

УДК 621.867.133

Ловейкін В.С., д.т.н., Рибалко В.М., к.т.н., Ткаченко О.Ю.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ ПУСКУ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА

Постановка проблеми. В процесі роботи скребкових конвеєрів у тяговому органі та елементах приводу виникають значні динамічні навантаження, що обумовлені пуском чи гальмуванням конвеєра, раптовим заклинюванням тягового органу, або в період усталеного руху. Теоретичними дослідженнями встановлено, що такі динамічні навантаження спричиняють виникнення коливальних процесів зі значною зміною швидкості та прискорення [5,4].

Також відомо, що збільшення швидкості руху робочого органу конвеєра приводить до зменшення коефіцієнта опору переміщенню вантажу. А така падаюча характеристика тертя в механічних системах конвеєра зазвичай викликає коливальні процеси в них. Всі ці фактори призводить до зниження надійності роботи та передчасного руйнування конструкції скребкового конвеєра. У зв'язку з цим нами проведена оптимізація режиму руху конвеєра, що дозволяє мінімізувати коливання в ланках приводного механізму та гнучкому тяговому органі.

Аналіз останніх досліджень. Дослідженню динамічних процесів, що виникають в конвеєрах з ланцюговим тяговим органом в період пуску та усталеного руху та побудові їх математичних моделей присвячено роботи [2, 9, 10].

Питання оптимального керування рухом механізмів різного призначення висвітлено в роботах [1, 3, 8]. В статті [6] наведено методику розв'язку оптимізаційних задач руху механічних систем за допомогою прямого варіаційного методу. Автори мінімізували середньоквадратичне значення динамічної складової приводного зусилля механічної системи.

Проведення оптимізації режимів руху скребкових конвеєрів є важливою задачею, яка потребує експериментального підтвердження ефективності керування рухом конвеєра за оптимальним законом.

Мета роботи полягає у розробці методики експериментальних досліджень динаміки руху скребкового конвеєра. Така методика дозволить провести експерименти, за результатами яких буде перевірено адекватність теоретичних досліджень з наступним порівнянням отриманих експериментальних залежностей з теоретичними.

Виклад основного матеріалу. Перед проведенням експериментальних досліджень динаміки руху скребкового конвеєра були виконані теоретичні дослідження. Для цього було побудовано динамічну модель, яка відповідає реальній механічній системі й відображає основні її фізичні властивості (рис. 1).

При побудові моделі зроблено такі припущення: всі елементи скребкового конвеєра є абсолютно твердими тілами, окрім елементів передавального механізму та тягового органу, які володіють пружними властивостями; корпус приводу конвеєра та вали тягових зірочок закріплені абсолютно жорстко.

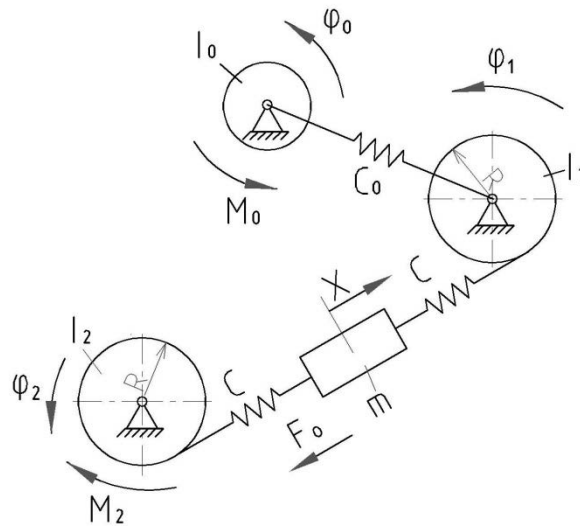


Рис. 1. Динамічна модель скребкового конвеєра.

