

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
"Національний гірничий університет"

Електротехнічний
(факультет)

Кафедра Електропривода
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

дипломної роботи

магістра

(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

галузь знань 14 Електрична інженерія

(шифр і назва галузі знань)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

освітній рівень магістр

(назва освітнього рівня)

Кваліфікація 2151.2 (Int) Інженер-електромеханік

(код і назва кваліфікації)

на тему: РОЗРОБКА МІНІ-ДЕМОСТЕНДУ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЕРА
АРДУІНО

Виконавець:

Студент 6 курсу, групи 141м-16-4

Ткаченко О.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	Балахонцев О.В		
розділів:			
Аналітична частина	Балахонцев О.В		
Основна частина	Балахонцев О.В		
Практична частина	Балахонцев О.В		

Рецензент			
-----------	--	--	--

Нормоконтроль	Казачковський М.М.		
---------------	--------------------	--	--

Дніпропетровськ
2018

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
"Національний гірничий університет"

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
Електроприводу (повна назва)

_____ Казачковський М.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 2018 року

ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи магістра
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та
електропривод»)

студенту 141М-16-4 Ткаченко О.В.
(група) (прізвище та ініціали)

Тема дипломної роботи РОЗРОБКА МІНІ-ДЕМОСТЕНДУ НА ОСНОВІ
КОНТРОЛЕРА АРДУІНО

1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора ДВНЗ "НГУ" від 31.10.2017 № 1806-л

2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Об'єкт досліджень динамічні процеси в електромеханічній системі керування положенням перевернутого маятника

Предмет досліджень система керування електроприводом та алгоритм обробки сигналів у складі міні-демостенду

Мета НДР синтез раціональної системи керування електроприводом і розробка технічних рішень щодо міні-демостенду

Вихідні дані для проведення роботи параметри компонентів мікроелектромеханічних систем, плат мікроконтролерів на базі Atmel та периферійних пристроїв

3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

Наукова новизна полягає у розробці системи керування рівновагою перевернутого маятника з нерухомою точкою опори

Практична цінність полягає у розробці і виготовленні міні-демостенду для кафедри електроприводу

4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Результати повинні бути достовірними та обґрунтованими

5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Огляд способів та методів підтримування рівноваги та балансуєчих систем керування	15.09.2017 – 17.10.2017
Розробка технічних рішень щодо систем керування рівновагою	18.10.2017 – 18.11.2017
Практична частина	19.11.2017 – 19.01.2018

6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект є опосередкованим і пов'язаний з поліпшенням матеріально-технічного забезпечення учбового процесу

7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

Відповідність оформлення ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення

Завдання видав _____

(підпис)

Балахонцев О.В.

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Ткаченко О.В.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: _____

Термін подання дипломної роботи до ЕК _____

Реферат

Пояснювальна записка 55 с., 13 рис., 1 табл., 12 джерел, мультимедійна презентація на 17 слайдах.

Об'єкт досліджень: динамічні процеси в електромеханічній системі керування положенням перевернутого маятника

Предмет досліджень: система керування електроприводом та алгоритм обробки сигналів у складі міні-демостенду

Мета роботи: синтез раціональної системи керування електроприводом і розробка технічних рішень щодо міні-демостенду

У дипломній роботі було запроєктовано та зібрано стенд керування рівновагою перевернутого маятника.

У першому розділі були розглянуті загальні принципи утримання рівноваги та порядок керування системою рівноваги.

У другому розділі дипломної роботи була виконана розробка стенду, підбір обладнання, а також збірка стенду.

У третьому розділі були розглянуті способи та алгоритми роботи з обладнанням а також розробка алгоритму керування системою.

ЕЛЕКТРОПРИВІД, МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ,
ПЕРЕВЕРНУТИЙ МАЯТНИК, ГІРОСКОП, АКСЕЛЕРОМЕТР, ДВИГУН
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, МІНІ-ДЕМОСТЕНД.

Реферат

Пояснительная записка 55 с., 13 рис., 1 табл., 12 источников, мультимедийная презентация на 17 слайдах.

Объект исследований: динамические процессы в электромеханической системе управления положением перевернутого маятника

Предмет исследований: система управления электроприводом и алгоритм обработки сигналов в составе мини-демонстрационного стенда

Цель работы: синтез рациональной системы управления электроприводом и разработка технических решений касательно мини-демонстрационного стенда.

В дипломной работе было запроектировано и собрано стенд управления равновесием перевернутого маятника.

В первом разделе были рассмотрены общие принципы удержания равновесия и порядок управления системой равновесия.

Во втором разделе дипломной работы была выполнена разработка стенда, подбор оборудования, а также сборка стенда.

В третьем разделе были рассмотрены способы и методы работы с оборудованием а также разработка алгоритма управления системой.

ЭЛЕКТРОПРИВОД, МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ,
ПЕРЕВЕРНУТЫЙ МАЯТНИК, ГИРОСКОП, АКСЕЛЕРОМЕТР,
ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА, МИНИ-ДЕМОСТЕНД.

Abstract

Explanatory note 55 pages, 13 figures, 1 tables, 12 sources, multimedia presentation on 17 slides.

Object of research: dynamic processes in the electromechanical control system of the position of the inverted pendulum

The subject of the research: the electric drive control system and the signal processing algorithm in the bench

The purpose of the work: synthesis of a rational electric drive control system and development of technical solutions for a bench

In the diploma work, the balance control for a bench of the inverted pendulum was designed and assembled.

In the first section, the general principles of maintaining equilibrium and the order of control of the equilibrium system were considered.

In the second section, the bench was developed, equipment was selected, and the bench was assembled.

In the third section, the methods of working with equipment were discussed and also a control system algorithm was developed.

ELECTRIC DRIVE, MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, INVERTED PENDULUM, GYROSCOPE, ACCELEROMETER, DC MOTOR, BENCH.

Зміст

ВСТУП.....	8
1. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РІВНОВАГОЮ.....	10
Умови рівноваги та її види	11
Перевернутий маятник.....	11
Поняття управління об'єктом	14
2. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ СТЕДУ. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ.....	18
Функціональна та принципова схема стенду.	19
Опис стенду.	20
Вибір двигуна.	20
Вибір плати керування.....	22
Вибір вимірювального пристрою.....	29
Вибір модуля керування двигуном.	32
Вибір елементів живлення.....	35
3. СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ВИМІРЮВАНЬ СИГНАЛІВ ТА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	37
Алгоритм вимірювання кута нахилу.....	38
Застосування фільтра Калмана в каналі зворотного зв'язку.	38
Алгоритм керування двигуном.....	45
ВИСНОВКИ	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	49
ДОДАТКИ	51
Код програми.....	52

ВСТУП

В даний час електропривод розвивається і знаходять все більше методів управління і сфер застосування. Важко уявити наше життя без електромеханіки: ліфти, транспорт, верстати, інструменти і т.д. У сучасному суспільстві на частку електроприводу припадає понад 60% споживаної в країні електроенергії.

Таке широке застосування електроприводу пояснюється цілою низкою його переваг у порівнянні з іншими видами приводів: використання електричної енергії, розподіл і перетворення якої в інші види енергії, в тому числі і в механічну, найбільш економічно; великий діапазон потужності електроприводів і швидкості їх руху; різноманітність конструктивних виконань, що дозволяє раціонально поєднувати привід з виконавчим органом робочої машини і використовувати для роботи в різних умовах; високий ККД і екологічна чистота.

Метою даної дипломної роботи є розробка системи управління рівновагою перевернутого маятника шляхом зміщення центру маси за рахунок моменту інерції, який створюється електроприводом, а також розробка мікропрограми балансуєчої системи і її конструкції.

Актуальність обраної теми полягає в тому, що така система балансування може бути застосовна як для рухомого об'єкта, так і для нерухомих з нерухомою точкою опори. Більш того, дана система може сама виступати в ролі засобу пересування. У зв'язку з вищесказаним, система балансування може знайти своє застосування не тільки в області наземного транспорту а й в будівництві, авіабудуванні та ракетобудуванні.

Окремо варто виділити можливість застосування такої системи для стабілізації об'єктів під час землетрусів.

1. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РІВНОВАГОЮ.

Умови рівноваги та її види

Рівновагою називається стан, при якому, незважаючи на прикладені сили, тіло знаходиться в стані спокою.

Для рівноваги необхідно, щоб сума зовнішніх сил, прикладених до тіла, дорівнювала нулю, і щоб сума моментів всіх зовнішніх сил, прикладених до тіла відносно будь-якої осі, дорівнювала нулю. Центр мас такого тіла повинен залишатися в спокої.

Рівновага буває трьох видів: стійка, нестійка і байдужа. Якщо при відхиленні від положення рівноваги виникає повертаюча сила, спрямована до положення рівноваги, це стійке положення рівноваги. Коли рівновага порушується під впливом невеликих зовнішніх впливів, вона називається нестійкою. Рівновага тіла байдужа, якщо при зміні положення тіла воно залишається так само в рівновазі.

Найзручніше описувати стан рівноваги за допомогою поняття енергії. У стійкому положенні рівноваги центр ваги тіла займає положення з найменшим запасом потенційної енергії. Форма потенційної ями визначає відхилення від положення рівноваги. Тіло багаторазово проходить положення рівноваги, поки дія дисипативних сил не призведе до того, що коливання припиняться. Таке тіло називається осцилятором.

