

УДК 621.873

Ловейкін В.С., д.т.н., Ромасевич Ю.О., к.т.н.

ПРОГРАМНЕ ТА АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ МАШИН

Постановка проблеми.

Одним із етапів дослідження динаміки роботи вантажопідйомних машин є встановлення адекватності прийнятих у теоретичних дослідженнях моделей. Для цього необхідно проводити експериментальні дослідження і порівнювати їх результати з результатами теоретичних розрахунків. Співпадіння характерних показників, таких як частоти, амплітуди та фази власних коливань елементів механізмів, коефіцієнти демпфування коливань тощо дає змогу встановити адекватність або неадекватність прийнятих математичних моделей механізмів.

Як правило, результати експериментальних досліджень представлені у вигляді багатомірного масиву даних. Цей масив знаходиться у файлі, що зберігається у пам'яті комп'ютера, зовнішньому накопичувачі (наприклад, flash-накопичувача інформації) або пам'яті АЦП. Розмірність масиву рівна кількості каналів АЦП, з яких відбувається зчитування сигналів. Зазначимо, якщо кожен датчик генерує сигнал лише по одному каналу, то розмірність масиву експериментальних даних рівна кількості датчиків, які використані у досліді. Кожен елемент масиву представляється у вигляді списку даних, які зібрані з певною частотою опитування каналу АЦП. Вони, як правило, є величинами струму або напруги сигналу у каналі АЦП. У свою чергу сигнал, який надходить на вимірювальний канал АЦП містить окрім корисного сигналу також різноманітні перешкоди. Виокремлення корисного сигналу є важливою задачею при попередній обробці експериментальних даних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для вимірювання різноманітних параметрів вантажопідйомних машин та механізмів використовуються датчики різних видів. У роботі [1] для вимірювання маси вантажу, кута відхилення вантажних канатів від вертикалі, положення крана та висоти підвісу вантажу використовуються аналогові датчики магнітного типу. Чутливим елементом у цих датчиках є магніточутлива головка.

У роботі [2] приводяться експериментальні дані для режиму підйому вантажу (осцилограми навантаження вантажних канатів) та переміщення мостового крана з перекосом.

В роботі [3] наведено опис апаратних засобів, які використані для проведення експериментальних досліджень з усунення коливань вантажу закріпленого на гнучкому підвісі до кранового візка.

В більшій чи меншій мірі експериментальні дослідження роботи вантажопідйомних кранів приведені в роботах[4-7]. Однак, майже в усіх вказаних роботах відсутній опис технічних засобів вимірювання та методик обробки експериментальних даних.

Постановка мети та задач дослідження.

Метою даної роботи є розробка алгоритмів попередньої обробки експериментальних даних від різних датчиків.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. описати датчики, які використовуються для збору експериментальних даних під час роботи вантажопідйомних машин та вказати їх основні технічні характеристики;
2. описати процедуру збору даних та їх експорт в програму Mathematica;
3. розробити алгоритм попередньої обробки даних для датчиків, які генерують аналоговий сигнал;
4. розробити алгоритм попередньої обробки даних для енкодерів.

Виклад матеріалу.

Для збору експериментальних даних під час досліджень роботи вантажопідйомних машин та механізмів необхідно вимірювати такі параметри:

- 1) електричні (напругу на зажимах електродвигуна, або силового перетворювача; струм, який споживає електродвигун або силовий перетворювач);
- 2) динамічні (зусилля та моменти у найбільш навантажених ланках машини);
- 3) кінематичні (положення, швидкість та прискорення елементів машини).

Для вимірювання електричних показників використовується датчик струму CSLA1CD 0612 MEX та напруги, який побудований у вигляді подільника напруги на резисторах. Датчик струму умовно складається з трьох частин: чутливого елемента, що перетворює силу струму, який протікає у кільці, в напругу; підсилювача сигналу напруги та стабілізатора напруги живлення датчика. Датчик струму відтарований (рис. 1): для того, щоб отримати силу струму, яка протікає через датчик необхідно сигнал напруги датчика помножити на постійний коефіцієнт 5,05.

Датчик напруги являє собою резистивний подільник напруги. З виходу подільника напруги можна знімати три рівні сигналу. Це зроблено для зручності вимірювання різних напруг: лінійної або фазної. Відношення опорів резисторів подільника напруги такі: 24,1; 48,2 та 120,5. Таким чином, у випадку вимірювання фазної напруги 220 В на виході датчика напруги будемо мати такі рівні напруг: 9,13 В; 4,56 В; 1,83 В (рис. 2).

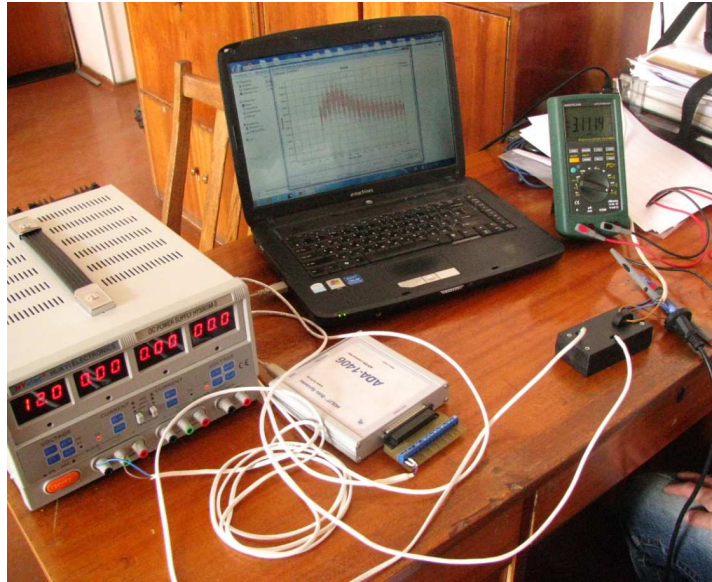


Рис. 1. Тарування датчика струму



Рис. 2. Тарування датчика напруги

Необхідно зазначити, що описані датчики вимірюють миттєві струм та напругу, амплітуди яких, як відомо, у $\sqrt{2}$ рази більші ніж їх діючі значення. Це необхідно враховувати при обробці даних.

