



УДК 519.6: 681.5

**FEATURES OF ACCELERATED CARRIAGE MOVEMENT IN THE  
LINEAR DRIVE SYSTEM OF VIBROCALIBRATION COMPLEX  
ОСОБЛИВОСТІ ПРИСКОРЕНОГО РУХУ КАРЕТКИ В СИСТЕМІ ЛІНІЙНОГО  
ПРИВОДУ ВІБРОКАЛІБРУВАНЬНОГО КОМПЛЕКСУ**

**Kryvoruchko I.P. / Криворучко І. П.**  
researcher/н. снівр.

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.** Запропоновано режим рівноприскореного коливального руху як одного з можливих для виконання вібродіагностичних вимірювань. Графік зміни прискорення на проміжку рівному половині коливання складається з шести ділянок: синусоїдального розгону, сталого, косинусоїдального, синусоїдального гальмування, сталого і косинусоїдального. Надаються рівняння та графіки для розрахунків прискорення, швидкості та переміщення як функції часу. Наводиться та описується алгоритм розрахунку міжкрокових інтервалів для реалізації такого руху. У відповідності з цим алгоритмом проведені розрахунки параметрів руху на конкретному прикладі. Акцентується увага на існуванні певних обмежень для величин параметрів, які враховуються у обчисленнях.

**Ключові слова:** кроковий двигун, вібро-калібрувальний комплекс, рівноприскорений рух, алгоритм.

### **Вступ**

Одним із можливих типів руху каретки вібро-калібрувального комплексу є рівноприскорений коливальний рух. Привабливість такого виду переміщення каретки для вирішення задач віброкалібровки та вібродіагностики пов'язана зі сталістю величини прискорення на певному часовому інтервалі коливань.

Взагалі прискорений/гальмівний рух використовується як елемент переміщення об'єкту від однієї точки до іншої. При цьому цей шлях складається з трьох частин: прискорення - для швидкого досягнення оптимальної швидкості, ділянки з постійною швидкістю – основна частина переміщення та гальмування аж до нульової швидкості при досягненні кінцевої точки шляху. Характер зміни прискорення на ділянці прискорення/гальмування може бути лінійною, експоненціальною, параболічною, S-типу та ін. При лінійному законі зміни прискорення можливі пропуски кроків та виникають залишкові вібрації при досягненні кінцевого положення.

Прискорення/гальмування S-типу – це метод зміни швидкості, при якому крива зміни швидкості в часі наближається до форми "S" в процесі прискорення або уповільнення.

Можливість управління кроковим двигуном (КД) для реалізації такого характеру руху згадується у роботі [1]. Розглядається алгоритм зміни частоти управляючих імпульсів для реалізації прискорення/гальмування за трапецеїдальному та параболічному законам. Показано пришвидшення в досягненні кута повороту за параболічним законом зміни прискорення на 21% по відношенню до трапецеїдального.

Новий підхід реалізації S-типу кривої розгону/гальмування наведено в [2].



У якості змінної при розрахунках параметрів руху береться не час, а число імпульсів, необхідне для переміщення каретки з однієї точки до іншої. Тут розглядається варіант лінійного характеру зміни прискорення з часом. Тому в точках перелому графіка:  $a(n) = a_0 + kn$ , на графіку руху будуть спостерігатися нелінійності. Крім того, основна задача даної роботи полягала у спрощенні розрахунків для реалізації переміщення каретки з однієї позиції до іншої. Альтернативі S-кривій у роботі [3] пропонується алгоритм розгону, який включає експоненціальний ріст, рух з постійним прискоренням та гальмування за параболічним законом.

Для реалізації рівноприскореного руху з метою виконання процедур щодо віброкалібровки важливо не саме переміщення, а точне відтворення графіка руху з урахуванням часових параметрів: частоти коливань та синхронності у відповідності з рівнянням руху.

З метою забезпечення гладкості графіка рівняння прискорення від часу пропонується представити його у вигляді тригонометричної функції, а саме:

$$a(t) = a_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

де  $a_0$  - амплітудне значення прискорення,  $\omega$  - кругова частота коливання, яка визначається так:  $\omega = \pi/2t_0$ , де  $t_0$  - 1/4 періоду коливань, який відповідає синусоїдальній частині зміни прискорення.

