

НУБІП України

НУБІП України

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

НУБІП України

01.09. – КМР.204 «С». 2022.02.04-09 ПЗ

**ТКАЧЕНКО ПЛАТОНА ВЛАДЛЕНОВИЧА**

НУБІП України

**2023 р.**

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет конструювання та дизайну

# НУБІП України

УДК 681.513.675-047.37

ПОГОДЖЕНО:

Декан факультету

конструювання та дизайну

Ружилю З.В.

(підпис)

« » травня 2023 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ:

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання

Ловейкія В.С.

(підпис)

« » травня 2023 р.

# НУБІП України

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Синтез та дослідження оптимального керування  
маятником Фурути»

01.09. – КМР.204 «С». 2022.02.04 09 ПЗ

# НУБІП України

Спеціальність - 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма - «Машини та обладнання сільськогосподарського  
виробництва»

Орієнтація освітньої програми - освітньо-наукова

# НУБІП України

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

д.т.н. проф.

Виконав

Ромасевич Ю.О.

(підпис)

Ткаченко П.В.

(підпис)

# НУБІП України

# НУБІП України

Київ-2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

# НУБІП України

І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
Факультет конструювання та дизайну

# НУБІП України

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**  
Завідувач кафедри  
конструювання машин і  
обладнання, д.т.н.

Ловейкін В.С.

(підпис)

«           травня 2023 р.

# НУБІП України

## ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

**ТКАЧЕНКО ПЛАТОНУ ВЛАДІСЛАВОВИЧУ**

Спеціальність – 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма – «Машини та обладнання

сільськогосподарського виробництва»

Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

Тема магістерської роботи: «Синтез та дослідження оптимального керування маятником Фурути», затверджена наказом ректора від «14»

листопада 2022 р. № 204 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15.05.2023 р.

Вихідні дані до магістерської роботи: Огляд та аналіз літератури та досліджень за темами синтезу керування маятником Фурути та

дослідження оптимального керування; Синтез оптимального керування маятником Фурути; Створення і налагодження експериментальної

установка маятника Фурути та програмного коду керування; Створення алгоритму навчання нейрорегулятора для керування експериментальною

установкою.

# НУБІП України

# НУБІП України <sup>3</sup>

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Виконати аналіз науково-технічних робіт на тему маятника Фурути, коливання і оптимальне керування, малоприводні механічні системи, штучні нейронні мережі.
2. Побудувати і налаштувати механізм експериментальної установки маятника Фурути.
3. Розробити програмне забезпечення для керування механізмом маятника.
4. Розробити методику налаштування установки перед проведенням експерименту.
5. Розробити алгоритм навчання нейромережі для оптимального керування експериментальною установкою.

Дата видачі завдання: 14.11.2022 р.

Керівник магістерської роботи:

д.т.н. проф. \_\_\_\_\_

Ромасевич

Ю.О. \_\_\_\_\_

Завдання прийняв до виконання: \_\_\_\_\_

Ісаченко Н.В.

# НУБІП України

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження є маятник Фурути, який є типовим представником малоприводної механічної системи. Він складається з веденого важеля, що обертається в горизонтальній площині, та маятника, який може вільно обертатися у вертикальній площині. Цей механізм має складну нелінійну динаміку, що робить його ідеальним об'єктом для аналізу динамічних та статистичних характеристик, а також для вирішення завдань оптимізації автоматизованого керування.

Предметом дослідження є розробка законів керування маятником Фурути. Метою даної дипломної роботи є розробка, синтез та дослідження оптимального керування рухом маятника Фурути. Для досягнення цієї мети передбачено виконання таких завдань:

1. Провести кількісний та якісний аналіз наукових праць, статей, патентів та інших матеріалів, що стосуються теорії контролю, малоприводних механічних систем, штучних нейронних мереж.
2. Здійснити синтез та подальшу оптимізацію оптимального керування маятником Фурути.
3. Розробити методику проведення досліджень з метою підтвердження ефективності запропонованого методу керування.
4. Провести аналіз отриманих результатів, зробити висновки щодо ефективності запропонованого оптимального керування та запропонувати подальші напрямки досліджень.

Для досягнення поставлених завдань у даному проекті будуть використані різні методи дослідження, включаючи методи диференціального та інтегрального числення, математичне моделювання, теоретичну механіку, навчання штучних нейронних мереж, навчання з підкріпленням, метаевристичні методи оптимізації,

# НУБІП України

математичну логіку і теорію множин, методи планування факторних експериментів, статистичні методи обробки статистичних даних та інші.

# НУБІП України

У результаті проведених досліджень та розробки оптимального керування для маятника Фурути очікується поліпшення характеристик системи, зокрема діапазону подорожі, швидкості, маневреності та стабільності транспортних засобів. Також очікується покращення точності та енергоефективності маніпуляторів у робототехніці.

# НУБІП України

*Ключові слова: маятник Фурути, оптимізація контролю, штучні нейронні мережі, метод ролу часток.*

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

ЗМІСТ 6

РЕФЕРАТ 4

# НУБІП України

ЗМІСТ 6  
ВСТУП 8  
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ 10

1.1. Малоприводні механічні системи 10

1.2. Фурути нейронні мережі 11

1.3. Метод рою часток 13

1.4. Аналіз поточних тенденцій 15

РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ 18

2.1. Постановка оптимізаційної задачі 18

2.2. Зведення задачі 21

2.3. Опис методу розв'язання задачі 22

2.4. Результати та аналіз 24

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ 29

3.1. Експериментальна установка 29

3.1.1. Апаратна частина маятника Фурути 29

3.1.2. Електрична частина маятника Фурути 31

3.1.3. Програмування мікроконтролера 39

3.2. Алгоритм навчання нейромережі 54

3.3. Результати 56

ВИСНОВКИ 58

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 61

ДОДАТКИ 64

# НУБІП України

ВСТУП

7

У сучасному світі спостерігається зростання попиту на різні види побутової електроніки, такі як гіроскутери[1], квадрокоптери[2] та стедиками[3]. Також у логістиці з'являються перспективи автоматизації доставки з використанням наземних та надземних апаратів[4]. У галузі космічної технології спостерігається збільшення запусків ракет[5] та супутників з різними маніпуляторами та механічними деталями. Всі ці виробники використовують системи автоматичного керування та регулювання, і для підвищення їх конкурентоспроможності виникає потреба у поліпшенні цих систем.

Перелічені пристрої відносяться до групи малоприводних механічних систем, які мають менше входів управління, ніж ступенів свободи. Такі системи широко використовуються в аерокосмічній, транспортній, військовій та будівельній промисловості[6]. Вони відзначаються складними нелінійними характеристиками, такими як фід-форвард нелінійність та динаміка нульової фази. Тому дослідження цих систем у нелінійному керуванні мають велике значення[7]. Покращення виробів та алгоритмів керування може позитивно вплинути на такі характеристики, як діапазон подорожі, швидкість, маневрування, стабільність транспортних засобів, а також точність та енергоефективність маніпуляторів у робототехніці[8].

Однією з сучасних тенденцій у теорії автоматичного регулювання є застосування штучних нейронних мереж. Системи автоматичного регулювання, побудовані на основі цих мереж, здатні ефективно працювати зі складними та нелінійними об'єктами регулювання. В цій

# НУБІП України

дипломній роботі запропоновано використати метод рою часток для мінімізації функції та оптимізації контролю.

# НУБІП України

Основний внесок даної дипломної роботи полягатиме у синтезі та дослідженні оптимального керування маятником [Фурути[9], який може знайти широке застосування в різних галузях, включаючи робототехніку, автоматизовану логістику та космічну промисловість. Отримані

# НУБІП України

результати вплинуть на розвиток теорії автоматичного керування та сприятимуть покращенню функціональних характеристик механічних систем.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

У даному розділі проводиться огляд та аналіз літератури, наукових статей, патентів та інших матеріалів, які мають пряму відносність до предмета дослідження. Вивчення цих джерел є першим кроком для досягнення поставленої мети і виконання завдань дослідження.

### 1.1. Малоприводні механічні системи

Малоприводні механічні системи є складними механічними системами, що використовуються в різних галузях, таких як космічні роботи, підводні роботи, мобільні роботи, гнучкі роботи, шагаючі та гімнастичні роботи. Однак, вони відрізняються від повнопривідних систем тим, що мають менше входів управління, ніж ступенів свободи. Це призводить до специфічних властивостей, які потребують досліджень у галузі нелінійного керування[10].

Лагранжева динаміка малоприводних систем може містити прямі нелінійності, які пояснюються неідеальностями у структурі системи або нелінійними характеристиками датчиків та виконавчих пристроїв. Крім того, ці системи можуть мати не мінімальну динаміку фазового нуля, що означає, що кількість динамічних ступенів свободи перевищує кількість входів управління. Це може призводити до нестабільності та внутрішніх коливань, що ускладнює процес управління цими системами.

Одним з основних способів, за якими механічна система може стати малоприводною, є навмісний дизайн. Наприклад, деякі роботи, такі як брахіаційний робот Фукуд, пасивний ходок Макгіра, акробат або пендубот, спеціально створені з обмеженою кількістю входів управління. Також у мобільних роботосистемах можуть виникати малоприводні

# НУБІП України

системи, коли рука манипулятора прикріплена до мобільної платформи, космічної платформи або підводного транспортного засобу. Третій

# НУБІП України

спосіб використання малоприводних систем пов'язаний з математичною моделлю, що використовується для проектування управління. Наприклад, у моделі може бути врахована гнучкість суглобів, що зводить кількість входів управління до меншої кількості, ніж ступенів свободи

системи.

# НУБІП України

Останні десятиліття принесли значний прогрес у розвитку методів керування малоприводними механічними системами. Для

повнопривідних систем було розроблено різноманітні методи

# НУБІП України

проектування оптимальних, надійних, адаптивних та навчальних контролерів, зокрема завдяки їх специфічним властивостям, таким як лінійність зворотного зв'язку, пасивність, умови узгодження та лінійна параметризація.

## 1.2. Штучні нейронні мережі

# НУБІП України

Штучні нейронні мережі – програмні імплементації нейронних структур мозку. Їх різноманітність визначається конфігураціями, але мережеві парадигми мають спільні особливості.

# НУБІП України

Нейронні мережі класифікуються за топологією зв'язків між нейронами і типом формальних нейронів. За архітектурою, мережі можуть бути прямого поширення (без циклів) або рекурентними (зі зворотними зв'язками).

# НУБІП України

Залежно від способу навчання, виокремлюють навчання з вчителем (з використанням зразків з відомими відповідями) та навчання без вчителя. Поділ за способом навчання також може бути за входами або

# НУБІП України

виходами. При навчанні за входами використовується лише вектор вхідних сигналів, а при навчанні за виходами - вхідний та вихідний вектори.

# НУБІП України

Моделювання функцій синапсів здійснюється шляхом масштабування вхідних сигналів за допомогою вагових коефіцієнтів.

Після обробки суматором отримані сигнали проходять далі.

