

**Серілко Л. С., к.т.н., доцент, Серілко Д. Л., к.т.н., доцент, Морозюк С. В., ст. викладач** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, l.s.serilko@nuwm.edu.ua, d.l.serilko@nuwm.edu.ua, s.v.moroziuk@nuwm.edu.ua, 0969995009@ukr.net), **Часов Д. П., к.т.н., доцент** (Дніпровський державний технічний університет, м. Дніпро)

## **ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ КРОКОВИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ПРИВОДУ КОЛИВНИХ КОНВЕЄРІВ**

**В роботі обґрунтовано можливість використання крокових двигунів як привод коливних конвеєрів. Існуючі кінематичні схеми приводів, які поєднують кривошипно-повзунний та коромисловий механізми, досить громіздкі і налаштовані на певний закон руху жолоба конвеєра. Авторами пропонується використанні крокового двигуна, в якому можна в широких межах регулювати закон обертального руху змінюючи скетч (код, який керує роботою мікроконтролера привода). Розроблена математична модель руху частинки матеріалу по поверхні жолоба циліндричної форми. При русі робочого органа, внаслідок його крутильних коливань, змінюється напрямок сили тертя між матеріалом і жолобом, що дозволяє збільшити продуктивність конвеєра. Проведені експериментальні дослідження підтвердити адекватність розробленої математичної моделі. Застосування крокового двигуна, для приводу інерційних конвеєрів дозволить покращити техніко-економічні показники процесу транспортування матеріалів цими пристроями, які можуть бути використані при проєктуванні транспортних систем в різних галузях промисловості та сільського господарства.**

**Ключові слова:** коливний конвеєр; вібраційне транспортування; кроковий двигун; кривошипно-повзунний механізм.

**Вступ.** Коливні конвеєри (інерційні і вібраційні) використовуються як для транспортування різноманітних матеріалів, так і для виконання допоміжних операцій в технологічних процесах. Ці пристрої характеризуються простотою конструкції, герметичністю, не значною витратою енергії на транспортування, а також відсутністю контакту з деталями, які здійснюють обертальний рух. Як

правило, приводи таких конвеєрів здійснюються за допомогою електромагнітних збуджувачів, кривошипно-повзунних, або кривошипно-коромислових механізмів. Вони відзначаються складністю конструкції, значною масою і унеможливають змінювати параметри руху жолоба, які залежать від фізико-механічних властивостей матеріалу, який транспортується.

**Аналіз існуючих досліджень.** Є два основних типи вібраційного транспортування матеріалів – з постійним тиском матеріалів на дно жолоба конвеєра та і змінним тиском. В першому випадку робочий орган (жолоб конвеєра) коливається з великою амплітудою і малою частотою [1]. В другому випадку робочий орган здійснює коливання як в горизонтальному, так і вертикальному напрямках з великою частотою і малою амплітудою. В роботах Врублевського І.Й. наведені результати роботи різноманітних вібраційних транспортних пристроїв (конвеєрів, маніпуляторів, живильників у електромагнітними віброзбуджувачами. Проблемні визначення точності наближеного розрахунку параметрів еліптичних коливань під час швидкісного вібраційного транспортування: відношення амплітуд складових коливань, кута зсуву між ними, які забезпечують максимальну швидкість переміщення, а також кут підйому матеріалу, присвячена робота [2]. Результати дослідження впливу мас-інерційних параметрів вібраційних транспортних пристроїв на процес вібропереміщення наведено в роботі [3]. Оскільки вібротранспортери з електромагнітним приводом чутливі до різної зміни мас вантажів, то в роботах [4; 5] наведені результати досліджень роботи двомасового вібротранспортера, який оснащений незалежними віброзбуджувачами горизонтальних і вертикальних коливань, коли робочий орган транспортера рухається по еліптичній траєкторії. Проведені теоретичні і експериментальні дослідження таких пристроїв показали, що при правильному співвідношенні параметрів вібротранспортера можна забезпечити стабільність транспортування при значній зміні масі вантажа. Значні дослідження в області вібраційної техніки проводяться на кафедрі механіки та автоматизації машинобудування Львівської політехніки. Організатором цих досліджень був професор Повідайло В.О., автор навчального посібника [6]. В роботі [7] обґрунтовані переваги вібраційних конвеєрів з електромагнітними приводами. Проаналізовано можливість застосування цих пристроїв для пакувального обладнання. Наведена конструкцію транспортного маніпуляційного модуля, оснований на три масовій коливальній

системі із застосуванням ґраткових і плоских пружин які забезпечують горизонтальні коливання транспортувальної площини в будь-якому напрямку.