Перевернутий маятник

На малюнку зображений плоский маятник

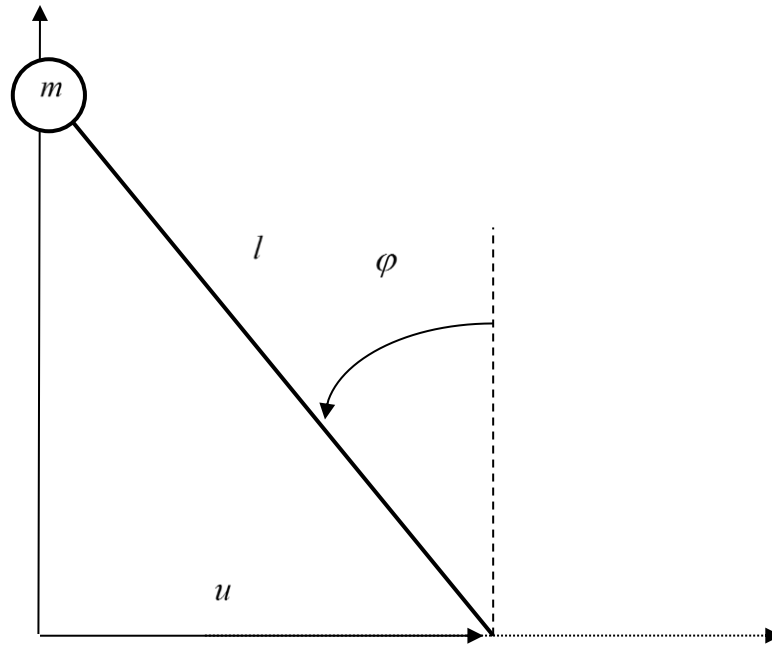


Рис.1 – Плоский маятник

Де: φ - кут відхилення маятника від вертикалі;

u - горизонтальне зміщення точки опори в площині хитання маятника;

l - довжина маятника;

m - маса.

Знайдемо функцію Лагранжа і складемо з її допомогою рівняння руху.

Безпосередньо знаходимо координати x , y маси m маятника $x = u - l \sin \varphi$;

$y = l \cos \varphi$;

Знаходимо потенційну і кінетичну енергію.

Кінетична енергія - це енергія механічної системи, що залежить від швидкостей руху складових її частин. У класичній механіці кінетична енергія матеріальної точки маси m , що рухається зі швидкістю V , дорівнює:

$$E_k = \frac{mV^2}{2}, \quad (1.1)$$

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2, \quad (1.2) \quad V_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x}, \quad (1.3) \quad V_y = \frac{dy}{dt} = \dot{y}, \quad (1.4)$$

$$\dot{x} = (u - l \sin \varphi)' = \dot{u} - l(\sin \varphi)' \dot{\varphi} = \dot{u} - l \cos \varphi \dot{\varphi} = \dot{u} - l \dot{\varphi} \cos \varphi, \quad (1.5)$$

$$\dot{y} = -l \dot{\varphi} \sin \varphi, \quad (1.6) \quad V^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2, \quad (1.7)$$

$$V^2 = (\dot{u} - l\dot{\phi} \cos \phi)^2 + (-l\dot{\phi} \sin \phi)^2 = \dot{u}^2 - 2\dot{u}l\dot{\phi} \cos \phi + l^2\dot{\phi}^2 \cos^2 \phi + l^2\dot{\phi}^2 \sin^2 \phi = ; (1.8)$$

$$= \dot{u}^2 - 2\dot{u}l\dot{\phi} \cos \phi + l^2\dot{\phi}^2 (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) = \dot{u}^2 - 2\dot{u}l\dot{\phi} \cos \phi + l^2\dot{\phi}^2$$

Отже

$$E_{к.} = \frac{mV^2}{2} = \frac{m(\dot{u}^2 - 2\dot{u}l\dot{\phi} \cos \phi + l^2\dot{\phi}^2)}{2}; (1.9)$$

Потенційна енергія - частина загальної механічної енергії системи, що залежить від взаємного розташування її часток і від їх положення в зовнішньому силовому полі.

$$E_{п.} = mgh, (1.10)$$

$$h = l \cos \phi, (1.11)$$

$$E_{п.} = mgl \cos \phi; (1.12)$$

Функція Лагранжа:

$$L = E_{к.} - E_{п.}, (1.13)$$

$$L = \frac{m(\dot{u}^2 - 2\dot{u}l\dot{\phi} \cos \phi + l^2\dot{\phi}^2)}{2} - mgl \cos \phi; (1.14)$$

Або

$$L = \frac{m}{2}(\dot{u}^2 - 2\dot{u}l\dot{\phi} \cos \phi + l^2\dot{\phi}^2) - mgl \cos \phi; (1.15)$$

Складаючи рівняння Лагранжа отримаємо:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} - \frac{\partial L}{\partial \phi} = 0; (1.16)$$

В даному випадку:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} = \frac{m}{2}(-2\dot{u}l \cos \phi + l^2 2\dot{\phi}) = -ml\dot{u} \cos \phi + ml^2\dot{\phi}, (1.17)$$

$$\frac{d}{dt}(-ml\dot{u} \cos \phi + ml^2\dot{\phi}) = -ml \cos \phi \dot{u} + ml\dot{u} \sin \phi \dot{\phi} + ml^2\ddot{\phi}, (1.18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \phi} = \frac{m}{2}(2\dot{u}l\dot{\phi} \sin \phi) + mgl \sin \phi = ml\dot{u}\dot{\phi} \sin \phi + mgl \sin \phi; (1.19)$$

Виходячи з цього рівняння Лагранжа буде мати вигляд:

$$-ml\dot{u} \cos \phi + ml\dot{u}\dot{\phi} \sin \phi + ml^2\ddot{\phi} - ml\dot{u}\dot{\phi} \sin \phi - mgl \sin \phi = 0, (1.20)$$

$$-l \cos \phi \dot{u} + l\dot{u} \sin \phi \dot{\phi} + l^2\ddot{\phi} - l\dot{u}\dot{\phi} \sin \phi - gl \sin \phi = 0, (1.21)$$

$$-\frac{\cos \varphi \ddot{u}}{l} + \frac{\dot{u} \sin \varphi \dot{\varphi}}{l} + \ddot{\varphi} - \frac{\dot{u} \dot{\varphi} \sin \varphi}{l} - \frac{g \sin \varphi}{l} = 0, \quad (1.22)$$

$$\ddot{\varphi} - \frac{\cos \varphi \ddot{u}}{l} + \frac{\dot{u} \sin \varphi \dot{\varphi}}{l} - \frac{\dot{u} \dot{\varphi} \sin \varphi}{l} - \frac{g \sin \varphi}{l} = 0, \quad (1.23)$$

$$\ddot{\varphi} - \frac{\cos \varphi \ddot{u}}{l} - \frac{g \sin \varphi}{l} = 0, \quad (1.24)$$

$$\ddot{\varphi} - \frac{g \sin \varphi}{l} = \frac{\cos \varphi}{l} \ddot{u}; \quad (1.25)$$

Якщо обмежитися малими кутами φ та спростити це рівняння у вигляді

$$\ddot{\varphi} - \frac{g}{l} \varphi = \frac{\ddot{u}}{l}; \quad (1.26)$$

При $u=0$, тобто при нерухомій точці опори маятника, рівняння (1.26) переходить в рівняння маятника, лінеаризоване поблизу верхнього хиткого становища рівноваги.

Скористаємося можливістю вибору зміщення точки m на відстань u , отримаємо.

$$\ddot{\varphi} + 2\delta \dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = 0; \quad (1.27)$$

Рівняння перетворилося в рівняння осцилятора зі стійким положенням рівноваги $\varphi = 0$, тобто щоб маятник, стоячи доверху, поведився так само, як якби він висів вниз і коливання його згасали ($\delta > 0$).

Порівнюючи два рівняння (1.26) і (1.27), бачимо, що для цього потрібно, щоб

$$\ddot{u} = -(g + \omega^2 l) \varphi - 2l \delta \dot{\varphi}; \quad (1.28)$$

Реалізувати таке u можна, спостерігаючи за маятником і вимірюючи його відхилення φ і швидкість відхилення $\dot{\varphi}$ і повідомляючи точці m прискорення \ddot{u} відповідно до формули (1.28).

Поняття управління об'єктом

Спосіб керування, що задається формулою (1.28), називають стратегією керування. Як вже зазначалося, для її реалізації потрібно вимірювати φ , $\dot{\varphi}$, звичайно, прикладати до точки опори силу, яка б повідомляла точці опори

необхідне прискорення. Таким чином, для реалізації управління потрібна вимірвальна і виконавча системи.

Отже, алгоритм вирішення задачі стабілізації перевернутого маятника буде наступним:

- 1) Записуємо координати маятника в рухомій системі відліку;
- 2) Переходимо в інерційну систему відліку;
- 3) Диференціюємо координати за часом, щоб знайти $\dot{x}; \dot{y}$;
- 4) Знаходимо $V^2 = V_x^2 + V_y^2$;
- 5) Знаходимо кінетичну і потенційну енергію;
- 6) Пишемо функцію Лагранжа $L = E_k - E_n$;
- 7) Записуємо рівняння Лагранжа (рівняння коливань) $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0$;
- 8) Знаходимо $\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}$;
- 9) Результат диференціюючи за часом;
- 10) Шукаємо похідну $\frac{\partial L}{\partial \varphi}$;
- 11) Підставляємо все в рівняння Лагранжа;
- 12) Вводимо обмеження малих кутів, отримуємо диференціальне рівняння другого порядку;
- 13) Вибираємо стратегію керування у вигляді, $\ddot{y} = -a\varphi - b\dot{\varphi}$, де, $a > g$, а $b > 0$;
- 14) Складаємо визначник по системі рівняння коливань і стратегії керування. Розкриваючи визначник, аналізуємо отриманий вираз щодо його коефіцієнтів, визначаємо при яких значеннях коефіцієнтів рівновага буде типу фокус або вузол.

Описаний процес керування можна зобразити схемою, показаної на мал.2. Схема включає об'єкт керування - перевернутий маятник, на який можна впливати, переміщуючи його опору; систему вимірювання кута φ і

кутової швидкості $\dot{\varphi}$; систему керування, що реалізує стратегію керування і силовий вплив, пересуваючий перевернутий маятник та сповіщаючий йому необхідне стратегією керування прискорення.

Принципова схема стабілізації стоячого вертикально вгору маятника, що відображає основний принцип керування - зворотний зв'язок.

