УДК 629.429.3:621.313

ВПЛИВ НАПРУГИ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРОКОВОГО ПРИВОДУ ПОВОРОТУ ПЛАТФОРМИ ГАЗОДЕТОНАЦІЙНОГО МІНОМЕТУ

ЛЮБАРСЬКИЙ Б.Г. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2985-7345, e-mail: lboris1911@ukr.net;

КРИВОШЕЄВ С.Ю. канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри промислової і біомедичної електроніки Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8771-2961, e-mail: Serhii.Kryvosheiev@khpi.edu.ua;

ЄРЕСЬКО О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3521-5314, e-mail: oleksandr.eresko@khpi.edu.ua;

ГАЛИЦЯ В.І. канд. техн. наук, доцент кафедри фізичного виховання Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3521-5314, e-mail: vitaliy.galitsa@gmail.com;

САКУН О.В. д-р техн. наук, завідувач кафедри військової підготовки Військового інституту танкових військ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: http://orcid.org/ 0000-0002-2964-071X, e-mail: sakunav71@gmail.com;

ЛЮБАРСЬКИЙ Д.Б. інженер кафедри промислової і біомедичної електроніки Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3535-9809, e-mail: dizas005@ukr.net.

Мета роботи. *Визначити залежності впливу напруги акумуляторної батареї, що обумовлює рівень її заряду на максимальні та вібраційні моменти, а також діюче значення струму фази двигуна, які ідентифікують ефективність роботи приводу повороту платформи газодетонаційного міномету.*

Методи дослідження. *Метод імітаційного моделювання.*

Отримані результати. *розроблено імітаційну модель крокового приводу, особливістю якої є врахування конструктивних параметрів навантаження, крокового двигуна та напівпровідникового перетворювача, параметрів системи керування та крокового двигуна; проведено комплекс чисельних експериментів на імітаційній моделі для визначення впливу рівня напруги акумуляторної батареї та струму уставки на діючий струм фази двигуна, його вібраційний та максимальний моменти; визначено, що керування струмом уставки може призвести до стабілізації режимів роботи привода повороту платформи газодетонаційного міномету при розряді акумулятора живлення та зниженні його напруги. Визначено, що діюче значення струму фази має змінний характер. Зміна діючого значення струму від струму уставки збільшується при збільшені напруги живлення від 2,41 А до 3,23 А при напрузі акумуляторної батареї 27 В. При низьких значеннях напруги вплив струму уставки на діюче значення струму фази двигуна незначний від 1,52А до 1,58 А. При збільшення напруги акумуляторної батареї з 22 В до 27 В при усіх значеннях струму уставки спостерігається монотонне збільшення діючого струму фази. Рівень вібраційного моменту на валу двигуна значно зростає при збільшенні напруги батареї. Струм уставки зменшує рівень вібрацій, однак це зниження ефективне лише при напругах акумулятора від 26В до 27В. Визначено, що при високих значеннях напруги акумулятора та високих значеннях струму уставки спостерігається значне зростання максимальних пускових моментів. Тому при пуску привода рекомендоване примусове зменшення струму уставки до рівня 4,5 А.*

Наукова новизна. *Вперше визначено залежності діючих значень струмів фаз та рівня вібраційних, максимальних моментів крокового приводу для повороту платформи газоденатоційного міномету від напруги акумуляторної батарей живлення, що можливо застосувати при створенні системи автоматизованого керування.*

Практична цінність. *Отримані результати досліджень можливо використати на практиці при створен-*

© Любарський Б.Г., Кривошеєв С.Ю., Єресько О.В., Галиця В.І., Сакун О.В., Любарський Д.Б., 2025
Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License **(CC-BY-CA 4.0)**
DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-3-2

ні автоматизованого електроприводу повороту газодетонаційного міномету на основі крокового двигуна шляхом вибору параметрів струму уставки для напівпровідникового перетворювача, відповідно до рівня напруги акумуляторної батареї.

Ключові слова: кроковий двигун; поворотна платформа; газодетонаційний міномет; напруга акумуляторної батареї; струм уставки; вібраційний момент.

I. ВСТУП

Досвід роботи іноземних армій у міських боях продемонстрував необхідність модернізації бойових машин для ефективної роботи в міських умовах. Наприклад, після конфлікту в Іраку Велика Британія модернізувала танк Challenger II, інтегрувавши міномет як допоміжну зброю. Ця модернізація, продемонстрована на Армійському бойовому експерименті 2018 року, передбачала встановлення мінометa на башті танка, що забезпечувало пригнічувальний вогонь та посилену підтримку піхотних підрозділів у міських бойових ситуаціях.

