



УДК 519.6: 681.5

**PIECEWISE LINEAR APPROXIMATION OF THE SINUSOIDAL MOTION OF THE VIBROCALIBRATION COMPLEX CARRIAGE****КУСКОВО-ЛІНІЙНА АПРОКСИМАЦІЯ СИНУСОЇДАЛЬНОГО РУХУ КАРЕТКИ ВІБРОКАЛІБРУВАНЬНОГО КОМПЛЕКСУ****Kryvoruchko I.P./Криворучко І. П.**  
*researcher/н. співр.*

ORCID: 0000-0003-2848-5348

*G.E.Puhov Institute for modeling and energy engineering, Kyiv, Naumova, 15, 03164**Інститут проблем моделювання в енергетиці ім.Г.Є.Пухова, Київ, Наумова, 15, 03164*

**Анотація.** Для спрощення управління кроковим двигуном у випадку реалізації синусоїдального руху каретки вібро-калібрувального комплексу пропонується представлення цього руху сумою відрізків з фіксованою швидкістю. Наведено алгоритм розрахунку точок перелому та частот слідування імпульсів у залежності від величини максимального відхилення між графіками руху, амплітуди та частоти коливань. Наводиться графік залежності коефіцієнта нелінійних спотворень від величини максимального відхилення.

**Ключові слова:** кроковий двигун, синусоїдальний рух, вібро-калібрувальний комплекс, кусково-лінійна апроксимація, коефіцієнт нелінійних спотворень.

**Вступ**

Серед основних типів руху каретки вібро-калібрувального комплексу важливе значення приділяється руху за синусоїдальним законом. Покрокове зчитування розрахованих значень часових міжкрокових інтервалів для управління драйвером крокового двигуна стикається з технічними складнощами. Для спрощення реалізації руху каретки пропонується апроксимація синусоїди кусково-лінійною функцією. В результаті каретка в межах кожного часового інтервалу має рухатися зі сталою для даного інтервалу швидкістю. А сталість швидкості означає фіксовану величину міжкрокового інтервалу. Таке спрощення значно - у сотні разів зменшує об'єми пам'яті для зберігання міжкрокових інтервалів і спрощує управління кроковим двигуном.

Використання крокових двигунів (КД) у системах без зворотного зв'язку можливе у випадках коли режими його використання виключають пропуски кроків і можуть бути найкращим варіантом навіть для задач точного керування рухом враховуючи вартість і складність серводвигунів.

Апаратно-програмний вібро-калібрувальний комплекс (ВКК) складається із системи приводу руху каретки з датчиками параметрів руху (акселерометри) та вимірювального блоку [1]. Відповідно до вимог до ВКК необхідно забезпечити періодичний рух каретки з досить високими показниками якості руху. Використовуваний у якості приводу КД має, як і всі КД, ступінчастий характер обертання якоря. Обертальний рух якоря за допомогою спеціального пристрою - актуатора перетворюється на послідовне ступінчасте лінійне переміщення каретки. Величина кроку визначається як параметрами актуатора так і обраним режимом роботи КД. Залежно від КД і обраного режиму роботи драйвера величина кроку КД може змінюватися від 1,8 кут. град. до 1/512 цієї величини у режимі "мікрокроку". Можна оцінити величину основного кроку в мм.



$$l_{ш} = \frac{2\pi \cdot R}{200} \approx 0.5 \text{ мм}, \quad (1)$$

де  $l_{ш}$  - величина основного кроку,  $R$  – радіус шестерні актуатора КД.

Кількість кроків необхідна для переміщення каретки на відстань, наприклад, 0,5 метра (від центрального положення до крайнього положення), можна розрахувати так:

$$N = \frac{A}{l_{ш}} \approx 10000 \quad (2)$$

де  $A$  – амплітуда коливання.

