УДК 621.867.22:51.001.572

В.В. Дмитриева, С.В. Гершун

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА С ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫМ ПРИВОДОМ

Семинар № 13

Повышения эффективности эксплуатации конвейерного транспорта можно добиться путем разработки и внедрения автоматических систем управления скоростью движения конвейерной ленты в зависимости от параметров фактического грузопотока, поступающего на полотно конвейера. На кафедре АТ МГГУ выполнены исследования по созданию такой системы управления. Объектом управления в синтезируемой системе является электромеханическая система «управляемый электропривод-лента конвейера с грузом». В работах [1], [2], [3], [4] были получены математические модели конвейерных установок с однобарабанным приводом. Однако, в настоящее время рост грузопотоков и длин транспортирования обусловил широкое распространение высокопроизводительных конвейерных установок большой длины и мощности с двухдвигательным приводом. В данной статье рассматривается получение такой модели.

Общий принцип построения моделей движения ленты конвейера изложен в работах [1], [2], [4], [5]. Это принцип кусочно-линейной аппроксимации, который заключается в условном разбиении контура ленты на некоторое количество участков, в границах каждого из которых закон изменения скорости деформации по длине предполагается линейным. Расчетные схемы строятся с учетом следующих допущений:

- трасса конвейера прямолинейна с постоянным углом наклона ;
- трансмиссионные валы и муфты абсолютно жесткие;
- масса ленты и вращающихся частей роликоопор равномерно распределена;
- нет проскальзывания ленты на роликоопорах;
- лента представляется упруго-вязким стержнем;
- диссипативные силы внутреннего трения пропорциональны скорости деформации;
- массы хвостового и отклоняющегося барабанов пренебрежимо малы по сравнению с распределенной массой ленты и груза;
- коэффициенты сопротивления движению постоянны на грузовой и порожней ветвях ленты;
- скорости в точках набегания и сбегания на приводном барабане равны.

Расчетная схема конвейерной установки с двумя приводами и натяжным устройством в хвостовой части приведена на рис. 1. Система с распределенными параметрами аппроксимируется шестью сосредоточенными массами, три

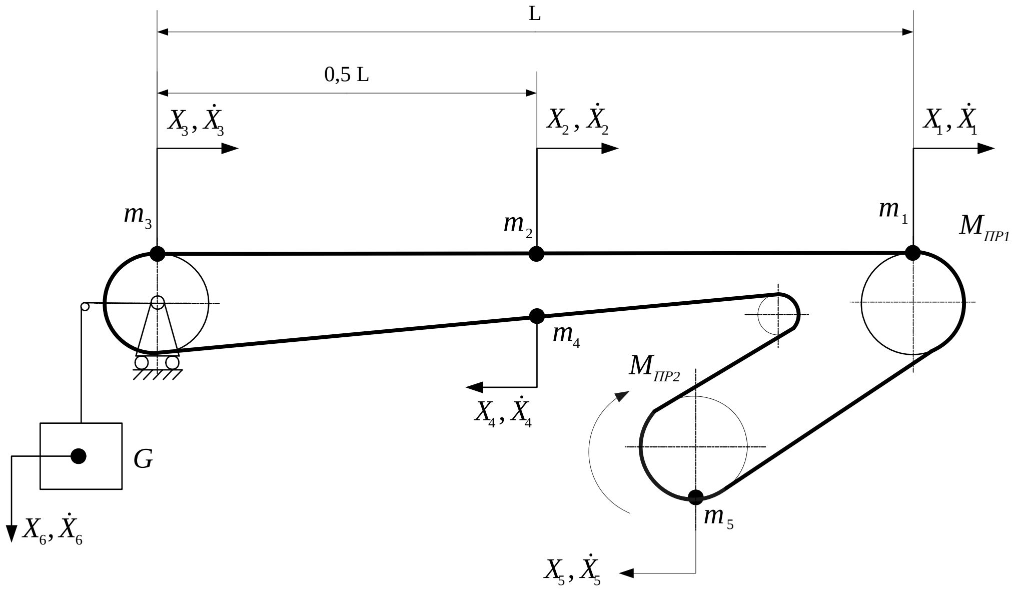

Рис. 1. Расчетная схема конвейера с двухдвигательным приводом

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.

