

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Ю.В. Киричук
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Анемометр з покращеними характеристиками»

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ПМ-11мп

Пигуля Артем Вікторович _____

Науковий керівник: к.т.н., доцент

Литвиненко Павло Леонідович _____

Консультант з розробки стартапу:

завідувач кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф.

Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент: к.т.н., доцент

Синиця Валентин Іванович _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2022 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність –151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма -«Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ю.В. Киричук
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

1. Тема дисертації «Анемометр з покращеними характеристиками», науковий керівник дисертації Литвиненко Павло Леонідович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «9» 11.2022 р. № 4110-с
2. Термін подання студентом дисертації «17» грудня 2022 р.
3. Об'єкт дослідження : Анемометр чашечний;
4. Вихідні дані : Діапазон робочої температури середовища від 0 ° С до 100°, тип анемометра – чашковий; кількість чашок – чотири;
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: розробка математичної моделі, визначення кількісних характеристик елементів вимірювального контуру, розробка мікропроцесорного вимірювача кутової швидкості, розробка стартап-проекту.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: складальні креслення, алгоритм розрахунків, загальний вигляд, кінематична схема, динамічна та структурні схеми.
7. Орієнтовний перелік публікацій
8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту “Анемометр з покращеними якостями”	завідувач кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф. Бояринова К.О.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Одержати у керівника магістерської дисертації (МГ) затвердженого завідувачем кафедри завдання на МГ	05 вересня 2022 р.	
2.	Виконання пояснювальної записки МГ	05 жовтня 2022 р.	
3.	Виконання технологічного розділу МГ, передача на перевірку та одержання підпису консультанта	05 жовтня 2022 р.	
4.	Виконання графічних матеріалів МГ	15 жовтня 2022 р.	
5.	Подання керівнику для перевірки: МГ та тексту його остаточного варіанту в електронному вигляді, одержання відгука на МГ	18 листопада 2022 р.	
6.	Одержання рецензії на МГ	18 грудня 2022 р.	
7.	Подання МГ на кафедру, одержання грифу «До захисту допущено» у завідувача кафедри	18 грудня 2022 р.	
8.	Подання МГ, відгука та рецензії в екзаменаційну комісію університету	18 грудня 2022 р.	
9.	Захист дипломного проекту в екзаменаційній комісії університету	20 грудня 2022 р.	
10.	Подання повної електронної версії МГ на кафедру для розміщенню в ELAKPI	20 грудня 2022 р.	

Студент _____

Артем Вікторович Пігуля

Науковий керівник _____

Павло Леонідович Литвиненко

Реферат

Магістерська дисертація містить в собі вступ, шість розділів, висновки та перелік посилань. Диплом включає в себе 110 сторінки, в тому числі 13 рисунків та перелік посилань.

Магістерська дисертація присвячена розробці комп'ютерної системи контролю швидкості повітряного потоку на підприємствах залізобетонних виробів. Даний прилад встановлюється у пропарювальних камерах при виробництві залізобетону та призначений для вимірювання невеликих швидкостей водяної пари (до 17 м/с) та діапазону температур від 0 до 100°C з подальшою передачею даних у систему автоматичного контролю. Також може застосовуватися як у підприємствах, і під час проведення науково-експериментальних робіт із необхідністю виміру швидкості напору повітряного потоку.

У проектно-дослідному розділі проведено роботи з розробки статичної та динамічної структурних схем, кінематичної схеми, розрахунку розрахункових характеристик та основних деталей приладу.

У розділі стартап-проекту було проведено аналіз ринку та запропоновані найкращі шляхи для його реалізації.

Abstract

Master's thesis to take part in your own entry, six divisions, visnovki and cross-posting. The diploma includes 110 sides, including 13 drawings and cross-posting.

The master's thesis is dedicated to the development of a computer system for controlling the windage of the overhead flow at the enterprises of reinforced concrete screeds. This attachment is installed at steaming chambers when vibrating concrete and slabs and is intended for vibrating small water steam rates (up to 17 m/s) and a temperature range of 0 to 100°C with a distant transmission of data to an automatic control system. It is also possible to zastosovuvatisya like in enterprises, and for an hour of carrying out scientific and experimental work, due to the need for vimir security against the pressure of the flow.

