

Стешенко Владлен Дмитрович

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

ORCID 0009-0008-7390-0540

Приходько Ірина Олександрівна

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

ORCID 0000-0002-3018-2875

ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ПОВОРОТНОЇ ПЛАТФОРМИ

Анотація. У статті розглядається розробка математичної моделі та алгоритмів керування для спеціалізованої поворотної платформи, призначеної для стабілізації та наведення оптичної системи на борту безпілотного літального апарата (БПЛА). Постановка задачі передбачає визначення кількості ступенів свободи, необхідних для реалізації заданих маневрів, розрахунок максимальних кутів повороту платформи, забезпечення необхідної роздільної здатності керування, а також гарантування достатньої швидкодії системи для компенсації зовнішніх збурень та відстеження рухомих цілей.

Метою дослідження є визначення раціонального варіанту реалізації системи захоплення та супроводження цілі оптичною камерою. У статті наведені результати визначення критичних параметрів обертальної системи, серед яких: кількість ступенів свободи, мінімальний кут повороту (крок), швидкість обертання та прискорення системи з урахуванням ваги корисного навантаження.

Дослідження базується на параметрах обраної камери, вага якої становить 70 г, з фокусною відстанню 16 мм та роздільною здатністю 1280 на 800 пікселів. Розрахунки кута огляду проводяться за вертикальним кутом, зокрема максимальний кут огляду становить 12.8 градусів. Для підвищення стабільності зображення, роздільну здатність поворотної системи обрано в 4 рази більшою, що забезпечує значення 3.2 градуси.

Окрім цього, у статті описується важливість компенсації зміни орієнтації літального апарату, що досягається зміною положення оптичної системи через поворотну стабілізаційну платформу. Таким чином, результати дослідження відкривають нові можливості для підвищення ефективності систем спостереження, що використовуються в безпілотних технологіях.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, стабілізація, наведення, оптична система, поворотна платформа, BLDC двигун, кроковий двигун.

Steshenko Vladlen

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnical Institute, Kyiv

ORCID 0009-0008-7390-0540

Prykhodko Iryna

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnical Institute, Kyiv

ORCID 0000-0002-3018-2875

ELECTROMECHANICAL ACTUATOR SELECTION FOR SPECIALIZED TURNTABLE APPLICATION

Abstract. The article deals with the development of a mathematical model and control algorithms for a specialized rotary platform designed to stabilize and guide an optical system on board an unmanned aerial vehicle (UAV). The problem statement involves determining the number of degrees of freedom required to implement the specified maneuvers, calculating the maximum rotation angles of the platform, ensuring the

required control resolution, and ensuring sufficient system performance to compensate for external disturbances and track moving targets.

The purpose of the study is to determine a rational variant of the implementation of the system for capturing and tracking a target with an optical camera. The article presents the results of determining the critical parameters of the rotating system, including the number of degrees of freedom, minimum rotation angle (pitch), rotation speed, and acceleration of the system, taking into account the weight of the payload.

The study is based on the parameters of the selected camera, which weighs 70 g, has a focal length of 16 mm and a resolution of 1280 by 800 pixels. The viewing angle is calculated from a vertical angle, with a maximum viewing angle of 12.8 degrees. To improve image stability, the resolution of the rotary system was chosen to be 4 times higher, which provides a value of 3.2 degrees.

In addition, the article describes the importance of compensating for changes in aircraft orientation, which is achieved by changing the position of the optical system through a rotary stabilization platform. Thus, the results of the study open up new opportunities to improve the efficiency of surveillance systems used in unmanned technologies.

Keywords: unmanned aerial vehicle, stabilization, tracking, optical system, rotary platform, BLDC motor, stepper motor.

Постановка задачі.

Розробити математичну модель та алгоритми керування для спеціалізованої поворотної платформи, призначеної для стабілізації та наведення оптичної системи безпілотного літального апарата. Платформа повинна забезпечити:

- **Кількість ступенів свободи:** Визначити необхідну кількість ступенів свободи для реалізації заданих маневрів оптичної системи.
- **Кути повороту:** Розрахувати максимальні кути повороту платформи, що відповідають вимогам до огляду та точності наведення.
- **Роздільна здатність:** Забезпечити необхідну роздільну здатність керування для стабілізації зображення та точності наведення.
- **Швидкодія:** Гарантувати достатню швидкодію системи керування для компенсації зовнішніх збурень та відстеження рухомих цілей.

Мета і задачі дослідження.

Метою дослідження є визначення раціонального варіанту реалізації системи захоплення та супроводження цілі оптичною камерою на борту маневруючого літального апарата.

Результати дослідження

Визначення достатніх параметрів для обертальної системи.

Виходячи з необхідних характеристик комплексу та умов використання необхідно визначити такі параметри як:

- кількість ступенів свободи поворотної системи.
- мінімальний кут повороту камери (крок), тобто роздільна здатність поворотного комплексу
 - швидкість повороту (градусів на секунду)
 - прискорення системи з заданою вагою корисного навантаження (оптична система)
 - здатність системи зберігати стабільність під дією сили інерції при маневруванні та вібраційних впливів.

Визначимо необхідні параметри системи. Для розрахунку деяких параметрів візьмемо камеру з наступними параметрами: вага 70 г, фокусна відстань 16мм, матриця 1.3 дюйма, розмір матриці 4.8мм на 3.6мм, роздільна здатність 1280 на 800 пікселів.

Розрахуємо необхідну роздільну здатність поворотної системи, враховуючи параметри оптичної системи. Для цього розрахуємо кути огляду камери для випадку максимальної фокусної відстані.

$$FOV_v = 2 \cdot \arctan\left(\frac{h}{2f}\right). \quad (1)$$

де FOV_v — кут огляду камери; h — висота матриці; f — фокусна відстань.

