

УДК 621.867.3

В. Ловейкін, докт.техн.наук; В. Бортун

Національний університет біоресурсів і природокористування України

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ РУХУ СТРІЧКОВОГО КІВШОВОГО ЕЛЕВАТОРА З ОДНОСТОРОННІМ ЗВ'ЯЗКОМ ТЯГОВОГО ОРГАНА

Резюме. Розроблено математичну модель вертикального стрічкового ківшового елеватора, в якій тяговий орган (стрічка) представлено як пружний елемент з одностороннім зв'язком, що працює на розтяг, через кусочні функції зміни реакції у цьому ж елементі.

Ключові слова: стрічковий ківшовий елеватор, динамічна модель, математична модель, пружний елемент, кусочна функція.

V. Loveikin, V. Bortun

MATHEMATICAL MODEL OF THE BELT BUCKET ELEVATOR'S MOVEMENT DYNAMICS WITH ONE-SIDE CONSTRAINT OF THE PULLING ELEMENT

The summary. The mathematical model of the vertical belt bucket elevator has been developed. In this model the pulling element is presented by piecewise function as an elastic element with one-side constraint and works in tension.

Key words: belt bucket elevator, dynamical model, mathematical model, elastic element, piecewise function.

Постановка проблеми. На жаль, навіть на сучасному етапі розвитку науки, більшість машинобудівних заводів (підприємств), не тільки вітчизняних, а й зарубіжних, при конструюванні конвеєрного транспорту користуються нормами, які ґрунтуються лише на статичних методах розрахунку. За такого методу не виключені значні неточності, адже при розрахунку стрічка вважається абсолютно жорсткою, а її швидкість – сталою. В подальшому ці неточності компенсують, приймаючи певні коефіцієнти запасу міцності. Тобто, метою такого розрахунку є підбір необхідних конструктивних елементів конвеєра та перевірка ефективності його роботи під час усталеного режиму. Крім того, статичні методи розрахунку не враховують динамічних реакцій та навантажень, що виникають у стрічці та рухомих елементах конвеєра під час перехідних процесів. Саме тому найдоцільнішим методом з дослідження динаміки конвеєрних систем є динамічний аналіз, який базується на побудові математичних моделей.

Аналіз публікацій. Динамічному аналізу, розробленню як динамічних, так і математичних моделей конвеєрів, багатомасових систем із замкненим контуром присвячені роботи [1–6]. У них розглянуто в основному ланцюгові та стрічкові конвеєри важкої промисловості, які часто мають змінну траєкторію (по куту нахилу) і характеризуються значною протяжністю. Таким чином, більшість із розглянутих математичних моделей не повною мірою підходять для динамічного аналізу вертикальних стрічкових ківшових елеваторів. Важливо, що характерним для теорій, які викладені у вищезгаданих працях, є те, що тяговий орган конвеєрів працює лише на

розтяг і представлений у математичній моделі як пружний елемент з певним коефіцієнтом жорсткості. Проте використання такого підходу при математичному моделюванні вертикального стрічкового ківшового елеватора призводить до певних неточностей при розрахунку, оскільки частина стрічки, представлена пружними елементами, буде працювати на стиск, а отже, реакція, що виникатиме при цьому, набуватиме від’ємні значення, що є недопустимим при моделюванні динаміки робочого процесу конвеєра.

Мета роботи полягає в розробленні математичної моделі, яка б адекватно описувала динаміку руху елементів стрічкового ківшового елеватора, для подальшого динамічного аналізу.

Основний зміст роботи. Для досягнення поставленої мети стрічку найзручніше представити як пружний елемент з одностороннім зв’язком, який працює на розтяг. Тобто, під час роботи конвеєра у пружному елементі реакція виникає лише при розтягові, а під час стиснення – дорівнює нулю. Відповідно до сказаного вище, реакцію можна виразити як кусочну функцію [7, 8].