Натомість, українська бронетехніка наразі оснащена димовими гранатометами, ефективна дальність стрільби яких не перевищує 300 метрів, що обмежує їхню корисність у маневреній війні, де швидке та масштабне димове маскування є важливим. Це підкреслює необхідність подальшої модернізації броньованих платформ для покращення адаптивності до міських операцій та підвищення ефективності димових завіс для захисту військ [1].

Танки, бойові машини піхоти та бронетранспортери часто використовуються в міських боях; однак ефективність танків у таких умовах значно обмежена обмеженим кутом піднесення основної гармати, що перешкоджає можливості нейтралізувати цілі [2], розташовані на верхніх поверхах будівель або за перешкодами. Досвід західних військових у міських боях підкреслює важливість розширення оперативних можливостей танків для вирішення проблем забудованої місцевості [3]. Одним із підходів була інтеграція мінометів у системи озброєння танків, що покращило як тактичну гнучкість, так і загальну ефективність [4].

Наприклад, ізраїльські танки «Меркава», розроблені для міських боїв, оснащені 60-мм мінометами. Ця додаткова зброя дозволяє використовувати як протипіхотні, так і димові гранати, що підвищує здатність протидіяти ворожій піхоті та розгортати димові завіси для маскування або порушення порядку [2]. Отже, оснащення танків мінометами для ураження прихованих цілей, позицій на дахах та важкодоступних місцях є значним кроком до підвищення ефективності танків у міських боях [4].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Національний технічний університет «ХПІ» розробив інноваційний безпороховий міномет із регульованою енергією пострілу, що значно розширює його застосовність у бойових ситуаціях. Було виготовлено та успішно випробувано функціональний експериментальний прототип, що підтвердило життєздатність новоствореної технології запуску мінометних снарядів без використання звичайного порохового заряду.

Ключовою особливістю цієї конструкції є використання газодетонаційного заряду для регулювання дальності стрільби. На відміну від традиційних мінометів, де дальність регулюється зміною кута піднесення ствола, ця система підтримує постійний кут піднесення, а натомість змінює енергію пострілу. Це стало можливим завдяки заміні порохового заряду горючою газовою сумішшю, що також дозволило безшовну інтеграцію системи керування пострілом мінометa із загальною системою керування вогнем [5].

Це рішення підтримує режим напівпрямого вогню, що дозволяє швидке розгортання зброї на полі бою, що особливо вигідно в міських умовах, де швидка реакція та точність мають вирішальне значення [1, 5]. Важливим фактором підвищення точності стрільби є інтеграція мінометa з автоматизованою системою прицілювання. Механізм прицілювання побудований навколо поворотної платформи, що дозволяє точно регулювати азимут ствола на основі попередньо встановлених параметрів стрільби.

Запропоновано кроковий двигун для обертання та фіксації платформи під потрібним кутом, що забезпечує високу точність позиціонування та можливість застосування додаткового утримуючого моменту для стабілізації поворотної платформи.

Платформа містить поворотний стіл, що приводиться в рух черв'ячною передачею, що також забезпечує її надійну фіксацію. Крутний момент передається на черв'ячну передачу від крокового двигуна через зубчастий ремінний привід, що зменшує вплив сил навантаження на двигун. Для роботи мінометa на стволі встановлено пристрій подачі горючої суміші та електромагнітний мінно-утримувальний вузол, конструктивні та вагові параметри яких описані в [6].

Для опису роботи та розробки математичних моделей електроприводів на основі крокових двигунів запропоновано моделі в [7]. Однак ключовим обмеженням цієї роботи є розрахунок зміни потокозчеплення без урахування насичення магнітного кола. У [8] представлені принципи визначення електромагнітного моменту на основі гармонічних змін потокозчеплення з постійною складовою; однак не враховуються гармоніки вищого порядку, які можуть викликати додаткові вібраційні моменти в двигуні.

Моделі керування кроковими двигунами представлені в [9], де розроблена двофазна гібридна сис-

тема керування кроковим двигуном у розімкнутому контурі. Для досягнення меншого кута кроку було запропоновано дві стандартні криві прискорення та уповільнення для онлайн-обчислень у реальному часі на основі технології розподіленого керування. Як зазначається в [10, 11], керування кроковим двигуном може працювати як у конфігураціях з розімкнутим, так і в замкнутим циклом. Системи із замкнутим циклом можуть використовувати визначення положення ротора за допомогою нечіткого пропорційно-інтегрально-диференціального контролера [10] та просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (SVPWM) [11]. Ці методи є типовими для традиційного керування із замкнутим циклом і можуть покращити продуктивність; однак, їхні недоліки включають складність та високу вартість.