Як видно з рівняння (1)  $t_0$  - це значення часу коли прискорення набуває амплітудного значення і далі не змінюється (рис.1). Цей перехід відбувається плавно.

Для прикладу, на рис.1 ця величина складає 10 одиниць по вісі t.

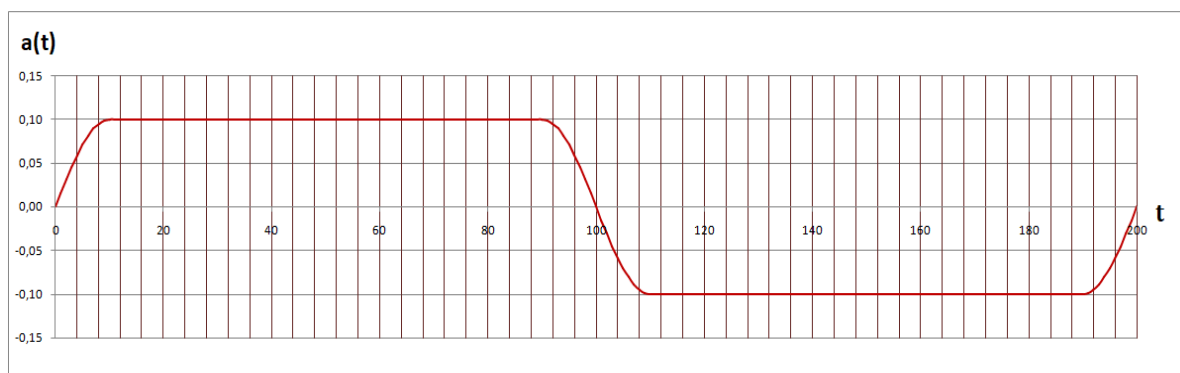


Рис.1 Залежність прискорення від часу.

В діапазоні  $t \in [10, 90]$  здійснюється рівноприскорений рух з величиною прискорення рівною  $a_0$ . Далі в діапазоні від 90 до 100 рух відбувається з прискоренням:

$$a(t) = a_0 \cos(\omega t) \quad (2)$$



В подальшому, в інтервалі значень  $t \in [100, 200]$ , відбувається гальмування, а рівняння руху відрізняються від наведених вище лише знаком.

Слід зауважити, що зображеному на графіку інтервалу часу від 0 до 200 відповідає переміщення каретки від одного крайнього положення до іншого, що становить половину періоду колювання. Для зручності розгляду, враховуючи симетричний характер графіка, час розгону (0-10) і час зменшення прискорення до нуля (90 -100) позначаємо через  $t_o$ . Інтервал сталого значення прискорення позначимо через  $T_m$ . Тобто  $(T_m + t_o)$  – це момент початку зменшення прискорення. Тоді весь інтервал додатних значень прискорення буде складати  $T_m + 2 t_o$  (так само як і від'ємних).

На рис.2 зображено графік зміни у часі величини швидкості. Відповідні рівняння розраховані з урахуванням характеру зміни прискорення (рис.1).

