

Методика експериментальних досліджень спрощеної моделі БПЛА типу бікоптер

*Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»*

Сучасні літальні апарати, зазвичай, є статично нестійкими об'єктами. За рахунок цього досягається підвищена маневреність та керованість. Одним із перспективних напрямів є розробка та впровадження БПЛА типу бікоптер або конвертоплан. Їхній рух забезпечується двома гвинтовими електроприводами. Неідентичність параметрів двигунів та особливості руху БПЛА такого типу зумовлюють особливі вимоги до систем управління. Для забезпечення стійкості необхідне моделювання та проведення досліджень за допомогою різноманітних інструментальних засобів. Найбільш доступними моделями нестійких рухів є маятникові пристрої різного виду, які дозволяють вивчати процеси стабілізації. Метою роботи є використання комп'ютерної системи стабілізації спрощеної моделі БПЛА типу бікоптер за рахунок зміни тяги двигунів. Завданнями роботи є: розробка комп'ютерної системи стабілізації за кутом тангажу або крену, створення її перевірка алгоритмів стабілізації на лабораторному стенді з використанням контролера ARDUINO, дослідження функціональних можливостей контурів кутової стабілізації. Об'єкт дослідження: комп'ютерна система управління ЛА, що виконує задачу стабілізації БПЛА. Предмет дослідження: процеси стабілізації кутового положення спрощеної моделі бікоптера. При виконанні роботи було обрано закон управління, що використовує зворотні зв'язки за кутом і кутовою швидкістю. Запропоновано варіант стабілізації ЛА при використанні управління тягою двигунів. Обрано і випробувано закон управління комп'ютерною системою стабілізації, яка реалізована на контролері ARDUINO. Прикладною цінністю роботи є подальше використання отриманих результатів у сучасних зразках бікоптерів.

Ключові слова: бікоптер, стабілізація кутового положення, контури стабілізації, лабораторний зразок.

Вступ

У ході проведення навчання здобувачів освіти важливим завданням є натурні та напівнатурні дослідження розроблюваної системи автоматичного управління, призначеної для стабілізації обраного типу ЛА. [1,2]. Якщо у ході роботи виготовляється стенд або лабораторний зразок об'єкта управління, актуальним є розробка та використання закону управління та здобуття навичок налаштування регуляторів для отримання перехідних процесів необхідної якості. Ця стаття відображає досвід розв'язку таких завдань. Крім того передбачено самостійний синтез декількох фрагментів коду програм для проведення досліджень. Ці матеріали додатково використовувались при проведенні "Роботурнів" серед школярів на базі Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»

1. Опис спрощеної моделі бікоптеру

Зовнішній вигляд установки наведено на рис. 1.

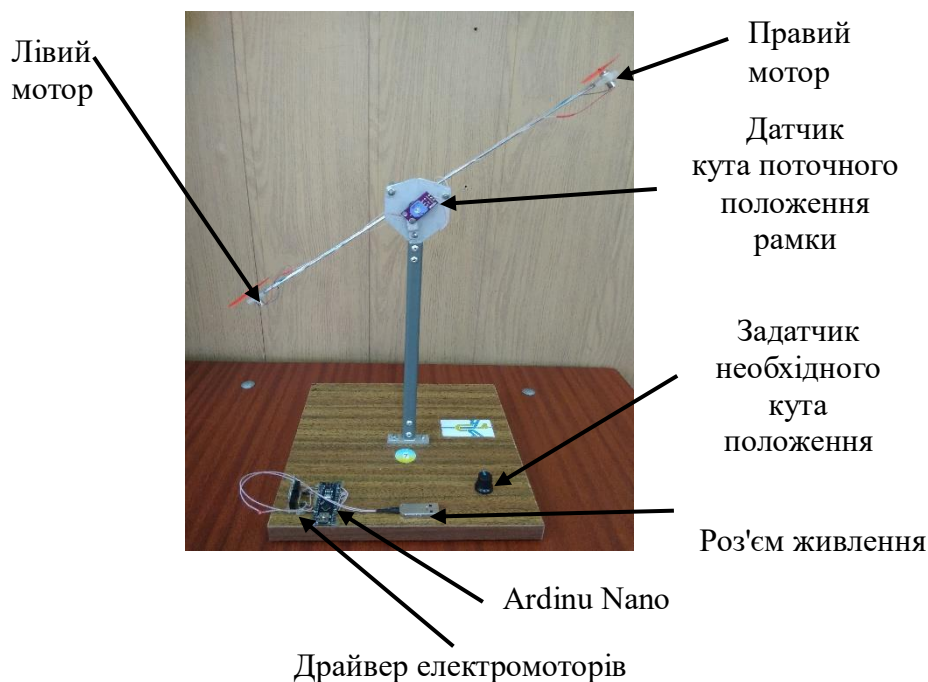


Рис. 1. Зовнішній вигляд установки.