Як видно із огляду, в усіх розглянутих конвеєрах наявний механічний перетворювач обертального руху асинхронного двигуна в зворотно-поступальний рух жолоба. Так і у випадку із вібраційними конвеєрами наявність маховика погіршує умови пуску електродвигуна, а важкі кінематичні схеми ще більшою кількістю шарнірних з'єднань, що працюють в тяжких умовах, знижують строк роботи підшипників.

На сьогодні інерційні конвеєри проєктуються в основному із легкими жолобами для малої продуктивності і маси вантажу. Це дозволяє пом'якшити умови роботи привода. Наприклад, відоме використання конвеєра для транспортування харчових продуктів

На рисунках 1, 2 зображені конвеєри фірми Triple/S Dynamics (Даллас, Техас, США) [8].



Рис. 1. Інерційний конвеєр для транспортування кукурудзи



Рис. 2. Інерційні конвеєри для транспортування золи

На рис. 3 наведено загальний вигляд сучасних інерційних конвеєрів фірми VIBRA MASCHINENFABRIK SCHULTHEIS GmbH & Co. [9].



а)



б)

Рис. 3

**Теоретичні дослідження.** При кінематичному дослідженні привода інерційного конвеєра приймається, що його ведучий вал обертається з постійною кутовою швидкістю. Але оскільки навантаження на робочий орган конвеєра змінюється, то очевидно, що і частота обертання електричного двигуна, яким оснащено привод, буде не постійною. Це призводить до зміни кінематичних параметрів руху жолоба, швидкості, прискорення і переміщення. Крім зміни цих параметрів, при транспортуванні матеріалів з різними фізико-механічними властивостями, необхідно змінювати геометричні розміри механізму привода, що пов'язане з певними труднощами. Тому пропонується в якості привода інерційного конвеєра використовувати кроковий двигун, який за допомогою кривошипно-повзунного механізму забезпечує необхідний закон руху жолоба конвеєра.

Розглянемо кривошипно-повзунний механізм (рис. 4), привід якого здійснюється від крокового двигуна.

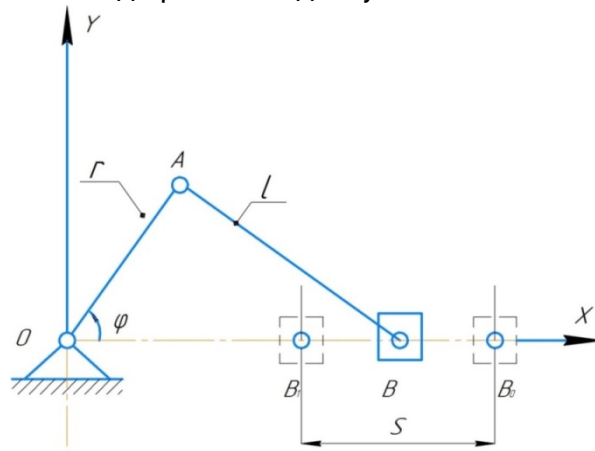


Рис. 4. Схема кривошипно-повзунного механізму

Знаючи закон руху повзуна, необхідно визначити також закон руху кривошипа, тобто залежність кута повороту крокового двигуна від часу.

Очевидно, що координата точки В буде рівна:

$$x_B = 2\cos\varphi + \sqrt{l^2 - (2\sin\varphi)^2}. \quad (1)$$

або

$$\sqrt{l^2 - 2^2\sin\varphi} = X_B - 2\cos\varphi. \quad (2)$$

Звідки

$$\cos\varphi = \frac{X_B^2 + r^2 - l^2}{2X_B r}. \quad (3)$$

Переміщення повзуна  $S = X_{BO} - X_B$  де  $X_{BO} = r + l$ .

