

УДК 621.867

Ромасевич Ю. О., д.т.н.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РУХУ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

Анотація. У статті побудовано математичну модель руху стрічкового транспортера. Для оцінки динамічних та енергетичних характеристик роботи транспортера запропоновано комплекс показників для режимів його пуску та гальмування. На основі аналізу розрахованих чисельних значень показників роботи транспортуючої машини та графічних залежностей її динамічних та енергетичних характеристик встановлено найбільш небезпечні режими її роботи. Отримані результати доцільно використати для обґрунтування критеріальної бази для задач оптимізації режимів руху стрічкових транспортерів.

Ключові слова: динамічні навантаження, стрічковий конвеєр, математична модель, енергетичні показники.

Аннотация. В статье построена математическая модель движения ленточного транспортера. Для оценки динамических и энергетических характеристик работы транспортера предложен комплекс показателей для режимов его пуска и торможения. На основе анализа рассчитанных численных значений показателей работы транспортирующей машины и графических зависимостей ее динамических и энергетических характеристик установлены наиболее опасные режимы ее работы. Полученные результаты целесообразно использовать для обоснования критерияльной базы для задач оптимизации режимов движения ленточных транспортеров.

Ключевые слова: динамические нагрузки, ленточный конвейер, математическая модель, энергетические показатели.

Abstrakt. Das mathematische Bewegungsmodell eines Bandförderers ist in dem Artikel konstruiert. Um die dynamischen und energetischen Eigenschaften des Förderbetriebs zu beurteilen, wird eine Reihe von Indikatoren für seine Anfahr- und Bremsmodi vorgeschlagen. Basierend auf der Analyse der berechneten numerischen Werte der Leistung der Transportmaschine und der graphischen Abhängigkeiten ihrer dynamischen und energetischen Eigenschaften werden die gefährlichsten Betriebsmodi ermittelt. Es ist zweckmäßig, die erhaltenen Ergebnisse zu verwenden, um die entscheidenden Grundlagen für die Optimierung der Bewegungsabläufe von Förderbändern zu rechtfertigen.

Stichwort: dynamische Lasten, Gurtförderer, mathematisches

© Ромасевич Ю. О.

*Modell, Energiekennzahlen.***Постановка проблеми.**

Стрічкові конвеєри використовуються на багатьох підприємствах агропромислового комплексу, видобувної і хімічної промисловості та інших галузей народного господарства. Під час пуску у елементах стрічкового конвеєра виникають небезпечні динамічні навантаження, які діють на елементи тягового органу і приводу. Ці навантаження призводять до зниження надійності роботи конвеєра. Вони можуть стати причиною передчасного руйнування стрічки. Враховуючи значну вартість стрічки (до 40% вартості всього конвеєра), необхідно особливу увагу приділити зниженню пікових зусиль саме в цьому елементі конвеєра.

Одним із шляхів встановлення основних причин, які впливають на рівень динамічних навантажень у елементах конвеєра, а також забезпечення енергоефективності його роботи є аналіз адекватної математичної моделі руху стрічкового конвеєра.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

В статті [1] розглянуто вплив пружних властивостей конвеєрної стрічки на процес інтегрування за часом величини, що є функцією середнього значення погонного навантаження у стрічці конвеєра. Встановлено, що передавальна ланка, яким є конвеєрна стрічка, не вносить похибки на підрахунок кількості матеріалу, що пройшов через конвеєр.

В роботі [2] на основі проведених теоретичних досліджень встановлено: пуск конвеєра приводним електродвигуном супроводжується великими перевантаженнями, що пов'язані зі зміною швидкості стрічки при пуску; режим пуску вимагає оптимального часу розгону конвеєра з урахуванням додаткових динамічних зусиль, яке б виключало пробуксовку стрічки; для забезпечення оптимального часу пуску конвеєра автори пропонують включити до складу приводу конвеєра гідродинамічну муфту за допомогою якої можна забезпечити плавний пуск конвеєра протягом розрахункового оптимального часу.