Розрахунок проведемо за вертикальним кутом огляду, оскільки ця сторона матриці менша:

$$FOV_v = 2 \cdot \arctan\left(\frac{h}{2f}\right) = 2 \cdot \arctan\left(\frac{3.6}{2 \cdot 16}\right) = 12.8.$$

Отже, кут огляду камери по вертикалі на максимальній фокусній відстані становить 12.8 градуси.

Роздільну здатність поворотної системи виберемо в 4 рази більшою, ніж кут огляду камери на найбільшій фокусній відстані з огляду на інертність системи та необхідність зменшити вірогідність виходу зображення цілі за межі кадру при швидкому зменшенні відстані.

$$\beta = \frac{FOV_v}{4} = 0.325 \approx 3.2. \quad (2)$$

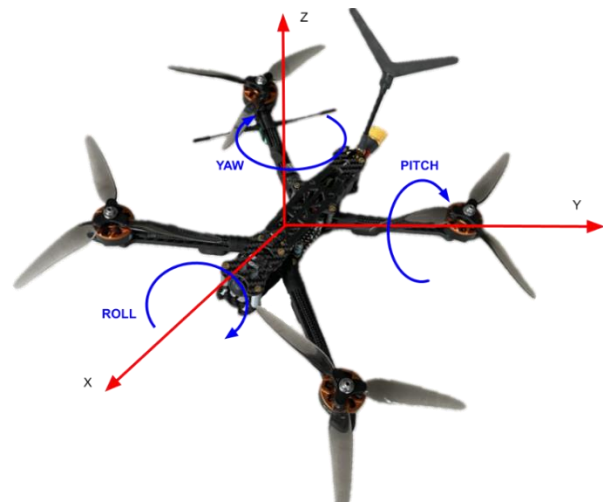
Отже, роздільна здатність поворотної системи рівна 3.2 градуси.

Для функціонування режиму відслідковування цілі необхідно забезпечити утримання цілі в рамках поля зору оптичної системи. Для цього необхідно компенсувати зміну орієнтації літального апарату шляхом зміни положення оптичної системи за допомогою поворотної стабілізаційної платформи.

З метою забезпечення ефективної роботи системи стабілізації та наведення оптичної системи на БПЛА, проведемо дослідження залежності необхідної швидкодії системи повороту від кутового прискорення літального апарату. В якості об'єкта дослідження вибрано квадрокоптер, для якого максимальне кутове прискорення обмежено значенням 600 градусів за секунду. Для верифікації теоретичних розрахунків будуть проведені експериментальні вимірювання реальних значень кутових швидкостей та прискорень під час виконання різних маневрів БПЛА.



а)



б)

Рис. 1. Випробувальний стенд для перевірки динамічних характеристик літального апарату (а) з позначенням осей обертання при проведенні експерименту (б)

Максимальне кутове прискорення квадрокоптера навколо осі крену (вісь X або ROLL) було визначено шляхом аналізу даних, отриманих з бортового самописця. Для цього було проведено експеримент на спеціалізованому стенді, під час якого фіксувалися зміни

положення літального апарату. Отримані дані були візуалізовані у вигляді графіків, що дозволило встановити, що максимальна швидкість обертання квадрокоптера під час експерименту досягла 568 градусів за секунду.

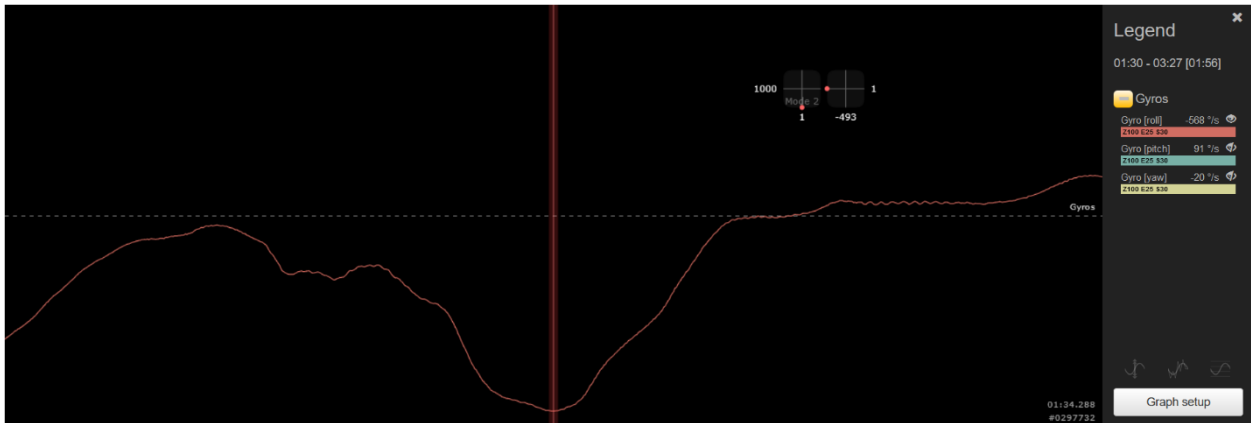


Рис. 2. Вимірювання максимальної кутової швидкості обертання за віссю X

Для забезпечення безперервного відстеження цілі в умовах, коли вона займає більше половини кадру, кутове прискорення системи повороту має бути не меншим за кутове прискорення літального апарату.

Отже:

$$\omega_{opt} \geq \omega_{ac}, \quad (3)$$

де ω_{opt} – кутова швидкість оптичної системи, ω_{ac} – кутова швидкість літального апарату.

Проаналізуємо графік кутової швидкості для визначення максимального кутового прискорення літального апарату.