Тоді:

$$X_{BO} = r + l - S. \quad (4)$$

Кут повороту вала двигуна буде рівний:

$$\varphi = \arccos \frac{X_B^2 + r^2 - l^2}{2X_B r}. \quad (5)$$

Розглянемо випадок, коли рух жолоба змінюється по гармонічному закону (рис. 5):

$$S = A \sin t, \quad (6)$$

де  $A = S_{\max} = 0,2 \text{ м}$  – амплітуда коливань жолоба.

Знаючи залежність переміщення жолоба інерційного конвеєра від часу з рівняння (5), можна визначити залежність кута повороту вала крокового двигуна від часу рис. 6.

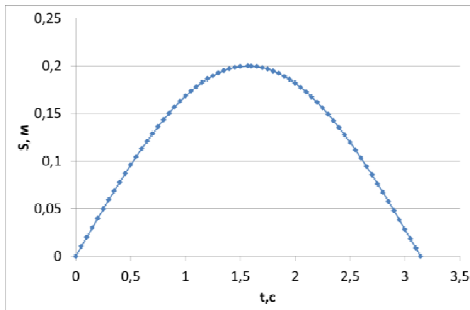


Рис. 5. Залежність переміщення жолоба інерційного конвеєра часу ( $r=0,1 \text{ м}$ ,  $l=0,4 \text{ м}$ )

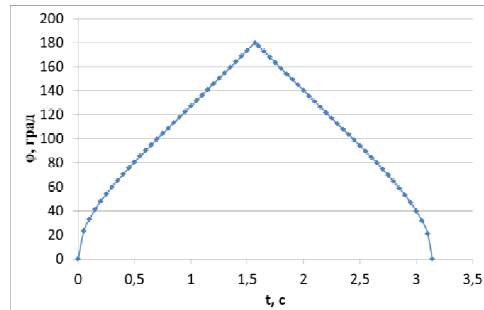


Рис. 6. Залежність кута повороту вала крокового двигуна від часу

Для створення коливань жолоба установки використовується кроковий двигун, який керується мікроконтролером Arduino разом із драйвером крокового двигуна.

За допомогою програмного забезпечення Arduino IDE створюється скетч (код, який керує роботою мікроконтролера). Зміна параметрів роботи крокового двигуна, а відповідно і коливання жолоба конвеєра здійснюється шляхом зміни відповідних числових значень параметрів у скетчі з послідовним завантаженням у пам'ять мікроконтролера Arduino.

Таким чином, проаналізувавши різноманітні схеми приводів інерційних конвеєрів і врахувавши їх переваги і недоліки була запропонована конструкція інерційного конвеєра, привід якого здійснюється з допомогою крокового двигуна, що дозволяє забезпечити необхідний закон руху інерційного конвеєра. За допомогою програмного забезпечення Arduino IDE розроблений скетч (код, який керує роботою драйвера крокового двигуна).

Розглянемо варіант застосування крокового двигуна для здійснення крутильних коливань інерційного конвеєра [10; 11].

Припустимо, що частинка матеріалу знаходиться на внутрішній поверхні циліндра, який нахилений під кутом  $\alpha$  до горизонту (рис. 7) і здійснює крутильні коливання по закону:

$$\varphi = \varphi_0 \cos \omega t. \quad (7)$$

Будемо вважати, що  $\alpha < \rho$ , де  $\rho$  – кут тертя спокою матеріалу.

$$\rho = \arctg \mu_0, \quad (8)$$

де  $\mu_0$  – коефіцієнт тертя спокою матеріалу.