Для вимірювання зусилля використовується S-подібний тензометричний датчик. Оскільки сигнал електричної напруги з виходу датчика є занадто низьким для вимірювання, то послідовно до виходу датчика підключений підсилювач. Датчик зусилля відтарований в робочому діапазоні зусиль від 0 до 10000 Н. Для стабілізації живлення датчика на його вхід під'єднаний стабілізатор напруги.

Кінематичні параметри механізмів вантажопідйомних машин вимірюються за допомогою енкодерів лінійного та кутового переміщення. Тарування таких датчиків виконувати не потрібно, оскільки це вже виконано фірмою-виробником. Енкодери формують електричні імпульси, кількість яких пропорційна кутовому або лінійному переміщенню датчика. Для вимірювання лінійного переміщення використовується енкодер ENC фірми Autonics (рис. 3), а для кутового енкодера MOL-40 фірми Megatron (рис. 4).



Рис. 3. Зовнішній вигляд енкодера ENC Autonics

Вимірювання прискорень виконують за допомогою акселерометра, який має три канали, що відповідають трьом осям декартової системи координат. Тарування акселерометра (рис. 5) виконується таким чином: по вертикальній осі координат (z -осі) діє прискорення вільного падіння g , а по іншим координатним осям (x - та y -осям) при знаходженні акселерометра у стані спокою прискорення відсутнє. Сигнали у каналах, які відповідають координатним осям x та y у рівні між собою. Крім того, вони відрізняються від сигналу в каналі, який відповідає z -осі.



Рис. 4. Зовнішній вигляд енкодера MOL-40 Megatron

Таким чином, для того, щоб знайти рівень напруги сигналу акселерометра, який відповідає прискоренню вільного падіння g , необхідно сигнал каналу, який відповідає z -осі, відняти від сигналу каналу, який відповідає осі x чи y . Структура акселерометра подібна до структури датчика струму, це – три складові: чутливий елемент, підсилювач сигналу та стабілізатор напруги живлення датчика. Живлення акселерометра виконується за допомогою гальванічних елементів.

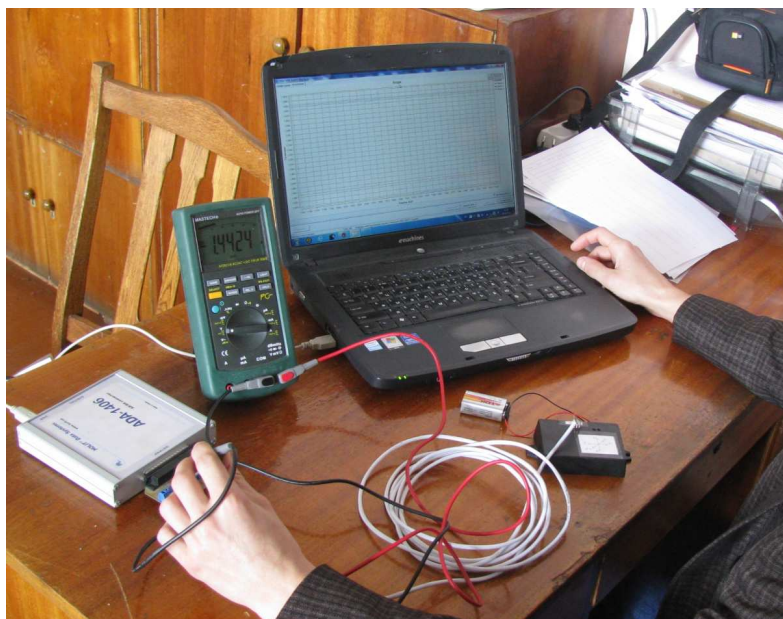


Рис. 5. Тарування датчика прискорення

У таблиці 1 приведені основні характеристики описаних датчиків.

Характеристики датчиків

Таблиця 1.

Вимірюваний параметр	Марка чутливого елемента	Фірма-виробник чутливого елемента	Абсолютна похибка вимірювання	Межі вимірювання	Чутливість
Струм	CSLA1CD 0612 MEX	Honeywell	0,03 А	0... 57 А	0,198 В/А
Наруга	-	-	-	Обмежені максимальною напругою АЦП	0,0415 В/В
					0,0207 В/В
					0,0083 В/В
Зусилля	DEF-A	Keli	100 Н	0...10000 Н	0,001 В/Н
Лінійне переміщення	ENC	Autonics	1 мм	-	1 імп/мм
Кутове переміщення	MOL-40	Megatron	0,1 ⁰	-	3600 імп/об
Прискорення	MMA7260 Q	Freescale Semiconductor	0,03 м/с ²	0...60 м/с ²	0,0194 В·с ² /м

Процедура збору даних складається з наступних етапів: 1) підключення датчиків до АЦП та налаштування програмного забезпечення для їх опитування; 2) безпосередній запис даних на ПК; 3) конвертація даних у файл txt; 4) експорт даних в програму Mathematica. Опишемо докладніше кожен з цих етапів.