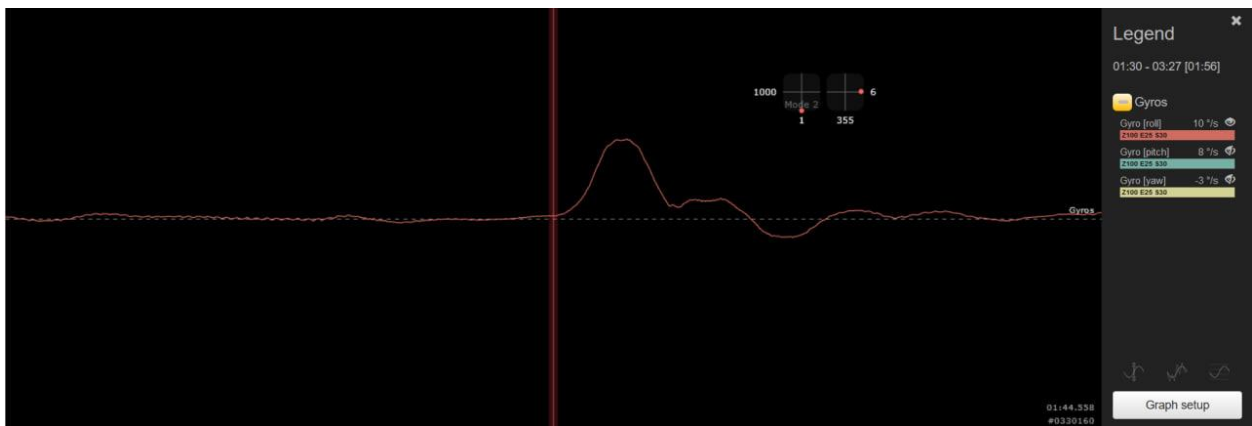


Рис. 3. Графік кутової швидкості на початку маневру, початку набору швидкості

Визначимо кутове прискорення:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{231 - 10}{1.44.616 - 1.44.558} = 3810 \text{ } ^\circ/\text{c}^2. \quad (4)$$

Отже, максимальне прискорення літального апарату при маневруванні становить $3810 \text{ } ^\circ/\text{c}^2$.

Як вихідні дані для подальших розрахунків приймаємо такі значення: маса оптичної системи – 70 грам, роздільна здатність кута нахилу – 3.2 градуса, кутове прискорення – 3810

градусів за секунду в квадраті. Максимальні кути повороту системи за осями крену, тангажу та ристання становлять відповідно 270, 120 та 90 градусів.

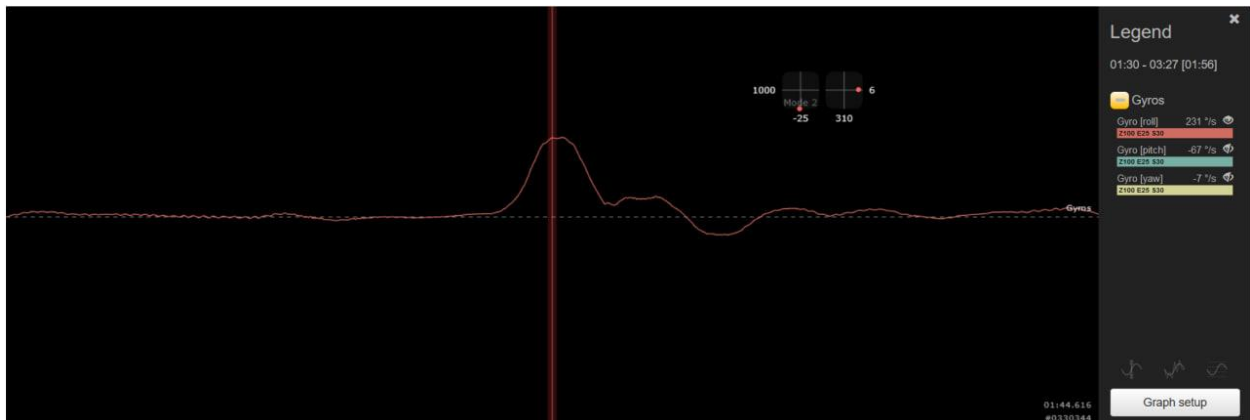


Рис.4 Графік кутової швидкості в кінці маневру, завершення набору швидкості

Огляд приводів для поворотних механізмів.

Виконавчі пристрої, які рухають частини механізмів, можна розділити на кілька типів залежно від джерела енергії.

-Гідравлічні системи

Гідравлічні системи перетворюють енергію рідини під тиском в механічну роботу. Така система має високу точність за рахунок відсутності ефекту стиснення в рідині, високі показники моменту енергії. Однак, гідравлічні системи мають ряд недоліків, що обмежують їх застосування, а саме наявність джерела стисненої рідини. У загальному випадку безпілотні літальні апарати не мають на борту гідравлічної системи. Тому при встановленні гідравлічного насоса така система буде мати надлишкову вагу через необхідність використовувати трубчасті магістралі. Додатковим недоліком є складність реалізації поршневих чи обертальних гідравлічних приводів[1,2].

- Пневматичні системи

Основною перевагою пневматичної системи є забезпечення швидкодії її роботи за рахунок накопиченої енергії у стисненому повітрі.

Пневматичні системи мають такі ж недоліки, як і гідравлічні, та додатково необхідність наявності ресиверу. За рахунок стиснення газів виникає проблема з визначенням положення поворотного механізму і наявністю пружної реакції на зовнішню дію (перевантаження, вібрація)[1,2].

