DOI: 10.35681/1560-9189.2022.24.1.262939

УДК 621.3; 681.1

І. В. Косяк, О. А. Цубін
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Результати дослідження застосування мікрокрокового режиму при керуванні кроковим двигуном

Проведено аналіз і дослідження системи керування кроковим двигуном (КД) у мікрокроковому режимі. Розглянуто особливості розробки та побудови систем керування КД. Запропоновано реалізацію малобюджетної системи керування КД на основі драйвера TB67S109A.

Ключові слова: *кроковий двигун, мікрокрок, широтно-імпульсна модуляція, керування, мікрокроковий режим, драйвер.*

У прецизійному верстатобудуванні застосовується багато різних варіантів реалізації приводів точної подачі, що включають використання таких передач як шарикогвинтові пари, безлюфтові та зубчасті, п'єзоелектричні та магнітострикційні передачі із використанням двигунів постійного струму, крокових і лінійних двигунів. У багатьох пристроях, де потрібні малі переміщення і висока роздільна здатність, використовують крокові двигуни (КД).

Переваги крокових двигунів добре відомі. Вони можуть працювати в режимі розімкнутого контуру, точність якого, в основному, залежить від механічної точності двигуна. Вони рухаються з квантованими приростеннями (кроками), що дозволяє легко використовувати їх у системах руху з цифровим керуванням. Крім того, їхні керуючі сигнали мають прямокутну форму і тому легко генеруються з відносно високою ефективністю завдяки їхнім характеристикам включення/вимкнення. Але крокові двигуни не позбавлені проблем. Їхні великі імпульсні форми хвилі збудження створюють механічні сили, які збуджують і посилюють механічні резонанси в системі. Вони залежать від навантаження, і їх важко контролювати, оскільки у крокових двигунів власне демпфірування дуже мале.

При резонансі система КД може втратити синхронізацію і, отже, пропустити або отримати зайвий крок. Оскільки це система з розімкненим контуром, це означало би втрату інформації про місцезнаходження, що було би неприйнятним. Поширеним методом вирішення цієї проблеми є повне виключення смуги резонансних частот, але це може серйозно обмежити продуктивність системи. Крокові двигуни мають 200 кроків на оберт або 1,8 градуса на крок. Комерційно доступні крокові двигуни з найвищою роздільною здатністю мають 500 кроків на оберт або 0,72 градуса на крок [1].

© І. В. Косяк, О. А. Цубін

Одним із способів обійти проблеми, що пов'язані з кроковими двигунами, при збереженні їхніх переваг розімкнутого контуру, це використовувати їх у мікрокроковому режимі, хоча він і вимагає більш складної схеми керування [2]. Тому дослідження використання систем керування КД з метою їхнього здешевлення, доступності та універсальності застосування залишається актуальним завданням.

Дана робота присвячена аналізу та дослідженню побудови малобюджетної системи керування КД на основі спеціалізованого інтегрованого пристрою керування КД TB67S109A виробництва «Toshiba».

Актуальність розробки обумовлена тим, що системи керування КД, які зазвичай складаються із програмованого контролера та драйвера КД [3–5], та забезпечують мікрокроковий режим керування зі струмом навантаження в обмотках ≥ 3 А, мають зависоку вартість.

Мікрокроковий режим

У мікрокроковому режимі кожен із кроків поділено на дрібніші кроки або «мікрокроки». Перевагами мікрокрокового режиму є:

— плавне переміщення на низьких швидкостях;

— підвищена роздільна здатність позиціонування кроку в результаті меншого кута кроку;

— зменшення проблем з резонансом крокового двигуна;

— максимальний крутний момент як при низьких, так і високих швидкостях кроку.

Діаграми струму, а також послідовність операцій у разі повного або половинного кроку показують, що електрична послідовність повторюється після кожного четвертого повного кроку (рис. 1,*а*). Це явище крокового двигуна означає, що один повний «електричний цикл» складається з чотирьох повних кроків. Важливо, що один повний «електричний цикл» (тобто 360° «електричного кута») відрізняється від одного повного оберту ротора (360° механічного обертання). Один повний «електричний цикл» завжди складається з чотирьох повних кроків. Отже, один повний крок будь-якого крокового двигуна з будь-яким «кутом кроку» відповідає 360°/4 або 90° електричного кута.