Для підключення датчиків до АЦП та блока живлення використовуються екрановані гнучкі багатожильні мідні кабелі. Живлення датчиків виконується за допомогою блока живлення постійного струму НУ3003М-3 фірми MASTECH [8], який має три незалежні канали: два регульованих за напругою та струмом та один нерегульований з напругою 5 В (рис. 6). Всі канали блока живлення мають стабілізовану напругу.



Рис. 6. Зовнішній вигляд блока живлення HY3003M-3

У випадку коли живлення датчика виконувати із стаціонарного блока живлення незручно, використовуються гальванічні елементи.

Для збору даних використовується 8-канальний АЦП ADA-1406 (рис. 7), технічні характеристики якого наведені у таблиці 2 [9].

Таблиця 2.

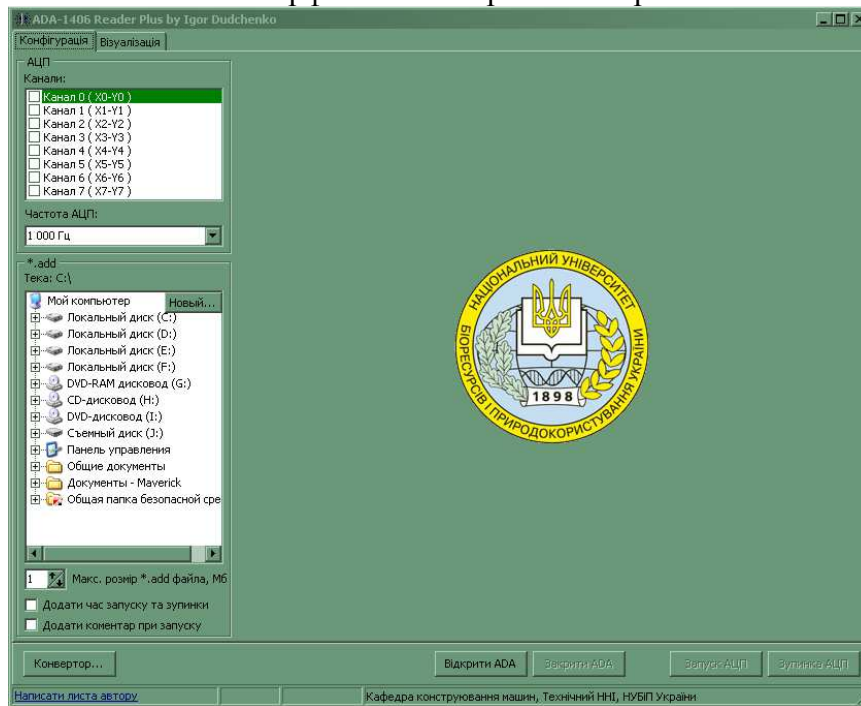
Технічні характеристики АЦП ADA-1406

Параметр	Значення параметру
Кількість аналогових каналів	8 диференціальних каналів або 16 однопровідних каналів
Вхідний діапазон сигналів, В	$\pm 10; \pm 5; \pm 2,5; \pm 1,25$
Гранична вхідна напруга відносно AGND, В: - при включеному інтерфейсі USB - при відключеному інтерфейсі USB	± 35 ± 10
Розрядність АЦП, біт	14
Максимальна диференціальна нелінійність перетворення, МЗР	-1...+1,5
Максимальна інтегральна нелінійність перетворення, МЗР	$\pm 1,5$
Максимальна частота перетворення, кГц	350
Напруга живлення	живлення від шини USB
Максимальний споживаний струм, мА: - в момент вмикання - в активному режимі	460 260
Габаритні розміри, мм	140x140x35
Маса, кг	0,35

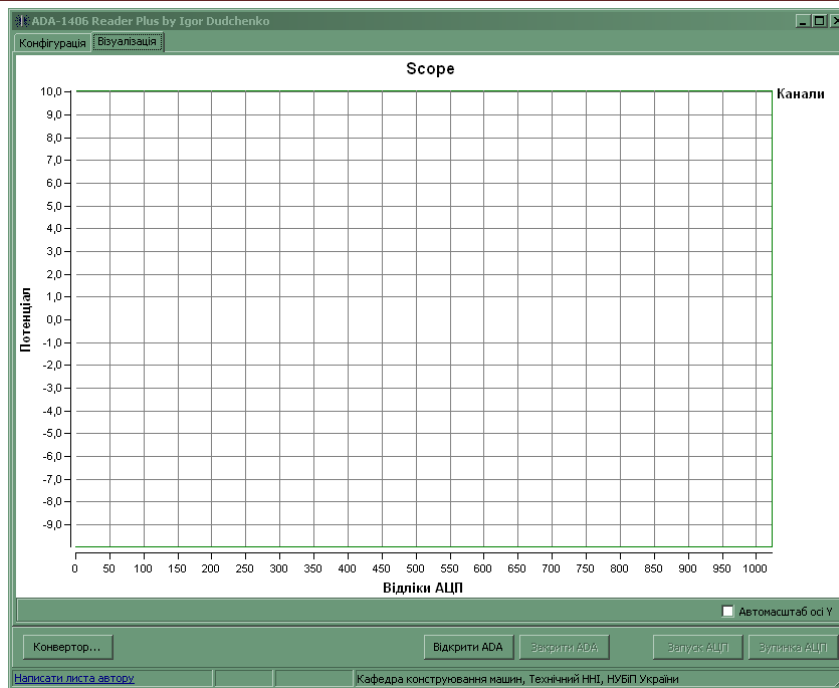


Рис. 7. Зовнішній вигляд АЦП ADA-1406

Керування роботою АЦП виконується за допомогою програми ADA-1406 Reader Plus інтерфейс якої зображено на рис. 8.



