



УДК 519.6: 681.5

**METHOD OF FORMING STEPPER MOTOR CONTROL SIGNALS FOR IMPLEMENTATION OF SINUSOIDAL MOVEMENT****СПОСІБ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ УПРАВЛІННЯ КРОКОВОГО ДВИГУНА ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИНУСОЇДАЛЬНОГО РУХУ**

Kryvoruchko I.P./Криворучко І. П.

postgraduate / аспірант

ORCID: 0000-0003-2848-5348

Institute for modeling and energy engineering, Kyiv, Naumova, 15, 03164

Інститут проблем моделювання в енергетиці, Київ, Наумова, 15, 03164

Vladimirsky A.A./Владимирський О.А.

d.t.s. / д.т.н.

Institute for modeling and energy engineering, Kyiv, Naumova, 15, 03164

Інститут проблем моделювання в енергетиці, Київ, Наумова, 15, 03164

**Анотація.** Точність відтворення закону руху каретки віброкалібрувального комплексу в великій мірі залежить від точності розрахунку міжкрокових інтервалів - сигналів STEP драйвера крокового двигуна. В середовищі імітаційного моделювання MatLab&Simulink розроблено блок формування сигналів керування крокового двигуна (КД) для організації форми напруг живлення статорних обмоток в режимі мікрокроку. Наведені графіки напруг для лінійного та синусоїдального типу обертання ротора КД. В роботі дається опис способу розрахунків міжкрокових інтервалів для реалізації руху каретки за синусоїдальним законом. Для запропонованого способу розрахунків розроблена програма і наводиться оцінка якості відтворення змодельованого руху.

**Ключові слова:** кроковий двигун, міжкроковий інтервал, сигнал STEP

**Вступ**

Вибір крокового двигуна у якості електромагнітного приводу віброкалібрувальної установки визначились його безсумнівними перевагами, а саме: висока питома потужність, високе відношення моменту до інерції ротора, відсутність обмоток ротора, відсутність зовнішнього збудження ротора. Крім того особливістю КД є те, що на відміну від інших типів двигунів, позиціонування ротора КД цілком визначається числом кроків, які здійснює КД та величиною кроку. Хоча для надійної роботи КД в умовах змінного навантаження та широкого швидкісного діапазону рекомендується застосовувати зворотний зв'язок. Для більш точного позиціонування та плавного переміщення ротора КД використовують мікрокроковий режим, який передбачає переміщення ротора на кут кратний поділу основного кроку КД на число  $2^N$ , де  $N$  – ціле число. Ця міра квантування може сягати 1024. Саме мікрокроковий режим роботи вважається найкращим для точного позиціонування ротора. Для створення електромагнітного моменту, який взаємодіє з магнітними полями постійних магнітів ротора гібридного КД, обмотки статора заживлюють синусоподібними напругами  $u_a$  та  $u_b$ , зсунутими по фазі на кут  $\pi/2$ .

**Основна частина**

Рівняння, що описують роботу крокового двигуна наведені нижче [1]:



$$\begin{cases} u_a = R \cdot i_a + L \frac{di_a}{dt} - k_m \cdot \Omega \cdot \sin(p\theta) \\ u_b = R \cdot i_b + L \frac{di_b}{dt} + k_m \cdot \Omega \cdot \cos(p\theta) \\ J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = M_{Em} - B \cdot \Omega - T_l - T_{dm} \sin(4p\theta), \frac{d\theta}{dt} = \Omega \end{cases} \quad (1)$$

де  $M_{Em} = k_m(i_b \cos(p\theta) - i_a \sin(p\theta))$  - електромагнітний обертаючий момент, створюваний при заживленні статорних обмоток;  $R$  – опір статорних обмоток, Ohm;  $L$  - індуктивність обмоток, Н;  $i_a, i_b$  – струм в обмотках, А;  $p$  – число пар полюсів ротора;  $\Omega$  (Omega) – частота обертання ротора, rad/s;  $\theta$  - кут повороту ротора, rad;  $k_m$  - постійна обертаючого моменту двигуна, Nm/A;  $T_{dm}$  – фіксує момент – момент, який виникає між ротором та статором за відсутності струму в обмотках;  $B$  – коефіцієнт загального тертя, пропорційного швидкості обертання.

