{S}_{6 \times 1} \end{pmatrix}; \mathbf{B}_4 = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{V}_{6 \times 1} \end{pmatrix}.$$

Исследование составленной математической модели движения ленты двух-приводного конвейера с целью проверки ее адекватности реальным процессам проводилось моделированием движения ленты с грузом для конвейера 2Л100У-01 программными средствами. Был использован блок, позволяющий задать внутреннюю модель движения конвейерной ленты, блок, объединяющий управляющие воздействия в вектор $U = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T$. Для моделирования приводов использовались готовые модели асинхронных короткозамкнутых приводов с частотно-векторным управлением. Схема моделирования приведена на рис. 2.

Моделирование проводилось для числовых значений параметров ленточного конвейера 2Л100У-01.

Технические данные модели

Длина ленты l , м	1500
Масса участка грузовой ветви m_r , кг	1518,5
Масса участка порожней ветви m_p , кг	352,5
Масса участков на промежуточной ветви m_m , кг	2,4
Масса первого привода $m_{пр1}$, кг	3000
Масса второго привода $m_{пр2}$, кг	2000
Момент, создаваемый на первом приводном барабане, $M_{пр1}$, Н·м	20 900
Момент, создаваемый на втором приводном барабане, $M_{пр2}$, Н·м	20 900
Вес груза натяжного устройства $G_{НУ}$, Н	52 000
Радиус приводных барабанов R_b , м	0,5
Вязкость ленты с грузом η , Н·с/м	4000
Жесткость ленты C , Н/м	10 000
Жесткость канатов натяжного устройства C_k , Н/м	10^{10}
Коэффициент сопротивления движению μ	0,03
Коэффициент сопротивления движению натяжных грузов f	0,3

Матрицы $\mathbf{M}, \mathbf{N}, \mathbf{C}, \mathbf{S}, \mathbf{V}, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ системы уравнений математической модели принимают вид:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 6040 & 1518,5 & 0 & 0 & 352 & 0 \\ 1518,5 & 6072 & 1518,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1518,5 & 3740 & 352 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 352 & 1408 & 352 & 0 \\ 2,4 & 0 & 0 & 352 & 2708 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5200 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 8000 & -4000 & 0 & 0 & -4000 & 0 \\ -4000 & 8000 & -4000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4000 & 2200 & -4000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4000 & 8000 & -4000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4000 & 8000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 20000 & -10000 & 0 & 0 & -10000 & 0 \\ -10000 & 20000 & -10000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -10000 & 25000 & 20000 & -25000 & 10000 & 0 & -5000000000 \\ 0 & 0 & -25000 & 10000 & 25000 & 20000 & -10000 & 5000000000 \\ -10000 & 0 & 0 & -10000 & 20000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -5000000000 & 5000000000 & 0 & 0 & 10000000000 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{S} = \text{diag}[1341,4 \quad 2678,6 \quad 1650,2 \quad 621,8 \quad 313 \quad 15600];$$

$$\mathbf{P}_1 = [2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]; \quad \mathbf{P}_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 2 \quad 0];$$

$$\mathbf{V} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 52000].$$

Результатами компьютерного моделирования явились переходные процессы по скоростям обобщенных координат ленты и натяжного устройства, представленные на рис. 3. Графики соответствуют режиму разгона и режиму работы конвейера с постоянной скоростью. Полученные кривые сравнивались качественно

