

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РОБОТИ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА РУХУ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ

Ю. О. Ромасевич, доктор технічних наук, професор

В. С. Ловейкін, доктор технічних наук, професор

О. Г. Шевчук, кандидат технічних наук

І. М. Болбот, доктор технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net

Анотація. *Наведено експериментальні дослідження роботи нейрорегулятора лабораторної установки ланки квадрокоптера. Остання є нелінійною динамічною системою. Вхідний вектор нейрорегулятора включав кут нахилу стержня (промінь квадрокоптера) відносно горизонту, його кутову швидкість та кутову швидкість пропелера. Вихідний сигнал нейрорегулятора був пропорційний до напруги живлення привода пропелера.*

У статті проведено планування експериментальних досліджень та обрано вісім показників, за якими проведена оцінка якості процесу регулювання. Крім того, проведено якісний аналіз процесів регулювання руху динамічної системи шляхом побудови відповідних графічних залежностей.

Отримані дані показали гарну якість регулювання при нульовій уставці кута. Для інших значень уставки ($-0,52$ та $-1,05$ рад) нейрорегулятор забезпечує вихід стержня у окіл уставки та стійкість регулювання. Однак, при цьому якість регулювання не висока. У роботі встановлено причину цього ефекту.

Для того, щоб підвищити якість регулювання проведено модифікацію нейрорегулятора шляхом включення у його структуру інтегральної складової. При цьому усталена похибка регулювання суттєво зменшилась при незначних змінах інших оціночних показників.

Ключові слова: *нейрорегулятор, динамічна система, експериментальні дослідження, оцінка*

Актуальність. *Значна частина сучасних систем керування ґрунтується на можливостях технологій штучних нейронних мереж. Останні, завдяки своїм потужним апроксимаційним властивостям, здатні працювати у контурах регулювання досить складних (у тому числі нелінійних) динамічних систем. Такими системами можуть виступати: квадрокоптери, гіроборди, мобільні та стаціонарні роботи, 3D-принтери тощо.*

Питання синтезу нейрорегуляторів для динамічних систем не є новим. Однак, у відомих наукових публікаціях спостерігається переважаюча частка теоретичних робіт. Наукові роботи, які б у тому чи іншому аспекті висвітлювали результати експериментальних досліджень, порівняно не багато. Це ставить під сумнів деякі теоретичні результати. Для того, щоб довести їх валідність, необхідно проводити ряд експериментальних досліджень, які б дозволили виявити позитивні і негативні властивості практичної реалізації нейрорегуляторів. Звичайно, перший етап таких досліджень повинен проходити в лабораторних умовах. У представленій роботі наведено результати саме таких досліджень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [1] автори навели класифікацію методів керування квадрокоптерами. Серед них вони виділили три великих класи: лінійне робастне керування, нелінійне та інтелектуальне. Останній клас, крім інших, включає методи, що ґрунтуються на технологіях штучних нейронних мереж.

У статті [2] автори порівняли застосування ПД- та нейрорегуляторів для задач набору та утримання висоти квадрокоптера. Нейрорегулятор показав кращі результати за показниками усталеної похибки висоти квадрокоптера та тривалості її досягнення.

У роботі [3] проведено аналіз методів, які ґрунтуються на застосуванні математичних моделей квадрокоптерів та моделей на основі штучних нейронних мереж. Ця задача відома під назвою „нейроідентифікації” об’єкта керування (регулювання). Автори також проаналізувати методи керування квадрокоптерами та прийшли до висновку, що ефективні методи керування можуть бути отримані на основі поєднання технологій штучних нейронних мереж та математичних моделей квадрокоптерів.

У статті [4] автори застосували штучні нейронні мережі для задач регулювання динаміки польоту квадрокоптера. Робота базується на теоретичних та експериментальних результатах. Також було проведено порівняльний аналіз застосування нейрорегулятора, який показав кращу якість регулювання порівняно з ПД-алгоритмом.

Загалом, тенденції щодо ускладнення алгоритмів функціонування нейрорегуляторів руху квадрокоптерів, розширення класу нейронних мереж для задач ідентифікації динаміки квадрокоптерів та синтезу нейрорегуляторів, а також постановка нових задач регулювання динаміки квадрокоптерів є домінуючими у цій галузі науково-прикладних досліджень.