В основе построения математической модели положен метод Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i}T\right)-\left(\frac{\partial}{\partial q_i}T\right)+\frac{\partial}{\partial q_i}\Pi+\frac{\partial}{\partial q_i}A=0\,. \qquad (1)$$

где $I = 1,2,...6$.

В котором в качестве обобщенных координат q_i приняты перемещения X_i и скорости перемещения $\dot{X}_i$ сосредоточенных масс m_i, $i = 1, 2,...6$.

Кинетическая энергия ленты и груза, равномерно распределенного на соответствующем участке между точками i и j представлена выражением

$$T_{ij}=\frac{G_{ij}l_{ij}}{6g}\left[\dot{X}_i^{\,2}+\dot{X}_i\,\dot{X}_j+\dot{X}_j^{\,2}\right], \qquad (2)$$

где G_{ij} – вес ленты, роликоопор и груза на участке *ij*, l_{ij} – длина участка, *g* – ускорение свободного падения.

Потенциальная энергия *ij* участка длиной l_{ij} складывается из энергии упругих деформаций и потенциальной энергии замкнутого контура ленты с распределенной массой

$$\Pi_{ij}=C_{ij}\frac{\left(X_i-X_j\right)^2}{2}+G_{ij}l_{ij}\frac{X_i+X_j}{2}\sin\beta\,. \qquad (3)$$

Здесь C_{ij} – жесткость участка, β – угол наклона конвейера к горизонту.

Работа внешних сил на *ij* участке создается суммой сил сопротивления движению и движущей силы привода которое определяется из выражений

$$A_{ij} = G_{ij} l_{ij} \mu \frac{X_i + X_j}{2} \cos\beta, \quad A_{пр} = -\frac{M_{п1}}{R_{б1}} X_1 - \frac{M_{п2}}{R_{б2}} X_5, \qquad (4)$$

где μ – коэффициент сопротивления движению, $M_{п1}$ и $M_{п2}$ - движущие моменты приводов, приведенные к радиусу приводных барабанов, $R_{б2}$ и $R_{б1}$ - радиусы приводных барабанов.

Работа сил внутреннего трения на участке *ij* определяется в предположении, полагая, что силы внутреннего трения пропорциональны скоростям деформации

$$A_{ij} = \frac{\eta}{2}\left[\left(\dot{X}_i - \dot{X}_{i+1}\right)\left(X_i - X_{i+1}\right) + \left(\dot{X}_i - \dot{X}_{i-1}\right)\left(X_i - X_{i-1}\right)\right], \qquad (5)$$

где η – коэффициент вязкости ленты.

Кинетическая энергия системы для рассматриваемой расчетной схемы складывается из кинетической энергии T_K, замкнутого контура ленты с равномерно распределенным грузом на верхней ветви кинетической энергии $T_П$ приводного и кинетической энергии T_H натяжного устройства.

Кинетическая энергия контура ленты:

$$\begin{aligned} T_к = {} & \frac{G_г l}{6g}\left(\dot{X}_1^2 + \dot{X}_1 \dot{X}_2 + \dot{X}_2^2\right) + \frac{G_г l}{6g}\left(\dot{X}_2^2 + \dot{X}_2 \dot{X}_3 + \dot{X}_3^2\right) + \frac{G_п l}{6g}\left(\dot{X}_3^2 + \dot{X}_4 \dot{X}_3 + \dot{X}_4^2\right) + \\ & + \frac{G_п l}{6g}\left(\dot{X}_4^2 + \dot{X}_5 \dot{X}_4 + \dot{X}_5^2\right) + \frac{G_п l}{6g}\left(\dot{X}_5^2 + \dot{X}_1 \dot{q}_5 + \dot{X}_1^2\right), \end{aligned} \qquad (6)$$

где $G_г$, $G_п$ – погонный вес движущихся частей соответственно груженной и порожней ветви.