Величина  $km$  може бути розрахована за наступним виразом:

$$k_m = \frac{M_{hold}}{i_{max}} \quad (2)$$

де  $M_{hold}$  – утримуючий момент;  $i_{max}$  – максимальний фазний струм.

Нелінійність рівнянь (1) ускладнює їх розв’язок, тому вдаються до методів пониження порядку диференціювання, використовуючи оператор Лапласа.

Операторна форма запису рівняння обертального руху матиме наступний вигляд:

$$J \cdot p \cdot \Omega = M_{Em} - B \cdot \Omega - T_l - T_d \quad (3)$$

де  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор Лапласа.

Ці рівняння не враховують магнітне насичення статорних осердь а також ігнорується наявність міжполюсного потокощеплення. Для моделювання динамічних систем у роботі використовується пакет імітаційного моделювання Simulink, який входить до потужного пакету числового комп’ютерного моделювання MATLAB.

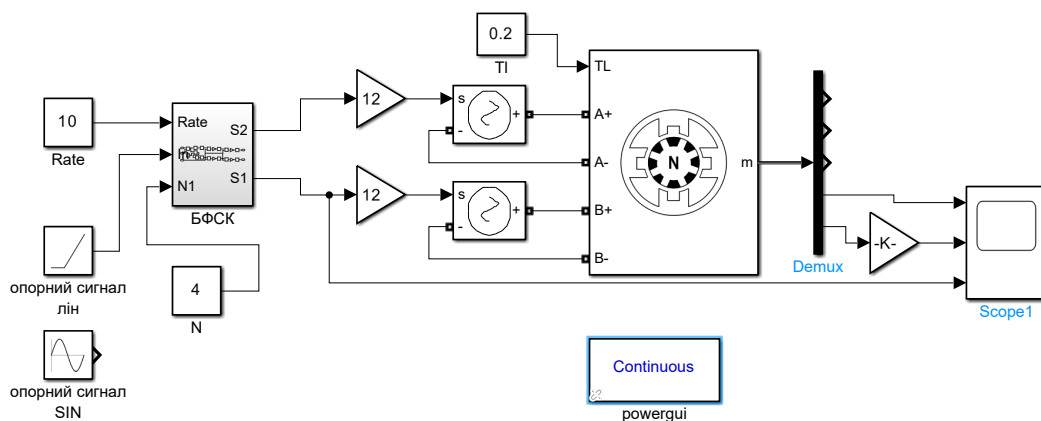


Рисунок 1. Simulink модель КД у системі a-b



На рисунку 1 наведена імітаційна модель КД у системі відліку a-b , що реалізує систему рівнянь (1). Блок формування сигналу керування (БФСК), блок схема якого зображена на рисунку 2, формує два синусоподібні сигнали S1 та S2 , зсунуті по фазі на кут  $\pi/2$  і необхідні для мікрокрокового режиму роботи КД. Блок “constant” (N) встановлює необхідний рівень квантування.

Система відліку a-b передбачає прив’язку координатної системи відліку кутів положення ротора відносно статора до осі однієї зі статорних обмоток.

У якості прикладу для моделювання використовувався ГКД формату NEMA23, що має наступні параметри:

Величина кроку, град	1.8	Індуктивність обмоток, Н	$1.4 \times 10^{-3}$
Номинальний струм, А	2.8	Опір обмоток, Ohm	0.7
Момент утримання, N·m	0.55	Інерція ротора, kg·m <sup>2</sup>	$15 \times 10^{-6}$
Коеф. в’язкого тертя, N·m·s	0.0002	Фіксуєчий момент, N·m	0.0013

