

УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ КОВШОВОГО ЭЛЕВАТОРА

Вячеслав Ловейкин, Виталий Бортун

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Украина, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15

Аннотация. На основе разработанной математической модели исследованы динамические нагрузки, которые возникают в поводе и тяговом органе во время работы ковшového элеватора с учетом его упругих и диссипативных свойств. Проведен анализ полученных результатов с учетом и без учета диссипативных свойств элементов конвейера.

Ключевые слова: динамическая модель, математическая модель, ковшовой элеватор, конвейер, диссипация.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При работе вертикального ленточного ковшového элеватора, в его элементах, и в первую очередь в тяговом органе, возникают значительные динамические нагрузки, которые во время неустановившихся процессов могут превышать статические. Такие нагрузки возникают вследствие особенностей внешних активных и внутренних реактивных сил и связей, которые определяют и вместе с тем ограничивают движение конвейера [1 – 4]. Кроме того, величина динамических нагрузок зависит от инерционных, жесткостных и диссипативных свойств элементов ковшového элеватора. Для установления причин возникновения, а также снижение динамических нагрузок необходимо исследовать динамику движения ковшového элеватора в наиболее нагруженном состоянии [4, 18], а именно при загруженных ковшах рабочей ветви в режиме пуска. Решение такой задачи обеспечит получение на этапе проектирования достоверных исходных данных для дальнейшего расчетов элементов конструкции элеватора, что позволит повысить его технический уровень.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вопросом моделирования рабочего процесса конвейеров, многомассовых систем с замкнутым контуром посвящены работы [2 – 9, 20]. В этих работах рассмотрены математические модели ленточных и цепных конвейеров большой длины, которые преимущественно применяются в тяжелой промышленности. Также в математических моделях, представленных в этих работах, не учтены крутильные колебания масс, которые имеют место в ковшových элеваторах. Таким образом, большинство из разработанных математических моделей не в полной мере отображают динамические процессы вертикальных ленточных ковшových элеваторов, которые применяются в сельском хозяйстве.

Цель исследования состоит в разработке математической модели, пригодной для исследования нагрузок и динамики движения вертикального ленточного ковшového элеватора с загруженной рабочей ветвью в процессе его пуска с учетом упругих и диссипативных свойств.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для динамических технических систем, то есть систем, которые меняют

свое состояние со временем, необходимо разработать динамическую модель. Известно, что при переходе от реальной механической системы (машины) к ее динамической модели пренебрегают теми физическими факторами, которые не существенны для данного исследования [10]. Итак, при разработке использованы такие предположения:

- ковшовый элеватор представлен как детерминированная динамическая система с голономными связями;
- ковши считаются абсолютно твердыми телами и имеют возможность с помощью упругих элементов крепления с коэффициентами жесткости c_a возвращаться вокруг осей $O_{p1}, O_{p2}, \dots, O_{pn}, O_{x1}, O_{x2}, \dots, O_{xk}$, которые принято за точки крепления ковшей к ленте;
- вес ленты конвейера распределен между ковшами на этой ленте;
- лента разделена между точками крепления ковшей на отдельные упруго-диссипативные элементы с коэффициентом жесткости c и коэффициентом демпфирования β ;
- принимаем, что поперечные перемещения ленты являются незначительными, поэтому их не учитываем;
- приводной механизм имеет упругие и диссипативные свойства, которые представлены коэффициентом жесткости c_0 и коэффициентом демпфирования β_0 ;
- корпуса электродвигателя, редуктора и оси приводного и натяжного барабанов закреплены абсолютно жестко.

