

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет  
Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Надія Бурау

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## **Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології»**

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно інтегровані технології та системи навігації і керування»

**на тему: «Керована модель нестійкого маятника»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПГ-61

Федоров Артур Костянтинович \_\_\_\_\_

Керівник: доцент кафедри ПСОН, к.т.н., доцент

Мироненко Павло Степанович \_\_\_\_\_

Консультант \_\_\_\_\_

Рецензент:

Ст. викл., к.т.н. Таранов В.В. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультет**  
**Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології

Освітньо-професійна програма Комп'ютерно інтегровані технології та системи навігації і керування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Надія Бурау

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ

**на дипломний проєкт студенту**  
**Федорову Артуру Костянтиновичу**

1. Тема проєкту «Керована модель нестійкого маятника»,  
керівник проєкту Мироненко Павло Степанович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_
2. Термін подання студентом проєкту 09.06.2020р
3. Вихідні дані до проєкту : об'єкт дослідження - нестійкий маятник на рухомій платформі; розробка системи стабілізації : вимірювального блоку та керованої рухомої платформи. Виготовлення діючого макету та демонстрація його дії (відео). \_\_\_\_\_
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Огляд схем побудови управлінням нестійкими об'єктами. Вибір кінематичної схеми керованої моделі. Вибір елементної бази та створення системи керування. Комп'ютерне моделювання руху керованої моделі. Висновки
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 3D моделі системи , його вузлів і деталей. Ілюстративний матеріал презентації.

## 6. Консультанти розділів проєкту\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 17.03.2020 р.

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Підготовка та обробка матеріалу	25.03.2020	
2	Складання механічної частини	12.04.2020	
3	Написання теоретичної частини	26.04.2020	
4	Підготовка електричної частини	25.05.2020	

Студент

Артур Федоров

Керівник

Павло Мироненко

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ХХХХ. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	115	
3	A1	ДП ХХХХ. 01.000 ТК		1	
4	A1	ДП ХХХХ. 02.000 ТК		1	
5	A1	ДП ХХХХ. 03.000 ТК		1	
6	A1	ДП ХХХХ. 04.000 ТК		1	
7	A1	ДП ХХХХ. 05.000 ТК		1	
8	A1	ДП ХХХХ. 06.000 ТК		1	
9	A1	ДП ХХХХ. 07.000 ТК		1	

				<b>ДП ХХХХ 00.000.00</b>		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.				Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.					1	1
Консуьлт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПБФ Гр. ПГ-61	

Пояснювальна записка до дипломного проекту  
на тему: «Керована модель нестійкого маятника»

Зміст	
Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	10
1.1.Огляд об'єктів керування .....	
1.2 Нестійка модель літака .....	11
1.3. Подвійний перевернутий маятник .....	12
1.4 Загальні відомості про управлінні нестійкими об'єктами .....	13
1.5. Нестійкий маятник як об'єкт управління.....	14
1.6. Математична модель об'єкта управління .....	17
Розділ 2. МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТІЙКОГО МАЯТНИКА .....	26
2.1. Опис установки і складових частин .....	29
2.2 Вимірювальний пристрій .....	34
2.3 Плата керування .....	38
2.4 Драйвер двигуна.....	39
2.5. Код програми дослідження .....	45
Висновки .....	51
Література .....	52

## Вступ

Мета даної роботи - реалізація оптимального управління платформою з одноланковим нестійким маятником на основі загальнодоступних компонентів і модулів.

Дана мета потребує вирішення наступних завдань:

- 1) побудови і дослідження математичної моделі системи, що дозволяє стабілізувати перевернутий маятник на платформі за мінімально можливий час;
- 2) проектування і виготовлення системи платформа - маятник, розроблення комутаційних зв'язків між усіма модулями і мікроконтролерами;
- 3) створення програмного забезпечення для мікроконтролерів.

Для виконання поставлених завдань та досягнення мети цього дипломного проекту були використані аналітичні методи.

Практична значимість роботи полягає в дослідженні можливостей мікроконтролерів, датчиків та виконуючих елементів для реалізації поставленої задачі.

В проекті виконано синтез модального і оптимального регуляторів, спостерігача стану, проведено порівняльне дослідження роботи двох регуляторів. Сферою застосування таких об'єктів є електротехнічна промисловість, робототехніка, літакобудування, будівництво. Розроблені моделі керування дозволяють утримувати маятник в початковому положенні рівноваги при початковому відхиленні до 12 градусів за допомогою одного керуючого елемента.

На сьогоднішній день конструкції різних нестійких об'єктів знайшли широке застосування в різних областях. Наприклад, сучасний індивідуальний засіб пересування «Segway» створено саме за принципом зворотного маятника. Якщо раніше такі маятники використовувались лише в якості одного з

центральных компонентів сейсмометрів, то зараз вони застосовуються в літакобудуванні, будівництві висотних будівель і плавучих нафтовидобувних платформах, а також в робототехніці. П'ята за висотою будівля у світі «Тайбей 101» має в своїй конструкції сферичний маятник, який повертає всю будівлю в стійке положення навіть при найсильніших землетрусах.

Побудова системи управління перевернутим маятником включає розробку регулятора стану з подальшою оптимізацією параметрів об'єкта управління. В якості регулятора стану розглядається модальний регулятор. Таке керування відноситься до корневих методів синтезу лінійних САУ, тобто, виходячи із заданих (бажаних) і необхідних показників якості управління, будується бажаний характеристичний поліном та визначається місце розташування коренів характеристичного рівняння.

При малих відхиленнях маятника лінійний регулятор стану забезпечує стійкість положення рівноваги. Варто відзначити, що при використанні в якості регулятора стану оптимального регулятора, процеси в системі аналогічні тим, що відбуваються в ході використання модального регулятора.

Для поліпшення цих показників можлива побудова і оптимізація нечіткого регулятора за допомогою засобів математичного пакета MatLAB. Процедура навчання такого регулятора еквівалентна навчанню адаптивної нейронної мережі і проводиться за допомогою гібридного алгоритму зворотного поширення помилки та методу найменших квадратів на основі числового набору вхідних і вихідних даних, об'єднаних в єдину базу даних.

Отримавши відповідний набір числових вхідних і вихідних даних, можна здійснити моделювання системи управління з регулятором стану в програмі MatLAB Simulink, імітуючи різні режими роботи системи шляхом зміни параметрів об'єкта управління та провести оптимізацію параметрів системи на основі законів модального або оптимального управління.

При побудові регуляторів для нестійкого маятника в дипломному проекті використовуються методи модального і оптимального регулювання та розв'язуються задачі:

- створення математичної моделі системи нестійкого маятника на платформі, а саме отримання диференціальних рівнянь руху першої (маятник) і другої (платформа) ланок системи;

- розробка комп'ютерної моделі нестійкого маятника в середовищі MATLAB Simulink з метою подальшого дослідження стійкості системи і аналізу спостережливості та керованості об'єкта управління;

- синтез модального регулятора і спостерігача стану;

- синтез оптимального регулятора.

В першому розділі даної роботи розглянута математична модель нестійкого маятника.

Другий розділ присвячено синтезу модального і оптимального регуляторів, а також спостерігача системи.

В висновках представлені загальні результати виконання даного проекту, висновки щодо використаних методів регулювання, рекомендації відносно їх застосування та перспективи розвитку теми даного проекту.

Використання даних систем можливо у багатьох сферах техніки. В першу чергу - у робототехніці: механізми, в основі яких лежить схема нестійкого маятника, що потребує стабілізації.

До них можна віднести використання:

- роботів - офіціантів - запрограмованих машини, що роблять набагато менше помилок при обслуговуванні;

- роботів у військовій сфері (стабілізація зброї, розвідка);

- у кінематографі (стабілізація та керування кінокамерами);

- у будівництві, яке вийшло на інші висоти завдяки маятниковим системам, що можуть компенсувати дію землетрусів та вітрових навантажень.[7]

## РОЗДІЛ 1. МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 1.1. Огляд об'єктів керування

В техніці існує багато об'єктів, які, при відсутності управління, нестійкі.

Як приклад, можна привести пристрій "Segway" (рис.1.1) який, разом з пасажиром, представляє собою нестійкий маятник на колісній парі. Велика частина ланок будь-якого крокуючого механізму (наприклад, двоногого робота), так само як і людини, являється нестійким об'єктом. До подібних об'єктом можна віднести і літальні апарати зі зміщенням вперед центром тяжіння. Такий літаючий засіб без спеціального керування не може бути маневреним. Для збільшення необхідної маневреності, в ряді випадків, доводиться зменшувати запас стійкості апарата, а іноді навіть виходити в область нестійкості.



Рис.1.1 – Segway - одновісний електричний транспортний засіб

Часто проблема стабілізації потрібного режиму роботи виникає при конструюванні нестійких систем на магнітному або електростатичному підвісі. Інколи, об'єкт задовольняє всім висунутим до нього критеріям стійкості без використання управління і є стійким. Тоді задача системи управління в цьому випадку - покращення якості перехідних процесів, виникаючих при відхиленнях об'єкта від бажаного режиму під впливом зовнішніх збурень. Якщо при відсутності управління режим роботи нестійкий, то перед системою керування більш пріоритетною буде завдання стабілізації бажаного режиму. У такому випадку реалізувати потрібно в першу чергу режим стійкого функціонування об'єкта, а завдання поліпшення якості перехідних процесів відсувається на другий план.

## 1.2 Нестійка модель літака

Нестійкий літак- це літак, який, будучи виведений з усталеного режиму польоту будь-якої сторонньою силою, сам, без допомоги органів управління, в початковий режим польоту не повертається (рис. 1.2).

У польоті літак знаходиться під постійним впливом різних збурень, пов'язаних, в першу чергу, з переміщенням повітряних мас в атмосфері. Ці збурення прагнуть вивести літак з рівноваги і змінити режим польоту. За таких умов завдяки стійкості спрощується пілотування літаком, і літак зберігає заданий режим польоту і парирує виникаючі збурення самостійно. В стійкому літаку центр тиску розташовується ближче до хвоста, ніж центр ваги; за рахунок цього і відбувається стабілізація. Літак буде нестійким, якщо центр тиску розташовується ближче до носа, ніж центр ваги. В цьому випадку проводиться синтез коригувальних пристроїв, здатних стабілізувати нестійкий літак і дає можливість при необхідності виконувати складні фігури вищого пілотажу.[6]



Рис.1.2- Не стійкий літак МІГ-29

### 1.3. Подвійний перевернутий маятник

Подвійний нестійкий маятник - це маятник з двома нестійкими ланками (Рис 1.3). Звісно, у подвійному перевернутому маятнику центри мас окремих ланок вищі ніж точка опору об'єкту.

Існує два основних способи управління подвійним нестійким маятником : рухаючи платформу, так як і у випадку з одноланковим нестійким маятником, або шляхом використання додаткового керуючого крутного моменту в шарнірі повороту між двома ланками. Схема дослідження стійкості такого маятника складніша, але метод дослідження такий же, як і у випадку з одноланковим маятником[10].