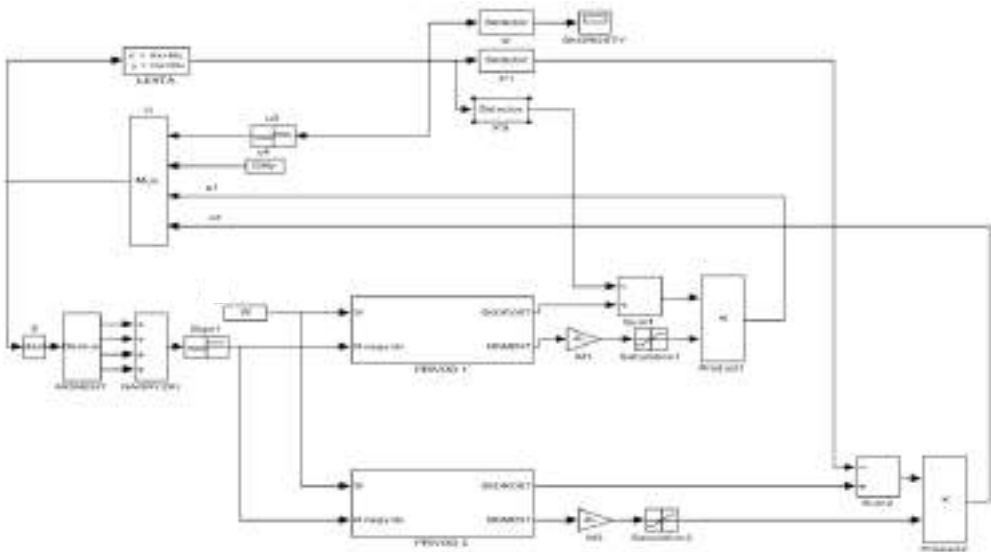


Рис. 2. Схема моделирования движения ленты двухприводного конвейера 2Л100У-01

и количественно с переходными процессами пуска и равномерного движения реального конвейера того же класса. Величина отличия переходных процессов определялась как интегральный квадрат разности этих кривых на достаточно

длительном интервале времени. Эта величина не превысила 8–10 %, что подтверждает заключение об адекватности разработанной модели движения ленты двухприводного конвейера.

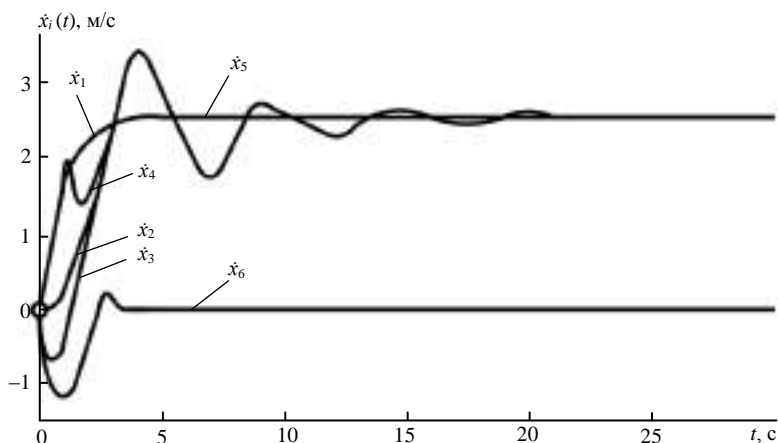


Рис. 3. Переходные процессы по скоростям обобщенных координат при пуске конвейера со скоростью 2,5 м/с

Разработанная модель движения ленты позволяет определять значения скорости движения и натяжения ленты в характерных точках конвейера, что дает возможность использовать эти координаты при разработке системы автоматического управления скоростью движения конвейерной ленты для исключения пробуксовки на приводных барабанах и равномерного распределения нагрузки на ленте при любой скорости движения конвейера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. М.: Машиностроение, 1987. 336 с.
2. Галкин В. И., Дмитриев В. Г., Дьяченко В. П., Запенин И. В., Шешко Е. Е. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. М.: МГГУ, 2005. 543 с.
3. Дмитриева В. В. Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 125 с.
4. Дмитриева В. В., Певзнер Л. Д. Автоматическая стабилизация погонной нагрузки ленточного конвейера. М.: МГГУ, 2004. 25 с.
5. Дмитриева В. В. Современные задачи автоматизации ленточного конвейера. ГИАБ. 2014. № 3. С. 65–72.
6. Безбородова М. И. Разработка системы управления скоростью движения конвейерной ленты. ГИАБ. 2006. С. 221–224.
7. Галкин В. И., Шешко Е. Е. Транспортные машины. М.: Горная книга, 2010. 588 с.
8. Ленточный конвейер – устройство, применение. URL: <http://promplace.ru> (дата обращения: 1.11.2017).
9. Quang N. P., Dittrich J.-A. Vector control of three-phase AC machines. Publisher: Springer. ISBN: 978-3-540-79028-0, 2015. P. 61–63.
10. Springer handbook of automation. Publisher: Springer. ISBN: 978-3-540-78830-0. DOI: 10.1007/978-3-540-78831-7, 2009. P. 154–168.
11. Kaung Pyae Aung, Dmitrieva V. V. Maintaining traction factor value of belt conveyor with two-engine drive: 3rd Int. Conf. on Advances in Mechanical and Automation Engineering MAE 2015. Rome, Italy. ISBN: 978-1-63248-080-4. DOI: 10.15224/978-1-63248-080-4-73. P. 45–48.