-Електромеханічні системи

Електромеханічні системи являють собою велику групу виконавчих пристроїв, в основі яких лежить процес перетворення електричної енергії в механічну. Загальною характеристикою для електромеханічних систем є відсутність необхідності мати на борту великогабаритні та важкі елементи, на відміну від розглянутих вище систем.

Системи цього типу можна розділити на наступні підгрупи: електромагнітні, електродвигунні та п'єзоелектричні.

Електромагнітні системи побудовані на принципі використання електричного струму для створення магнітного поля, яке дозволить виконувати механічну роботу. В загальному випадку такою роботою є лінійне переміщення та різного роду ударний вплив. Прикладом систем цієї підгрупи є лінійні актюатори, електромагнітні клапани, звукові випромінювачі.

До електродвигунних перетворювачів можна віднести системи з перетворенням електричної енергії в обертальний рух. Класифікувати їх можна в загальному випадку за типом струму живлення, властивостями та за самостійністю функціонування (необхідність

використання контролера чи її відсутність). Виходячи з цього, можна провести класифікацію на наступні категорії: двигуни постійного струму, двигуни змінного струму та інші двигуни спеціальної конструкції, такі як кроковий двигун та BLDC.

До п'єзодвигунів відносяться п'єзоелектричні перетворювачі, які базуються на принципі зміни власного розміру під впливом прикладеної напруги. Цей тип двигунів має ряд особливостей, що відрізняють його від традиційних електродвигунів, заснованих на принципі електромагнітної індукції[3-6].

Вибір типу виконавчого пристрою для використання в поворотному механізмі.

На основі проведеного аналізу виконавчих механізмів для активної поворотної системи, було прийнято рішення відмовитися від використання пневматичних та гідравлічних систем через їхні значні масогабаритні характеристики та складність експлуатації. Для безпілотних літальних апаратів, де критичними є маса, габарити та енергоспоживання, електромеханічні системи є найбільш перспективним рішенням. Далі буде проведено детальний аналіз різних типів електромеханічних приводів (рис.5) з метою вибору оптимального варіанту для конкретної системи.



Рис.5. Класифікація типів електромеханічних приводів

Для розробки класифікації електромеханічних перетворювачів був проведений аналіз наукової літератури з таких галузей як робототехніка, мехатроніка та оптичні системи стабілізації[3-6]. Запропонована класифікація базується на принципі перетворення електричної енергії в механічну[7].

Проведемо попереднє визначення типу електромагнітного перетворювача.

Електромагнітні системи

Електромагнітні системи, основою роботи яких є електромагнітне поле, використовуються для прямолінійних переміщень. Соленоїди та актуатори є типовими представниками таких систем. Незважаючи на високу швидкість та точність позиціонування, електромагнітні системи мають ряд обмежень: невелика амплітуда переміщення, значні масогабаритні характеристики та необхідність використання механічних передач для перетворення лінійного руху в обертальний. Враховуючи ці обмеження, електромагнітні системи не відповідають вимогам даної системи.

П'єзоелектричні двигуни

П'єзоелектричні приводи такі як актюатори, п'єзоприводи лінійного переміщення та п'єзоелектричні двигуни мають ряд характерних особливостей[2]. До їхніх переваг належать: можливість фіксації виконавчого елемента без споживання енергії, висока точність позиціонування та швидка динаміка. Однак, низька швидкість переміщення, складність системи керування та висока вартість обмежують їх застосування.

Електродвигунні системи

DC-двигуни: двигуни постійного струму мають високе співвідношення потужності до своїх габаритів і маси, високий коефіцієнт корисної дії, гнучкість у підборі типу виконання для досягнення необхідних характеристик та низьку ціну. Не потребують використання системи керування.

Недоліками цього типу двигунів є складність чіткого позиціонування, необхідність використання редукторів для роботи з малими кутами переміщення, що в свою чергу створює неконтрольований люфт на вихідному валу системи.

Це робить використання цього типу двигунів не доцільним.

АС-двигуни: Мають високі показники енергетичної ефективності, але для керування швидкістю потребують складну систему частотного регулювання швидкості обертання та потужності. В них відсутня можливість чіткого позиціонування вала та є необхідність використання редуктора для роботи на малих кутах переміщення.

Спеціальні двигуни

Крокові двигуни: мають можливість утримування вала у фіксованому стані, дають можливість чіткого позиціонування та високий крутний момент на низьких обертах. Використання цього типу двигунів дає високу ступінь контролю переміщення без застосування зворотного зв'язку. У таких двигунах обмежена роздільна здатність переміщення, що зазвичай становить 200 кроків на оберт та відповідає куту у 1.8 градуси. Збільшення роздільної здатності можливе за рахунок розбивання кроку на проміжні положення за рахунок балансування потенціалу між обмотками, що в свою чергу призводить до суттєвого погіршення показників сили утримання та робить можливим пропуск кроків.

До недоліків цього типу двигунів можна віднести обмежену швидкість обертання, дискретність кроків та невелике відношення потужності до маси.

BLDC: безколекторні двигуни постійного струму. Перевагою цього типу двигунів є динамічні характеристики, а саме: висока плавність ходу, високий крутний момент та можливість чіткого позиціонування.

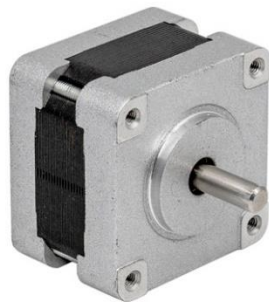


Рис.6. Кроковий двигун NEMA-16 - 39H020H-0504

Недоліками цих двигунів є необхідність зворотного зв'язку.