Динамическая модель для общего случая с произвольным количеством масс (n_p и n_x рабочей и холостой ветвей соответственно) и с учетом принятых предположений показана на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: J_0 – приведенный к оси вращения барабана момент инерции электродвигателя, редуктора, муфты; J_1 – момент инерции приводного барабана; J_2 – момент инерции натяжного барабана; J_p – момент инерции загруженного ковша относительно его центра масс; J_x – момент инерции разгруженного ковша относительно его центра масс; M_p – приведенный к оси обращения приводного барабана движущий момент приводного механизма; M_o – приведенный к оси обращения натяжного барабана момент сил сопротивления перемещению ленты с ковшами и грузом; m_p, m_x – приведенные к тяговому органу массы ковша с грузом и без груза соответственно с учетом массы ленты между ковшами; c_0, β_0 – коэффициенты жесткости и демпфирования приводного механизма; c, β – коэффициенты жесткости и демпфирования ленты, длиной равной шагу между ковшами; c_a – крутильная жесткость поворота ковшей; R_1, R_2 – радиусы приводного и натяжного барабана соответственно; a_p, a_x – расстояния от точек крепления загруженного и пустого ковшей к их центрам масс соответственно; g – ускорение свободного падения.

За обобщенные координаты такой механической системы приняты:

$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ – угловые координаты поворота приведенной массы приводного механизма, приводного и натяжного барабанов соответственно;

$x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pn}, x_{x1}, x_{x2}, \dots, x_{xk}$ – вертикальные координаты перемещения точек крепления ковшей к ленте $O_{p1}, O_{p2}, \dots, O_{pn}, O_{x1}, O_{x2}, \dots, O_{xk}$ на рабочей и холостой ветвях конвейера;

$\alpha_{p1}, \alpha_{p2}, \dots, \alpha_{pn}, \alpha_{x1}, \alpha_{x2}, \dots, \alpha_{xk}$ – угловые координаты поворота загруженных и разгруженных ковшей относительно точек их крепления $O_{p1}, O_{p2}, \dots, O_{pn}, O_{x1}, O_{x2}, \dots, O_{xk}$.