В статті [3] на основі аналізу факторів, що визначають масу вантажу, який знаходиться на стрічці, розроблена математична модель динаміки зміни статичного навантаження при змінному характері вантажопотоку і швидкості руху конвеєра. Розроблена у цій роботі модель може бути використана для оцінки динамічних властивостей стрічкового конвеєра з метою обґрунтування параметрів і структури пристрою регулювання, що забезпечує автоматичну стабілізацію навантаження його приводу.

У роботі [4] розглянуто питання створення динамічної моделі стрічкового конвеєра. Описано сутність фізичних явищ, наведені основні припущення та параметри моделі, а також детально

розроблена математична реалізація моделі. Автори роботи [4] навели переваги і недоліки моделі, а також можливі сфери її застосування.

Значна кількість робіт присвячена дослідженню саме усталеного руху транспортуючої машини. При цьому вивченню перехідних режимів руху стрічкових транспортерів приділено недостатньо уваги.

Аналіз патентних доробок [5-14] показує, що їх основна частина припадає на конструктивну частину. Автори патентів пропонують вводити нові або модернізувати існуючі елементи конструкції приводної станції, підтримуючих роликкоопор, натяжних механізмів тощо. Це дозволяє підвищити надійнісні та енергетичні показники роботи стрічкового конвеєра, до певної межі збільшити його продуктивність. Однак, більшість конструкцій стрічкових конвеєрів, для яких пропонуються вдосконалення, відносяться до гірничовидобувної промисловості, тобто мають певну специфіку.

Постановка мети і задач дослідження.

Метою дослідження є встановлення динамічних та енергетичних показників роботи стрічкового конвеєра у перехідних режимах руху. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: 1) синтезувати математичну модель руху стрічкового конвеєра; 2) провести динамічний та енергетичний аналіз його роботи на перехідних режимах руху (пуск та гальмування).

Виклад основного матеріалу.

При розробці динамічної моделі стрічкового транспортера вважаємо, що всі елементи стрічкового конвеєра є абсолютно твердими тілами, крім елементів передавального механізму і тягового органу, які володіють пружними властивостями. При цьому корпус привода конвеєра й вали закріплено абсолютно жорстко. З урахуванням цих припущень побудована динамічна модель, яка зображена на рис. 1 [15].

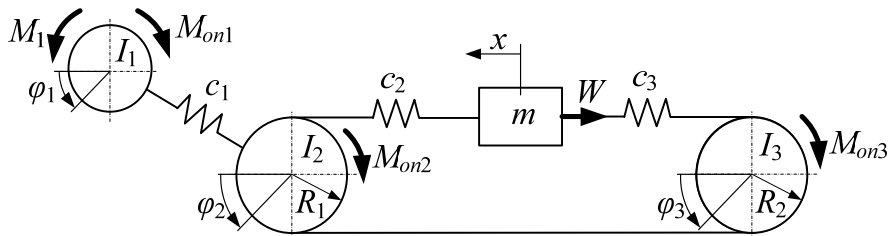


Рисунок 1 – Динамічна схема стрічкового конвеєра

В якості узагальнених координат динамічної моделі прийняті: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – кутові координати переміщення ротора двигуна, приводного і натяжного барабана конвеєра відповідно; x – координата центру мас робочої гілки конвеєра. На рис. 1 прийняті наступні позначення: c_1 – коефіцієнт жорсткості приводного механізму (клинопасової передачі), зведений до осі повороту приводного барабана; c_2 та c_3 – зведені

коефіцієнти жорсткості робочої гілки конвеєра до приведеної маси m та після неї; R_1 і R_2 – радіус приводного та натяжного барабана відповідно; $M_1, M_{on1}, M_{on2}, M_{on3}$ – зведені до приводного барабана рушійний момент двигуна, момент сил тертя на валу двигуна, моменти сил тертя на приводному і натяжному барабані відповідно; W – сила опору переміщенню робочої гілки конвеєра; m – зведена до поступального руху маса робочої гілки конвеєра і транспортованого вантажу; I_1, I_2, I_3 – зведені моменти інерції приводу, приводного і натяжного барабана відповідно.