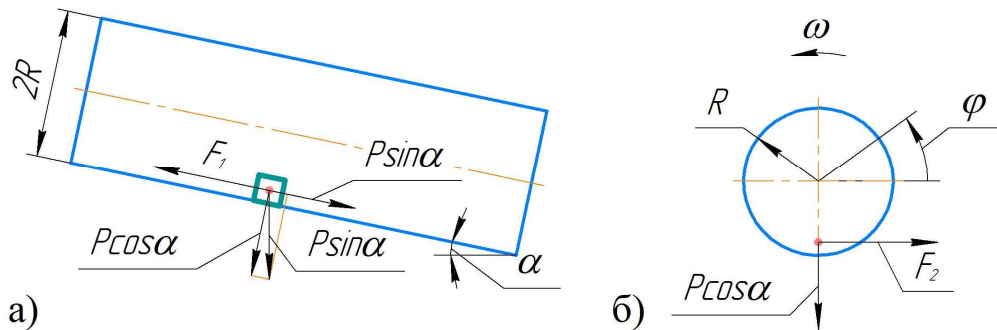


Рис. 7. Схема дії сил

При коливанні циліндра сила тертя між матеріалом і циліндром змінює свій напрямок і частинка матеріалу почне ковзати по його поверхні. Диференціальне рівняння руху частинки матиме вигляд:

$$m\ddot{x} = mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (9)$$

де  $u = \dot{x}$  – проекція вектора швидкості частинки на вісь  $x$ .

$v = \dot{\varphi} \cdot R$  – швидкість руху поверхні циліндра.

Після перетворення рівняння 9 матиме вигляд:

$$\ddot{x} = g \sin \alpha - \mu g \cos \alpha \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{\varphi}R)^2}}. \quad (10)$$

Оскільки рівняння (10) суттєво не лінійне, то його розв'язок можна отримати тільки чисельним методом

На рис. 8, рис. 9 наведено графічні залежності швидкості і переміщення точки по поверхні циліндра від часу, для різних значень коефіцієнту тертя, та кута нахилу осі циліндра до горизонту.

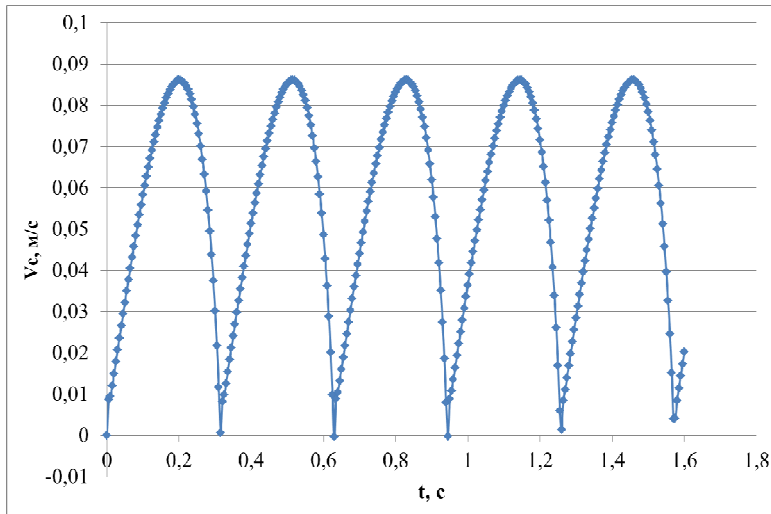


Рис. 8. Залежність швидкості руху частинки матеріалу по поверхні циліндра від часу ( $\phi_0=0,4$  рад,  $\omega=10$  рад/с,  $R=0,05$  м,  $f=0,4$ ,  $\alpha=10^\circ$ )

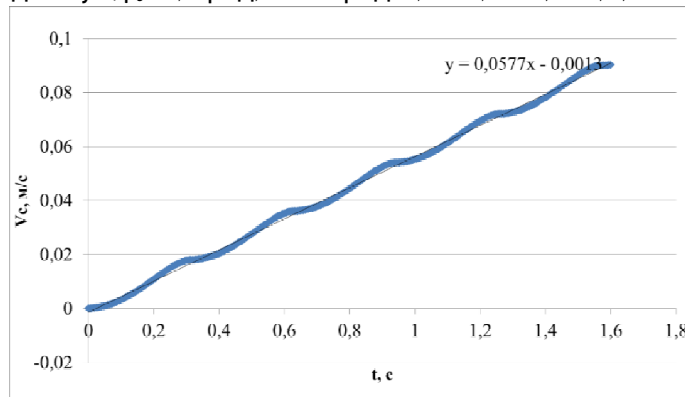


Рис. 9. Залежність переміщення частинки матеріалу по поверхні циліндра від часу ( $\phi_0=0,4$  рад,  $\omega=10$  рад/с,  $R=0,05$  м,  $f=0,4$ ,  $\alpha=10^\circ$ )