# НУБІП України

У роботі буде використовуватися така модель штучного нейрона:

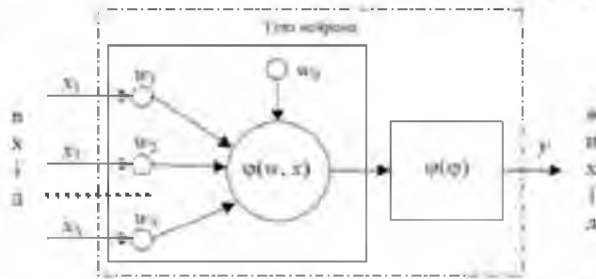


Рис. 1.1. Модель штучного нейрона

# НУБІП України

Математичною моделлю такого нейрона є наступний вираз:

$$u_{\alpha,\gamma} = f \left( \sum_{\beta=1}^B u_{(\alpha-1),\beta} \cdot w_{\alpha,\beta,\gamma} + b_{\alpha,\gamma} \right), \quad \alpha \in \{2, \dots, A\}, \quad \beta \in \{1, \dots, B\}, \quad \gamma \in \{1, \dots, \Gamma\}. \quad (2.1)$$

де  $w_{\alpha,\beta,\gamma}$  – вага синапса  $\gamma$ -го нейрона у  $\alpha$ -тому шарі, який передає сигнал від  $\beta$ -того нейрона попереднього (тобто від  $(\alpha-1)$ -го) шару;  $A$  – кількість шарів нейронної мережі, включаючи вхідний та вихідний шари;  $B$  – кількість нейронів у попередньому шарі;  $\Gamma$  – кількість нейронів у поточному шарі;  $b_{\alpha,\gamma}$  – біас (зміщення сигналу)  $\gamma$ -го нейрона у  $\alpha$ -тому шарі;  $f$  – активаційна функція нейрона (не зменшуючи загальності будемо вважати, що активаційні функції для всіх нейронів однакові);  $u_{\alpha,\gamma}$  – вихідна величина (сигнал)  $\gamma$ -го нейрона у  $\alpha$ -тому шарі,  $u_{(\alpha-1),\beta}$  – вихідна величина (сигнал)  $\beta$ -го нейрона у  $(\alpha-1)$ -му прихованому шарі.

# НУБІП України

Штучна нейронна мережа, у своїй загальній структурі, має

наступний вигляд:

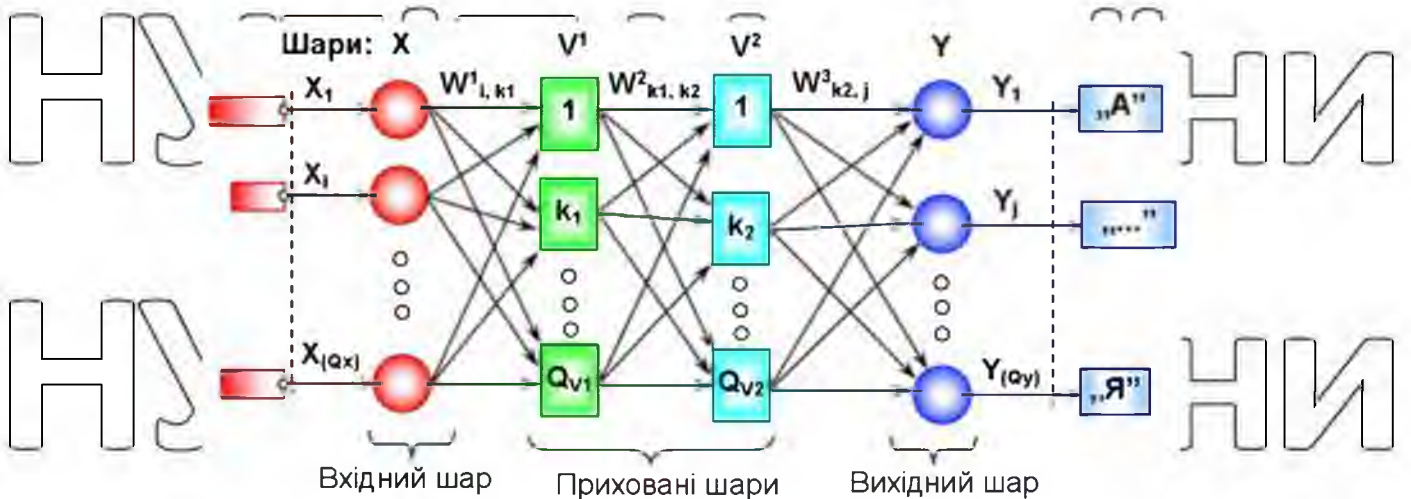


Рис. 1.2. Структура штучної нейронної мережі

## 1.3. Метод рою часток

У науці та техніці зараз актуальна проблема оптимізації, адже багато завдань вимагають розв'язання задачі глобальної оптимізації, яка є досить складною. Найчастіше такі задачі мають складний ландшафт поверхні пошуку та можуть бути багатомірними, багатокстремальними та многокритеріальними. Що стосується математичних властивостей, то такі завдання можуть бути недиференційовними та нелінійними, а також містити як дискретні, так і безперервні змінні у функції мети. Більшість з цих задач неможливо розв'язати з використанням традиційних підходів без додаткової інформації апіорі. Тому дослідники розробляють громіздкі чисельні методи, які допомагають вирішувати такі складні завдання. Ці задачі мають суттєвий інтерес у практичному застосуванні, тому вирішення цих проблем є важливим напрямком розвитку науки та техніки.

# НУБІП України

Алгоритм оптимізації рою частинок (PSO)[11] є ефективним методом стохастичної оптимізації, який базується на спостереженні соціальної поведінки тварин, таких як комахи, птахи та риби. У природі ці тварини співпрацюють у роях для досягнення спільної мети, такої як пошук їжі. Алгоритм PSO використовує цю соціальну стратегію та адаптивно змінює схему пошуку для досягнення оптимальних рішень.

При розробці алгоритму PSO враховуються дві ключові концепції: еволюційні алгоритми та штучне життя. Подібно до еволюційного алгоритму, PSO використовує режим рою, що дозволяє проводити пошук у широкому просторі рішень цільової функції. Це дозволяє алгоритму ефективно досліджувати різні регіони і знаходити оптимальні рішення.

Крім того, метод рою частинок застосовуються для вивчення штучних систем з життєвими характеристиками, що робить його цікавим інструментом для вирішення складних завдань оптимізації. Завдяки комбінації соціальної взаємодії, еволюційних принципів та адаптивності, PSO виявляється потужним інструментом для рішення різноманітних оптимізаційних завдань.

Завдання безумовної глобальної оптимізації формулюється як задача мінімізації цільової функції  $f(X)$  в просторі пошуку  $D$ , де область  $D$  являє собою  $d$ -вимірний гіперкуб з розмірністю  $d$ ,  $X$  – векторний аргумент оптимізується функції  $f$ , а її глобальне рішення досягається в точці  $X^*$ .

Метод PSO складається з рою частинок, які шукають глобальний оптимум у просторі рішень. Частинки намагаються покращити знайдене рішення та обмінюються інформацією зі своїми сусідами. Ці зв'язки між частинками визначають ефективність передачі інформації між сусідніми агентами рою. Для організації зв'язків між частинками використовують

# НУБІП України

два основних підходи: gbest і lbest. Крім класичного методу PSO, існує

багато його модифікацій, таких як FISO, FDR PSO, APSO, коеволуційний

PSO, та інші [12]. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки та

може бути застосований в залежності від заданої оптимізації.

# НУБІП України

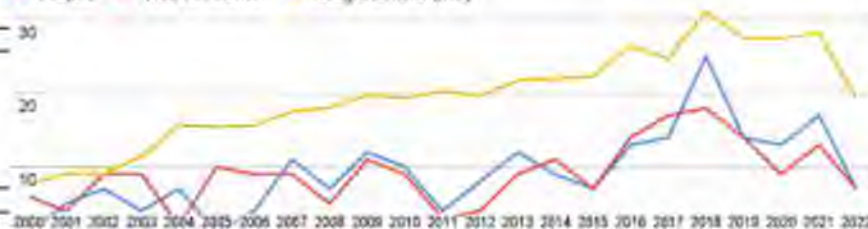
## 1.4. Аналіз поточних тенденцій

Упрі роботі для проведення аналізу науково-технічних документів та статей за тематикою дослідження, використовуються дані наукометричних баз даних Scopus [13], Web of Science [14] та Google Scholar [15].

Всі отримані дані відповідають даті запиту – 31 жовтня 2022 року.

Кількість наукових статей за темою "Керування м'ягким фурути"

— Scopus — Web of Science — Google Scholar (x10)



# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

Рис. 1.3. Кількість наукових статей за темою в базах даних

# НУБІП України



# НУБІП України



# НУБІП України

# НУБІП України

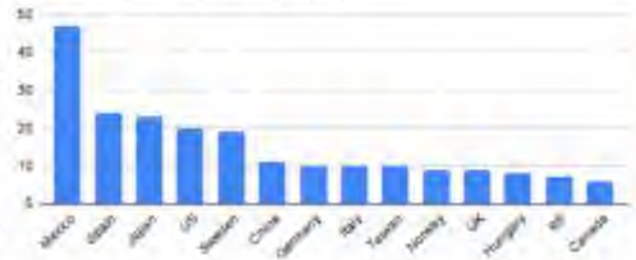
# НУБІП України

# НУБІП України

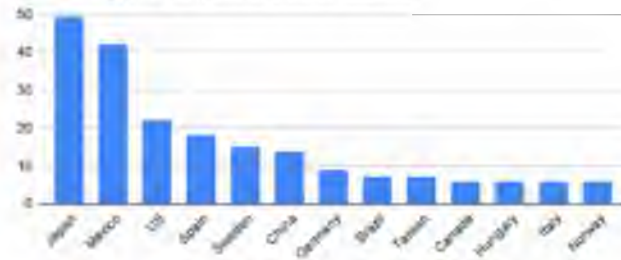
# НУБІП України

К

"Маятник Фурути" за країною (Scopus)

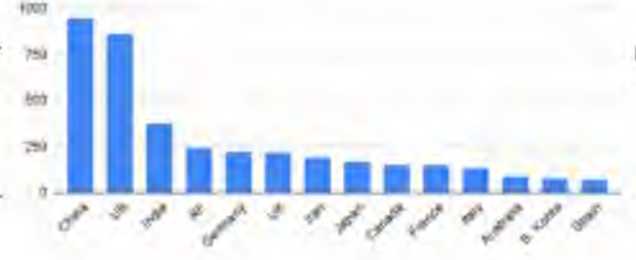


"Маятник Фурути" за країною (Web of Science)



К

"Колівання та оптимальне керування" за країною (Scopus)



"Колівання та оптимальне керування" за країною (Web of Science)

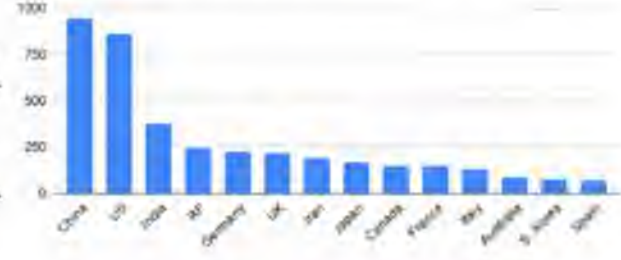


Рис. 1.4. Кількість наукових статей за темою в базах даних

Аналізуючи отримані дані, видно тенденцію росту кількості опублікованих статей за темами "Керування маятником Фурути", "Маятник Фурути" та "Колівання та оптимальне керування", що вказує на актуальність та перспективу досліджень, зацікавленість академічної спільноти. Провідними країнами за кількістю публікацій є Китай, США, Індія, Мексика та Японія.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

### 2.1. Постановка оптимізаційної задачі

Маятник Фурути - це механічна система, що складається з вертикальної колони, що може обертатись навколо своєї вертикальної осі і рухатись завдяки двигуну. У верхній частині колони розташована стріла, на кінці якої закріплена маятникова ланка за допомогою шарнірного з'єднання. До стріли та маятничової ланки прикріплюються маси  $m_1$  та  $m_2$  відповідно. Ця система використовується для дослідження динаміки маятників і важлива в науці та інженерії.

Параметри маси та довжини маятничових ланок впливають на їх рух і стабільність.