Із врахуванням динамічної моделі, яка зображена на рис. 1, була складена система неоднорідних звичайних диференціальних рівнянь другого порядку (математична модель руху стрічкового транспортера), що описує рух зведених мас динамічної моделі конвеєра:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\phi}_1 = M_1 - c_1(\phi_1 - \phi_2) - M_{on1}; \\ I_2 \ddot{\phi}_2 = c_1(\phi_1 - \phi_2) - c_2 R_1(\phi_2 R_1 - x) - M_{on2}; \\ m \ddot{x} = c_2(\phi_2 R_1 - x) - c_3(x - \phi_3 R_2) - W; \\ I_3 \ddot{\phi}_3 = c_3 R_2(x - \phi_3 R_2) - M_{on3}. \end{cases} \quad (1)$$

Точка над символом означає диференціювання за часом.

Моделювання роботи асинхронного електричного двигуна, який використовуються для приводу стрічкового конвеєра, базується на рівняннях узагальненої асинхронної електричної машини. Використаємо представлення диференціальних рівнянь асинхронного двигуна у нерухомій системі координат, що характеризується наявністю змінних (періодичних) коефіцієнтів, які обумовлені зміною взаємної індуктивності між обмотками статора та ротора [16]. Система диференціальних рівнянь дає змогу оцінити струмові навантаження приводу конвеєра:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1}(u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1 + k_r e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1}(u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1 - k_r e_{2\beta}); \\ \frac{di_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2}((u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1)k_s + e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2}((u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1)k_s - e_{2\beta}); \\ M_1 = u \eta \frac{3}{2} p L_{12}(i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}), \end{cases} \quad (2)$$

де $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – проєкції узагальненого вектора струму статора на нерухомі ортогональні координатні осі α і β ; $i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ – проєкції узагальненого вектора струму ротора на ортогональні координатні осі α і β ; L_1, L_2 –

індуктивності статорної та роторної обмоток; L_{12} – взаєміндуктивність; k_r і k_s – коефіцієнти магнітного зв'язку ротора та статора відповідно ($k_r=L_{12}L_2^{-1}$; $k_s=L_{12}L_1^{-1}$); p – кількість пар полюсів двигуна; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора напруги статора на координатні осі α і β ($u_{1\alpha}=U_{max} \cos(2\pi f dt)$, $u_{1\beta}=U_{max} \sin(2\pi f dt)$); U_{max} – амплітуда фазної напруги живлення двигуна; f – частота напруги живлення двигуна; $e_{2\beta}$, $e_{2\alpha}$ – ЕРС, що індукуються потокозчепленнями ротора по осях α і β відповідно ($e_{2\alpha}=p\omega_{\delta\delta}(L_2i_{2\beta}+L_{12}i_{1\beta})+i_{2\alpha}R_2$, $e_{2\beta}=p\omega_{\delta\delta}(L_2i_{2\alpha}+L_{12}i_{1\alpha})+i_{2\beta}R_2$); R_1 – активний опір статорної обмотки; R_2 – зведений до статора активний опір роторної обмотки; X_1 – індуктивний опір статорної обмотки; X_2 – зведений до статора індуктивний опір роторної обмотки; δ – коефіцієнт розсіювання ($\delta=1-(1+X_1(2\pi f L_{12})^{-1})(1+X_2(2\pi f L_{12})^{-1})^{-1}$); $\omega_{\delta\delta}$ – кутова швидкість двигуна; u та η – передаточне число і ККД приводу конвеєра.