Аналіз властивостей електромагнітних перетворювачів дозволяє виділити два перспективних кандидати для вирішення поставленого завдання: BLDC двигуни постійного струму та крокові двигуни. Для об'єктивного порівняння цих типів двигунів було проведено симуляційне моделювання в середовищі Simulink. В якості прикладу, розглянуто кроковий двигун NEMA-16 - 39H020H-0504 [5] з детальним аналізом його характеристик.

Габарити 39.4мм * 39.4мм * 20мм

Вага: 120г

Номінальна напруга 9 В

Струм на фазу 0.5 А

Опір на фазу 18 Ом

Індуктивність на фазу 20 мГн

Інерція ротора 11 г/см²

Момент утримання 1.3 кг*см або 0.127 Nm

Для ілюстрації роботи даного двигуна на рис.7 представлено графік залежності його крутного моменту від швидкості обертання валу.

Типорозмір двигуна обраний таким чином, щоб крутний момент на швидкості 600 градусів на секунду (100 обертів на хвилину) був співрозмірним до BLDC двигуна. Це обумовлено тим, що крутний момент крокових двигунів знижується зі збільшенням швидкості обертання.

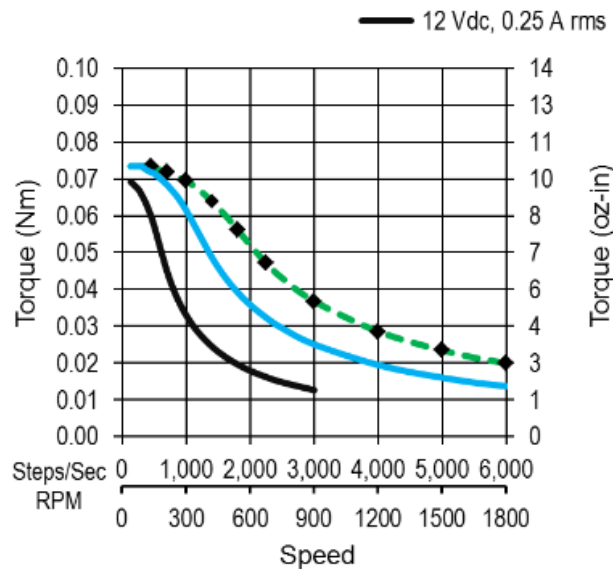


Рис.7. Графік залежності крутного моменту крокового двигуна від швидкості обертання валу

Було обрано BLDC двигун JD-Power – dc-2813c - 0504 з наступними характеристиками[6].



Рис.6. BLDC двигун JD-Power – dc-2813c - 0504

Габарити 27.5мм * 27.5мм * 13мм
 Вага: 23г
 Номінальна напруга 12 В
 Струм на фазу 0.6 А
 Опір на фазу 11.3 Ом
 Індуктивність на фазу 1.59 мГн
 Інерція ротора 20 г/см²
 Крутний момент 0.53 кг*см або 0.034 Nm

Схеми моделювання були розроблені на основі бібліотек Simulink (рис.7,8)[8,9]. Для визначення загального моменту інерції системи було враховано момент інерції роторів двигунів та корисного навантаження. В якості корисного навантаження було обрано тіло у вигляді суцільного циліндра зі сталюю густиною і з центром мас у осі обертання, його параметри: маса $m=70$ г та радіус $R=4$ см. В такому випадку момент інерції розраховується за формулою (5)[10].

$$I_{pl} = \frac{m \cdot R^2}{2} \quad (5)$$

$$I_{pl} = \frac{70 \cdot 4}{2} = \frac{280}{2} = 140 \text{ г} \cdot \text{см}^2$$

Отже, момент інерції корисного навантаження буде дорівнювати $140 \text{ г} \cdot \text{см}^2$.

Момент інерції для ротора буде дорівнювати сумі власної інерції ротора та інерції корисного навантаження:

$$I = I_{pl} + I_{rotor} \quad (6)$$

Для крокового двигуна момент інерції дорівнюватиме:

$$I_{step} = 140 + 11 = 151 \text{ г} \cdot \text{см}^2$$

Для BLDC двигуна

$$I_{bldc} = 140 + 20 = 160 \text{ г} \cdot \text{см}^2$$

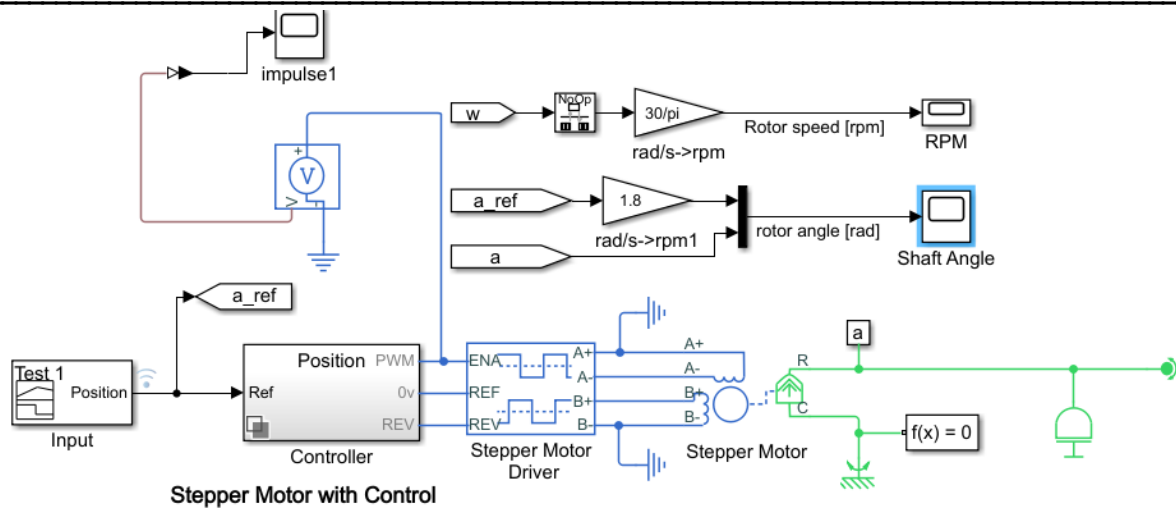


Рис. 7. Схема моделювання крокового двигуна в середовищі Simulink.