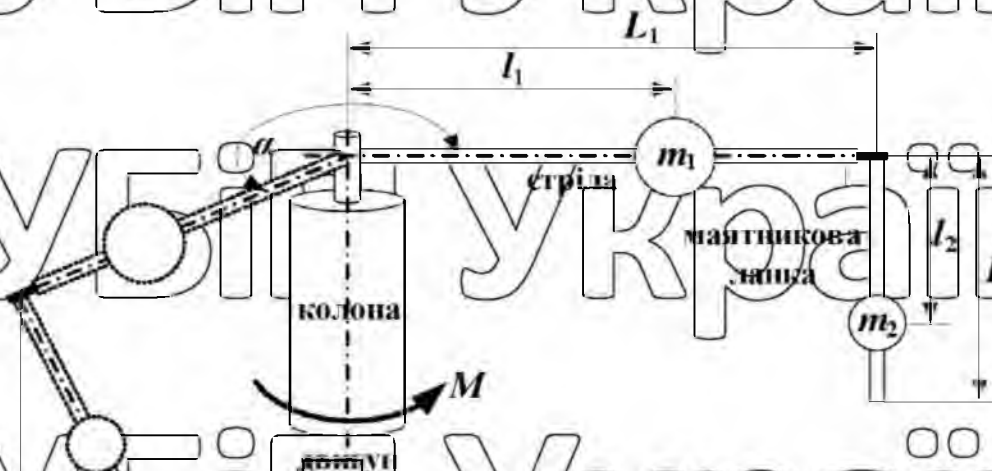


Рис. 2.1. Маятник Фурути

Математична модель маятника Фурути є система нелінійних диференціальних рівнянь [16]:

# НУБІП України

$$\ddot{\alpha}(J_0 + J_{21} \sin^2(\varphi)) + \ddot{\varphi} m_2 L_1 l_2 \cos(\varphi) - m_2 L_1 l_2 \sin(\varphi) \dot{\varphi}^2 + \dot{\alpha} \dot{\varphi} J_{21} \sin(2\varphi) = M;$$

$$\ddot{\alpha} m_2 L_1 l_2 \cos(\varphi) + \ddot{\varphi} J_{21} - \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 J_{21} \sin(2\varphi) g m_2 l_2 \sin(\varphi) = 0,$$

(2.1)

# НУБІП України

# НУБІП України

де  $\varphi, \alpha$  – узагальнені координати системи (кут відхилення маятникової ланки та кут повороту стріли відповідно);  $M$  – рушійний момент, що

створений двигуном;  $L_1$  та  $L_2$  – довжини відповідно стріли та маятникової

ланки відносно осей їх обертання;  $I_1$  та  $I_2$  – відстань від центра маси  $m_1$  до

осі повороту ланки стріли та відстань від центра маси  $m_2$  до осі повороту

маятникової ланки відповідно;  $m_1$  та  $m_2$  – зведені маси, які розміщені на

стрілі та маятниковій ланці відповідно;  $J_0$  – зведений момент інерції

колони відносно осі її обертання при умові, що маятникова ланка

знаходиться у нижньому (стійкому) положенні рівноваги ( $J_0 = J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2$ );  $I_1$  – зведений момент інерції колони та двигуна

відносно осі їх обертання;  $J_2$  – зведений момент інерції маятникової ланки

відносно осі її обертання;  $J_{21}$  – зведений момент інерції маятникової

ланки відносно осі її обертання ( $J_{21} = J_2 + m_2 l_2^2$ ). Тонка над символом

означає диференціювання за часом.

# НУБІП України

Крайові умови руху маятника Фурути наступні:

$$\left. \begin{aligned} \varphi(0) &= \pi; \dot{\varphi}(0) = \alpha(0) = \dot{\alpha}(0) = 0; \\ \varphi(t_s) &= \dot{\varphi}(t_s) = \alpha(t_s) = \dot{\alpha}(t_s) = 0. \end{aligned} \right\} (2.2)$$

# НУБІП України

Початкові умови руху системи визначаються станом спокою маятника, коли він знаходиться у нижньому стійкому положенні

рівноваги. Кінцеві умови, натомість, відповідають стану спокою маятника у верхньому нестійкому положенні рівноваги. Зауважимо, що початкове та кінцеве положення стріли не обов'язково повинні бути однаковими. Проте, для ускладнення задачі ми вважаємо їх однаковими.

Такий підхід дозволяє більш детально досліджувати поведінку системи та вивчати вплив початкових умов на рух маятника. Початкові та кінцеві умови є важливими факторами при моделюванні та аналізі динаміки маятникових систем, і їх ретельний розгляд допомагає отримати більш точні результати.

Критерії оптимізації при проектуванні регуляторів можна представити як суму двох показників: тривалості регулювання та середньоквадратичного значення керування. Мінімізація першого компонента критерію забезпечує швидкий перехід системи з початкового у кінцеве положення, а мінімізація другого компонента дозволяє знизити енерговитрати на приводі системи, що особливо важливо для малоприводних систем. Таким чином, відповідно до встановлених критеріїв, регулятор повинен забезпечувати швидкий перехід між початковим та кінцевим положеннями маятника Фурути, знижуючи водночас енерговитрати системи.

Задача навчання штучної нейронної мережі полягає у визначенні таких значень ваг синапсів  $w_{\alpha\beta\gamma}$  та біасів  $b_{\alpha\gamma}$ , при яких певний критерій набуває екстремуму.

# НУБІП України

# НУБІП України

## 2.2. Зведення задачі

Для вирішення задачі оптимізації нейрорегулятора в даній роботі буде застосована парадигма навчання з підкріпленням. Цей підхід обрано через наявність математичної моделі об'єкта регулювання. У рамках цієї парадигми, нейронна мережа виступає в ролі агента, а об'єкт регулювання - середовищем. Основним поняттям у навчанні з підкріпленням є винагорода, яка вимірює ступінь наближення до заздалегідь визначеної мети.

Задачі оптимізації нейрорегулятора, які використовуються для формулювання критерію оптимізації, описуються так:

$$\begin{aligned} G &= \frac{Y}{X}; \\ Y &= P(X); \\ \lim_{t \rightarrow \infty} X &= 0; \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} f_{\lambda}(X, Y) &\leq F_{\lambda}, \quad \lambda = (\overline{1}, L); \\ Cr_k &\rightarrow \min, \quad k \in (\overline{1}, K). \end{aligned}$$

де  $P$  – матриця нелінійних операторів нейрорегулятора, яка відповідає перетворенню вхідного вектора  $X$  у вихідний  $Y$ ;  $Cr_k$  –  $k$ -й критерій мінімізації;  $K$  – загальна кількість критеріїв оптимізації;  $f_{\lambda}$  –  $\lambda$ -а функція, яка в загальному випадку залежить від векторів  $X$  та  $Y$ ;  $F_{\lambda}$  – граничне значення  $\lambda$ -ї функції;  $L$  – загальна кількість обмежень в оптимізаційній задачі.

Комплексний показник, який використовується як оптимізаційний критерій у даній задачі, враховує два основних аспекти: середньоквадратичне значення динамічної складової потужності приводу і тривалість регулювання. Цей показник можна математично виразити таким чином:

# НУБІП України

$$\begin{aligned}
 CC = I_{P_{\text{opt}}} &= 10^4 t_s + \sqrt{t_s^{-1} \int_0^{t_s} P_{\text{opt}}^2 dt} = 10^4 t_s + \sqrt{t_s^{-1} \int_0^{t_s} (F \dot{x}_1)^2 dt} = \\
 &= 10^4 t_s + \sqrt{t_s^{-1} \int_0^{t_s} (m_1 \ddot{x}_1 \dot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 \dot{x}_1)^2 dt} \rightarrow \min,
 \end{aligned}$$

(2.4)

# НУБІП України

## 2.3. Опис методу розв'язання задачі

У даній роботі для синтезу контролера використовується модифікований метод рою часток ME-D-PSO. Цей метод, який був успішно використаний в попередніх наукових роботах, демонструє свій потенціал у розв'язанні складних задач. Ітераційна кількість для алгоритму була експериментально визначена як оптимальна і складає 200. Додаткове збільшення кількості ітерацій не призводить до значного покращення отриманих параметрів, а зменшення кількості ітерацій не дозволяє досягти оптимального мінімуму критерію.

ME-D-PSO є розширеною версією методу ME-PSO. Основна ідея методу ME-PSO полягає у контролі ефективності алгоритму під час його виконання. Якщо рій має тенденцію до стагнації, це свідчить про застрягання у поганому мінімумі, а ефективність алгоритму стає низькою. Тому, коли рівень стагнації перевищує задану межу і подальші ітерації не приносять вагомого зменшення критерію оптимізації, алгоритм реініціалізує рій для пошуку більш оптимальних параметрів та уникнення застрягання в локальних мінімумах.

# НУБІП України

З метою поліпшення пошуку в методі ME-PSO було впроваджено механізм розмаїття. Розмаїтість відображає різні особливості частинок,

які впливають на їх рух. Схема руху частинок змінюється з ітерації на ітерацію, що підвищує ймовірність знаходження кращого (іноді навіть глобального) мінімуму функції.

Для вирішення поставленої задачі необхідно зменшити кількість критеріїв до одного, який буде використовуватися для навчання нейрорегулятора. Для опису цього критерію використовується наступна формула:

$$Cr(W, B) = Ter + Cr_{ineq} + CC \rightarrow \min, \quad (2.5)$$

де  $Ter$ ,  $Cr_{ineq}$  та  $CC$  – критерії: термінальний, обумовлений обмеженнями та комплексний відповідно. Термінальний критерій має вигляд такої залежності:

$$Ter = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x_1(T) < v_1 \wedge \dots \wedge x_n(T) < v_n \wedge \dots \wedge x_N(T) < v_N; \\ \delta T \cdot |X(T)|, & \text{якщо } x_1(T) < v_1 \vee \dots \vee x_n(T) < v_n \vee \dots \vee x_N(T) < v_N \end{cases} \quad (2.6)$$

де  $T$  – момент часу, коли умови стійкості дотримуються;  $\delta T$  – термінальний коефіцієнт, який відображає важливість досягнення умов стійкості;  $v_n$  – невелике допустиме значення  $n$ -ого компоненту вектора  $X$ .

Вимоги стійкості процесу регулювання виконуються коли абсолютний мінімум критерію дорівнює нулю. Обумовлений обмеженнями критерій має наступний вигляд:

$$Cr_{ineq} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } E_x = f_x(X, Y) \geq 0; \\ \delta_p \sum_{y=1}^Y F_y = f_y(X, Y), & \text{якщо } F = f_1(X, Y) < 0 \vee F_2 = f_2(X, Y) < 0 \vee \dots \vee F_Y = f_Y(X, Y) < 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

# НУБІП України

де  $u$  – індикатор виконання нерівності;  $Y$  – загальна кількість нерівностей,  $\delta_p$  – штрафний коефіцієнт.

## 2.4. Результати та аналіз

В попередніх розділах було успішно розроблено нейрорегулятор для маятника Фурути, який повністю відповідає вимогам поставленої задачі. Аналізуючи отримані графіки, стало очевидним, що за допомогою нейрорегулятора маятник Фурути був ефективно переведений з початкового положення, коли маятник був опущений вниз, до кінцевого положення, коли маятник знаходився у вертикальному нестійкому стані рівноваги. В процесі регулювання стріла маятника змінила напрямок руху сім разів, що свідчить про успішне досягнення поставленої мети.

Функція рушійного моменту показала максимальні та мінімальні значення, а в кінці руху досягла нульового значення. Це свідчить про те, що система успішно знайшла стійке вертикальне положення та знаходиться в стані спокою, що є бажаною і оптимальною конфігурацією системи.