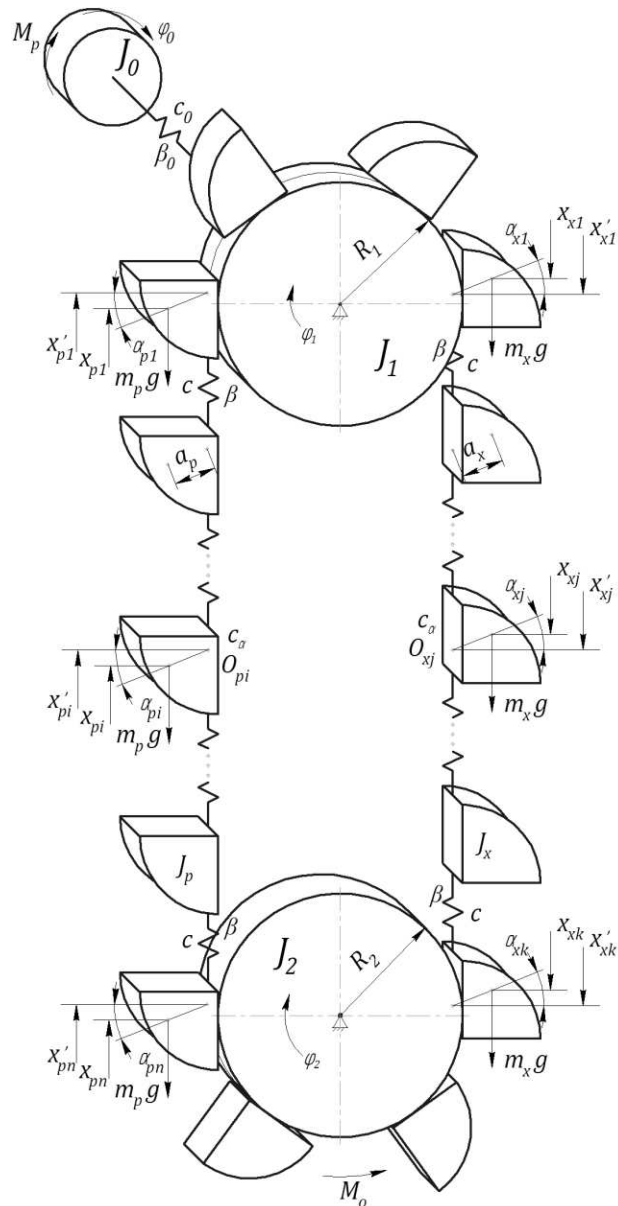


Рис. 1. Динамическая модель вертикального ленточного ковшового элеватора

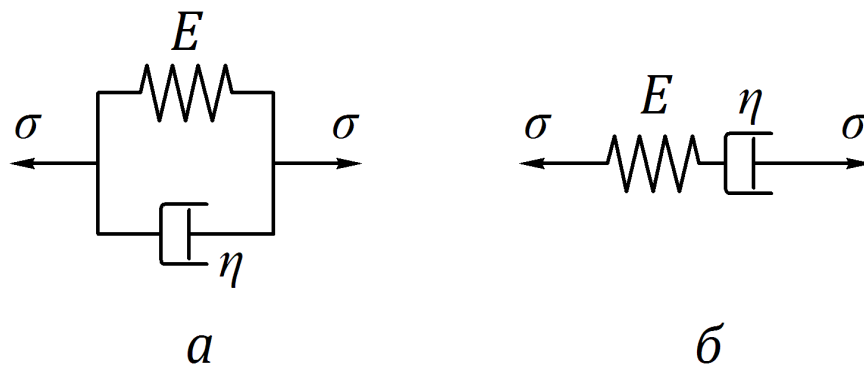


Рис. 2. Реологические модели:
а – Кельвина-Фохта, б – Максвелла

Лента конвейера может быть представлена разными расчетными

моделями, которые рассматриваются в работах [8, 9]. Одной из наиболее

$$\begin{aligned}
 m_p(\ddot{x}_{pn-1} - a_p \ddot{\alpha}_{pn-1}) &= c(x_{pn-2} - x_{pn-1}) + \beta(\dot{x}_{pn-2} - \dot{x}_{pn-1}) - c(x_{pn-1} - x_{pn}) - \\
 &- \beta(\dot{x}_{pn-1} - \dot{x}_{pn}) - m_p g; \\
 -m_p \ddot{x}_{pn-1} a_p + (J_p + m_p a_p^2) \ddot{\alpha}_{pn-1} &= m_p g a_p - c_\alpha \alpha_{pn-1}; \\
 m_p(\ddot{x}_{pn} - a_p \ddot{\alpha}_{pn}) &= c(x_{pn-1} - x_{pn}) + \beta(\dot{x}_{pn-1} - \dot{x}_{pn}) - c(x_{pn} - x_{pn+1}) - \\
 &- \beta(\dot{x}_{pn} - \dot{x}_{pn+1}) - m_p g; \\
 -m_p \ddot{x}_{pn} a_p + (J_p + m_p a_p^2) \ddot{\alpha}_{pn} &= m_p g a_p - c_\alpha \alpha_{pn}; \\
 J_2 \ddot{\phi}_2 &= c(x_{pn} - \phi_2 R_2) R_2 + \beta(\dot{x}_{pn} - \dot{\phi}_2 R_2) R_2 - c(\phi_2 R_2 - x_{xk}) R_2 - \\
 &- \beta(\dot{\phi}_2 R_2 - \dot{x}_{xk}) R_2 - M_o(\dot{\phi}_2); \\
 m_x(\ddot{x}_{xk} - a_x \ddot{\alpha}_{xk}) &= c(\phi_2 R_2 - x_{xk}) R_2 + \beta(\dot{\phi}_2 R_2 - \dot{x}_{xk}) R_2 - c(x_{xk} - x_{xk-1}) - \\
 &- \beta(\dot{x}_{xk} - \dot{x}_{xk-1}) + m_x g; \\
 -m_x \ddot{x}_{xk} a_x + (J_x + m_x a_x^2) \ddot{\alpha}_{xk} &= m_x g a_x - c_\alpha \alpha_{xk}; \\
 m_x(\ddot{x}_{xk-1} - a_x \ddot{\alpha}_{xk-1}) &= c(x_{xk} - x_{xk-1}) + \beta(\dot{x}_{xk} - \dot{x}_{xk-1}) - c(x_{xk-1} - x_{xk-2}) - \\
 &- \beta(\dot{x}_{xk-1} - \dot{x}_{xk-2}) + m_x g; \\
 -m_x \ddot{x}_{xk-1} a_x + (J_x + m_x a_x^2) \ddot{\alpha}_{xk-1} &= m_x g a_x - c_\alpha \alpha_{xk-1}; \\
 \dots\dots\dots \\
 m_x(\ddot{x}_{xj} - a_x \ddot{\alpha}_{xj}) &= c(x_{xj+1} - x_{xj}) R_2 + \beta(\dot{x}_{xj+1} - \dot{x}_{xj}) R_2 - c(x_{xj} - x_{xj-1}) - \\
 &- \beta(\dot{x}_{xj} - \dot{x}_{xj-1}) + m_x g; \\
 -m_x \ddot{x}_{xj} a_x + (J_x + m_x a_x^2) \ddot{\alpha}_{xj} &= m_x g a_x - c_\alpha \alpha_{xj}; \\
 \dots\dots\dots \\
 m_x(\ddot{x}_{x1} - a_x \ddot{\alpha}_{x1}) &= c(x_{x2} - x_{x1}) R_2 + \beta(\dot{x}_{x2} - \dot{x}_{x1}) R_2 - c(x_{x1} - \phi_1 R_1) - \\
 &- \beta(\dot{x}_{x1} - \dot{\phi}_1 R_1) + m_x g; \\
 -m_x \ddot{x}_{x1} a_x + (J_x + m_x a_x^2) \ddot{\alpha}_{x1} &= m_x g a_x - c_\alpha \alpha_{x1}.
 \end{aligned}$$