Як приклад, розглянуто чотиримасову динамічну модель вертикального стрічкового ківшового елеватора (рис. 1). На рисунку прийняті такі позначення: J_1 – зведений до осі обертання приводного барабана момент інерції самого барабана, електродвигуна, редуктора та муфти; m_1 – зведена до осі тягового органу маса завантажених ковшів з відповідною довжиною стрічки на робочій гілці; m_2 – зведена до осі тягового органу маса незавантажених ковшів з відповідною довжиною стрічки на холостій гілці; J_2 – момент інерції натяжного барабана; M_p – зведений до осі обертання приводного барабана рушійний момент приводного механізму; M_o – зведений до осі обертання натяжного барабана момент сили опору зачерпуванню вантажу; r_1, r_2 – радіуси приводного та натяжного барабанів відповідно; c – жорсткість стрічки відповідної довжини; g – прискорення вільного падіння.

За узагальнені координати такої системи прийнято: φ_1, φ_2 – кутові координати повороту приводного та натяжного барабанів відповідно; x_1, x_2 – лінійні координати центрів мас зведених мас робочої і неробочої гілок m_1 та m_2 відповідно.

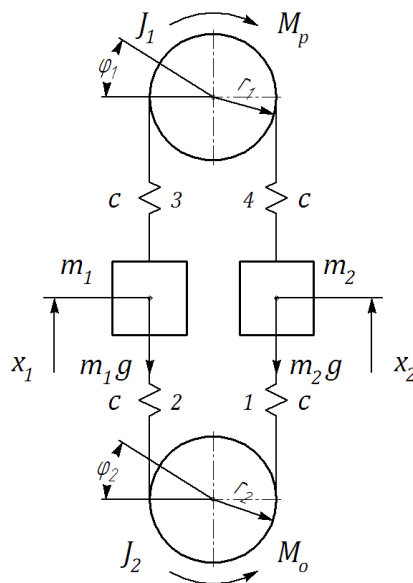


Рисунок 1. Динамічна модель вертикального стрічкового ківшового елеватора

Для складання системи диференціальних рівнянь динаміки робочого процесу ківшового елеватора використано принцип д'Аламбера [9], за допомогою якого маємо

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\phi}_1 = M_p - R_1 r_1 + R_3 r_1; \\ m_1 \ddot{x}_1 = R_1 - R_2 - m_1 g; \\ J_2 \ddot{\phi}_2 = R_2 r_2 - R_4 r_2 - M_o; \\ m_2 \ddot{x}_2 = R_4 - R_3 + m_2 g. \end{cases} \quad (1)$$

Тут R_1, R_2, R_3, R_4 – реакції, що виникають у відповідних елементах стрічки і визначаються таким чином:

$$R_1 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } c(\phi_1 r_1 - x_1) < 0; \\ c(\phi_1 r_1 - x_1), & \text{якщо } c(\phi_1 r_1 - x_1) > 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$R_2 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } c(x_1 - \phi_2 r_2) < 0; \\ c(x_1 - \phi_2 r_2), & \text{якщо } c(x_1 - \phi_2 r_2) > 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$R_3 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } c(x_2 - \phi_1 r_1) < 0; \\ c(x_2 - \phi_1 r_1), & \text{якщо } c(x_2 - \phi_1 r_1) > 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$R_4 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } c(\phi_2 r_2 - x_2) < 0; \\ c(\phi_2 r_2 - x_2), & \text{якщо } c(\phi_2 r_2 - x_2) > 0; \end{cases} \quad (5)$$

Враховуючи рівняння Клосса, рушійний момент приводного механізму, зведений до осі повороту приводного барабана, має вигляд

$$M_d = \frac{2M_{max}}{1 - \dot{\phi}_1 \cdot u / \omega_0 + \frac{s_{gd}}{1 - \dot{\phi}_1 \cdot u / \omega_0}} \cdot u \cdot \eta, \quad (6)$$

де M_{max} – максимальний момент на валу двигуна (береться з каталога на електродвигуни); $\dot{\phi}_1$ – кутова швидкість приводного барабана; ω_0 – кутова швидкість ідеального холостого ходу електродвигуна; s_{gp} – критичне ковзання електродвигуна, яке відповідає максимальному моменту; u – передаточне число приводного механізму від двигуна до барабана; η – к.к.д. приводного механізму.

Сила опору зачерпуванню сипкого матеріалу, яка залежить від кутової швидкості натяжного барабана і згідно з [10] визначається залежністю

$$F_{ic} = f \cdot m_{зв} \cdot \dot{\phi}_2^2 \cdot r_3, \quad (7)$$

де f – коефіцієнт, який враховує втрати на тертя; $m_{зв}$ – маса зони випирання, яка виникає перед ковшем при зачерпуванні вантажу; r_3 – відстань від осі повороту натяжного барабана до центру мас вантажу в ковші.

