

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПУСКУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА**Ю. О. РОМАСЕВИЧ**, доктор технічних наук, професор**Р. А. КУЛЬПІН**, аспірант*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net

<https://doi.org/dopovidi2022.04.011>

Анотація. У роботі розроблена програма та методика планування експериментальних досліджень при пуску стрічкового конвеєра. Наведено конструкцію лабораторної моделі стрічкового конвеєра, обрано найбільш значимі характеристики, які необхідно виміряти. Проведено підбір давачів (струму електродвигуна, прискорення та лінійного переміщення стрічки) та відповідного обладнання для запису і передачі отриманих даних. Показано місця встановлення необхідного обладнання на лабораторній моделі стрічкового конвеєра. Представлено програмне забезпечення для обробки показників давачів.

Проведено планування експериментальних досліджень для визначення динамічних та енергетичних параметрів стрічкового конвеєра. Незалежними факторами обрано характеристики пуску (прямий пуск, частотно-керований із різними залежностями наростання частоти, частотно-керований за оптимальним законом наростання частоти), а також тривалість наростання частоти. Наведено методику фільтрації та обробки експериментальних даних.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, планування, експериментальні дослідження, програма досліджень

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженням питання динаміки, оптимізації перехідних режимів руху стрічкових конвеєрів присвячено багато наукових робіт та патентів. Зокрема, у статті [1] запропоновано методологію стендових випробувань з визначення ключових складових опору руху стрічкового конвеєра та представлені результати експериментальних випробувань. Ці випробування мали на меті визначити оптимальні конструктивні параметри для підвищення енергоефективності. При

цьому використано конвеєрну стрічку, що має низький опір кочення на роликах і опір вигину на шківках в умовах підземних шахт.

У статті [2] показано, що під час роботи стрічкового конвеєра вимірювання швидкості стрічки є важливим для безпечної та ефективної роботи машини. У існуючій системі вимірювання швидкості необхідний вимірювальний прилад контактуючий з поверхнею стрічки. Контактний метод вимірювання не може уникнути похибки вимірювання, спричиненої

Ромасевич Ю. О., Кульпін Р. А.

ковзанням на контактній поверхні та зносом вимірювального приладу. Тому для вирішення зазначених вище проблеми запропонована нова безконтактна система вимірювання швидкості.

У статті [3] показано стрічковий конвеєр як випробувальну лабораторну установку. На конвеєрі застосовано давачі температури і вібрації для моніторингу холостого ходу. Сигнали, що отримані із давачів, дали змогу проаналізувати зміну температури та отримати величину середньоквадратичного рівня вібрації. Автори зробили висновок, що вимірювання температури на роликах є простим і ефективним способом контролю стану натягу стрічки стрічкових конвеєрів.

У статті [4] було досліджено кілька ефектів, що мають місце при розтязі стрічки конвеєра. Вони включали поздовжню вібрацію стрічки, оцінку власної частоти коливань у поперечному напрямку та реакції на імпульсне збудження. Вібраційну реакцію спостерігали при кількох різних частотах збудження. Показано, що сила натягу стрічки є основним фактором впливу на поздовжню вібрацію, а вплив частоти збудження менший. Це свідчить про те, що при експлуатації конвеєра слід звертати увагу на величину розтягуючого зусилля стрічки.

Мета. Метою експериментальних досліджень є

методична підготовка та планування проведення експериментальних досліджень пуску стрічкового конвеєра.

Результати досліджень.

Програма виконання експериментальних досліджень пуску стрічкового конвеєра складається із наступних етапів:

- оцінка технічних характеристик об'єкту експериментальних досліджень, а також підбір відповідних давачів та вимірювально-реєструючого обладнання;

- розробка відповідного програмного забезпечення для ефективної практичної реалізації оптимального режиму руху стрічкового конвеєра;

- обрання методики опрацювання експериментальних даних та їх статистичного аналізу;

- виконання експериментальних досліджень та аналіз отриманих результатів;

- надання рекомендацій для підвищення ефективності виконання експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження проводитимуться на фізичній моделі стрічкового конвеєра. Для проведення дослідження використані параметри стаціонарного стрічкового конвеєра типу КЛ 100-45-4-500-1П.

Загальний вид моделі стрічкового конвеєра, який використовуватиметься для

Ромасевич Ю. О., Кульпін Р. А.