а)



б)

Рис. 8. Інтерфейс програми ADA-1406 Reader Plus: а) вікно „конфігурація”; б) вікно „візуалізація”

Для налаштування опитування датчиків спочатку відмічають канали, які задіяні в АЦП. Надалі встановлюють частоту опитування каналів. Вона може приймати такі значення: 1кГц, 10кГц, 25кГц. Вибір частоти опитування є дуже важливим етапом. Встановлення великої частоти опитування може призвести до значного об'єму даних, що у свою чергу призведе до уповільнення обробки всього масиву даних. Мала частота опитування каналів АЦП може викликати втрату корисної інформації про досліджуваний процес. Загалом, при налаштуванні цього параметру необхідно приймати до уваги теорему Котельникова-Шеннона [10], що вимагає хоча б орієнтовної оцінки верхньої частоти із усього спектру коливань вимірюваного параметру (струму, напруги, прискорення тощо). Крім того, для застосування енкодера MOL-40 частота його опитування повинна бути хоча б у 36000 разів більшою, ніж максимальна швидкість його обертання у обертах за секунду. У цьому випадку кількість фіксацій одного імпульсу напруги складає не менше чотирьох, що дозволяє ідентифікувати імпульс при попередній обробці даних з цього датчика.

Після налаштування частоти опитування датчиків виконують відкриття пристрою ADA-1406 натисканням кнопки „Відкрити ADA”. Надалі включають АЦП, який починає послідовно опитувати підключені до його каналів датчики. При цьому досліджуваний процес

ще не розпочався, тобто всі елементи механізму вантажопідійомної машини знаходяться у стані спокою. Це необхідно для того, щоб зафіксувати нульовий рівень аналогових датчиків. Надалі вмикають приводний механізм та виконують технологічний процес, який необхідно дослідити. Після зупинки приводу необхідно через певний проміжок часу вимкнути АЦП. Проміжок часу вибирається потрібний для того, щоб зафіксувати залишкові коливання та переміщення елементів механізму. Зупинка АЦП виконується за допомогою кнопки „Зупинка АЦП”. Надалі виконують конвертацію даних. Під час вимірювання всі дані записувались у файл ADC_Log.add. За допомогою програми ADA-1406 Reader Plus відкривають файл ADC_Log.add та конвертують його у формат txt, в якому дані записані у такому вигляді:

$$\{\{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1i}, x_{1i+1}, \dots, x_{1n}\}, \{x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2i}, x_{2i+1}, \dots, x_{2n}\}, \{x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mi}, x_{mi+1}, \dots, x_{mn}\}\}, \quad (1)$$

де m – кількість задіяних каналів; n – довжина масиву (кількість вимірів). Для того, щоб ідентифікувати експеримент файлу з розширенням txt дають певну назву, наприклад, називають його за номером експерименту „Експеримент 1.txt”.

Для попередньої обробки даних файл з розширенням txt підключають (експортують) у робочий документ Mathematica. Це виконується шляхом присвоєння змінній InputData вмісту файлу з розширенням txt.

Після того, як дані завантажені у робочий документ Mathematica виконується вибір даних з потрібного каналу шляхом присвоєння змінній DataList елементу InputData з номером потрібного каналу. Попередня обробка даних для аналогових сигналів включає наступні операції з одномірним масивом DataList: 1) визначення моментів початку та закінчення процесу; 2) калібровка нуля (якщо потрібно); 3) згладжування даних (якщо потрібно); 4) формування двомірного масиву „час - вимірювана величина”. Для цифрових сигналів (сигнали еncoderів) операції попередньої обробки даних такі: 1) визначення моментів початку та закінчення процесу; 2) формування двомірного масиву „час - вимірювана величина”; 3) формування двомірного модифікованого масиву „час - вимірювана величина”.

Опишемо процедуру визначення моментів початку та закінчення процесу. Для цього виконують алгоритм, який показаний на рис. 9.