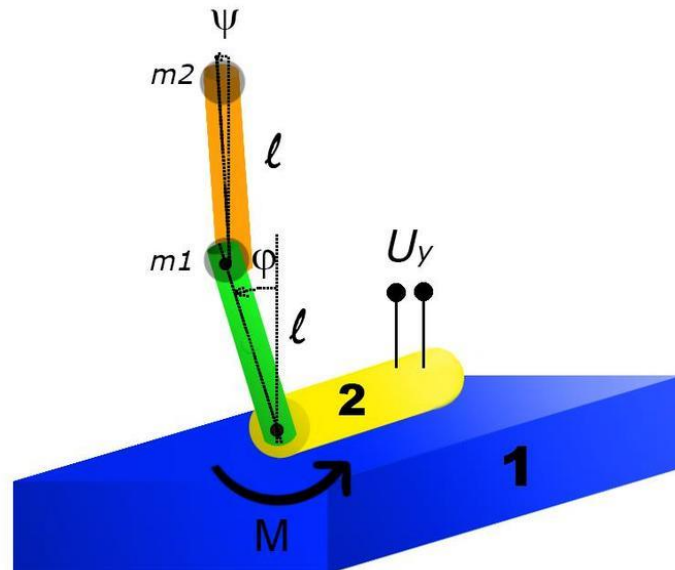


Рис.1.3 - Схема дволанкового нестійкого маятника

#### 1.4 Загальні відомості про управління нестійкими об'єктами

Можливість управління нестійкими об'єктами теоретично розглядається вже протягом декількох десятиків років, але практичне значення набуло недавно. Справа в тому, що нестійкі об'єкти управління, якщо ними правильно керувати, мають ряд корисних якостей, в тому числі і швидкодію.

По мірі підвищення надійності систем управління в техніці все більш широке застосування знаходять нестійкі, у відсутності управління, об'єкти.

Підхід вивчення властивостей систем управління нестійкими об'єктами краще здійснювати на відносно простих прикладах, одним з яких є класичний зворотний маятник.

У багатьох програмах моделювання фізичних і технічних об'єктів і їх систем управління містять найпростіші приклади опису роботи нестійкого маятника. Нижче наведено рішення задачі моделювання та дослідження поведінки такого маятника і синтез системи управління ним.

Технічні об'єкти і системи в залежності від їх призначення за відсутності управління ними можуть бути як стійкими, так і нестійкими. Наприклад, пасажирський літак проектується згідно з вимог максимальної безпечності. Отже

літаки під час відсутності управління повинні бути стійкими. Так, при зменшенні швидкості польоту до того, як літак зайде в штопор, його ніс опускається і швидкість збільшується. Таким чином, зберігається стабільне положення літака в просторі.

Літаки-винищувачі проектуються в першу чергу для ведення повітряного бою, тому одним із його найважливіших характеристик являється маневреність. Вона досягається шляхом наближення властивостей винищувача до межі стійкості і навіть з переходом через неї. У цьому випадку завдання підтримки винищувача в стійкому стані вже лягають не на пілота, а на систему управління.

Багато традиційних технічні пристрої мають як стійкі, так і не стійкі режими роботи. При проектуванні системи управління нестійким об'єктом повинно враховуватися, що при втраті управління необхідне спрацювання системи захисту і сигналізації, яка забезпечує мінімізацію втрат, пов'язаних з таким інцидентом.

Одною з найважливіших задач управління є підтримка вертикального положення антропоморфних технічних пристроїв (роботів, кіборгів і т.п.). Подобну задачу вирішує система управління людини, що підтримує його на ногах, коли людина тримає в руці довгу жердину. Останні приклади показують значимість вивчення роботи системи балансування, яка може бути досліджена шляхом моделювання перевернутого маятника.

Нижче розглянуте завдання моделювання перевернутого маятника , управління ним, яке повинне привести його у вертикальне положення з довільного положення шляхом подачі на нього керуючого впливу [9]

Віртуальне моделювання та дослідження виконувалось в програмі MatLab.[5]

### **1.5. Нестійкий маятник як об'єкт управління**

Більшість досліджень будь-якого об'єкта або системи починається з побудови математичної моделі досліджуваного об'єкта або досліджуваної системи. Математична модель (ММ) являє собою спрощене опис реальних

фізичних явищ, які відбуваються в об'єкті. ММ повинна дати максимально повний і найбільш простий опис об'єкта. Як правило, ММ являє собою систему рівнянь, яка може бути представлена у вигляді структурної схеми. У даній роботі, в якості об'єкту дослідження, обрано одноланковий нестійкий маятник на рухомій платформі.[4]

Схема нестійкий маятник - платформа показана на рис. 1.4.

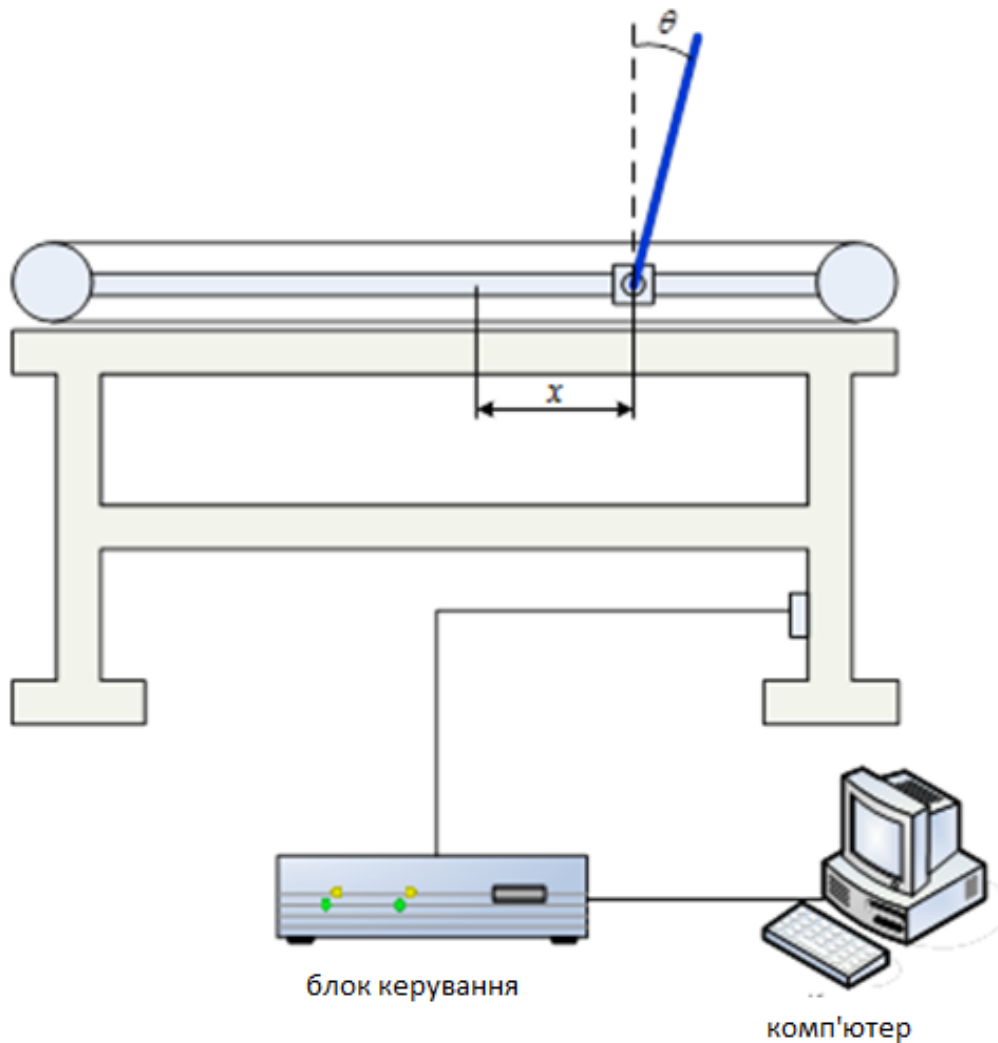


Рис.1.4 Схематичний вид досліджуваної системи.

Вона представляє собою платформу, на якій розташований електродвигун, до якого прикріплена ланка маятника. Вісь обертання двигуна паралельна осі обертання ланки маятника. Ланка маятника має довжину  $l$  і масу  $m_1$ . Центр мас

розташований на вільному кінці стержня. Система приводиться в рух за допомогою двигуна постійного струму, який має момент обертання  $M$ , і який, в свою чергу, залежить від керуючої напруги  $u$ . Кут відхилення від положення рівноваги маятника -  $\varphi$ . Параметри об'єкта управління вибрані наступні:

$$m_1 = 0,1 \text{ кг}$$

$$l = 0,3 \text{ м.}$$

При створенні системи управління маятником ми будемо враховувати наступне обмеження на керуючий момент двигуна: він не повинен перевищувати максимальний момент, що здатний розвивати двигун.

Інші параметри регулятора:

- кут відхилення маятника від положення рівноваги  $\varphi$ ;

- кутова швидкість маятника  $\dot{\varphi}$ ;

Якщо прийняти відсутність тертя в шарнірі маятника і опору повітря, то математична модель об'єкта може бути представлена у формі системи з двох диференціальних рівнянь :

$$\begin{aligned} J \ddot{\theta} + g \sin(\theta) &= -\ddot{x} \cos(\theta) \\ (m + M) \ddot{x} &= -ml \ddot{\theta} \cos(\theta) + ml \dot{\theta}^2 \sin(\theta) + l \end{aligned} \quad (1.1)$$

Перше рівняння відображає другий закон Ньютона для обертального руху маятника.

Друге рівняння - використання другого закону Ньютона для поступального руху платформи[9].

Реалізація моделей в середовищі програми MatLab Simulink спрощується, якщо ці рівняння представити в формі Коші.

Маємо чотири рівняння першого порядку, щодо похідних.

Рівняння в формі Коші мають вигляд:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \dot{\theta}$$

$$\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial t} = \frac{((M + m)g \sin \theta - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta - f \cos \theta)}{A} \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \dot{x}$$

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial t} = \frac{(ml^2 \dot{\theta}^2 \sin(\theta) + If - gml \sin(\theta) \cos(\theta))}{A}$$

Рівняння доповнюємо початковими умовами при  $t = 0$   
 $\theta = \theta_0$ .

Для малих кутів, якщо зробити заміну, згідно рівнянь 1.3, отримаємо лінеаризовані рівняння.

$$\sin(\theta) \cong \theta; \cos(\theta) \cong 1; \dot{\theta} \cong 0. \quad (1.3)$$

### 1.6. Математична модель об'єкта управління

Розглянемо коливання маятника. Всі фізичні величини, які беруть участь в процесі роботи маятника, позначені на Рис.1.5 В якості узагальнених координат вибираємо кути відхилення ланки - $\vartheta$ .