експериментального дослідження, представлено на рис. 1.

Процес пуску асинхронного електродвигуна приводу стрічкового конвеєра відбувався за допомогою відповідного частотного

перетворювача марки FR-D740-080-ES виробництва компанії Mitsubishi Electric. Він змонтований у щиті із іншим комутуючим та захисним електричним обладнанням.



Рис. 1. Зовнішній вигляд фізичної моделі стрічкового конвеєра

Виконання експериментальних досліджень пуску стрічкового конвеєра відбувалося у три етапи. Під час першого етапу для перевірки адекватності розроблених динамічної та математичної моделей було експериментально досліджено прямий пуск стрічкового конвеєра. На другому етапі експериментальних досліджень, основна увага приділялась дослідженню струмових навантажень та енергетичних втрат у асинхронному електродвигуні частотно-керованого електроприводу стрічкового конвеєра.

При третьому етапі експериментальних досліджень відбувалась практична реалізація оптимального режиму руху стрічкового конвеєра та досліджувалася його ефективність.

Прямий, частотно-керований та оптимальний пуск стрічкового конвеєра було експериментально досліджено для двох режимів пуску:

- при пуску з ненавантаженим робочим органом конвеєра;
- при пуску із завантаженим робочим органом конвеєра, відповідним матеріалом, що транспортується (кукурудза).

Для виконання експериментальних досліджень енергоефективності частотно-керованого пуску приводу стрічкового конвеєра було розроблено структуру (план) повнофакторних експериментів. У даному випадку, незалежними показниками, що варіюються виступали:

- режим пуску конвеєра (холостий та під навантаженням);

•тип характеристики наростання частоти напруги живлення двигуна від нуля до номінальної частоти (лінійна та S-подібна);

•тривалість наростання частоти напруги живлення до номінальної (1, 3 та 5 секунд).

Загалом структура повнофакторного експериментального дослідження частотно-керованого пуску стрічкового конвеєра наведена у табл. 2

2. Структура повнофакторних експериментів при дослідженні частотно-керованого пуску стрічкового конвеєра

Фактор	Значення											
Режим пуску конвеєра	Холостий						Завантажений					
Тип характеристики наростання частоти	Лінійна			S-подібна			Лінійна			S-подібна		
Тривалість наростання частоти, с	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Номер експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

У даному випадку було проведено серію із 12 експериментальних досліджень. Для дослідження оптимального режиму руху конвеєра план повнофакторних експериментів подібний до

попередньої серії експериментів (табл. 2), його представлено у табл. 3.

Кожен експеримент із серії усіх повнофакторних експериментів виконувався з п'ятикратною повторюваністю.

3. План повнофакторних експериментів при дослідженні оптимального режиму пуску стрічкового конвеєра

Параметр	Значення					
Режим пуску конвеєра	Холостий			Завантажений		
Тривалість розгону, с	1	3	5	1	3	5
Номер експерименту	1	2	3	4	5	6

Під час виконання експериментальних досліджень руху стрічкового конвеєра основна увага приділялась досліджуванню наступних показників:

■ величині струмових навантажень електроприводу конвеєра та середніх за час пуску втрат потужності у приводі;

■ швидкості переміщення робочого органу (стрічки) конвеєра;

Ромасевич Ю. О., Кульпін Р. А.

■ величині вібрації у горизонтальній площині конструкції стрічкового конвеєра біля приводного та натяжного барабанів.

Для ефективного виконання серій всіх спланованих експериментальних досліджень було виконано підбір і монтаж

(встановлення) відповідного обладнання.

Експериментальні дослідження величини струмових навантажень і середніх за час пуску втрат потужності у електроприводі стрічкового конвеєра виконувалися за допомогою давача струму (рис. 2) в обмотках статора електродвигуна.



Рис. 2. Зовнішній вигляд давача струму Micro Switch Freeport Csla1sd 1314 Mex

Давач вимірювання струму (рис. 2) під'єднується в розрив фази живлення асинхронного електроприводу стрічкового конвеєра. Перед початком виконання експериментальних досліджень було здійснено тарування давача струму.

Під час дослідження швидкості переміщення стрічки конвеєра

використовувався інкрементний енкодер лінійного переміщення ENC Autonics, який дає змогу перетворювати обертання своїх коліс у набір відповідних електронних імпульсів при переміщенні стрічки (рис. 3).