### Експериментальні дослідження

**Опис експериментальної установки.** Для проведення дослідження руху частинки матеріалу по поверхні жолоба інерційного конвеєра було розроблено конструкцію установки, схема якої наведена на рис. 10, а загальний вигляд на рис. 11.

Установка складається із основи 1, на якій жорстко встановлені дві металеві стійки 3 і 9. Пластиковий жолоб 6 кріпиться до стійок за допомогою осей 4 і 8, що дає йому змогу коливатися (обертатися) відносно власної осі.

На передній стійці змонтовано привідний кроковий двигун 2, від якого обертання через пас 5 передаються до жолоба. Передаточне число пасової передачі складає 12:1.

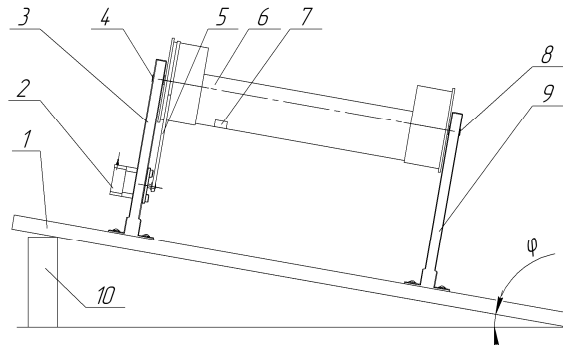


Рис. 10. Схема дослідної установки

Для створення коливань жолоба установки використовується кроковий двигун, який керується мікроконтролером Arduino разом із драйвером крокового двигуна A4988.

За допомогою програмного забезпечення Arduino IDE створюється скетч (код, який керує роботою мікроконтролера). Зміна параметрів роботи крокового двигуна, а відповідно і коливання жолоба конвеєра здійснюється шляхом зміни відповідних числових значень параметрів у скетчі з послідовним завантаженням у пам'ять мікроконтролера Arduino.



Рис. 11. Загальний вигляд установки експериментальної установки

**Методика проведення експериментальних досліджень.** Експериментальну установку встановлюють під певним кутом до горизонту і на поверхні циліндричного жолоба розміщують частинку



матеріалу. Вмикають кроковий двигун 2, який за допомогою пасової передачі 5 приводить в коливний рух жолоб 6. Частоту і амплітуду коливань можна змінювати мікроконтролером Arduino. Вмикали секундомір і вимірювали час проходження частинкою матеріалу певної відстані по поверхні жолоба. Середню швидкість руху частинки визначали за формулою

$$V_c = \frac{L}{t} . \quad (11)$$

Частоту коливання жолоба визначали за допомогою лазерного тахометра.

**Результати експериментальних досліджень.** На рис. 12 наведено графічні залежності середньої швидкості точки по поверхні циліндра від амплітуди коливань для різних значень частоти отримані теоретичним та експериментальним шляхом.

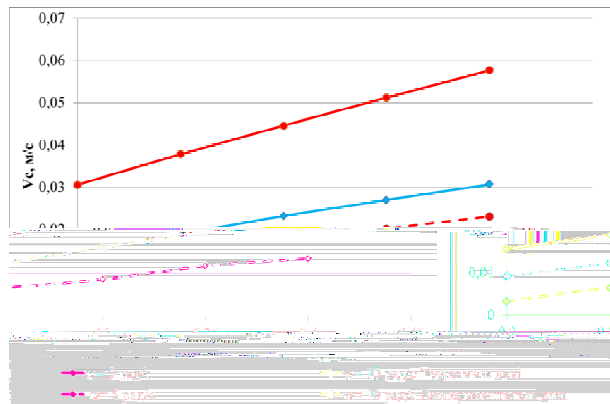


Рис. 12. Графічні залежності середньої швидкості точки по поверхні циліндра від амплітуди коливань для різних значень частоти

Розходження між теоретичними і експериментальними значеннями середньої швидкості пояснюється тим, що за допомогою крокового двигуна не можна отримати закон гармонічних коливань жолоба, як було прийнято при теоретичних дослідженнях.