Якщо цей «електричний кут» розділити на менші рівні кути та подати відповідний струм на обмотки статора, то це буде виглядати як на рис. 1,*б*. Тобто, кожен повний крок поділяється на мікрокроки шляхом подачі на фази двигуна проміжних рівнів струму.

Таким чином, ми можемо змінювати струм в одній обмотці за допомогою синусної функції кута φ в іншій обмотці з функцією косинуса φ. У кроковому двигуні стабільні положення ротора синхронізовані з потоком статора. Коли обмотки знаходяться під напругою, кожна з обмоток вироблятиме потік у повітряний зазор пропорційно струму в цій обмотці. Отже, потік у повітряному зазорі прямо пропорційний векторній сумі струмів обмоток у результуючому векторному напрямку. В режимах повного кроку та напівкроку номінальний струм подається на обмотки, який обертає результуючий магнітний потік у повітряному зазорі на 90° і 45° електричного відповідно з кожною зміною послідовності. При мікрокроковому режимі струм змінюється в обмотках у частках номінального струму.

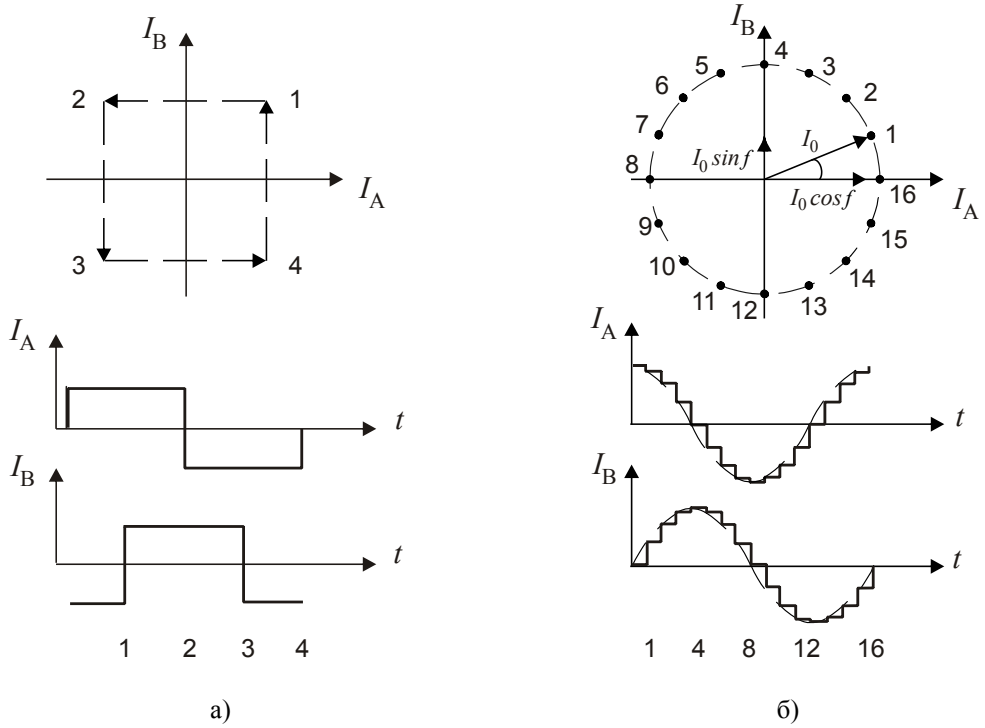

Рис. 1. Діаграми струму в обмотках крокового двигуна: а) при повнокроковому режимі; б) у режимі 4 мікрокроки на повний крок

Отже, результуючий напрямок магнітного потоку змінюється на долі 90° електричного струму. Зазвичай повний крок ділиться на 4/8/16/32/128/256 кроки. Довжина кроку, менша за 1/32 повного кроку, зазвичай не сприяє подальшому покращенню руху [6].

Для досягнення необхідного обертового потоку, розрахунок величини струму проводиться за формулою:

$$\begin{aligned} I_A &= I_0 \cdot \sin\varphi, \\ I_B &= I_0 \cdot \cos\varphi, \end{aligned} \tag{1}$$

де I_A — миттєве значення струму в обмотці статора A; I_B — миттєве значення струму в обмотці статора B; φ — кут в електричних градусах від повного кроку положення (кут мікрокроку); I_0 — номінальний струм обмотки.