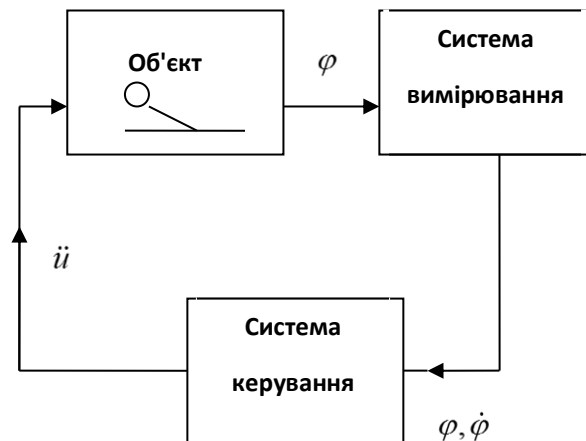


Рис. 2 – Система керування рівновагою

Стратегія керування (5) лінійна по φ і $\dot{\varphi}$ так що $\ddot{i} = -a\varphi - b\dot{\varphi}$, причому, для стійкості потрібно, щоб, $a > g$, а $b > 0$. При $b = 0$ перевернутий маятник також стійкий, але його коливання біля рівноваги загасають, так як вони описуються осцилятором (4) з $\delta = 0$.

Перша частина стратегії керування $a\varphi$ - це управління по відхиленню маятника φ . Згідно з цією частиною, маятник потрібно переміщати прискорено в протилежну сторону нахилу маятника, тобто при $\varphi > 0$, $\ddot{i} > 0$ а при $\varphi < 0$ $\ddot{i} < 0$.

Наступна частина коригує величину прискорення \ddot{i} , з огляду на кутову швидкість обертання маятника. Якщо маятник рухається в ту ж сторону, що і його відхилення, то це призводить до збільшення необхідного прискорення в порівнянні з частиною $a\varphi$, навпаки, якщо він рухається в сторону, зворотну по відношенню до відхилення, то це прискорення зменшується за величиною, стаючи менше $a\varphi$.

$$\ddot{\varphi} - \frac{g}{l} \varphi = \frac{\ddot{i}}{l}; \quad (1.29)$$

Принцип роботи стенду заснований на дії закону про збереження кутового моменту або моменту імпульсу.

Згідно з рівнянням динаміки обертального руху $\frac{dL}{dt} = \overline{M}$, якщо система замкнута і момент сили M , що діє на систему дорівнює нулю, адже жодна зовнішня сила не діє на систему, то виконується рівність $\frac{dL}{dt} = 0$.

Ця рівність має місце лише в тому випадку: коли результуючий момент імпульсу системи дорівнює сталій величині, тобто $L = const$

В будь-якій замкнутій системі сумарний момент імпульсу всіх тіл цієї системи з часом не змінюється. Це і є формулювання закону збереження моменту імпульсу. Закон збереження моменту імпульсу має досить широке використання.

Оскільки

$$\sum_{i=1}^n I_i \omega_i = const, \quad (1.30)$$

то зміна моменту інерції I_i приводить до відповідної зміни кутової швидкості. Приклади використання закону збереження моменту імпульсу мають місце в техніці

Отже, при збільшенні кутової швидкості, та відповідно, з виникненням прискорення обертального руху момент інерції зменшується. І навпаки, зменшення кутової швидкості, супроводжується зростанням моменту інерції.

Таким чином, при різкій зупинці обертального руху, швидко зростає момент інерції, який, при відсутності обертання завдяки силі тертя переноситься у площину обертання і направлений в сторону обертання.

Саме на базі такого ефекту має працювати стенд розроблений в цій дипломній роботі.

2. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ СТЕДУ.
ВИБІР ОБЛАДНАННЯ.

Функціональна та принципова схема стенду.

Стенд складається із восьми основних частин:

- Станина;
- Двигун;
- Механічна частина;
- Плата керування;
- Драйвер двигуна;
- Датчик кута нахилу;
- Блок живлення двигуна;
- Живлення плати керування.

Механічна частина, в свою чергу складається із таких складових частин:

- Кут сталевий – 2 шт.
- Підшипник – 2 шт.
- Вал – 1 шт.
- Плече – 1 шт.
- Колесо – 1 шт.

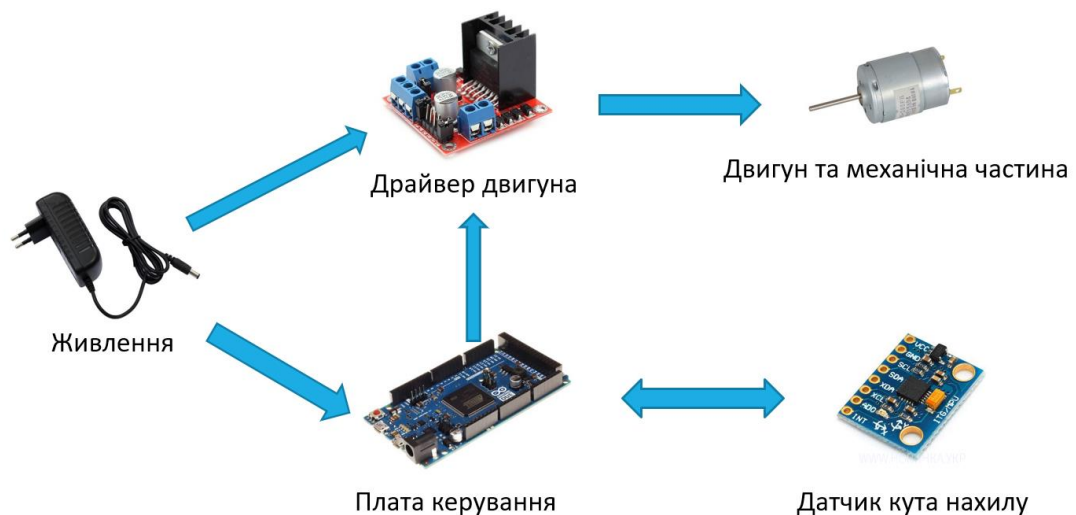


Рис.3 Функціональна схема стенду

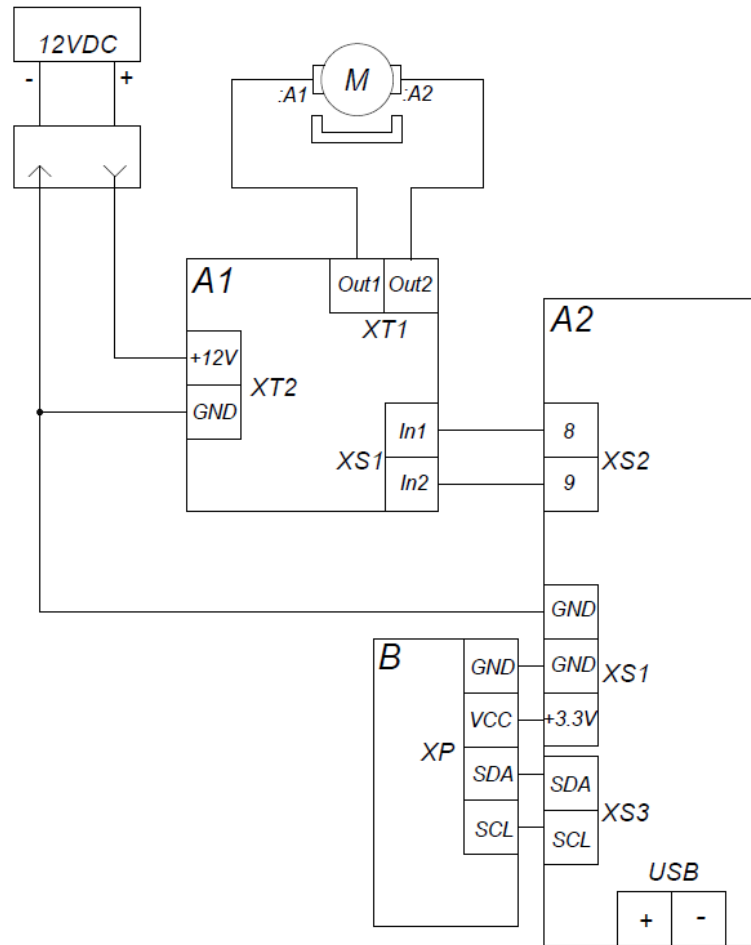


Рис. 4 – Принципова схема стану.

Опис стану.

На станину закріплюється два сталєних кута між якими закріплюється вал на підшипниках. На вал встановлюється нижня частина плеча. Двигун закріплюється у верхній частини плеча, а зверху на плече встановлюється вимірювач кута нахилу. Також на станину встановлюється плата керування та драйвер двигуна.

Вибір двигуна.

Для поставлених цілей необхідний двигун постійного струму що розвиває достатню кутову швидкість (близько 8000 об/хв) та має невеликі габарити і вагу. Таким характеристикам відповідає двигун Mabuchi RS-385.



Рис.5 – Двигун постійного струму RS-385

Характеристики:

Збудження: постійні магніти

Гранична напруга живлення: 6-24В

Номінальна напруга живлення: 12В

Струм без навантаження: 0,15А

Струм максимального навантаження: 0,76А

Номінальний момент: 7,15 мН*м

Гальмівний момент: 43,6 мН*м

Гальмівний струм 3,9А

Колекторний двигун постійного струму (КДПТ) з постійними магнітами є найбільш поширеним серед КДПТ. Індуктор цього двигуна включає постійні магніти, які створюють магнітне поле статора. Колекторні двигуни постійного струму з постійними магнітами зазвичай використовуються в задачах, що не вимагають великих потужностей. Колекторні двигуни постійного струму з постійними магнітами дешевше у виробництві, ніж колекторні двигуни з обмотками збудження. При цьому момент колекторних двигунів постійного струму з постійними магнітами обмежений полем постійних магнітів статора. КДПТ з постійними магнітами дуже швидко реагує на зміну напруги. Завдяки

постійному полю статора легко управляти швидкістю двигуна. Недоліком електродвигуна постійного струму з постійними магнітами є те, що з часом магніти втрачають свої магнітні властивості, в результаті чого зменшується поле статора і знижуються характеристики двигуна.

переваги:

краще співвідношення ціна / якість

високий момент на низьких оборотах

швидкий відгук на зміну напруги

недоліки:

постійні магніти з часом, а також під впливом високих температур втрачають свої магнітні властивості

Вибір плати керування

Для виконання стенду була обрана плата мікроконтролера Arduino Due на базі процесора Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3.