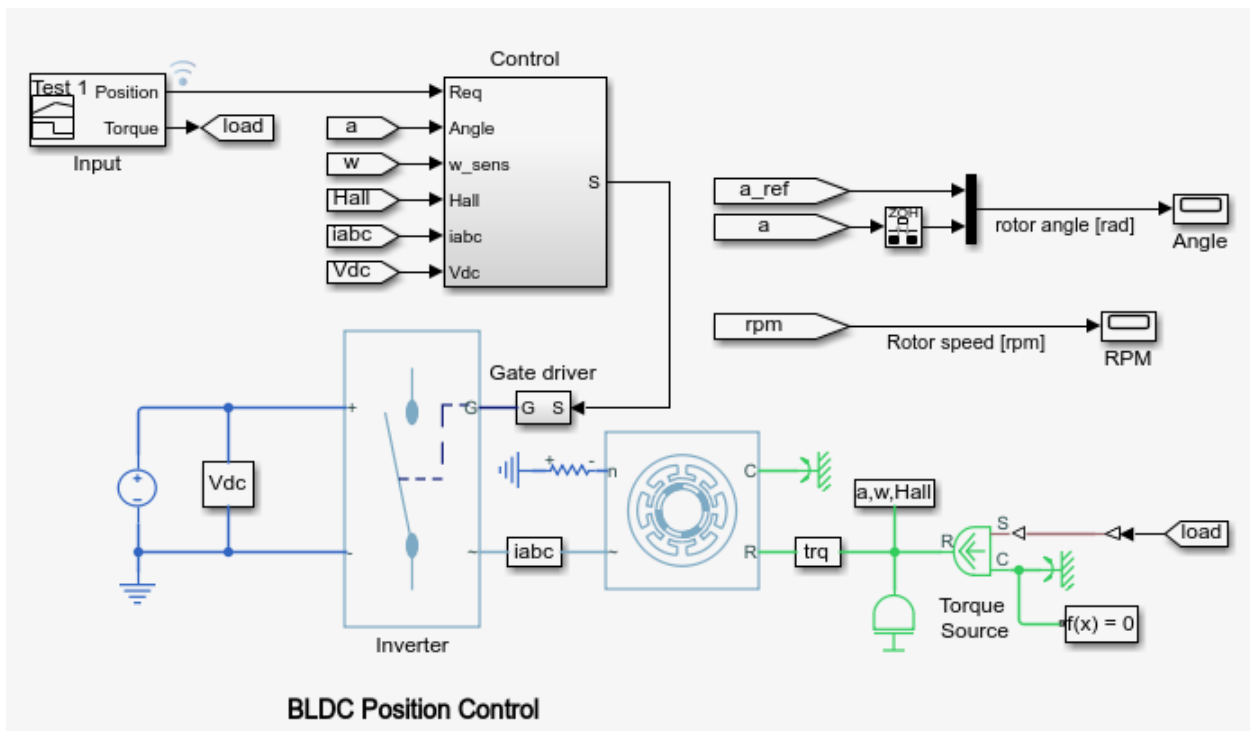


Рис. 8. Схема моделювання BLDC двигуна в середовищі Simulink.

Для аналізу роботи двигунів було розглянуто змодельовані графіки швидкості та кута їх повороту (рис.9-12).

На графіках представлено порівняння заданого кута повороту (жовта лінія) та фактичної реакції двигуна (синя лінія). Заданий кут повороту становить 90 градусів, що еквівалентно 1,57 радіана (рис.9,10).

Визначено, що час між початком руху і досяганням заданого кута валу в заданій конфігурації складає для крокового двигуна $\Delta t_{step} = 74.983$ мс, для BLDC двигуна $\Delta t_{bldc} = 60.847$ мс.

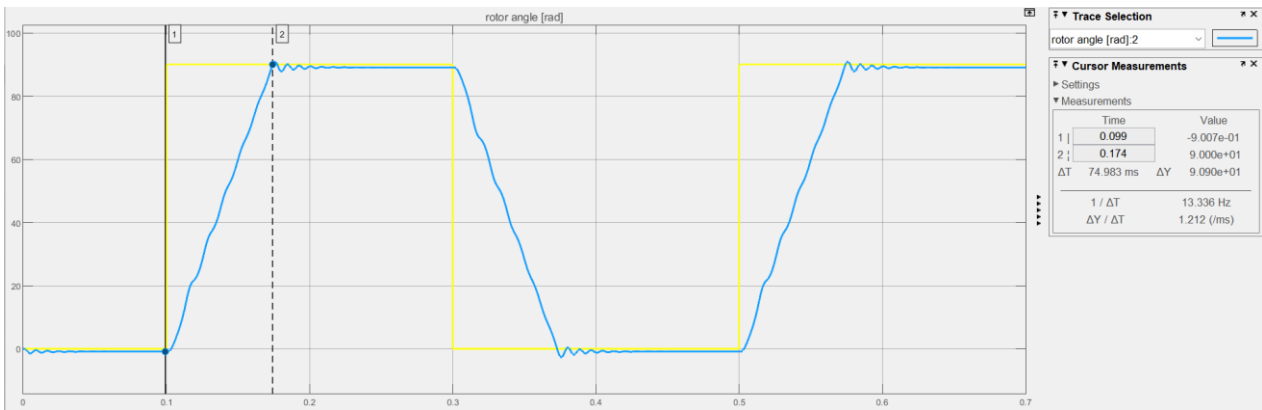


Рис. 9. Кут повороту ротора крокового двигуна (градуси)