Система диференціальних рівнянь, яка описує динамічні процеси в скребковому конвеєрі, складена на основі принципу Д'Аламбера і має такий вид:

$$\begin{cases} I_0 \ddot{\varphi}_0 = M_0 - c_0 (\varphi_0 - \varphi_1); \\ I_1 \ddot{\varphi}_1 = c_0 (\varphi_0 - \varphi_1) - cR (\varphi_1 R - x); \\ m \ddot{x} = c (\varphi_1 R - x) - c (x - \varphi_2 R) - F_0; \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 = cR (x - \varphi_2 R) - M_2, \end{cases} \quad (1)$$

де I_0 – момент інерції елементів приводного механізму, зведених до осі приводного валу; I_1, I_2 – моменти інерції приводного та натяжного валів конвеєра відносно власних осей обертання; $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ – кутові координати повороту відповідно приводного механізму, приводної та натяжної зірочок конвеєра; x – лінійна координата центру мас робочої вітки конвеєра; m – маса, що

зосереджена на робочій вітці конвеєра; c_0 – коефіцієнт жорсткості приводного механізму, зведений до осі повороту приводного валу; c – коефіцієнт жорсткості тягового ланцюга конвеєра; R – радіуси приводної і натяжної зірочок; M_0 – рушійний момент приводу, зведений до осі повороту приводного валу; M_2 – момент опору від зачерпування скребками вантажу, зведений до осі повороту натяжного валу; F_o – сила опору переміщенню робочої вітки конвеєра.

Розв'язавши диференціальні рівняння системи (1) чисельним методом, який реалізовано за допомогою програмного продукту, отримано характеристики швидкості та прискорення, які представлено на графіках (рис. 2, 4). Наведені графіки відображають динаміку руху скребкового конвеєра при дійсному режимі руху та побудовані при таких параметрах динамічної моделі:

$$\begin{aligned} m &= 76 \text{ кг}; I_0 = 0,7435 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; I_1 = I_2 = 0,00171 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\ c_0 &= 7378 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}; c = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Н} / \text{м}; R = 0,0535 \text{ м}; \\ M_2 &= 0,55 \text{ Н} \cdot \text{м}; F_o = 1350 \text{ Н}; v = 1,5 \text{ м} / \text{с}; t_1 = 1 \text{ с}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для оптимізації керування руху досить часто використовують варіаційне числення, яке дає можливість отримати плавні керуючі функції, що дозволяє «пом'якшити» режим руху системи [6].

З рівнянь системи (1) виразимо лінійну координату центру мас робочої вітки конвеєра x , кутові координати повороту приводного механізму φ_0 , приводного барабану φ_1 , а також рушійний момент M_0 , через кутову координату φ_2 та її похідні. При цьому рушійний момент має вигляд:

$$\begin{aligned} M_0 &= (mR^2 + I_0 + I_1 + I_2) \ddot{\varphi}_2 + \left\{ \frac{I_0}{c_0} \left[\frac{c_0}{c} \left(m + \frac{2I_2}{R^2} \right) + mR^2 + I_1 + I_2 \right] + \right. \\ &+ \left. \frac{m}{c} \left[I_1 \left(1 + \frac{2I_2}{mR^2} \right) + I_2 \right] \right\} \varphi_2^{IV} + \frac{mI_0I_1I_2}{c_0c} \varphi_2^{VIII} + M_2 + F_oR. \end{aligned} \quad (3)$$

За критерій оцінки режиму руху конвеєра на ділянці пуску вибрано середньоквадратичне відхилення прискорень центра мас скребків і тягового органу в момент збігання з натяжного барабана:

$$I_{22} = \left[\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} f_{22} dt \right]^{1/2}; \quad (4)$$

$$f_{22} = (\ddot{x} - \ddot{\varphi}_2 R)^2 = \left(\frac{I_2}{cR} \varphi_2^{IV} \right)^2. \quad (5)$$

де t_1 – тривалість розгону конвеєра.

Оскільки цей критерій відображає небажані властивості скребкового конвеєра, то його необхідно мінімізувати. Умовою мінімуму критерію (4) з підінтегральними виразом (5) є рівняння Ейлера-Пуассона [11]:

$$\frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial f_{22}^{IV}}{\partial \varphi_2} = 2 \left(\frac{I_2}{cR} \right)^{VIII} \varphi_2 = 0. \quad (6)$$

Останній вираз дорівнює нулю, коли $\varphi_2^{VIII} = 0$.