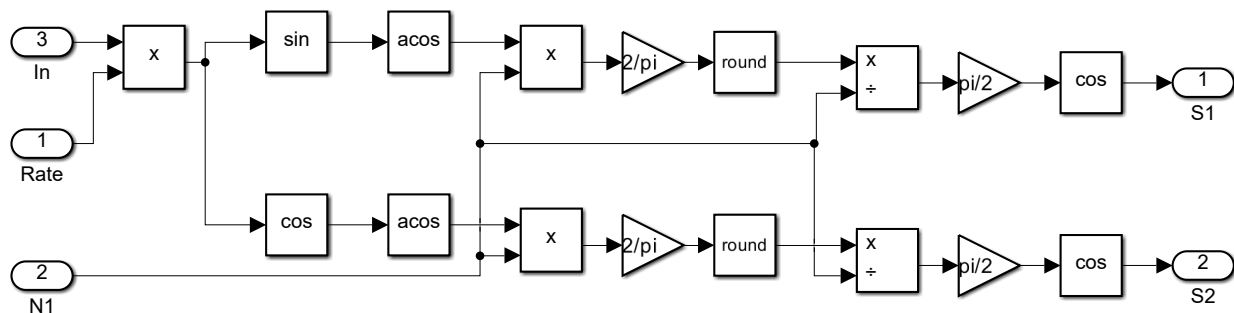


Рисунок 2. Simulink модель БФСК

Результати моделювання за вказаними величинами параметрів КД наведені на рисунку 3. У якості джерела лінійної зміни фази (вхід In) у моделі використовується блок “опорний сигнал лін”. Фазова швидкість  $\omega(t)$  задається параметром цього блоку і складає 100 рад/с. Це відповідає  $\omega(t)/2\pi$  коливань фазних напруг за секунду. Враховуючи те, що одному періоду цього сигналу відповідає обертання ротора на кут рівний чотирьом крокам, можна вивести формулу зв’язку швидкості обертання ротора КД ( $\Omega$ ) з кутовою частотою сигналу управління ( $\omega$ ):

$$\Omega = \frac{4 \cdot \omega \cdot S \cdot \pi}{2 \cdot \pi \cdot 180} = \frac{\omega \cdot S}{90} \tag{4}$$

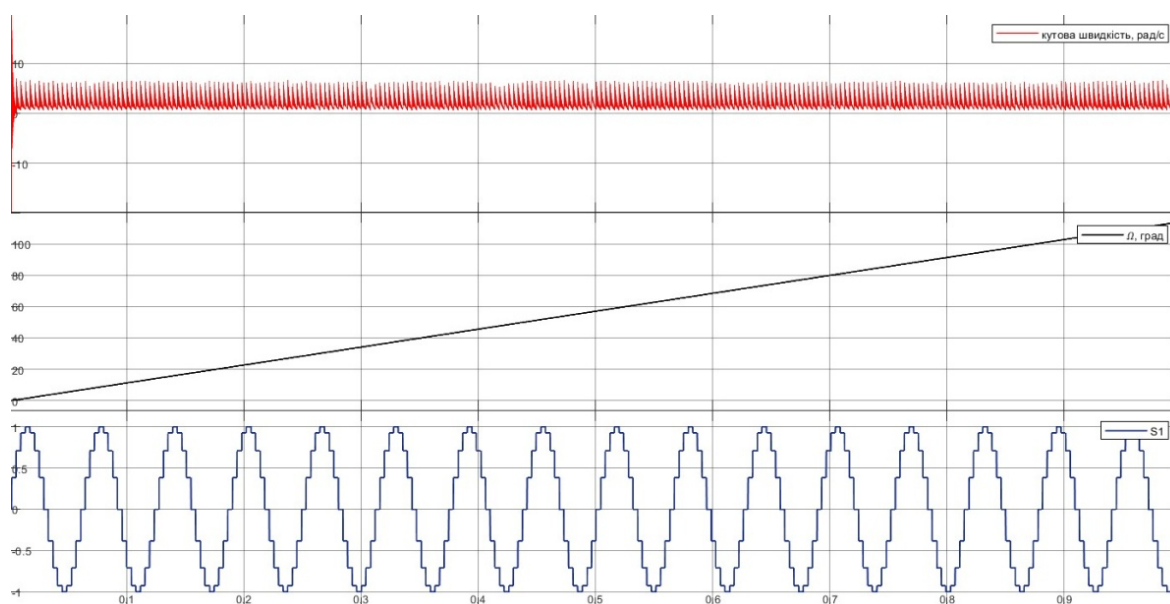
де S – величина кроку в град ( $1,8^\circ$ ). Для нашого випадку  $\Omega$  становить 2 рад/с, що відповідає прийнятому для математичної моделі КД співвідношенню:  $\Omega = \frac{\omega}{p}$

, де p – число пар статорних полюсів (для нашого КД  $p=50$ ).