Кинетическая энергия приводного устройства:

$$T_п = \frac{m_{п1}}{2} \dot{X}_1^2 + \frac{m_{п2}}{2} \dot{X}_5^2, \qquad (7)$$

где $m_{п1}, m_{п2}$ – массы вращающихся частей электродвигателей, редуктора, муфт и приводного барабана, приведенная к ободу барабана.

Кинетическая энергия натяжного устройства:

$$T_н = \frac{G_{ну} \dot{X}_6^2}{2g}, \qquad (8)$$

где $G_{ну}$, $\dot{X}_6$ – соответственно вес и скорость перемещения натяжного устройства.

Суммируя полученные выражения получим выражения для полной T_Σ кинетической энергии системы:

$$\begin{aligned} T_\Sigma = {} & \frac{G_г l}{6g}\left(\dot{X}_1^2 + \dot{X}_1 \dot{X}_2 + \dot{X}_2^2\right) + \frac{G_г l}{6g}\left(\dot{X}_2^2 + \dot{X}_2 \dot{X}_3 + \dot{X}_3^2\right) + \frac{G_п l}{6g}\left(\dot{X}_3^2 + \dot{X}_4 \dot{X}_3 + \dot{X}_4^2\right) + \\ & + \frac{G_п l}{6g}\left(\dot{X}_4^2 + \dot{X}_5 \dot{X}_4 + \dot{X}_5^2\right) + \frac{G_п l}{6g}\left(\dot{X}_5^2 + \dot{X}_1 \dot{q}_5 + \dot{X}_1^2\right) + \frac{m_{п1}}{2} \dot{X}_1^2 + \frac{m_{п2}}{2} \dot{X}_5^2 + \frac{G_{ну} \dot{X}_6^2}{2g}. \end{aligned} \qquad (9)$$

Потенциальная энергия упругой деформации системы при принятых допущениях состоит из энергии $\Pi_к$ замкнутого контура конвейерной ленты и потенциальной энергии $\Pi_н$ канатов натяжного устройства.

Предполагая равными коэффициенты жесткости участков конвейерной ленты, получим:

$$\Pi_к = \frac{(X_1 - X_2)^2 C}{2} + \frac{(X_2 - X_3)^2 C}{2} + \frac{(X_3 - X_4)^2 C}{2} + \frac{(X_4 - X_5)^2 C}{2} + \frac{(X_5 - X_1)^2 C}{2}, \qquad (10)$$

где C – коэффициент жесткости каждого участка.

Потенциальная энергия натяжного устройства:

$$\Pi_н = 0.5\left(\frac{X_3 - X_4}{2} - X_6\right)^2 C_К, \qquad (11)$$

где $C_к$ – коэффициент жесткости каната.

Потенциальная энергия положения натяжных грузов:

$$\Pi_г = G_{ну} X_6, \qquad (12)$$

Работа внешних сил складывается из работы движущей силы привода, сил сопротивления движению ветвей ленты и натяжных грузов, а также силы торможения.