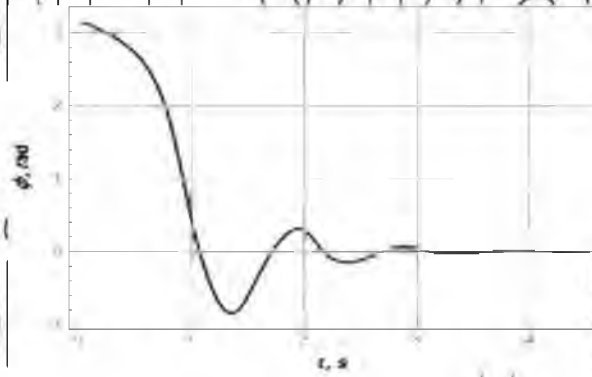
З аналізу збіжності алгоритму до мінімуму критерію внаслідок на те, що розв'язок задачі, який у даному випадку дорівнює шуканим значенням компонентів вектора біасів  $B$  та тензор ваг  $W$ , було знайдено на останніх ітераціях ( $\epsilon$ ). Якщо необхідного розв'язку задачі досягнуто було, то згідно методики, необхідно ініціалізувати новий цикл

# НУБІП України

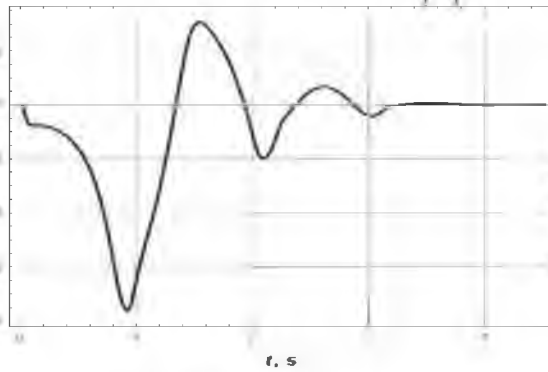
розрахунку або збільшити кількість ітерацій, чого у даному випадку

робити не раціонально.

# НУБІП України



# НУБІП України



# НУБІП України

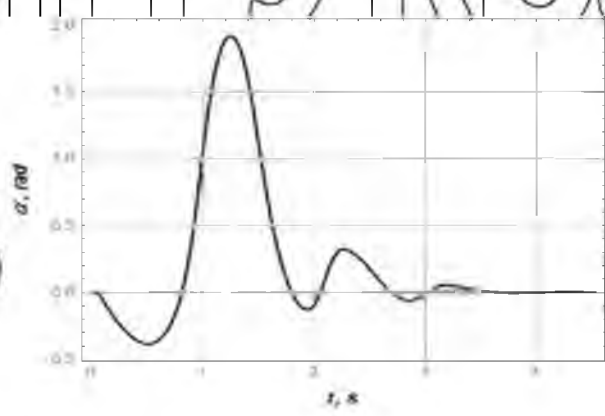
# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

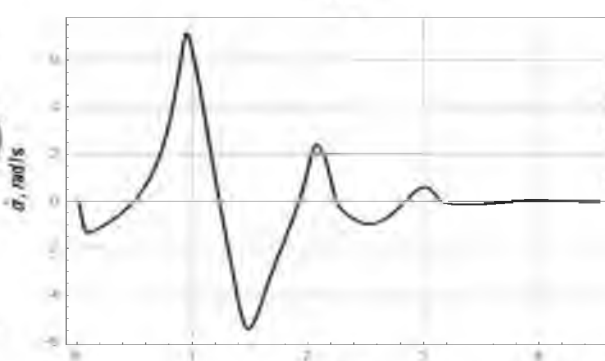
# НУБіП України

НУБ



аїни

НУБ



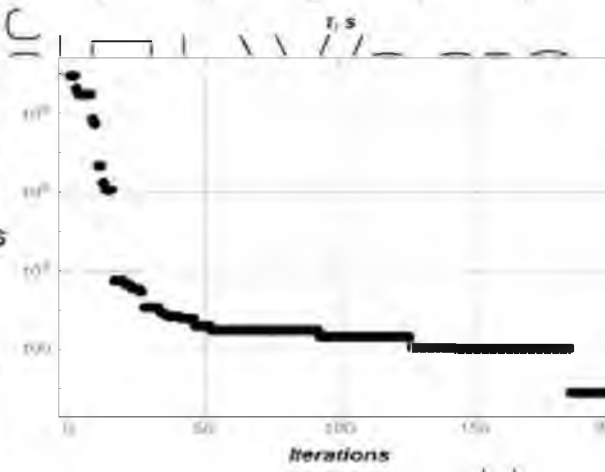
аїни

НУБ



аїни

НУБ



аїни

НУБ

аїни

НУБ

аїни

# НУБІП України

Рис 2.2. Графіки динаміки регулювання маятника Фурути: кутове

положення маятничкової ланки (а), кутова швидкість маятничкової ланки (б), кутове положення стріли (в), кутова швидкість стріли (г), крутний момент двигуна (д) зменшення узагальненого критерію протягом процедури оптимізації (е)

Розроблений нейрорегулятор, заснований на методі ME-D-PSO, продемонстрував свою високу ефективність у керуванні маятником Фурути. Цей алгоритм може бути корисним і в інших складних нелінійних системах, для яких традиційні методи є обмеженими.

Інтеграція нейронних мереж та методу рою часток ME-D-PSO дозволяє досягти оптимальних результатів у керуванні та досягти бажаного стану системи.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

### 3.1. Експериментальна установка

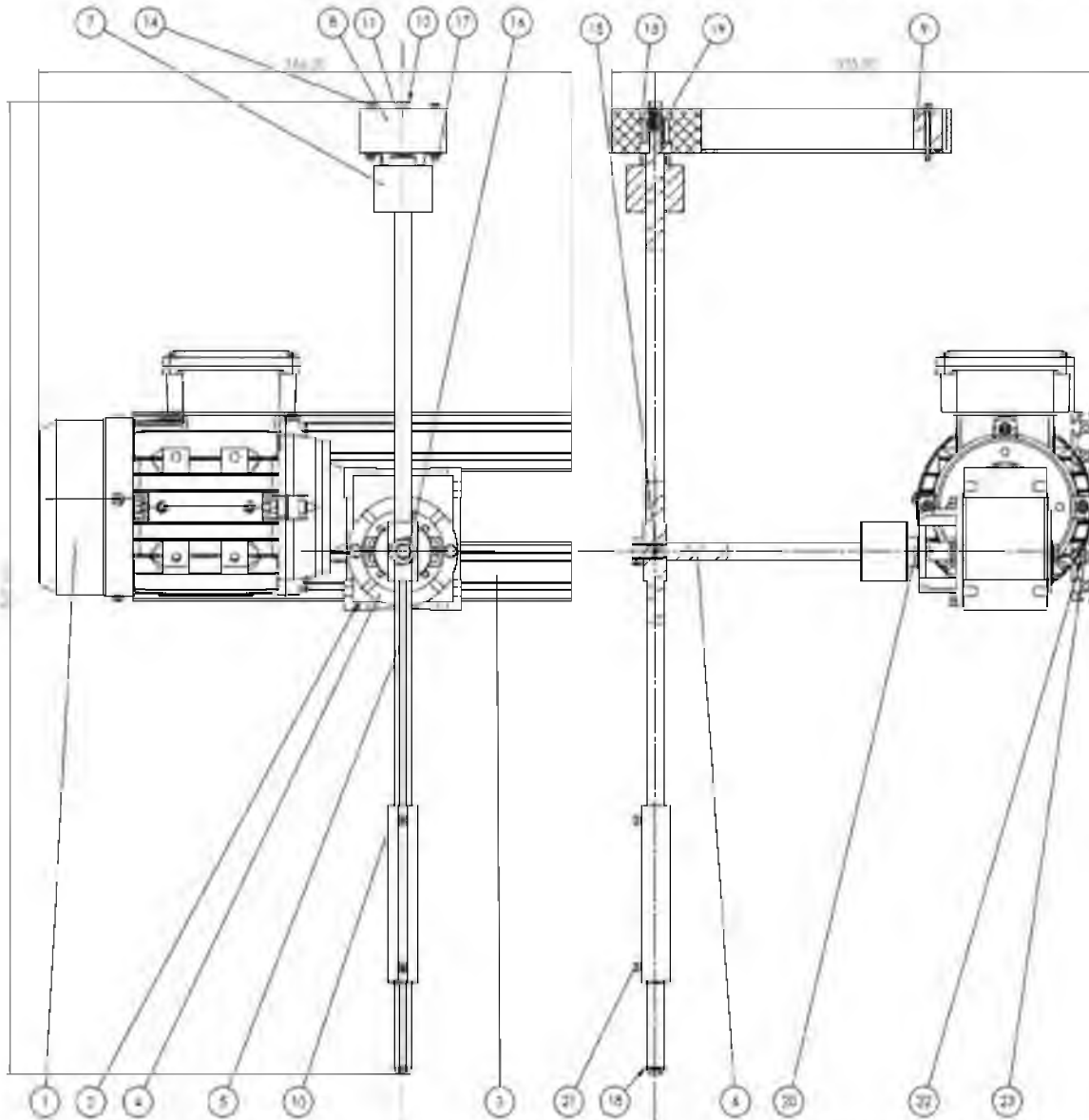
У цьому розділі буде описана експериментальна установка маятника Фурути, програмування мікроконтролера для керування та збору даних, отримання масиву та синтез алгоритму для навчання нейрорегулятора.

#### 3.1.1. Апаратна частина маятника Фурути

Загальна схема маятника Фурути (рис. 2.1), що була описана в попередніх розділах, включає основні компоненти, необхідні для його правильної роботи. Ці компоненти включають мотор, колону (або вал), маятникову стрілу та маятникову ланку. Колона, завдяки жорсткому з'єднанню з маятничовою стрілою, передає зворотний момент від мотору до маятничової ланки. Ця схема є ключовим елементом у створенні ефективного контрольного алгоритму для досягнення бажаних режимів руху маятника Фурути.

У даній роботі, для побудови апаратної частини експериментальної установки, будуть використані креслення попередньої наукової праці.

Розробка всіх деталей, вузлів, креслень, візуалізації та аналізу установки на проєктувальному етапі, була використана програма SOLIDWORKS 2020 SP5.0.



НОМЕР	НАЗВА ДЕТАЛ	ОПИС	КРИМСТЬ
1	Електроштор	ФУСНЕР IIS 431-4 834	1
2	Редуктор	УРМ Testologies H&RV 30	1
3	Алюмініевий профіль	20x40x30	2
4	Платформа шкідлива		1
5	Ністиковий стриж		1
6	Колесо		1
7	Велідеи	Аутомат F40H12-3600-3-24	2
8	Ністик		1
9	Ністиковий вал		1
10	Грунтвал		1
11	Шайба М3		1
12	Болт М3x12		8
13	Роздільний підшипник	608-2Z	2
14	Болт М3x35		3
15	Сталеий дріт	Діаметр 0,8x20	1
16	Гайка М3		1
17	Гайка М3		5
18	Сталея протівник	Шайба М3x15	1
19	Трубка підшипникова		1
20	Болт М3x5		2
21	Болт М3x6		2
22	Болт М3x25		4
23	Болт М3x35		2

Рис. 3.1. Складальне креслення експериментальної установки малопилки

# НУБІП України

## 3.1.2. Електрична частина маятника Фурути

Мотором у даній конструкції є TECHTOP MS 631-6 B34. До мотора під'єднаний редуктор UPM Technologies NMRV 30  $i = 20$ .



Рис. 3.2 Мотор TECHTOP MS 631-6 B34 (зправа) та редуктор UPM Technologies NMRV 30 (зліва)

Таблиця 1

Характеристики мотору TECHTOP MS 631-6 B34

Тип	Трифазний індукційний мотор
Напруга	230/400 V
Струм	0,88/0,51 A
Частота струму	50Hz
Потужність	0,06 kW
Кількість об/хв	1380

У цьому проєкті, для виконання обчислень керування мотора та збереження і аналізу даних з енцидентів, використовується відлагоджувальна плата NUCLEO-F446RE на базі мікроконтролера

НУБІП України

STM32F446RE T6U. Ця плата керує частотним інвертором за допомогою аналогового сигналу з ЦАП, що забезпечує живленням мотор. В

установці використовується Mitsubishi Electric FR-E720S-0085C-EC з потужністю 80 Втгг.