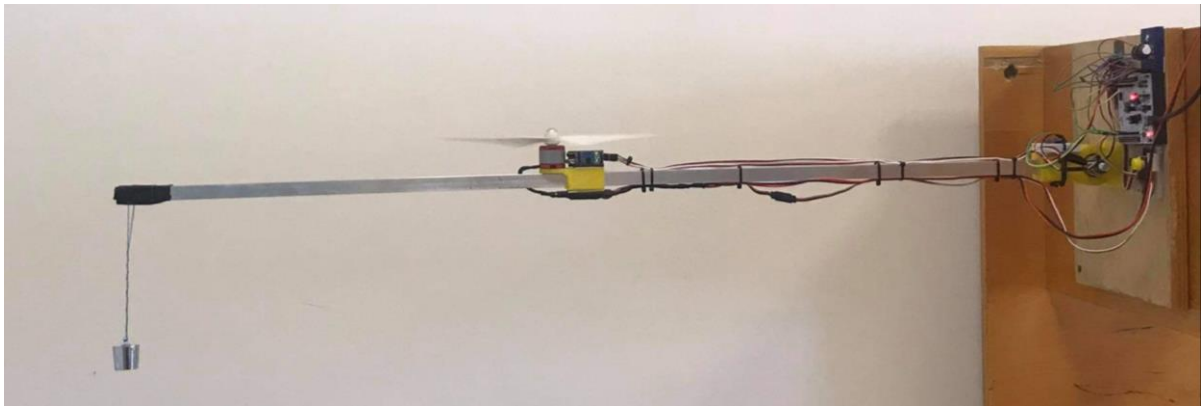
Мета дослідження - визначення ефективності застосування нейрорегулятора для регулювання руху нелінійної динамічної системи (ланка квадрокоптера). Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) провести планування експериментальних досліджень; 2) проаналізувати отримані результати та вказати напрямки подальшого вдосконалення нейрорегулятора; 3) провести експериментальні дослідження роботи модифікованого нейрорегулятора та виконати їх аналіз.

Матеріали і методи дослідження. Всі дослідження були проведені в лабораторній установці, яка є нелінійною динамічною системою (рис. 1) [5].

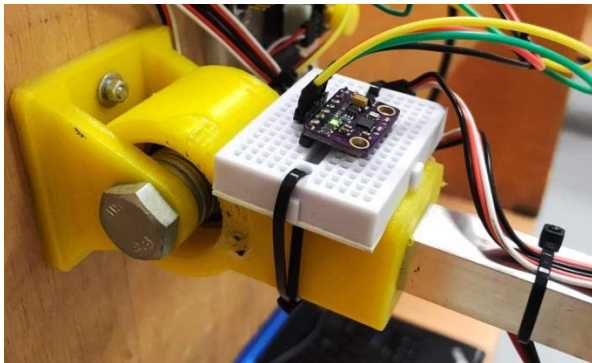
Установка включає стержень (рис. 1, а), поворотну секцію на його правому кінці (рис. 1, б), безщітковий двигун з пропелером (рис. 1, в) та електронні компоненти (драйвер двигуна, мікроконтролер STM32F4, датчик MPU9250 на шарнірному з'єднанні, оптопару для визначення кутової швидкості гвинта та блок живлення).

Оскільки положення двигуна на стержні зафіксовано і стержень може обертатися навколо шарніра, то проекції рушійної сили, зумовленої обертанням лопатей пропелера, і сила ваги, що діє на горизонтальну вісь змінюються. Вони нелінійно залежать від кутового положення стрижня. Ось чому динамічна система є нелінійною.

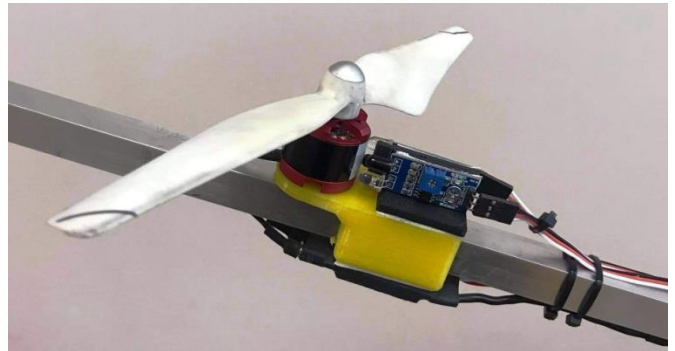
Керування рухом лабораторної установки забезпечується подачею на двигун деякого рівня напруги. Вона формується на виході нейрорегулятора. Останній був розроблений на основі навчання штучної нейронної мережі на даних, які, у свою чергу, були зібрані при ручному керуванні рухом установки. Таким чином, вхідний вектор нейрорегулятора включає значення кута та кутової швидкості стержня і кутову швидкість пропелера. Детальний опис процесу розробки нейрорегулятора виходить за рамки цієї роботи.



а



б



в

Рис. 1. Фізична конфігурація лабораторної установки:

а - загальний вигляд; *б* - шарнірна секція з датчиком MPU9250; *в* - безщітковий двигун RS 2212-920 кВ Readytosky з драйвером, гвинтом та датчиком кутової швидкості гвинта

Для того, щоб дослідити якісні характеристики роботи нейрорегулятора було проведено експериментальні дослідження. Їх суть полягала у тому, що у різних місцях до стержня прикріплювали гирьку на гнучкому підвісі (рис. 1, *а*).

Коливання гирьки впливали на рух стержня, відхиляючи його положення від уставки як у статичному режимі (вплив ваги гирьки), так і у динамічному режимі (динамічна дія гирьки при її коливаннях). Експерименти були проведені при різних значеннях довжини гнучкого підвісу гирьки (це впливало на частоту коливань гирьки і, відповідно, на частоту динамічних впливів на рух стержня), маси гирьки та уставки кута (цільового кута). Загалом незалежні фактори та рівні їх варіювання представлені у табл. 1.