Реалізація синусоїдального руху каретки вимагає розрахунку моментів здійснення чергового кроку згідно з формулою наведеною в [2]. Для зберігання, оперативного зчитування без затримок та передачі контролеру значень інтервалів між кроками потрібна наявність оперативної або іншої пам'яті, що швидко зчитується, від 100 кБайт і більше для  $\frac{1}{4}$  періоду коливань. Розраховані значення для  $\frac{1}{4}$  періоду можуть бути використані для реалізації повного періоду коливань. Іншим варіантом реалізації синусоїдального руху може бути представлення його кінцевим числом лінійних переміщень з відповідним фіксованим значенням швидкості і тривалості часового проміжку. Сталість швидкості в межах одного лінійного відрізка означає рівність часових інтервалів кожного кроку. У такому разі розмір пам'яті для зберігання величин міжкрокових інтервалів зменшується у сотні разів. Заміна руху по синусоїді рухом по ламаній полілінії очікувано супроводжуватиметься збільшенням нелінійних спотворень у порівнянні з еталонним. Очевидно, що зі збільшенням числа відрізків, що використовуються для представлення синусоїди, зменшується ступінь відмінності двох графіків.

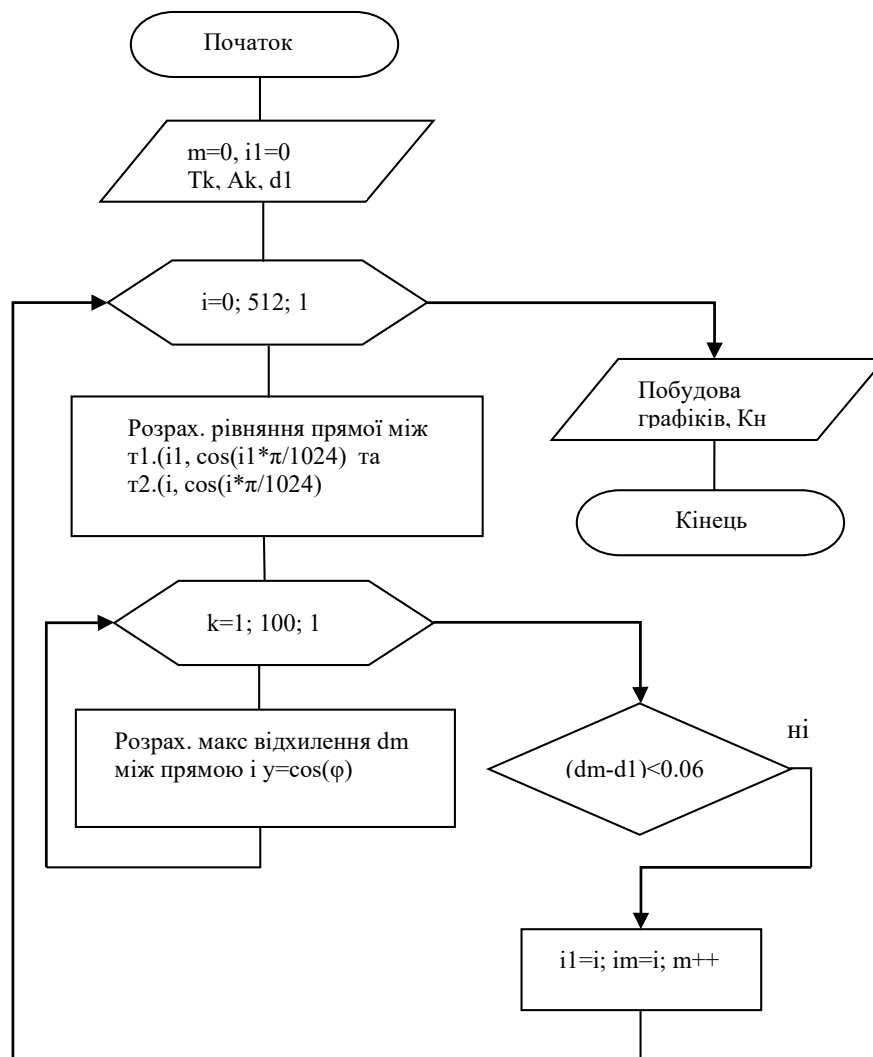
Використання ідеї заміни експоненціальної кривої розгону-гальмування ступінчатою залежністю швидкості від часу використовується, наприклад, у [3]. У роботі [4] пропонується замість S-кривої розгону застосовувати експоненціальне прискорення, рівномірне прискорення, гальмування за параболічним законом. Згладжені криві прискорення і швидкості дозволяють уникнути пропуск кроків і робить переміщення більш плавним. Дається математичне обґрунтування методу розрахунку міжкрокових інтервалів.