Рис. 3. Розміщення лінійного енкодера ENC Autonics на стрічковому конвеєрі

Для дослідження величини вібрації у горизонтальній площині конструкції стрічкового конвеєра біля приводного та натяжного барабанів було використано акселерометр ММА7260q, який кріпиться до рами конвеєра (рис. 4).

Основні технічні характеристики акселерометра, який використовується для виконання експериментальних досліджень, представлені у таблиці 4.

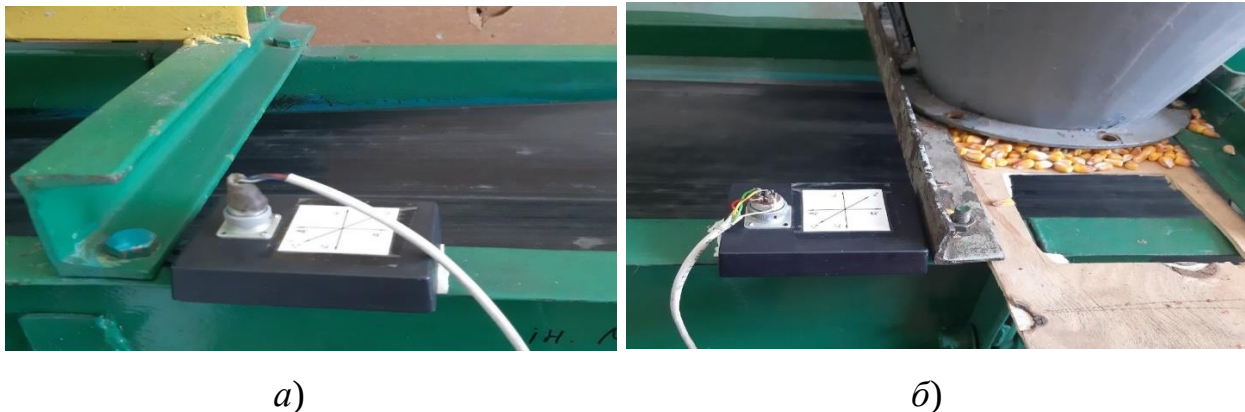


Рис. 4. Зовнішній вигляд розміщення акселерометрів на рамі стрічкового конвеєра: а) біля приводного барабана; б) біля натяжного барабана

4. Основні технічні характеристики акселерометра ММА7260q

№ п/п	Параметр	Величина
1.	Тип вихідного сигналу	Аналоговий
2.	Чутливість, mV/g	800
3.	Діапазон робочих температур, C ⁰	-40 ... +105
4.	Кількість осей	3
5.	Сила струму, що споживається, мкА	500
6.	Діапазон напруги живлення, В	2,2 – 3,6
7.	Маса, мг	179,3

Перед початком виконання експериментальних досліджень було проведено тарування акселерометра.

Загальний вигляд розміщення відповідного вимірювально-

реєструючого обладнання на лабораторній моделі стрічкового конвеєра представлено на рис. 5.



Рис. 5. Загальний вигляд розміщення вимірювально-реєструючого обладнання для виконання експериментальних досліджень

На рис. 5 наведено наступні позначення: 1 – частотний перетворювач FR-D740-080-EC; 2 – джерело живлення електродвигуна стрічкового конвеєра; 3 – датчик вимірювання струму; 4 – лабораторний блок живлення HYELEC HUA YI ELECTRONICS DC POWER SUPPLY HY3003M-3; 5 – кабель COM-порту; 6 – мотор-редуктор стрічкового конвеєра; 7 – персональний комп'ютер із встановленим відповідним програмним забезпеченням (m-DAQ 14 Reader v 1.2); 8 – пристрій збору експериментальних даних (m-DAQ 14).

Процес збору експериментальних даних здійснюється наступним чином. На рис. 5 зображено перетворювач частоти 1, який підключено до мережі

живлення 380 В та за допомогою якого виконується керування електродвигуном мотор-редуктора 6 стрічкового конвеєра, від джерела живлення 2.