Відповідно результуючий струм статора є векторною сумою струмів окремих обмоток:

$$I = \sqrt{(I_0 \cdot \sin\varphi)^2 + (I_0 \cdot \cos\varphi)^2} = I_0 . \tag{2}$$

Це показує, що при будь-якому куті φ результуючий струм залишається незмінним і дорівнює I_0.

Теоретично можна досягти нескінченної роздільної здатності з будь-яким кроковим двигуном. Оскільки форми хвилі струму збудження мають синусоїдальну, а не квадратну форму, стрибки між ступінчастими коливаннями усуваються

та пов'язані з ними коливання швидкості. Це значно покращує характеристики на низьких швидкостях обертання та допомагає уникнути проблем із резонансом.

Реалізація системи керування кроковим двигуном

На рис. 2 представлено узагальнену блок-схему системи керування КД з використанням мікрокрокового режиму. Сигнал з генератора імпульсів подається через керуючі елементи (перемикачі, які не зображені) на реверсивний лічильник, далі на постійні запам'ятовуючі пристрої (ПЗП). У ПЗП зберігаються таблиці двох синусоїдальних сигналів зміщених по фазі на 90°. Реверсивний лічильник використовується для генерування відповідних адрес для ПЗП і вихідних даних, які застосовуються для управління ЦАП, які, в свою чергу, формують синусоїдальні сигнали.

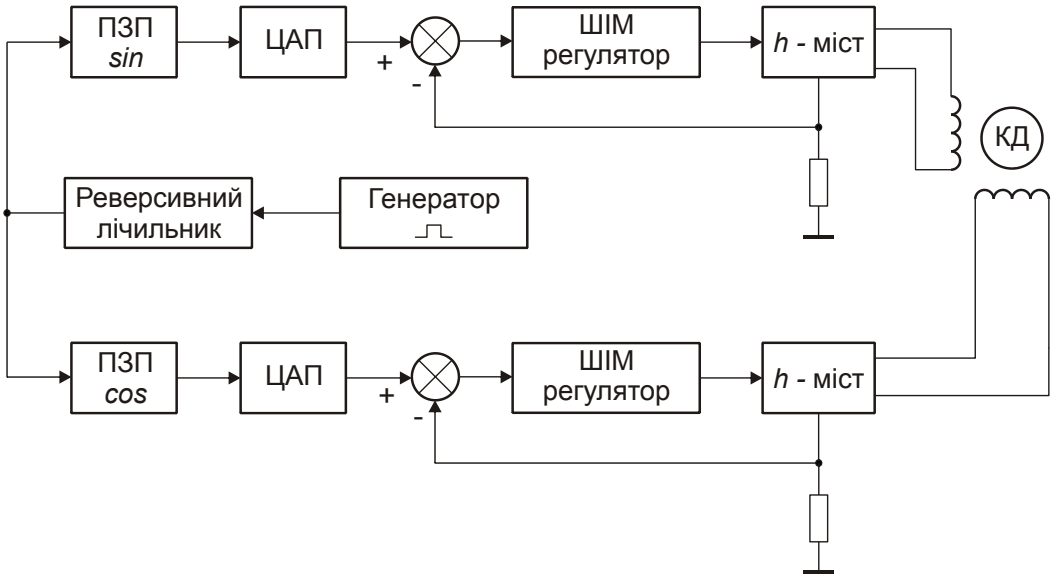

Рис. 2. Блок-схема управління КД у мікрокроковому режимі

Для формування багатьох мікрокроків, що становлять один повний крок, необхідно мати можливість регулювання струму. Управління КД здійснюється на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Керуючим сигналом для ШІМ-управління струмом в обмотках КД є сигнал порівняння синусоїдальної опорної напруги, сформованої цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП), і напруги з резистора (рис. 1), через який протікає струм в обмотці КД. При ШІМ-управлінні струм через обмотку можна контролювати, модулюючи тривалість імпульсів ШІМ, таким чином, що через котушку протікає тільки необхідний струм, який можна задавати.

Сформовані сигнали з ШІМ-регулятора подаються на силові каскади *H*-мости, які дають можливість прикласти напругу до навантаження у різних напрямках. Як правило *H*-міст виконано на транзисторах MOSFET, що дозволяє за допомогою керуючих сигналів перемикати полярність напруги, яка надходить на виконавчий пристрій.