Поступила в редакцию 7 декабря 2017 года

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR THE SPEED OF THE BELT OF A TWO-DRIVE BELT CONVEYOR

Kubrin S. S. – Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of RAS, Moscow, the Russian Federation. E-mail: s_kubrin@mail.ru

Pevzner L. D. – Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation (MIREA), Moscow, the Russian Federation. E-mail: lpevzner@msmu.ru

Dmitrieva V. V. – Russian State University of Oil and Gas named after I. M. Gubkin (RSU), Moscow, the Russian Federation. E-mail: dm_valeriya@msmu.ru

The paper presents the development of an adequate mathematical model of a two-drive belt conveyor with tensioning device, complemented by the model of the controlled electric drives of the belt conveyor, and also the simulation results that allow to determine the speeds and tensions at characteristic points of the belt conveyor model, which will make it possible to synthesize the speed control system of the conveyor belt if there is no slipping on the drive drums at any conveyor speed. Mathematical model allows observing transient processes of an object at various modes of operation of conveyor belt motion and the model of tensioning device. Transient processes on the velocities of the concentrated masses of the conveyor belt motion model were obtained by computer simulation. Computer simulation of the developed system was carried out using Simulink software.

Key words: belt conveyor; modeling; conveyor belt motion; tensioning device; transient processes.

REFERENCES

1. Shakhmeister L. G., Dmitriev V. G. *Teoriia i raschet lentochnykh konveierov* [Theory and calculation of belt conveyors]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 336 p.
2. Galkin V. I., Dmitriev V. G., D'iachenko V. P., Zapenin I. V., Sheshko E. E. *Sovremennaia teoriia lentochnykh konveierov gornykh predpriiatii* [Modern theory of belt conveyors of mining enterprises]. Moscow, MSMU, 2005. 543 p.
3. Dmitrieva V. V. *Razrabotka i issledovanie sistemy avtomaticheskoi stabilizatsii pogonnoi nagruzki magistral'nogo konveiera: dis. kand. tekhn. nauk* [Development and investigation of the system of automated stabilization of main conveyor unit load. Cand. eng. sci. diss.]. Moscow, 2005. 125 p.
4. Dmitrieva V. V., Pevzner L. D. *Avtomaticheskaiia stabilizatsiia pogonnoi nagruzki lentochnogo konveiera* [Automated stabilization of belt conveyor unit load]. Moscow, MSMU Publ., 2004. 25 p.
5. Dmitrieva V. V. [Modern aims of belt conveyor automation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2014, no. 3, pp. 65–72. (In Russ.)
6. Bezborodova M. I. [Development of the system of conveyor belt speed control system]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2006, pp. 221–224. (In Russ.)
7. Galkin V. I., Sheshko E. E. *Transportnye mashiny* [Transport machines]. Moscow, Gornaia kniga Publ., 2010. 588 p.
8. Belt conveyor – structure, application. Available at: <http://promplace.ru> (access date 1.11.2017). (In Russ.)
9. Quang N. P., Dittrich J.-A. Vector control of three-phase AC machines. Publisher Springer, 2015, pp. 61–63.
10. Springer Handbook of Automation. Publisher Springer, 2009, pp. 154–168.
11. Kaung Pyae Aung, Dmitrieva V. V. Maintaining traction factor value of belt conveyor with two-engine drive. 3rd Int. Conf. on Advances in Mechanical and Automation Engineering MAE 2015. Rome, Italy, pp. 45–48.