Як зазначається в [12], системи із замкнутим циклом пропонують кращу продуктивність керування, але можуть збільшити частоту перемикання перетворювача, що, як зазначається в [13] для асинхронних двигунів, може призвести до вищих втрат напівпровідників та вплинути на загальну енергоефективність приводу. Зусилля щодо зниження вартості таких систем, включаючи впровадження прямого керування крутним моментом (DTC), були описані в [14].

Згідно з [9, 15, 16], застосування існуючих систем керування кроковим двигуном часто призводить до надмірної складності системи. Важливим чинком, що впливає на працездатність електроприводу повороту є рівень заряду акумуляторної батареї живлення. В залежності від рівня заряду змінюється напруга живлення приводу, що в свою чергу призводить до зміну струму фаз крокового двигуна та рівень моменту на його валу, що є критично важливим для швидкодії наведення міномету.

III. МЕТА РОБОТИ

Визначити залежності впливу напруги акумуляторної батареї, що обумовлює рівень її заряду на максимальні та вібраційні моменти, а також діюче значення струму фази двигуна, які ідентифікують ефективність роботи приводу повороту платформи газодетонаційного міномету.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання дослідження:

– розробити імітаційну модель крокового приводу, яка враховує конструктивні параметри навантаження, крокового двигуна та напівпровідникового перетворювача;

– провести комплекс чисельних експериментів на імітаційній моделі для визначення впливу рівня напруги джерела живлення та параметрів керування (струму уставки) на енергетичні та механічні показники двигуна.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для подальших досліджень крокового приводу в роботі розроблено імітаційну модель в системі MATLAB Simulink, яку наведено на рис. 1.

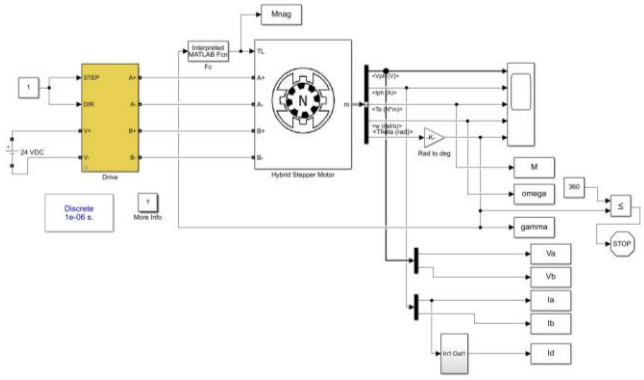

Рисунок 1. Імітаційна модель крокового приводу поворотної платформи

Модель складається: з системи крокового двигуна – Hybrid Stepper Motor; підсистеми живлення та управління (Drive), яка моделює роботу системи керування та напівпровідникового перетворювача; MATLAB функцію Fc, яка реалізує зміну моменту навантаження в залежності від куту повороту поворотної платформи, а також додаткові блоки передачі даних, таких як визначення діючого значення струму, джерело живлення (24VDC), блоки зупинки процесу моделювання (STOP) (рис. 2).

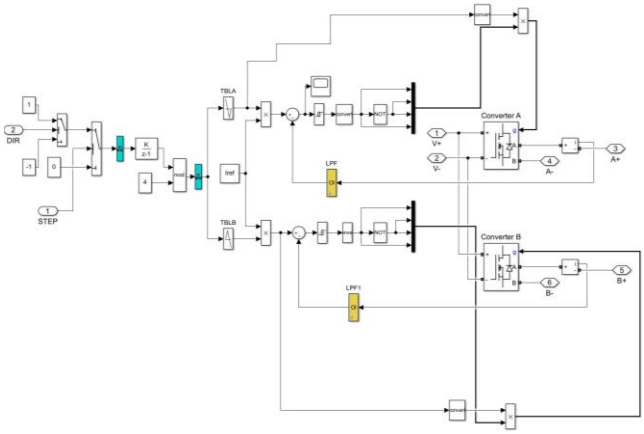

Рисунок 2. Імітаційна модель блоку підсистема живлення та управління (Drive) крокового приводу поворотної платформи

Імітаційна модель крокового двигуна розроблена на підставі вирішення диференційних рівнянь фази двигуна, яку запропоновано у [9]. Фази двигуна є магнітно незалежними. Основні параметри двигуна, який застосовується в приводі та їх позначення в елементах моделі, наведено у табл.1.