Для оцінювання рівня відмінності можна використовувати кілька оцінок: коефіцієнт кореляції, Евклідова відстань, різницю площ двох графіків, сума квадратів відхилень у заданих точках (квадратичне наближення), максимум модуля різниці та ін. У роботі паралельно з використанням у якості міри подібності модуля різниці ординат здійснюється розрахунок коефіцієнта нелінійних спотворень ( $K_n$ ), оскільки у вимірювальному блоці комплексу передбачено вимірювання параметрів датчиків, що тестуються на частоті коливань каретки з датчиками. Тому оцінка  $K_n$ , а отже, і величини гармонійних складових дуже важлива. Для оцінки величини відхилень двох графіків розроблено алгоритм і реалізовано програму розрахунку точок перелому (точки на синусоїді, в яких закінчується попередній відрізок і починається наступний), числа кроків для кожного кутового інтервалу (чи часового), частоти здійснення



кроків в залежності від заданої частоти коливань каретки, амплітуди коливань (максимального відхилення каретки від положення рівноваги) та максимальної величини відхилення ординат двох графіків.

Алгоритм роботи програми наведено на рис.1. На початку роботи задаються початкові значення:  $A_k$ -амплітуда коливань,  $T_k$ -період коливань,  $d_1$ -максимальне відхилення ординат графіків прямої і косинусоїди. Далі в тілі циклу починаючи з першої точки на графіку косинусоїди до кожної наступної будується прямий відрізок і для кожної точки на ньому у другому циклі обраховується  $d_m$  - максимальне відхилення кожної точки цього відрізка від відповідних точок на косинусоїді.

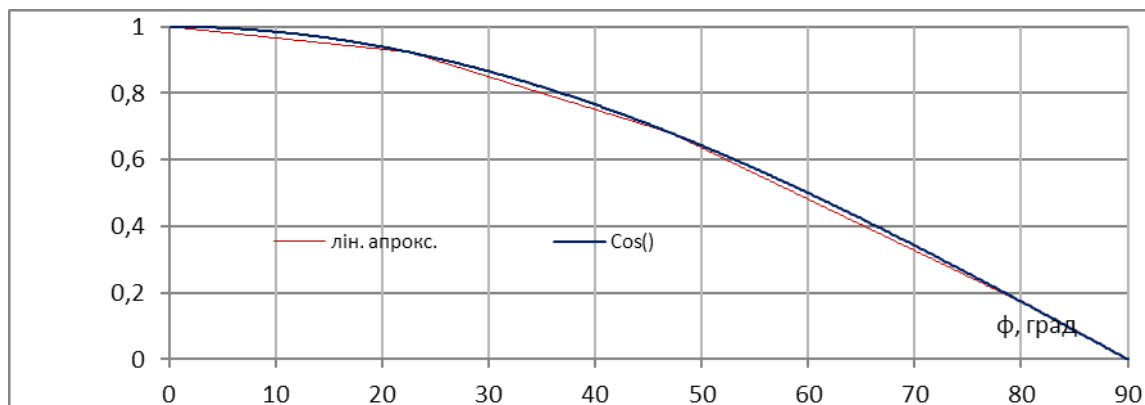


**Рис.1. - Алгоритм роботи програми розрахунків параметрів руху.**

Якщо розрахована величина менше за задану – відбувається перехід в перший цикл; кінцева точка відрізка пересувається на наступну точку на косинусоїді і процес повторюється. У випадку співпадіння  $d_1$  та  $d_m$  кінцева точка першого відрізка стає першою точкою наступного і процес повторюється. По досягненню останньої точки (512) отримуємо набір прямих відрізків сполучених послідовно. За результатами обчислень будуються графіки і розраховуються параметри подібності графічних представлень.



В результаті роботи програми будуються обидва графіки (Рис. 2). По осі абсцис - кут відхилення каретки з кроком  $\Delta\varphi = 0,17578125$  град. Така величина кроку вибрана для зручності подальших розрахунків  $K_n$  із залученням апарату FFT ( $\Delta\varphi = 360/2048$ ). Симетрія періодичних графіків дозволяє навести зображення лише четвертої частини всього періоду коливань.