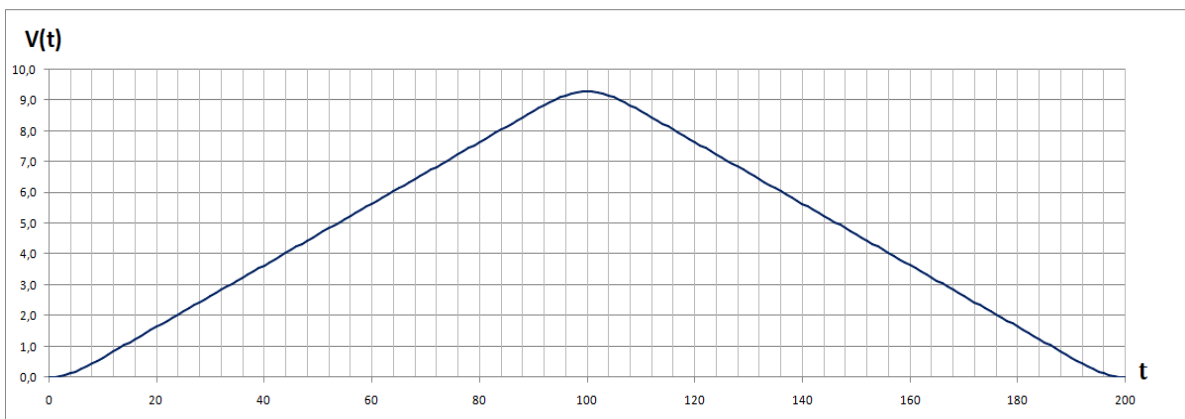


Рис.2 Залежність швидкості від часу.

Наведений графік є наслідком інтегрування трьох рівнянь для прискорення, зображених графічно на мал.1.

Не наводячи процедури розрахунків  $V(t)$  даємо їх кінцеві аналітичні вигляди для кожного з трьох інтервалів.

$$V(t) = \frac{a_o}{\omega} * (1 - \cos(\omega t)), \quad 0 \leq t \leq t_o \quad (3)$$

$$V(t) = a_o * (t - t_o) + \frac{a_o}{\omega}, \quad t_o \leq t \leq t_o + T_m, \quad (4)$$

де  $T_m$  – інтервал часу від  $t_o$  до  $(100 - t_o)$ .

$$V(t) = \frac{a_o}{\omega} * \sin(\omega(t - T_m - t_o)) + a_o T_m + \frac{a_o}{\omega}, \quad T_m + t_o \leq t \leq 2t_o + T_m \quad (5)$$

Для розрахунків параметрів руху каретки в системі лінійного приводу – кроковий двигун, а саме: міжкрокових інтервалів, загальної величини переміщення з урахуванням обмежень на величин прискорення та швидкості, слід мати аналітичні рівняння руху у вигляді  $L = F(t)$ .

Тому рівняння (3), (4) та (5) стали вихідними для отримання рівнянь руху у відповідних інтервалах часу.

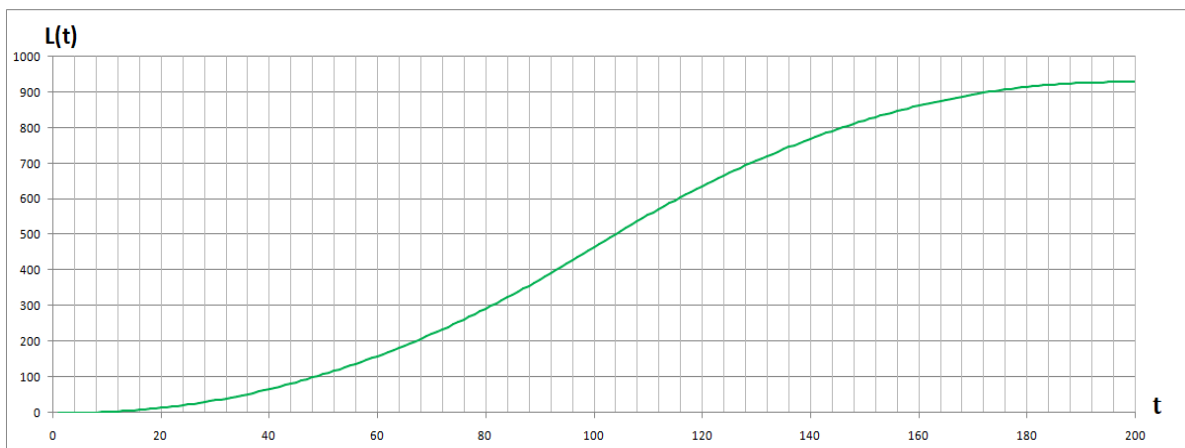


$$L(t) = \frac{a_o}{\omega} t - \frac{a_o}{\omega^2} \sin(\omega t), \quad 0 \leq t \leq t_o \quad (6)$$