Момент сил опору зачерпуванню вантажу визначається залежністю

$$M_o = F_{os} \cdot r_3, \quad (8)$$

На основі системи диференціальних рівнянь (1) з урахуванням залежностей (2)–(8) виконано моделювання процесу пуску норії із завантаженою робочою гілкою. У якості прикладу прийнято стрічковий ківшовий елеватор (норія) – Scandia SEI 35/14

висотою 3,5 м, з такими вихідними даними: $J_1=0,668 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_2=0,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $r_1=0,2 \text{ м}$, $r_2=0,2 \text{ м}$, $r_3=0,2625 \text{ м}$, $m_1=20,9 \text{ кг}$, $m_2=13,2 \text{ кг}$, $m_{зв}=2 \text{ кг}$, $c=20000 \text{ Н/м}$, $M_{\max}=18,41 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $\omega_0=17,17 \text{ рад/с}$, $s_{кр}=0,4$, $u=9,15$, $\eta=0,96$.

У результаті проведених розрахунків отримано графіки (рис. 2 – 6) зміни кутових швидкостей і прискорень приводного та натяжного барабанів, швидкостей та прискорень мас на робочій та холостій гілках, а також реакції, що виникають у відповідних пружних елементах.

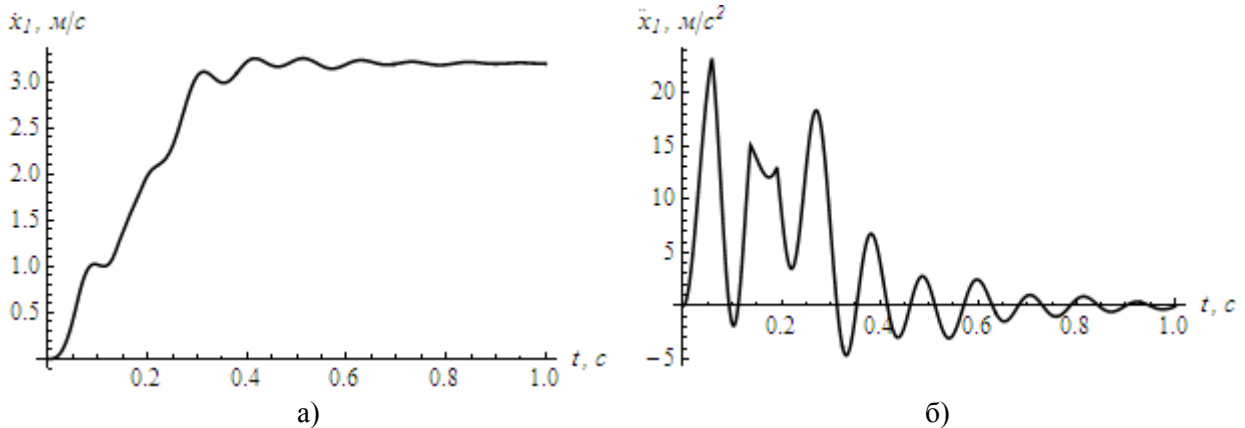


Рисунок 2. Графіки зміни швидкості та прискорення першої маси протягом пуску

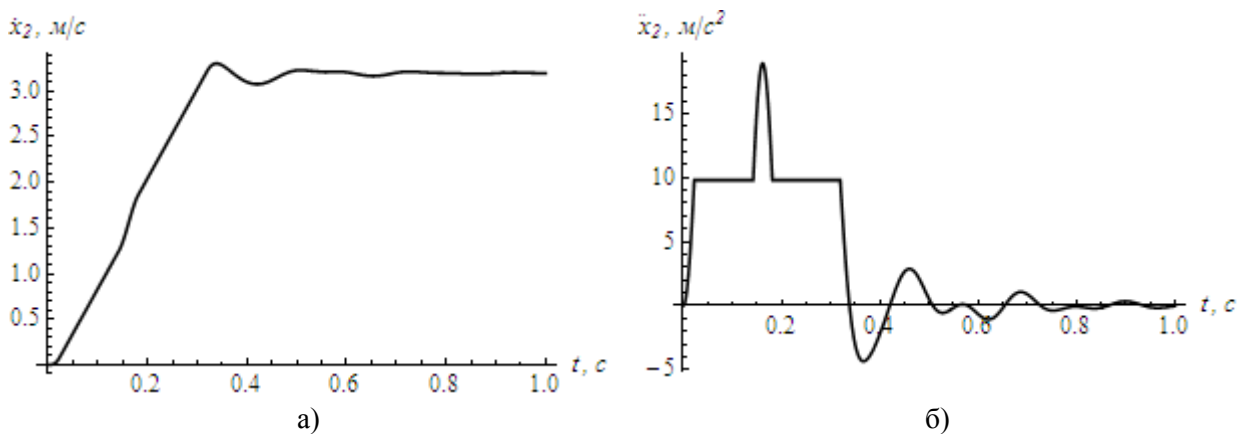


Рисунок 3. Графіки зміни швидкості та прискорення другої маси протягом пуску

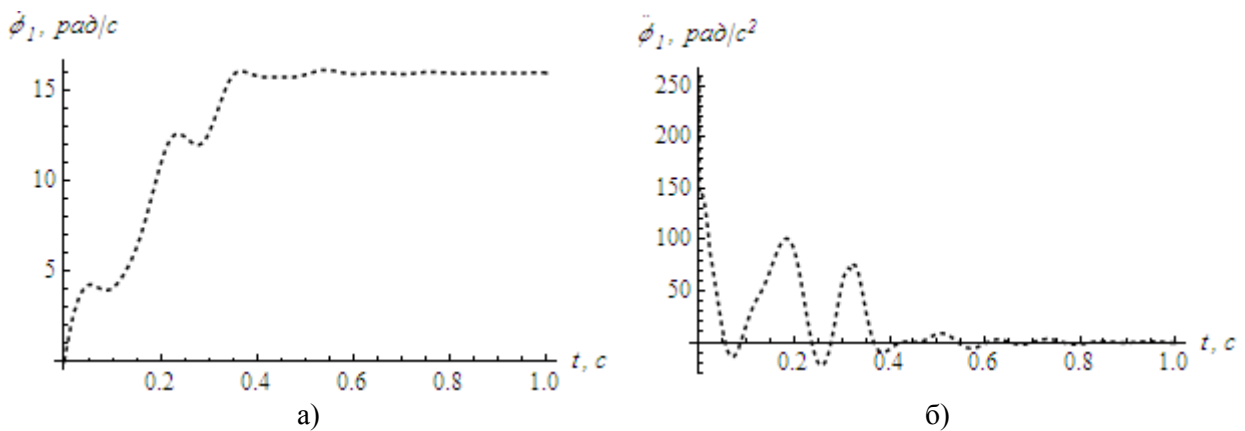


Рисунок 4. Графіки зміни кутової швидкості та прискорення приводного барабана протягом пуску