Запропонована система керування КД побудована на основі спеціалізованого інтегрованого пристрою керування КД TB67S109A виробництва «Toshiba» вартістю < 4 $. В одному корпусі зібрані практично усі розглянуті раніше компоненти блок-схеми, представленої на рис. 2. TB67S109A — драйвер двофазного біполярного крокового двигуна, що використовує регулятори ШІМ, та дозволяє працювати в мікрокроковому режимі.

Основні особливості драйвера TB67S109A [7]:

— можливість керування одним біполярним кроковим двигуном;

— вихідна напруга до 50 В, струм навантаження до 4,0 А;

— привід постійного струму із ШІМ-керуванням;

— дозволяє працювати з повним, половинним, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 кроками;

— низький опір в увімкненому стані, 0,49 Ом;

— вихідний каскад на МОП-транзисторах;

— високоефективний механізм керування струмом двигуна (Advanced Dynamic Mixed decay);

— функція виводу сигналу виявлення помилок (TSD/ISD);

— вбудовані схеми виявлення помилок (відключення при перегріві (TSD), відключення при перевантаженні струму (ISD) та скидання при включенні живлення (POR));

— вбудований регулятор напруги VCC для використання у внутрішньому ланцюзі.

— тактова частота для роботи ШІМ може бути настроєна зовнішнім резистором і конденсатором;

— потребує незначної кількості зовнішніх елементів.

Драйвер TB67S109A містить схему управління, два незалежні ШІМ з контролем струму та силовий каскад, що складається з двох *H*-мостових схем із захистом від короткого замикання навантаження. Діапазон робочих напруг драйвера становить 10...50 В, що дозволяє використовувати його в системах керування двигунами з напругою 10, 24, 36 або 45 В. Таким чином, завдяки максимальній напрузі живлення 50 В забезпечується сумісність драйвера з широкою номенклатурою КД.

Для того, щоб отримати 32 мікрокроки, компанія Toshiba розробила удосконалений прецизійний алгоритм управління двигуном за допомогою широтно-імпульсної модуляції з контролем струму [8]. У цьому алгоритмі черговий крок формується вбудованим компаратором, який порівнює миттєве значення струму двигуна з порогом, заданим ЦАП.

На рис. 3 представлено розроблену тестову принципову електричну схему системи управління КД з мікрокроковим режимом. За допомогою перемикачів S1, S2, S3 можливо встановити режими ділення мікрокроків. Змінним резистором R8 регулюється частота імпульсів генератора і зрештою швидкість обертання валу КД. У даташиті [7] зазначено формули, за якими розраховується обмеження струму в котушках КД. За обмеження струму відповідають входи VREFA та VREFB драйвера TB67S109A, на які подається напруга в межах 0–5 В. При зазначених номіналах R2, R3, R5, R6 (рис. 3) обмеження струму дорівнює 3А. За допомогою перемикачів S4, S5 встановлюється напрямок обертання.