На рисунку 3 представлені результати моделювання роботи КД при фіксованій швидкості обертання ротора  $\Omega=2$  рад/с. При збільшенні фазової частоти сигналів управління виникає ситуація коли ротор КД не може розпочати обертання. Це явище викликано зменшенням електромагнітного моменту, який вже не спроможний пересилити гальмівні моменти, що діють на



ротор. Причиною зменшення величини цього моменту є зменшенням струму в статорних обмотках через інерційність послідовно з'єднаних опору та індуктивності обмоток [2].



**Рисунок 3. Діаграми кутової швидкості, переміщення (кут) та одного з фазових сигналів (за рисунком 1)**

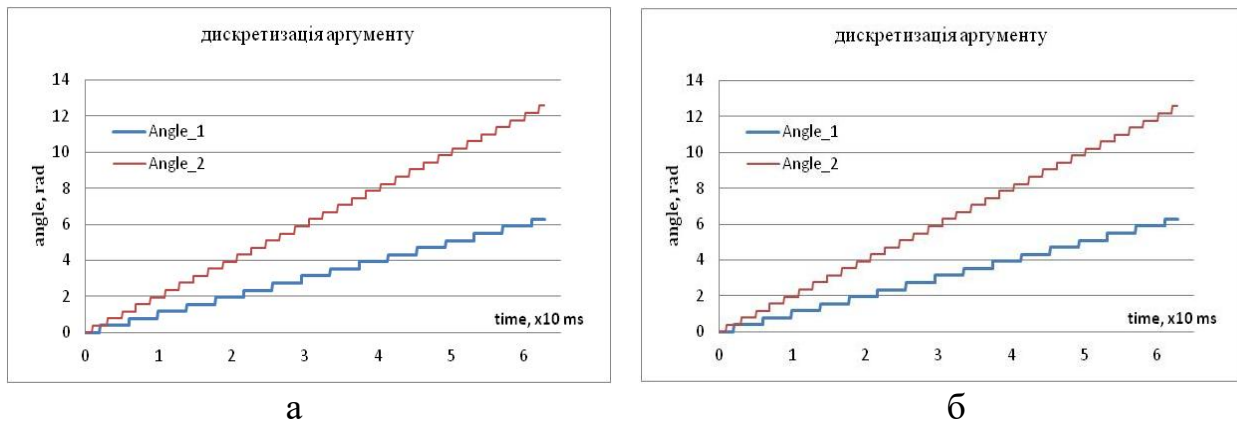
Реактивний опір індуктивності пропорційний частоті і починаючи з деякої її величини стає визначальною сумарного опору статорної обмотки. Постійна часу зростає і струм обмотки не встигає досягти номінальних значень, а отже і необхідного крутного моменту [3]. Одним із методів збільшення «стартової» частоти є збільшення напруги, а отже і струму живлення обмоток. Для потужних КД напруга живлення драйвера КД може сягати сотні вольт. Роль драйвера полягає в заживленні обмоток КД струмом необхідної величини для створення максимального крутного моменту. Головною умовою стабільної роботи КД є непереверження максимального значення середнього струму, визначеного виробником КД.

В загальному випадку роботу БФСК можна описати наступним рівнянням:

$$\text{Angle}(t) = \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot q \cdot \text{round}(2 \cdot \varphi(t) / \pi \cdot q), \quad (5)$$

де  $q$  –квантування і рівний  $1/N$  ( $N=2^k$ ,  $k$  – натуральне число),  $\varphi(t)$  – фаза.