Оптимізацію режиму пуску конвеєра здійснено при таких крайових умовах руху:

$$\text{при } t = 0 \Rightarrow \varphi_2 = 0, \dot{\varphi}_2 = 0, \ddot{\varphi}_2 = 0, \overset{IV}{\varphi}_2 = 0;$$

$$\text{при } t = t_1 \Rightarrow \dot{\varphi}_2 = \omega_y, \ddot{\varphi}_2 = 0, \overset{IV}{\varphi}_2 = 0, \varphi_2 = 0,$$

де ω_y – усталена швидкість повороту натяжного вала.

Послідовно інтегруючи рівняння $\varphi_2^{VIII} = 0$, враховуючи крайові умови руху на ділянці пуску отримуємо, оптимальний закон руху натяжного барабана. За допомогою цього режиму, використовуючи рівняння системи (1), отримано оптимальні режими руху інших ланок конвеєра.

Побудовано графіки кутової швидкості $\dot{\varphi}_2$ (рис. 3) та кутового прискорення $\ddot{\varphi}_2$ (рис. 5) на валу натяжної зірочки за оптимального режиму руху при таких же параметрах динамічної моделі (2). Зміна кутової швидкості та кутового прискорення інших ланок конвеєра матиме такий же характер, як зображено на рис. 2, 5.

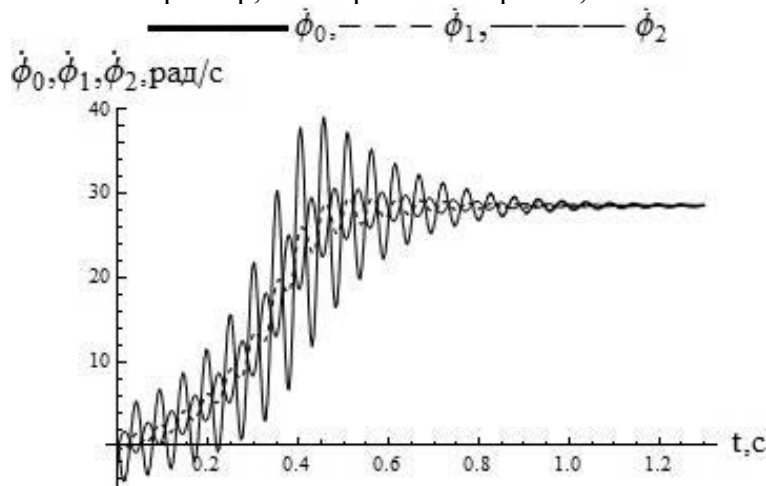


Рис. 2. Графік зміни кутових швидкостей $\dot{\varphi}_0, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ без оптимізації режиму пуску.

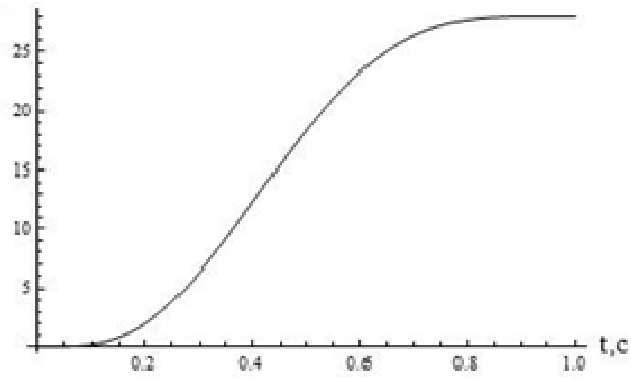


Рис. 3. Графік зміни кутової швидкості $\dot{\phi}_2$ за оптимальним законом

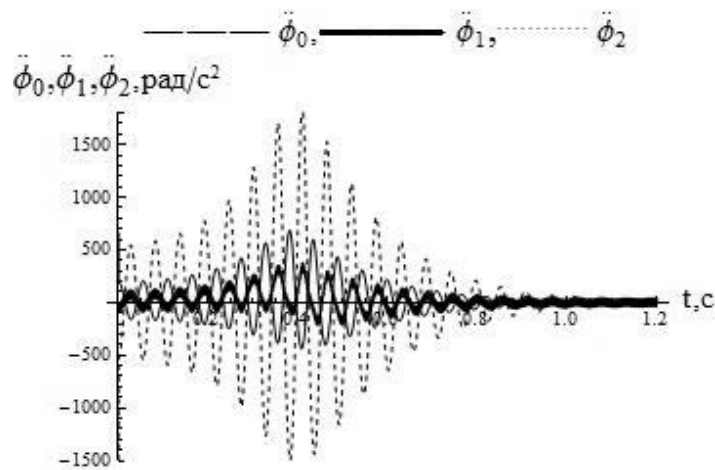


Рис. 4. Графік зміни кутових прискорень $\ddot{\phi}_0, \ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2$ без оптимізації режиму пуску