До складу макета входять:

1. Два електродвигуни з пропелерами;
 2. Підсилювач потужності (Драйвер);
 3. Контролер – ARDUINO-NANO-V3.0;
 4. Датчик кута повороту SV01A103AE01R00;
 5. Резистор змінний 10K;
 6. Джерело живлення (наприклад, акумулятор або Power Bank).
- На рис. 2 показані кути, що використовуються при виконанні роботи.

2. Загальні відомості

Позначимо:



Ліва напівплощина $\text{rzad} < 0$



Права напівплощина $\text{rzad} \geq 0$

Ілюстрація поточного та заданого кутів положення рамки наведено на рис. 2.

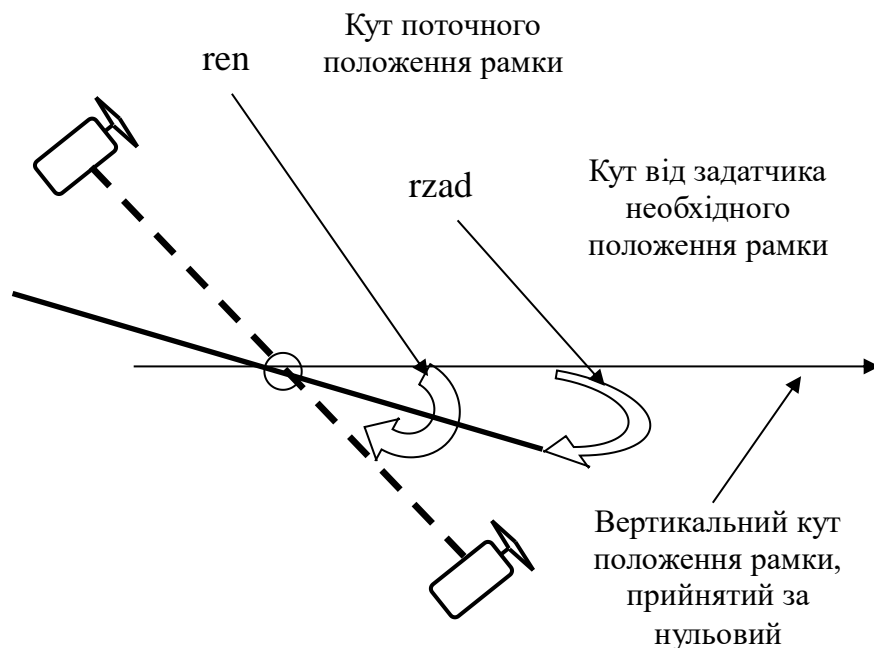


Рис.2. Ілюстрація поточного та заданого кутів положення рамки.

Основні технологічні особливості, що виникають при виготовленні та використанні набору однотипних установок:

1. Підвіс рамки може мати не нульове тертя при обертанні. Усувається збільшенням обертів двигунів;

2. Покази датчика не завжди відповідають горизонтальному положенню двигунів. У програмі задається зміщення показань датчика таким чином, щоб у горизонтальному положенні кут відповідав нульовому значенню;

3. Електродвигуни обов'язково мають різні характеристики, а отже і тягу. Для одного з моторів необхідно вводити коефіцієнт, що підвищує або знижує значення сигналу, що управляє, а отже обороти і тягу;

Розглянемо суть методу, який використовується для підйому та стабілізації макета для заданого кута.

У запропонованому коді програми прийняті такі позначення:

rzad- задане значення кута положення рамки, яке встановлюється за допомогою потенціометра, розташованого на корпусі установки;

gen- кут поточного положення рамки, що визначається резистивним енкодером.

Вихідною інформацією про положення рамки з двигунами є кут відхилення від заданого значення ($rzad - gen$). Природно, що чим кут більше, то більше має бути швидкість обертання моторів, відповідно і їх тяга. Причому, залежно від знака цієї різниці, необхідно керувати або лівим або правим моторами. Це пов'язано з тим, що мотор з пропелером забезпечує ефективно лише підйом. Різнісна складова відхилення поточного кута від заданого значення ($rzad - gen$) називається пропорційною. Для переходу до значення напруги та масштабування при підстроюванні тяги окремих моторів введемо коефіцієнт - пропорційний.

Використання лише пропорційної складової керування рухом макета

недостатньо тому, що у різних ділянках зміни кутового положення різна швидкість переміщення рамки. Крім того, зміна швидкості має коливальний характер.