At the design-final division, work was carried out on the development of static and dynamic structural schemes, kinematic schemes, the design of the design of the design characteristics and the main parts of the fixture.

At the distribution of a start-up project, an analysis of the market was carried out and the best ways were promoted for its implementation.

ЗМІСТ

Вступ	8
1. Огляд та аналіз аналогів об'єкта проектування.....	9
2. Розробка математичної моделі анемометра.....	16
2.1. Структурна схема приладу	16
2.2. Передавальна функція.....	20
2.3. Кінематична схема приладу.....	22
2.4. Математична модель анемометра	24
2.5. Загальне рішення диференціального лінійного рівняння другого порядку постійними коефіцієнтами та з правою частиною.....	31
3. Визначення кількісних характеристик елементів вимірювального контуру	38
3.1. Розрахунок чашкової вертушки.	38
3.2. Оптимізаційний розрахунок рухомої системи вимірника.....	41
3.3. Розрахунок моментної спіральної пружини	45
4. Аналіз отриманих результатів щодо розрахунку характеристик приладу.....	49
4.1. Статична характеристика.....	49
4.2. Динамічна характеристика.....	50
4.3. Аналіз-температурної помилки вимірника	57
4.4. Аналіз мультиплікатора відлікового пристрою	63
4.5. Аналіз точності мультиплікатора.	65
4.6. Визначення характеристик надійності анемометра.	68
4.7. Аналіз відлікового пристрою.....	72
5. Розробка мікропроцесорного вимірювача кутової швидкості	74
5.1. Функції МПС у цьому вимірнику.....	75
5.2. Вибір МПС.....	77
5.3. Розширення каналу введення-виводу (за необхідності зняття інформації від групи однотипних датчиків).....	78
6. Розроблення стартап-проекту “Анемометр з покращеними якостями”	
80	
6.1. Опис ідеї проекту.....	80

6.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	86
6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	87
6.4. Ринкова стратегія проекту.....	99
6.5 Маркетингова програма стартап-проекту	103
Висновки	108
Перелік посилань	109

ВСТУП

В даний час широка увага приділяється створенню та висвітленню серійного випуску автоматичних засобів технічної діагностики машин та обладнання, засобів неруйнівного контролю, комплексів нових приладів перевірки якості продукції, контролю та регулювання паливно-енергетичних ресурсів.

Виникає необхідність створення додаткових засобів вимірювання, які б визначали режим або умови, за яких веде роботу основний засіб вимірювання або технічний засіб.

Всі ці обставини вимагають удосконалення старого комплексу датчиків та приладів чи розробки нових.

У народному господарстві існує чимало галузей, порядок роботи яких залежить від погодних умов, тому існує необхідність у створенні засобів вимірювання, які б здійснювали їх вимірювання.

Ця робота присвячена розробці комп'ютерної системи контролю швидкості повітряного потоку на підприємствах залізобетонних виробів. Якщо ж засіб вимірювання швидкості вітру встановлюється на об'єктах, що рухаються - швидкість вітру буде складатися з двох складових: власної швидкості руху об'єкта і швидкості вітру.

Таким чином, даний прилад для вимірювання швидкості вітру повинен крім вимог до точності, економічності та технологічності повинен задовольняти вимогам надійності, довговічності при роботі в різних кліматичних умовах, у тому числі і при роботі з підвищеною температурою і вологістю.

При проектуванні існує необхідність в обліку запасу на міцність, тому що прилад працює при мінливих навантаженнях, створюваних швидкісним тиском повітря.

1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТА ПРОЕКТУВАННЯ.

Вітром називають горизонтальне переміщення повітря щодо земної поверхні. Швидкістю вітру називають горизонтальну складову швидкість руху повітря відносно нерухомої точки земної поверхні.