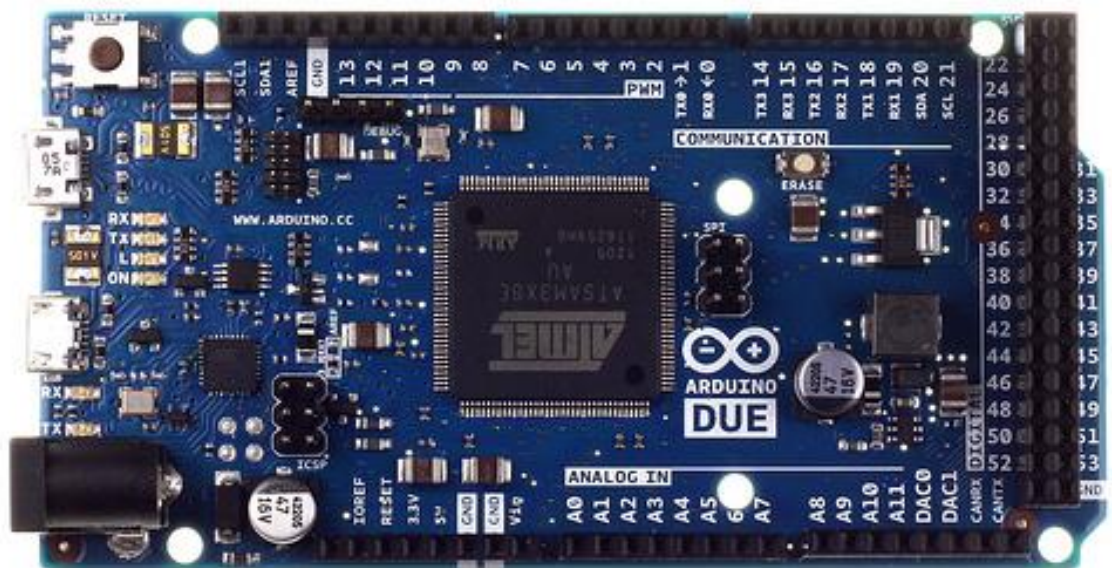


Рис.6 – плата мікроконтролера Arduino Due

Це перша плата Arduino в основі якої лежить 32-бітний мікроконтролер з ARM ядром. На відміну від інших плат Arduino, Arduino Due працює від 3,3 В подавши більш високу напругу, наприклад, 5 В, на виводи можна пошкодити плату.

Плата містить все, що необхідно для підтримки мікроконтролера. Щоб почати роботу з нею, досить просто підключити її до комп'ютера кабелем мікро-USB, або подати живлення з AC / DC перетворювача або батарейки. Due сумісний з усіма платами розширення Arduino, що працюють від 3,3 В, і з цоколівкою Arduino 1.0.

Розташування виводів Due повторює цоколівку Arduino 1.0:

TWI: Виводи SDA і SCL розташовані поруч з виводами AREF.

Вивід IOREF, який дозволяє за допомогою правильної конфігурації адаптувати приєднану плату розширення до напруги, що видається Arduino. Завдяки цьому плати розширення можуть бути сумісні і з 3,3-вольтовими платами типу Due і з платами на базі AVR, що працюють від 5 В.

Непідключені виводи, зарезервовані для використання в майбутньому.

Переваги ядра ARM.

На Due встановлено 32-бітове ARM ядро, що перевершує по продуктивності звичайні 8-бітові мікроконтролери. Найбільш значущі відмінності:

- 32-бітове ядро, що дозволяє виконувати операції з даними шириною 4 байта за 1 такт
- частота процесора (CPU) 84 МГц.
- 96 КБ ОЗУ.
- 512 КБ флеш-пам'яті для зберігання програм.
- контролер DMA, який розвантажує центральний процесор від виконання інтенсивних операцій з пам'яттю.
- Характеристики
- Мікроконтролер AT91SAM3X8E робоча напруга 3,3 В
- Вхідна напруга (рекомендована): 7-12 В
- Вхідна напруга (гранична): 6-20 В
- Цифрові Входи / Виходи: 54 (на 12 з яких реалізується вихід ШІМ)
- Аналогові входи: 12

- Аналогові виходи: 2 (ЦАП)
- Загальний вихідний постійний струм на всіх входах / виходах: 50 мА
- Постійний струм через вивід 3,3 В: 800 мА
- Постійний струм через вивід 5 В: 800 мА
- Флеш-пам'ять: 512 КБ доступно всього для призначених для користувача додатків
- ОЗУ: 96 КБ (два банки: 64 КБ і 32 КБ)
- Тактова частота: 84 МГц

Живлення

Живлення Arduino Due може здійснюватися через USB роз'єм або за допомогою зовнішнього джерела живлення. Вибір джерела живлення виконується автоматично.

Зовнішнім (не USB) джерелом живлення може бути або АС / DC перетворювач («wall wart» - адаптер в одному корпусі з вилкою), або батарея. Адаптер підключається до відповідного роз'єму плати 2,1 мм вилкою з центральним позитивним контактом. Виводи батареї підключаються до контактів Gnd і Vin роз'єму POWER. Плата може функціонувати при зовнішньому живленні від 6 до 20 В. Але якщо напруга живлення опускається нижче 7 В, на виводі 5 В може виявитися менше п'яти вольт, і плата буде працювати нестабільно. Якщо ж подається напруга більше 12 В, може перегрітися стабілізатор напруги, що може призвести до пошкодження плати. Діапазон напруг - від 7 до 12 В.

Нижче перераховані виводи живлення:

VIN - Це вхідна напруга для плати Arduino, коли вона живиться від зовнішнього джерела живлення (на противагу 5 вольт, що надходять через USB з'єднання або від іншого регульованого джерела живлення). Напруга живлення може подаватися на цей вивід, чи зніматися з цього виводу в разі живлення через роз'єм живлення.

5V - Даний вивід служить виходом регульованої напруги 5 В з вбудованого стабілізатора на платі. Сама плата може живитися через роз'єм живлення постійного струму (7-12 В), або через USB роз'єм (5 В), або через вивід VIN на платі (7-12V). Напругу живлення через виводи 5 В і 3,3 В подається в обхід стабілізатора і може пошкодити плату.

3.3V - Живлення 3,3 В, що виробляється вбудованим стабілізатором. Максимальний вихідний струм 800 мА. Стабілізатор також забезпечує живлення мікроконтролера SAM3X.

GND - Земляні виводи.

IOREF - Даний вивід плати Arduino забезпечує опорна напруга, при якій працює мікроконтролер. Вірно сконфігурована плата розширення може зняти напругу на виводі IOREF і обрати відповідне джерело живлення, або дозволити використання вихідних перетворювачів напруги для роботи з 5 В або 3,3 В.

Пам'ять

Флеш-пам'ять SAM3X становить 512 КБ (2 блоки по 256 КБ) для зберігання програм. Завантажувач (бутлодер) записується Atmel при виробництві і зберігається в спеціально відведеному для нього ПЗУ. Доступний обсяг ОЗУ становить 96 КБ в двох суміжних банках - 64 КБ і 32 КБ. Вся доступна пам'ять (флеш-пам'ять, ОЗУ і ПЗУ) може адресуватися безпосередньо як плоский адресний простір.

Існує можливість стерти флеш-пам'ять SAM3X за допомогою вбудованої кнопки стирання. При цьому з мікропроцесора віддалиться поточна завантажена програма. Для стирання натисніть і кілька секунд утримуйте кнопку стирання при ввімкненому живленні плати.

Входи і Виходи

Цифрові входи / виходи: виводи з 0 по 53

Кожен з 54 цифрових виводів Due може використовуватися в якості входу або виходу, за допомогою функцій pinMode (), digitalWrite () і digitalRead

() Виводи працюють від 3,3 В. Кожен вивід може видавати (як джерело) струм 3 мА або 15 мА, в залежності від виводу, або отримувати (як приймач) струм 6 мА або 9 мА, в залежності від виводу. На них також є внутрішні навантажувальні резистори (за замовчуванням вони відключені) номіналом 100 кОм. Крім цього, деяким виводам призначені спеціалізовані функції:

- Послідовна лінія: 0 (RX) і 1 (TX)
- Послідовна лінія 1: 19 (RX) і 18 (TX)
- Послідовна лінія 2: 17 (RX) і 16 (TX)
- Послідовна лінія 3: 15 (RX) і 14 (TX)

Ці виводи використовуються для прийому (RX) і передачі (TX) послідовних даних TTL (з рівнем 3,3 У). Висновки 0 і 1 з'єднані з відповідними виводами послідовного контролера ATmega16U2 USB-to-TTL.

ШІМ: виводи з 2 по 13.

На них реалізується 8-бітний вихід ШІМ за допомогою функції `analogWrite ()`. Роздільну здатність ШІМ можна змінювати, використовуючи функцію `analogWriteResolution ()`.

SPI: роз'єм SPI (роз'єм ICSP на інших платах Arduino).

Дані виводи служать для зв'язку з SPI з використанням бібліотеки SPI. Сигнали SPI виведені на центральний 6-контактний роз'єм, який фізично сумісний з Uno, Leonardo і Mega2560. Роз'єм SPI можна використовувати тільки для зв'язку з іншими пристроями SPI, але не для програмування SAM3X за технологією внутрисхемного послідовного програмування (ICSP). SPI на Due також має розширені функції, доступні при використанні Розширених методів SPI для Due.

CAN: CANRX і CANTX

На цих виводах підтримується протокол зв'язку CAN, але поки його не підтримують програмні інтерфейси (API) Arduino.

"L" LED: 13

Вбудований світлодіод, підключений до цифрового виводу 13. При високому рівні сигналу на даному виводі, світлодіод включається, при низькому - вимикається. Можливо також зменшити яскравість світлодіода, оскільки вивід 13 одночасно є виходом ШІМ.

TWI 1: 20 (SDA) і 21 (SCL)

TWI 2: SDA1 і SCL1

На даних виводах з використанням бібліотеки `Wire` підтримується зв'язок з TWI.