1. План експериментальних досліджень 2·2·3

Незалежний фактор	Рівні варіювання незалежних факторів											
Довжина підвісу гирьки L , м	0,15						0,30					
Маса гирьки m , г	50			100			50			100		
*Уставка кута α_{st} , рад	0	- 0,52	- 1,05	0	- 0,52	- 1,05	0	- 0,52	- 1,05	0	- 0,52	- 1,05
Номер експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

* горизонтальне положення стержня відповідає випадку $\alpha=0$; вертикальне положення стержня відповідає $\alpha=-\pi/2$

Кожний експеримент полягав у тому, що виконували запуск системи і виведення її у окіл уставки. При цьому визначали кут стержня, його кутову швидкість, кутову швидкість пропелера та напругу живлення привода. На основі отриманих даних розраховували якісні показники регулювання: перерегулювання, %; тривалість перехідного процесу, с; відносну усталену похибку регулювання, рад; середньоквадратичне значення похибки регулювання протягом перехідного режиму, рад; максимальну кутову швидкість маятника, рад/с; максимальну кутову швидкість пропелера, рад/с; середньоквадратичне значення кутової швидкості пропелера, рад/с; середньоквадратичне значення напруги живлення привода протягом перехідного режиму, В. Всі перелічені показники є небажаними.

Всі зібрані експериментальні дані піддавались обробці за допомогою цифрового фільтра Савицького-Голея [6].

Результати досліджень та їх обговорення. Окремі розраховані оціночні показники, які отримані на основі експериментальних даних, наведено у табл. 2.

Дані для інших експериментальних досліджень (з 2 по 12) розраховано, але у статті не наведено. Також наведемо графічні залежності, які відповідають отриманим експериментальним даним (рис. 2).

2. Оціночні показники якості регулювання руху динамічної системи за допомогою нейрорегулятора для експерименту № 1

Показник	Одиниця вимірювання	Значення показника
Перерегулювання	%	9,31
Тривалість перехідного процесу	с	1,71
Відносна усталена похибка регулювання	%	9,22
Середньоквадратичне значення похибки регулювання протягом перехідного режиму	рад	0,62
Максимальна кутова швидкість маятника	рад/с	3,33
Максимальна кутова швидкість пропелера	рад/с	722,2
Середньоквадратичне значення кутової швидкості пропелера	рад/с	533,2
Середньоквадратичне значення напруги живлення приводу протягом перехідного режиму	В	6,09

Найбільш значущими показниками, які наведено у табл. 2, є усталена похибка регулювання та перерегулювання. Перша показує якість досягнення уставки α_{st} , а друга – максимальний вихід регульованої координати (кута α) за межі уставки. Аналіз чисельних даних, які наведено у табл. 2, та тих, які відповідають експериментам 2-12, показує, що найбільші значення відносної усталеної похибки регулювання відповідають уставці $\alpha_{st}=-1,05$ рад. Це пояснюється тим, що нейрорегулятор був синтезований для випадку $\alpha_{st}=0$ і в цьому режимі досить якісно працює (відносна усталена похибка регулювання рівна 4,5...19,6 %).

При $\alpha_{st}=-0,52$ рад цільовий кут відносно близький до нуля. Тому позитивні властивості нейрорегулятора, які характерні для випадку $\alpha_{st}=0$, частково властиві і для випадку $\alpha_{st}=-0,52$ рад. Тому для $\alpha_{st}=0$ відносна усталена похибка регулювання незначна (у межах 2,91...14,91 %). Для випадку $\alpha_{st}=-1,05$ рад спостерігається тенденція до збільшення відносної усталеної похибки регулювання. Це пояснюється тим, що уставка кута $\alpha_{st}=-1,05$ рад знаходиться досить далеко від нуля і, відповідно, нейрорегулятор не здатний якісно забезпечити регулювання в околі цієї уставки.