Нелинейность системы вызвана нелинейностью механической характеристики приводного асинхронного двигателя, которая зависит от угловой скорости приводного вала и определяется с помощью уравнения Клосса [12, 13].

Учитывая уравнение Клосса, движущий момент приводного механизма, приведенный к оси поворота приводного барабана, имеет вид:

$$M_p = \frac{2M_{max}}{\frac{1 - \dot{\phi}_0 \cdot u / \omega_0}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{1 - \dot{\phi}_0 \cdot u / \omega_0}} \cdot u \cdot \eta, \tag{3}$$

где M_{max} – максимальный момент на валу двигателя (берется из каталога на электродвигатели); $\dot{\phi}_0$ – угловая скорость приводного барабана; ω_0 – угловая скорость идеального холостого хода

электродвигателя; $s_{кр}$ – критическое скольжение электродвигателя, которое отвечает максимальному моменту; u – передаточное число приводного механизма от двигателя к барабану; η – к.п.д. приводного механизма.

Момент сил сопротивления перемещению ленты с ковшами и грузом определяется зависимостью:

$$M_o = F_{i\zeta} R_3, \quad (4)$$

где R_3 – расстояние от оси поворота барабана к кромке ковша, которая погружается в сыпучий материал; $F_{o3}(\dot{\varphi}_2)$ – сила сопротивления зечерпыванию сыпучего материала, которая зависит от угловой скорости натяжного барабана и согласно [17] определяется зависимостью:

$$F_{o3} = 1,1 \cdot m_{зв} \cdot \dot{\varphi}_2^2 \cdot R_2. \quad (5)$$

Здесь $m_{зв}$ – масса зоны выпирания, которая возникает перед ковшом при зечерпывании груза.

На основе системы дифференциальных уравнений (2) с учетом зависимостей (3) – (5), выполнено моделирование процесса пуска нории с загруженной рабочей ветвью. В качестве примера принят ленточный ковшовый элеватор – Scandia SEI 35/14 012020-4.

Графики процесса пуска загруженного ковшового элеватора с учетом диссипативных свойств системы и без, приведенные на рис. 3-8.