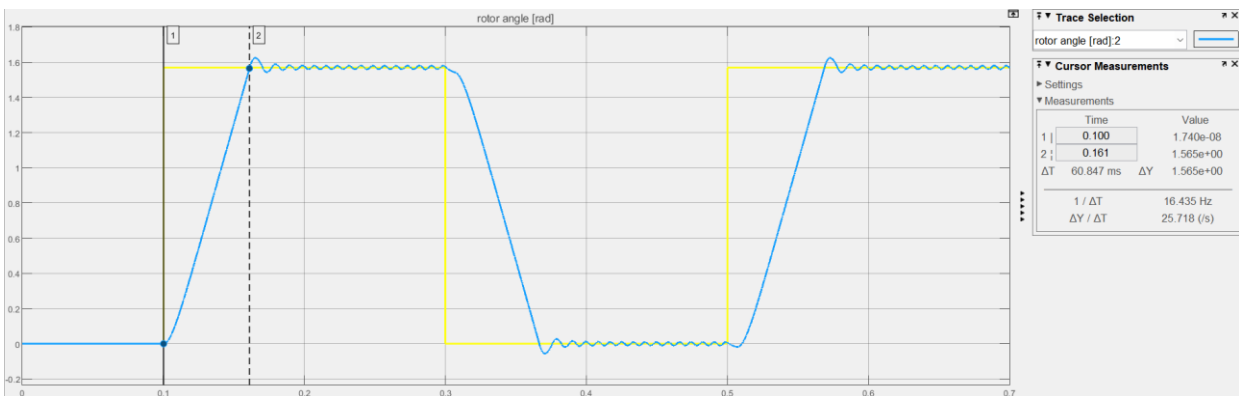


Рис. 10. Кут повороту ротора BLDC двигуна (радіани)

Проведено аналіз графіків швидкості з метою визначення динамічних характеристик двигунів (рис.11,12). Для оцінки прискорення вибрано дві характерні точки на графіку: початок руху та точку зі швидкістю 200 об/хв. За відомими значеннями часу та швидкості в цих точках розраховано кутове прискорення. Розраховано кутове прискорення валу BLDC двигуна на ділянці від 0 до 1200°/с, згідно отриманого графіка:

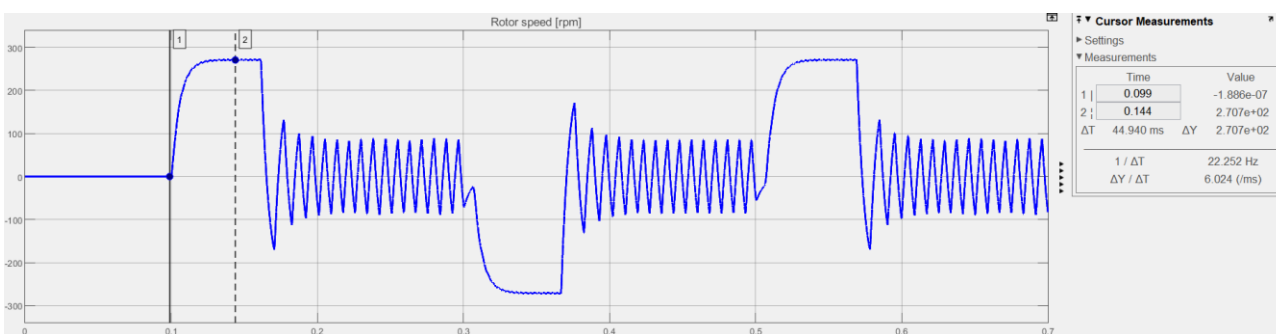


Рис.11. Графік швидкості ротора BLDC двигуна(обертів на хвилину)

Було виконано перетворення швидкості з RPM (обертів на хвилину) у градуси на секунду за формулою перерахунку:

$$\omega_2 = \frac{RPM \cdot \text{градусів у оберті}}{\text{секунд у хвилині}}. \quad (7)$$

При підстановці значень (рис.11) :

$$\omega_2 = \frac{RPM \cdot 360}{60} = \frac{201 \cdot 360}{60} = 1206 \text{ }^\circ/\text{с}$$

$$\varepsilon_{bldc} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} = \frac{1206 - 0}{0.009} = 134000 \text{ }^\circ/\text{с}^2$$

Розраховано кутове прискорення валу крокового двигуна на ділянці від 0 до 1200°/с, згідно отриманого графіка:

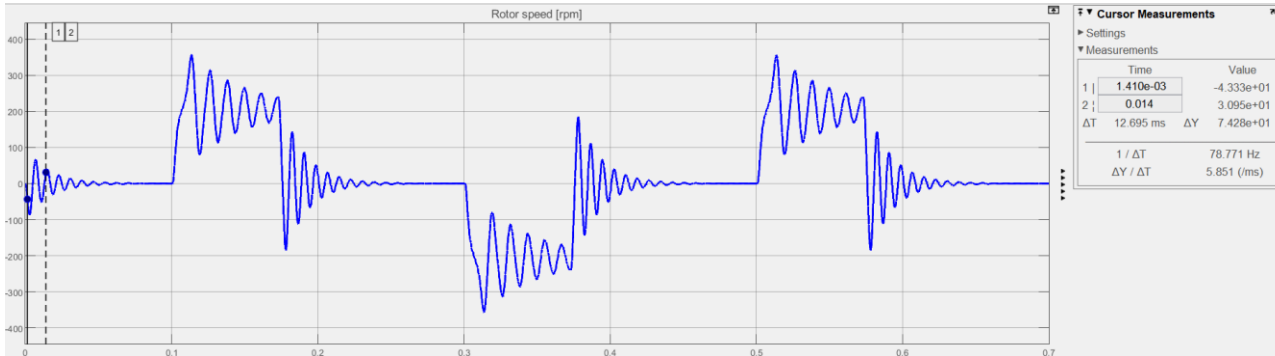


Рис.12. Графік швидкості ротора крокового двигуна(обертів на хвилину)