Суммируя полученные выражения, получим выражения для полной Π_Σ кинетической энергии системы:

$$\Pi_\Sigma = \frac{(X_1 - X_2)^2 C}{2} + \frac{(X_2 - X_3)^2 C}{2} + \frac{(X_3 - X_4)^2 C}{2} + \frac{(X_4 - X_5)^2 C}{2} + \frac{(X_1 - X_5)^2 C}{2} + \\ +0.5\left(\frac{X_3 - X_4}{2} - X_6\right)^2 C_К + G_{ну} X_6 \qquad (13)$$

Работа движущей силы привода, при условии, что радиусы приводных барабанов одинаковы:

$$A_{пр} = -\frac{M_{п1}}{R_б} X_1 - \frac{M_{п2}}{R_б} X_5. \qquad (14)$$

Работа сил сопротивления движению ветвей ленты:

$$A_К = 0.5 G_г l \mu' (X_1 + 2X_2 + X_3) + 0.5 G_п l \mu'' (X_3 + 2X_4 + 2X_5 + X_1), \qquad (15)$$

где μ', μ'' – коэффициенты сопротивления движению груженой и порожней ветви.

Работа сил сопротивления движению натяжных грузов:

$$A_н = \pm G_{ну} f X_6, \qquad (16)$$

где f – приведенный коэффициент сопротивления движению натяжных грузов.

Работа сил внутреннего трения замкнутого контура :

$$A_в = (\dot{X}_1 - \dot{X}_2)(X_1 - X_2)\eta + (\dot{X}_2 - \dot{X}_3)(X_2 - X_3)\eta + (\dot{X}_3 - \dot{X}_4)(X_3 - X_4)\eta + \\ (\dot{X}_4 - \dot{X}_5)(X_4 - X_5)\eta + (\dot{X}_5 - \dot{X}_1)(X_5 - X_1)\eta. \qquad (17)$$

Введем обозначения:

$\frac{G_г l}{6g} = m_г$, $\frac{G_п l}{6g} = m_п$ - массы грузового и порожнего участка ленты соответственно.

Систему дифференциальных уравнений составляющих математическую модель движения ленточного конвейера получим согласно выражения (1), выполнив необходимые подстановки и дифференциальные преобразования полученных составляющих энергии (9), (13) и обобщенной работы (14)-(17).

1. $m_г(2\ddot{X}_1 + \ddot{X}_2) + m_м(2\ddot{X}_1 + \ddot{X}_5) + m_{пр1}\ddot{X}_1 + C(2X_1 - X_2 - X_5) + 0.5(G_г l + G_п l_м)\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_1 +$
$$+\eta(2\dot{X}_1 - \dot{X}_2 - \dot{X}_5) = \frac{M_{пр1}}{R_б}\operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1),$$
2. $m_г(2\ddot{X}_2 + \ddot{X}_1) + m_г(2\ddot{X}_2 + \ddot{X}_3) + C(2X_2 - X_1 - X_3) + G_г l\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_2 + \eta(2\dot{X}_2 - \dot{X}_1 - \dot{X}_3) = 0,$
3. $m_г(2\ddot{X}_3 + \ddot{X}_2) + m_п(2\ddot{X}_3 + \ddot{X}_4) + C(2X_3 - X_2 - X_4) + 0.25C_k(X_3 - X_4 - 2X_6) +$
$$+\eta(2\dot{X}_3 - \dot{X}_2 - \dot{X}_4) + 0.5(G_г + G_п)l\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_3 = 0$$
4. $m_п(2\ddot{X}_4 + \ddot{X}_3) + m_п(2\ddot{X}_4 + \ddot{X}_5) + C(2X_4 - X_5 - X_3) + 0.25C_k(X_4 - X_3 + 2X_6) +$
$$+G_п l\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_4 + \eta(2\dot{X}_4 - \dot{X}_5 - \dot{X}_3) = 0$$
5. $m_п(2\ddot{X}_5 + \ddot{X}_4) + m_м(2\ddot{X}_5 + \ddot{X}_1) + +m_{пр2}\ddot{X}_5 + C(2X_5 - X_1 - X_4) +$
$$+0.5(G_п l + G_п l_м)\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_5 + \eta(2\dot{X}_5 - \dot{X}_1 - \dot{X}_4) = \frac{M_{пр2}}{R_б}\operatorname{sgn}(\dot{X}_{c2} - \dot{X}_5)$$
6. $\frac{G_{ну}}{g}\ddot{X}_6 + 0.5C_k(X_4 - X_3 + 2X_6) + G_{ну} + G_{ну} f \operatorname{sgn} \dot{X}_6 = 0$