На рисунку 4(а) наведено графіки розрахунків за наведеною вище формулою для двох  $\varphi(t)$  вигляду  $\varphi(t) = K * t$ . Графік  $\text{Angle}_2$  відповідає  $\varphi(t)$ , який має коефіцієнт  $K$  вдвічі більший за відповідний коефіцієнт для  $\text{Angle}_1$ . Розраховані величини  $\cos(\text{Angle}(t))$  для дискретизованих значень аргументу наведені на рисунку 4(б). З останніх графіків слідує пряма пропорційність частоти синусоподібних вихідних сигналів швидкості зміни аргументу (фази  $\varphi(t)$ ). У випадку іншого закону зміни  $\varphi(t)$ , частота вихідних сигналів також буде змінюватися відповідно до закону  $\varphi(t)$ .



**Рисунок 4. Графіки дискретизації лінійно-змінного вхідного сигналу та відповідного вихідного сигналу**

Для забезпечення коливального руху, як основного типу механічного переміщення каретки віброкалібрувальної установки [4], вимагається формування відповідного сигналу управління. У ролі БФСК для цього випадку можна використати блок вже згаданий вище. Але у якості опорного сигналу використовуємо блок “Sine wave” – генератор синусоїдального сигналу (опорний сигнал COS).

Деякі пояснення щодо роботи БФСК наведені нижче.

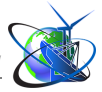
Вхід  $N_1$ - число, яке визначає ступінь квантування мікрокроку ( $q=1/N_1$ ), входи  $In$  та  $Rate$  еквівалентні і задають бажаний закон зміни фази коливання  $\phi_s$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  – вихідні синусоподібні сигнали для заживлення статорних обмоток. Нижче наведено графік цих сигналів для лінійної та синусоїдальної зміни фази. Фіксований рівень сигналу на входах блоку не викликає зміну сигналів на виходах, тобто БФСК реагує лише на зміну вхідних сигналів. Для вхідного сигналу змінної величини частота вихідного сигналу теж змінюється. Наприклад, для  $In(t) = A_m \sin(\Omega t)$  можна розрахувати інтегральну фазу за інтервал рівний  $1/4$  періоду коливань  $T_0=2\pi/\Omega$ .

$$\phi_s = \int_0^{1/4 T_0} In(t)' dt = \int_0^{1/4 T_0} A_m \Omega \cos(\Omega t) dt = -A_m \sin(\Omega t) \Big|_0^{1/4 T_0} = A_m$$

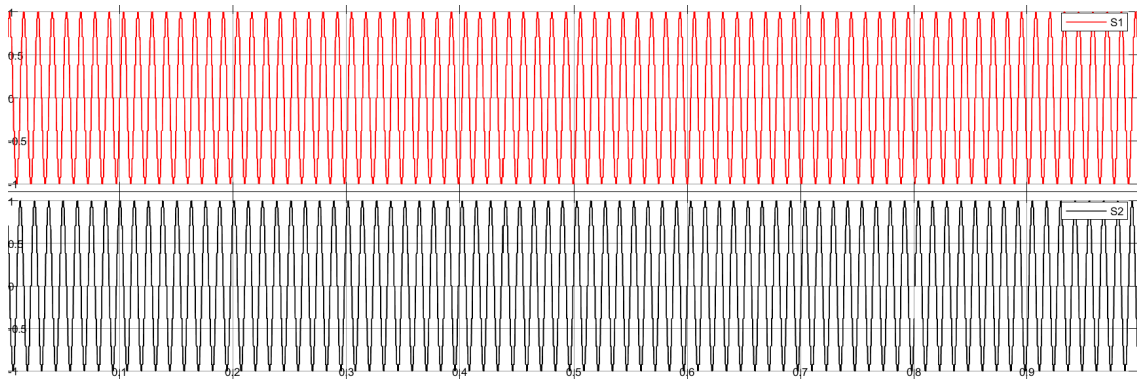
Тобто інтегральна фаза (в радіанах) рівна амплітуді вхідного сигналу. Знаючи величину  $\phi_s$  можна розрахувати число синусоїдальних коливань вихідних сигналів блоку -  $N_k = \phi_s/360$ . Враховуючи те, що одне коливання вихідного сигналу відповідає 4-м крокам КД і знаючи величину одного кроку  $S$  можемо навести формулу для амплітудного кутового відхилення коливання ротора КД:  $\phi_m = 4 * A_m * S/360 = A_m * S/90$ , тобто маємо таке ж співвідношення, як і для швидкостей.