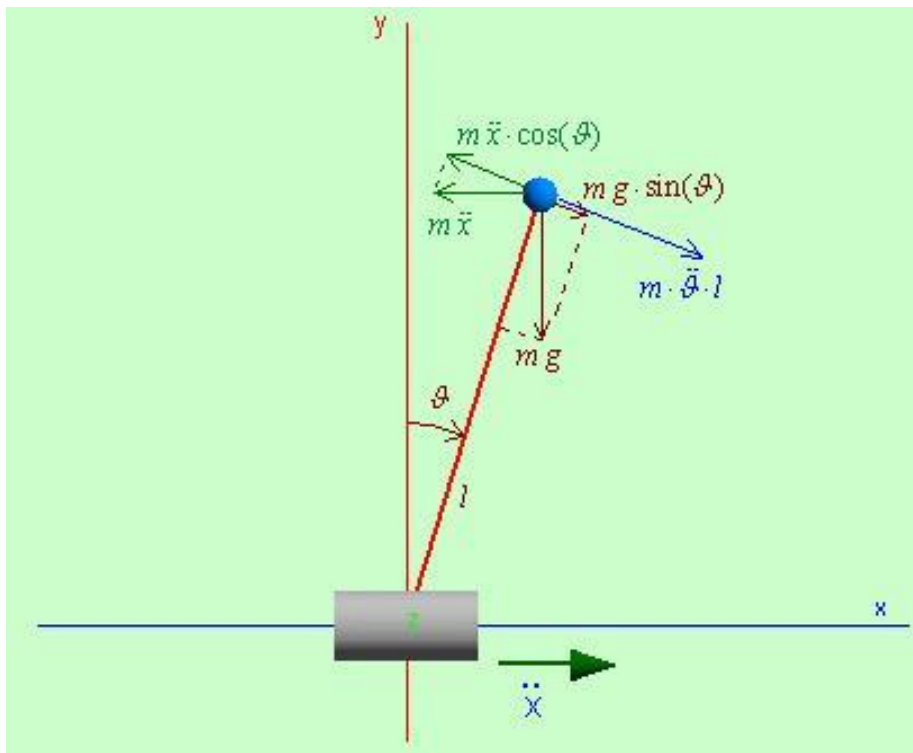


Рис. 1.5 Нестійкий маятник з урахуванням діючих сил

Ціль управління є стабілізація та оптимізація руху перевернутого маятника. Як об'єкт управління обрано маятник, закріплений на рухомій платформі (рис.1.6). Маятник може вільно обертатися у вертикальній площині. Керуваними і вимірюваними параметрами об'єкту є положення платформи і кут відхилення маятника від вертикалі. Керуючим впливом є сила, яка додається до платформи (для спрощення привод платформи не розглядається). Мета управління полягає у приведенні маятника у вертикальне положення. У подальшому, при керованому переміщенню платформи маятник повинен знаходитися в околиці положення рівноваги. У разі втрати стійкості маятником він повинен бути знову приведений у вертикальне положення наступним наступним переміщенням платформи.[2]

Математична модель об'єкта складена на підставі другого закону Ньютона для сил, що діють на платформу і маятник, і обертаючих моментів маятника 1.4:

$$\left\{ \begin{array}{l} (M + m) \cdot \ddot{x} + k \cdot \dot{x} + ml \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos \theta - ml \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta = u \\ (J + ml^2) \cdot \ddot{\theta} + c \cdot \dot{\theta} + ml \cdot \ddot{x} \cdot \cos \theta - mgl \cdot \sin \theta = 0 \end{array} \right. \quad (1.4)$$

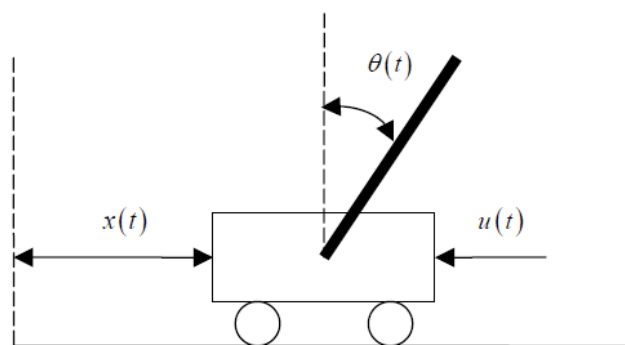


Рис.1.6 - Об'єкт управління

Загальні принципи управління[8]:

1. На етапі приведення маятника у вертикальне положення і його стабілізації, управління здійснюється на основі нечітких правил;

2. На етапі переміщення платформи модель (1) може бути наближена лінійною моделлю, на основі якої здійснюється модальне керування (по заданому розташуванню коренів характеристичного рівняння замкнутої системи);

3. У разі втрати маятником стійкості внаслідок дії збурень, проводиться його стабілізація в стійкому нижньому положенні за допомогою нечітких правил, після чого повторюються п. 1, 2.

Нечіткі правила для п. 1 пропонується скласти, виходячи з таких міркувань.

Для приведення маятника в вертикальне положення його потрібно розгойдувати, прикладаючи силу до платформи. Розгойдування відбуватиметься найшвидше в разі, якщо прикладати силу в той час, коли кутова швидкість маятника близька до максимуму, . При проходженні маятником нижнього положення ( $\theta \in [\pi - \Delta\theta_1; \pi + \Delta\theta_1]$ ) знак (напрямок) сили при цьому збігається зі знаком кутовий швидкості маятника: при проходженні маятником нижнього положення з позитивною кутовий швидкістю (за годинниковою стрілкою) повинна додаватися позитивна сила (вправо) . У деякий момент часу маятник опиниться в околиці вертикального положення. Для його стабілізації в цьому положенні пропонується застосувати найбільш грубе управління, яке вимагає мінімальної кількості правил: докладати позитивну силу, якщо маятник знаходиться в околиці вертикального положення праворуч від нього ( $\theta \in [\Delta\theta_3; \Delta\theta_2]$ ), і негативну, якщо зліва ( $\theta \in [-\Delta\theta_2; -\Delta\theta_3]$ ).

У діапазонах кутів  $\theta \in [-\Delta\theta_3; \Delta\theta_3], |\theta| \in [\Delta\theta_2; \pi - \Delta\theta_1]$  сила дорівнює нулю.

На Рис 1.7 умовно наведені виділені кути маятника, а на Рис1.8 наведені функції належності для даних множин.

Для кутової швидкості на даному етапі досить визначити тільки множину позитивних швидкостей - POS. Для сили, що додається до платформи, визначаються множини позитивної (PM), негативною (NM) і нульовий (Z) сили наведені на Рис.1.9

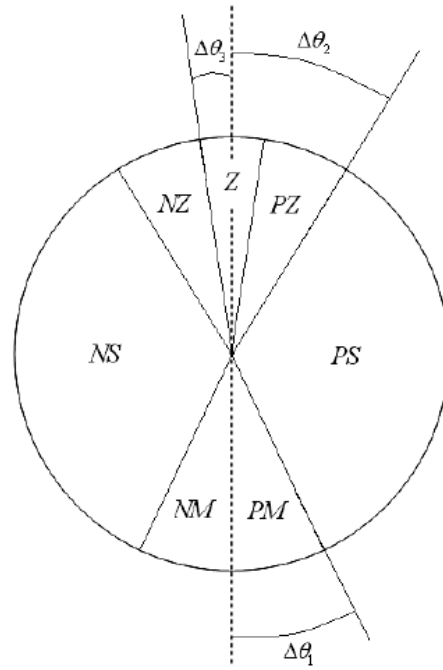


Рис.1.7 – Множини кутів маятника

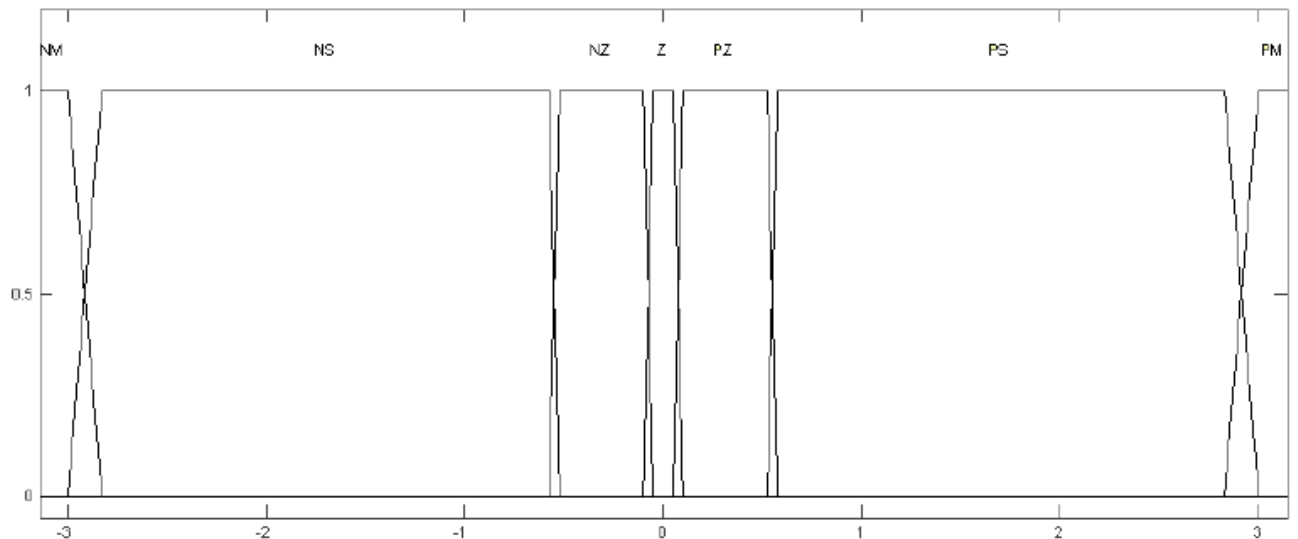


Рис.1.8 — Функції належності для множини кутів маятника

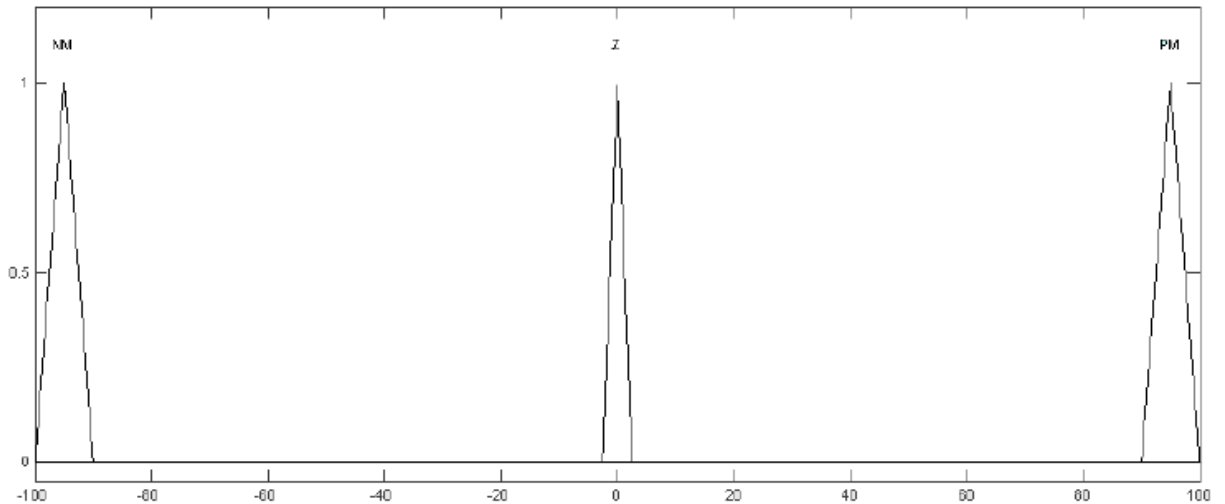


Рис.1.9 — Функції належності для множин сили , прикладеної до платформи

З урахуванням введених позначень, маємо наступний набір нечітких правил для п. 1:

- Пр.1: Якщо (Кут= NM) И (Швидкість = POS), ТО (Сила = PM)
- Пр.2: Якщо (Кут= NM) И (Швидкість = НЕ POS), ТО (Сила = NM)
- Пр.3: Якщо (Кут= PM) И (Швидкість = POS), ТО (Сила = PM)
- Пр.4: Якщо (Кут= PM) И (Швидкість = НЕ POS), ТО (Сила = NM)
- Пр.5: Якщо (Кут= NS), ТО (Сила = Z)
- Пр.6: Якщо (Кут= PS), ТО (Сила = Z)
- Пр.7: Якщо (Кут= NZ), ТО (Сила = NM)
- Пр.8: Якщо (Кут= PZ), ТО (Сила = PM)
- Пр.9: Якщо (Кут= Z), ТО (Сила = Z)

В околиці вертикального положення маятника  $\theta \approx 0$ ,  $\sin \theta \approx \theta$ ,  $\cos \theta \approx 1$  модель (1) приводиться до лінійної моделі, яка в формі простору станів має вид 1.5:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k(J+ml^2)}{D} & -\frac{m^2gl^2}{D} & \frac{mlc}{D} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

де

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A \cdot x + B \cdot u \\ y &= C \cdot x\end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k(J+ml^2)}{D} & -\frac{m^2 gl^2}{D} & \frac{mlc}{D} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{mlk}{D} & \frac{(M+m)mgl}{D} & -\frac{(M+m)c}{D} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{J+ml^2}{D} & 0 & -\frac{ml}{D} \end{bmatrix}^T, \quad C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$x = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T, \quad D = J(M+m) + Mml^2$$

Для переміщення платформи після стабілізації маятника використовується модальне управління. Коефіцієнти зворотного зв'язку розраховуються виходячи з необхідного характеристичного полінома замкнутої системи. В якості необхідного полінома вибираємо стандартний поліном Баттерворта:

$$s^4 + 2.6w \cdot s^3 + 3.4w^2 \cdot s^2 + 2.6w^3 \cdot s + w^4 \quad (1.6)$$

де параметр  $w$  прямо визначає швидкодію системи з даними поліномом. Матриця коефіцієнтів модального регулятора за методом Аккермана має вигляд 1.7:

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ 1] * Q_R^{-1} * [A^4 + 2.6w * A^3 + 3.4w^2 * A^2 + 2.6w^3 * A + w^4 * I] \quad (1.7)$$

де  $Q_R$  - матриця керованості системи (2)  $Q_R = [B : AB : A^2B : A^3B]$ .