Було виконано перетворення швидкості з RPM (обертів на хвилину) у градуси на секунду за наведеною вище формулою (7) (рис.12) :

$$\omega_2 = \frac{RPM \cdot 360}{60} = \frac{202 \cdot 360}{60} = 1212 \text{ }^\circ/\text{с} .$$

$$\varepsilon_{step} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} = \frac{1212 - 0.1}{0.00679} = 178483 \text{ }^\circ/\text{с}^2 .$$

Максимальна швидкість двигунів складає $\omega_{step} = 270$ об/ хв для BLDC двигуна, що дорівнює $\omega_{step} = 1620 \text{ }^\circ/\text{с}$, та $\omega_{step} = 202$ об/ хв для крокового двигуна, що дорівнює $\omega_{step} = 1212 \text{ }^\circ/\text{с}$.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки. BLDC двигун виконує завдання повороту на 90 градусів на 14,136 мс швидше за кроковий двигун. Незважаючи на більш високе кутове прискорення крокового двигуна, його максимальна кутова швидкість виявилася нижчою. Обидва типи двигунів задовольняють вимоги за динамічними характеристиками. Однак, BLDC двигун має значні переваги за швидкістю та габаритами, що робить його більш раціональним вибором для розроблюваної поворотної системи.

Список використаних джерел

1. Лінчевський І. Фізика: навчальний посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за технічними спеціальностями / І. Лінчевський, В. Хіст. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 141 с.
2. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: Підручник для здобувачів вищої освіти / Д.Журавель, І. Паламарчук, С. Уманський, В. Паламарчук. – Київ: ЦП «Компринт», 2021. – 449 с.
3. Richmond K. Mechatronic Systems Design, Methods. Models. Concepts / K. Richmond, C. Janschek. // DOI:10.1007/978-3-642-17531-2. – 2012.Design challenges regarding

high- definition electro-optic/infrared stabilized imaging systems / J. Miller, S. Way, B. Ellison, C. Archer. – 2013.

4. Adaptive Multi-Parameter Estimation of Inertial Stabilization Platform with Unknown Load / [J. Zheng, X. Xie, B. Li та ін.]. – 2023.

5. Clarence W. de Silva C. Mechatronic Systems Devices, Design, Control, Operation and Monitoring, Mechatronic Systems / Clarence W. de Silva., 2014.

6. Електромеханічні виконуючі пристрої у стабілізаційно-поворотних оптичних системах / В. Д. Стешенко, О. Т. Титенко, А. А. Новосад, Б. М. Деружко. // матеріали конф. XII МНТК «РТПСАС-2023». Київ, 13 – 15 грудня 2023 р.. – 2023. – С. 76–78.

7. 39H NEMA16 2Phase 1.8° [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: 8. <https://www.czykmotor.com/Product/39H-NEMA16-2Phase-1-8%C2%B0.html>.

8. Corke P. Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in MATLAB [Електронний ресурс] / Peter Corke // Berlin Heidelberg: Springer Publishing. – 2013.

9. Raymond A. S. Physics for scientists & engineers / A. Serway Raymond. // Saunders College Publishing. – 1986. – С. 202.

References

1. I. Linchevskiy. Physics: study guide for students of the first (bachelor's) level of higher education in technical specialties / I. Linchevskiy, V. Hist. – Kyiv: KPI named after Igor Sikorskiy, 2023. – 141 p.

2. Hydraulics, hydraulic and pneumatic drives: Textbook for students of higher education / D. Zhuravel, I. Palamarchuk, S. Umanskyi, V. Palamarchuk. - Kyiv: CP "Comprint", 2021. - 449 p.

3. Richmond K. Mechatronic Systems Design, Methods. Models. Concepts / K. Richmond, C. Janschek. // DOI:10.1007/978-3-642-17531-2. – 2012. Design challenges regarding high-definition electro-optic/infrared stabilized imaging systems / J. Miller, S. Way, B. Ellison, C. Archer. - 2013.

4. Adaptive Multi-Parameter Estimation of Inertial Stabilization Platform with Unknown Load / [J. Zheng, X. Xie, B. Li, and others] - 2023.

5. Clarence W. de Silva C. Mechatronic Systems Devices, Design, Control, Operation and Monitoring, Mechatronic Systems / Clarence W. de Silva., 2014.

6. Electromechanical actuators in stabilization and rotation optical systems / V. D. Steshenko, O. T. Tytenko, A. A. Novosad, B. M. Deruzhko. // conference materials XII MNTK "RTPSAS-2023". Kyiv, December 13-15, 2023. - 2023. - P. 76-78.

7. 39H NEMA16 2Phase 1.8° [Electronic resource] - Resource access mode: 8. <https://www.czykmotor.com/Product/39H-NEMA16-2Phase-1-8%C2%B0.html>.

8. Corke P. Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in MATLAB [Electronic resource] / Peter Corke // Berlin Heidelberg: Springer Publishing. - 2013.

9. Raymond A. S. Physics for scientists & engineers / A. Serway Raymond. // Saunders College Publishing. - 1986. - P. 202.