Для усунення такого ефекту застосовується друга складова у законі управління – диференційна. Вона формується в такий спосіб. При переміщенні двигунів поточне значення різниці кутів ($\alpha_{\text{зад}} - \alpha_{\text{рен}}$) положення рамки програмним чином диференціюється. Отже, визначається швидкість кутового переміщення об'єкта. Ця складова, як і пропорційна, регулюється з допомогою свого коефіцієнта передачі – диференційного.

Зрештою сигнал управління двигунами, а отже і тягою містить дві складові, які визначаються різницею заданого та поточного кутів та швидкістю її зміни.

Висновок. Практична реалізація налаштування руху для конкретної установки зводиться до підбору значень пропорційного та диференційного коефіцієнтів передачі окремо для правої та лівої напівплощин.

2. Загальна характеристика алгоритму управління

Попередньо зазначимо, що код програми умовно містить чотири фрагменти.

1. Стандартний. Оголошення змінних. Встановлення та призначення входів – виходів та інші вихідні оголошення (у роботі не використовується);
2. Стабілізація у правій напівплощині (Завдання № 1);
3. Стабілізація у лівій напівплощині (Завдання № 2)
4. Код програми необхідно скласти та ввести в контролер самостійно;
5. Управління рухом рамки за синусоїдальним законом (Завдання № 3)

Код програми необхідно скласти та ввести в контролер самостійно.

ПРИМІТКА. Практична робота з установкою зводиться до виконання першого, другого та третього завдання і реалізує усунення дефектів, що виникають при виробництві макета і компенсацію відмінності параметрів елементів конструкції, наприклад, електромоторів.

Під час виконання завдань виконується зміна коду програми. Новий код обов'язково має бути завантажений у контролер установки.

Після повідомлення про закінчення завантаження (у нижньому куті вікна Ардуїно) у вікні "Інструменти" вибрати та натиснути вкладку "Монітор порту".

При виведенні інформації в новому вікні звернути увагу на швидкість інформації, що виводиться. Вона повинна відповідати числу 9600.

Створений алгоритм, що використовується, подано на рис. 3.

3. Виконання досліджень

Виконання роботи та досліджень передбачає три завдання для яких існує не тільки налагоджування закону управління а ще і придбання навичок створення коду програми.

Перше завдання. Налаштування системи управління для стабілізації положення моделі бікоптера на заданому значенні кута в правій напівплощині положення рамки. (Виконується за наданим кодом програми)

Друге завдання. Налаштування системи управління для стабілізації положення моделі бікоптера на заданому значенні кута в лівій напівплощині положення рамки. (Код програми необхідно скласти та ввести самостійно)