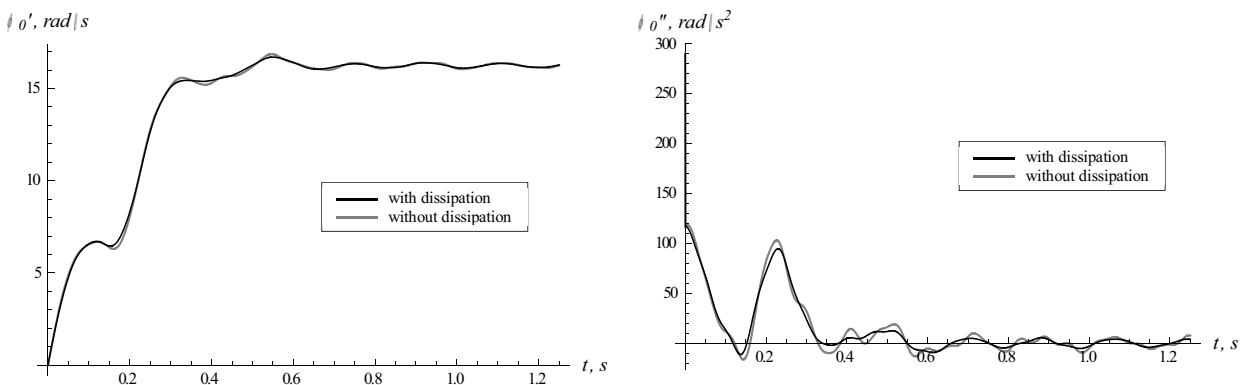


Рис. 3. Графики изменения угловой скорости и углового ускорения приводного механизма.

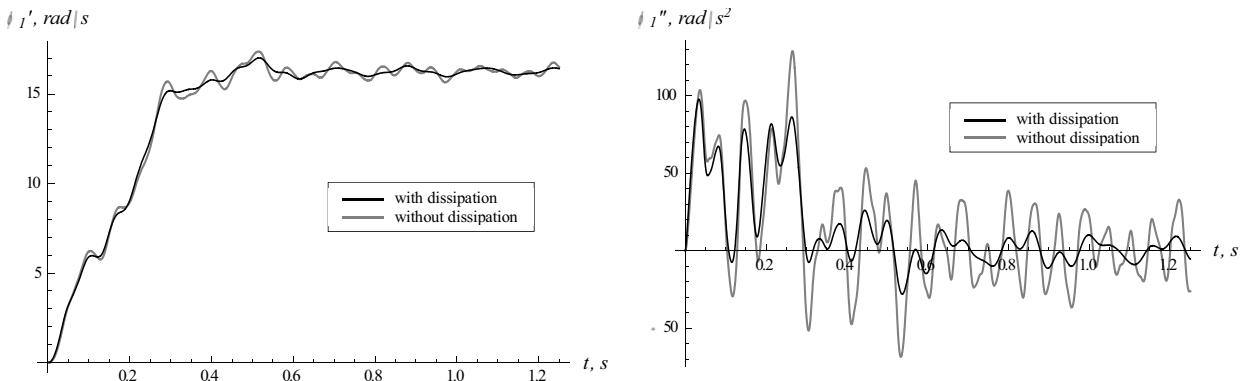


Рис. 4. Графики изменения угловой скорости и углового ускорения приводного барабана.

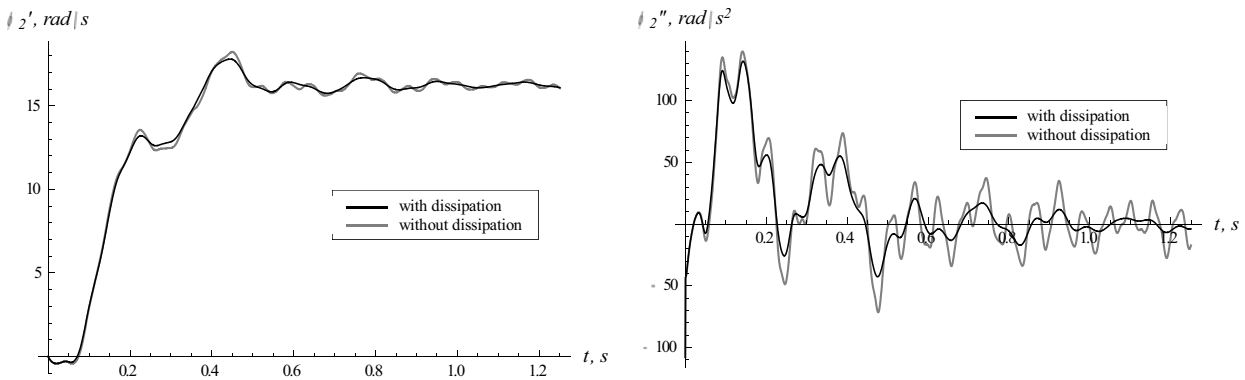


Рис. 5. Графики изменения угловой скорости и углового ускорения натяжного барабана.