Таблиця 1. Параметри елементів крокового приводу повороту платформи

Параметр	Значення
тип двигуна	SY130ST199-6004A
кількість фаз (Number of phases)	2
індуктивність обмотки фази (Winding inductance)	$12\cdot10^{-3}$ Гн
активний опір фази (Winding resistance)	0,75 Ом;
геометричний кут кроку обертання ротору двигуна при подачі одного імпульсу (Step angle)	1,8º
максимальне потокозчеплення (Maximum flux linkage)	$7{,}2\cdot10^{-2}$ Вб;
реактивний момент двигуна	0,25 Н·м;
момент інерції приводу приведений до валу двигуна (Total inertia)	$33\cdot10^{-4}$ кг·м^2;
загальний коефіцієнт тертя приводу (Total friction)	10^{-6} Н· с/м
тип двигуна	SY130ST199-6004A
кількість фаз (Number of phases)	2
індуктивність обмотки фази (Winding inductance)	$12\cdot10^{-3}$ Гн
активний опір фази (Winding resistance)	0,75 Ом
геометричний кут кроку обертання ротору двигуна при подачі одного імпульсу (Step angle)	1,8º
максимальне потокозчеплення (Maximum flux linkage)	$7{,}2\cdot10^{-2}$ Вб
реактивний момент двигуна	0,25 Н·м
момент інерції приводу приведений до валу двигуна (Total inertia)	$33\cdot10^{-4}$ кг·м^2

Модель підсистеми живлення та управління наведено на рис. 2. Модель складається з системи управління, яку створено на основі двох незалежних блоків керування однофазних мостових інверторів (Converter A та Converter B). Роботу інверторів узгоджено вхідними блоками до яких поступають сигнали направлення руху (DIR) та зупинки (STEP).

В системі керування, кожний канал керування автономним мостовим однофазним інвертором має зворотній зв'язок за каналом струму на транзисторах, що реалізовано блоками LPF та LPF1 для фаз A та B відповідно. Однофазні інвертори Converter A та Converter B створено з однотипних базових блоків за допомогою підсистем Converter Simulink у режимі MOSFET/Diodes.

MATLAB функцію Fc, що реалізує зміну моменту навантаження, задає монотонну зміну навантаження від 6 Н·м до 6,7 Н·м, при зміні кута повороту платформи від 0º до 180º, та від 6,7 Н·м до 6 Н·м, при зміні кута повороту платформи від 180º до 360º. Такі дані було визначено експериментальним шляхом при нахилі платформи з мінометом на кут 10º, що може статися у реальних обставинах використання міномету на транспортному засобі.

Моделювання роботи приводу проводиться з використанням вирішувача зі змінним кроком та автоматичним керуванням кроком вирішення при максимальному кроці $2\cdot10^{-6}$ с.

Процес моделювання розглянемо на прикладі роботи крокового приводу повороту платформи на прикладі напруги акумуляторної батареї 24 В, частоти обертання 45 об/хв. та струмі уставки 5А. При інших значеннях параметрів керування фізичні процеси мають подібний вигляд.

При проведені досліджень було встановлено, що процес роботи привода можливо умовно поділити на пуск двигуна, який супроводжується роботою приводу у режимі обмеження струму що складає від 0,012 до 0,027с (рис. 3), в залежності від струмів уставки і заданої частоти обертання. та роботу у номінальному режимі. Зміна навантаження за час обертання не причиняє значного впливу на фізичні процеси роботи та впливає лише на діюче значення струму фази двигуна.

Робота крокового приводу проходить шляхом подачі напруги від мостових однофазних інверторів на фази крокового двигуна (рис.3), які зсунуті друг відносно другу на півфази. Напруга фази має прямокутну форму зі значним спаданням у першій половині фази, яка обумовлена дією електрорушійної сили, що наводиться у фазі (рис.5, поз 1). Струм фази має трикутний вигляд, що обумовлено поступовим зростанням та падінням струму за експоненційними кривими (рис.3, поз 2). При роботі двигуна реалізується максимальний електромагнітний момент який дорівнює 18,87 Н·м. (рис.3, поз 3).

Для подальших досліджень, за результатами моделювання, знаходились амплітуди змінних складових моменту на валу крокового двигуна. При напрузі акумуляторної батареї 24 В та струмі уставки 5А він складає 7,715 Н·м (рис.3, поз 3).