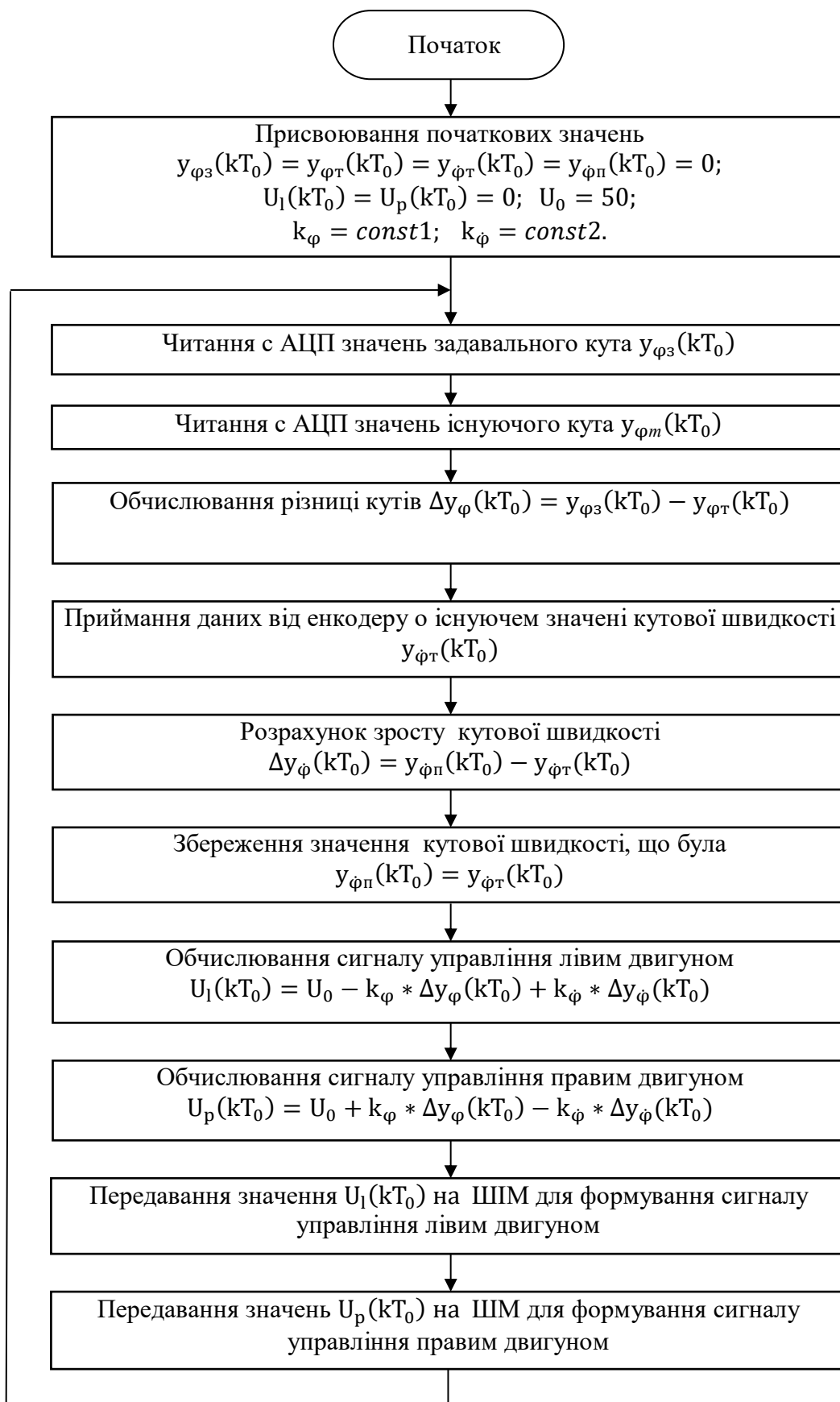


Рис. 3. Алгоритм роботи контролера

Третє завдання. Скласти й запровадити код програми для руху рамки об'єкта від однієї до іншої напівплощини за синусоїдальним законом

Перше завдання

У цьому завданні необхідно налаштувати пропорційну та диференціальну складову закону управління для плавного руху рамки об'єкта у правій напівплощині.

Нагадування. Під час виконання завдань виконується зміна коду програми. Новий код обов'язково має бути завантажений у контролер установки. [4,5].

Після повідомлення про закінчення завантаження (у нижньому куті вікна Ардуїно) у вікні "Інструменти" вибрати та натиснути вкладку "Монітор порту".

При виведенні інформації в новому вікні звернути увагу на швидкість інформації, що виводиться. Вона повинна відповідати числу 9600.

Оператори початку виконання алгоритму управління.

```
void loop() {  
  ren=analogRead(A0); // опитування енкодера (датчик поточного кута)  
  ren=map(ren,281,773,-85,+85)+5; //+5 // масштабування даних енкодера  
  rzad=analogRead(A1); // опитування потенціометра (кут задавальний)  
  rzad=map(rzad,0,1023,-85,+85); // масштабування даних потенціометра  
  ПРИМІТКА. Визначення та регулювання диференціальної складової sdif  
  виконується для правої та лівої напівплощин.  
  sdif = (renpr-ren) *40;  
  renpr = ren;
```

Значення 40 наведено як приклад. Його необхідно визначати при регулюванні диференціальної складової.

Права напівплощина

Задане значення кута положення рамки $rzad \geq 0$.

Перший етап ($rzad-ren \leq 0$)

Наявність двох етапів обумовлено тим, що різниця кутів (що задає $rzad$ і поточного ren) положення рамки може набувати як позитивних, так і негативних значень. У цьому негативних значень різниці кутів необхідно керувати правим мотором, а позитивної - лівим.

Початок: $if (rzad \geq 0)$.

Графічна ілюстрація алгоритму управління для негативної різниці $rzad - ren$ наведено на рис 3.

Цьому етапу відповідає наступний код програми.

```
if ((rzad-ren) <= 0) {  
  dp = visx * 1 - (rzad - ren) * 1.5 - sdif;  
  dl = visx * 1; }
```

Тут:- змінна $visx$ - Це задана константа, яка зменшує інерційність моторів у момент старту;