$$L(t) = \frac{a_o(t-t_o)^2}{2} + \frac{a_o(t-t_o)}{\omega} + \frac{a_o}{\omega} t_o - \frac{a_o}{\omega^2}, \quad t_o \leq t \leq t_o + T_m \quad (7)$$

$$L(t) = \left( a_o T_m + \frac{a_o}{\omega} \right) (t - T_m + t_o) - \frac{a_o}{\omega^2} \cos(\omega(t - T_m + t_o)) + \frac{a_o}{\omega} t_o + \frac{a_o}{2} T_m^2 + \frac{a_o}{\omega} T_m, \quad T_m + t_o \leq t \leq 2t_o + T_m \quad (8)$$

На рис.3 наведено графік руху каретки на протязі всього інтервалу часу, який складає половину періоду коливань.



**Рис.3 Залежність відхилення положення каретки від часу на інтервалі рівному половині періоду коливань.**

Кроковий двигун характеризується ступінчастим характером обертання якоря. Обертальний рух якоря за допомогою спеціального пристрою - актуатора перетворюється на послідовне ступінчасте лінійне переміщення каретки. Розмір 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.

$$dl = \frac{2\pi \cdot R}{200}, \quad (9)$$

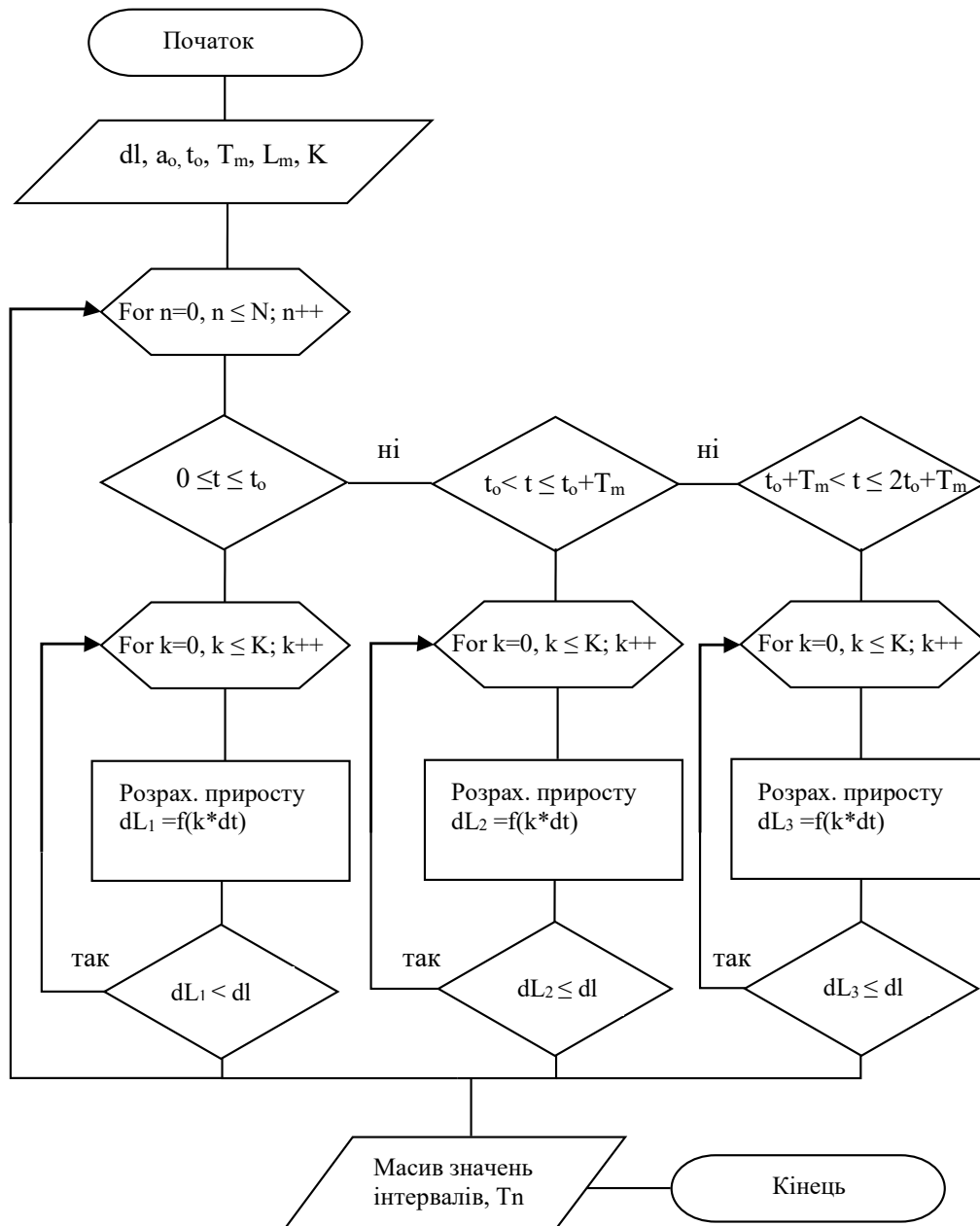
де  $dl$  - величина основного кроку,  $R$  – радіус шестерні актуатора КД.