Швидкість та напрямок вітру змінюються безперервно. Характер мінливості швидкості вітру залежить від метеорологічних умов і характеру місцевості. Миттєві значення швидкості вітру є нестійкими характеристиками вітру. Вони безперервно коливаються у середніх значень, стійких протягом досить великого відрізка часу.

Швидкість вітру прийнято усереднювати в десяти-хвилинному інтервалі часу (іноді у двох хвилинах). Миттєвою швидкістю прийнято вважати швидкість, що визначається внаслідок інерційності вимірюваного приладу за інтервал 2-5с.

Прилади для вимірювання швидкості вітру називаються анемометрами.

Розглянемо деякі конструкції приладів типу [3]:

а) Анемометр ручний чашковий з рахунковим механізмом МС – 13 (рис. 1)

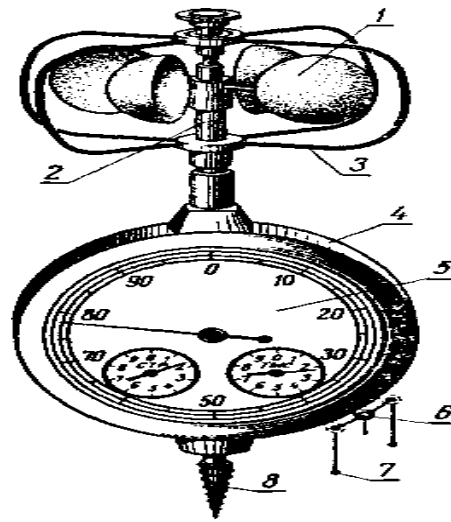


Рисунок 1 - Анемометр ручний чашковий з рахунковим механізмом
МС – 13:

1 - Чашкова вертушка; 2 - Захисна дужка; 3 – Вісь; 4 – Корпус; 5 – Кільце; 6 - Важель з кільцем; 7 – Шнури; 8 - Гвинт

Застосовується для вимірювання середньої швидкості вітру від 1 до 20 м/с (зазвичай за 10 хв). Чутливим елементом цього приладу є невелика вертушка з чотирма напівсферичними чашками 1. Вона укріплена на осі 3, обидва кінці якої упираються в агатові підшипники, на нижньому кінці осі є черв'як, що зв'язує вісь 3 з вхідним черв'ячним колесом механічного лічильника числа оборот. Редуктор лічильника складається із зубчастих коліс і пов'язаний із трьома стрілками, які при обертанні вертушки переміщуються за трьома шкалами.

Збоку з корпусу 4 виступає важіль 6 аретира лічильника, поворотом якого за годинниковою стрілкою лічильник включається проти годинникової - вимикається. Перемикання важеля 6, коли до нього безпосередньо не можна дістати рукою, здійснюється шнуром 7. Для цього з обох боків важеля є кільця,

через які протягують нитки шнура. За допомогою гвинта 8 можна встановити анемометр на дерев'яній поверхні (стовпі).

При вимірі швидкості вітру (10с) записують показання всіх стрілок через 20 – 30 с. Вимикають і знову записують.

Різниця показань лічильника ділять на число секунд, визначаючи середнє число дій за секунду. Середню швидкість у метрах за секунду знаходять по градуювальній кривій або таблиці, що є у перевірочному свідоцтві даного анемометра.

Похибка ($0,3 \pm 0,5V$) м/с, де V - значення вимірюваної швидкості. б) Анемометр ручний індукційний АРІ (рис. 2)