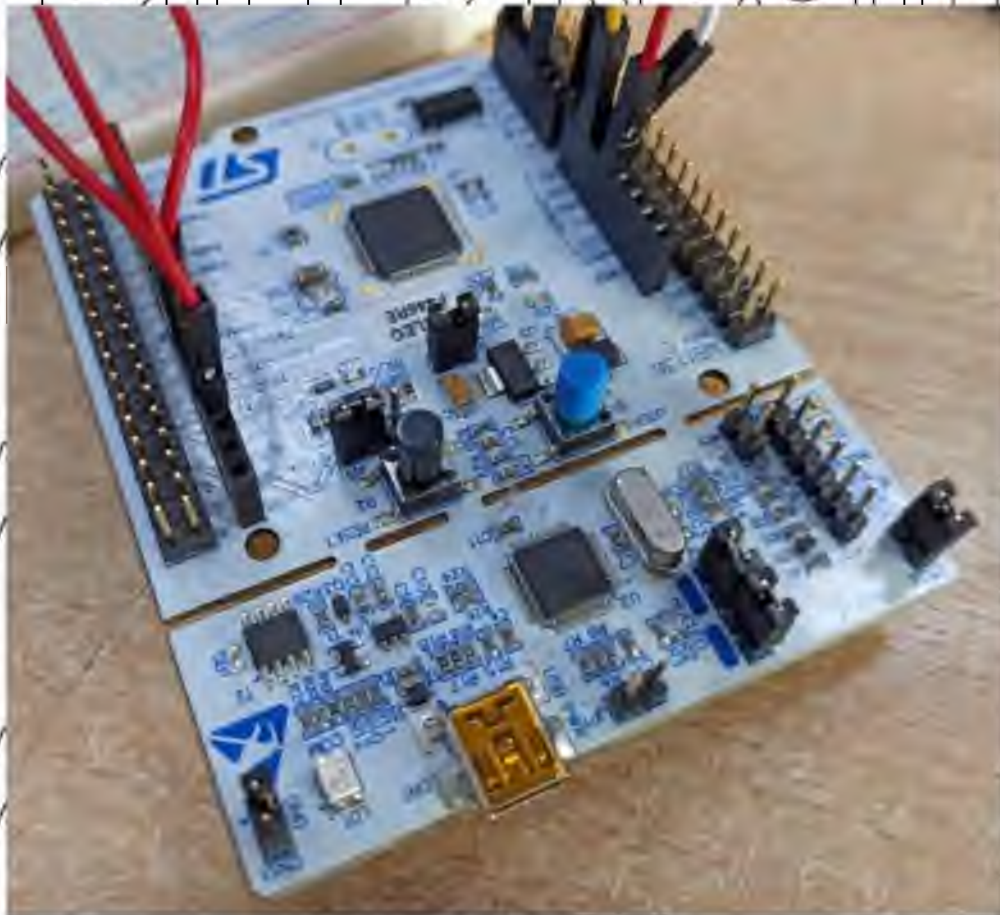


Рис. 3.3. Відлагоджувальна плата NUCLEO-F446RE High-Performance

НУБІП України

НУБІП України

## Характеристики мікроконтролера NUCLEO-F446RE High-Performance

Процесор	ARM Cortex-M4
Частота процесора	32 біт 180 MHz
Розмір програмної пам'яті	512 Кілобайт



Рис. 314. Частотний інвертор Mitsubishi Electric серії E700

# НУБІП України

Характеристики частотного інвертора Mitsubishi Electric FR-

E720S-008SC-EC

Номінальна потужність	80 W
Напруга	200-240 V
Номінальна сила струму	800 mA
Напруга аналогово входу	0-5V

Для досягнення оптимального керування та збору інформації з експериментальної установки використовуються два енкодери обертання Autonics F40H12-3600-3-24. Один з енкодерів кріпиться до редуктора та колони за допомогою надрукованої пластикової платформи, а другий - до осі та маятника. Ці енкодери забезпечують точне вимірювання кутових переміщень і швидкості обертання відповідних компонентів маятника. Дурити, що є необхідним для подальшого аналізу та контролю режимів руху.



Рис. 3.5. Енкодер обертання Autonics F40H12-3600-3-24

Таблиця 4

Характеристики енкодера обертання Autonics F40H12-3600-3-24

Тип енкодера	Інкрементальний енкодер обертання
Номинальна напруга живлення	12V постійного струму
Внутрішній діаметр отвору	12мм
Тип валу	порожнистий
Максимальна допустима частота обертання	5000 об/хв

Підключення електронних компонентів було налаштовано на макетній платі. Додатково, для налаштування програмного коду і живлення відлагоджувальної плати Nucleo, використовується персональний комп'ютер.

# НУБІП України

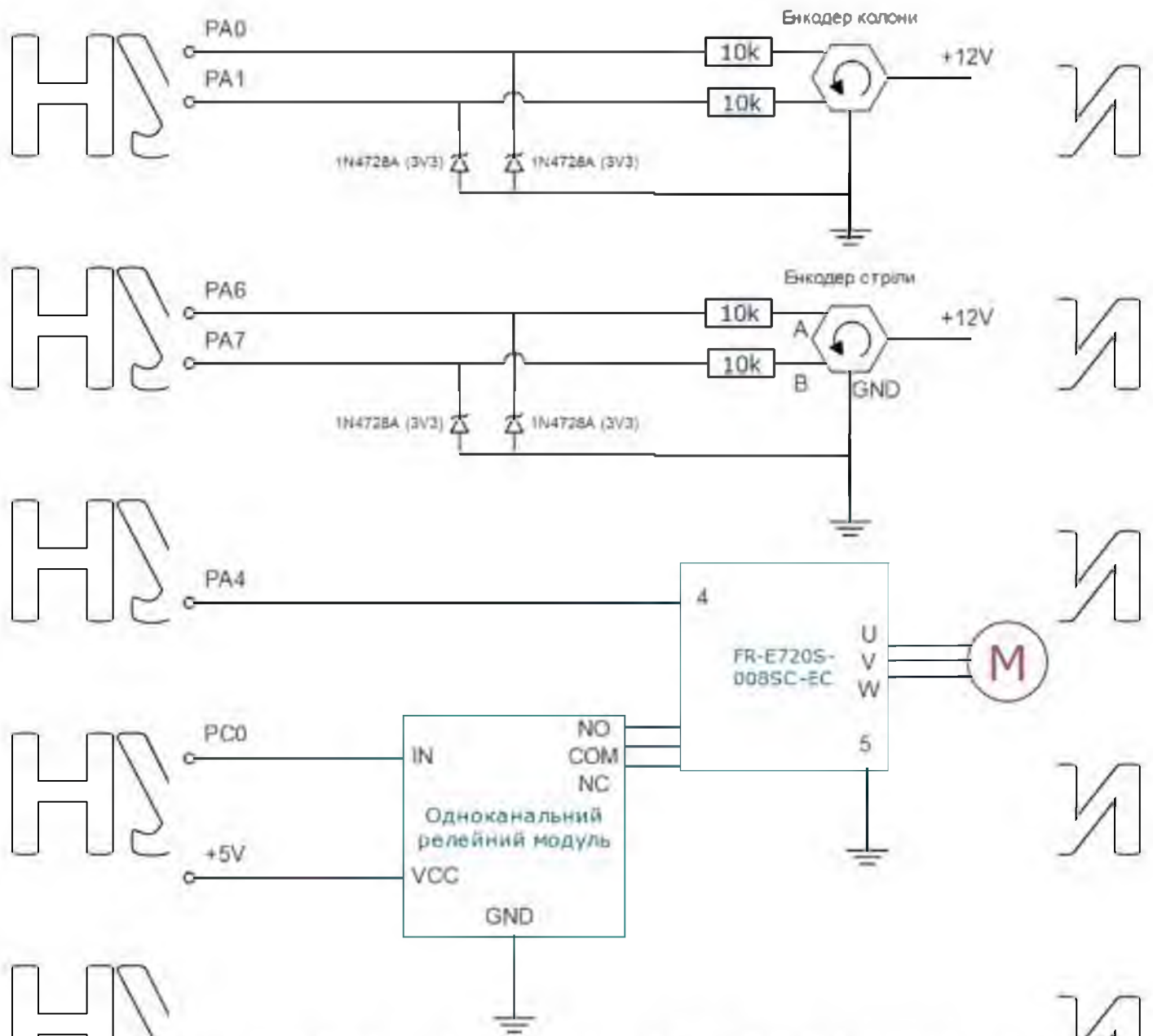


Рис. 3.6. Електросхема під'єднання експериментальної установки

# НУБІП України

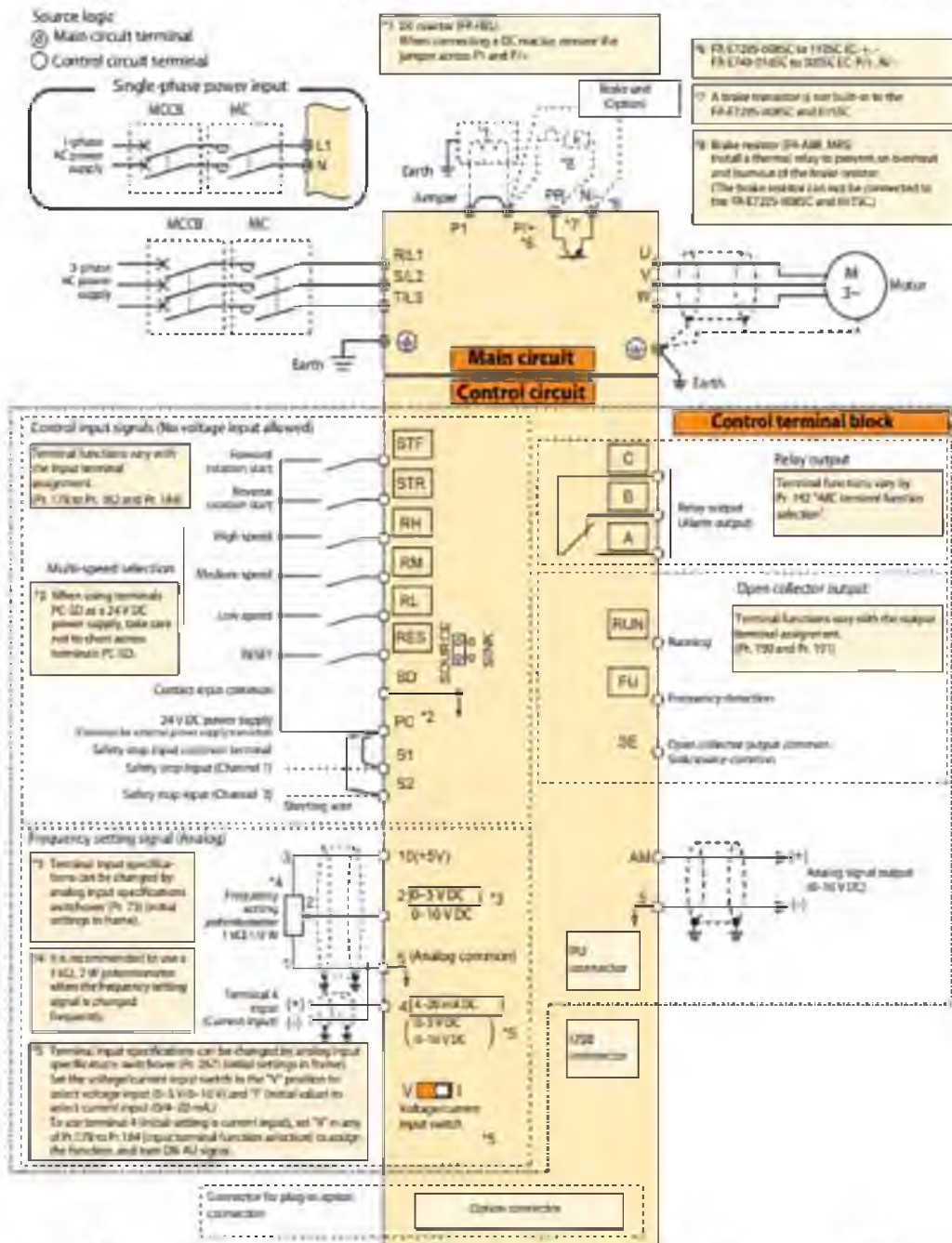


Рис. 3.7 Схема підключення частотного інвертора фази Mitsubishi

Electric FR-E720S-008SC-EC

Налаштування частотного інвертора було проведено за документацією виробника. Для обрання правильного режиму керування установкою треба змінити значення програм з номерами 73-267.