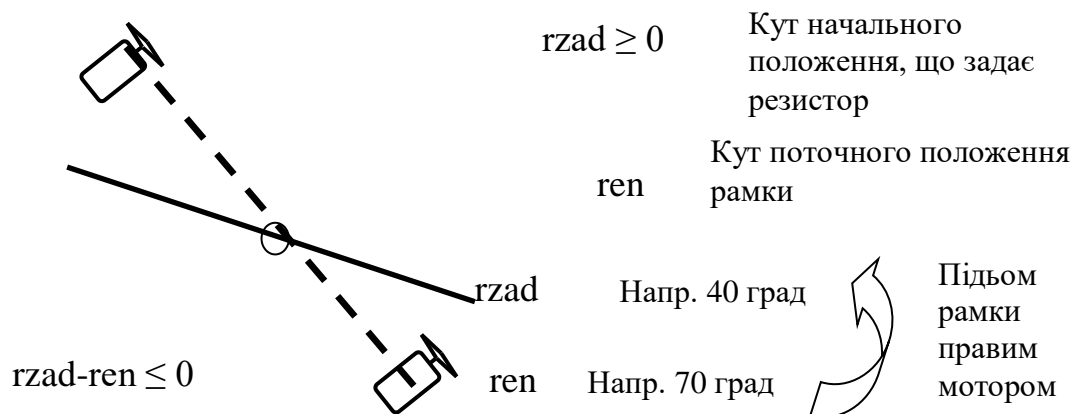


Рис. 3. Ілюстрація алгоритму управління для етапу, коли $r_{zad} \geq 0$ та $r_{zad} - r_{en} \leq 0$

- $sdif$ – диференціальна складова закону управління (її опис наведено вище);
- стабілізація провадиться правим двигуном (dp);
- числове значення 1.5 наведено для прикладу. Це i є пропорційна складова закону управління, яка підлягає регулюванню під час виконання роботи.

Другий етап ($r_{zad} - r_{en} > 0$)

Графічна ілюстрація алгоритму управління для позитивної різниці **$r_{zad} - r_{en}$** наведено на рис 4.

Цьому етапу відповідає наступний код програми.

```
else {
    dp = visx * 1;
    dl = visx * 1 + (r_zad - r_en) * 1.5 + sdif; }
```

ПРИМІТКА. Зміна знаків ($r_{zad} - r_{en}$) та $sdif$ в операторі $dl = visx * 1 + (r_{zad} - r_{en}) * 1.5 + sdif$ викликано тим, що для цього етапу змінюється знак різниці ($r_{zad} - r_{en}$). Крім того, у цьому випадку стабілізація рамки макета досягається роботою лівого двигуна (dl).

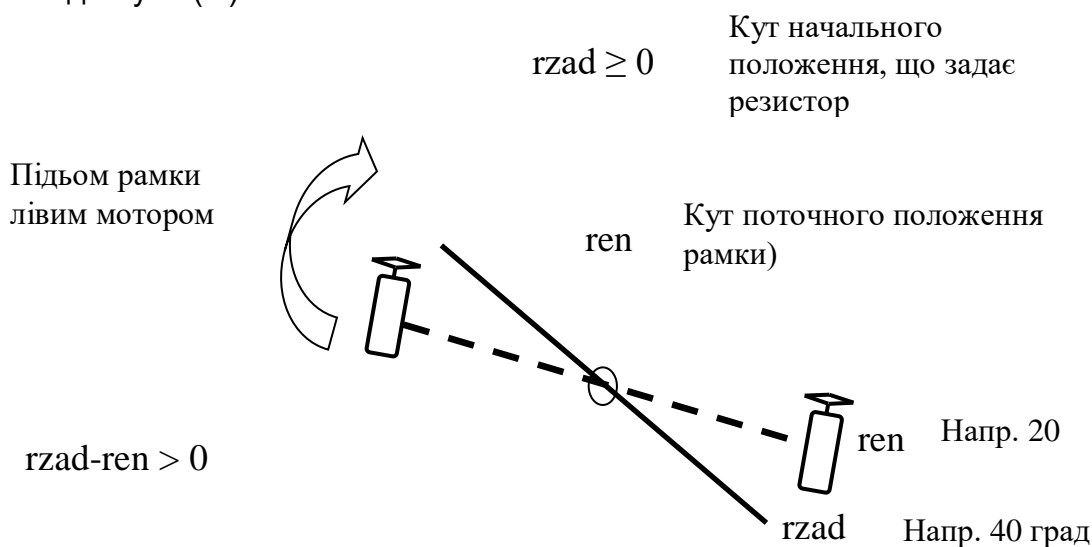


Рис. 4. Ілюстрація алгоритму управління для етапу, коли $r_{zad} \geq 0$ і $r_{zad} - r_{en} > 0$

Виконання всіх завдань має ітераційний характер та передбачає декілька кроків.

Це:

Спочатку, вибір швидкості обертання моторів для відносної стабілізації рамки.

Досягається при збільшенні обертів одного з двигунів у більшу або другого в меншу сторону (наприклад, $visx \cdot 1$ коефіцієнт 1 необхідно змінювати для врівноваження тяги двигунів).