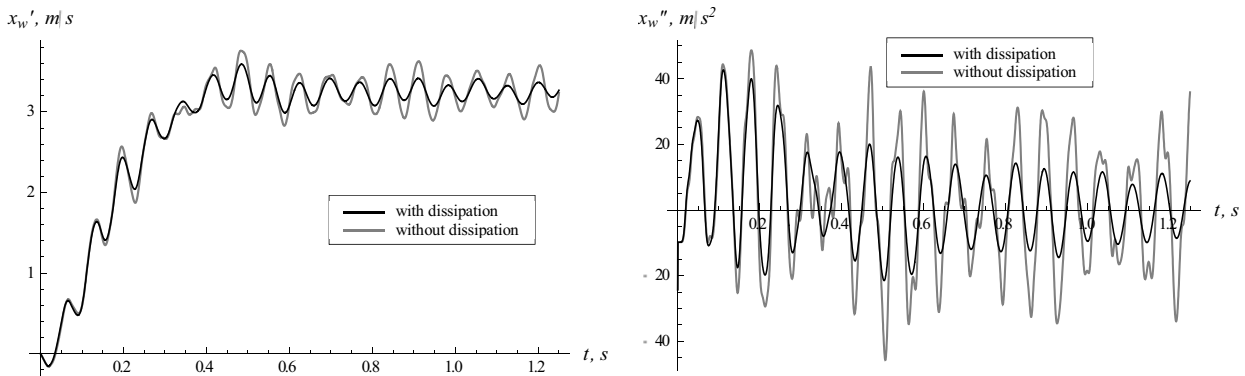


Рис. 6. Графики изменения скорости и ускорение пятой массы на рабочей ветви.

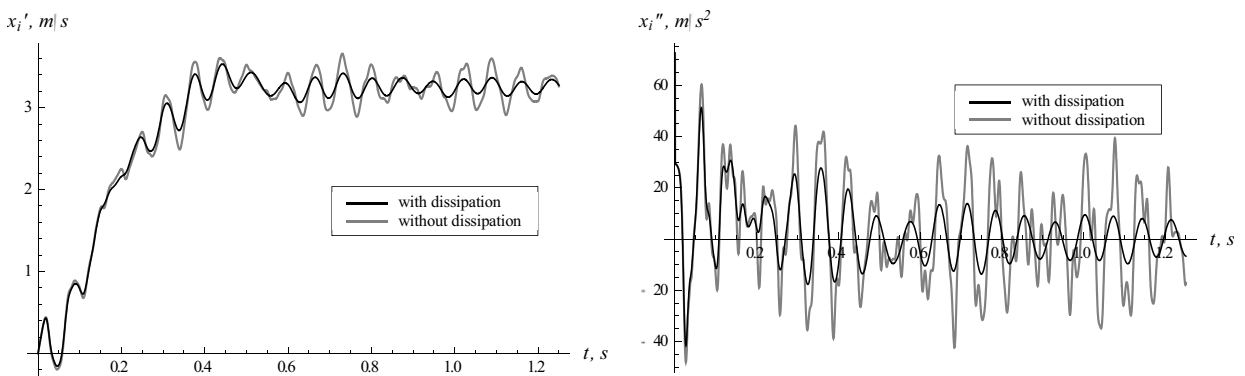


Рис. 7. Графики изменения скорости и ускорение пятой массы на холостой ветви.