Проведя соответствующие алгебраические преобразования, получим следующую запись системы дифференциальных уравнений, описывающих движение загруженной ленты:

1. $(2m_г + 2m_м + m_{пр})\ddot{X}_1 + m_г\ddot{X}_2 + m_п\ddot{X}_5 + 2\eta\dot{X}_1 - \eta\dot{X}_2 - \eta\dot{X}_5 + 2CX_1 - CX_2 - CX_5 +$
$$+0.5(G_г l + G_п l_м)\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_1 = \frac{M_{пр1}}{R_б}\operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1),$$
2. $m_г\ddot{X}_1 + 4m_г\ddot{X}_2 + m_г\ddot{X}_3 - \eta\dot{X}_1 + 2\eta\dot{X}_2 - \eta\dot{X}_3 - CX_1 + 2CX_2 - CX_3 + G_г l\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_2 = 0,$
3. $m_г\ddot{X}_2 + (2m_г + 2m_п)\ddot{X}_3 + m_п\ddot{X}_4 - \eta\dot{X}_2 + 2\eta\dot{X}_3 - \eta\dot{X}_4 - CX_2 + (2C + 0.25C_k)X_3 -$
$$-(C + 0.25C_k)X_4 - 0.5C_k X_6 + 0.5(G_г + G_п)l\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_3 = 0$$
4. $m_п\ddot{X}_3 + 4m_п\ddot{X}_4 + m_п\ddot{X}_5 - \eta\dot{X}_3 + 2\eta\dot{X}_4 - \eta\dot{X}_5 - (C + 0.25C_k)X_3 + (2C + 0.25C_k)X_4 - CX_5$
$$+G_п l\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_4 = 0$$
5. $m_м\ddot{X}_1 + m_п\ddot{X}_4 + (2m_п + 2m_м + m_{пр2})\ddot{X}_5 - \eta\dot{X}_1 - \eta\dot{X}_4 + 2\eta\dot{X}_5 - CX_1 - CX_4 + 2CX_5 +$
$$+0.5(G_п l + G_п l_м)\mu \operatorname{sgn} \dot{X}_5 = \frac{M_{пр2}}{R_б}\operatorname{sgn}(\dot{X}_{c2} - \dot{X}_5)$$

6. $\frac{G_{ну}}{g}\ddot{X}_6 - 0.5C_k X_3 + 0.5C_k X_4 + C_k X_6 + G_{ну} + G_{ну} f \operatorname{sgn}\dot{X}_6 = 0.$

Для лаконичного представления этой модели используем матричный вид записи относительно вектора обобщенного перемещения
$X = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 \end{bmatrix}^T$:

$$M\ddot{X} + N\dot{X} + CX + S\operatorname{sgn}\dot{X} + VG_{ну} = P_1 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1)M_{пр1} + P_2 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_5)M_{пр2}, \qquad (18)$$

где

$$M = \begin{bmatrix} 2m_г + 2m_м + m_{пр1} & m_г & 0 & 0 & m_м & 0 \\ m_г & 4m_г & m_г & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_г & 2m_г + 2m_п & m_п & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_п & 4m_п & m_п & 0 \\ m_м & 0 & 0 & m_п & 2m_п + 2m_м + m_{пр2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G_{ну}}{g} \end{bmatrix},$$