Під час пуску стрічкового конвеєра сигнали від датчика струму (рис. 2), лінійного енкодера (рис. 3) та акселерометрів (рис. 4 а та б) передаються за допомогою відповідних кабелів до пристрою для збору даних 8, який підключено до комп'ютера 7 із встановленим відповідним програмним забезпеченням. У свою чергу датчики живляться напругою від лабораторного блоку живлення 4, яка для датчика струму та лінійного енкодера становить 12 В, а для акселерометрів по 5 В. Лабораторний блок живлення під'єднано до мережі живлення у 220 В.

Ромасевич Ю. О., Кульпін Р. А.

У якості програмного забезпечення, яке призначено для запису та конвертації отриманих

експериментальних даних, виступає mDAQ-14 Reader v 1.2 (рис. 6).

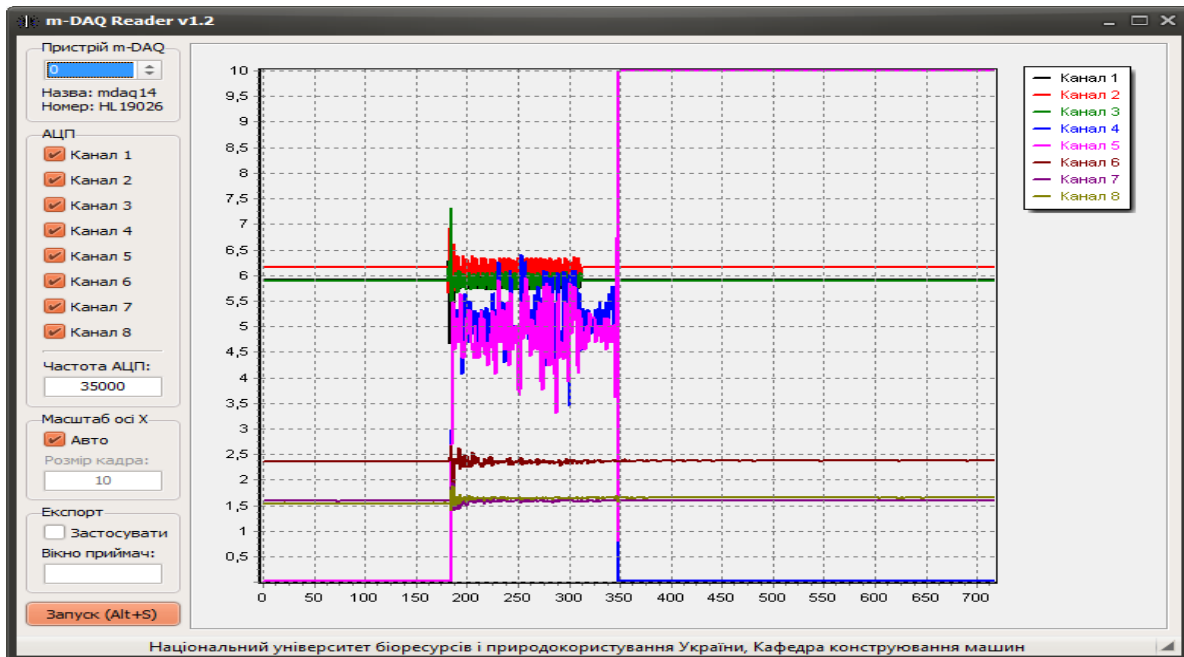


Рис. 6. Зовнішній вигляд вікна програми mDAQ-14 Reader v 1.2

У подальшому отримані експериментальні дані імпортуються у програму Wolfram Mathematica для подальшого опрацювання.

У теоретичних дослідженнях було отримано розв'язок задачі мінімізації узагальненого оптимізаційного критерію, який відображає інтегральну та термінальну складові [9]. Узагальнений оптимізаційний

критерій дозволяє мінімізувати енергетичні та силові навантаження у компонентах стрічкового конвеєр під час розгону машини зі стану спокою до усталеної швидкості руху. Для того щоб забезпечити практичну реалізацію отриманого розв'язку було розроблено відповідне програмне забезпечення, що встановлено на персональний комп'ютер 7 (рис. 5).