Аналогові входи: виводи з A0 по A11

Плата `Arduino Due` має 12 аналогових входів, кожен з яких може забезпечити розподільну здатність 12 біт (тобто 4096 різних значень). За умовчанням встановлена розподільна здатність 10 біт для сумісності з іншими платами `Arduino`. Дозвіл АЦП можна змінювати за допомогою функції `analogReadResolution ()`. Аналогові входи `Due` проводять вимірювання від рівня землі до максимального значення 3,3 В. Прикладання до цих виводів напруги понад 3,3 В викличе пошкодження кристала `SAM3X`. Функція `analogReference ()` на `Due` ігнорується.

Вивід `AREF` підключений до аналогового виводу опорної напруги `SAM3X` через резисторний міст. Для активації виведення `AREF` необхідно відпаяти з печатної плати резистор `BR1`.

DAC1 і DAC2

На виводах ЦАП `DAC1` і `DAC2` надаються достовірні аналогові виводи з 12-бітовою розподільною здатністю (4096 рівнів) за допомогою функції `analogWrite ()`. Дані виводи можна використовувати для створення аудіовиходу, використовуючи при цьому бібліотеку `Audio`.

Інші виводи:

`AREF`

Опорна напруга для аналогових входів. Використовується з функцією `analogReference ()`.

Reset

За низького рівня на цій лінії відбувається скидання мікроконтролера. Типове застосування виведення Reset - додавання кнопки скидання на плату розширення, яка перекриває цю кнопку на мікроконтролері.

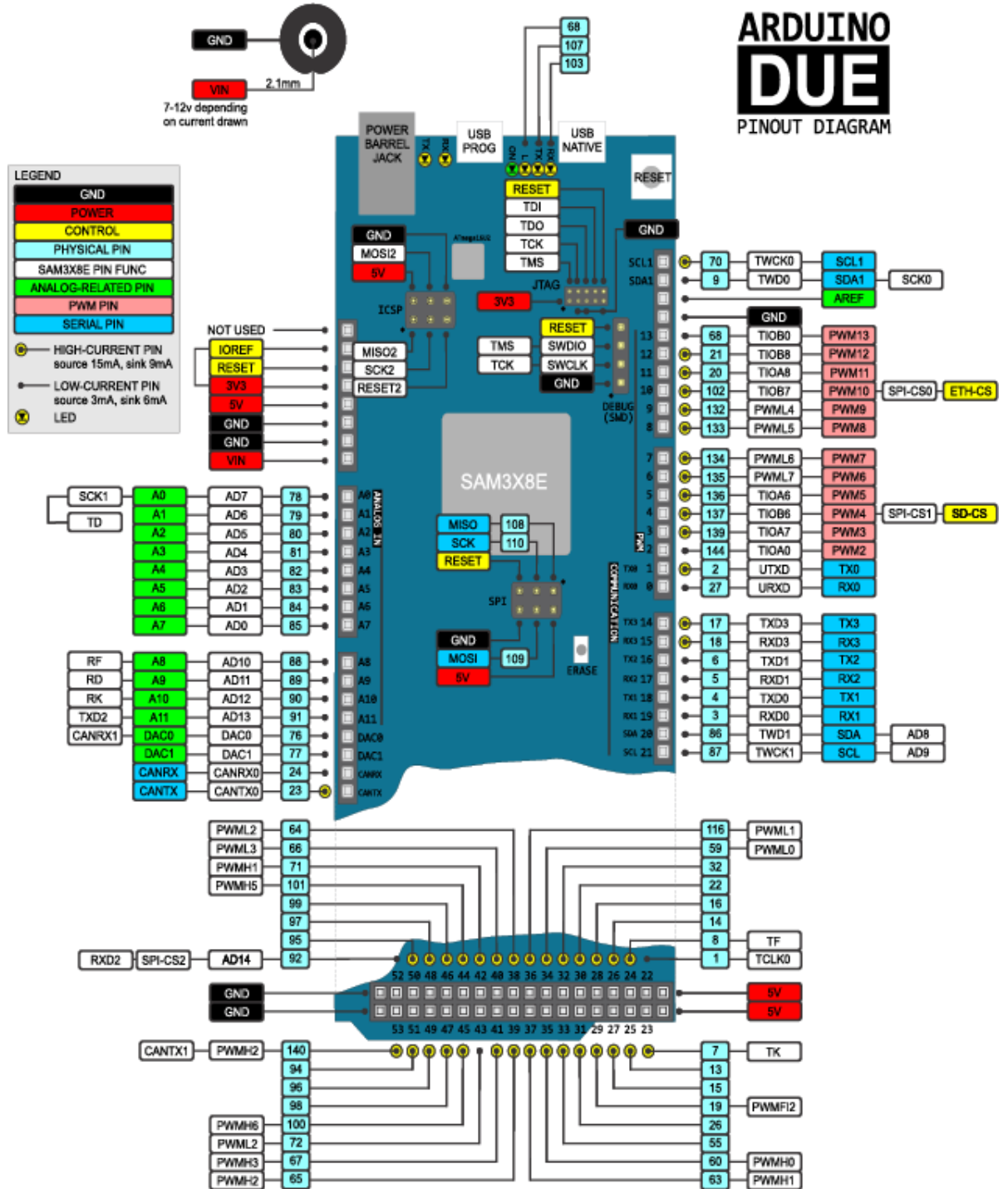


Рис.7 – Діаграма вводів і виводів

Вибір вимірювального пристрою

Основними характеристиками для вибору вимірювального пристрою були: здатність до виміру кута нахилу, доступність та розповсюдженість. Для виконання стенду був обраний модуль GY-521, що має на борту як акселерометр та гіроскоп. Мікросхема MPU6050 є головним елементом модуля. Крім цієї мікросхеми на платі модуля розташована необхідна обв'язка MPU6050, в тому числі підтягуючі резистори інтерфейсу I2C, а також стабілізатор напруги на 3,3 вольт з малим падінням напруги (при живленні вже в 3,3 вольт на виході стабілізатора буде 3 рівно вольт) з фільтруючими конденсаторами. Також на платі розпаяний SMD світлодіод з обмежуючим резистором як індикатор напруги живлення. Розмір плати модуля GY-521 10 x 20 мм.

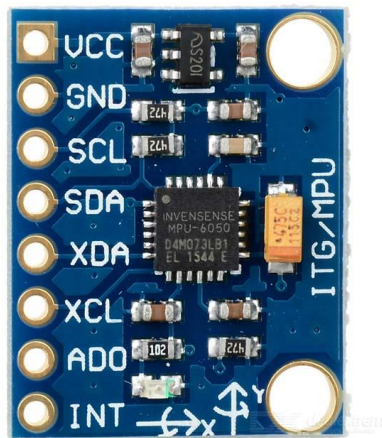


Рис.8 - модуль GY-521

Характеристики

Живлення

- напруга 3,7 - 5,5 В
- струм до 10 мА
- гіроскоп споживає 3,6 мА, в режимі очікування 5 мкА
- акселерометр споживає 350 мкА.

В режимі очікування:

- 10 мкА для 1,25 Гц,
- 20 мкА для 5 Гц,
- 60 мкА для 20 Гц,
- 110 мкА для 40 Гц.

Максимальна частота інтерфейсу I2C складає 400 кГц

Діапазон гіроскопа: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , і ± 2000 градусів в секунду

Діапазон акселерометра: ± 2 , ± 4 , ± 8 і ± 16 g

16 біт виведення даних

Резонансна частота 27 кГц

Шум $0,005$ ° / с / $\sqrt{\text{Гц}}$

Відстань між контактами 2,54 мм

Отвори під гвинт 3 мм

Розміри 20 x 16 мм

Датчики гіроскопа і акселерометра виготовлені як MEMS (мікроелектромеханічна система) - зовнішній вплив на датчик спочатку змінює стан механічної частини, потім зміна стану механічної частини призводить до зміни сигналу електричної частини. Одним словом в одному корпусі зібрано не тільки електроніка, а й механіка. У мікросхемі MPU6050 міститься відразу два MEMS датчика, виробник стверджує, що їх взаємний вплив один на одного зведено до мінімуму.

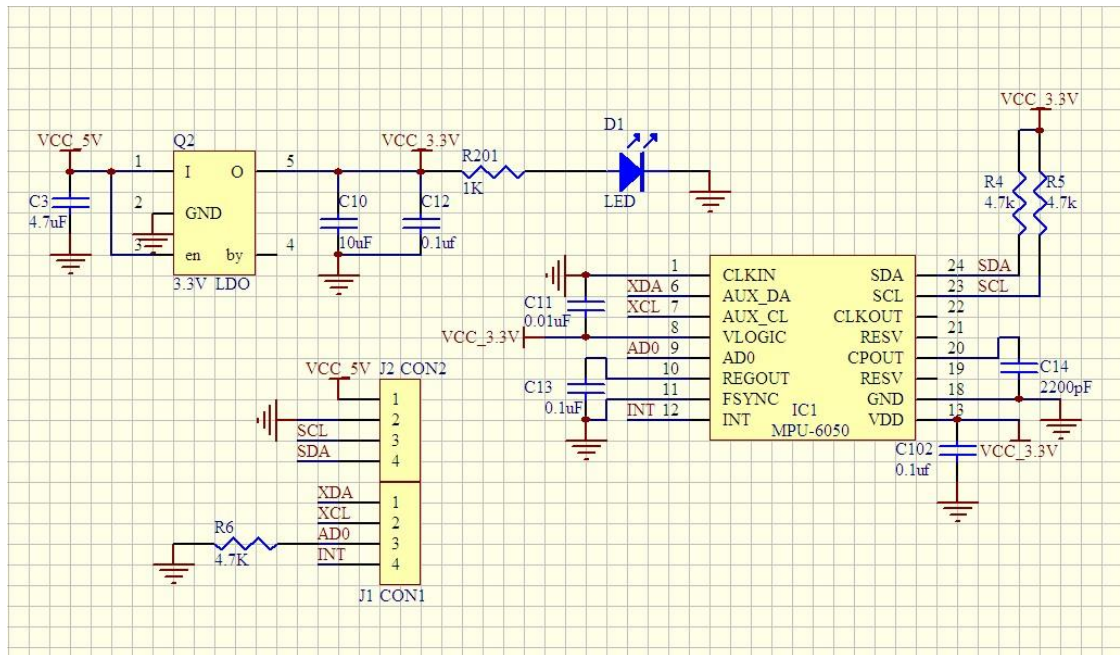


Рис.9 – Принципова схема модуля GY-521

Гіроскоп вимірює кутові швидкості по трьох осях з різними межами вимірювань: 250, 500, 1000, і 2000 градусів в секунду. За допомогою електронного гіроскопа можна визначити положення системи в такий спосіб. При включенні прийняти початкове положення за нульову позицію. Потім опитувати гіроскоп з заданим інтервалом, знаючи інтервал і швидкість обертання, обчислювати зсув і додавати до поточного стану. При цьому ми припускаємо, що між двома опитуваннями датчика система поверталася з постійною швидкістю. Такий підхід веде до неминучого накопиченню помилки. Таким чином, при інтегруванні стану кута положення, також інтегрується і похибка - при тривалому використанні можна отримати вже абсолютно неправильні значення.