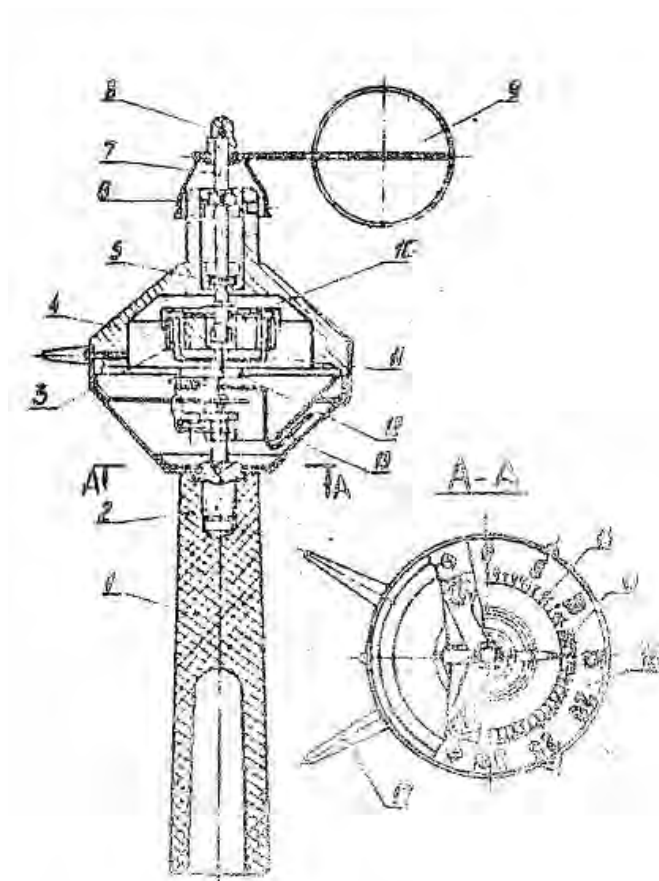


Рисунок 2 - Анемометр ручний індукційний АРІ

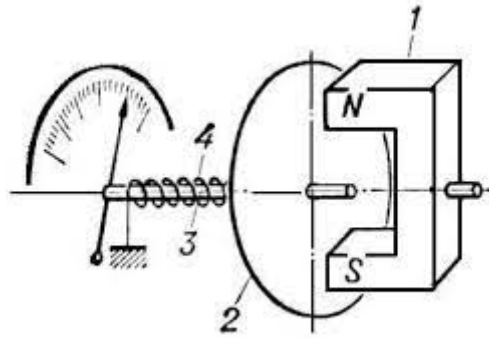


Рисунок 3 - Магнітний тахометр

Цей анемометр дозволяє виміряти середню (за 3 - 6 с) швидкість вітру від 2 до 20 м/с.

Первинним перетворювачем у цьому анемометрі служить трьох чашкова вертушка, посажена на вісь із магнітним тахометром. Анемометр зібраний у корпусі, у верхній частині якого укріплена трьох чашкова вертушка 1, а на нижньому кінці, в корпусі 2 - вторинний перетворювач, що є магнітним тахометром (рис 3). Останній складається з постійного магніту 7, магнітопроводу 8. На осі 6 посаджено металевий ковпачок 9 (з немагнітного матеріалу), спіральна магнітна пружина 10, кінець якої закріплений до стрілки 11.

У нижній частині корпусу є засклеєне вікно, через яке спостерігається шкала анемометра 3. Ручка 4 служить для утримання приладу під час вимірювання. На бічній поверхні є два штирі 5, на які прилад стійко спирається, коли його кладуть на площину.

При обертанні вертушки починає обертатися магніт 7. Вплив електричного поля (індукційного струму) і магнітного поля постійного магніту створює доданий до ковпачка момент $M_1 = K_1 n$, де n - частота обертання магніту (об/с) - коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструктивних особливостей тахометра.

Під впливом моменту M_1 ковпачок 9 починає повертатися разом з віссю б, закручуючи пружину 10. При цьому пружина створює протидіє момент $M_2 = k_2 \varphi$, де φ - кут повороту ковпачка 9 на ост б (кут закручування пружини) K_2 - коефіцієнт, що залежить від конструкції пружини. Момент виміру настає, коли $M_1 = M_2$.

Анемометр завдяки інертності його рухомої системи усереднює результати вимірювань (інтервал усереднення 5-6 с). Похибка вимірів $\pm (0,5 \text{ ч } 0,05 \text{ V}) \text{ м/с}$.

в) Анемометр чашковий контактний М-25 (рис 4)

1. Черв'як.
2. Кулачок.
3. черв'ячне колесо.
- 4.,5. Контактні пластини.
6. Собачка.
7. Клема.
8. Муфта.