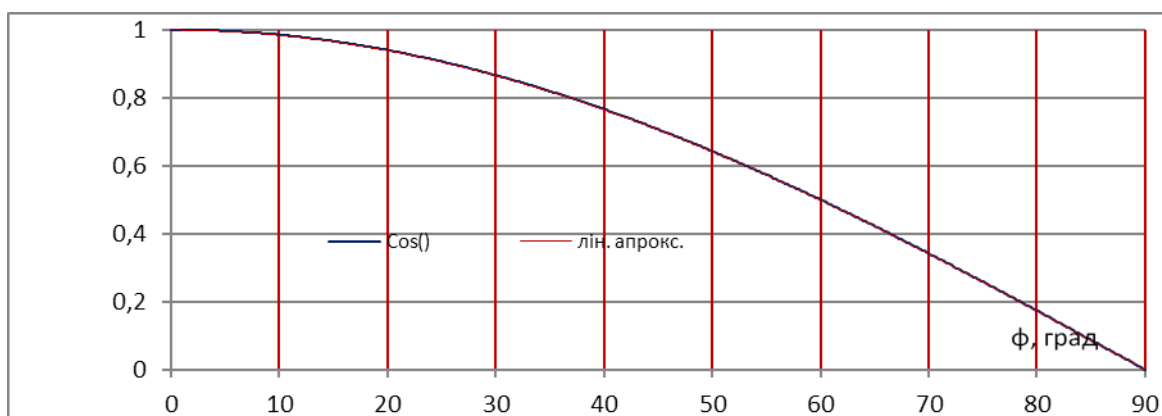


**Рис.2 - Кусково-лінійна апроксимація  $y = \cos(\varphi)$  чотирма відрізками (на  $\frac{1}{4}$  періоду)**

Куту 90 град. відповідає нульове відхилення від положення рівноваги незалежно від періоду коливань. Для спрощення сприйняття і покращення роздільної здатності амплітуда коливання на графіку дорівнює одиниці, а кут лежить в діапазоні 0 – 90 град. кут.

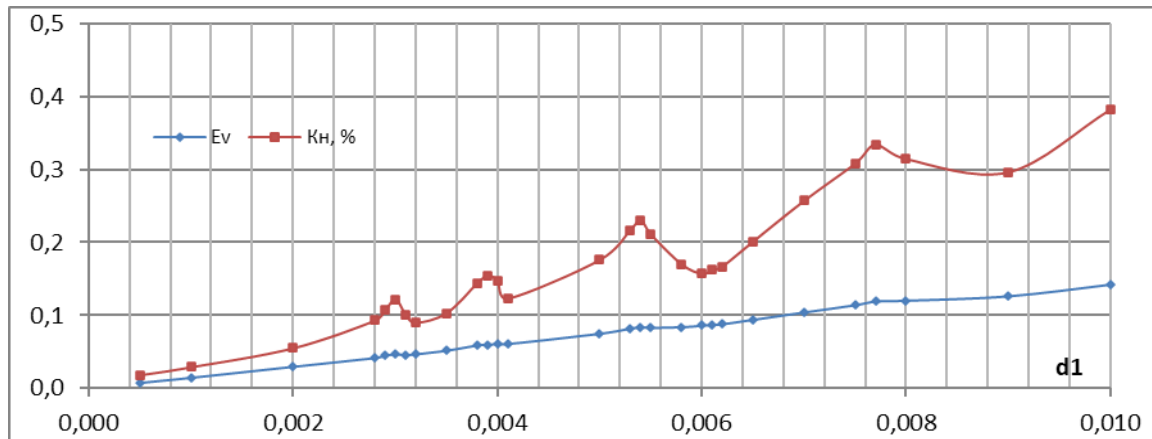
Ступінь відмінності двох графіків визначається параметром  $d_1$ , що використовується в програмі, який задає максимальне допустиме відхилення ординат двох графіків для всього періоду.

На рис. 3 представлений аналогічний графік зі збільшеним числом прямолінійних відрізків до 10.