Для визначення положення системи можна використовувати тривісний акселерометр. Акселерометр також має налаштування межі вимірювань $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ и $\pm 16g$. Коли ми повертаємо датчик в просторі, показання акселерометра на кожній з трьох осей буде змінюватися в залежності від положення. Так, за допомогою тривісного акселерометра під впливом сили тяжіння можна визначити положення системи. Однак недоліком цього датчика є шум.

Використання окремо акселерометра або окремо гіроскопа не дасть бажаного результату, тільки їх спільне використання із застосуванням фільтрації з урахуванням показань двох датчиків дає прийнятний результат. За початкове положення приймається положення, обчислене на підставі даних акселерометра. Потім через встановлені проміжки часу обчислюються положення на основі даних гіроскопа і положення на основі даних акселерометра. Потім обчислені свідчення зводяться до загального фінального результату. При цьому акселерометр коригує "дрейф" гіроскопа, а гіроскоп згладжує скачки акселерометра при вібраціях і прискореннях.

Хотілося б відзначити, що даний модуль - це недороге і досить гарне рішення при необхідності використання гіроскопа і / або акселерометра, велика кількість налаштувань датчиків дозволить налаштувати їх під будь-які пристрої, малі розміри модуля з легкістю дозволять вбудовувати його в більшість схем.

Вибір модуля керування двигуном.

Для керування двигуном був обраний модуль керування моторами РКР-01А на мікросхемі L298N. З його допомогою можна контролювати обертання двох незалежних колекторних моторів постійного струму (DC-моторів) або одного двохобмоткового крокового двигуна.

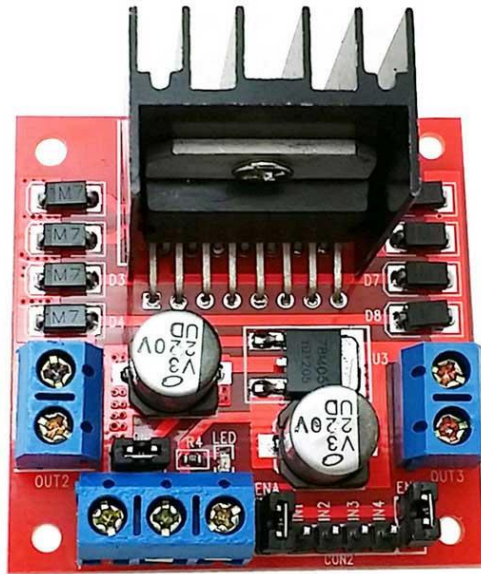


Рис.10 – Контролер двигунів RKP-01A

Плата контролера двигунів RKP-01A завдяки мікросхемі драйвера моторів L298N дозволяє легко керувати двома електромоторами що використовують живлення від 5В до 35В. Встановлений на основну мікросхему L298N радіатор охолодження дозволяє витримувати струм навантаження до 2А на канал. Для захисту драйвера моторів від перевантаження використовуються спеціальні діоди Шоткі. Модуль контролера двигунів дозволяє використовувати його в різних робототехнічних проектах, розміщуючи його на свій розсуд.

Характеристики драйвера моторів RKP-01A на мікросхемі L298N:

- Мікросхема драйвера: L298N (з радіатором охолодження)
- Можливість живлення зовнішньої логіки (V_{ss}): + 5V ~ + 7V (внутрішній стабілізатор +5 В)
- Вхідна напруга логічної частини (V_d): від 6V до 12V
- Вхідна напруга керованої частини (V_s): від + 5V до + 35V
- Робочий струм зовнішньої логічної частини (I_{ss}): 0 ~ 36mA
- Струм навантаження кожної керованої частини (I_o): 2A
- Піковий струм навантаження кожної керованої частини (I_o): 3A

- Максимальна споживана потужність: 20 Вт (при температурі = 75 ° C)
- Високий рівень вхідного сигналу (High): $2.3V = V_{in} = V_{ss}$
- Низький рівень вхідного сигналу (Low): $-0.3V = V_{in} = 1.5V$
- Робоча температура навколишнього середовища: від -25 до + 130 ° C
- Розміри модуля зі стійками кріплення і радіатором L298: 53 x 47 x 27

мм

- Вага драйвера моторів RKP-01A: 35 грам

Для підключення моторів постійного струму (DC-моторів) служать порти:

OUT1 і OUT2 - мотор А

OUT3 і OUT4 - мотор В

(Управління електромоторами повністю незалежно один від одного)

Управління DC-моторами здійснюється через спеціальні входи:

ENA (ENB) - надіта перемикач активує включення каналу управління двигуном.

ENA (ENB) - з'єднати з ШІМ-виходом MCU, для контролю швидкості обертання

I1 (I3) і I2 (I4) - логічні входи (мають відключаються підтягує резистори) завдання напрямку обертання (див. Таблицю нижче)

Таблиця 1 – Таблиця станів двигуна

S	ENA	I1	I2	Стан мотора А
PWM>	0	0	0	Стоп
PWM>	0	0	1	Обертання за годинниковою
PWM>	0	1	0	Обертання проти годинникової
PWM>	0	1	1	Стоп

S	ENB	I3	I4	Стан мотора В
PWM>	0	0	0	Стоп
PWM>	0	0	1	Обертання за годинниковою
PWM>	0	1	0	Обертання проти годинникової
PWM>	0	1	1	Стоп

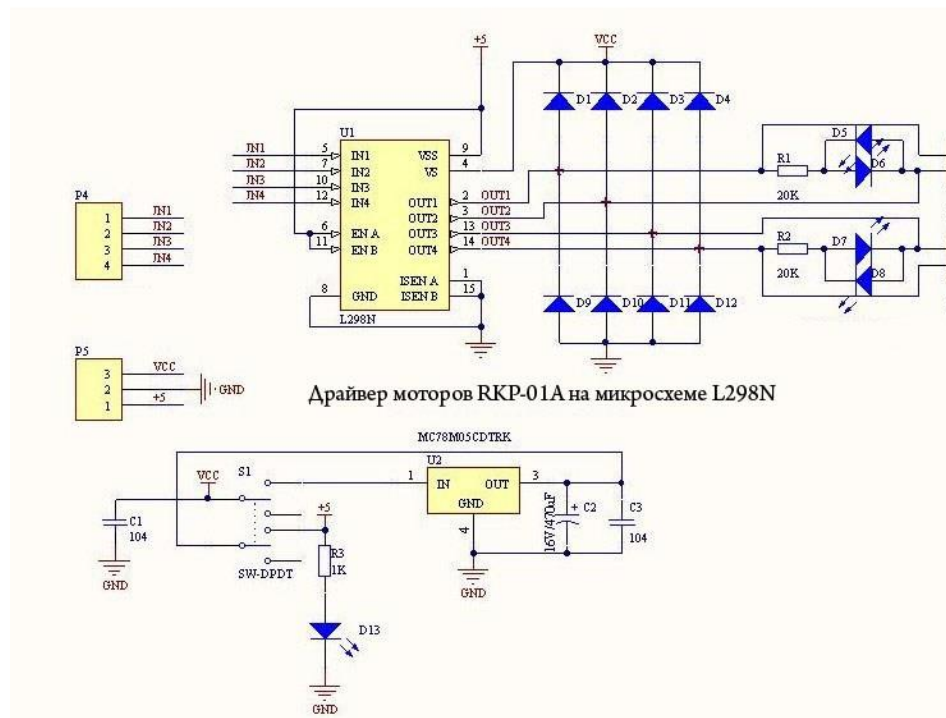


Рис.11 – Принципова схема контролера двигунів RKP-01A

Серед переваг даного модуля слід відмітити доступність та здатність керувати напругою більше 5В, а серед недоліків – великі габарити.

Вибір елементів живлення.

Двигуни постійного струму, споживають струм більше ніж може видати Arduino. Також вони створюють небезпечні викиди напруги. Для цього необхідно ізолювати двигун постійного струму від плати Arduino і живити його через окреме джерело живлення. Номінальна напруга двигуна складає 12В, тому був обраний імпульсний блок живлення на 12 В від мережі живлення 220В.



Рис.12 – Імпульсний блок живлення

Технічні характеристики адаптера 12V 2 A:

Колір чорний

Захист від короткого замикання і перевантаження (перегріву).

Матеріал: пластик, на засувках закритого типу, без вентиляційних отворів.

Вхідна напруга 100-240В

Вихідна напруга: 12В

Час виходу на номінальну потужність: 1 секунда

Вихідний струм: 2А

Штекер 5x2,1 мм

Довжина кабелю: 90см

Вага: 60г

Розмір: 40 * 75 * 27мм

Схема керування в свою чергу може житися від спеціального виводу 5В на драйвері для керування двигуном або від порту USB.

3. СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ВИМІРЮВАННЬ СИГНАЛІВ ТА
КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.