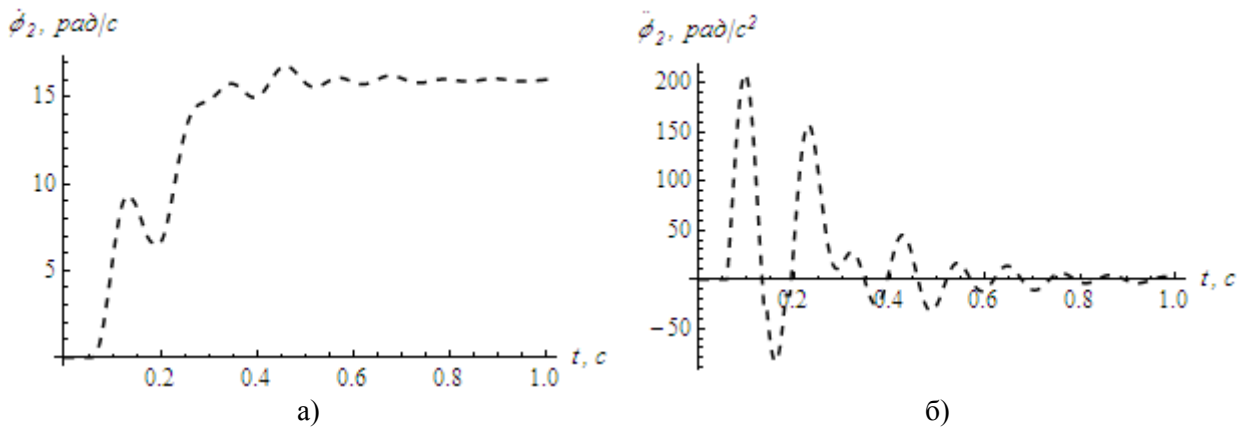
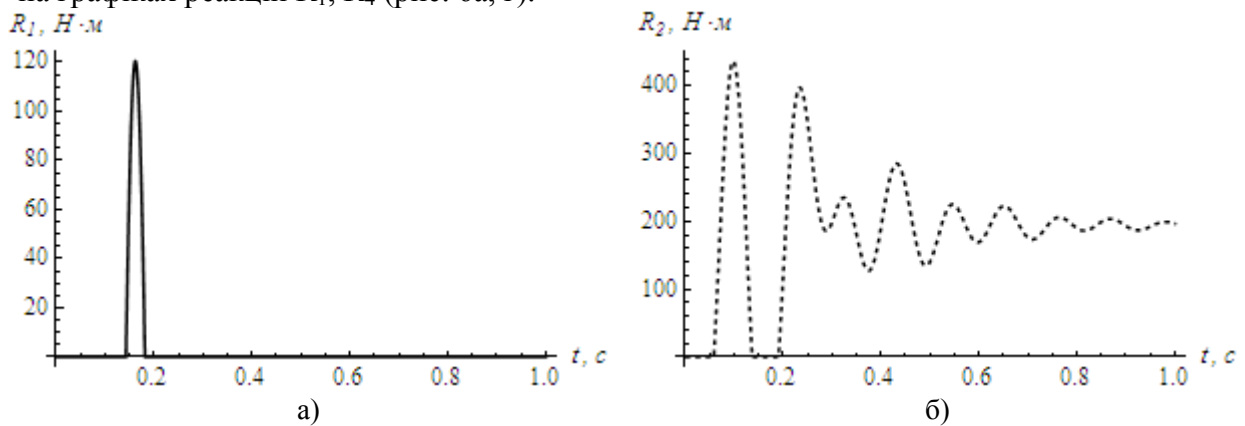


Рисунок 5. Графіки зміни кутової швидкості та прискорення натяжного барабана протягом пуску

З отриманих графічних залежностей бачимо, що під час пуску ківшового елеватора виникають значні коливальні процеси внаслідок нелінійних характеристик елементів конвеєра. Графіки на рис. 2–5 показують, що швидкості рухомих елементів ківшового елеватора доволі різко зростають із помітними коливаннями до певного номінального значення протягом 0,8 с. Можна спостерігати також і відмінність у наростанні кутової швидкості приводного і натяжного барабанів, що пояснюється пружними властивостями стрічки. Прискорення елементів змінюються як за величиною, так і за напрямом дії.

З графіків на рис. 6 можна прослідкувати характер зміни реакцій у відповідних пружних елементах. Практично не навантажений у конвеєрі перший контур, пік його навантаження припадає лише на короткий проміжок часу, і характеризується одночасною відсутністю реакцій у другому і четвертому контурі та незначною зміною реакції у третьому контурі. Найбільш навантаженими контурами норії є третій та другий, відповідно менш навантаженим – четвертий. Реакції у цих контурах доволі різко змінюються за величиною, звичайно, це негативно впливає як на стрічку, так і на роботу конвеєра в цілому.

Необхідно відзначити, що будь-яка зміна кінематичних характеристик рухомих елементів норії адекватно відображається реакціями, що виникають у відповідних контурах стрічки (пружних елементах). Наприклад, у певні моменти часу можна спостерігати рівноприскорений рух другої маси (рис. 3б), що адекватно відображається на графіках реакцій R_1 , R_4 (рис. 6а, г).