Крок X+. Зміна пропорційного коефіцієнта задля досягнення стійкого процесу виходу заданий кут у режимі стабілізації. Це регулюється як збільшенням і зменшенням його значення.

Крок Y+. Зміна диференціального коефіцієнта для досягнення рівномірного врівноважування без коливань. Це може бути отримано як при збільшенні, так і при зменшенні його значення.

Крок остаточний. Процес налаштування ітераційний, тому цей крок зводиться до повернення та повторення кроків Крок X+ та Крок Y+.

Підсумком виконання першого, другого та третього завдання є впевнена та рівномірна стабілізація об'єкта на заданому значенні кута $rzad$.

Друге завдання

У цьому завданні необхідно налаштувати пропорційну та диференційну складові закону управління для плавного руху рамки об'єкта в лівій на півплощині. (Код програми скласти та ввести самостійно)

Ліва напівплощина

Задане значення кута положення рамки $rzad < 0$.

Перший етап

Для кутів ($rzad - ren \geq 0$) наявність двох етапів обумовлено тим, що різниця кутів (що задає $rzad$ і поточного ren) положення рамки може набувати як позитивних, так і негативних значень. При цьому для позитивних значень різниці кутів необхідно керувати лівим двигуном, а для негативної - правим.

Початок: $if (rzad < 0)$.

ПРИМІТКА. Всі кути мають протилежний знак у порівнянні з правою напівплощиною. Тож позитивних значень різниці кутів необхідно керувати лівим мотором, а негативних - правим.

Графічна ілюстрація алгоритму управління для позитивної різниці **$rzad - ren$** лівій напівплощині наведено на рис 5.

Код програми роботи макета необхідно скласти та ввести в ARDUINO самостійно.

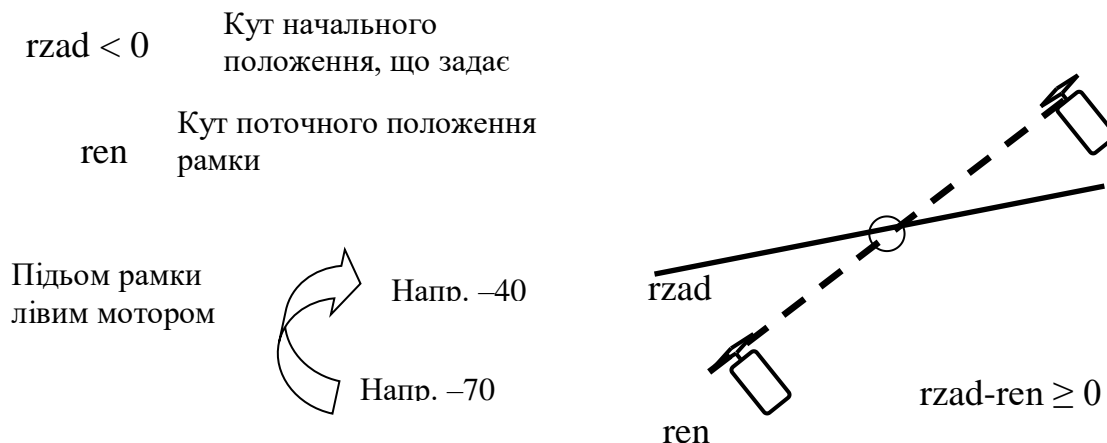


Рис. 5. Ілюстрація алгоритму управління для етапу, коли $rzad < 0$ і $rzad - ren \geq 0$

Другий етап ($rzad - ren < 0$)

Графічна ілюстрація алгоритму управління для негативної різниці **$rzad - ren$** наведено на рис 6.