Визначимо значення умовного коефіцієнту тертя  $f_y$ , при якому частинка буде рухатися по поверхні циліндра з середньою швидкістю. Нехай за час  $t$ , який дорівнює періоду коливань циліндра, частинка пройде шлях  $S$ , величина якого буде рівна:

$$S = \frac{aT^2}{2} , \quad (12)$$

де

$$a = g(\sin\alpha - f_y \cos\alpha) . \quad (13)$$

Враховуючи, що середня швидкість  $V_c = \frac{S}{T}$  з рівнянь 12, 13 визначимо величину умовного тертя.

$$f_y = \frac{\sin\alpha \frac{2V_c}{Tg}}{\cos\alpha} = \operatorname{tg}\alpha - \frac{2V_c}{Tg\cos\alpha} . \quad (14)$$

### ВИСНОВКИ

Авторами проведено аналіз приводів коливних конвеєрів, за результатами якого запропоновано застосування крокового двигуна в якості привода. Аналітичним шляхом встановлена залежність кута повороту крокового двигуна від часу для різних законів руху жолоба конвеєра, що дозволяє, за рахунок зміни кону програмування вибрати оптимальні кінематичні характеристики руху жолоба конвеєра при транспортуванні вантажів з різними фізико-механічними властивостями. Отримані залежності умовного коефіцієнта тертя частинки по поверхні жолоба циліндричної форми від частоти і амплітуди крутильних коливань жолоба.

Результати теоретичних досліджень підтверджені проведеними експериментами на розробленій лабораторній установці. Зменшення коефіцієнта тертя частинки по поверхні жолоба, коли він рухається в напрямку, який протилежний напрямку транспортування дозволяє зменшити затрати енергії на процес транспортування та збільшити продуктивність конвеєра.

**1.** Григоров О. В., Петренко О. В. Вантажопідйомні машини : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2006. 299 с. **2.** Іванченко Ф. К. Підйомно-транспортні машини : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 413 с. **3.** Врублевський І. Й. Точність наближеного розрахунку параметрів еліптичних коливань під час швидкісного вібротранспортування. *Військово-технічний збірник*. 2013. № 2. С. 9–12. **4.** Врублевський І. Й. Дослідження впливу мас-інерційних параметрів вібротранспортних пристроїв на процес вібропереміщення за допомогою графічного редактора AutoCAD. Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка». **5.** Врублевський І. Й. Визначення параметрів двомасового вібраційного транспортера великої вантажності. *Військово-технічний збірник*. 2019. № 21. С. 3–8. **6.** Повідайло В. Вібраційні процеси та обладнання. Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. **7.** Корендій В. М., Гаврильченко О. В., Шенбор В. С. Вібраційні транспортно-маніпулюючі конвеєри для пакувального обладнання. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні* : зб. наук. праць. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. № 891. С. 35–41. **8.** URL: <https://www.vibraschultheis.de/ru/produkty/transportirovka-vygruzka/slip-stick-konveyery->

skolzjaschie-konvejery.html (дата звернення: 10.08.2024). **9.** URL: <https://www.sssdynamics.com/> (дата звернення: 10.08.2024). **10.** Серілко Л. С., Сасюк З. К., Серілко Д. Л., Часов Д. П. Розробка конструкції та моделювання роботи високоефективного інерційного конвеєра. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2022. Вип. 2(98). С. 297–309. **11.** Serilko L. S., Lyashuk O. L., Sasyuk Z. K., Serilko D. L. *The research of inertial conveyor transitional chute oscillations influence on its technical and economic indicators*. Resource-saving technologies of raw-material base development in mineralmini : multi-authored monograph. Petrosani, Romania : Universitas Publishing, 2020. P. 293–309.