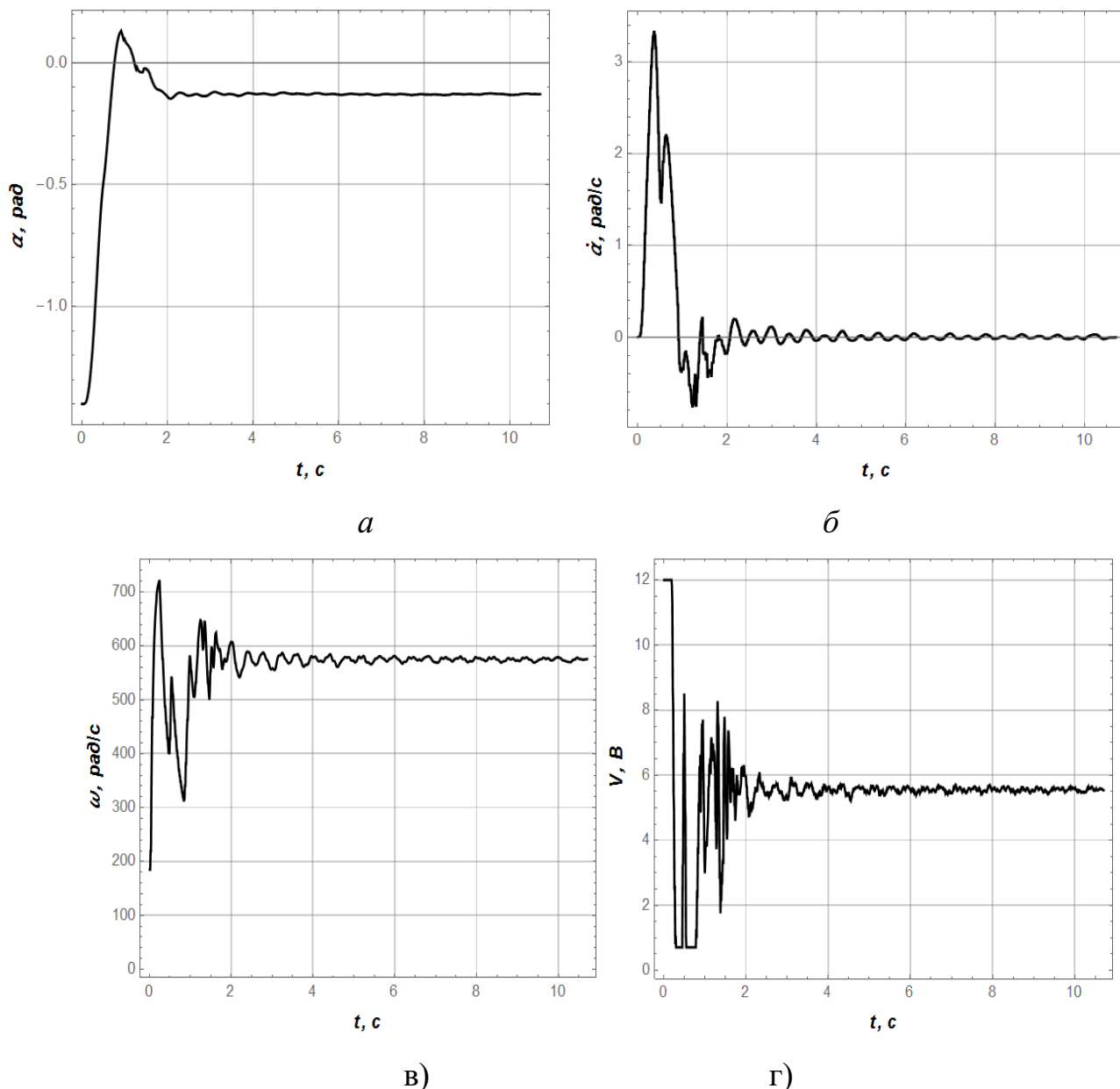


Рис. 2. Графіки отриманих експериментальних даних, що відповідають експерименту №1:

а - величина α ; *б* - величина $\dot{\alpha}$; *в* - величина ω ; *г* - напруга живлення двигуна пропелера

Для всіх випадків більші значення відносної усталеної похибки регулювання відповідають більшим значенням ваги гирьки, що цілком природно (більша вага гирьки викликає більший крутний момент, що діє на стержень, відхиляючи його від заданого значення α_{st}).

Описані вище причини щодо високої відносної усталеної похибки регулювання впливають також і на величину перерегулювання. Однак, тут також необхідно

враховувати динамічний вплив коливань гирьки: фаза коливань може вплинути на досить значне перерегулювання, що видно на рис. 3 (на рис. 3 сіра лінія відповідає уставці кута $\alpha_{st} = -1,05$ рад).

Короткочасне відхилення гирьки в сторону зростання кута стержня зумовлює значне відхилення самого стержня вгору. Крім того, значною є і відносна усталена похибка регулювання (для випадку, який відповідає рис. 3, ця величина рівна 41,59 %).

Загалом проведений аналіз підводить до висновку: синтез нейрорегулятора повинен враховувати величину α_{st} . Остання повинна бути включена як компонент вхідного вектора штучної нейронної мережі (не дивлячись на те, що вона буде константною).

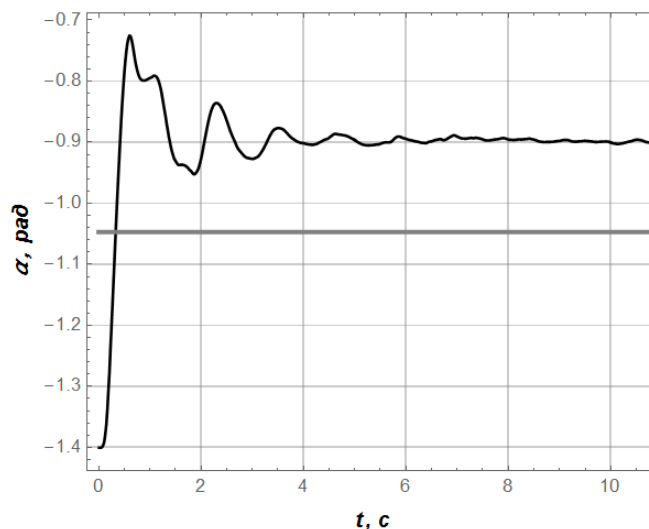


Рис. 3. Графік зміни величини α , що відповідає експерименту №9 (найбільше значення перерегулювання серед всіх проведених експериментів)