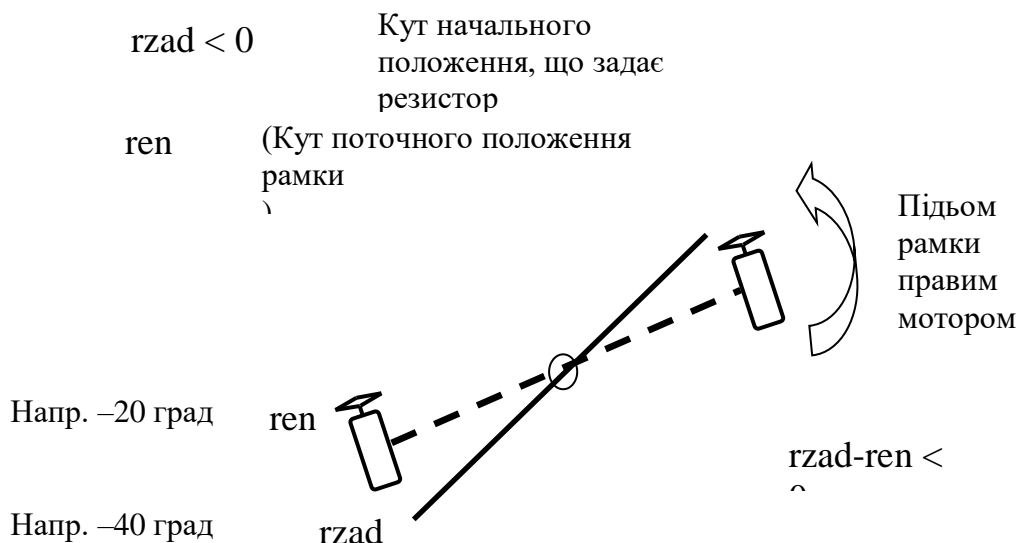
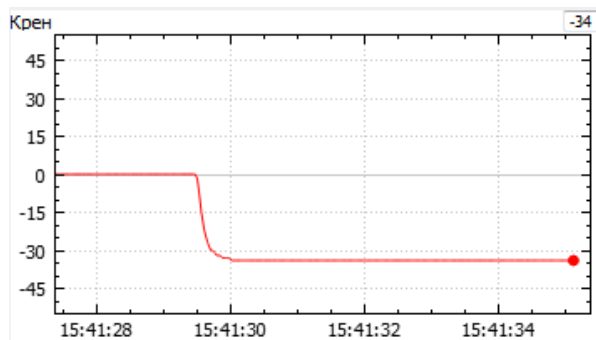


Рис. 6. Ілюстрація алгоритму управління для етапу, коли $rzad < 0$ і $rzad - ren < 0$

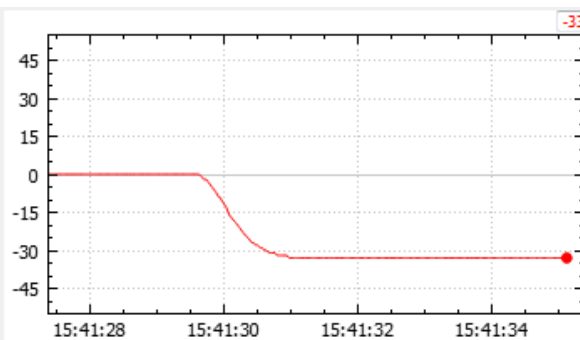
Код програми роботи макета необхідно скласти та ввести в ARDUINO самостійно.

Так, наприклад, варіант експерименту де враховуються сигнали як задавального (кут нахилу рамки) і зворотнього зв'язку (відпрацювання нахилу) для різних коефіцієнтів налаштування регулятора в законі управління наведено на рис. 7.

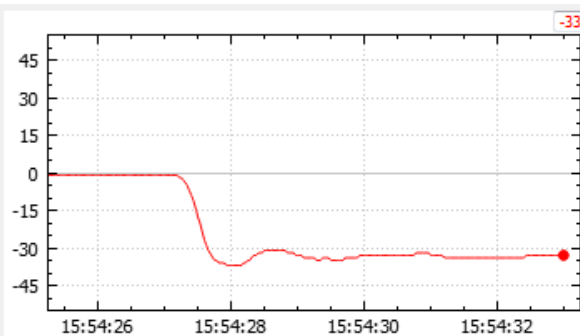
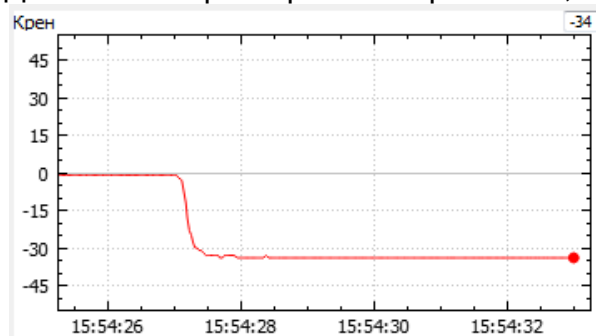
Сигнал керування



Сигнал зворотного зв'язку



Динамічна характеристика при $K_p = 2$, $K_d = 2$.



Динамічна характеристика при $K_d = 4$, $K_p = 4,5$.

Рис. 7. Варіант результатів для різних коефіцієнтів налаштування регулятора.

Де: K_d - диференційний, а K_p - пропорційний коефіцієнти налаштування регулятора. Цей рисунок візуально демонструє залежність перехідного процесу від параметрів регулятора. [3].