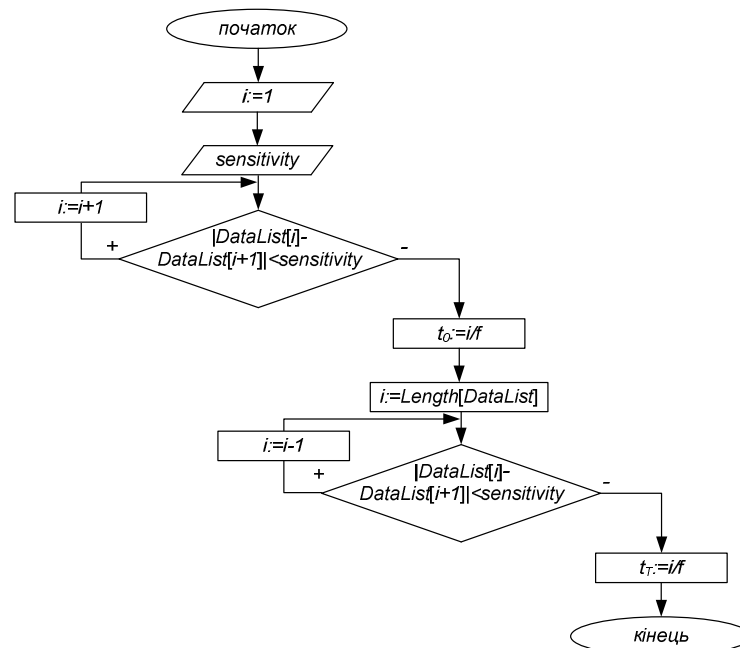


Рис. 9. Алгоритм для визначення моментів початку t_0 та закінчення t_T процесу

Алгоритм працює таким чином. Задають змінну i рівною нулю. Далі встановлюють чутливість (*sensitivity*) до зміни даних. Наступний етап – порівняння модулів різниць сусідніх значень у масиві з величиною чутливості *sensitivity*. Якщо умова виконується, що свідчить про те, що вимірюваний параметр при переході від одного дискретного значення до іншого ще не змінюється, то збільшують значення змінної i на одиницю і знову повторюють порівняння. Якщо умова не виконується (параметр почав змінюватись), то встановлюють значення початку процесу як відношення поточного значення змінної i до частоти опитування f . Процедура визначення моменту часу t_T закінчення процесу аналогічна з тією лише різницею, що порівняння сусідніх значень масиву *DataList* виконується у напрямку з кінця до початку.

Для калібровки нуля виконують дві операції: 1) визначення середнього значення параметра на проміжку від початку масиву *DataList* до значення, яке відповідає початку процесу t_0 (отримане значення є величиною „дрейфу нуля”); 2) віднімання всіх даних у масиві *DataList* від величини „дрейфу нуля”. Калібровку нуля виконують у випадку коли апріорі відомо, що вимірювальний параметр до початку процесу має нульове значення (наприклад, сила струму до вмикання двигуна).

Інколи у даних спостерігаються промахи, тобто занадто великі значення, які не відповідають фізичній дійсності процесу. Вони, як

правило, є наслідками електромагнітної дії на вимірювальне обладнання зі сторони силового устаткування (двигунів, контакторів, автоматичних вимикачів тощо). Для усунення цих викидів використовується процедура згладжування даних, яка зображена у вигляді алгоритму на рис. 10.

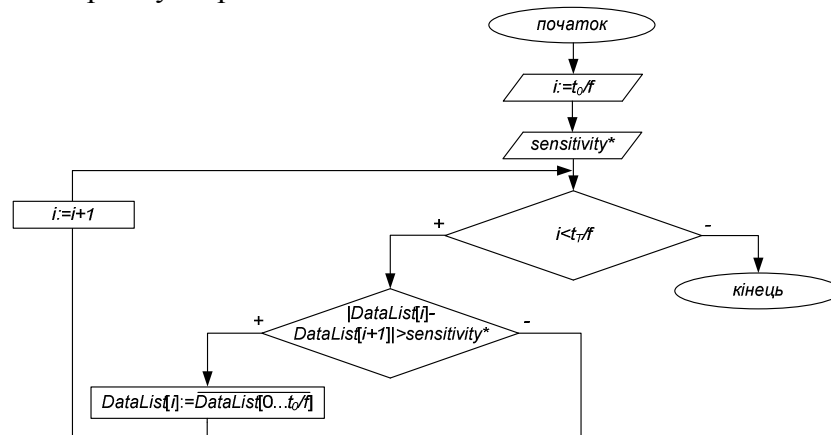


Рис. 10. Алгоритм для згладжування даних

Алгоритм працює так: встановлюють значення змінної i рівне t_0/f , тобто воно відповідає моменту початку процесу. Далі встановлюють значення чутливості $sensitivity^*$, яке виступає критерієм фізичної можливості збільшення вимірюваного параметра при переході від i -того значення параметра до $(i+1)$ -го. Після цього виконують цикл, який полягає у порівнянні між собою сусідніх значень вимірюваного параметру. Якщо модуль їх різниці більший ніж величина чутливості $sensitivity^*$, що вказує на наявність промаху у вимірюваннях, то i -те значення масиву $DataList$ встановлюють у величину „дрейфу нуля”. При кожному переході між значеннями вимірюваного параметра перевіряють поточне значення змінної i . Якщо вона стала рівною t_T/f , що відповідає моменту закінчення процесу, процедура згладжування даних закінчується.

Всі описані вище процедури виконуються із одновірним масивом. Для того, щоб встановити відповідність між значенням параметра та моментом його дії виконують формування двовірного масиву „час - вимірювана величина”. На рис. 11 показано алгоритм формування двовірного масиву „час - вимірювана величина”. Спочатку об’являють два масиви: одновірний двоелементний $element$ та двовірний $NeededData$. Після цього встановлюють значення змінної i таке, що відповідає моменту початку t_0 процесу. Надалі для всього проміжку даних $[t_0/f; t_T/f]$ масиву $DataList$ виконують такі операції: 1) у масив $element$ додають значення дискретного часу та величини параметру, яка діє в цей момент часу; 2) у масив $NeededData$ додають масив $element$; 3) очищають масив $element$. Досягнення змінної i

значення, яке відповідає моменту закінчення процесу t_T , перевіряється за допомогою умови $i < t_T/f$.