**Рис.3 - Кусково-лінійна апроксимація графіка функції  $y = \cos(\varphi)$  10-ма відрізками (на  $\frac{1}{4}$  періоду)**

З малюнка видно, що збільшення кількості відрізків призводить до значного покращення «якості» графіка. Узагальнені результати вимірювань деяких оцінок міри близькості для ряду значень параметра  $d_1$  наведено на рис.4.



**Рис.4 - Залежність Кн та Ev від максимального модуля різниці d1.**

Евклідова відстань (Ev) є найбільш зрозумілою та інтерпретованою мірою відмінності або близькості об'єктів і є геометричною відстанню в багатовимірному просторі. Воно обчислюється за теоремою Піфагора. У нашому випадку Ev обчислюється як квадратний корінь від суми квадратів різниці ординат на кожному кроці (512 точок). Кн дорівнює відношенню середньоквадратичного значення всіх вищих гармонік сигналу до величини першої гармоніки:

$$Кн = \frac{1}{U_1} \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots} \quad (3)$$

Задання величини d1 впливає як на оцінні параметри схожості графіків так і на число прямих відрізків і відстань точок перелому від початку відліку в кутових одиницях. Тому для певних значень d1 можуть виникнути ситуації, коли відстань між точками перелому (найбільших неоднорідностей графіка) може становити точну частину від періоду коливальних, а значить може розглядатися як додаткова гармонійна складова результуючого сигналу. Це підтверджується графіком залежності Кн від d1. Наприклад, для d1=0,0054 7-а гармоніка у спектрі сигналу збільшена більш ніж у 22 рази порівняно з величиною цієї гармоніки для значення d1=0,006. Цьому випадку відповідає відстань між першою та четвертою точками перелому рівна 49,5 град. і між 4-ою та 2-ою (у наступному квадранті) 52 град. Це можна розглядати як додатковий сигнал, що заважає, на частоті близької до 7-ї гармоніки. Тобто спектральний склад сигналу, який описується ломаною лінією в значній мірі визначається величиною параметра d1.

**Висновки.** Запропоновано спосіб представлення синусоїдального закону руху каретки рухом кількома часовими інтервалами з фіксованою швидкістю. Таке рішення значно спрощує реалізацію коливального періодичного руху. Величина Кн суттєво залежить від числа лінійних відрізків, які представляють чи моделюють синусоїду. Коректним вибором величини максимального відхилення можна мінімізувати Кн кусково-лінійної функції для вибраної частоти коливальних а значить поліпшити умови для виділення корисного сигналу при виконанні вимірювань. Отримані результати планується використати для розробки спеціалізованого ПО, яке стосується управління КД, віброкалібрувального комплексу.



## Література.

1. О.А. Владимирський, І.А.Владимирський, А.П.Іващенко, І.П.Криворучко, Розробка структури низькочастотної автоматизованої вібро-калібрувальної установки НАВКУ-3. Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць. Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України. Вип. 89, Київ, 2019 р.-с.45-49.
2. І.П.Криворучко, Методика розрахунку параметрів управління крокових двигунів для моделювання руху довільного характеру, Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць. Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України. Вип. 91, Київ, 2020 р.
3. X. Wei, "Acceleration and Deceleration Control Design of Step Motor Based on TMS320F240," *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 501-504, 2011.
4. Zeng, Min & Hu, Cheng-Zu & Hu, Peng-Fei. (2016). Control Algorithm of Acceleration Curve for Stepper Motor. *Journal of Control and Systems Engineering*. 4. 32-39. 10.18005/JCSE0401004.

**Abstract.** To simplify the control of the stepper motor in the case of sinusoidal motion of the carriage of the vibro-calibration complex, it is proposed to represent this motion by the sum of segments with a fixed speed. An algorithm for calculating breakpoints and pulse repetition frequencies depending on the magnitude of the maximum deviation between the graphs of motion, amplitude and frequency of oscillations is presented. A graph of the dependence of the non-linear distortion coefficient on the value of the maximum deviation is given.

**Keywords:** stepper motor, sinusoidal motion, vibration calibration complex, piecewise linear approximation, nonlinear distortion coefficient.