Система диференціальних рівнянь (2) є нелінійною, тому її аналітично не вдається проінтегрувати. Для її розв'язування використано чисельний метод Рунге-Кутта [17]. Аналіз руху стрічкового конвеєра будемо проводити для двох режимів: пуску та гальмування. Для цього використаємо наступні показники: 1) коефіцієнт динамічності клинопасової передачі; 2) коефіцієнт динамічності стрічки у місці її набігання на приводний барабан; 3) кратність максимального струму двигуна; 4) кратність максимальної потужності двигуна; 5) кратність максимального моменту двигуна; 6) середньоінтегральне значення моменту приводу; 7) середньоінтегральне значення зусилля у клинопасовій передачі; 8) середньоінтегральне значення зусилля у стрічці. Розрахунки проведені для конвеєра типу КЛ [18], його основні характеристики наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики стрічкового конвеєра КЛ

Найменування параметра або характеристики	Параметр або характеристика
Марка конвеєра	КЛ 100-45-4-500-1П
Тип технічного засобу	стаціонарний одноопераційний
Продуктивність, т/год	100
Довжина транспортування, м	45
Ширина стрічки, мм	500
Номінальна швидкість стрічки, м/с	1,6
Споживана потужність електродвигунів, кВт	3,98

Стрічкові конвеєри типу КЛ призначені для транспортування зернових, бобових, насіння соняшника і круп'яних культур.

Досліджувався прямий пуск (пряме вмикання електродвигуна у мережу живлення) і гальмування на вибігу. Моделювання режиму

гальмування конвеєра на вибігу виконано шляхом задання $U_{max}=0$, що відповідає від'єднанню двигуна від мережі.

Для становлення чисельних характеристик пуску та гальмування конвеєра розраховано значення оціночних показників, які наведені у таблиці 2. У табл. 2 жирним виділено найбільші значення показників.

Таблиця 2 – Значення оціночних показників для режиму пуску і гальмування стрічкового конвеєра

Найменування показника	Режим	
	пуск	гальмування
Коефіцієнт динамічності клинопасової передачі	8,35	5,11
Коефіцієнт динамічності стрічки у місці її набігання на приводний барабан	7,13	4,17
Кратність максимального струму двигуна	5,48	5,41
Кратність максимальної потужності двигуна	3,33	4,74
Кратність максимального моменту двигуна	10,07	12,17
Середньоінтегральне значення моменту приводу, Нм	965	1024
Середньоінтегральне значення зусилля у клинопасовій передачі, Н	244	204
Середньоінтегральне значення зусилля у стрічці, Н	4476	5111

Данні, що наведені у табл. 2, свідчать про те, що під час пуску і гальмування у стрічковому конвеєрі виникають надзвичайно великі динамічні та енергетичні навантаження. З табл. 2 випливає, що зниження зусиль у клинопасовій передачі необхідно виконувати протягом пуску конвеєра. Що стосується стрічки, то вочевидь найбільш важливим показником є кратність максимального значення зусилля. Найбільш небезпечний у цьому плані є режим пуску транспортуючої машини.

Процес гальмування конвеєра є доволі інтенсивним із точки зору протікання динамічних та енергетичних процесів. Зазначимо, що для різних характеристик тривалість їх дії є різною: наприклад, струм, який протікає у обмотках двигуна, досить швидко затухає. У той час як механічні елементи не встигають так швидко зупинитись. Це пояснюється тим, що механічна інерційність системи більша, ніж електрична.

Значні величини оціночних показників, які відповідають режиму гальмування (табл. 2), пояснюються тим що при миттєвому вимиканні двигуна від мережі у його обмотках виникає ЕРС, яка викликає пікові струми. Вони, в свою чергу, викликають електромагнітні моменти приводу. Це спричиняє навантаження

механічних елементів конвеєра які, однак, не тривають довго (десяті долі секунди) і тому не мають значимого впливу на елементи стрічкового конвеєра. Очевидно, що необхідно враховувати не тільки величину динамічних та енергетичних показників, а і тривалість дії цих факторів.