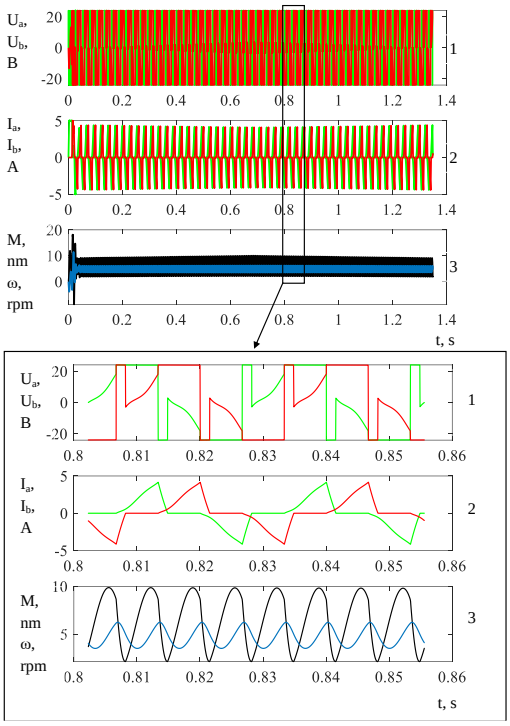

Рисунок 3. Результати моделювання роботи крокового приводу повороту платформи міномету за напругою акумуляторної батареї 24 В та струмі уставки 5А при обертанні платформи від 0º до 4º: 1– напруги фаз, В, 2 – струми фаз, А, 3 – момент на валу двигуна, Н м та частота обертання, об/хв. Червони лінії – фаза А, зелена фаза В.

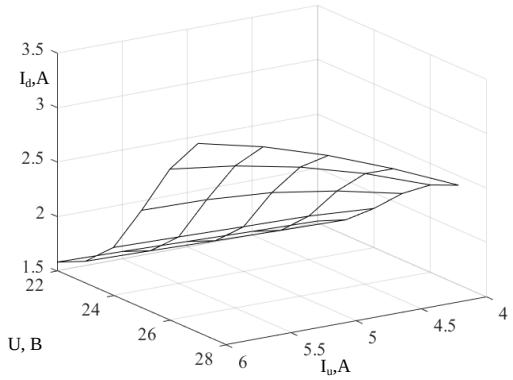

Рисунок 4. Залежність діючого струму фази I_d від напруги акумуляторної батареї U та струму уставки I_u

Комплекс чисельних експериментів на імітаційній моделі, що наведені на рис. 1 та рис. 2, для визначення впливу напруги акумуляторної батареї та струму уставки, проводились шляхом визначення залежності діючого значення струму фази двигуна (рис. 4), амплітуди змінної складової моменту (вібраційного моменту) на його валу (рис.5) та максимального моменту на валу двигуна (рис.6).

Процес моделювання режиму роботи проводились при зміні струму уставки I_u від 4 А до 6 А, напрузі акумуляторної батареї від 22В до 27 В..

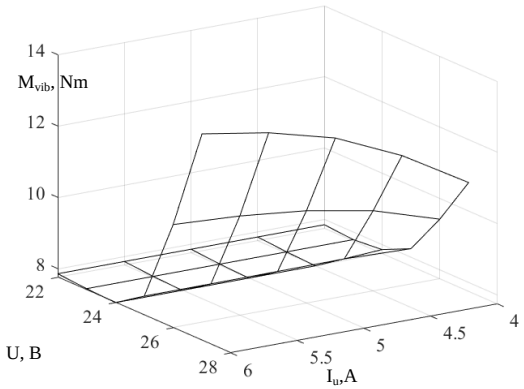

Рисунок 5. Залежність амплітуди вібраційного моменту на валу крокового двигуна M_{vib} від напруги акумуляторної батареї U та струму уставки I_u

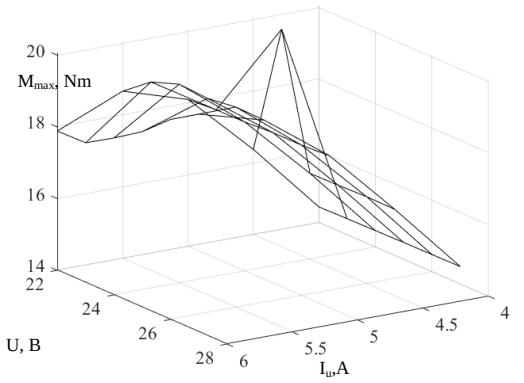

Рисунок 6. Залежність максимального значення моменту на валу крокового двигуна M_{max} від напруги акумуляторної батареї U та струму уставки I_u

За результатами аналізу результатів досліджень отриманих на рис.4-6 отримане наступне. Діюче значення струму фази (рис. 4) має змінний характер. Зміна діючого значення струму від струму уставки збільшується при збільшені напруги живлення від 2,41 А до 3,23 А при напрузі акумуляторної батареї 27 В. При низьких значеннях напруги вплив струму уставки на діюче значення струму фази двигуна незначний від 1,52А до 1,58 А. При збільшення напруги акумуляторної батареї з 22 В до 27 В при усіх значеннях струму уставки спостерігається монотонне збільшення діючого струму фази.