Замкнута система на вході доповнюємо фільтром 1.8:

$$V = -\frac{1}{C * (A - B * K)^{-1} * B} \quad (1.8)$$

Таким чином, на етапі переміщення платформи об'єкт описується наступною моделлю 1.9 [3]

$$\dot{x} = (A - BK) * x + BV * U. \quad (1.9)$$

На швидкодію модального регулятора накладаються певні обмеження області адекватності моделі (2) реальній системі. При збільшенні швидкодії збільшується сила, прикладена до платформи, і, відповідно, величини кута і кутовій швидкості маятника. Збільшення останніх призводить до все більш неточного опису реальної системи за допомогою моделі (2), в той час як управління у формується на основі моделі (2); в результаті це призводить до втрати стійкості маятником, перевищення допустимих меж зміни змінних та ін.

Те саме можна сказати і до вимоги на переміщення платформи при фіксованому швидкодії регулятора. Після етапу переміщення платформи на об'єкт можуть впливати збурення, які або не зменшуються модальним регулятором, або під його керуванням приводять до надмірно великих переміщень платформи.

В такому випадку обов'язковий перехід до управління на основі нечітких правил. Пропонується побудувати цей набір правил так, щоб він стабілізував маятник в нижньому положенні - це дозволить не прив'язуватися до конкретних значень збурень, котрі привели до втрати стійкості. Такий набір правил буде суперечити запропонованого раніше набору, тому в усі правила вводиться додаткова змінна (логічна) функція, значення якої буде говорити про необхідність стабілізації маятника або в верхньому, або в нижньому положенні. Позначимо цю змінну «Помилка», і нехай її початкове значення дорівнює нулю (НЕ YES); тоді з моменту втрати стійкості до стабілізації маятника в нижньому положенні вона повинна дорівнювати одиниці (YES). Після стабілізації маятника в нижньому положенні «Помилка» стає рівною нулю і наведеними раніше набором правил виконується стабілізація маятника в верхньому положенні. Таким чином, в умови наведених дев'яти правил додається: «I (Помилка = НЕ YES) ». Додаткові правила формуються виходячи зі зменшення кутової швидкості маятника: до платформи додається сила NM, якщо маятник знаходиться в діапазонах NM, NS з позитивною швидкістю, і сила PM, якщо маятник знаходиться в діапазонах PM, PS з від'ємною швидкістю. Додатково доводиться ввести масив положень нульової швидкості (близькі до нуля

значення), і два правила - не прикладати силу до платформи, якщо маятник знаходиться в діапазонах  $NM$ ,  $PM$  з нульовою швидкістю ( $Z$ ). В інших випадках сила до платформи не додається. Повний набір містить двадцять одне правило.

Для функціонування запропонованого алгоритму управління необхідно формувати два додаткових керуючих сигналу: визначальний поточний режим управління (нечіткі правила або модальний регулятор) - сигнал «Режим», і сигнал «Помилка», який визначає становище, в якому стабілізується маятник при нечіткому управлінні. Нехай сигнал «Режим» дорівнює нулю, якщо потрібно керувати на основі нечітких правил, і одиниці, якщо вимагається управління на основі модального регулятора. При переході до модального управління, крім величин кута і кутової швидкості маятника, необхідно враховувати швидкість переміщення платформи, так як сигнал управління формується виходячи з усього вектору стану. При достатньо великих величинах швидкості платформи отриманий сигнал управління приводить до описаної вище ситуації з швидкодією регулятора. Тому перехід сигналу «Режим» з нуля в одиницю повинен відбуватися, як тільки стан системи досягло всіх трьох заданих діапазонів з потрібних змінним: куту, кутової швидкості та лінійної швидкості платформи ( $[-Q_{in}; Q_{in}]$ ,  $[-dQ_{in}; dQ_{in}]$ ,  $[-dx_{in}; dx_{in}]$ ). Зворотний перехід здійснюється без урахування лінійної швидкості при виході кута маятника з діапазону  $[-Q_{out}; Q_{out}]$  або виході кутової швидкості з діапазону  $[-dQ_{out}; dQ_{out}]$ ; одночасно з цим переходом відбувається і перехід сигналу «Помилка» з нуля в одиницю. Мається на увазі, що  $Q_{out} > Q_{in}$ ,  $dQ_{out} > dQ_{in}$ . Перехід сигналу «Помилка» з одиниці в нуль відбувається після стабілізації маятника в нижньому положенні; під стабілізацією розуміється значення кута маятника в околиці  $\pm \pi$  (абсолютне значення кута більше  $Q_{eps}$ ) і значення лінійної швидкостей в діапазонах  $[-dQ_{eps}; dQ_{eps}]$ ,  $[-dx_{eps}; dx_{eps}]$  (лінійна швидкість враховується, т. к. нечіткі правила, які виконують стабілізацію маятника у верхньому положенні, є чутливими до її значення). Всі перераховані значення, крім  $Q_{eps}$ , знаходяться в околиці нуля. Їх значення, так само як і границі для множин кутів маятника 1, 2, 3,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\theta$  знаходяться

послідовним наближенням з перевіркою результатів. Відновлення не вимірюваних змінних об'єкта управління (лінійна і кутова швидкості) проводиться на основі вимірюваних змінних і управління, спостерігачем стану зниженого порядку. [1]

## Розділ 2. МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТІЙКОГО МАЯТНИКА

Спрощено маятник -це маса  $m$  на плечі  $l$ , яка може відхилитись на кут  $\theta$  . На маятник діє сила тяжіння  $mg$ , яка діє відносно осі обертання  $mg \cdot \sin \theta$  . На плечі маятника ця сила створює крутний момент  $mgl \cdot \sin \theta$  . З другого закону Ньютона  $F = ma$  , але це для випадку поступального руху. В нашому випадку ми маємо кутове переміщення, тому формула матиме вигляд 2.1

$$M = J \varepsilon .$$

$$J \ddot{\theta} = mgl \cdot \sin \theta ;$$

$$\text{Або } \theta = \frac{1}{J} (mgl \cdot \sin \theta) . \quad (2.1)$$

Щоб при моделюванні отримати згасаючий процес, введемо в рівняння момент тертя маятника. Тоді рівняння будуть мати вигляд

$$J \ddot{\theta} + b \dot{\theta} = mgl \cdot \sin \theta \quad J \ddot{\theta} + b \dot{\theta} = mgl \cdot \sin \theta \quad (2.2)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J} (mgl \cdot \sin \theta - b \dot{\theta}), \quad (2.2)$$

де

$m$  – маса маятника,

$l$  – довжина маятника ,

$J$  – момент інерції маятника відносно осі обертання ,

$b$ - коефіцієнт демпфування.

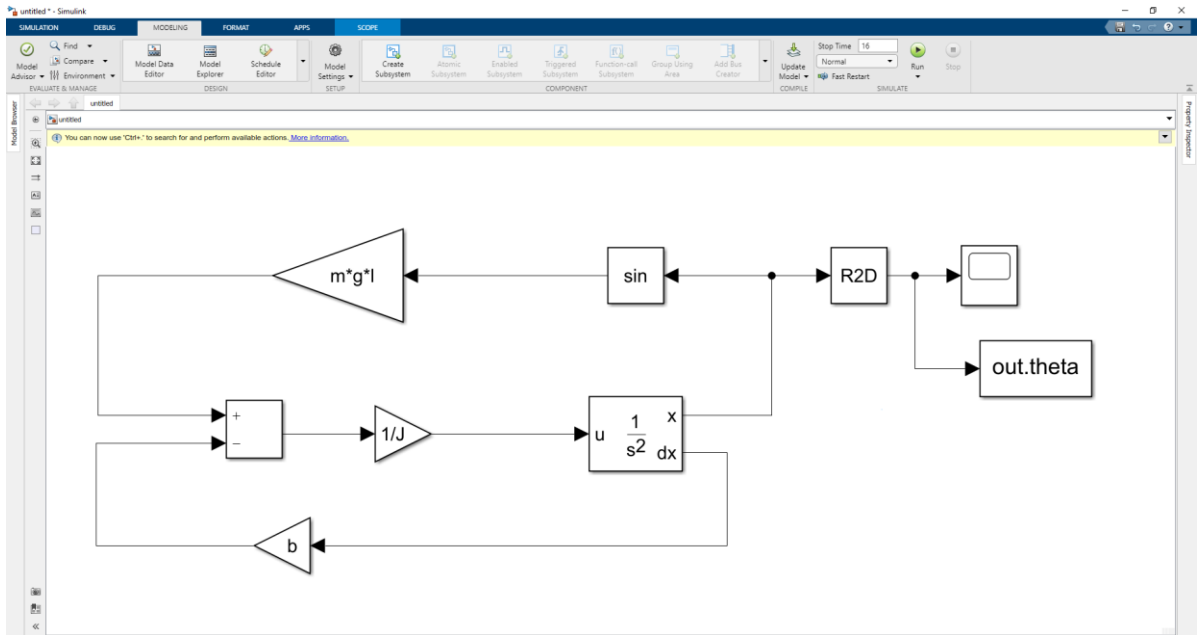


Рис.2.1- Математична модель маятника (Simulink)