На основі чисельного інтегрування математичної моделі конвеєра (1)-(2) було побудовано графіки (рис. 2), які відповідають режиму пуску. На рис. 2 не враховані зусилля від попереднього натягу, оскільки вони є постійними величинами. Для встановлення дійсної величини зусилля у клинопасовій передачі або стрічці необхідно до функцій, графіки яких зображено на рис. 2, додати вказані величини.

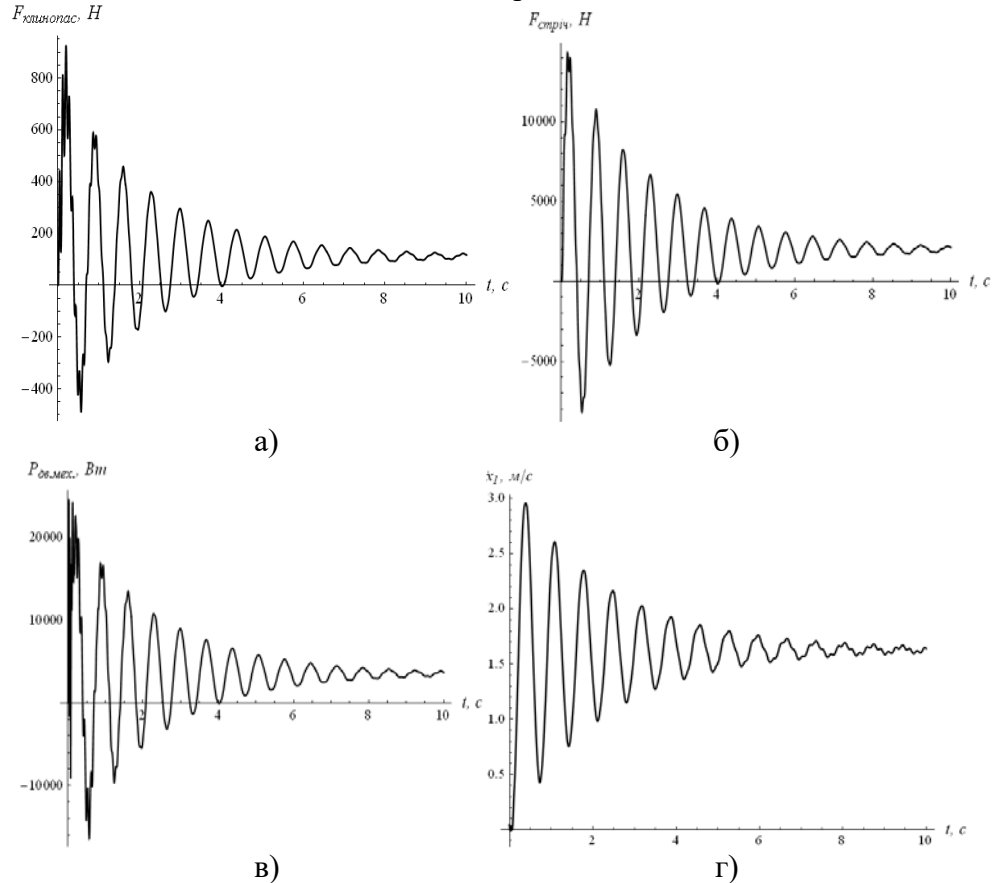


Рисунок 2 – Графіки динамічних та енергетичних характеристик руху стрічкового конвеєра: а) пружне зусилля у клинопасовій передачі; б) пружне зусилля у стрічці; в) механічна потужність двигуна; г) швидкість руху стрічки

Із наведених графіків (рис. 2) видно, що пуск конвеєра супроводжується коливними процесами, які досить повільно затухають. При цьому зусилля та моменти у елементах конвеєра та його приводу у декілька разів перевищують ті, які діють у стаціонарному (усталеному) режимі його руху. Коливання у приводі та

тяговому органі стрічкового конвеєра передаються на його металоконструкцію. Звичайно, пікові значення динамічних зусиль викликають додаткове навантаження елементів стрічкового конвеєра та можуть викликати передчасний його вихід з ладу.