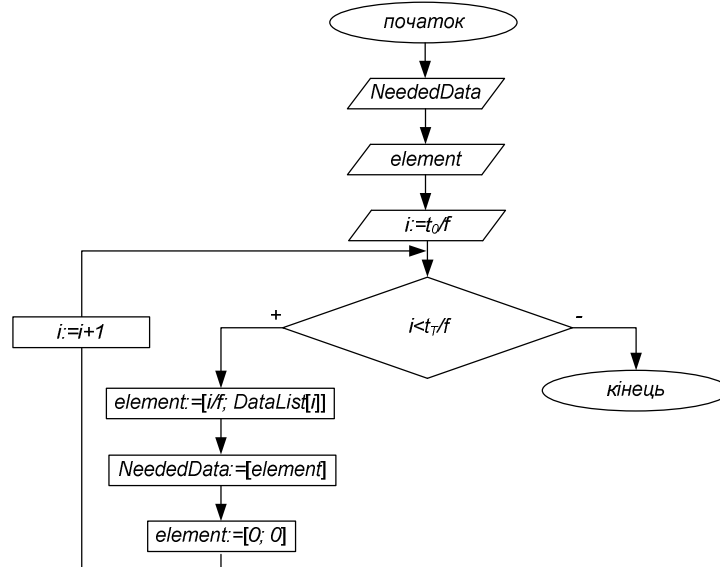


Рис. 11. Алгоритм формування масиву „час - вимірювана величина”

Таким чином, всі процедури попередньої обробки аналогових сигналів з датчиків описані. Нижче приведемо опис процедур, які виконуються для обробки сигналів з енкoderів. Перша процедура дозволяє визначити моменти початку та закінчення процесу. Опишемо алгоритм знаходження моменту початку процесу t_0 (рис. 12).

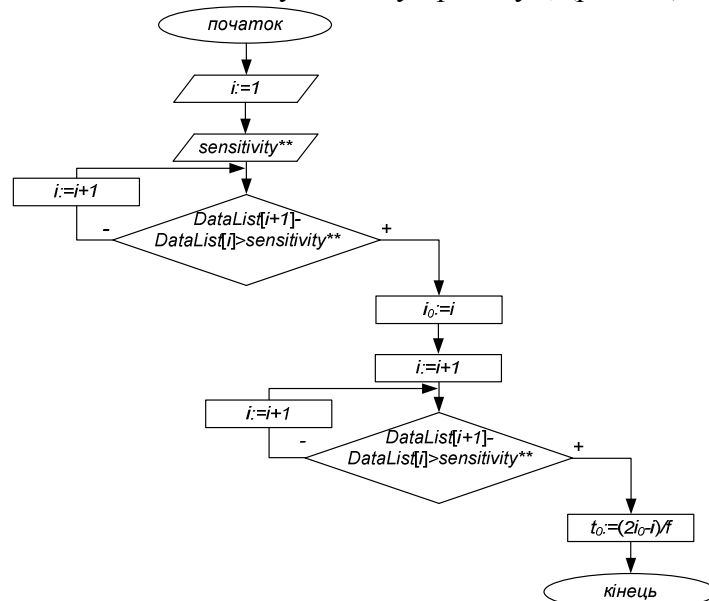


Рис. 12. Алгоритм для визначення моменту початку t_0 процесу

Спочатку об'являють змінну i та величину чутливості $sensitivity^{**}$, яка вибирається на 20-30% меншою, ніж різниця рівнів логічної одиниці та нуля енкодера. Надалі перевіряють різницю i -того та $(i+1)$ -го значень елементів масиву *DataList*. Якщо ця різниця більша аніж встановлена наперед чутливість $sensitivity^{**}$, то це означає, що у масиві зафіксовано перехід від логічного нуля до одиниці, тобто фронт першого імпульсу напруги. Після цього присвоюють значення змінної i іншій змінній i_0 . Аналогічно відшукують номер елементу масива для фронту другого імпульсу. Момент початку процесу визначається так $t_0 = (2i_0 - i) / f$. Це означає, що момент початку процесу рівний різниці моменту настання фронту першого імпульсу та тривалості першого імпульсу. Для моменту закінчення процесу t_T працює подібний алгоритм з тією лише різницею що „рух” в масиві *DataList* виконується з кінця на початок.

В результаті вимірювання кінематичних функцій руху елемента механізму отримують одномірний масив, який включає два рівні напруги: рівень логічного нуля та одиниці. Для того, щоб із вихідних даних сформувати дані положення елемента механізму у часі необхідно використати алгоритм, який зображено на рис. 13. Для формування двомірного масиву „час - вимірювана величина” спочатку об'являють двомірний масив *NeededData*, двоелементний масив *element*, встановлюють ціну одного імпульсу напруги Δx (наприклад для енкодера ENC $\Delta x = 0,001$ м), поточне значення положення елемента (наприклад $x = 0$) та переходять у масиві *DataList* до змінної i , яка відповідає моменту початку процесу. Після цього йде послідовний перехід від одного елементу масиву *DataList* до іншого, що викликане збільшенням змінної i . При виконанні переходу йде перевірка умови досягнення значення змінної i , яке відповідає моменту закінчення процесу. Якщо умова $i < t_T / f$ не виконалась, то це означає, що всі дані оброблені і процедура повинна бути закінчена. Тілом циклу для даного алгоритму є порівняння різниці значень сусідніх елементів масиву *DataList* з постійним параметром $-2,5$. Якщо умова $DataList[i] - DataList[i+1] < -2,5$ виконується, це значить, що у масиві *DataList* ми „напрапили” на фронт імпульса напруги датчика. При цьому змінна x збільшується на величину ціни одного імпульсу напруги Δx . Якщо приведена вище умова не виконалась, то значення x не змінюється. Наступними діями у циклі є запис даних дискретного часу та поточного положення x у масив *element*, запис масиву *element* у масив *NeededData*, обнулення масиву *element* та збільшення змінної i на одиницю.