Третє завдання

У цьому завданні потрібно скласти й запровадити код програми для руху рамки об'єкта від однієї до іншої напівплощини за синусоїдальним законом

Для виконання цього завдання необхідно виключити опитування датчика кута, що задає - оголосити як коментар (//)

// `gzad = analogRead (A1);` // з потенціометра (пристрій, що задає)

// `gzad = map (gzad, 0,1023, -85, +85);`

Далі код програми для зміни значення кута `gzad`, що задає, за синусоїдальним законом необхідно скласти і ввести в ARDUINO самостійно.

Список літератури

1. Немшилов, Ю. О. Моделі систем управління літальними апаратами та методи експериментальних досліджень [Текст] : навч. посіб. / Ю. О. Немшилов. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "ХАІ", 2019. – 160 с.

2. Кулик, А.С. Стабилизация неустойчивых состояний обратного маятника с винтовыми электроприводами [Текст] / А.С. Кулик, К.Ю. Дергачев, С.Н. Пасичник, Ю.А. Немшилов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2019. – Вип. 1 (53). – С. 81 – 89.

3. Немшилов, Ю. О. Практичне визначення передавальних функцій лабораторного стенду літака за кутом ристання [Текст] / Ю. О. Немшилов, С. М. Па-січник // Відкриті інформаційні та комп'ютерно інтегровані технології. – 2024. – № 99. – С. 62–77.

4. Знайомство з Ардуїно та набуття первинних навичок роботи. <https://www.twirpx.com/file/1382981/>

5. Загальні відомості, опис середовища та програмування Ардуїно. <http://www.vixri.ru> В. М. Гололобів. З чого починаються роботи. Про проект Arduino для школярів (і не лише)

References

1. Nemshilov, Yu. O. Models of aircraft control systems and methods of experimental research [Text]: academic. manual / Yu. O. Nemshilov. - Kharkiv: National. aerospace University named after M. E. Zhukovsky "KHAU", 2019. – 160 p.

2. Kulyk, A.S. Stabilization of an unstable inverted pendulum with screw electric drives [Text] / A.S. Kulyk, K.Yu. Dergachev, S.N. Pasychynyk, Yu.A. Nemshilov // Management, navigation and communication systems. – 2019. – Issue 1 (53). - P. 81–89.

3. Nemshilov, Yu. O. Practical determination of the transfer functions of the aircraft laboratory stand by yaw angle [Text] / Yu. O. Nemshilov, S. M. Pasichnik // Open information and computer-integrated technologies. – 2024. – No. 99. – P. 62–77.

4. Acquaintance with Arduino and acquisition of basic work skills. <https://www.twirpx.com/file/1382981/>

5. General information, description of the Arduino environment and programming. <http://www.vixri.ru> V. M. Hololobov. Where does the work begin? About the Arduino project for schoolchildren (and not only)

Надійшла до редакції 22.08.2024; розглянута на редколегії 22.08.2024

Methodology of experimental studies of a simplified bicopter UAV model

Modern aircraft are usually statically unstable objects. Due to this, increased maneuverability and controllability is achieved. One of the promising directions is the development and implementation of UAVs of the bicopter or convertible type. Their movement is provided by two screw electric drives. The non-identity of the engine parameters and the peculiarities of the movement of UAVs of this type cause special requirements for the control systems. To ensure sustainability, modeling and conducting research with the help of various tools is necessary. The most available models of unstable movements are pendulum devices of various types, which allow studying stabilization processes. The purpose of the work is to use a computer stabilization system of a simplified bicopter UAV model by changing the thrust of the engines. The tasks of the work are: development of a computer stabilization system for the angle of pitch or roll, creation and verification of stabilization algorithms on a laboratory bench using an ARDUINO controller, research of the functional capabilities of angular stabilization circuits. The object of the study: a computer control system of an aircraft that performs the task of stabilizing a UAV. Subject of research: processes of stabilization of the

angular position of a simplified bicopter model. When performing the work, a control law using angular and angular velocity feedback was chosen. A variant of aircraft stabilization when using engine thrust control is proposed. The control law of the computer stabilization system, which is implemented on the ARDUINO controller, was selected and tested. The applied value of the work is the further use of the obtained results in modern samples of bicopters.

Key words: bicopter, angular position stabilization, stabilization contours, laboratory sample.

Відомості про авторів

Немшилов Юрій Олександрович, доц., к.т.н., доцент кафедри «Системи управління літальних апаратів», Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна. ORCID: 0000-0001-6610-461X, y.nemshilov@khai.edu.

About the authors

Nemshylov Yuriy Oleksandrovych – Ph.D, Associate professor of Department Aircraft Management Systems, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine. ORCID: 0000-0001-6610-461X, y.nemshilov@khai.edu.