При початковому збуренні максимальне відхилення 5 градусів

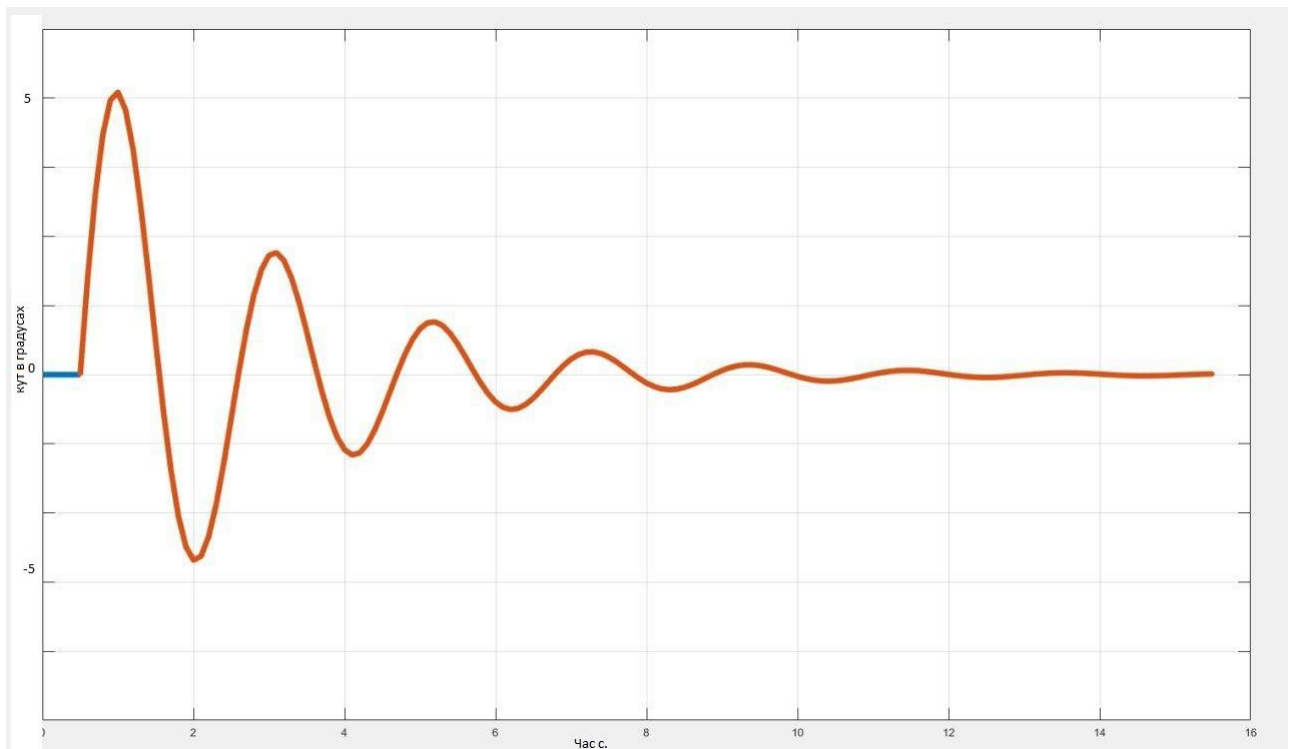


Рис.2.2- Графіки стабілізації кута відхилення маятника від часу при різних початкових умовах.

### Максимальне відхилення 9 градусів

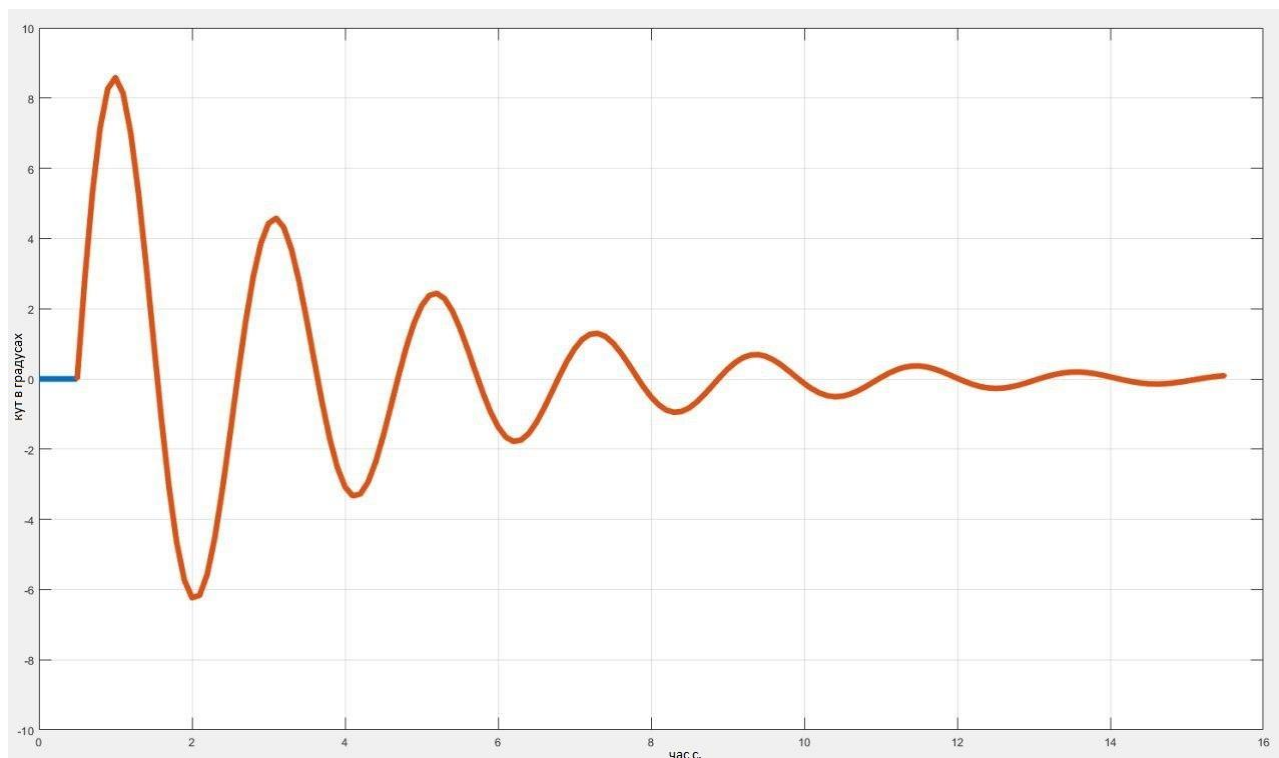


Рис.2.2.1- Графіки стабілізації кута відхилення маятника від часу при різних початкових умовах.

### Критичне відхилення - 12 градусів (рис.2.2.2)

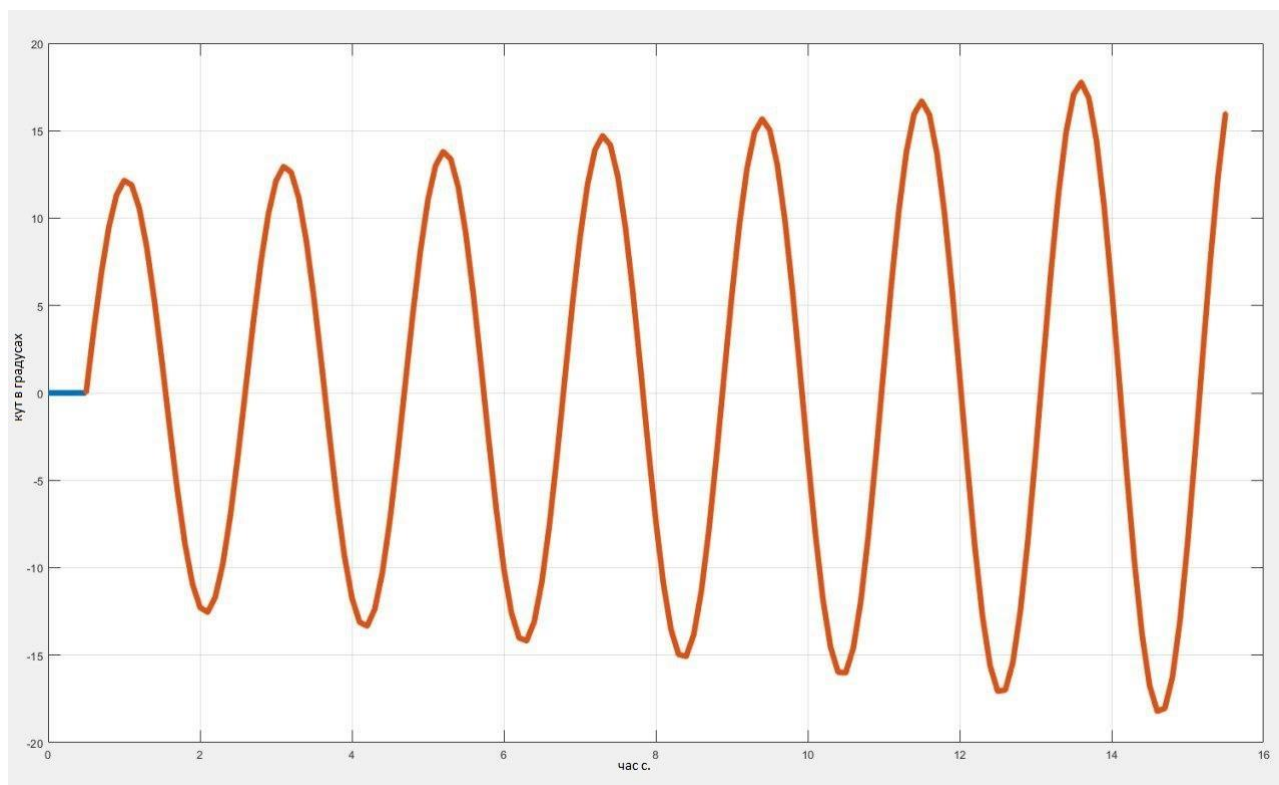


Рис.2.2.2- Графіки відхилення маятника при критичному куті

## 2.1. Опис установки і складових частин

Конструкція керованої моделі нестійкого маятника складається із восьми основних частин:

- станина;
- двигун;
- механічна частина;
- плата керування;
- драйвер двигуна;
- датчик кута нахилу;
- блок живлення двигуна;
- блок живлення плати керування.

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

- кут – 4 шт.
- підшипник лінійний – 4 шт.
- направляюча – 2 шт.
- кріплення направляючої – 4 шт.
- маятник – 1 шт.

Схематична 3д модель зроблена в середовищі Solidworks показана на Рис.2.3.

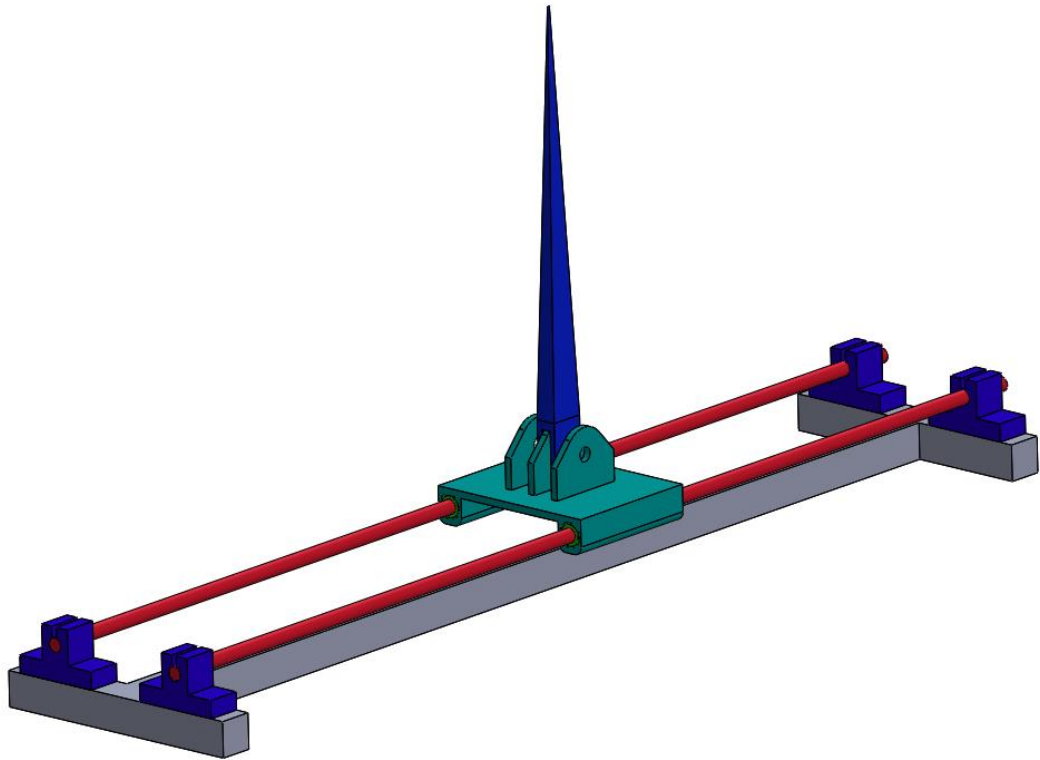


Рис.2.3. 3D модель керованого нестійкого маятника

Установка представляє собою опорну конструкцію-раму, на якій встановлено електродвигун (Рис.2.4). Це мотор-редуктор DC 12V 350 об / хв з коробкою передач з передавальним відношенням 34:1. На валу встановлено енкодер, який видає 11 імпульсів на один раунд, забезпечуючи максимальну потужність 374 Вт за один раунд. Струм холостого ходу: 20 мА, крутний момент: 12 кг.см.