Для зниження небажаних динамічних показників руху конвеєра необхідно виконувати керований пуск. Це введенням у електромеханічну систему транспортуючої машини мікропроцесорного обладнання та частотного перетворювача для керування швидкістю (або моментом) електродвигуна конвеєра.

Висновки. У роботі розроблено узагальнену математичну модель стрічкового транспортера, яка описує механічні та електричні процеси у транспортуючій машині. На основі аналізу величин динамічних та енергетичних оціночних показників для режимів пуску та гальмування стрічкового конвеєра встановлено, що під час цих режимів елементи конвеєра зазнають найбільших навантажень. Наприклад, коефіцієнт динамічності клинопасової передачі знаходиться у межах 5,11-8,35; коефіцієнт динамічності стрічки в межах 4,17-7,13; кратність максимальної потужності двигуна 3,33-4,74; кратність максимального моменту двигуна 10,07-12,17; середньоінтегральне значення зусилля у стрічці 4476-5111 Н.

Отримані результати дають змогу виконати уточнення інженерних методик розрахунку стрічкових конвеєрів. Крім того, результати, що отримані у роботі, дозволяють обґрунтувати фізичний зміст оптимізаційних критеріїв, які доцільно застосовувати для режимів пуску та гальмування стрічкового транспортера: для режиму пуску оптимізацію доцільно виконувати за динамічними критеріями, а для гальмування – за енергетичними, або енергетично-динамічними.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дудко М.А. Динамика поведения тягового органа при взвешивании грузопотока на ленточном конвейере по окружному усилию привода / М.А. Дудко, И.В. Вернер, Г.И. Саричева // Горное и металлургическое оборудование. 2014. – С. 26-34.
2. Гринько П.А. Исследование динамики привода ленточных конвейеров с целью повышения срока службы ленты / П.А. Гринько // Захист металургійних машин від поломок : міжвузівський тематичний збірник наукових праць. 2003. – Вип. 7. – С 52-156.
3. Ставицкий В.Н. Динамика нагрузки регулируемого привода ленточного конвейера / В.Н. Ставицкий // Наукові праці ДонНТУ. серія: обчислювальна техніка та автоматизація. – 2012 – №23 (201). – С. 49-53.