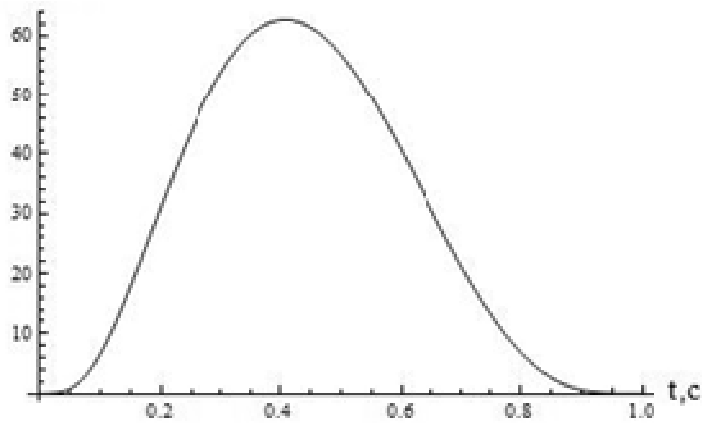


Рис. 5. Графік зміни кутового прискорення $\ddot{\phi}_2$ за оптимальним законом

Порівнюючи оптимальні графіки зміни кутової швидкості та кутового прискорення ланок конвеєра з графіками без оптимізації, можна зробити висновки, що такий режим пуску дав можливість мінімізувати коливання в ланках приводного механізму та гнучкому тяговому органі скребкового конвеєра, спричинені динамічними навантаженнями та забезпечив плавну зміну кутової швидкості та прискорення ланок скребкового конвеєра.

Експериментальні дослідження проводились на реальному об'єкті (натурне моделювання), оскільки це дає можливість найбільш достовірно виявити закономірності проходження досліджуваного процесу.

Програма експериментальних досліджень включає комплекс необхідних робіт, які дають можливість підтвердити попередні теоретичні положення про підвищення ефективності роботи конвеєра шляхом зменшення динамічних навантажень, що діють на тягові елементи конвеєра та привод на основі оптимізації режимів руху. Також експериментальними дослідженнями передбачається виявити вплив швидкості руху тягового органу, матеріалу скребків та жолоба на коефіцієнт опору руху.

Згідно з цим програма експериментальних досліджень включає:

- розробку та виготовлення натурної моделі скребкового конвеєра;
- підбір та розробка вимірювально-реєструючого обладнання для визначення основних параметрів руху натурної моделі;
- розробка програмного забезпечення для реалізації оптимального закону руху натурної моделі;
- проведення експериментів для визначення параметрів руху скребкового конвеєра при реальному режимі руху та при керуванні за оптимальним законом;
- проведення експериментів для дослідження залежності коефіцієнту опору від швидкості руху тягового органу, від фізико-механічних властивостей вантажу, що транспортується, від матеріалу жолоба та скребків;
- вибір методики для обробки масиву експериментальних даних.

Експериментальні дослідження проводились на скребковому конвеєрі типу ТС-40 (рис. 6), який складається з двох тягових ланцюгів

9 з прикріпленими до них скребками 10, приводної 7 та натяжної 8 зірочок. Приводна станція складається з асинхронного електродвигуна 1, шківів 2, 3 клинопасової передачі та зірочок 4, 5 ланцюгової передачі.