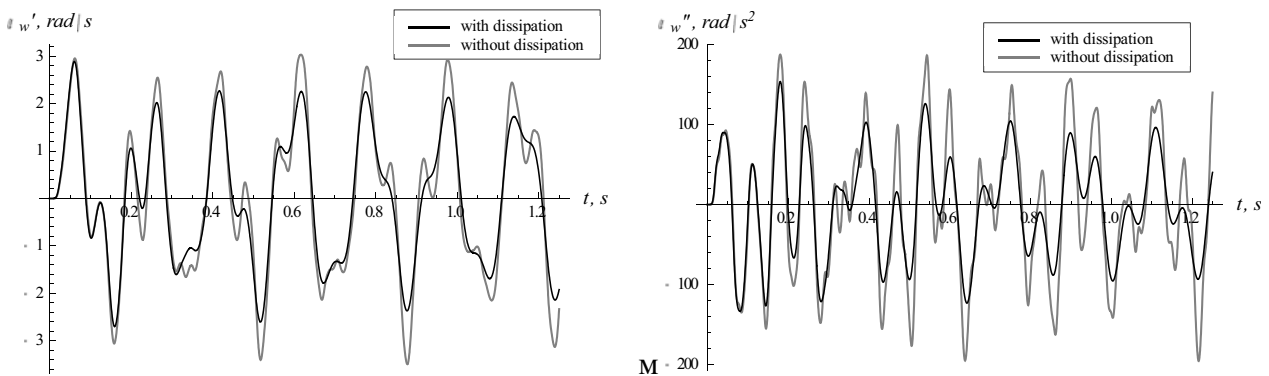


Рис. 8. Графики изменения угловой скорости и углового ускорения пятой массы на рабочей ветви.

Из полученных графических зависимостей видно, что во время пуска элеватора, в его подвижных элементах возникают значительные колебательные процессы. Такие колебания являются следствием нелинейной характеристики электродвигателя и упругих свойств элементов конвейера. Графики на рис. 3-7 показывают, что скорости и ускорение подвижных элементов ковшового элеватора довольно резко возрастают к определенному номинальному значению

на протяжении 0,8 с и имеют ярко выраженный колебательный характер. Также, вследствие того, что лента является упругим элементом, заметно отличие в нарастании скорости натяжного и приводного барабанов. Из приведенных результатов можно увидеть, что колебание масс (для примера приведена лишь пятая масса) и ленты, на рабочей ветви имеют большую амплитуду, чем массы на холостой ветви.

Из графиков на рис. 8 установлено, что угловая скорость ковшей имеет значительную интенсивность изменения как по величине, так и по направлению действия. Кроме того крутильные колебания ковшей, в отличие от них линейных колебаний, практически не затухают на протяжении всего периода работы ковшового элеватора.

Необходимо отметить, что влияние диссипативных свойств элементов ковшового элеватора имеет четко выраженный характер. Из графиков видно, что при сохранении частоты колебаний подвижных элементов конвейера, наблюдается значительное уменьшение их амплитуды, сравнительно с системой, которая учитывает только упругие свойства.

ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель динамики движения ковшового элеватора, которая учитывает упругие и диссипативные свойства его элементов. Такая модель может быть использована для исследования характеристик движения как на участках переходных процессов (пуск и торможение), так и на участке устойчивого движения.
2. Полученные с помощью разработанной модели зависимости кинематических характеристик звеньев для конкретного элеватора показывают, что имеют место значительные колебательные процессы как в элементах приводного механизма, так и в ленте, к которой прикреплены ковши. Особенно эти процессы проявляются при рассмотрении зависимостей ускорений этих звеньев, которые являются причиной возникновения динамических нагрузок. В дальнейшем на основе полученной модели можно разрабатывать математические модели, которые бы позволяли провести дальнейшую оптимизацию [19] пуска конвейера, а следовательно, и снижения динамических нагрузок на элементы его конструкции.
3. Проведенные расчеты математической модели ковшового элеватора с учетом и без учета их диссипативных свойств показывают, что практически для всех подвижных элементов наблюдаются затухания колебаний с учетом диссипации. Однако крутильные колебания ковшей относительно точек крепления к ленте имеют незначительный характер затухания колебаний. Вместе с тем, амплитуды колебаний звеньев с учетом диссипации на 25 – 30% меньше в сравнении с колебаниями без учета таковой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Harrison. (1991) Dynamic sag instabilities in long underground belt conveyors, International Mechanical Engineering Congress, Sydney, Australia, 8-12 July 1991, pp 24-30.
2. Спиваковский А.О. Теория ленточных конвейеров / А.О. Спиваковский, В.Г. Дмитриев. – М., 1982. – 192 с.
3. Хорольський І.М. Динаміка ланцюгових систем і замкнутих контурів машин неперервного транспорту / Хорольський І.М. – Л.: Вид-во держ. ун-ту «Львівська політехніка», 1999. – 194 с.
4. M. A. Alspaugh. (2004) Latest developments in belt conveyor technology. MINExpo 2004; Las Vegas, NV, USA; 27–30 September 2004.
5. Чугреев Л.И. Динамика конвейеров с цепным тяговым органом / Чугреев Л.И. – М.: Недра, 1976.- 256 с.
6. Штокман И.Г. Динамика тяговых цепей рудничных конвейеров / Штокман И.Г. – М.: Углетехиздат, 1959. – 290 с.
7. Кондрахин В.П. Математическая модель для исследования нагрузок в двухскоростном многодвигательном приводе и тяговом органе скребкового забойного конвейера // Кондрахин В.П., Борисенко В.Ф., Мельник А.А. и др. – Наукові праці Донецького національного технічного університету, вип. 16, Серія: гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. – С. 132–140.