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

$$C = \begin{bmatrix} 2C & -C & 0 & 0 & -C & 0 \\ -C & 2C & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C & 2C + 0.25C_k & -C - 0.25C_k & 0 & -0.5C_k \\ 0 & 0 & -C - 0.25C_k & 2C + 0.25C_k & -C & 0.5C_k \\ -C & 0 & 0 & -C & 2C & 0 \\ 0 & 0 & -0.5C_k & 0.5C_k & 0 & C_k \end{bmatrix},$$

$$S = \operatorname{diag}\begin{bmatrix} 0.5(G_г l + G_п l_м)\mu & G_г l\mu & 0.5(G_г + G_п) l\mu & G_п l\mu & 0.5(G_п l + G_п l_м)\mu & G_{ну} f \end{bmatrix},$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} R_б^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,\ P_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & R_б^{-1} & 0 \end{bmatrix}^T,\ V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T.$$

Для получения канонического представления умножим все члены выражения (18) на матрицу M^{-1}:

$$\ddot{X} + M^{-1}N\dot{X} + M^{-1}CX + M^{-1}S\operatorname{sgn}\dot{X} + M^{-1}VG_{ну} =$$
$$M^{-1}P_1 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1)M_{пр1} + M^{-1}P_2 \operatorname{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_5)M_{пр2}. \qquad (19)$$

Введем в модель координаты состояния согласно каноническому правилу О.Коши:

$$x_1 = X_1 \quad x_7 = \dot{X}_1$$
$$x_2 = X_2 \quad x_8 = \dot{X}_2$$
$$x_3 = X_3 \quad x_9 = \dot{X}_3$$
$$x_4 = X_4 \quad x_{10} = \dot{X}_4$$
$$x_5 = X_5 \quad x_{11} = \dot{X}_5$$
$$x_6 = X_6 \quad x_{12} = \dot{X}_6$$

Модель движения конвейерной ленты в пространстве состояний представляется в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = -(M^{-1}N + M^{-1}C)x + M^{-1}S\,\mathrm{sgn}\,x + M^{-1}VG_{\text{ну}} + M^{-1}P_1\,\mathrm{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1)M_{\text{пр1}} +$$

$$+M^{-1}P_2\,\mathrm{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_5)M_{\text{пр2}}\,.$$

В данной системе внешними воздействиями являются движущие моменты, развиваемые приводами, вес натяжного устройства и силы сопротивления движению конвейерной ленты, поэтому введем следующие обозначения:

$u_1 = M_{\text{пр1}}$ - движущий момент первого привода;

$u_2 = M_{\text{пр2}}$ - движущий момент второго привода;

$u_3 = \mathrm{sgn}\,x$ - сопротивление движению конвейерной ленты;

$u_4 = G_{\text{ну}}$ - вес натяжного устройства.

Матрица $A = -(M^{-1}N + M^{-1}C)$ является матрицей состояния системы, а матрицы $B_1 = M^{-1}P_1, B_2 = M^{-1}P_2, B_3 = M^{-1}S, B_4 = M^{-1}V$ - матрицами управления. Система уравнений принимает вид:

$$\dot{x} = Ax + B_1\,\mathrm{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1)u_1 + B_2\,\mathrm{sgn}(\dot{X}_{c1} - \dot{X}_1)u_2 + +B_3u_3 + B_4u_4. \quad (20)$$

Матрицы состояния и управления в модели являются блочными:

$$A = \begin{bmatrix} 0_{(6\times6)} & E_{(6\times6)} \\ -M^{-1}C_{(6\times6)} & 0_{(6\times6)} \end{bmatrix}_{(12\times12)}, \quad B = \begin{bmatrix} 0_{(6\times1)} \\ -M^{-1}P_{1(6\times1)} \end{bmatrix}_{(12\times1)}, B_2 = \begin{bmatrix} 0_{(6\times1)} \\ -M^{-1}P_{2(6\times1)} \end{bmatrix}_{(12\times1)},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0_{(6\times6)} & 0_{(6\times6)} \\ 0_{(6\times6)} & -M^{-1}S_{(6\times6)} \end{bmatrix}_{(12\times1)}, \quad B_{4(12\times1)} = \begin{bmatrix} 0_{(6\times1)} \\ -M^{-1}V_{(6\times1)} \end{bmatrix}_{(12\times1)}.$$