Платформа (кріплення маятника) було надруковано на 3D принтері по 3D моделі, яка, представлена у середовищі Solidworks (Рис. 2.5).



Рис.2.4 Двигун DC

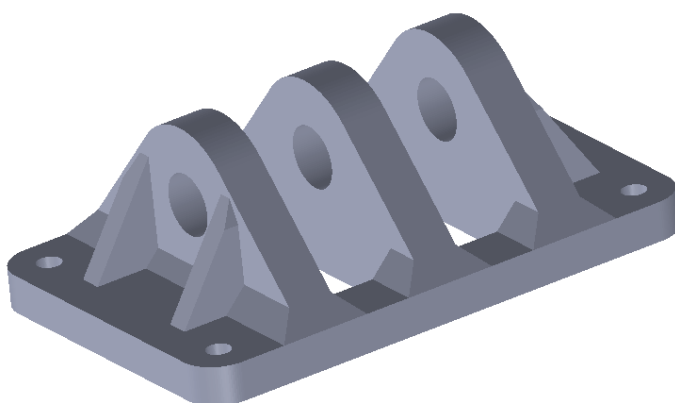


Рис.2.5 Кріплення маятника

До платформи кріпиться перехідна пластина, яка представляє собою акриловий лист товщиною 4мм. На лист закріплено чотири бугелі (Рис.2.6), для кріплення лінійних підшипників, які ходять по двох напрямних діаметром 8мм, встановлених горизонтально і закріпленних на спеціальних зажимах (Рис.2.7).

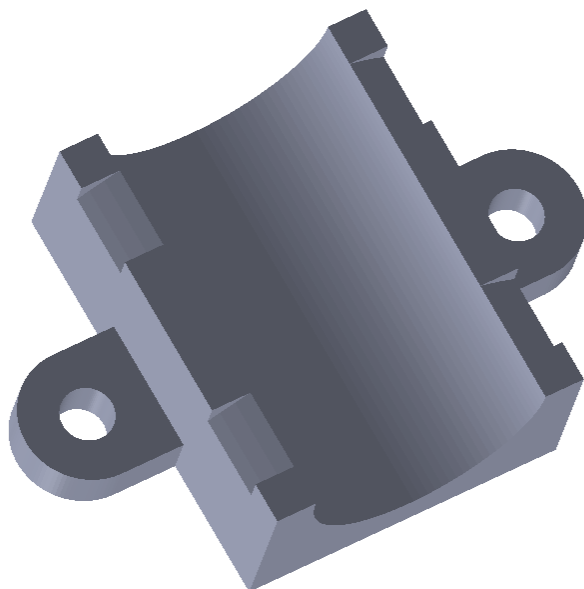


Рис.2.6 3D модель кріплення лінійного підшипника (бугель).

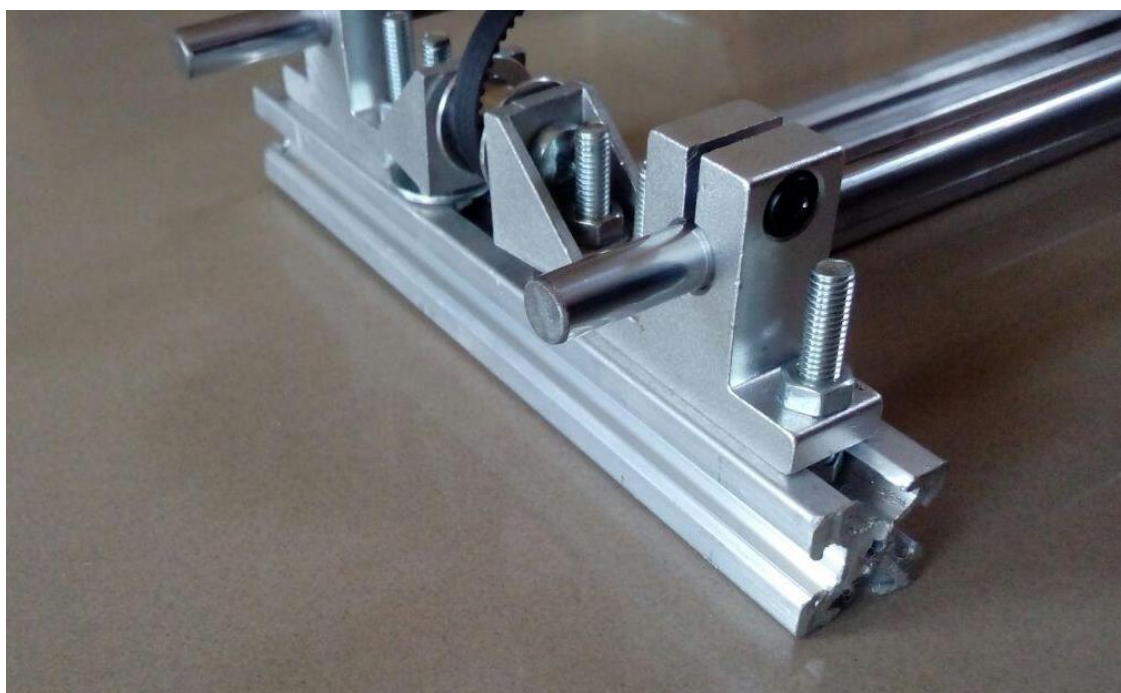


Рис.2.7 - Кріплення лінійної напрямної

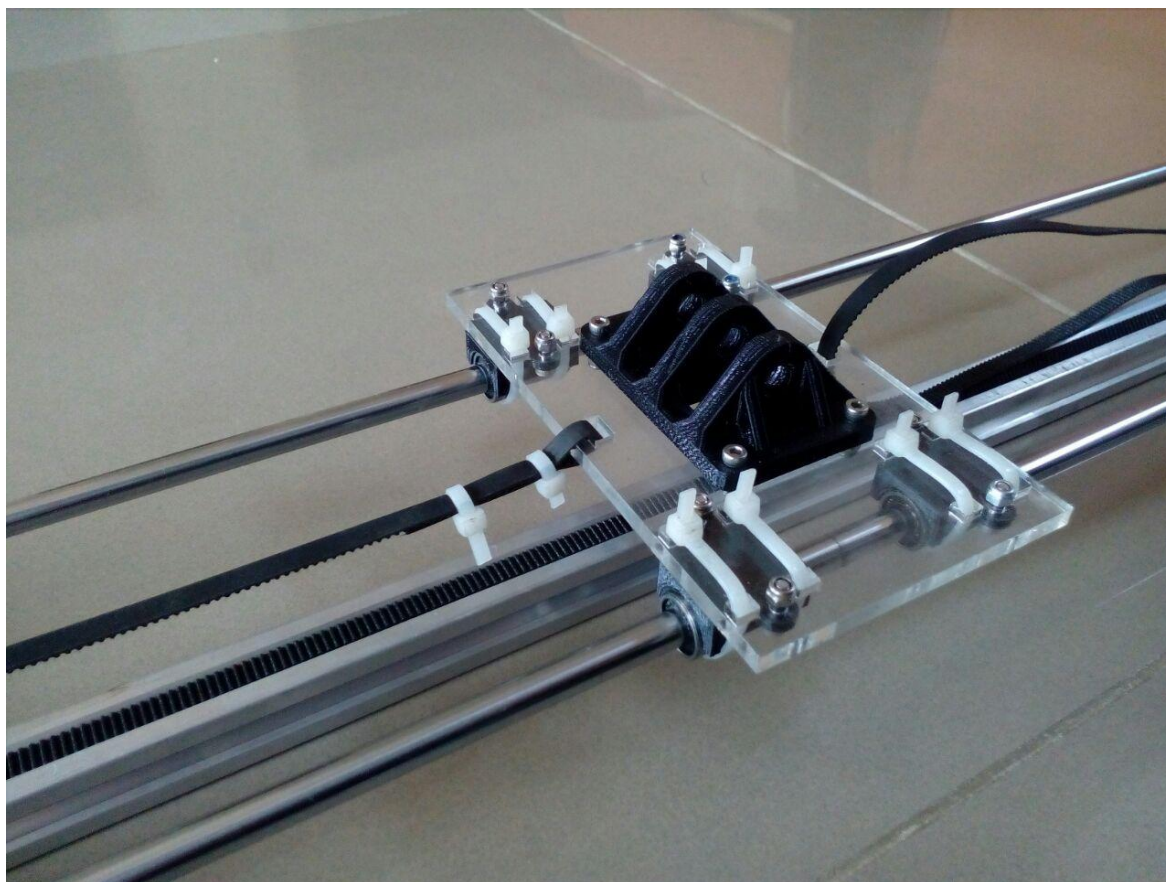


Рис.2.8 Загальний вигляд платформи

Установку було побудовано за допомогою механізму, схожого на 3D принтер. Двигун переміщує платформу за допомогою гнучкої передачі, ремені якої закріплений з обох боків на акриловій пластині. Ремінь GT типу (Рис.2.9) взято з 3D принтера. Маятник, виконаний у вигляді складної конструкції вирізаний на лазері з абс пластику по своїм кресленням; на вершині маятника встановлено модуль GY-521 мікросхеми MPU6050 (Рис.2.10), який вимірює прискорення маятника. Передаючи дані на плату, контролер (Arduino UNO) (Рис.2.11), який встановлено на раму, керує драйвером двигуна L298N (Рис.2.12) з характеристиками: напруга живлення логіки 5V; споживаний логікою струм

36mA; напруга живлення мотору: від 5V до 35V.

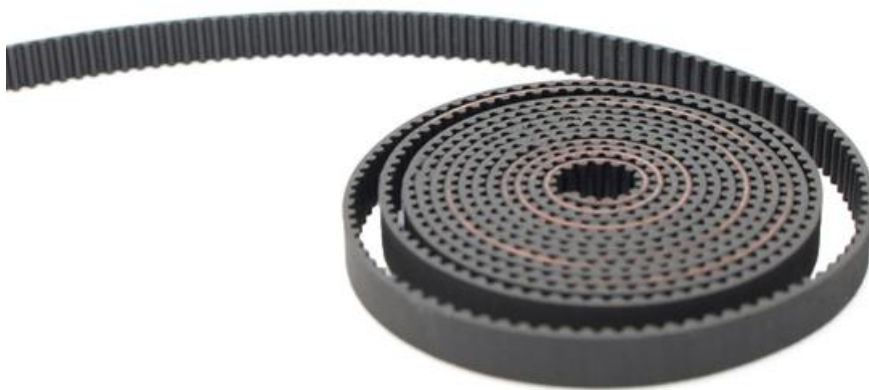


Рис.2.9– Ремінь

## 2.2 Вимірювальний пристрій

Основними характеристиками для вибору вимірювального пристрою були: здатність до виміру кута нахилу маятника з необхідною точністю, доступність та розповсюдженість. Для виконання стенду був обраний модуль GY-521, що має на борту як акселерометр так і гіроскоп. Мікросхема MPU6050 є головним елементом модуля.

Модуль MPU6050 закріплений у верхній точці перевернутого маятника. За допомогою цього датчика визначається кут відхилення маятника щодо вертикалі (Рис.2.13).