8. P. Kulinowski. (2004) Dynamic start-up calculations for belt conveyors with measured torque curves of fluid couplings / Mine planning and equipment selection 2004: proceedings of the thirteenth international symposium on Mine planning and equipment selection : Wroclaw, Poland: A. A. Balkema Publishers. – pp. 443-448.
9. D. Beavers, D. Morrison, D. Rea. Non-Linear Model for Dynamic Analysis of Conveyors.
<http://www.skmconsulting.com/Site-Documents/Technical-Papers/Non-Linear-Model-for-Dynamic-Analysis.pdf>.
10. Ловейкін В.С. Теорія технічних систем: навч. посібник. / Ловейкін В.С., Назаренко І.І., Онищенко О.Г. – Київ-Полтава: ПДТУ, 1998. – 175 с.
11. Дмитриев В. Г. Теоретические основы расчета ленточных конвейеров / В. Г. Дмитриев, А. О. Спиваковский. – М.: Наука, 1977. – 154 с.
12. Haddad Y. M. (1995) Viscoelasticity of engineering materials / Yehia M. Haddad.– London Chapman & Hall
13. Вейц В.Л. Динамика машинных агрегатов / Вейц В.Л. – Л.: Машиностроение, 1969. – 370 с.
14. Meirovich L. (1970) Methods of analytical dynamics / Leonard Meorovich. – New York: McGraw-Hill..
15. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: учебник [для студентов вузов] / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – [6-е изд., доп. и перераб.]. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
16. Isermann R. (2005) Mechatronic systems: fundamentals / Isermann R. – US: Springer
17. Турчин В.С. Обоснование конструктивно-режимных параметров элеваторов ковшового типа для транспортировки сыпучих материалов: Дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01/ Турчин Вячеслав Семёнович. – Оренбург, 2005. – 187 с.
18. Oleg Litvinov. К динамическому расчету машин / Oleg Litvinov, Wojciech Tanas // Motrol. Том 2 А. 2006. - Lublin. – С. 210–223.
19. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. 2010. Оптимізація керування рухом одно

масових механічних систем. Motrol – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, tom 12B, С. 91–96.

20. A. Harrison. (1996). Simulation of conveyor dynamics, Bulk Solids Handling, vol.16, n. 1, pp. 33–36.

IMPROVED MATHEMATICAL MODEL OF THE BUCKET ELEVATOR'S MOVEMENT DYNAMICS

Summary. Dynamic stresses, which arise in drive and traction element during operation of the conveyor have been investigated on the basis of the developed mathematical model. Calculation has been conducted with regard to its elastic and dissipative properties. The analysis of the obtained results has been carried out, with and without taking into consideration dissipative properties of the conveyor's elements.

Key words: dynamic model, mathematical model, bucket elevator, conveyor, dissipation.