Алгоритм вимірювання кута нахилу

Оскільки акселерометр або гіроскоп дають не досить точні виміри і велику похибку, їх показники будуть поєднуватись та пропускатись через фільтр. Завдання розпізнавання руху пристроєм накладає одну суттєву вимогу до фільтру - вимогу продуктивності достатню для того, щоб використовувати фільтр в режимі реального часу з мінімальними затримками. Звичайно, великою перевагою фільтра є наближеність значень до початкового.

Для фільтрування таких вимірів використовують фільтри середніх значень, фільтр низьких частот, фільтр Калмана тощо. Усі фільтри без додаткових модифікацій крім останнього фільтру мають помітну затримку, особливо при різкому коливанні значень. Запропонована система потребує більш точних вимірів, тому для виконання поставлених задач було обрано фільтр Калмана.

Застосування фільтра Калмана в каналі зворотного зв'язку.

Фільтр Калмана часто використовується для фільтрації значень різного роду

сигналів, його можна зустріти в GPS-приймачах, обробниках показників датчиків і т.д. Фільтр Калмана є різновидом рекурсивних фільтрів. Для обчислення оцінки стану системи на поточний етап роботи йому необхідна оцінка стану (у вигляді оцінки стану системи і оцінки похибки визначення цього стану) на попередньому кроці роботи і вимірювання на поточному кроці.

Алгоритм

Позначимо за x_k величину, яку ми будемо вимірювати, а потім фільтрувати. Знаючи напрямок руху можна припустити, як зміниться координата в наступний момент u_k .

Тоді координата буде змінюватися за законом:

$$x_{k+1} = x_k + u_k; \quad (3.1)$$

У реальному ж житті ми не можемо врахувати в наших розрахунках маленькі збурення, що діють на тіло, тому справжня координата буде

відрізнятися від розрахункової. До правої частини написаного рівняння додається випадкова величина b_k

$$x_{k+1} = x_k + u_k + b_k; \quad (3.2)$$

У нас є встановлений сенсор, який намагається міряти справжню координату, і, звичайно ж, не може її поміряти точно, а міряє з помилкою n_k , яка є теж випадковою величиною. У підсумку з сенсора ми отримуємо помилкові дані:

$$z_k = x_k + n_k; \quad (3.3)$$

Завдання полягає в тому, що, знаючи невірні показання сенсора, знайти хороше наближення для істинної координати. Це наближення ми будемо позначати як x_k^{opt} .

Ми знаємо рівняння, яке контролює зміну нам невідомої координати тому, ще не отримуючи значення з сенсора, ми можемо припустити, що на кроці $k+1$ система еволюціонує відповідно до цього закону і сенсор покаже щось близьке до $x_k^{opt} + u_k$. На жаль, поки ми не можемо сказати нічого більш точного. З іншого боку, на етапі до $k+1$ у нас на руках буде неточне показання сенсора z_{k+1} .

Ідея Калмана полягає в тому, що щоб отримати найкраще наближення до істинної координати x_{k+1} , ми повинні вибрати золоту середину між показанням неточного сенсора z_{k+1} і $x_k^{opt} + u_k$ - нашим прогнозом того, що ми очікували від нього побачити. Показання сенсора ми дамо вагу K , а на передбачене значення залишиться вага $(1-K)$:

$$x_{k+1}^{opt} = K \cdot z_{k+1} + (1-K) \cdot (x_k^{opt} + u_k); \quad (3.4)$$

Коефіцієнт K називають коефіцієнтом Калмана. Він залежить від кроку ітерації, тому правильніше було б писати K_{k+1} , але щоб не захарашувати формули розрахунках, ми будемо опускати його індекс.

Ми повинні вибрати коефіцієнт Калмана K таким, щоб отримане оптимальне значення координати x_{k+1}^{opt} було б найближче до істинної координати x_{k+1} . Наприклад, якщо ми знаємо, що наш сенсор дуже точний, то ми будемо більше довіряти його показанням і дамо значенню z_{k+1} більше ваги (близько до одиниці). Якщо ж сенсор, навпаки, зовсім не точний, тоді більше будемо орієнтуватися на теоретично передбачене значення $x_k^{opt} + u_k$.

Для програмування мікроконтролера будемо використовувати буде використовуватися середовище для програмування Arduino IDE, серед переваг якого слід виділити велику кількість готових бібліотек, у тому числі і для використання фільтру Калмана

Послідовність написання програмного коду:

Підключаємо бібліотеки для обладнання, що використовується:

```
#include <Wire.h>
```

```
#include "Kalman.h"
```

Визначаємо змінні

```
Kalman kalmanX;
```

```
Kalman kalmanY;
```

```
uint8_t IMUAddress = 0x68; // адреса регістру даних в вимірювачі
```

```
/* IMU Data */
```

```
int16_t accX;
```

```
int16_t accY;
```

```
int16_t accZ;
```

```
int16_t tempRaw;
```



```

int16_t gyroX;
int16_t gyroY;
int16_t gyroZ;
double accXangle; // Значення кута визначеного акселерометром
double temp;
double gyroXangle = 180; // Значення кута визначеного гіроскопом
double kalAngleX; // // Значення кута визначеного з використанням
фільтру Калмана
uint32_t timer;

```

Встановлення початкових налаштувань

```

void setup()
{
Wire.begin();
Serial.begin(9600);
i2cWrite(0x6B, 0x00); // Відключення режиму сну
kalmanX.setAngle(180); // Встановлення початкового кута
timer = micros(); }

```

Цикл програми

```

void loop() {
/* Оновлення усіх величин */
uint8_t* data = i2cRead(0x3B,14);
accX = ((data[0] << 8) | data[1]);
accY = ((data[2] << 8) | data[3]);
accZ = ((data[4] << 8) | data[5]);
tempRaw = ((data[6] << 8) | data[7]);

```

```

gyroX = ((data[8] << 8) | data[9]);
gyroY = ((data[10] << 8) | data[11]);
gyroZ = ((data[12] << 8) | data[13]);

```

/ Розрахунок кута з використанням усіх датчиків і алгоритму */*

```
accXangle = (atan2(accY, accZ) + PI) * RAD_TO_DEG;
```

```
double gyroXrate = (double)gyroX / 131.0;
```

```
gyroXangle += kalmanX.getRate() * ((double)(micros() - timer) / 10000); //
```

Розрахунок кута гіроскопом з використанням зсуву

```
kalAngleX = kalmanX.getAngle(accXangle, gyroXrate, (double)(micros() -
timer) / 10000); // Розрахунок кута з використанням фільтру Калмана
```

```
timer = micros();
```

```
}
```

Допоміжні функції для роботи з регістрами

```
void i2cWrite(uint8_t registerAddress, uint8_t data)
```

```
{
```

```
Wire.beginTransmission(IMUAddress);
```

```
Wire.write(registerAddress);
```

```
Wire.write(data);
```

```
Wire.endTransmission(); // Send stop
```

```
}
```

```
uint8_t* i2cRead(uint8_t registerAddress, uint8_t nbytes)
```

```
{
```

```
uint8_t data[nbytes];
```

```
Wire.beginTransmission(IMUAddress);
```

```
Wire.write(registerAddress);
```

```
Wire.endTransmission(false); // Don't release the bus
```

```
Wire.requestFrom(IMUAddress, nbytes); // Send a repeated start and then  
release the bus after reading  
for(uint8_t i = 0; i < nbytes; i++)  
    data [i]= Wire.read();  
return data;  
}
```

На основі отриманих вимірювань була побудована діаграма

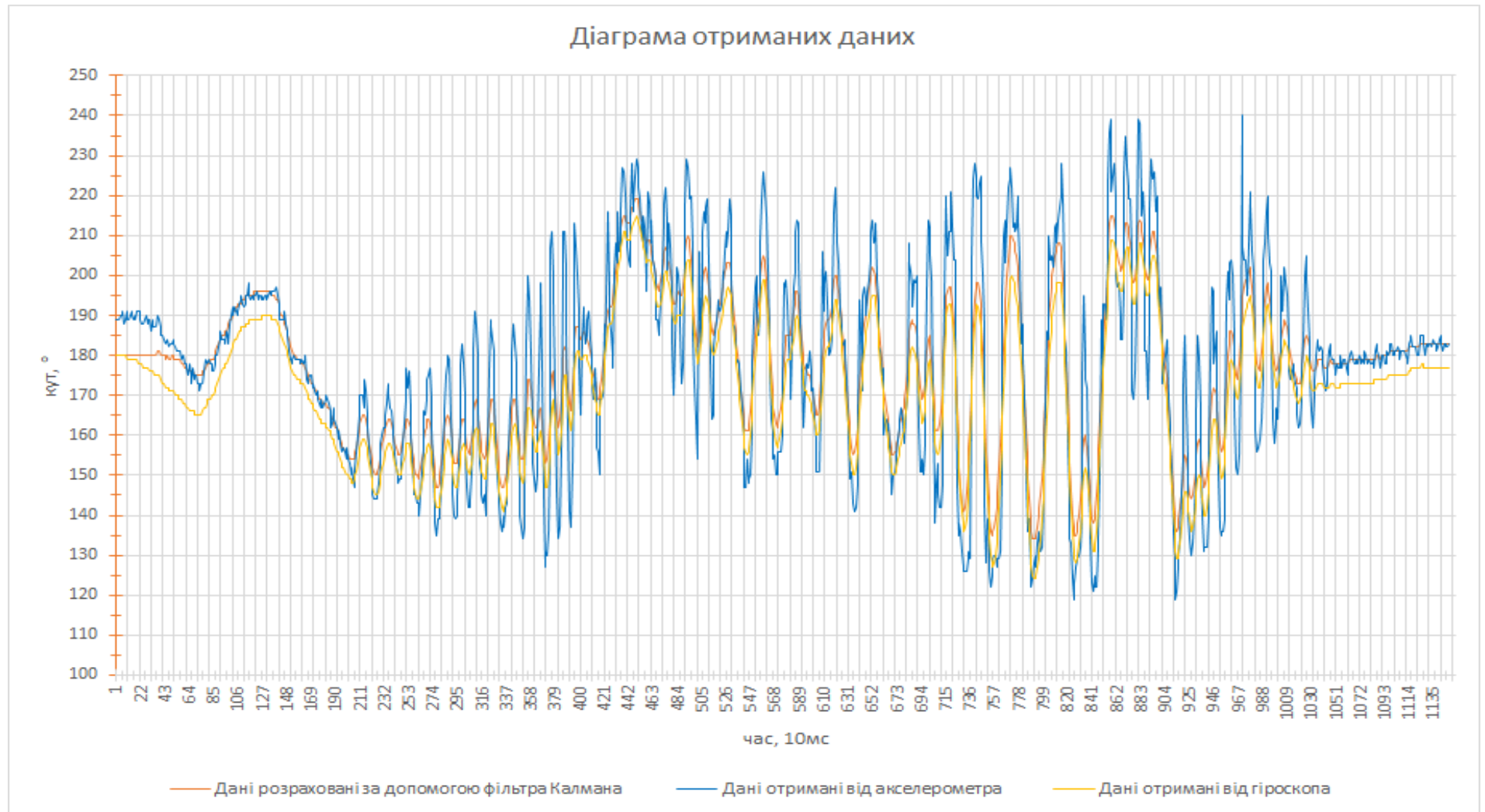


Рис.13 – Діаграма вимірювання кута нахилу.