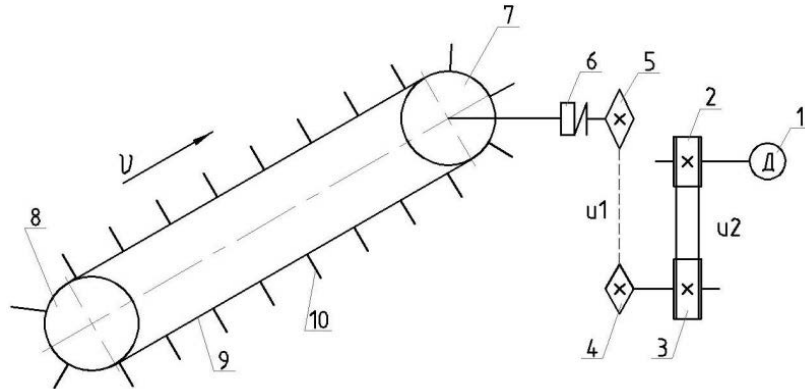


Рис. 6. Кінематична схема скребкового конвеєра

В процесі роботи скребкового конвеєра має місце значний тяговий опір, який спричиняє швидке спрацювання тягових органів та виникнення значних енергетичних витрат. Тому скребки та дно жолоба скребкового конвеєра виготовлено з високоміцного поліетилену, який володіє такими властивостями: низький коефіцієнт поверхневого тертя, висока ударна міцність, стійкість до взаємодії хімічно агресивних середовищ та корозії, наявність «самозмащуючого» ефекту, стійкість до високих динамічних навантажень.

Загальний вигляд експериментальної установки удосконаленого скребкового конвеєра типу ТС-40 з вимірювально-реєструючим обладнанням зображено на рис. 7.



Рис. 7. Загальний вигляд експериментальної установки з вимірювально-реєструючим обладнанням

Привод скребкового конвеєра здійснюється від асинхронного електродвигуна АІР90L2. Керування електродвигуном здійснюється за допомогою частотного перетворювача Mitsubishi FR-D740 (рис. 8). Конструкція експериментальної установки скребкового конвеєра дозволяє реалізувати як ручне, так і комп'ютерне керування рухом.

При комп'ютерному керуванні частотний перетворювач підключають до клем електродвигуна, що дає можливість живити двигун струмом з частотою, яка буде змінюватись за заданим законом. Таке керування дає змогу проводити пуск та зупинку скребкового конвеєра за оптимальним законом з урахуванням всіх змінних параметрів.



Рис. 8. Частотний перетворювач Mitsubishi FR-D740 для керування рухом скребкового конвеєра.

Суть комп'ютерного керування полягає в тому, що з персонального комп'ютера на частотний перетворювач надходить значення вихідної частоти напруги живлення двигуна. Частотний перетворювач змінює вихідну частоту і двигун змінює швидкість обертання вала за законом, що відповідає оптимальному режиму руху скребкового конвеєра. Протягом усталеного руху частотний перетворювач підтримує постійну частоту, яка відповідає номінальній швидкості конвеєра. Такий спосіб керування рухом дозволяє отримати плавний пуск та гальмування скребкового конвеєра, що забезпечує мінімізацію коливань в ланках приводного механізму та тягового органу.

Основні параметри руху експериментальної установки скребкового конвеєра визначались за допомогою вимірювально-реєструючого обладнання. Експерименти проводились як для реального режиму руху, так і для керованого за оптимальним законом.

Для визначення кутової швидкості використано датчик КМІ16/1 (рис. 9,а). Це магніторезистивний датчик, принцип роботи якого заснований на тому, що сигнал із виходу датчика змінюється залежно від положення зубця металевої шестерні, оскільки змінюється напрям лінії магнітного поля. Таким чином, на кожен зуб шестерні припадає один період зміни сигналу із виходу датчика. Тому на ведучому валу скребкового конвеєра встановлено шестерню (рис. 9, в). До кожуха конвеєра за допомогою кронштейнів змонтовано датчик, який зчитував сигнали з зубців шестерні за певний проміжок часу. Обробивши ці сигнали отримано частоту обертання металевої шестерні, а отже і приводного валу скребкового конвеєра.