Гіроскоп видає значення миттєвої кутової швидкості з дозволом, заданим в настройках. Акселерометр представляє собою пристрій, який вимірює проекцію удаваного прискорення, тобто, різницю між істинним прискоренням об'єкта та гравітаційним прискоренням.

Вимірювання акселерометра і гіроскопа мають систематичні помилки. Акселерометр забезпечує точні дані протягом тривалого часу, але в короткостроковій перспективі є грубим.

Одним з методів визначення нахилу тіла з трьома осями є визначення кожного кута окремо для кожної осі акселерометра від початкового положення. За вихідне положення приймається ситуація, коли проекція сили тяжіння на осі X і Y дорівнюють 0, проекція сили тяжіння на вісь Z дорівнює - g.

Позначимо за  $\theta$  кут між горизонтом і віссю X, за кут між горизонтом і віссю Y, за  $\varphi$  - кут між вектором  $\sim g$  і віссю Z. Тоді формули для визначення  $\theta$ , і  $\varphi$  мають вигляд:

$$\begin{cases} \theta = \arctan \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \\ \psi = \arctan \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \\ \varphi = \arctan \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \end{cases}$$

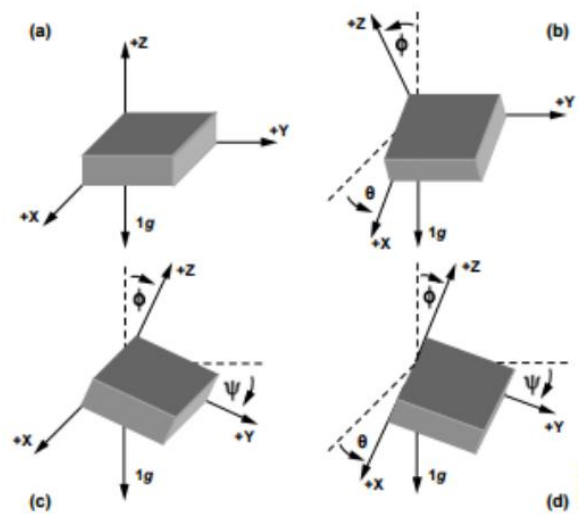


Рис.2.13 -кути відхилення маятника від вертикальної осі

Крім цієї мікросхеми, на платі модуля розташована необхідна обв'язка MPU6050, в тому числі регулюючі резистори інтерфейсу I2C, а також стабілізатор напруги на 3,3 В з малим падінням напруги.

Напруга (при живленні вже в 3,3 В на виході стабілізатора буде мати значення рівно 3 В). Також на платі розпаяний SMD світлодіод з обмежуючим резистором, як індикатор напруги живлення, а також фільтруючі конденсатори. Розмір плати модуля GY-521 10 x 20 мм.

Характеристики плати модуля GY-521

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: 30 мкА  
 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:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ , і  $\pm 2000$  градусів в секунду ;  
 Діапазон акселерометра:  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$  і  $\pm 16$  g ;  
 16 біт виведення даних;  
 Резонансна частота 27 кГц ;  
 Шум  $0,005^\circ / \text{с} / \sqrt{\text{Гц}}$  ;  
 Відстань між контактами 2,54 мм ;  
 Отвори під гвинт 3 мм ;  
 Розміри 20 x 16 мм ;

Датчики гіроскопа і акселерометра виготовлені за схемою MEMS-датчика.  
 . Зовнішній вплив на датчик спочатку змінює стан механічної частини вимірювачів, потім зміна стану механічної частини приводить до зміни сигналу електричної частини. Таким чином, 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.2.10 – модуль 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 треба 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 обертається 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 настраюються 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 покази зводяться до загального фінального результату. При цьому акселерометр коригує "дрейф" гіроскопа, а гіроскоп згладжує скачки акселерометра при вібраціях і прискореннях.

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

### 2.3 Плата керування

Мікроконтролер – Atmega 328

робоча напруга 5 V

вхідна напруга (рекомендований) 7-12 В

Вхідна напруга (граничне) 6-20 В.

Цифрові Входи / Виходи 14 (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ)

аналогові входи 6

Постійний струм через вхід / вихід 40 мА

Постійний струм для виведення 3.3 В 50 мА

Флеш пам`ять 32 Кб (АТmega328) з яких 0.5 КБ використовуються для завантажувача

ОЗУ 2 КБ (АТmega328)

EEPROM

1 Кб (АТmega328)

Тактова частота 16 МГц



Рис.2.11 - Arduino UNO

## 2.4 Драйвер двигуна

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

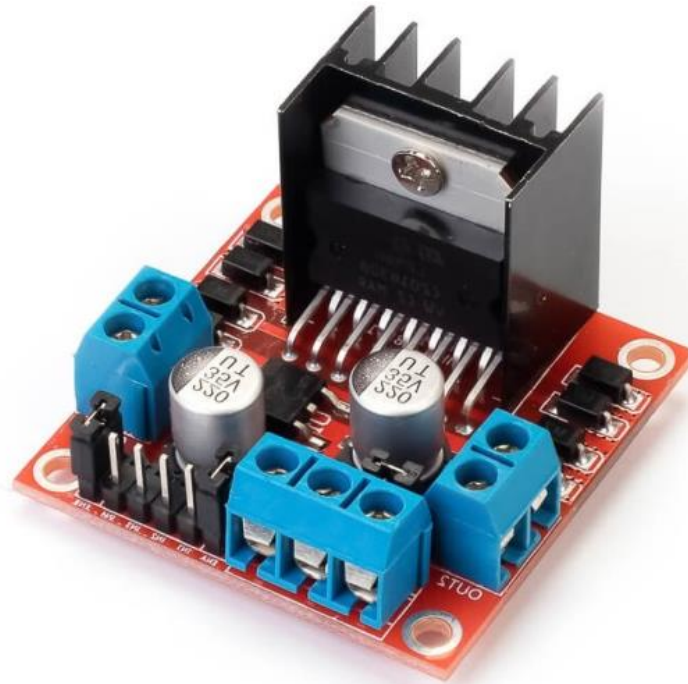


Рис.2.12 Драйвер двигуна L298N

Плата контролера двигунів 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 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 ( $I_o$ ): 2А - Піковий струм навантаження кожної керованої частини ( $I_o$ ): 3А 34 - Максимальна споживана потужність: 20 Вт (при температурі = 75 ° C) - Високий рівень вхідного сигналу (High): 2.3В =

$V_{in} = V_{ss}$  - 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:  $53 \times 47 \times 27$  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 перемичка 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.

Функціональна схема роботи вказана на Рис.2.14. На кінці маятника встановлено модуль, який передає данні на плату- контроллер ардуіно, який передає сигнал на драйвер двигуна, що керує цим двигуном.