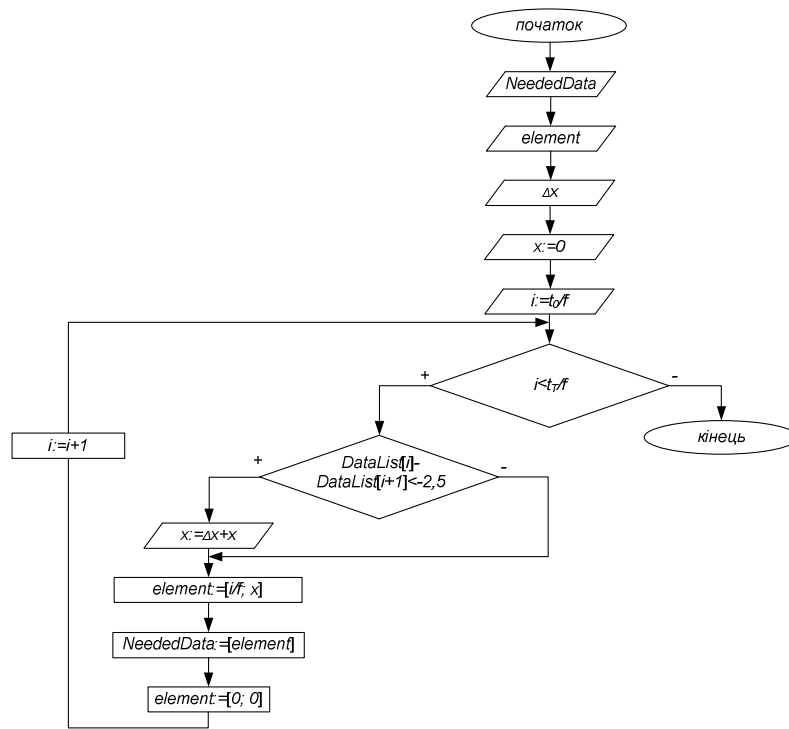


Рис. 13. Алгоритм формування двовірного масиву „час - вимірювана величина”

На рис. 14 показано графічна інтерпретація результатів роботи алгоритму двовірного масиву „час - вимірювана величина” при обробці даних з енкодера ENC. З представленого рисунку видно, що перехід у інше положення датчика викликано фронтом імпульса, який на рис. 14 показано тонкою сірою лінією.

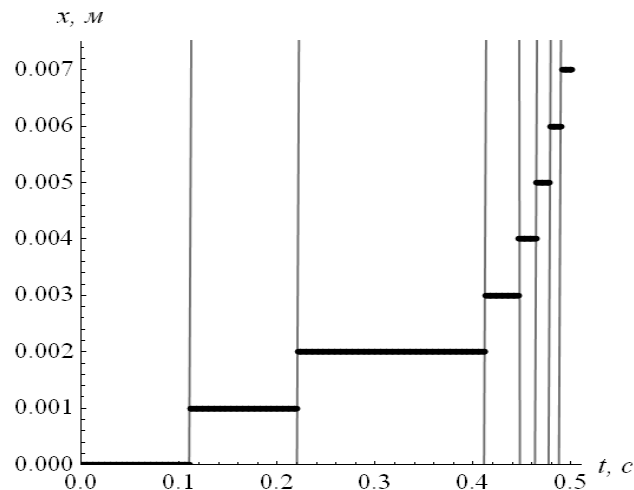


Рис. 14. Алгоритм формування двовірного масиву „час - вимірювана величина”

Таким чином, отриманий двомірний масив „час - вимірювана величина” готовий для аналізу статистичними методами. Однак, при виконанні статистичного аналізу може виникнути ситуація, що апроксимаційна або регресійна функція буде „намагатись” повторювати стрибки вимірюваної величини, наприклад, при високому порядку поліноміальної моделі регресійної функції. Ці стрибки хоча і невеликі за величиною – вони рівні ціні одного імпульсу напруги Δx – однак подальші операції з отриманою функцією, особливо диференціювання, будуть характеризуватись значними похибками. Дійсно при переході від одного значення вимірюваної величини до іншого похідна для часового проміжку переходу рівна:

$$\dot{x}_{\text{експ}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \Delta x f. \quad (2)$$

Для інших часових проміжків, як видно з рис. 14, вимірювана величина не змінюється і тому її похідна за часом рівна нулю.

Для того, щоб уникнути цієї ситуації необхідно модифікувати отриманий двомірний масив „час - вимірювана величина”. Для цієї мети було розроблено алгоритм, який показано на рис. 15. Алгоритм працює так: спочатку об’являють пустий двомірний масив *NeededDatamod*, який по мірі роботи алгоритму буде заповнюватись даними та двоелементний масив ціни одного імпульсу напруги Δx . Потім присвоюють змінній *i* значення нуль. Після цього виконують перевірку різниці сусідніх значень масиву *NeededData*. Якщо різниця рівна нулю, що означає, що зміна значень не відбувається, то збільшують змінну *i* на одиницю і повторюють перевірку. Якщо ж різниця більша нуля, що означає перехід на інше значення вимірюваної величини (перехід на вищу „полічку” на рис. 14), то заповнюють двоелементний масив *element* такими значеннями: перше – середнє значення часу при переході на інше значення вимірюваної величини; друге – середнє значення вимірюваної величини (середнє значення між нижньою та верхньою „полічками” на рис. 14). Надалі записують масив *element* у масив *NeededDatamod*, обнуляють масив *element* та збільшують значення змінної *i* на одиницю.