Тривалість перехідного процесу (яка визначається як момент, при якому кут стержня відхиляється від усталеного значення не більше, ніж на 2 %) для всіх експериментів є достатньо незначною. Вона знаходиться у діапазоні 1,20...3,55 с. Більші значення відповідають динамічному впливу коливань гирьки (рис. 4), які впливають на коливання кута нахилу стержня.

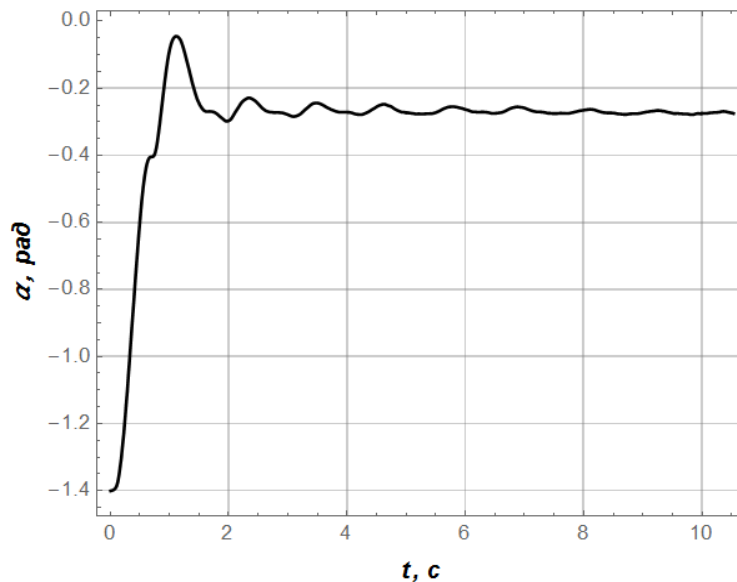


Рис. 4. Графік зміни величини α , що відповідає експерименту №10 (найбільша тривалість регулювання серед всіх проведених експериментів)

Що стосується середньоквадратичного значення похибки регулювання протягом перехідного режиму, то при $\alpha_{st}=0$ ця величина є найбільшою (порівняно з експериментами, у яких $\alpha_{st}=-0,52$ рад та $\alpha_{st}=-1,05$ рад). Це можна пояснити тим, що динамічна система відносно тривалий час знаходиться в стані з великими похибками. Дійсно, похибка, тобто різниця $\alpha_{st}-\alpha$, є більшою для вказаного випадку $\alpha_{st}=0$, ніж для інших випадків уставки.

Для цього ж випадку ($\alpha_{st}=0$) характерні і більші значення максимальної кутової швидкості маятника. Їх можна пояснити тим, що стержень при досягненні уставки кута встигає достатньо сильно розігнатись.

Аналогічна причина впливає на максимальну кутову швидкість пропелера та середньоквадратичне значення кутової швидкості пропелера: для випадку $\alpha_{st}=0$ вони є більшими, ніж для інших значень α_{st} .

Для всіх проведених експериментів початкова напруга живлення двигуна пропелера рівна 12 В. Однак, середньоквадратичне значення напруги живлення привода є варіабельною величиною. Вона залежить від α_{st} : для випадку $\alpha_{st}=0$ значення цього показника є більшими. Найменші значення середньоквадратичного значення напруги живлення приводу під час перехідного режиму руху системи відповідають випадку $\alpha_{st}=-1,05$ рад.

Одним із недоліків у роботі синтезованого нейрорегулятора руху динамічної системи є значні величини усталеної похибки регулювання. Це мотивує до продовження досліджень з метою усунення вказаного (і не тільки цього) недоліку.

Аналізуючи наведені вище дані, можна встановити, що нейрорегулятор досить добре виводить систему у окіл уставки кута α_{st} . Тому раціональним підходом є виведення системи у окіл уставки за допомогою нейрорегулятора і після цього мінімізація (в ідеальному випадку зведення до нуля) відносної усталеної похибки регулювання.

У регуляторах, які знайшли широке використання в різного роду автоматизованих процесах, ця задача вирішується шляхом використання інтегральної складової [7]. Наприклад, у ПІД-регуляторі саме інтегральна складова відповідає за мінімізацію усталеної похибки регулювання. Тому доцільно використати комбінацію нейрорегулятора та інтегральної складової (рис. 5). Перша виконує виведення динамічної системи у окіл уставки, а друга забезпечує усунення усталеної похибки регулювання.