Компьютерное моделирование движения ленты с грузом для двухприводного конвейера проводилось в ППП MATLAB, приложении SIMULINK. Модель движения конвейерной ленты задана блоком *State Space*, позволяющем задавать внутренние модели линейных систем в виде:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(0)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t).$$

Внешние воздействия объединены блоком *Mux* в вектор $U_{15\times1} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4]$, а матрица управления является блочной $B = [B_1 \vdots \; B_2 \vdots \; B_3 \vdots \; B_4]$. Выраженная через матрицы (18), она принимает вид:

$$B = \begin{bmatrix} 0_{(6\times1)} & 0_{(6\times1)} & 0_{(6\times6)} & 0_{(6\times6)} & 0_{(6\times10)} \\ -M^{-1}P_{1(6\times1)} & -M^{-1}P_{2(6\times1)} & 0_{(6\times6)} & -M^{-1}S_{(6\times6)} & -M^{-1}V_{(6\times1)} \end{bmatrix}.$$

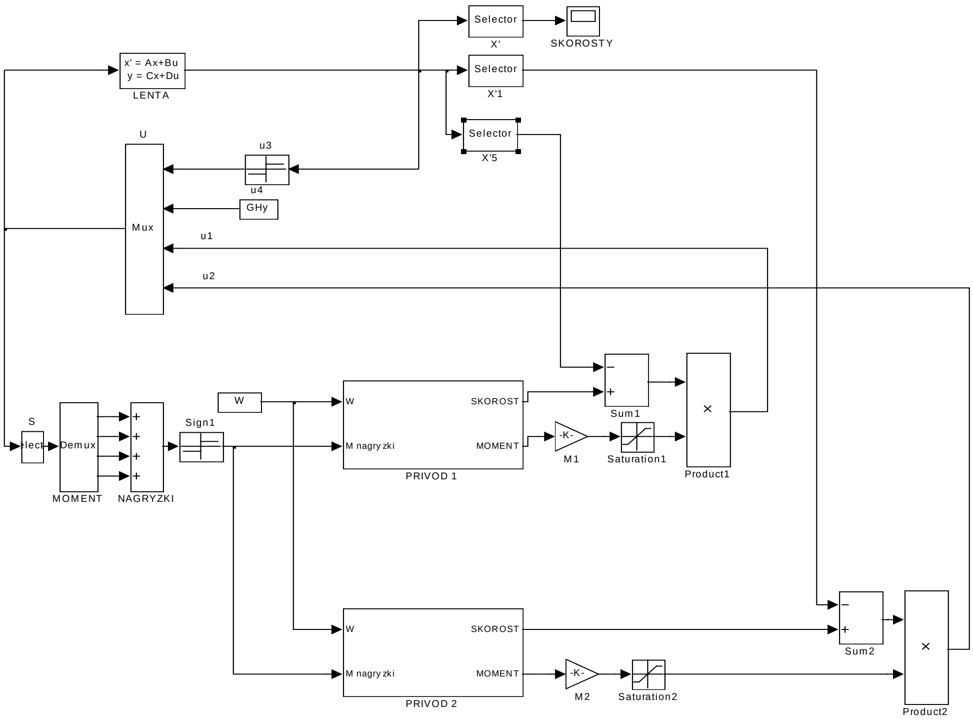

Рис. 2. Схема моделирования двухприводного конвейера в SIMULINK

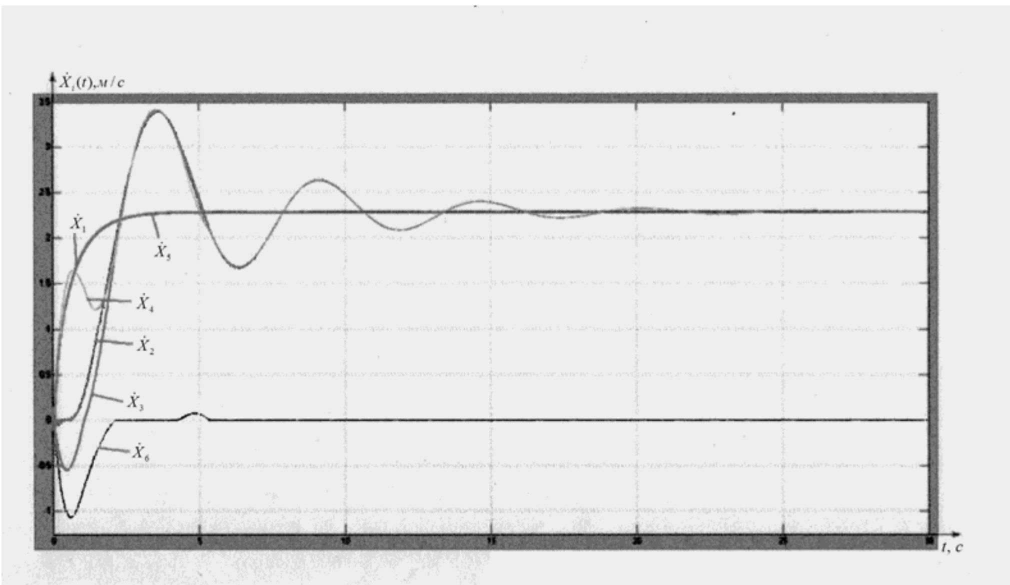

Рис.3. Переходные процессы по скоростям обобщенных координат при пуске конвейера со скоростью 2,5 м/с.

Для моделирования приводов используются готовые модели асинхронных короткозамкнутых приводов с частотно-векторным управлением. Для согласования модели движения конвейера и моделей приводов определен момент нагрузки на привода со стороны конвейера. Схема моделирования приведена на рис. 2. Моделирование проводилось для числовых значений:

$l = 1500$ м, $m_г = 1518$ кг, $m_п = 352$ кг,

$m_{пр1} = 3000$ кг, $m_{пр1} = 2000$ кг, $M_{пр1} = 20900$ Нм, $M_{пр2} = 20900$ Нм, $R_б = 0.5$ м,