Графіки вихідних сигналів БФСК для лінійної зміни фази ( $In$ ) та за синусом ( $A_{In}=50$ ) для  $N=4$  наведені відповідно на рисунках 5 та 6.

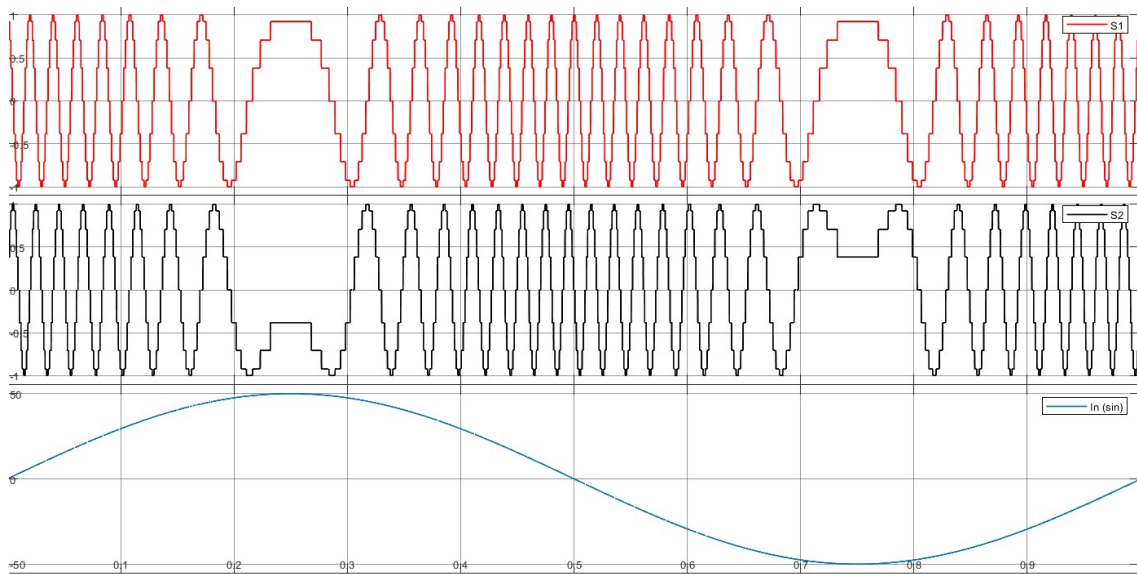
Період коливань каретки відповідає періоду вхідного сигналу  $In$ , а амплітуда коливань, яка є сумою кроків переміщення каретки від початку коливань до моменту рівного  $1/4$  періоду, пропорційна амплітуді вхідного сигналу  $In$ . На наступному графіку (Рисунок 7) можна бачити вплив збільшення



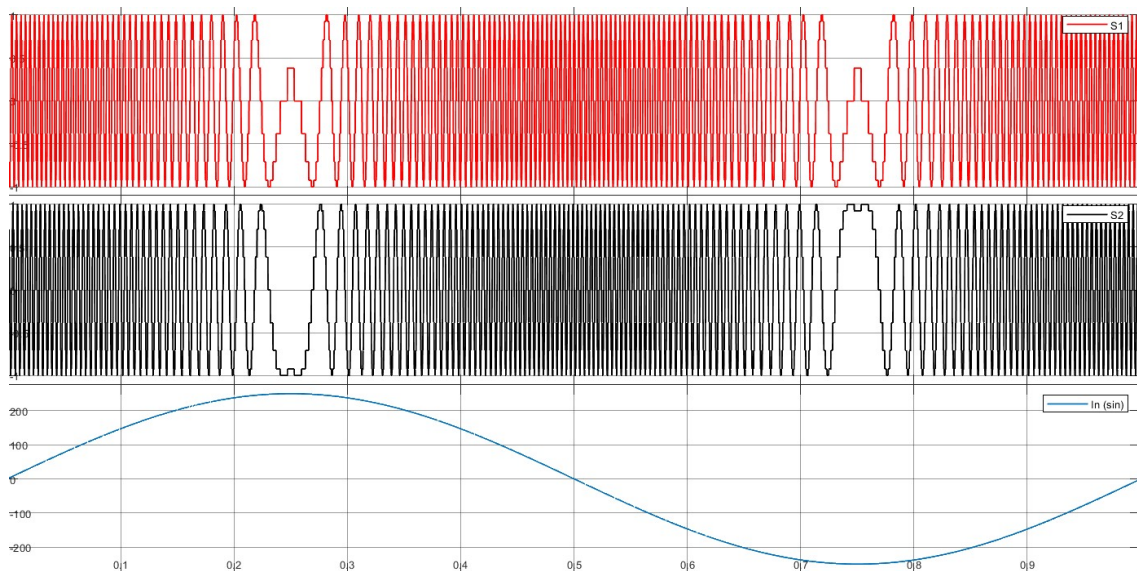
амплітуди колювання  $I_n$  на вигляд вихідних сигналів  $S_1$  та  $S_2$ .