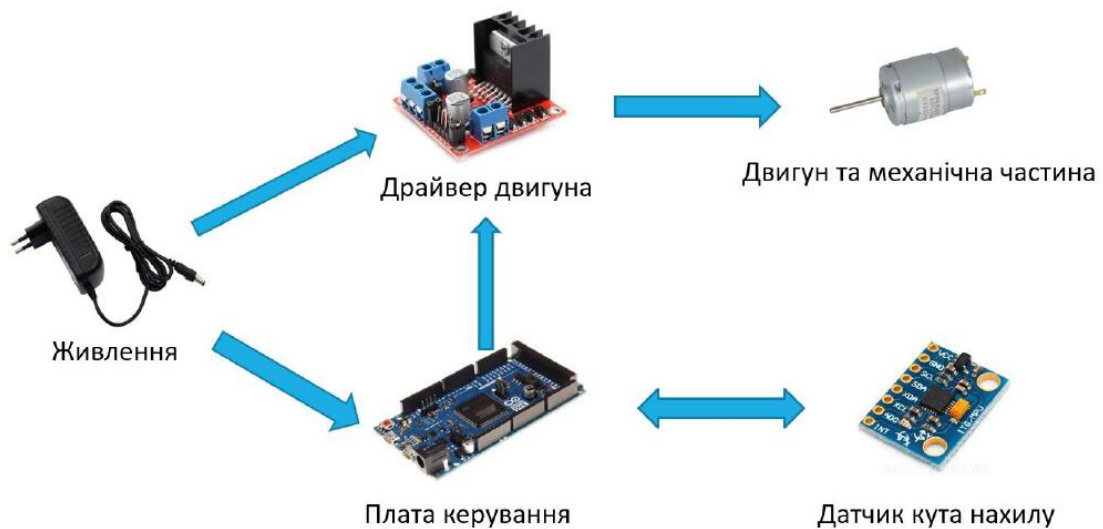


Рис.2.14 Функціональна схема управління двигуном

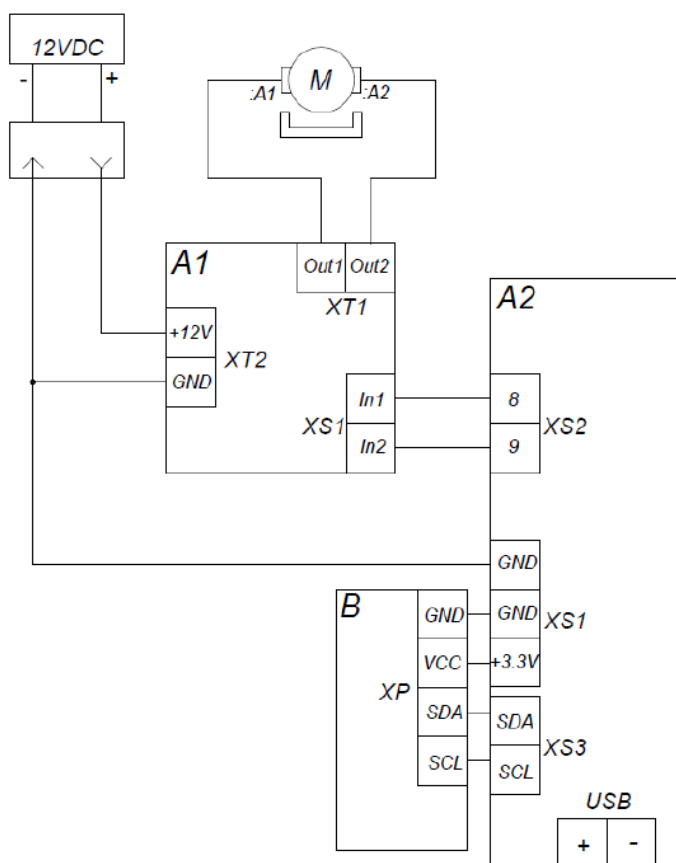


Рис.2.15 Принципова схема пристрою

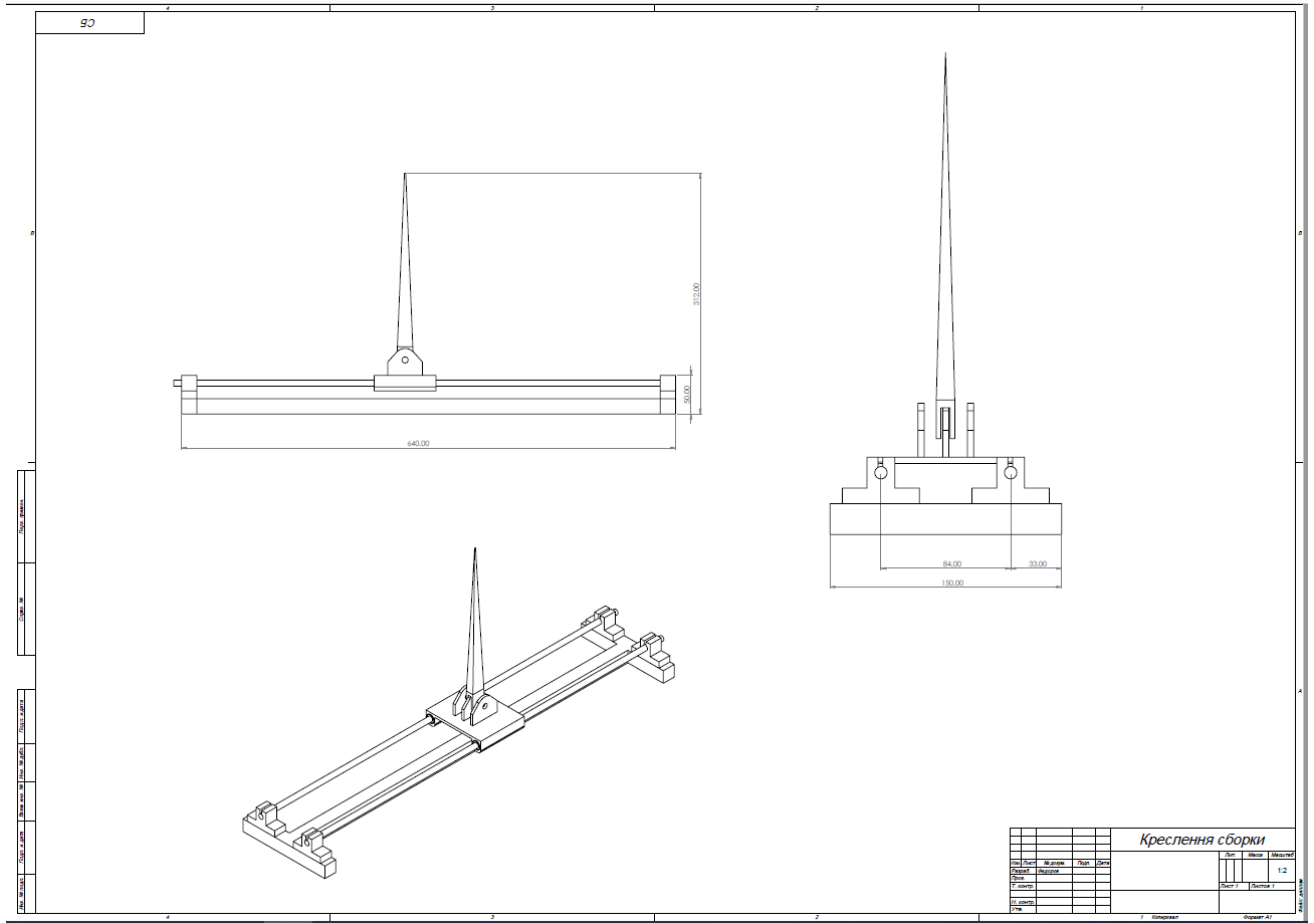


Рисунок 2.16 Габаритне креслення платформи з маятником



Рис.2.17- Зібрана механічна частина моделі

Науково-технічна проблема, в межах якої виконуються дослідження: сучасна система, яка керується автоматично, обов'язково використовує різні методи теорії автоматичного регулювання, одним з яких є ПІД регулятор, який найбільш широко застосовується. ПІД регулятори знайшли широке використання у багатьох пристроях робототехніки: коптери, керування автомобілем за дорожньою розміткою, нагрів у 3D принтерах та багато іншого.

Однією з найбільших проблем є різного роду дистабілізуючі фактори, що впливають на кінцевий результат обчислень. Такими факторами є: коректність та точність роботи датчиків, шуми, що виникають у схемі, залежність роботи від джерела напруги, зовнішні фактори (світло, електромагнітні хвилі та інше). Саме на вирішення цих питань направлена наукова робота, що передбачає аналіз та обробку даних (у ході дослідження використовується система з інфрачервоними датчиками кольору) та розробку принципової схеми друкованої плати, що буде стійкою до усіх вищезгаданих факторів.

## 2.5. Код програми дослідження

```
/*Gyro:  
* SDA - A4  
* SCL - A5  
* INT - D2  
*  
*  
* Motor Driver:  
* EnA - D5  
* In1 - D6  
* In2 - D7  
* In3 - D8  
* In4 - D9  
* EnB - D10  
*  
*/  
  
#include "PID_v1.h"  
#include "LMotorController.h"  
#include "I2Cdev.h"  
#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"  
  
#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE  
#include "Wire.h"  
#endif
```

```

#define MIN_ABS_SPEED 20

MPU6050 mpu;

// MPU control/status vars
bool dmpReady = false; // set true if DMP init was successful
uint8_t mpuIntStatus; // holds actual interrupt status byte from MPU
uint8_t devStatus; // return status after each device operation (0 = success, != 0 =
error)
uint16_t packetSize; // expected DMP packet size (default is 42 bytes)
uint16_t fifoCount; // count of all bytes currently in FIFO
uint8_t fifoBuffer[64]; // FIFO storage buffer

// orientation/motion vars
Quaternion q; // [w, x, y, z] quaternion container
VectorFloat gravity; // [x, y, z] gravity vector
float ypr[3]; // [yaw, pitch, roll] yaw/pitch/roll container and gravity vector

//PID
double originalSetpoint = 223.5;
double setpoint = originalSetpoint;
double movingAngleOffset = 0.1;
double input, output;

//adjust these vaues to fit your own design
double Kp = 180;
double Kd = 5;
double Ki = 60;

PID pid(&input, &output, &setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

```

```

double motorSpeedFactorLeft = 0.9;
double motorSpeedFactorRight = 0.9;
//MOTOR CONTROLLER
int ENA = 5;
int IN1 = 7;
int IN2 = 6;
int IN3 = 9;
int IN4 = 8;
int ENB = 10;
LMotorController motorController(ENA, IN1, IN2, ENB, IN3, IN4,
&motorSpeedFactorLeft, &motorSpeedFactorRight);

volatile bool mpuInterrupt = false; // indicates whether MPU interrupt pin has
got

void dmpDataReady()
{
  mpuInterrupt = true;
}

void setup()
{
  // join I2C bus (I2Cdev library doesn't do this automatically)
  pinMode(2, OUTPUT);
  digitalWrite(2, LOW);
#ifdef I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);

```

```

TWBR = 24; // 400kHz I2C clock (200kHz if CPU is 8MHz)
#elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
Fastwire::setup(400, true);
#endif

mpu.initialize();

devStatus = mpu.dmpInitialize();

// supply your own gyro offsets here, scaled for min sensitivity
mpu.setXGyroOffset(220);
mpu.setYGyroOffset(76);
mpu.setZGyroOffset(-85);
mpu.setZAccelOffset(1788); // 1688 factory default for my test chip

// make sure it worked (returns 0 if so)
if (devStatus == 0)
{
// turn on the DMP, now that it's ready
mpu.setDMPEnabled(true);
// enable Arduino interrupt detection
//attachInterrupt(2, dmpDataReady, RISING);
mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();

// set our DMP Ready flag so the main loop() function knows it's okay to use
it
dmpReady = true;

// get expected DMP packet size for later comparison

```

```

packetSize = mpu.dmpGetFIFOPacketSize();

//setup PID
pid.SetMode(AUTOMATIC);
pid.SetSampleTime(10);
pid.SetOutputLimits(-255, 255);
}
else
{
  // ERROR!
  // 1 = initial memory load failed
  // 2 = DMP configuration updates failed
  // (if it's going to break, usually the code will be 1)
  Serial.print(F("DMP Initialization failed (code "));
  Serial.print(devStatus);
  Serial.println(F(""));
}
}

void loop()
{
  // if programming failed, don't try to do anything
  if (!dmpReady) return;

  //no mpu data - performing PID calculations and output to motors

  pid.Compute();
  motorController.move(output, MIN_ABS_SPEED);

```

```
PID pid(&input, &output, &setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);  
//Serial.println(output);  
  
// reset interrupt flag and get INT_STATUS byte  
mpuInterrupt = false;  
mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();  
  
// get current FIFO count  
fifoCount = mpu.getFIFOCount();  
  
// check for overflow (this should never happen unless our code is too  
inefficient)  
if ((mpuIntStatus & 0x10) || fifoCount == 1024)  
{  
    // reset so we can continue cleanly  
    mpu.resetFIFO();  
    Serial.println(F("FIFO overflow!"));  
  
    // otherwise, check for DMP data ready interrupt (this should happen  
frequently)  
}  
else if (mpuIntStatus & 0x02)  
{  
    // wait for correct available data length, should be a VERY short wait  
    while (fifoCount < packetSize) fifoCount = mpu.getFIFOCount();  
  
    // read a packet from FIFO  
    mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer, packetSize);
```

```

// track FIFO count here in case there is > 1 packet available
// (this lets us immediately read more without waiting for an interrupt)
fifoCount -= packetSize;

mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
input = ypr[1] * 180 / M_PI + 180;
//Serial.println(input);
}
}

```

## **Висновки**

Основним завданням в даній роботі був синтез системи управління нестійким маятником на платформі з метою стабілізації його вертикального положення.

В ході роботи була складена математична модель системи. За допомогою даної моделі стало можливо вивчення руху подібних нестійких систем з іншими параметрами та для інших об'єктів.

Для проведення комп'ютерного моделювання система нестійкий маятник – платформа була представлена у вигляді комп'ютерної моделі в середовищі Matlab Simulink. В процесі синтезу системи управління були обрані модальний і оптимальний регулятор, що містять кожен по 4 зворотні зв'язки по повному вектору змінних стану.

Так як в системі змінних стану присутні змінні, що представляють складність для безпосереднього вимірювання, в роботі проведено синтез спостерігача пристрою.

Метою синтезу модального і оптимального регуляторів було забезпечення стійкого перехідного процесу. В проекті досліджена чутливість системи до змін параметрів об'єкта управління з метою оцінки грубості регулятора.

При варіюванні параметрів об'єкта і регуляторів експериментально знайдено оптимальні значення системи вимірювання, при яких спроектована модель залишається стійкою і відповідає вимогам до перехідного процесу при досить великих початкових значеннях кута відхилення маятника від вертикалі (приблизно  $12^{\circ}$ ).

## Література

- 1) ) Андрієвський Б.Р. Глобальна стабілізація нестійкого маятника з маховичним рівнянням / Б.Р. Андрієвський// УБС. – 2009. – 24. – С. 258-280.
- 2) Борців Ю. А., Второв В. Б. Математичні моделі і методи алгебри розрахунку автоматичних систем. Учеб. посібник. СПб .: ЦІ. 1992. 79 с.
- 3) Дослідження лінійних систем в середовищі MATLAB / SIMULINK: Метод. вказівки до лаб. робіт з дисципліни "Теорія управління" / Упоряд .: А. А. Бурмістров, В. Б. Второв, І. А. Приходько, О. Е. Якупов. СПб .: Видавництво СПбГЕТУ "ЛЕТІ", 2004. 24 с.
- 4) Крутько П.Д. Стабілізація стану рівноваги маятника, нагруженого слідкуючою і консервативною силами / П.Д. Крутько. В.Е. Палаш // Изв. РАН. ТіСУ. 2009. -№ 2. – С. 3-17.

5) Панкін Д.О., Жукова Н.В. Дослідження комбінованих методів управління нелінійними нестійкими механічними об'єктами. Розглянуто застосування гібридного методу, що сполучає традиційні і розвинуті стратегії управління, для стабілізації інвертованого маятника, що представляє собою приклад хитливої системи

- 6) <https://studfile.net/preview/936395/page:2/>
- 7) <https://docplayer.ru/75979154-Vypusknaya-kvalifikacionnaya-rabota-bakalavra.html>
- 8) <http://butikov.faculty.ifmo.ru/Russian/ParamPendulumKIO.pdf>
- 9) <https://habr.com/ru/post/306456/>
- 10) <http://www.unn.ru/site/images/docs/monography/2010/naemark.pdf>