Рівень вібраційного моменту (рис.5) на валу двигуна значно зростає при збільшенні напруги батареї. Струм уставки зменшує рівень вібрацій, однак це зниження ефективне лише при напругах акумулятора від 26В до 27В.

Що стосується максимального моменту (рис.6) на валу двигуна визначено наступне. При високих

значеннях напруги акумулятора та високих значеннях струму уставки спостерігається значне зростання максимальних пускових моментів. Тому при пуску привода необхідно примусове зменшення струму уставки до рівня 4,5 А.

Отримані результати досліджень можна використати на практиці при створенні автоматизованого електроприводу повороту газодетонаційного міномету на основі крокового двигуна шляхом вибору параметрів струму уставки для напівпровідникового перетворювача, відповідно до рівня напруги акумуляторної батареї. Проведені дослідження можна покласти в основу методики визначення параметрів керування електроприводу повороту на основі крокового двигуна.

Перспективи подальших досліджень. Діюче значення струму фази двигуна обумовлює теплові процеси в ньому та напівпровідниковому перетворювачі. При подальших дослідженнях теплових процесів у приводі буде розглянуто вплив діючого струму на температуру елементів конструкції крокового двигуна у режимах відпрацювання заданих параметрів сигналу наведення міномету та режимах слідкування за ціллю.

Вібраційний момент визначає точність відпрацювання сигналу керування. Мінімізація цього моменту призводить до підвищення точності пострілу, які можливо використати при подальших дослідженнях у польових випробуваннях міномету.

Для вибору оптимальних значень струму уставки при зміні рівня заряду та напруги акумуляторної батареї у основному режиму роботи можливо на підставі теорії прийняття рішень та буде напрямом подальших досліджень.

Подяка. Робота виконана за фінансової підтримки Національного Фонду Досліджень України. Реєстраційний номер проєкту: 2023.04/0101, « Автоматизований привід наведення та система управління газодетонаційного міномету для пострілу димовими мінами».

V. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень електроприводу повороту платформи газодетонаційного міномету, що створено на основі крокового двигуна було:

– розроблено імітаційну модель крокового приводу, особливістю якої є врахування конструктивних параметрів навантаження, крокового двигуна та напівпровідникового перетворювача, параметрів системи керування та крокового двигуна;

– проведено комплекс чисельних експериментів на імітаційній моделі для визначення впливу раіня напруги акумуляторної батареї та струму уставки на діючий струм фази двигуна, його вібраційний та максимальний моменти;

– визначено, що керування струмом уставки може призвести до стабілізації режимів роботи привода повороту платформи газодетонаційного міномету при розряді акумулятора живлення та зниженні його напруги.

Результати проведених досліджень можуть бути корисні при розробці систем наведення на основі крокових двигунів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Сакун О. В. Історія та перспективи застосування танкових мінометів // Механіка та машинобудування. – 2018. – № 1. – С. 89–96.

[2] Merkava 4 [Електронний ресурс] // Army Recognition. – Режим доступу: https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk (дата звернення: 05.09.2024).

[3] Streetfighter and the future of the Challenger 2 [Електронний ресурс] // Army Technology. – Режим доступу: https://www.army-technology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view (дата звернення: 05.09.2024).

[4] British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept [Електронний ресурс] // Shephard Media. – Режим доступу: https://www.shephardmedia.com/news/landwarfareintl/british-army-demos-new-challenger-2-urban-operatio/ (дата звернення: 05.09.2024).

[5] Senderowski C., Panas A. J., Fikus B., Zasada D., Kopec M., Korytchenko K. V. Effects of heat and momentum gain differentiation during gas detonation spraying of FeAl powder particles into the water // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 23. – Art. № 7443. – DOI: 10.3390/ma14237443.