**Рисунок 5. Графіки вихідних сигналів для лінійно-змінного  $I_n$ .**



**Рисунок 6. Графіки вихідних сигналів для входу типу  $I_n = A \sin(t)$**



**Рисунок 7. Графіки вихідних сигналів для  $I_n = 5.2 \cdot A \sin(t)$**

Аналіз аналітичного виразу вхідного сигналу і графічних залежностей для вихідних сигналів показує, що при такому виборі сигналу управління



$(A_m \sin(\Omega t))$  початок обертання ротора КД відповідає максимальній швидкості, що чисельно рівне  $A_m \Omega \cdot \cos(\Omega t) / 50 = A_m \Omega / 50$ . Тому раціональному вибору сигналу управління відповідає рівність початкової швидкості обертання ротора мінімальному значенню. За цих обставин вибираємо вхідний сигнал:  $In(t) = A_m \cos(\Omega t)$ . В початковий момент коливань – крайнє перше положення каретки і в другому крайньому (через півперіоду) швидкість має нульове значення. Ця особливість характеру коливань дає можливість змінювати напрямок руху каретки на протилежний в момент досягнення крайніх положень без значних механічних навантажень.

Максимальна швидкість обертання ротора КД обмежує максимальне кутову амплітуду коливання, а також лінійне переміщення каретки. Наприклад, для вибраного для моделювання КД нижче наведено максимальні кутові відхилення, швидкості та прискорення для різних частот коливання.

Частота коливання, Гц	Макс. ампл. відхилення, рад	Макс. швидк., рад/сек	Прискорення, рад <sup>2</sup> /сек
0,1	4500	2862	1735
1	450	2862	3943
10	22	1382	86764

Величину максимального прискорення можна розрахувати за формулою:

$$\Omega' = A_m \Omega^2 / 50.$$

Обмеження максимальної швидкості обертання для частоти 10 Гц можна пояснити досягненням прискорення критичної величини, яка спричинює зрив коливань. Для оцінки точності відтворення закону коливань порівнювалися крива опорного сигналу (задатчик) та вихідний сигнал - крива кутового відхилення  $\theta(t)$ . Нижче наведено дані порівняння для деяких частот коливань.

Частота коливання, Гц	Амп. коливання, рад	Макс. відхилення, рад	Відносне відхилення, %
0,1	4000	0,034	0,00085
1	400	0,027	0,00675
10	20	0,011	0,055

Слід пам'ятати про залежність максимальних швидкостей від навантаження на КД, яке може динамічно змінюватися. У випадку перевищення навантаження на КД вище певної величини, можливе порушення в роботі КД, яке може супроводжуватися пропуском кроків та втратою синхронізації.