4. Никитин С.В. Динамическая модель ленточного конвейера. [электронный ресурс] – режим доступа: url: <http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2014/176.pdf> (01.04.2018) – Название с экрана.
5. Пат. 105471 Україна, МПК В65G 15/08, В65G 15/32. Крутопохилий стрічковий конвеєр / Монастирський В.Ф., Кірія Р.В., Лисиця М.І., Кириленко В.С., Номеровський Д.А., Мостовий Б.І., Соколан А.О.; власник Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. № у 2015 08147. заявл. 17.08.2015.; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6.
6. Пат. 98580 Україна, МПК В65G 15/08, В65G 15/42, В65G 17/16, E21F 13/08. Вертикальний стрічковий конвеєр з багатопунктовим завантаженням / Монастирський В.Ф., Максютенко В.Ю., Виноградов В.В., Кірія Р.В., Брагінець Д.Д., Мостовий Б.І.; власник Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. № у 2011 05737. заявл. 06.05.2011.; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.
7. Пат. 96163 Україна, МПК В65G 15/08. Крутопохилий стрічковий конвеєр для насипних крупно кускових вантажів / Монастирський В.Ф., Максютенко В.Ю., Кірія Р.В., Кириленко В.С., Монастирський С.В., Номеровський Д.А., Мостовий Б.І.; власник Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. № у 2013 03049. заявл. 12.03.2013.; опубл. 26.01.2015, Бюл. № 2.
8. Пат. 95317 Україна, МПК В65G 17/00. Стрічковий конвеєр / Коруняк П.С., Баранович С.М., Ковольчук Т.Ю.; власники Коруняк П.С., Баранович С.М., Ковольчук Т.Ю. № у 2014 05123. заявл. 15.05.2014.; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24.
9. Пат. 93697 Україна, МПК В65G 27/10. Стрічковий конвеєр / Шевченко О.І., Бабій К.В., Левченко К.С., Ікол О.О.; власник Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. № у 2014 05101. заявл. 14.05.2014.; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19.
10. Пат. 86724 Україна, МПК В65G 15/60. Стрічковий конвеєр / Абрамцумянц Р.В., Бондар П.Я., Горкавенко Є.А.; власник Одеська національна академія харчових технологій. № у 2013 08238. заявл. 01.07.2013.; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.
11. Пат. 81385 Україна, МПК В65G 15/08. Крутопохилий стрічковий конвеєр / Монастирський В.Ф., Максютенко В.Ю., Кірія Р.В., Номеровський Д.А., Мостовий Б.І., Брагінець Д.Д.; власник Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. № у 2013 01020. заявл. 28.01.2013.; опубл. 25.06.2015, Бюл. № 12.

12. Пат. 80804 Україна, МПК В65G 15/00. Стрічковий конвеєр / Забіров В.З., Моргун В.Н., Артемева Н.Г., Єгоров Г.О., Руденко О.С., Кучма К.В.; власник Державне підприємство „Державний інститут по проектуванню підприємств гірничорудної промисловості КРИВБАСПРОЕКТ”. № у 2012 14886. заявл. 25.12.2012.; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.
13. Пат. 72508 Україна, МПК В65G 15/02. Стрічковий конвеєр / Козирев С.М.; власник Державне підприємство „Державний інститут по проектуванню підприємств гірничорудної промисловості КРИВБАСПРОЕКТ”. № у 2011 15366. заявл. 26.12.2011.; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16.
14. Пат. 62569 Україна, МПК В65G 15/00. Крутопохилий стрічковий конвеєр / Волошин О.І., Кириченко А.І., Костюкова Т.І., Лавренко Ю.В., Лиманська М.В., Пустовалов А.Г., Сильченко Ю.А., Картавий А.Н.; власник ЗАО „Новокраматорський машинобудівний завод”. № у 2010 04227. заявл. 12.04.2010.; опубл. 12.09.2011, Бюл. № 17.
15. Ловейкін В. Оптимальне керування рухом стрічкового конвеєра у перехідних режимах / О. Ромасевич, К. Шалатовська, П. Науменко // Гірничі та піднімально-транспортні машини. 2017. – № 89 – С. 16-23.
16. Штейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Штейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
17. Формалев В.Ф. Численные методы / В.Ф. Формалев, Д.Л. Ревизников. – М.: Физматлит, 2004. – 400 с.
18. Стрічковий конвеєр типу КЛ [електронний ресурс] – режим доступу:
url: [75](http://www.agrotechnika-ukr.com.ua/infotorg.php?categoria=%CC%E0%F8%E0%E3%F0%E3_%E4%EB%FF_%EF%B3%F1%EB%FF%E7%E1_%EE%E1%F0%B3%E7%E1%E5%F0_%E2%F0%EE%E6&grupa=%C7%E5%F0%ED%EE%ED%E0%E2%E0%ED%F2%E0%E6%F3%E2%E0%F7%B3&marka=%CA%CE%CD%C2%C5%AA%D0%20%D1%D2%D0%B2%D7%CA%CE%C2%C8%C9%20%D2%C8%CF%D3&model=%CA%CB&second=true. (01.04.2018) – Назва з екрана.

</div>
<div data-bbox=)