Рис. 5. Зв'язки між об'єктом керування, нейрорегулятором та інтегральною складовою регулятора

Вираз, за яким функціонує інтегральна складова, в дискретній формі описується такою залежністю:

$$u_i = (\alpha_{st} - \alpha_i)K_I + u_{i-1}, \quad (2)$$

де u_i та u_{i-1} – керування (напруга), яке відповідає інтегральній складовій регулятора на поточній та попередній ітераціях регулювання відповідно; K_I – коефіцієнт, який пропорційний впливу інтегральної складової на вихідний сигнал регулятора

(напругу, що подається на двигун). У рамках цього дослідження прийнято $K_I=10$. Однак, питання обґрунтованого вибору величини K_I залишається відкритим, оскільки прийняте значення K_I буде мати вплив на якісні показники регулювання.

Для того, щоб встановити ефективність застосування комбінованого регулятора (нейрорегулятора із інтегральною складовою) проведемо серію експериментальних досліджень. План досліджень – такий самий, як і для експериментів з нейрорегулятором (табл. 1). Це зроблено для того, щоб мати можливість дослідити вплив інтегральної складової на якість регулювання.

Оціночні показники також не були змінені. Вони наведені у табл. 3.

3. Оціночні показники якості регулювання руху динамічної системи за допомогою нейрорегулятора із інтегральною складовою для експерименту № 1

Показник	Одиниця вимірювання	Значення показника
Перерегулювання	%	12,35
Тривалість перехідного процесу	с	3,16
Відносна усталена похибка регулювання	%	0,18
Середньоквадратичне значення похибки регулювання протягом перехідного режиму	рад	0,46
Максимальна кутова швидкість маятника	рад/с	3,35
Максимальна кутова швидкість пропелера	рад/с	719,4
Середньоквадратичне значення кутової швидкості пропелера	рад/с	554,2
Середньоквадратичне значення напруги живлення приводу протягом перехідного режиму	В	5,89

Дані для інших експериментальних досліджень (2-12) цієї серії у статті не наведені. У експериментах 4 та 10 спостерігався нестійкий стан регулювання. Однак, дослідження цих ефектів не входить у рамки даного дослідження.

Також наведемо графічні залежності, які відповідають отриманим експериментальним даним (рис. 6).