$\mu = 0.03$, $\mu = 0.03$, $f = 0.3$, $C = 10000$ Н/м, $C_к = 10^{10}$ Н/м, , Gну = 52000 кг.

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. Эти результаты адекватны процессам, происходящим в реальном объекте, осцилограммы которых были получены Волотковским В.С.(МинЧерМет СССР). Результаты моделирования позволяют определять скорости и натяжения в характерных точках ленточного конвейера, что даст возможность в дальнейшем синтезировать систему управления скоростью движения конвейерной ленты при отсутствии пробуксовки на приводных барабанах и автоматически распределять нагрузку равномерно между приводами при любой скорости движения конвейера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Запенин И.В., Бельфор В.Е., Селищев Ю.А.* Моделирование переходных процессов ленточных конвейеров. – М.: Недра, 1969.

2. *Дмитриева В.В.* Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2005.

3. *Дмитриева В.В., Певзнер Л.Д.* «Автоматическая стабилизация погонной нагрузки ленточного конвейера». – М.: Издательство МГГУ, 2004.

4. *Дмитриева В.В.* «Математическая модель магистрального конвейера как объекта управления и автоматизации», «Горные машины и автоматика» №7, 2001.

5. *Зюзичева Ю.Е.* Модель ленточного конвейера, расположенного под углом к горизонту. Определение оптимального для переходного процесса угла наклона. – М.: Издательство МГГУ, ГИАБ №7,2006. ГИАБ

Коротко об авторах

Дмитриева В.В. – кафедра АТ,
Гершун С.В. – кафедра АТ,
Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 13 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *Л.Д. Певзнер.*