[6] Любарський Б. Г., Кривошеєв С. Ю., Єресько О. В., Галиця В. І., Поляков І. В., Любарський Д. Б. Визначення зусиль у енергоефективній системі електромагнітного утримання заряду // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика. – 2024. – № 2 (9). – С. 25–30. – DOI: 10.20998/EREE.2024.2(9).316265.

[7] Kenjo T., Sugawara A. Stepping motors and their microprocessor controls. – 2nd ed. – Oxford : Oxford University Press, 2003.

[8] Acarnley P. Stepping motors: A guide to theory and practice. – 4th ed. – London : The Institution of Electrical Engineers, 2002.

[9] Zhang D., Wang J., Qian L., Yi J. Stepper motor open-loop control system modeling and control strategy optimization // Archives of Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 68, № 1. – P. 63–75. – DOI: 10.24425/aee.2019.125980.

[10] Wang L., Xin X., Zhu L. A widely tunable fiber ring laser with closed loop control based on high-precision stepper motor // Optoelectronics Letters. –

2016. – Vol. 3. – P. 169–172. – DOI: 10.1007/s11801-016-6033-2.

[11] Wang Q., Lu Q. High performance closed loop drive of two phase hybrid stepping motor. – Zhejiang Province : Zhejiang Sci-Tech University, 2017. – DOI: 10.24425/aee.2019.125980.

[12] Stănică D.-M., Lita I., Oproescu M. Comparative analysis of stepper motors in open loop and closed loop used in nuclear engineering // IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging. – 2017.

[13] Liubarskyi B., Petrenko A., Iakunin D., Dubinina O. Optimization of thermal modes and cooling systems of the induction traction engines of trams // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies and Computer Systems Engineering Technological Systems. – 2017. – № 3(9[87]). – P. 59–67.

[14] Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Chepurna N., Pohosov O. Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor // Engineering Research Express. – 2023. – Режим доступу: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-8695/acde46.

[15] Deng N., Yingcao H., Ganghu C. Application of stepper motor subdivision drive in transformation of CA6140 lathe // IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications. – 2016.

[16] Kim W., Shin D., Lee Y., Chung C. C. Simplified torque modulated microstepping for position control of permanent magnet stepper motors // Mechatronics. – 2016. – Vol. 35, № 5. – P. 162–172.

Надійшла (Received) 12.08.2025;
Прийнята (Accepted) 22.08.2025;
Опублікована (Published) 22.10.2025;

INFLUENCE OF BATTERY VOLTAGE ON THE ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE STEPPER DRIVE FOR ROTATION OF THE PLATFORM OF A GAS DETONATION MORTAR

LIUBARSKYI B. Sci.D, Professor, Hard of Department of Electrical Transport and Diesel Locomotive of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2985-7345, e-mail: lboris1911@ukr.net;

KRYVOSHEIEV S. Ph.D, Associate professor, Hard of the Department of Industrial and biomedical electronics of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8771-2961, Serhii.Kryvosheiev@khpi.edu.ua;

ERESKO O. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department of Industrial and biomedical electronics of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3521-5314, oleksandr.eresko@khpi.edu.ua;

HALYTSIA V. Ph.D, Associate professor of the Department of Physical Education of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3521-5314, vitaliy.galitsa@gmail.com;

SAKUN O. Sci.D, Hard of Department of Military Training of the Military Institute of Tank Troops of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID http://orcid.org/ 0000-0002-2964-071X, e-mail: sakunav71@gmail.com;

LIUBARSKYI D. Engineer of the Department of Industrial and biomedical electronics of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3535-9809, dizas005@ukr.net;

Purpose. *Determine the dependence of the influence of the battery voltage, which determines the level of its charge, on the maximum and vibration moments, as well as the effective value of the motor phase current, which identify the efficiency of the drive for rotating the platform of a gas-detonation mortar.*

Methodology. *Simulation modeling method.*

Findings. *A simulation model of a stepper drive has been developed, the peculiarity of which is the consideration of the design parameters of the load, stepper motor and semiconductor converter, parameters of the control system and stepper motor; a set of numerical experiments has been carried out on the simulation model to determine the influence of the battery voltage level and the setpoint current on the effective current of the motor phase, its vibration and maximum moments; it has been determined that controlling the setpoint current can lead to stabilization of the operating modes of the gas-detonation mortar platform rotation drive when the power battery is discharged and its voltage de-*

creases. It has been determined that the effective value of the phase current is variable. The change in the effective current value from the setpoint current increases with an increase in the supply voltage from 2.41 A to 3.23 A at a battery voltage of 27 V. At low voltage values, the effect of the setpoint current on the effective value of the motor phase current is insignificant from 1.52 A to 1.58 A. When the battery voltage increases from 22 V to 27 V, a monotonous increase in the effective phase current is observed at all values of the setpoint current. The level of vibration torque on the motor shaft increases significantly with an increase in battery voltage. The setpoint current reduces the vibration level, however, this reduction is effective only at battery voltages from 26 V to 27 V. It has been determined that at high battery voltage values and high values of the setpoint current, a significant increase in maximum starting torques is observed. Therefore, when starting the drive, a forced reduction of the setpoint current to the level of 4.5 A is recommended.