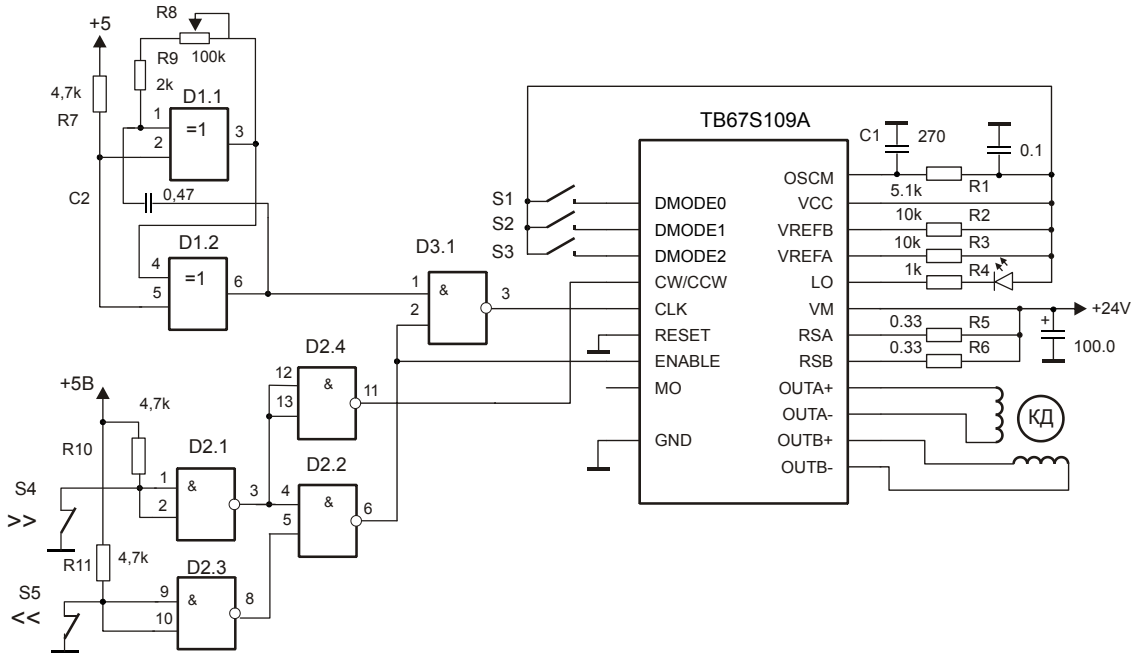

Рис. 3. Принципова електрична схема системи управління КД
із застосуванням драйвера TB67S109A

При проведені експериментальних досліджень було досягнуто результатів, що засвідчують високу ефективність мікрокрокової система керування КД з використанням малобюджетного драйвера TB67S109A.

На рис. 4 показано експериментальні результати застосування запропонованої системи керуванні КД. Осцилограми на рис. 4,*а* і рис. 4,*б* показують співвідношення вхідних тактових імпульсів (верхній графік) і напруги на виході драйвера, де видно, що один крок складається із 4-х тактових імпульсів при півкроковому режимі (рис. 4,*а*), і на рис. 4,*б* показано відповідно режим 1/4 мікрокроку.

На осцилограмах рис. 4,*в* та рис. 4,*г* зображено струм в обмотці КД (верхній графік) та напруги на виході драйвера (власне напруги на обмотці КД) у режимі 1/4 мікрокроку із різним масштабом розгортки по горизонталі відповідно, а на рис. 4,*д* — у режимі 1/8 мікрокроку.

На осцилограмі рис. 4,*е* зображено співвідношення напруг на обмотках КД у режимі 1/8 мікрокроку, де чітко видно зміщення по фазі на 90°.

На осцилограмах рис. 4,*є* та рис. 4,*ж* зображено струм в обмотці КД (верхній графік) і напруги на виході драйвера в режимі 1/32 мікрокроку з різним масштабом розгортки по горизонталі відповідно. На рис. 4,*ж* чітко видно роботу ШІМ регулятора (нижній графік).

Наведені осцилограми показують, що струми в обмотках КД мають тенденцію бути більш синусоподібними при збільшенні ступеня мікрокроку.

У результаті забезпечуються менші вібрації і практично безшумна робота двигуна. Менший розмір кроку призводить до більш точного позиціонування та зменшує пульсацію крутного моменту, забезпечуючи більш плавний рух.