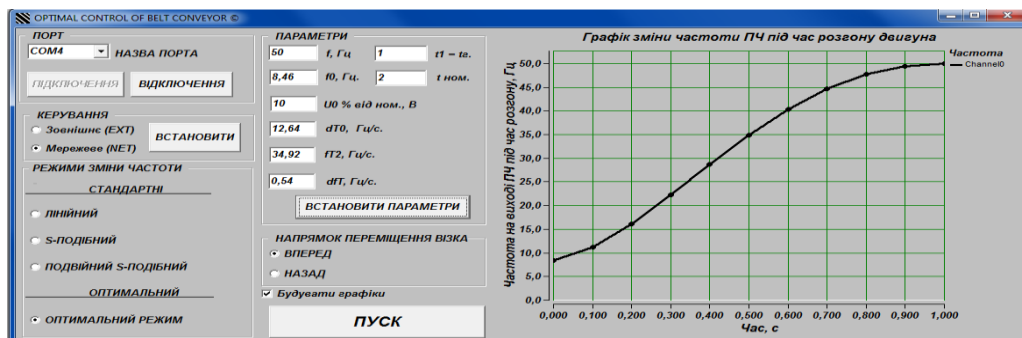


Рис. 7. Інтерфейс програмного забезпечення «OPTIMAL CONTROL OF BELT CONVEYOR»

Відповідне програмне забезпечення (рис. 7) дозволяє за допомогою кабелю COM-порту 5 (рис. 5) надсилати до частотного перетворювача 1 керуючі сигнали. Ці сигнали, призводять до зміни частоти та амплітуди напруги живлення електродвигуна, у результаті чого відбувається зміна його кутової швидкості. Таким чином, персональний комп'ютер із відповідним розробленим програмним забезпеченням та частотним перетворювачем дає змогу реалізувати оптимальний режим пуску стрічкового конвеєра на практиці.

Зібрані у ході проведення експериментальних досліджень дані характеризуються шумами, поява яких пов'язана із виникненням перешкод при вимірюваннях досліджуваних показників. Для того щоб зменшити вплив шумів на показники отриманих експериментальних даних було використано цифрові фільтри. Для обробки даних із давача струму застосовувався фільтр Савицького-Голя [11]. Для зменшення шумів сигналу лінійного енкодера було використано фільтр біжучої медіани [11]. Мінімізація шумів отриманих від акселерометрів відбувалася за допомогою фільтру біжучого середнього [8]. Дослідження величини розбіжності теоретичних та експериментальних даних

відбувалося за допомогою коефіцієнта варіації [10].

Висновки і перспективи подальших досліджень:

1. Проведено планування експериментальних досліджень пуску стрічкового конвеєра головною метою яких було встановлення характеристик руху конвеєра при прямому, частотно-керованому та оптимальному режимам пуску.
2. Незалежними факторами обрано тип пуску (із навантаженою стрічкою та на холостому ході), тип характеристики наростання частоти напруги живлення та тривалість її наростання.
3. Для збору експериментальних даних використано давачі струму приводу конвеєра (за ними також отримано значення середніх за час пуску втрат потужності), швидкість переміщення стрічки конвеєра, акселерометри, що розміщені біля приводного і натяжного барабанів машини.
4. Для практичної реалізації оптимального закону руху стрічкового конвеєра було розроблене відповідне програмне забезпечення «*OPTIMAL CONTROL OF BELT CONVEYOR*», яке призначене для керування роботою частотного

перетворювача FR-D740-080-
ЕС Mitsubishi Electric.

5. Фільтрація експериментальних даних відбувалася за допомогою фільтрів Савицького-Голя, біжучої медіани та біжучого

середнього. Розбіжність теоретичних та експериментальних значень досліджуваних показників визначалася за допомогою коефіцієнта варіації.

Список використаних джерел

1. Bajda, M., & Krol, R. (2015). Experimental Tests of Selected Constituents of Movement Resistance of the Belt Conveyors Used in the Underground Mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 702–711. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.098>
2. Gao, Y., Qiao, T., Zhang, H., Yang, Y., Pang, Y., & Wei, H. (2019). A contactless measuring speed system of belt conveyor based on machine vision and machine learning. *Measurement*, 139, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.030>
3. Liu, X., Pang, Y., Lodewijks, G., & He, D. (2018). Experimental research on condition monitoring of belt conveyor idlers. *Measurement*, 127, 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.066>
4. HOU, Y.-f., & MENG, Q.-r. (2008). Dynamic characteristics of conveyor belts. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(4), 629–633. [https://doi.org/10.1016/s1006-1266\(08\)60307-7](https://doi.org/10.1016/s1006-1266(08)60307-7)
5. Руководство пользователя V1.4. m-DAQ12, m-DAQ14 микросистема сбора данных с интерфейсом USB / URL: <http://old.holit.ua/download/common/docs/hds/m-DAQ.pdf> (дата звернення 22.06.2022).
6. Wolfram Mathematica / URL: https://www.wolfram.com/mathematica/online/?src=google&420&gclid=EAIaIQobChMI35rXjpnm9AIVAdiyCh3cxgnJEAAYASAAEGl9XvD_BwE (дата звернення 22.06.2022).
7. Lutovac M. D. Filter Design for Signal Processing using MATLAB© and Mathematica©. New Jersey, USA.: Prentice Hall. 2001. P. 756.
8. Фільтр біжучого середнього. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%83%D1%85%D0%BE%D0%BC%D0%B5_%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D1%94 (дата звернення 22.06.2022)