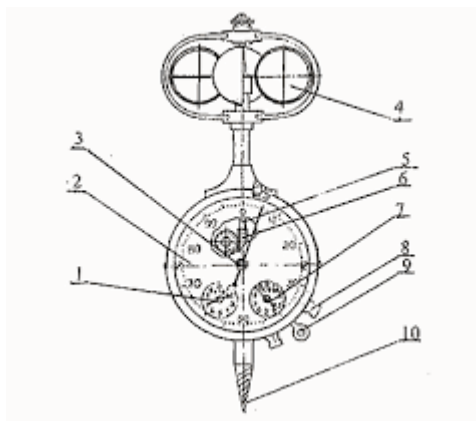


Рисунок 4 - Анемометр чашковий контактний М – 25

Призначений для експедиційних робіт. Його вертушка має три чашки. Вісь вертушки встановлена у двох шарикопідшипниках. У нижній частині осі є черв'як 1, зчеплений з черв'ячним колесом 3. З черв'ячним колесом вільно посаджений на вісь пластмасовий кулачок 2. Зчеплення кулачка 2 з колесом 3 здійснюється за допомогою храпового механізму і пружинної собачки 6. Профіль кула. На поверхні кулачка спираються щупи двох контактних пластин 4 і 5 нормально розімкнутої контактної групи, укріпленої на корпусі приладу.

Контактна група анемометра замикається і миттєво розмикається, перебування її в замкнутому стані короткочасно. Обертання кулачка 2 може відбуватися тільки проти годинникової стрілки. Коли чашкова вертушка обертається під впливом вітру, черв'ячне колесо 3 обертається проти годинникової стрілки, і пружинний песик 6, зачепивши зуб храпового колеса, починає його (разом з кулачком) обертати (проти годинникової стрілки). На корпусі анемометра є дві ізольовані від нього клеми 7, які з'єднуються з пластинами 4 і 5. До цих пластин - клем підключаються дроти, що з'єднують анемометр з лічильником і реєстратором, і джерелом живлення. Анемометр може встановлюватися на щоглах будь-якої висоти, де він зміцнюється за допомогою муфти 8 з гвинтом.

Анемометр М-25 має високу початкову чутливість - до 0,3 м/с. Прилад розрахований для вимірювання швидкості 15 м/с.

г) Електромеханічний самописець М-45.



Рисунок 5 - Електромеханічний самописець М-45

Призначений для безперервної дистанційної реєстрації напрямку та середньої швидкості вітра. Живлення від мережі змінного струму (127/220 В, 50 Гц).

В основу конструкції самописця М-45 покладено принцип дистанційної передачі кутів за допомогою безконтактних сельсинів (БД – 404 та БС – 404) у поєднанні з тахометром середньої швидкості та спеціальним пристроєм для реєстрації напрямку вітру.

Самописець вітру складається з блоку датчиків швидкості та напрямку вітру та реєстратора, що з'єднуються 8-жильним кабелем зі штепсельними роз'ємами.

Довжина кабелю становить 100 м. Блок датчиків вітру конструктивно виконаний в одному корпусі, в якому знаходяться два сельсин-датчики БД-404. Один сельсин-датчик, з'єднаний з віссю 2 флюгарки за допомогою зубчастої передачі, передає кут повороту флюгарки від датчика до реєстратора. Другий сельсин-датчик, з'єднаний через редуктор з віссю трьох вертушки, передає кут повороту вертушки від датчика до реєстратора. Реєстратор самописця змонтований у металевому корпусі, що має з лицьового боку зашклені дверцята. Реєстратор складається з трьох основних вузлів:

- 1) опосередкування та реєстрації швидкості вітру;

- 2) реєстрації напрямку вітру;
- 3) стрічко-протяжного механізму.

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АНЕМОМЕТРА

2.1. Структурна схема приладу

Проектування комп'ютерної системи контролю швидкості повітря починаємо з розробки структурної схеми, яка відображає сукупність перетворювачів, що здійснюють елементарні перетворення сигналів, що дозволяє відобразити статичні та динамічні передатні властивості.