Originality. *For the first time, the dependences of the effective values of phase currents and the level of vibration, maximum moments of the stepper drive for rotating the platform of a gas-denotation mortar on the voltage of the power battery have been determined, which can be used when creating an automated control system.*

Practical value. *The obtained research results can be used in practice when creating an automated electric drive for turning a gas-detonation mortar based on a stepper motor by selecting the parameters of the setpoint current for the semiconductor converter, in accordance with the voltage level of the battery.*

Keywords: stepper motor; rotary platform; gas-detonation mortar; battery voltage; setpoint current; vibration torque..

REFERENCES

[1] 1. Sakun, O. V. (2018). Istoriia ta perspektyvy zastosuvannia tankovykh minometiv. Mekhanika ta mashynobuduvannia, (1), 89–96.

[2] 2. Merkava 4. (n.d.). Army Recognition. https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk

[3] 3. Streetfighter and the future of the Challenger 2. (n.d.). Army Technology. https://www.army-technology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view

[4] 4. British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept. (n.d.). Shephard Media. https://www.shephardmedia.com/news/landwarfareintl/british-army-demos-new-challenger-2-urban-operatio/

[5] 5. Senderowski, C., Panas, A. J., Fikus, B., Zasada, D., Kopec, M., & Korytchenko, K. V. (2021). Effects of heat and momentum gain differentiation during gas detonation spraying of FeAl powder particles into the water. Materials, 14(23), 7443. https://doi.org/10.3390/ma14237443

[6] 6. Liubarskyi, B. H., Kryvosheiev, S. Yu., Yeresko, O. V., Halytsia, V. I., Poliakov, I. V., & Liubarskyi, D. B. (2024). Vyznachennia zusyl u enerhoefektyvnii systemi elektromahnitnoho utrymannia zariadu. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Enerhetyka, (2[9]), 25–30. https://doi.org/10.20998/EREE.2024.2(9).316265

[7] 7. Kenjo, T., & Sugawara, A. (2003). Stepping motors and their microprocessor controls (2nd ed.). Oxford University Press.

[8] 8. Acarnley, P. (2002). Stepping motors: A guide to theory and practice (4th ed.). The Institution of Electrical Engineers.

[9] 9. Zhang, D., Wang, J., Qian, L., & Yi, J. (2019). Stepper motor open-loop control system modeling and control strategy optimization. Archives of Electrical Engineering, 68(1), 63–75. https://doi.org/10.24425/aee.2019.125980

[10] 10. Wang, L., Xin, X., & Zhu, L. (2016). A widely tunable fiber ring laser with closed loop control based on high-precision stepper motor. Optoelectronics Letters, 3, 169–172. DOI: 10.1007/s11801-016-6033-2

[11] 11. Wang, Q., & Lu, Q. (2017). High performance closed loop drive of two phase hybrid stepping motor. Zhejiang Sci-Tech University. DOI: 10.24425/aee.2019.125980

[12] 12. Stănică, D.-M., Lita, I., & Oproescu, M. (2017). Comparative analysis of stepper motors in open loop and closed loop used in nuclear engineering. In IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging.

[13] 13. Liubarskyi, B., Petrenko, A., Iakunin, D., & Dubinina, O. (2017). Optimization of thermal modes and cooling systems of the induction traction engines of trams. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies and Computer Systems Engineering Technological Systems, 3(9[87]), 59–67.

[14] 14. Goolak, S., Liubarskyi, B., Riabov, I., Chepurna, N., & Pohosov, O. (2023). Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor. Engineering Research Express. http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-8695/acde46

[15] 15. Deng, N., Yingcao, H., & Ganghu, C. (2016). Application of stepper motor subdivision drive in transformation of CA6140 lathe. In IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications.

[16] 16. Kim, W., Shin, D., Lee, Y., & Chung, C. C. (2016). Simplified torque modulated microstepping for position control of permanent magnet stepper motors. Mechatronics, 35(5), 162–172.