В сучасних системах керування КД широко використовуються драйвери КД, які формують струми відповідних величин в статорних обмотках синхронно з дією імпульсів STEP, які спричинюють обертання ротора КД на



один крок (мікрокрок). Додатковий сигнал управління DIR драйвера визначає напрямок обертання ротора. Для вибору режиму мікрокроку слугують відповідні перемикачі або інтерфейс для програмного керування. Робота драйвера вимагає використання масиву даних міжкрокових інтервалів, які визначають характер зміни кута обертання ротора з часом. Можливість представлення синусоїди кусково-лінійною функцією і фіксації величини міжкрокових інтервалів на цьому лінійному відрізку розглядалася в [5]. Альтернативним до цього рішення є використання узагальненого виду рівняння (5), яке визначає роботу згаданого вище БФСК, з визначеною для вирішення нашої задачі функцією  $\varphi(t) = A_m \cos(\Omega t)$ . З рис. 4 видно, що момент початку мікрокроку співпадає з фронтом ступінчастої зміни розрахованої фази статорних напруг  $\text{Angle}(t)$ . Для отримання часових значень міжкрокових інтервалів було розроблено алгоритм і програмний код.

У якості вхідних параметрів для розрахунків були визначені:  $T$  – період коливань,  $Q_m$  – амплітуда коливань в кроках,  $N$  – значення мікрокроку (1, 2, 4 ..) і точність (дискретність по часу) розрахунків. Враховуючи періодичність косинусоїди розрахунки проводяться для  $1/4$  періоду коливань.

Дані розрахунку міжкрокових інтервалів для  $T=1\text{сек}$ ,  $Q_m=100$ ,  $N=4$  та  $k=0.00001$  були використані для оцінки подібності змодельованої залежності  $A_m \cos_m(\Omega t)$  та аналітичного виразу  $A_m \cos(\Omega t)$  для тих самих моментів часу. Коефіцієнт кореляції Пірсона становив  $R=0.962$ , а відносна евклідова відстань  $L_r=0.149$ . Відносна евклідова відстань розраховувалася за формулою:

$$L_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}}{\sqrt{N}}$$

## Висновки

В середовищі імітаційного моделювання MatLab&Simulink розроблено блок формування сигналів керування КД, який дозволяє легко сформувати форми статорних напруг КД за заданими параметрами руху. На прикладі конкретного КД змодельовані графіки сигналів статорних напруг для лінійного та синусоїдального типів обертання ротора.

Запропоновано спосіб розрахунку міжкрокових інтервалів для формування сигналів STEP драйверів КД. Отримані розрахункові оцінки подібності змодельованого закону руху та опорного показують високу схожість.

Наступним кроком досліджень роботи КД у якості приводу віброкалібрувальної установки буде дослідна оцінка запропонованого способу.

## Список літератури

1. Chiu-Keng Lai, Jhang-Shan Ciou, Chia-Chetsai,. "The stepper motor drive system design by matlab/simulink and fpga", IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 6, no. 3, pp. 49-56, 2018.
2. А.И Шеремет., Н.В. Климченкова, А.Г. Климченков. Математическое описание шагового электропривода и реализация его системы управления на





базе м/к Arduino //Научный вестник ДГМА. – 2017. - №3. –С. 88-96

3. М.Г. Чиликин. Дискретный электропривод с шаговым двигателем. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.

4. О.А.Владимирський, І.А.Владимирський, А.П.Іващенко, І.П.Криворучко, Розробка структури низькочастотної автоматизованої віброкалібрувальної 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.

5. І.П. Криворучко Кусково-лінійна апроксимація синусоїдального руху каретки віброкалібруваного комплексу. *SWorldJournal*, 2022, 11-01, р.79-84. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2022-11-01-59>**DOI**

*Abstract* The accuracy of reproducing the law of the carriage movement of the vibrocalibration complex depends to a large extent on the accuracy of the calculation of step intervals - STEP signals of the stepper motor driver. In the MatLab&Simulink simulation environment, a stepper motor control signal generation unit was developed to organize the shape of the power supply voltages of the stator windings in the microstep mode. The voltage graphs for the linear and sinusoidal type of rotation of the SM rotor are given. The paper describes the method of calculating step intervals for the implementation of carriage movement according to the sinusoidal law. A program has been developed for the proposed method of calculations and an assessment of the quality of reproduction of the simulated motion is provided.

**Key words:** stepper motor, step interval, STEP signal

Науковий керівник: д.т.н., Владимирський О.А.