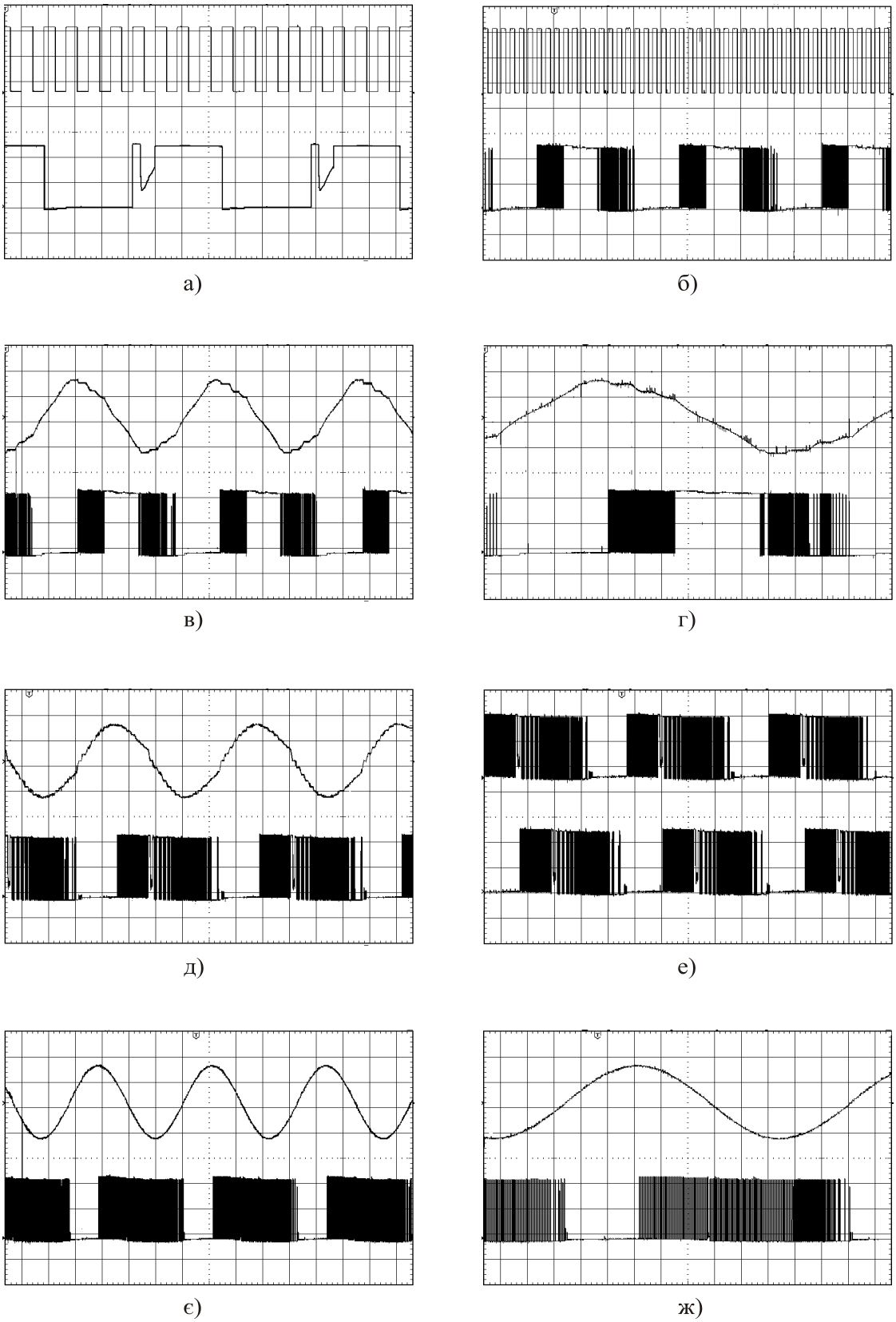

Рис. 4. Осцилограми сигналів роботи мікрокрокової системи керування КД

Висновки

Виконано дослідження щодо застосування мікрокрокового режиму при керуванні кроковим двигуном і запропоновано використовувати як основну частину системи керування кроковим двигуном спеціалізований інтегрований пристрій керування КД TB67S109A виробництва «Toshiba».

Описана вище система з використанням драйвера TB67S109A має такі особливості:

— можливість отримати мікрокроковий режим, що підвищує роздільну здатність у приводі КД, і робить двигун придатним для точного позиціонування сервосистем;

— функції захисту при перевантаженні струмом;

— ціна системи значно нижча, ніж у класичних мікрокрокових систем керування КД.

1. Acarnley P. Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice. Institution of Engineering and Technology; 4th ed. (April 17, 2002). 172 p.

2. Michael Wright. How to Control Stepper Motors: The Most Comprehensive, Easy-to-Understand Advanced Guide for Hobbyists and Experts. Institution of Engineering and Technology ((March 12, 2016). 230 p.

3. P6000 Stepper Drive. URL: https://www.kollmorgen.com/en-us/products/drives/stepper/p6000-series/p6000-stepp

4. The M880A is a high performance microstepping drive. URL: http://www.leadshine.com; URL: http://www.leadshine.com/productdetail.aspx?type=products&category=stepper-products&producttype=stepper-drives&subtype=general-stepper-drives&series=m&model=m880a

5. MD2U-ID20 2-Phase Stepper Motor Driver. URL: https://www.autonics.com/series/3000406

6. Yedamale P., Chattopadhyay S. Stepper Motor Microstepping with PIC18C452. Microchip Technology Inc., 2002.

7. TB67S109A CLOCK-in controlled Bipolar Stepping Motor Driver. Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 2017.

8. TB67S109A Application Note, Usage considerations. Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 2020.

Надійшла до редакції 10.02.2022