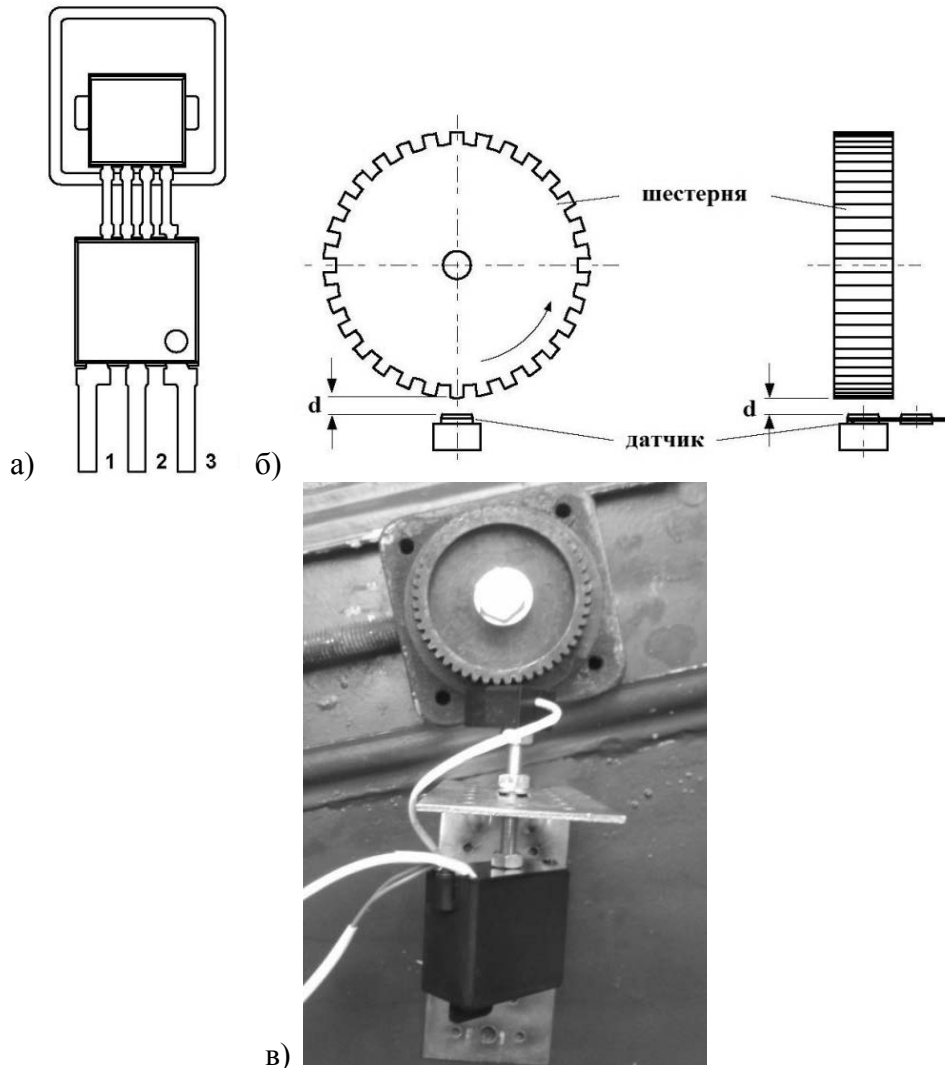


Рис. 9. Датчик кутової швидкості КМІ16/1: а) зовнішній вигляд датчика; б) розташування датчика; в) датчик на експериментальній установці

Для визначення енерговитрат, що виникають в процесі роботи скребкового конвеєра, необхідно дослідити зміну потужності залежно від режиму роботи (оптимального чи неоптимального). Потужність на приводному валу визначалась непрямим методом через значення струму і напруги.

Значення струму отримано з лінійного датчика струму Honeywell CSLA1CD відкритого типу, який працює на ефекті Холла. Призначений для безконтактного вимірювання постійного, змінного та імпульсного струмів в діапазонах $\pm 57 \dots \pm 950$ А та має аналоговий вихід. Датчик підключався послідовно до однієї з фаз двигуна (не нульової); його розташування на експериментальній установці показано на рис. 10.

Напруга визначалась високоточним цифровим мультиметром Mastech MS8218AC (рис. 11), який підключається до персонального комп'ютера (ПК) через порт RS-232 за допомогою кабеля. Програмне забезпечення дозволяє автоматично відкалібрувати прилад і за допомогою ПК опрацювати отримані дані. Вимірює середньоквадратичне значення величини постійної чи змінної напруги.