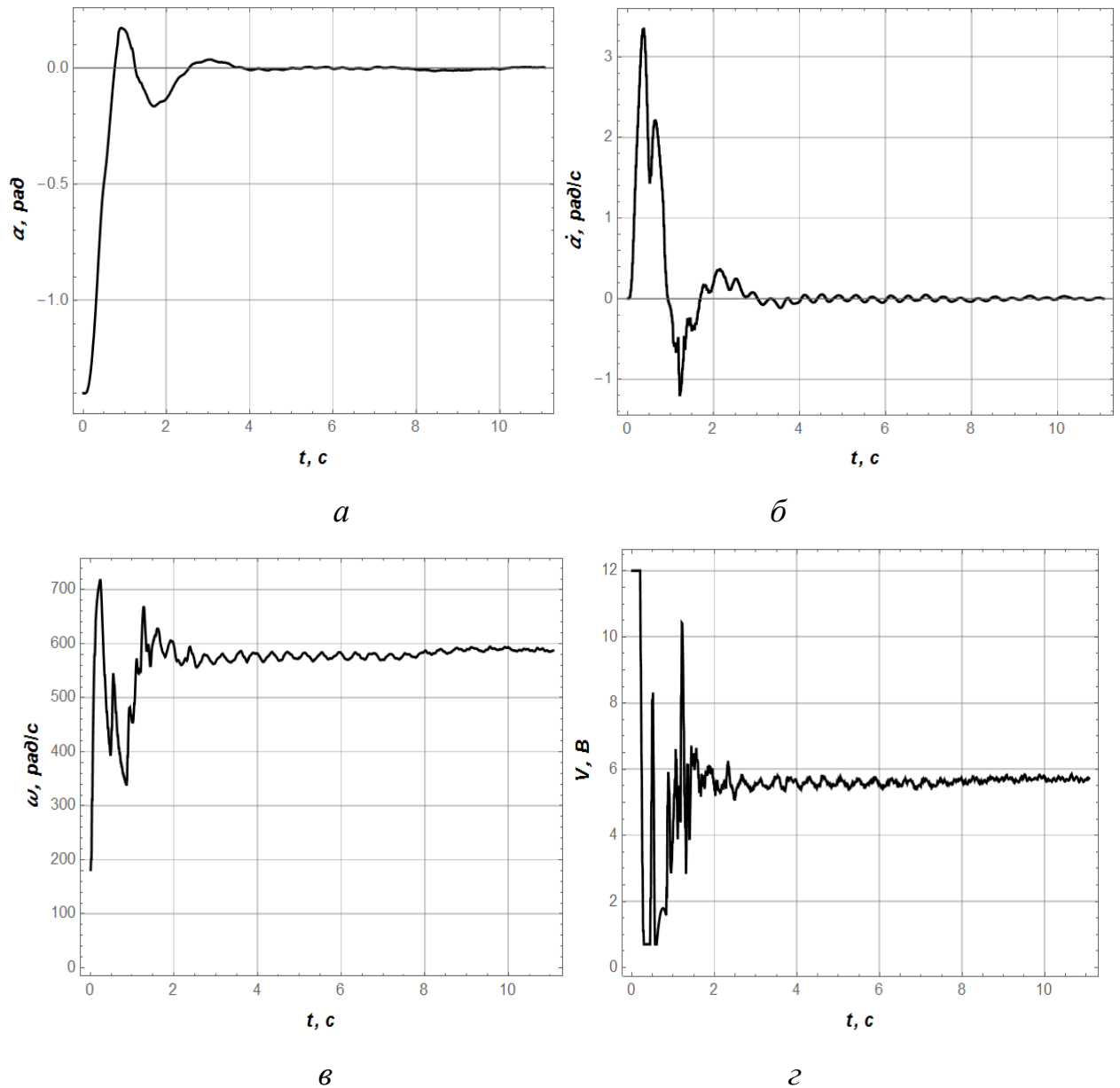


Рис. 6. Графіки отриманих експериментальних даних, які відповідають експерименту №1 для роботи нейрорегулятора із інтегральною складовою: *а* - величина α ; *б* - величина $\dot{\alpha}$; *в* - величина ω ; *г* - напруга живлення двигуна пропелера

Аналіз чисельних даних, які наведено у табл. 3, а також тих, що відповідають експериментам 2-12 вказує на те, що введення інтегральної складової у структуру регулятора дозволяє значно зменшити відносну усталену похибку регулювання. Вона для всіх експериментів зменшилась у 19,66...165,22 рази (порівняння проведено для експериментів, які проходили при подібних умовах). Таке значне покращення якості регулювання досягнуто завдяки дії саме інтегральної складової регулятора.

Разом з тим, у роботі модифікованого регулятора з'явилися певні недоліки. Наприклад, перерегулювання в середньому (тобто за всіма експериментами, крім 4 та 10) збільшилось на 12,5 %.

Тривалість регулювання для одних експериментів зменшилась, а для других збільшилася. Тут прослідковується певна закономірність: для експериментів для яких $\alpha_{st} = -1,05$ рад та $\alpha_{st} = -0,52$ рад цей показник зменшився у 0,87...1,86 рази. Для випадку $\alpha_{st} = 0$ рад показник тривалості регулювання зріс, що є наслідком близькості околу уставки $\alpha_{st} = 0$ до межі стійкості регулювання.

Середньоквадратичне значення похибки регулювання протягом перехідного режиму змінилося в 0,75...1,35 рази, тобто загальної тенденції до зміни цього показника не спостерігається. Також не спостерігається значних змін показників середньоквадратичного значення напруги живлення привода протягом перехідного режиму, максимальної кутової швидкості маятника, максимальної кутової швидкості пропелера, середньоквадратичного значення кутової швидкості пропелера.

Висновки і перспективи.

1. Встановлено, що робота нейрорегулятора є якісною при дії зовнішніх збурень на динамічну систему для випадку $\alpha_{st} = 0$ (випадок, для якого був розрахований нейрорегулятор). Зміна величини α_{st} призводить до погіршення якісних показників регулювання. Однак, при цьому зберігаються критичні властивості регулятора: забезпечення стійкості руху динамічної системи, виведення системи із початкового положення у окіл уставки.

2. Для того, щоб отримати якісне досягнення уставки необхідно при синтезі нейрорегулятора враховувати її величину. Значення уставки повинно надходити на один із входів нейрорегулятора. Однак, це потребує розробки нового алгоритму навчання штучної нейронної мережі, що визначає перспективу подальших досліджень у цьому напрямку.

3. Розроблено модифікацію регулятора шляхом введення у його структуру інтегральної складової. Остання дозволила у 19,66...165,22 рази зменшити відносну усталену похибку регулювання при не суттєвій зміні інших показників регулювання. Однак, введення інтегральної складової призводить у деяких випадках до

нестійкості регулювання. Ці випадки відповідають умові $\alpha_{st}=0$, що визначає особливий стан динамічної системи, коли процес регулювання відбувається близько до межі стійкості її руху. Очевидно, що для усунення вказаного недоліку необхідно виконувати подальше вдосконалення алгоритму функціонування регулятора.

Список використаних джерел

1. Jinho Kim., S. Andrew Gadsden, Stephen A. Wilkerson. A Comprehensive Survey of Control Strategies for Autonomous Quadrotors. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2019. Vol. 43. Issue 1. P. 3-16. DOI: 10.1109/CJECE.2019.2920938
2. Jemie Muliadi, Benyamin Kusumoputro. Neural Network Control System of UAV Altitude Dynamics and Its Comparison with the PID Control System. Journal of Advanced Transportation. Vol. 2018. Article ID 3823201, 18 pages. DOI: 10.1155/2018/3823201
3. Weibin Gu, Kimon P. Valavanis, Matthew J. Rutherford, Alessandro Rizzo. UAV Model-based Flight Control with Artificial Neural Networks: A Survey. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2020. 100. P. 1469-1491. DOI: 10.1007/s10846-020-01227-8
4. Fan Jiang, Farhad Pourpanah, Qi Hao. Design, Implementation and Evaluation of a Neural Network Based Quadcopter UAV System. IEEE transactions on industrial electronics. 2019. Vol. 67. Issue 3. P. 2076-2085. DOI: 10.1109/TIE.2019.2905808
5. Ромасевич Ю. О., Ловеїкін В. С., Шевчук О. Г. Ідентифікація математичної моделі лабораторної установки ланки квадрокоптера. Енергетика і автоматика. 2020. №4. С. 27-37.
6. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. Analytical Chemistry. 1964. Vol. 36 (8), P. 1627-1639. DOI: 10.1021/ac60214a047
7. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID control. ISA. The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2006. 460 p.