# НУБІП України

## Analog input selection (Pr. 73, Pr. 267)

You can select the function that switches between forward rotation and reverse rotation according to the analog input terminal specifications and input signal.

The following settings are possible:

- Select reference voltages and currents: 0–10V, 0–5V or 0/4–20mA
- Suppress motor reversing




Pr. No.	Name	Initial Value	Setting Range	Description		Parameters referred to	Refer to Section				
73	Analog input selection	1	0	Terminal 2: 0–10V	Without reversible operation	125	Terminal 2 frequency setting gain frequency	6.16.3			
			1	Terminal 2: 0–5V	Without reversible operation	126	Terminal 4 frequency setting gain frequency	6.16.3			
			10	Terminal 2: 0–10V	With reversible operation						
			11	Terminal 2: 0–5V	With reversible operation						
267	Terminal 4 input selection	0	Voltage/current input switch		Description	C2	Terminal 2 frequency setting bias frequency to	6.16.3			
			0		Terminal 4: 0/4–20mA				C7	Terminal 4 frequency setting gain	6.16.3
			1		Terminal 4: 0–5V						
			2		Terminal 4: 0–10V						

Рис. 3.8. Схема налаштування програм частотного інвертора Mitsubishi Electric FR-E720S-008SC-EC

# НУБІП України

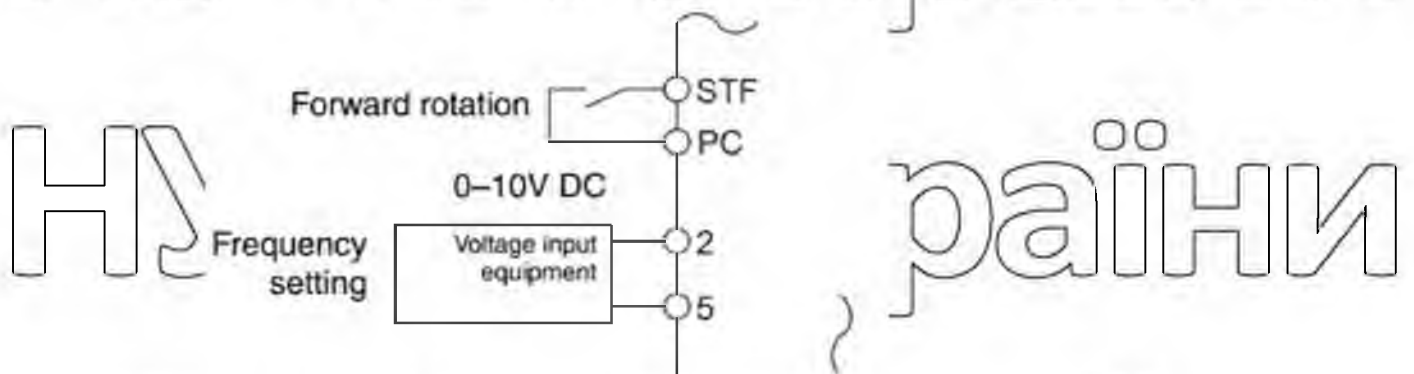


Рис. 3.9. Запропонована схема підключення аналогового сигналу керування до частотного інвертора

# НУБІП України

# НУБІП України

Для виготовлення колони, маятничкової стріли, маятничкової ваги та противаги використовується сталевий вал діаметром 20мм. Обробка проводиться на токарному, свердловому та фрезерному станках.

# НУБІП України

Для виготовлення пластмасових деталей маятника, пластикової трубки та редукторної платформи використовується 3D принтер.

### 3.1.3. Програмування мікроконтролера

# НУБІП України

Керування експериментальною установкою проводить мікроконтролер Nucleo. При виконанні кода збереженого у пам'яті, процесор мікроконтролера проводить аналіз отриманих даних з

# НУБІП України

енкодерів про кутове положення колони та маятничкової ланки. Виходячи з цих даних, використовуючи штучну нейронну мережу отриману модифікованим методом рою часток у попередніх розділах роботи, мікропроцесор генерує аналоговий сигнал який подається на частотний

# НУБІП України

інвертор для подальшого контролю напруги живлення мотора. Для змінення напрямку обертань мотора використовується одноканальний реле модуль, який, під керуванням мікроконтролера, перемикає контакти частотного інвертора.

# НУБІП України

Код керування Nucleo був написаний у інтегрованому середовищі розробки для мікропроцесорів STM32 – CubeIDE. Налаштування вікна Pinout & Configuration, за якою робиться під'єднання мікропроцесора до

# НУБІП України

приборів установки.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБіП України

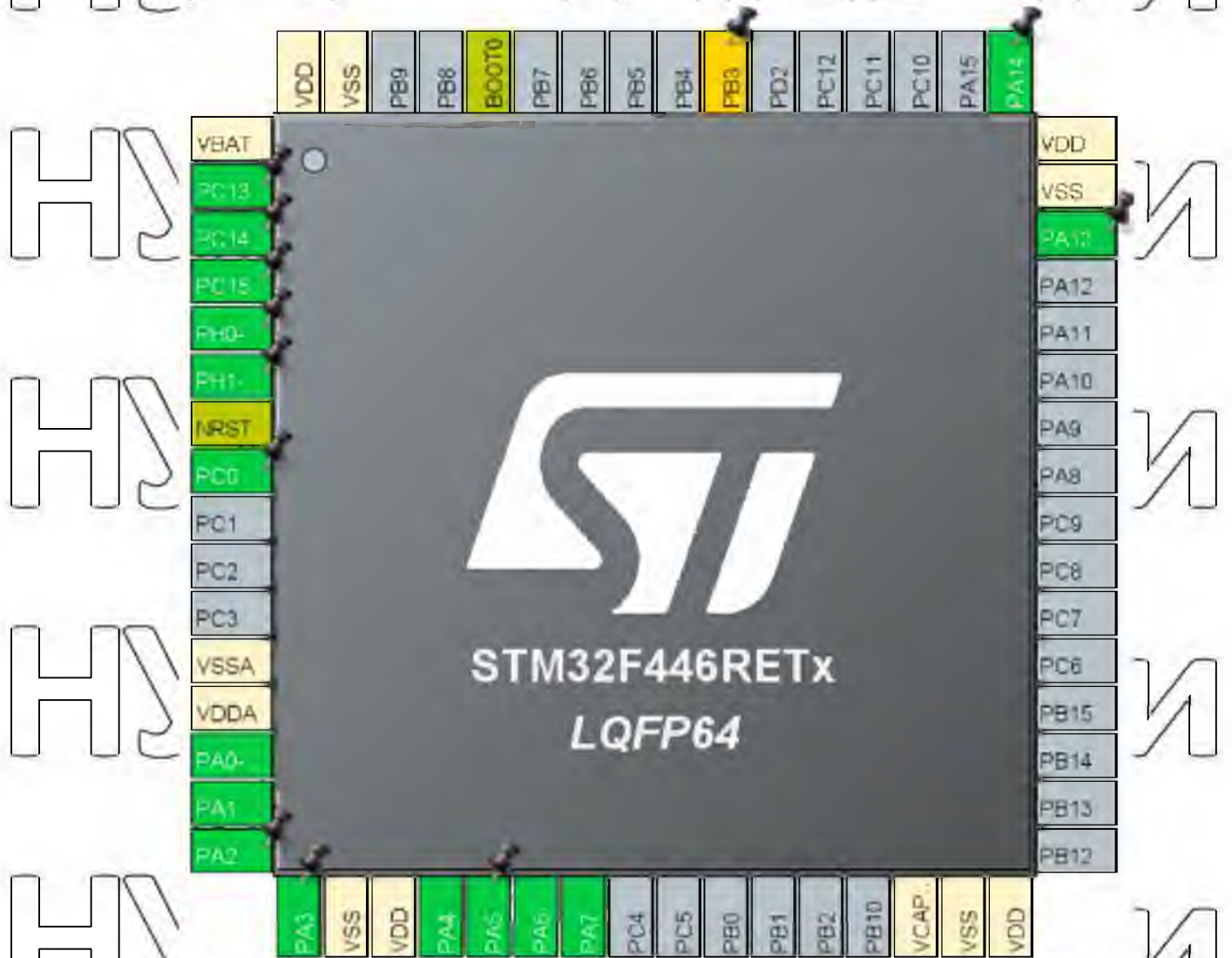


Рис. 3.10. Схема підключення виходів мікроконтролера

Зборі даних для навчання нейромережі був запроваджений таким алгоритмом

1. Зчитування значення лічильника (counter, тенкодер колони) та counter (енкодер стріли) з таймерів TIM3 і TIM2.
2. Отримання значення часу Time у мілісекундах використовуючи функцію HAL\_GetTick().
3. Встановлення значення для ЦАП (hdac) використовуючи HAL\_DAC\_SetValue.

# НУБіП України

# НУБіП України

# НУБІП України

4. Перевірка значень counter і flag для зміни напрямку руху лічильника і встановлення відповідних значень на виході DAC.

# НУБІП України

5. Оновлення виходу DAC за допомогою HAL\_DAC\_Start.

6. Відправка даних до персонального комп'ютера

7. Затримка на 10 мілісекунд за допомогою HAL\_Delay.

# НУБІП України

Значення ЦАП відповідають кутовій швидкості колони. Для отримання даних для навчання нейромережі, алгоритм встановлював значення отримані експериментальним методом. Основною задачею алгоритму є отримання даних з енкодерів при різних кутових положеннях, кутових швидкостях колони та маятника для подальшого аналізу.

# НУБІП України

Завантажений код на мікросхему для збору даних має такий вигляд:

```
#include "main.h"
```

```
#include "stdio.h"
```

```
#include <math.h>
```

```
DAC_HandleTypeDef hdac;
```

```
TIM_HandleTypeDef htim2;
```

```
TIM_HandleTypeDef htim3;
```

```
UART_HandleTypeDef huart2;
```

```
void SystemClock_Config(void);
```

```
static void MX_GPIO_Init(void);
```

```
static void MX_USART2_UART_Init(void);
```

```
static void MX_TIM3_Init(void);
```

```
static void MX_DAC_Init(void);
```

```
static void MX_TIM2_Init(void);
```

```
int32_t counter = 0;
```

# НУБІП України

НУБІП України

```
int32_t counterp = 0;
```

```
char buf[100];
```

НУБІП України

```
float Time = 0;
```

```
uint8_t i = 0;
```

```
int flag = 0;
```

```
uint16_t dacValues[] = {
```

НУБІП України

```
4095
```

```
};
```

```
int main(void)
```

```
{
```

НУБІП України

```
HAL_Init();
```

```
SystemClock_Config();
```

```
MX_GPIO_Init();
```

```
MX_USART2_UART_Init();
```

НУБІП України

```
MX_TIM3_Init();
```

```
MX_DAC_Init();
```

```
MX_TIM2_Init();
```

```
HAL_DAC_Start(&hdac, DAC_CHANNEL_1);
```

НУБІП України

```
HAL_TIM_Encoder_Start(&htim3, TIM_CHANNEL_1);
```

```
HAL_TIM_Encoder_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_1);
```

```
TIM3->CNT = 30000;
```

```
TIM2->CNT = 30000;
```

НУБІП України

```
while (1)
```

```
{
```

```
counter = TIM3->CNT - 30000;
```

```
counterp = TIM2->CNT - 30000;
```

НУБІП України

```
Time = HAL_GetTick();
```

```
HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)buf, sprintf(buf,
"Time : %.3f\n", Time/1000.0),10);
```

НУБІП України

```
HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)buf, sprintf(buf,
"Counter: %ld\n", counter),10);
```

```
HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)buf, sprintf(buf,
"Pendulum: %ld\n", counterp),10);
```