Для прикладу, величина кроку для крокового двигуна з шестернею актуатора діаметром 16мм становить приблизно 0,5 мм. Якщо часовий інтервал між здійсненням кроків постійний, тоді швидкість обертання і лінійне переміщення каретки теж буде близькою до рівномірної. Через симетрію графічних залежностей для швидкостей та прискорення графік руху каретки для другої частини періоду коливань теж буде симетричним відносно вертикальної осі, що проходить через абсцису  $t=200$  (рис.3).

Тому розраховані значення міжкрокових часових інтервалів для однієї половини будуть такими ж що і для другої половини. Другою задачею, окрім отримання відповідних рівнянь руху, є розробка алгоритму розрахунків



міжкрокових інтервалів (рис.4), які забезпечать рух каретки у відповідності з отриманими рівняннями руху.



**Рис.4 Алгоритм розрахунку міжкрокових інтервалів**

Крім визначених раніше при розрахунках міжкрокових інтервалів будуть використовуватися наступні параметри:  $k$  - число часових каліброваних інтервалів  $dt$  які використовуються як міра. Величина цього інтервалу визначає точність розрахунку міжкрокових інтервалів і ступень співпадіння отриманих результатів з теоретичними. Таким чином величину міжкрокового інтервалу можна представити як  $k*dt$ .  $K$  - це максимальне допустиме число  $k$ .  $N$  - максимальне можливе число кроків на всій базі, а  $n$  - це поточне його значення.

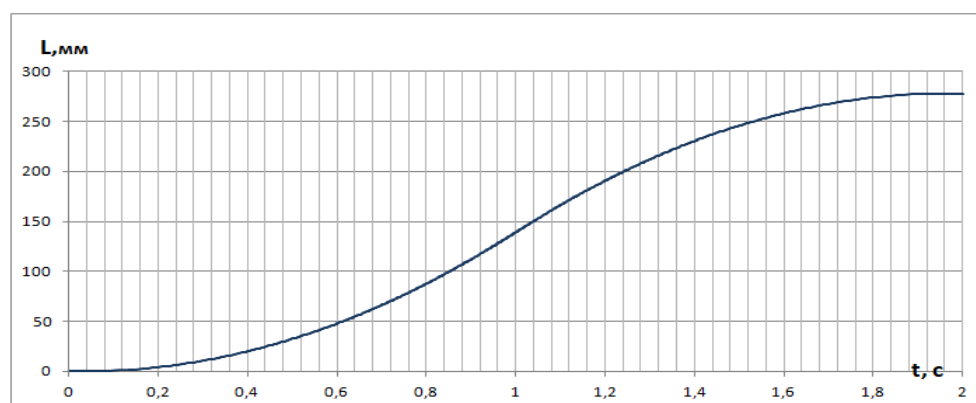
$N$  визначається величиною бази віброкалібрувального комплексу - величиною максимального переміщення каретки  $Lm$  і величиною кроку  $dl$  простим співвідношенням  $N=Lm/dl$ .