References

1. Kim, J., S. Gadsden, A., Wilkerson, S. A. (2019). A Comprehensive Survey of Control Strategies for Autonomous Quadrotors Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 43 (1), 3-16. DOI: 10.1109/CJECE.2019.2920938
2. Muliadi, J., Kusumoputro, B. (2018). Neural Network Control System of UAV Altitude Dynamics and Its Comparison with the PID Control System. Journal of Advanced Transportation,. Article ID 3823201, 18. DOI: 10.1155/2018/3823201
3. Gu, W., Valavanis, K. P., Rutherford, M. J., Rizzo A. (2020). UAV Model-based Flight Control with Artificial Neural Networks: A Survey. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 100, 1469-1491. DOI: 10.1007/s10846-020-01227-8
4. Jiang, F., Pourpanah, F., Hao, Q. (2019). Design, Implementation and Evaluation of a Neural Network Based Quadcopter UAV System. IEEE transactions on industrial electronics, 67 (3), 2076-2085. DOI: 10.1109/TIE.2019.2905808

5. Romasevych, Y. O., Loveikin, V. S., Shevchuk, O. G. (2020). Identyfikatsiia matematychnoi modeli laboratornoi ustanovky lanky kvadrokoptera [Identification of the mathematical model of laboratory installation of a quadcopter link]. Energetyka i avtomatyka, 4, 27-37.

6. Savitzky, A., Golay, M.J.E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. Analytical Chemistry, 36 (8), 1627-1639. DOI: 10.1021/ac60214a047

7. Åström, K. J., Hägglund, T. (2006). Advanced PID control. ISA. The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 460.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ РАБОТЫ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА ДВИЖЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Ю. А. Ромасевич, В. С. Ловейкин, А. Г. Шевчук, И. М. Болбот

Аннотация. Приведены экспериментальные исследования работы нейрорегулятора лабораторной установки звена квадрокоптера. Последняя представляется нелинейной динамической системой. Входной вектор нейрорегулятора включал угол наклона стержня (луча квадрокоптера) относительно горизонта, его угловую скорость и угловую скорость пропеллера. Выходной сигнал нейрорегулятора пропорционален напряжению питания привода пропеллера.

В статье проведено планирование экспериментальных исследований и выбраны восемь показателей, по которым проведена оценка качества процесса регулирования. Кроме того, проведен качественный анализ процессов регулирования движения динамической системы путем построения соответствующих графических зависимостей.

Полученные данные показали хорошее качество регулирования при нулевой уставке угла. Для других значений уставки ($-0,52$ и $-1,05$ рад) нейрорегулятор обеспечивает выход стержня в окрестность уставки и устойчивость регулирования. Однако, при этом качество регулирования не высокое. В работе установлена причина этого эффекта.

Для того, чтобы повысить качество регулирования проведено модификацию нейрорегулятора путем включения в его структуру интегральной составляющей. При этом установившаяся погрешность регулирования существенно уменьшилась при незначительных изменениях других оценочных показателей.

Ключевые слова: нейрорегулятор, динамическая система, экспериментальные исследования, оценка

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE OPERATION DYNAMICS OF THE MOTION NEURO REGULATOR OF A NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM

Yu. Romasevych, V. Loveikin, A. Shevchuk, I. Bolbot

Abstract. In the article, experimental studies of the neurocontroller of a laboratory installation of a quadcopter link are presented. The latter is a nonlinear dynamic system. The input vector of the neurocontroller included the angle of inclination of the rod

(a beam of the quadcopter) relative to the horizon, its angular velocity, and the angular velocity of the propeller. The output signal of the neurocontroller is proportional to the supply voltage of the propeller drive.

In the article, the planning of experimental studies was carried out and eight indicators were selected, according to which the quality of the control process was evaluated. In addition, a qualitative analysis of the control process of the dynamic system motion was carried out with the corresponding graphical dependencies.

The data obtained showed a good quality of control at a zero setpoint angle. For other values of the setpoint (-0.52 and -1.05 rad), the neurocontroller provides the rod aboutness to the setpoint angle and the control stability. However, the quality of control is not high. The reason for this effect has been established in the work.

In order to improve the quality of control, the neurocontroller was modified by including an integral component in its structure. At the same time, the steady-state control error has significantly decreased with minor changes in other estimated indicators.

Key words: *neurocontroller, dynamic system, experimental research, evaluation*