НУБІП України

```
HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_1,
DAC_ALIGN_12B_R, dacValues[i]);
```

```
if(counter > 500 && !flag)
```

```
{
```

```
HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_1,
DAC_ALIGN_12B_R, dacValues[i]);
```

НУБІП України

```
i++;
```

```
flag = 1;
```

```
HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_0,
GPIO_PIN_SET);
```

НУБІП України

```
if(i > sizeof(counter))
```

```
{
```

```
i = 0;
```

```
}
```

НУБІП України

```
else if(counter < 500 && flag)
```

```
{
```

```
HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_1,
DAC_ALIGN_12B_R, dacValues[i]);
```

НУБІП України

```
if(i > sizeof(counter))
```

НУБІП України

```
i=0;
```

```
}
```

НУБІП України

```
flag=0;
HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_0,
GPIO_PIN_RESET);
```

```
}
```

```
else if(counter<500 &&counter>-500)
```

НУБІП України

```
HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_1,
DAC_ALIGN_12B_R, dacValues[i]);
```

```
}
```

НУБІП України

```
HAL_DAC_Start(&hdac, DAC_CHANNEL_1);
HAL_UART_Transmit(&uart2, (uint8_t*)buf, sprintf(buf, "DAC
Value: %d \n\n", dacValues[i]), 10);
```

```
HAL_Delay(10);
```

НУБІП України

```
void SystemClock_Config(void)
```

```
{
```

```
RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
```

```
RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
```

```
HAL_RCC_PWR_CLK_ENABLE();
```

НУБІП України

```
HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR
VOLTAGE_SCALE3);
```

НУБІП України

```
RCC_OscInitStruct.OscillatorType
RCC_OSCILLATORTYPE_HSI;
```

```
RCC_OscInitStruct.HSISState = RCC_HSI_ON;
```

```

RCC_OscInitStruct.HSICalibrationValue
RCC_HSICALIBRATION_DEFAULT;

```

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;

```

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSI;

```

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLCM = 16;

```

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 336;

```

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV4;

```

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = 2;

```

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLR = 2;

```

```

if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)

```

```

{
    Error_Handler();
}

```

```

RCC_ClkInitStruct.ClockType
RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK

```

```

|RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;

```

```

RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource
RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;

```

```

RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;

```

```

RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;

```

```

RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;

```

```

if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2)
    != HAL_OK)

```

```

{
    Error_Handler();
}

```

НУБІП України

```
static void MX_DAC_Init(void)
```

```
{
```

```
    DAC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};
```

```
    hdac.Instance = DAC;
```

```
    if (HAL_DAC_Init(&hdac) != HAL_OK)
```

```
    {
```

```
        Error_Handler();
```

```
    }
```

```
    sConfig.DAC_Trigger = DAC_TRIGGER_NONE;
```

```
    sConfig.DAC_OutputBuffer = DAC_OUTPUTBUFFER_ENABLE;
```

```
    if (HAL_DAC_ConfigChannel(&hdac, &sConfig,  
        DAC_CHANNEL_1) != HAL_OK)
```

```
    {
```

```
        Error_Handler();
```

```
    }
```

```
static void MX_TIM2_Init(void)
```

```
{
```

```
    TIM_Encoder_InitTypeDef sConfig = {0};
```

```
    TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
```

```
    htim2.Instance = TIM2;
```

```
    htim2.Init.Prescaler = 2;
```

```
    htim2.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
```

```
    htim2.Init.Period = 4294967295;
```

```
    htim2.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
```

```
    htim2.Init.AutoReloadPreload
```

```
    TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
```

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

```
sConfig.EncoderMode = TIM_ENCODERMODE_TI12;
```

```
sConfig.IC1Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
```

```
sConfig.IC1Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTIO
```

```
sConfig.IC1Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
```

```
sConfig.IC1Filter = 0;
```

```
sConfig.IC2Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
```

```
sConfig.IC2Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTIO
```

```
sConfig.IC2Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
```

```
sConfig.IC2Filter = 0;
```

```
if (HAL_TIM_Encoder_Init(&htim2, &sConfig) != HAL_OK)
```

```
    Error_Handler();
```

```
sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
```

```
sMasterConfig.MasterSlaveMode =  
TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
```

```
if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim2,  
&sMasterConfig) != HAL_OK)
```

```
    Error_Handler();
```

```
static void MX_TIM3_Init(void)
```

```
    HAL_TIM_Encoder_Start_IT(&htim3,  
TIM_CHANNEL_ALL);
```

```
TIM_Encoder_InitTypeDef sConfig = {0};
```

```
TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
```

```
htim3.Instance = TIM3;
```

```
htim3.Init.Prescaler = 1;
```

```
htim3.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
```

```
htim3.Init.Period = 65535;
```

```
htim3.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
```

```
htim3.Init.AutoReloadPreload =  
TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
```

```
sConfig.EncoderMode = TIM_ENCODERMODE_TI12;
```

```
sConfig.IC1Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
```

```
sConfig.IC1Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTTI;
```

```
sConfig.IC1Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
```

```
sConfig.IC1Filter = 0;
```

```
sConfig.IC2Polarity = TIM_ICPOLARITY_RISING;
```

```
sConfig.IC2Selection = TIM_ICSELECTION_DIRECTTI;
```

```
sConfig.IC2Prescaler = TIM_ICPSC_DIV1;
```

```
sConfig.IC2Filter = 0;
```

```
if (HAL_TIM_Encoder_Init(&htim3, &sConfig) != HAL_OK)
```

```
{
```

```
    Error_Handler();
```

```
}
```

```
sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
```

```
sMasterConfig.MasterSlaveMode =  
TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
```

```
if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim3,  
&sMasterConfig) != HAL_OK)
```

```
{
```

НУБІП України

```
Error_Handler();
```

```
}
```

НУБІП України

```
static void MX_USART2_UART_Init(void)
```

```
{
    huart2.Instance = USART2;
```

```
    huart2.Init.BaudRate = 115200;
```

```
    huart2.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
```

```
    huart2.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
```

```
    huart2.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
```

```
    huart2.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
```

```
    huart2.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
```

```
    huart2.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
```

```
    if (HAL_UART_Init(&huart2) != HAL_OK)
```

```
{
```

```
        Error_Handler();
```

```
}
```

```
static void MX_GPIO_Init(void)
```

```
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};
```

```
    __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
```

```
    __HAL_RCC_GPIOH_CLK_ENABLE();
```

```
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
```

```
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();
```

```
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_0, GPIO_PIN_RESET);
```

НУБІП України

```

HAL_GPIO_WritePin(LD2_GPIO_Port,
GPIO_PIN_RESET);

```

```

GPIO_InitStruct.Pin = B1_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_IT_FALLING;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
HAL_GPIO_Init(B1_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

```

```

GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_0;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;

```

```

HAL_GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStruct);

```

```

GPIO_InitStruct.Pin = LD2_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;

```