## REFERENCES:

**1.** Hryhorov O. V., Petrenko O. V. *Vantazhopidiomni mashyny : navch. posib.* Kharkiv : NTU «KhPI», 2006. 299 s. **2.** Ivanchenko F. K. *Pidiomno-transportni mashyny : pidruchnyk.* Kyiv : Vyshcha shkola, 1993. 413 s. **3.** Vrublevskiy I. Y. *Tochnist nablyzhenoho rozrakhunku parametriv eliptychnykh kolyvan pid chas shvydkisnogo vibrotransportuvannia. Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk.* 2013. № 2. S. 9–12. **4.** Vrublevskiy I. Y. *Doslidzhennia vplyvu mas-inertiinykh parametriv vibrotransportnykh prystroiv na protses vibroperemishchennia za dopomohoiu hrafichnogo redaktora AutoCAD.* Lviv : Vyd-vo Natsionalnogo universytetu «Lvivska politekhnika». **5.** Vrublevskiy I. Y. *Vyznachennia parametriv dvomasovoho vibratsiinoho transportera velykoi vantazhnosti. Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk.* 2019. № 21. S. 3–8. **6.** Povidailo V. *Vibratsiini protsesy ta obladnannia.* Lviv : Vyd-vo Natsionalnogo universytetu «Lvivska politekhnika», 2004. **7.** Korendii V. M., Havrylchenko O. V., Shenbor V. S. *Vibratsiini transportno-manipuliuiuchi konveieri dlia pakuvalnogo obladnannia. Visnyk Natsionalnogo universytetu «Lvivska politekhnika». Ser. Optyimizatsiia vyrobnychyykh protsesiv i tekhnichnyi kontrol u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni* : zb. nauk. prats. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, 2018. № 891. S. 35–41. **8.** URL: <https://www.vibraschultheis.de/ru/produkty/transportirovka-vygruzka/slip-stick-konvejery-skolzjaschie-konvejery.html> (data zvernennia: 10.08.2024). **9.** URL: <https://www.sssdynamics.com/> (data zvernennia: 10.08.2024). **10.** Serilko L. S., Sasiuk Z. K., Serilko D. L., Chasov D. P. *Rozrobka konstruksii ta modeliuvannia roboty vysokoeffektyvnogo inertiinoho konveiera. Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2022. Vyp. 2(98). S. 297–309. **11.** Serilko L. S., Lyashuk O. L., Sasyuk Z. K., Serilko D. L. *The research of inertial conveyor transitional chute oscillations influence on its technical and economic indicators*. Resource-saving technologies of raw-material base development in mineralmini : multi-authored monograph. Petrosani, Romania : Universitas Publishing, 2020. P. 293–309.

**Serilko L. S., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Serilko D. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Moroziuk S. V., Senior Lecturer (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), Chasov D. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (Dniprovsky State Technical University, Dnipro)**

## **PERSPECTIVES OF USING STEPPER MOTORS FOR DRIVE OF OSCILLATING CONVEYORS**

**The paper substantiates the possibility of using stepper motors as a drive for oscillating conveyors. Existing kinematic drive schemes, which combine crank-slider and rocker mechanisms, are quite bulky and are tuned to a certain law of conveyor trough movement. The authors propose the use of a stepper motor, in which the law of rotational motion can be widely regulated by changing the sketch (code that controls the operation of the drive microcontroller). A mathematical model of the movement of a particle of material on the surface of a cylindrical trough has been developed. When the working body moves, due to its torsional vibrations, the direction of the friction force between the material and the trough changes, which allows increasing the productivity of the conveyor. Experimental studies have confirmed the adequacy of the developed mathematical model. The use of a stepper motor for driving inertial conveyors will improve the technical and economic indicators of the process of transporting materials by these devices, which can be used in the design of transport systems in various industries and agriculture.**

***Keywords:* oscillating conveyor; vibrating transportation; stepper motor; crank-slider mechanism.**