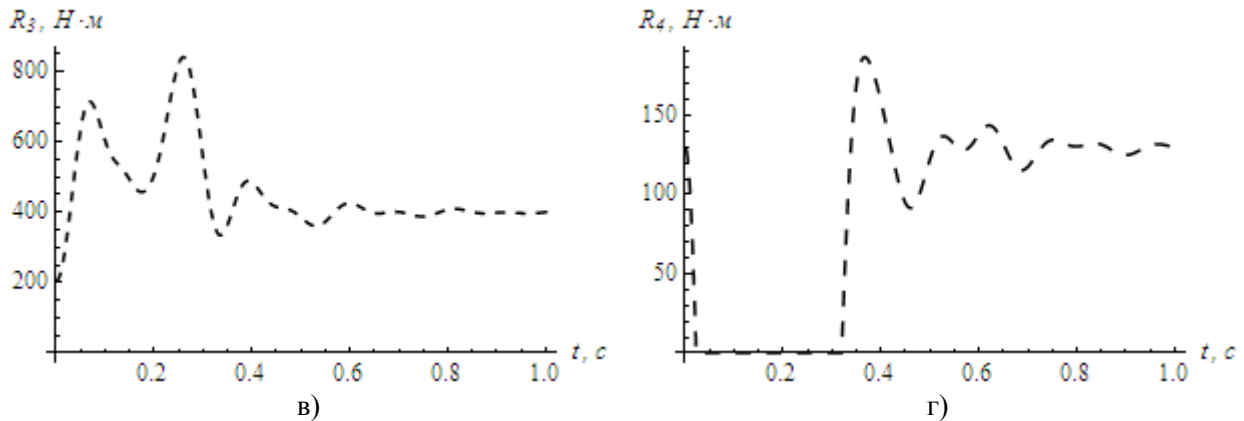


Рисунок 6. Графіки зміни реакцій, що виникають у відповідних пружних елементах протягом пуску

Висновок. Представлення стрічки пружним елементом із одностороннім зв'язком, що працює на розтяг, через кусочні функції зміни реакцій дозволяє з достатньою точністю відобразити динаміку роботи тягового органу конвеєра, а також провести аналіз динамічних навантажень, що діють на рухомі елементи вертикального стрічкового ківшового елеватора. Використання такого підходу при моделюванні вертикальних ківшових конвеєрів дає змогу ще на етапі проектування, вносити конкретні конструктивні поліпшення, що в кінцевому результаті підвищує надійність роботи конвеєра.

Список використаної літератури

1. Harrison A. Non-linear Belt Transient Analysis / A. Harrison // Bulk Solids Handling International Journal, 2008. – No. 3. – PP. 1–7.
2. D. Beavers, D. Morrison. Non-Linear Model for Dynamic Analysis of Conveyors [Електронний ресурс] / D. Beavers, D. Morrison, D. Rea // Sinclair Knight Merz. – Режим доступу: <http://www.skmconsulting.com/Site-Documents/Technical-Papers/Non-Linear-Model-for-Dynamic-Analysis.pdf>.
3. Кондрахин, В.П. Математическая модель для исследования нагрузок в двухскоростном многодвигательном приводе и тяговом органе скребкового забойного конвейера [Текст] // В.П. Кондрахин, В.Ф. Борисенко, А.А. Мельник и др. – Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Вип. 16, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. – С. 132–140.
4. Спиваковский, А.О. Теория ленточных конвейеров [Текст] / А.О. Спиваковский, В.Г. Дмитриев. – М., 1982. – 192 с.
5. Хорольський, І.М. Динаміка ланцюгових систем і замкнутих контурів машин неперервного транспорту [Текст] / І.М. Хорольський. – Л.: Вид-во держ. ун-ту «Львівська політехніка», 1999. – 194 с.
6. Чугреев, Л.И. Динамика конвейеров с цепным тяговым органом [Текст] / Л.И. Чугреев. – М.: Недра, 1976. – 256 с.
7. Казиев, В.М. Введение в математику и информатику: учебн. пособие [Текст] / В.М. Казиев. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 301 с.
8. Козлов, В.В. Биллиарды. Генетическое введение в динамику систем с ударами [Текст] / В.В. Козлов, Д.В. Трещев. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 168 с.
9. Ловейкін, В.С. Теорія технічних систем: навч. посібник [Текст] / В.С. Ловейкін, І.І. Назаренко, О.Г. Онищенко. – Київ-Полтава: ПДТУ, 1998. – 175 с.
10. Турчин, В.С. Обоснование конструктивно-режимных параметров элеваторов ковшового типа для транспортировки сыпучих материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 [Текст] / Турчин Вячеслав Семёнович. – Оренбург, 2005. – 187 с.

Отримано 15.12.2011