```

HAL_GPIO_Init(LD2_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

```

```

void Error_Handler(void)

```

```

{

```

```

    disable_irq();

```

```

    while (1)
    {

```

```

    }

```

```

}

```

```

#ifdef USE_FULL_ASSERT

```

```

void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)

```

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

Процес прошивки мікроконтролера Nucleo FR446RE кодом у середовищі STM32Cube IDE:

## 1. Підготовка до прошивки:

- Завантаження та налаштування середовища розробки STM32Cube IDE.

- Підключення Nucleo FR446RE до комп'ютера за допомогою

USB-кабелю

## НУБІП України

- Завантаження та налагодження необхідних драйверів для Nucleo FR446RE

### 2. Створення нового проекту:

- Запуск CUBEIDE та виберіть опцію "New Project" з головного меню.

## НУБІП України

- Оберіть тип проекту "C Project", а потім оберть модель мікроконтролера Nucleo FR446RE.

- Налаштування опцій проекту, такі як типи файлів та

структуру каталогів.

## НУБІП України

- Натисніть кнопку "Finish", щоб створити новий проект.

### 3. Написання та компіляція коду:

- Додайте файл з програмним кодом до вашого проекту.

- Написання необхідного коду

## НУБІП України

- Компіляція коду, використовуючи вбудований компілятор C.

- Перевірка компіляції на успіх і наявність помилок.

### 4. Завантаження коду на мікроконтролер

- Підключіть Nucleo FR446RE до комп'ютера за допомогою

USB-кабелю.

## НУБІП України

- Виберіть "Run" або "Debug" з головного меню CUBEIDE.

# НУБІП України

- Переконайтеся, що Nucleo FR446RE вибрано як ціль для запуску програми.

# НУБІП України

- Запустіть прошивку, натиснувши "Run" або "Debug".
- Перевірка виконання програми

## 3.2. Алгоритм навчання нейромережі

# НУБІП України

Отримані дані використовуються для навчання рекурентної нейромережі та синтезу керування перевернутим маятником (Фуруті). Загальний алгоритм навчання нейромережі для подальшого використання у керуванні установки:

# НУБІП України

### 1. Підготовка даних:

- Завантаження бази знань, яка містить дані про положення гідки маятника, кутове прискорення гідки маятника, положення колони, кутове прискорення колони та напругу керування частотного інвертора.

# НУБІП України

- Розбиття бази знань на тренувальний та тестовий набори даних.

### 2. Побудова моделі рекурентної нейромережі

- Ініціалізація моделі рекурентної нейромережі з відповідною кількістю вхідних та вихідних нейронів.

# НУБІП України

- Визначення архітектури моделі, такої як кількість прихованих шарів, кількість нейронів у кожному шарі, тип активаційних функцій тощо.

# НУБІП України

### 3. Навчання моделі рекурентної нейромережі:

- Використання тренувального набору даних для навчання моделі рекурентної нейромережі.

# НУБІП України

- Використання методу оптимізації, у даній роботі модифікованого методу рою часток ME-D-PSO, для знаходження оптимальних ваг моделі.

# НУБІП України

- Повторення процесу навчання з використанням генерацій та пакетного навчання для поліпшення точності моделі.

## 4. Оцінка ефективності нейромережі:

# НУБІП України

- Використання тестового набору даних для оцінки ефективності навченої моделі рекурентної нейромережі.

- Обчислення прогнозованих значень керування перевернутим маятником Фурути з використанням навченої моделі.

- Порівняння прогнозованих значень зі справжніми значеннями керування для визначення точності та ефективності моделі.

# НУБІП України

- Використання метрик оцінки, таких як середня квадратична помилка (MSE) або середня абсолютна помилка (MAE), для кількісної оцінки рівня точності.

# НУБІП України

## 5. Синтез керування:

- Використання навченої моделі рекурентної нейромережі для генерації оптимального керування перевернутим маятником Фурути.

# НУБІП України

- Виконання обчислень та аналізу в реальному часі для забезпечення стабільного та точного керування маятником.

- Врахування динаміки системи, обмежень та безпеки для досягнення надійного та ефективного керування.

# НУБІП України

# НУБІП України

## 3.3. Результати

Результатом цього розділу є зібрана та налаштована експериментальна установка маятника Фурути, під'єднані електрокомпоненти і запрограмувати мікроконтролер на виконання керування. Також, було розроблено методику навчання нейромережі.

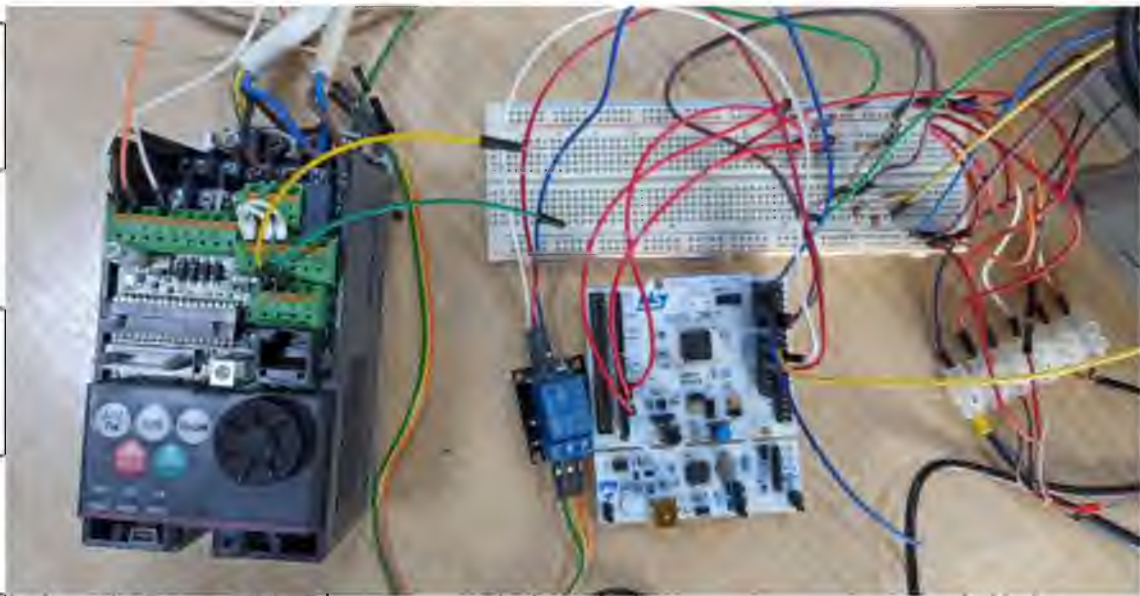


Рис. 3.11. Електрокомпоненти експериментальної установки маятника

# НУБіП України



Рис. 3.12. Екпериментальна установка маятника Фурути у початковому положенні (зліва) і у кінцевому положенні маятничової гілки (зправа)

# НУБіП України

# НУБіП України

# НУБІП України

## ВИСНОВКИ

Протягом цього проекту магістерської кваліфікації було досягнуто мети синтезу та дослідження перевернутого маятника Фурути з метою підвищення енергоефективності та зменшення часу стабілізації малоприводних систем. У процесі роботи було проведено кількісний та якісний аналіз наукових праць, статей, патентів та інших матеріалів, що стосуються теорії контролю, малоприводних механічних систем, штучних нейронних мереж та методу рою часток. Було синтезовано та оптимізовано алгоритм контролю маятника Фурути, розроблено, проаналізовано та збудовано експериментальну установку та програмний код для забезпечення оптимального контролю над установкою.

Системи, подібні до маятника Фурути, які за своєю конструкцією є малоприводними, використовуються в різних сферах життя - від особистих пристроїв, таких як квадрокоптери та гіроборди, до військових та космічних маніпуляторів. Динаміка цих систем є нелінійною, що ускладнює синтез оптимального контролю і є широкою темою для подальших досліджень. З кожним роком попит на такі пристрої зростає, разом зі збільшенням інтересу наукової спільноти до пошуку нових напрямків використання малоприводних систем та оптимізації існуючих конструкцій та алгоритмів керування ними. Це підтверджується результатами аналізу наукових статей та патентів, що свідчать про зростаючу актуальність цих тем.

Однією з сучасних тенденцій у розвитку теорії автоматичного регулювання є застосування штучних нейронних мереж. Системи

НУБІП України  
автоматичного керування, побудовані на основі цих мереж, виявляють

здатність до регулювання складних нелінійних об'єктів. У ході нашої

НУБІП України  
роботи були розглянуті механізми функціонування штучних нейронних мереж, їх типи та структура.

Також був розглянутий алгоритм оптимізації, відомий як метод рою часток. Цей метод ґрунтується на стохастичній оптимізації

НУБІП України  
імітуючи поведінку рою комах, птахів та риб. Ми ознайомилися з принципом його роботи та різновидами.

На основі штучної нейронної мережі та модифікованого методу рою часток був синтезований алгоритм оптимального керування для

НУБІП України  
маятника Фурути.

У ході роботи було побудовано експериментальну установку маятника Фурути. Установка має модульні елементи, які забезпечують швидку модифікацію експерименту/установки. Експериментальна

НУБІП України  
установка оптимізована для подальшої роботи у напрямку вдосконалення малоприводних систем. Крім цього, було розроблена і налагоджена електрична система експериментальної установки,

включаючи електромотор потужністю 60 Вт і частотний інвертор потужністю 80 Вт. Розроблено програмний код для керування і збору

НУБІП України  
даних з маятника. Також була запропонована методика дослідження та алгоритм навчання нейромережі для оптимального керування установкою

У ході результату магістерської кваліфікаційної роботи:

НУБІП України  
1. Виконано аналіз науково-технічних робіт на тему маятника Фурути, коливання і оптимальне керування, малоприводні механічні системи, штучні нейронні мережі.

# НУБІП України

2. Побудовано і налаштовано механізм експериментальної установки маятника Фурути.

# НУБІП України

3. Розроблено програмне забезпечення для керування механізмом маятника.

4. Розроблено методику налаштування установки перед проведенням експерименту.

# НУБІП України

5. Розроблено алгоритм навчання нейромережі для оптимального керування експериментальною установкою.

Існують такі напрями для подальшої роботи:

# НУБІП України

1. Розширення досліджень: Проведення додаткових експериментів та аналізу для підтвердження результатів та вдосконалення алгоритму контролю маятника Фурути. Це може включати дослідження впливу різних параметрів, використання різних методів оптимізації або розширення дослідження на інші типи малоприводних систем.

# НУБІП України

2. Розробка нових алгоритмів: Вивчення та розробка нових алгоритмів контролю на основі штучних нейронних мереж та методу рою часток. Це може включати пошук оптимальних структур нейронних мереж, використання різних видів архітектур мереж або поєднання різних методів оптимізації.

# НУБІП України

3. Розширення сфери застосування: Вивчення можливостей використання малоприводних систем, подібних до маятника Фурути, в інших галузях техніки і технологій. Наприклад, дослідження можливостей використання в робототехніці, медицині, енергетиці або промисловості.

# НУБІП України

4. Поліпшення енергоефективності: Розвиток нових методів та алгоритмів, спрямованих на поліпшення енергоефективності

НУБІП України

малоприводних систем. Це може включати розробку

енергозберігаючих алгоритмів, оптимізацію роботи системи для

зменшення енергетичних витрат або використання

альтернативних джерел енергії.

НУБІП України

5. Удосконалення стійкості і стабільності: Вивчення і поградження

стійкості та стабільності малоприводних систем, зокрема

маятника Фурути.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hoverboard market value forecast worldwide from 2017 until 2021 (in billion U.S. dollar)

<https://www.statista.com/statistics/869744/hoverboard-market-value-forecast-worldwide/> (дата звернення: 15.04.2023)

2. Commercial Drone Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Fixed-wing, Rotary Blade, Hybrid), By Application, By End-use, By Region, And Segment Forecasts, 2021 - 2028

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-commercial-drones-market> (дата звернення: 15.04.2023)

3. Dominating Sales Channel of Handheld Gimbal Will Still Be Online in The Future

[http://www.iresearchchina.com/content/details/7\\_44542.html](http://www.iresearchchina.com/content/details/7_44542.html) (дата звернення: 15.04.2023)

4. Amazon Prime Air Drones <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/?ie=UTF8&node=3037720011> (дата звернення: 15.04.2023)

5. Timeline of spaceflight

[https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline\\_of\\_spaceflight](https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_spaceflight) (дата звернення: 15.04.2023)

6. Mark W. Spong Control Problems in Robotics and Automation, 1998,

Volume 230 ISBN : 978-3-540-76220-1

7. Mazenc F., Praly L. 1995 Adding an integration and global stabilization of feedforward systems. IEEE Trans Automat Contr, 40 Jankovik M.,

Sepulchre R., Kokotovic P. V. 1995 Global stabilization of an enlarged class of cascade nonlinear systems. Preprint

# НУБІП України

8. Kennedy J., Eberhart R. (1995). Particle Swarm Optimization.

Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV.

c. 1942–1948.

# НУБІП України

9. Cazzolato, Ben & Prime, Zebb. (2011). On the Dynamics of the Furuta Pendulum. Hindawi Publishing Corporation Journal of Control Science and Engineering. 8. 10.1155/2011/528341

# НУБІП України

10. Fully-actuated vs Underactuated Systems

<http://underactuated.mit.edu/intro.html> (дата звернення: 15.04.2023)

11. Kennedy, J. & Eberhart, R.C. (1995). Particle swarm optimization.

Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Vol. 4, (pp. 1942-1948), Perth: IEEE

# НУБІП України

12. Pluhacek, M., Senkerik, R., Viktorin, A., Kadavy, T. & Zelinka I.

(2018). A review of real-world applications of particle swarm optimization algorithm. Recent Advances in Electrical Engineering and

# НУБІП України

Related Sciences: Theory and Application, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 465, Springer, Cham

13. Scopus <https://www.scopus.com/home.uri> (дата звернення:

31.10.2022)

# НУБІП України

14. Web of Science Master Journal List <https://ml.clarivate.com/search-results> (дата звернення: 31.10.2022)

15. Google Scholar <https://scholar.google.com/> (дата звернення:

31.10.2022)

# НУБІП України

# НУБІП України

16.K. Furuta, M. Yamakita, and S. Kobayashi, "Swing-up control of

inverted pendulum using pseudo-state feedback," Journal of Systems

and Control Engineering, vol. 206, no. 6, pp. 263–269, 1992.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

## ДОДАТКИ

# НУБІП України

А. Ткаченко П.В. КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МАЯЧНИКОМ ФУРУТИ,

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ «Вісник студентів факультету

конструювання та дизайну Національного університету біоресурсів

# НУБІП України

і природокористування України» Випуск 10

[https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik\\_tez\\_kd\\_2022.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_tez_kd_2022.pdf)

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

**Національний університет біоресурсів і  
природокористування України  
Факультет конструювання та дизайну**



**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
«Вісник студентів факультету конструювання та дизайну  
Національного університету біоресурсів і  
природокористування України»

**Випуск 10**

**Київ-2022**

УДК 519.7+681.5

## КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МАЯТНИКОМ ФУРУТИ

*Студент – Ткаченко П.В.*

*Науковий керівник – д.т.н., проф. Ромасевич Ю.О.*

У цій роботі, для проведення аналізу науково-технічних документів та статей за тематикою дослідження, використовуються дані наукометричних баз даних Scopus [1], Web of Science [2] та Google Scholar [3].



Рисунок 1 – Кількість наукових статей за темою в базах даних

## ЗМІСТ

Н	КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МАЯТНИКОМ ФУРУТИ.....	3	]
	THE LARGEST TOWER CRANE IN THE WORLD.....	5	
	АКТУАЛЬНІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНА ВІД НАГАРОВІДКЛАДЕНЬ.....	6	
Н	ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ТРИБОСПОЛУЧЕНЬ КОМПРЕСОРІВ АВТОМОБІЛІВ КАМАЗ.....	10	]
	ВОДЕНЬ В СТАЛІ.....	15	
	ПРОГАРТОВАНІСТЬ ЛИВАРНИХ СТАЛЕЙ.....	17	
	ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ РОЗГОНУ/ГАЛЬМУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ.....	18	
Н	КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПРАЦЬ В ГАЛУЗІ ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ ВАНТАЖУ, ЩО ПЕРЕМІЩУЄТЬСЯ БАШТОВИМ КРАНОМ.....	21	]
	ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИВІДНОГО МЕХАНІЗМУ МОТОВИЛА ЖАТКИ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА.....	23	
Н	ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ ГВИНТОВОГО КОНВЕСРА ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....	25	]
	ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ КОЗЛОВОГО КРАНА.....	26	
	КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ДОКУМЕНТІВ У ГАЛУЗІ РОЗРОБКИ СЕГВЕІВ.....	28	
Н	ЗРАЗОК ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ВИЛИВКАХ... МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ.....	29 32	]
Н	ОБґРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ РОБОЧИХ ОРГАНІВ РОТОРНОГО ГИЧКОРИЗУ ДЛЯ		]