URL: <http://dglip.nubip.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/7009> (дата звернення 22.06.2022)

9. Узагальнений критерій оптимізації керування рухом стрічкового конвеєра URL: <http://dglip.nubip.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/7009> (дата звернення 22.06.2022)

10. Коефіцієнт варіації. URL: <https://ukr.sciencedevices.com/kak-rasschitat-koefficient-variatsii-a-359622> (дата звернення 22.06.2022).

11. Медианный фильтр URL: https://ru.bmstu.wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%84%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F (дата звернення 22.06.2022)

References

1. Bajda, M., & Krol, R. (2015). Experimental Tests of Selected Constituents of Movement Resistance of the Belt Conveyors Used in the Underground Mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 702–711. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.098>
2. Gao, Y., Qiao, T., Zhang, H., Yang, Y., Pang, Y., & Wei, H. (2019). A contactless measuring speed system of belt conveyor based on machine vision and machine learning. *Measurement*, 139, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.030>
3. Liu, X., Pang, Y., Lodewijks, G., & He, D. (2018). Experimental research on condition monitoring of belt conveyor idlers. *Measurement*, 127, 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.066>
4. HOU, Y.-f., & MENG, Q.-r. (2008). Dynamic characteristics of conveyor belts.

Ромасевич Ю. О., Кульпін Р. А.

Journal of China University of Mining and Technology, 18(4), 629–633.
[https://doi.org/10.1016/s1006-1266\(08\)60307-7](https://doi.org/10.1016/s1006-1266(08)60307-7)

5. User Manual V1.4. m-DAQ12, m-DAQ14
 micro data acquisition system with interface / URL:
<http://old.holit.ua/download/common/docs/hds/m-DAQ.pdf>.

6. Wolfram Mathematica / URL:
https://www.wolfram.com/mathematica/online/?src=google&420&gclid=EAIaIQobChMI35rXjpnm9AIVAdiyCh3cxgnJEAAYASAAEgI9XvD_BwE

7. Lutovac M. D.
 Filter Design for Signal Processing using MATLAB© and Mathematica©. New Jersey, USA.: Prentice Hall. 2001. P. 756.

8. Filter of the big middle. URL:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%83%D1%85%D0%BE%D0%BC%D0%B5_%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D1%94

9. An increasing criterion for optimizing the rolling of a strichkovy conveyor <http://dglb.nubip.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/7009>

10. Coefficient of variation URL:
<https://ukr.sciencedevices.com/kak-rasschitat-koefficient-variatsii-a-359622>

11. Median filter URL:
https://ru.bmstu.wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%84%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F

PROGRAM AND METHODS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF BELT CONVEYOR START-UP

Yu. O. Romasevych, R. A. Kulpin

Abstract. *In the work, a program and a method of planning experimental studies during the start-up of a conveyor belt were developed. The design of the laboratory model of the belt conveyor is presented, the most significant characteristics that need to be measured are selected. The selection of transducers (electric motor current, acceleration and linear movement of the tape) and appropriate equipment for recording and transmitting the received data was carried out. The places of installation of the necessary equipment on the laboratory model of the belt conveyor are shown. Software for processing sensor indicators is presented.*

Experimental studies have been planned to determine the dynamic and energy parameters of the belt conveyor. The characteristics of the start (direct start, frequency-controlled with different dependences of the frequency increase, frequency-controlled according to the optimal law of the frequency increase), as well as the duration of the frequency increase, were chosen as independent factors. The technique of filtering and processing experimental data is presented.

Key words: belt conveyor, planning, experimental studies, research program