Алгоритм керування двигуном

Керування двигуном здійснюється за допомогою драйвера двигуна на базі мікросхеми L298N, яка в свою чергу здійснює керування по принципу роботи Н-моста для того, щоб мати можливість керувати обмоткою двигуна і змусити його вал обертатися в різні сторони. У мікросхемі міститься два Н-моста, виконаних на потужних транзисторах, а також логіка сумісна з TTL.

Додамо наступні функції керування станами двигуна:

- Обертання проти годинникової стрілки

```
void left()
{
  digitalWrite(in1, HIGH);
  digitalWrite(in2, LOW);
  analogWrite(enA, 255);
}
```

- Обертання за годинниковою стрілкою

```
void right()
{
  digitalWrite(in1, LOW);
  digitalWrite(in2, HIGH);
  analogWrite(enA, 255);
}
```

- Зупинка двигуна

```
void stop()
```

```
{  
  analogWrite(enA, 0);  
}
```

Та додамо умови керування в циклі програми:

```
if (kalAngleX > 185)  
{  
  right();  
  stp();  
  delay(500); //для повної зупинки двигуна  
}  
else  
{  
  if (kalAngleX < 175)  
  {  
    left();  
    stp();  
    delay(500);  
  }  
  else  
  {  
    stp();  
  }  
}
```

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було запроектовано та зібрано стенд керування рівновагою перевернутого маятника.

У першому розділі були розглянуті загальні принципи утримання рівноваги та порядок керування системою рівноваги.

У другому розділі дипломної роботи була виконана розробка стенду, підбір обладнання, а також збірка стенду.

У третьому розділі були розглянуті способи та алгоритми роботи з обладнанням а також розробка алгоритму керування системою. Для керування такою системою може бути застосований релейний регулятор положення, а для фільтрації сигналу зворотного зв'язку може використовуватись фільтр Калмана.

Після завантаження програми до мікроконтролера та її вілагодження можна зробити висновки, що принцип роботи стенду можна вважати підтвердженим. Відповідно до вибраного обладнання та конструкції можна зробити наступні висновки:

- Діапазон регулювання кута нахилу системи – від 175° до 185° ;
- Зміна швидкості двигуна має суттєвий вплив на покази вимірювального пристрою;
- Потужності мікроконтролера достатньо для виконання поставленої задачі.

Для системи керування рівновагою можна виставити наступні рекомендації:

- Для регулювання у більшому діапазоні кутів необхідно обрати більш потужний двигун;
- Для створення достатнього імпульсу необхідно встановити на двигун маховик з більшою масою рівномірно розподіленою по краях;
- Для отримання більш точних показів датчиків необхідна механічна розв'язка між двигуном, та частиною, відповідальною за виміри;
- Використовувати електромеханічне гальмування замість електричного.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nonlinear Analysis and Control of a Reaction Wheel-based 3D Inverted Pendulum [Текст], in Proc. Conference on Decision and Control, 2013 Florence, Italy / M. Muehlebach, G. Mohanarajah, and R. D'Andrea.
2. Nonlinear Analysis and Control of a Reaction-Wheel-Based 3-D Inverted Pendulum [Текст] , in IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016 (early access) / M. Muehlebach, R. D'Andrea.
3. The Cubli: A Cube that can Jump Up and Balance [Текст] / in Proc. IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robots and Systems, October 2012 Algarve, Portugal / M. Gajamohan, M. Merz, I. Thommen, and R. D'Andrea. – pp. 3722-3727.
4. The Cubli: A Reaction Wheel-based 3D Inverted Pendulum [Текст] , in Proc. European Control Conference, July 2013 Zurich, Switzerland / M. Gajamohan, M. Muehlebach, T. Widmer, and R. D'Andrea. – pp. 268-274.
5. Бабенко, А. Є. Вплив гіроскопічних ефектів на коливання валу центрифуги / А. Є. Бабенко, Я. І. Лавренко, М. М. Куренков // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Сер. : Машинобудування. - 2012. - № 65. - С. 166-174.
6. Беляев, С.А. Современные подходы к решению задачи стабилизации перевернутого маятника [Текст] / С. А. Беляев, А. Г. Михнович. – Программные продукты, системы и алгоритмы. – 2017. – №2. –С. 1-9.
7. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – С. 320: ил.216-239.

8. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины [Текст] / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – С. 753-760.
9. Лекции по динамике [Электронный ресурс] : Электронный учебный курс для студентов оч. и заоч. форм обучения / сост. : Каримов И. – Режим доступа \www/ URL: <http://www.teoretmech.ru/dinamika9.htm>. – Гироскопы.
10. Угловой момент закон сохранения [Электронный ресурс] / Физические величины и понятия. – Режим доступа \www/ URL: <http://www.physicalsystems.org/index07.02.9.0.html> – 20.01.2016. – Закон сохранения углового момента.
11. Физический практикум. Момент инерции : учеб.-метод. пособие для студентов естественных факультетов / сост. : А. А. Игнатъев, Л. Л. Страхова, С. П. Кудрявцева, Т. Н. Тихонова ; под ред. проф. А. А. Игнатъева. – 2-е изд. перераб. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2005. – 40 с.
12. Фильтр Калмана [Электронный ресурс] / Хабрхабр. – Режим доступа : \https/ URL: <https://habrahabr.ru/post/166693/> – 19.02.2013. – Фильтр Калмана.

ДОДАТКИ

Код програми

```
#include <Wire.h>
#include "Kalman.h"
Kalman kalmanX;
Kalman kalmanY;
uint8_t IMUAddress = 0x68;
/* IMU Data */
int var;
int spd;
int16_t accX;
int16_t accY;
int16_t accZ;
int16_t tempRaw;
int16_t gyroX;
int16_t gyroY;
int16_t gyroZ;
double accXangle; // Расчет угла акселерометром
double temp;
double gyroXangle = 180; // Расчет угла гироскопом
double kalAngleX; // Расчет угла с использованием фильтра Калмана
uint32_t timer;
int enA = 10;
int in1 = 9;
int in2 = 8;
int b = 0;
void setup() {
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
  i2cWrite(0x6B, 0x00); // Отключение спящего режима
  kalmanX.setAngle(180); // Установка начального угла
```

```

timer = micros();
pinMode(enA, OUTPUT);
pinMode(in1, OUTPUT);
pinMode(in2, OUTPUT);
}
void loop() {
  uint8_t* data = i2cRead(0x3B, 14);
  accX = ((data[0] << 8) | data[1]);
  accY = ((data[2] << 8) | data[3]);
  accZ = ((data[4] << 8) | data[5]);
  tempRaw = ((data[6] << 8) | data[7]);
  gyroX = ((data[8] << 8) | data[9]);
  gyroY = ((data[10] << 8) | data[11]);
  gyroZ = ((data[12] << 8) | data[13]);
  /* Расчет углов с использованием всех датчиков и алгоритма */
  accXangle = (atan2(accY, accZ) + PI) * RAD_TO_DEG;
  double gyroXrate = (double)gyroX / 131.0;
  gyroXangle += kalmanX.getRate() * ((double)(micros() - timer) / 1000000); // Расчет угла гироскопом с
использованием смещения
  kalAngleX = kalmanX.getAngle(accXangle, gyroXrate, (double)(micros() - timer) / 1000000); // Расчет
угла с использованием фильтра Калмана
  timer = micros();
  Serial.println();
  Serial.print("Xkal:");
  Serial.print(kalAngleX, 0);
  Serial.print(" ");
  Serial.print("b:");
  Serial.print(b);
  Serial.print(" ");
  if (kalAngleX > 185)
  {
    b++;
  }
}

```

```
right();
if (b > 50)
{
    stp();
    delay(700);
    b = 0;
}
}
else {
    if (kalAngleX < 175)
    {
        b++;
        left();
        if (b > 50)
        {
            stp();
            delay(700);
            b = 0;
        }
    }
    else
    {
        stp();
    }
}
}

void i2cWrite(uint8_t registerAddress, uint8_t data) {
    Wire.beginTransmission(IMUAddress);
    Wire.write(registerAddress);
    Wire.write(data);
}
```

```
Wire.endTransmission(); // Стоп
}
void left()
{
  digitalWrite(in1, HIGH);
  digitalWrite(in2, LOW);
  analogWrite(enA, 255);
}
void right()
{
  digitalWrite(in1, LOW);
  digitalWrite(in2, HIGH);
  analogWrite(enA, 255);
}
void stp()
{
  // выключаем двигатели
  analogWrite(enA, 0);
}
uint8_t* i2cRead(uint8_t registerAddress, uint8_t nbytes) {
  uint8_t data[nbytes];
  Wire.beginTransmission(IMUAddress);
  Wire.write(registerAddress);
  Wire.endTransmission(false); // Don't release the bus
  Wire.requestFrom(IMUAddress, nbytes); // Send a repeated start and then release the bus after reading
  for (uint8_t i = 0; i < nbytes; i++)
    data [i] = Wire.read();
  return data;
}
```