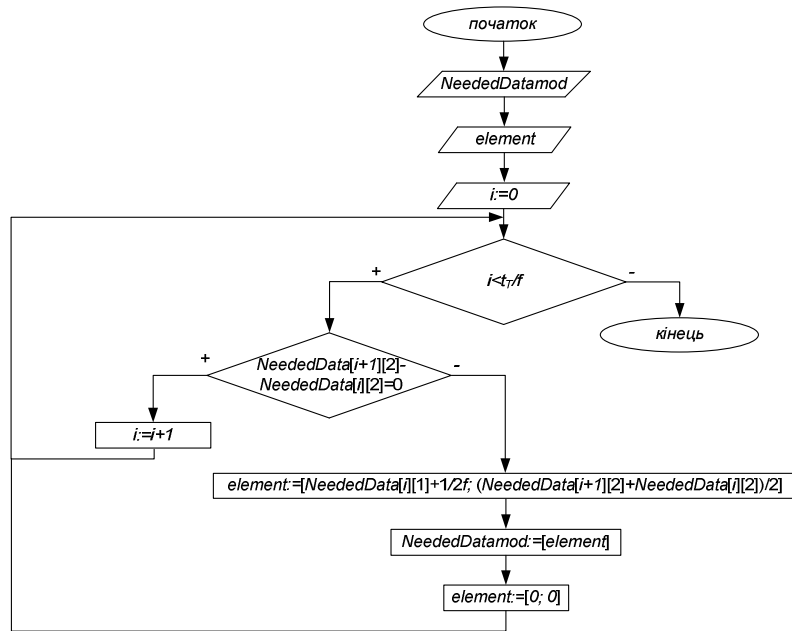


Рис. 15. Алгоритм формування двовірного модифікованого масиву „час - вимірювана величина”

На рис. 16 показано графіки трьох функцій: двовірного масиву „час - вимірювана величина” (горизонтальні лінії означають рівність сусідніх значень положення у масиві), двовірного модифікованого масиву „час - вимірювана величина” (точки сірого кольору) та інтерполяційної функції першого порядку, яка отримана по базовим точкам модифікованого масиву „час - вимірювана величина” (сіра лінія).

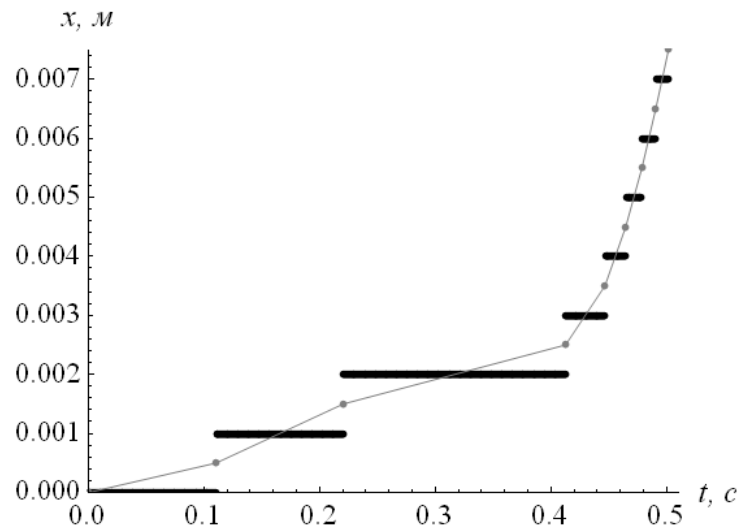


Рис. 16. Алгоритм формування двовірного масиву „час - вимірювана величина”

Висновки. Розроблені вище алгоритми попередньої обробки експериментальних даних можуть бути використані для масивів даних, що отримані у вигляді дискретних величини з аналогових та цифрових датчиків. Ці алгоритми дозволяють автоматизувати процес обробки експериментальних даних, що зумовлює скорочення часу їх обробки. Реалізація запропонованих алгоритмів може бути виконана в середовищі програм, які мають функції програмування (MathLab, Mathematica, Pascal тощо). Необхідно зазначити, що всі приведені вище алгоритми не пов'язані із статистичною обробкою даних, вони лише перетворюють „сирий експериментальний матеріал” у дані, які придатні для подальшого статистичного аналізу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Будиков Л.Я. Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа / Л.Я. Будиков. – Луганск: Издательство ВУГУ, 1997. – 210 с.
2. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов–М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
3. Ромасевич Ю.О. Методика проведення експериментальних досліджень з визначення характеристик перехідних режимів руху кранового візка / Ю.О. Ромасевич, В.С. Ловейкін // Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції молодих учених і студентів [„Перспективна техніка і технології - 2008”] (26-28 вересня 2008 року). – Миколаїв, 2008. – С. 168-171.
4. Григоров О.В. Совершенствование рабочих характеристик крановых механизмов: дисс. на соиск. степ. доктора техн. наук: 05.05.05 / Григоров Отто Владимирович. – Х., 1995. – 386 с.
5. Мельникова Л.В. Автоматизация технологического процесса перемещения механизма с подвешенным грузом средствами микропроцессорного управления: дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: 05.09.03 / Мельникова Любовь Васильевна. - Одесса, 2000. – 116 с.
6. Базил Ш. Управление электроприводом циклически работающих механизмов горизонтального перемещения: дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: 05.09.03 / Базил Шафик. - Одесса, - 1993. – 186 с.
7. Грузоподъемные краны. Кн. 2 / М. Шеффлер, Х. Дресиг, Ф. Курт; [пер. с немецкого М.М. Рунов, В.Н. Федосеев]; под ред. М.П. Александрова. – М.: Машиностроение, 1981. – 287 с.
8. Источник питания постоянного тока НУ3000-НУ5000. Сдвоенный. Руководство по эксплуатации. – 5 с.

9. ADA-1406. Модуль ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов. Руководство пользователя. V1.3. ООО «ХОЛИТ Дэйта Системс». – 17 с.
10. Басараб М. А. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона / М.А. Басараб, Е.Г.Зелкин, В.Ф. Кравченко, В.П. Яковлев. – М.: Радиотехника, 2004. – 72 с.