Для кожного кроку  $n$  обраховується поточне значення часової відстані від початку відліку, і в залежності в який часовий інтервал він попадає, вибирається відповідне рівняння (6, 7 чи 8) за яким і розраховується відстань  $L_n(k*dt)$  від початкової точки відліку. У цьому ж блоці розраховується різниця між отриманим значенням і яке відповідає попередньому кроку  $L_{n-1}(k*dt)$ . Якщо ця різниця менша за величину мінімального кроку  $dl$ ,  $k$  збільшується на 1. В іншому випадку фіксується величина  $T_n = k*dt$  (міжкроковий інтервал) для цього кроку, і процес повторюється знову для наступного значення  $n$ .

За наведеним вище алгоритмом розроблена програма розрахунку міжкрокових інтервалів. У якості прикладу розрахунку на рис. 5 наводяться результати обчислень для випадку коливання з параметрами, які зображені в таблиці нижче.

$dl = 0,5$ мм
$N = 554$
$a_0 = 300$ мм/с <sup>2</sup>
$K_m = 150000$
$t_0 = 0,2$ с
$T_m = 0,6$ с
$dt = 0,00001$ с



**Рис. 5 Графік руху каретки побудований на розрахованих програмою значеннях міжкрокових інтервалів**

Діапазон зміни міжкрокових інтервалів складає  $0,195 \div 10,975$  мс. Період коливань складає 4 с а максимальне відхилення 256 мм. На величину переміщення  $L$  значно впливають як прискорення  $a_0$  так і період коливань. Величина  $L$  обмежується базою лінійного переміщення конкретного вібро-калібрувального комплексу. Крім того існують обмеження на максимальні величини  $a_0$  та  $V$ , які зумовлені параметрами як самого КД так і динамічними характеристиками механічної частини вібро-калібрувального комплексу.

Коефіцієнт інерції має вирішальне значення для прискорення КД. Різниця у співвідношенні інерції між механічною системою та КД обмежує швидкість прискорення та гальмування і є причиною появи пропусків кроків.

Тому величини цих параметрів у програмі розрахунків міжкрокових інтервалів мають бути взаємопов'язані так, щоб обмежити перевищення максимально допустимого переміщення або прискорення (швидкості). Особливу увагу слід приділити кінцевому відрізку переміщення каретки біля краю бази, аби не допустити механічного пошкодження комплексу.

## Висновки

Запропоновано рівномірноприскорений коливальний рух каретки вібро-калібрувального комплексу як одного з можливих режимів коливань.



Наведено основні рівняння для розрахунку прискорення, швидкості та лінійного переміщення для кожної з трьох часових інтервалів розгону / гальмування.

Розроблено алгоритм розрахунку параметрів такого типу коливань і наводяться графічно наслідки обчислень для окремого випадку. Подальша робота над цією пропозицією полягатиме в розробці апаратно-програмної частини з метою її перевірки та оцінки.

### Література

1. Daode Zhang, Jingqi Wang, Lei Qian, Jun Yi, Stepper motor open-loop control system modeling and control strategy optimization, Archives of Electrical Engineering vol. 68(1), pp. 63–75 (2019)
2. Zhizheng Zhang and Yuanhua Yu (2022). S-type speed control curve based on the number of pulses *J. Phys.: Conf. Ser.* **2196** 012038
3. 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.** *The mode of uniformly accelerated oscillatory motion is offered as one of possible for performance of vibrodiagnostic measurements. The graph of the acceleration change in the interval equal to half the oscillation consists of six intervals: sinusoidal acceleration, steady, cosine, sinusoidal deceleration, steady and cosine. Equations and graphs are provided to calculate acceleration, velocity, and displacement as functions of time. The algorithm of calculation of interstep intervals for realization of such movement is resulted and described. In accordance with this algorithm, calculations of motion parameters were performed on a specific example. Emphasis is placed on the existence of certain restrictions for the values of parameters that are taken into account in the calculations.*

**Keywords:** *stepper motor, vibrocalibration complex, algorithm, uniformly accelerated motion.*