Рис. 10. Датчик струму

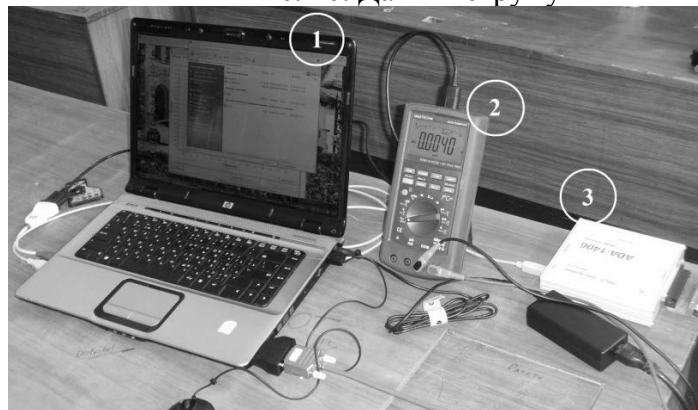


Рис. 11. Обладнання збору даних з експериментальної установки: 1) ПК; 2) Мультиметр; 3) Модуль АДА

Для збору даних з датчиків використано багатофункціональний модуль вводу-виводу аналогових і дискретних сигналів ADA-1406 (рис. 11), який під'єднується до ПК. Збір і передача даних на ПК відбувається через канал USB для їх подальшої обробки.

Висновки. В результаті проведених досліджень:

- розроблено програму експериментальних досліджень динаміки руху скребкового конвеєра;
- вдосконалено існуючу конструкцію скребкового конвеєра типу ТС-40, яка дозволяє дослідити: режим руху конвеєра на ділянці пуску при дійсному режимі роботи (неоптимальному) та при керуванні рухом за оптимальним законом; залежність коефіцієнту опору від швидкості руху, матеріалу скребків та жолоба;
- підібрано вимірювально-реєструюче обладнання для визначення експериментальним шляхом основних параметрів руху натурної моделі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Григоров О.В. Оптимальне керування рухом механізмів вантажопідйомних машин / О. Григоров, В. Ловейкін. – К. – 1997. – 262с.
2. Кондрахин В.П. Математическая модель для исследования нагрузок в двухскоростном многодвигательном приводе и тяговом органе скребкового забойного конвейера / В.П. Кондрахин, А.А. Мельник // Наукові праці ДонНТУ. – 2008. – Вип. 16 (142), Серія: гірничо-електромеханічна. – Донецьк. – С. 132-140.
3. Ловейкин В.С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / В.С. Ловейкин. – К.: УМК ВО, 1990. – 168с.
4. Ловейкін В.С. Багатомасова модель динаміки руху скребкового конвеєра з урахуванням дисипативних сил / В.С. Ловейкін, О.Ю. Костина // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). ПолтНТУ. – 2012. – Вип.1(31). – С.35-43.

5. Ловейкін В.С. Дослідження динаміки пуску скребкового конвеєра зі змінним навантаженням в процесі пуску/ В.С. Ловейкін, О.Ю. Костина // Motrol. – 2011. – 13В. – С.42-48.
6. Ловейкін В.С. Оптимізація перехідних режимів руху механічних систем прямим варіаційним методом / Ловейкін В.С., Ловейкін А.В., Ромасевич Ю.О. // Вісник ТДТУ. – 2010. – Том 15. - №1. – С. 7-13. – (механіка та матеріалознавство).
7. Ловейкін В.С. Оптимізація режиму пуску скребкового конвеєра / В.С. Ловейкін, О.Ю. Костина // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2012. – №1(65). – С.64-69.
8. Смехов А.А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А. Смехов, Н.И. Ерофеев. – М.: Машиностроение. 1975. – 239с.
9. Хорольський І.М. Динаміка ланцюгових систем і замкнутих контурів машин неперервного транспорту / І.М. Хорольський. – Львів: - 1999. – 194 с.
10. Чугреев Л. И. Динамика конвейеров с цепным тяговым органом / Чугреев Л. И. – М.: Недра, 1976. – 162с.
11. Эльгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Эльгольц Л.Э. – М.: Наука, 1969. – 424с.