Динамічною структурною схемою називається схема, що показує залежність між операторами, виражену через передавальні функції. Схема дозволяє вивчити динаміку анемометра, оскільки вона відбиває його динамічні властивості.

Для аналізу статичної характеристики анемометра необхідно скласти статичну структурну схему, яка вважається динамічною тим, що в передавальних функціях ланок необхідно прийняти $p = 0$.

Статична та динамічна структурні схеми анемометра представлені в графічній частині.

Визначимо передавальні коефіцієнти кожного перетворювача. Першим вхідним перетворювачем є чашкова вертушка. Під впливом вітру вертушка починає розкручуватися. Спочатку вона рухається з прискоренням, але зі збільшенням швидкості обертання чашок тиску вітру на опуклі сторони зростає, а на увігнуті зменшується. При деякій швидкості обертання чашок настає рівновага, а швидкість обертання стає постійною.

Вхід першого перетворювача є лінійне переміщення вітру 5, а виходом - кутове переміщення центру чашок β .

Передавальний коефіцієнт вертушки.

$$K_1 = -\frac{\beta}{5}$$

Кутове переміщення β надходить на вхід другого перетворювача генератора, входом якого є частота струму f , яка надходить на вхід третього перетворювача синхронного двигуна. Виходом останнього є кутове переміщення β .

Передавальний коефіцієнт другого та третього перетворювачів.

$$K_2 \cdot K_3 = 1$$

Перш ніж виводити передавальний коефіцієнт для четвертого перетворювача, розглянемо докладніше принцип цього перетворювача. Кутове переміщення β надходить на перетворювач 4 магніт-ковпачок. При обертанні магніт в немагнітному ковпачку наводяться вихрові струми (струми Фука), магнітне поле, яких, взаємодіючи з полем магніту, створює обертовий магнітоіндукційний момент M_v , під дією якого ковпачок провертається в напрямку обертання магніту на деякий кут α , закручуючи протидіючий момент M_p . Таким чином, на вхід перетворювача надходить кутове переміщення β , а на виході отримує крутний момент M_v .

Передавальний коефіцієнт перетворювача

$$K_4 = M_v / \beta, \text{ де } M_v = \beta.$$

$$\text{Тоді } K_4 = \frac{F_0 d\beta}{\beta dt}$$

Ввівши оператор диференціювання $p = d/dt$, запишемо передавальний коефіцієнт в операторній формі у вигляді передавальної функції:

$$W_4 = \frac{F_0 d\beta}{T_1 p + 1},$$

де F_0 - коефіцієнт пропорційності магнітоіндукційного перетворювача, T_1 - постійна часу.

На вхід п'ятого (ідеального) перетворювача з чутливістю рівної нескінченності ($S = \infty$) надходить кутове переміщення α , а виходом є момент сил інерції M_I рухомої системи вимірювача.

$$K_5 = \frac{\alpha}{M_I}, \text{ де } M_I = I \Delta^2 / \Delta T^2.$$

Ввівши оператор диференціювання $p^2 = d^2 / dt^2$, запишемо передатне відношення в оперативній формі у вигляді передавальної функції.

$$W_5(p) = 1 / p^2$$

Моментоіндукційний момент, що обертає, M_B повертає ковпачок і при цьому закручує спіральну пружину (волосок) – перетворювача 6, виходом якого є протидіючий момент $M_P = C\alpha$,

де C - Коефіцієнт жорсткості пружини.

Коефіцієнт передачі спіральної пружини

$$K_6 = M_P / \alpha = C\alpha / \alpha = C.$$

Сукупність перетворювачів, такого як магніт, ковпачок та спіральної пружини утворює диференціальний елемент, що виконує операцію диференціювання кутового переміщення β за часом t , тобто $d\beta / dt = \Omega$, де Ω - кутова швидкість моменту.

Сьомий перетворювач - магнітоіндукційний перетворювач (демпфер).

Момент заспокоєння у вимірнику з магнітоіндукційним диференціатором створюється самим диференціатором (природне заспокоєння без додаткового демпфера), так як при коливанні ковпачка щодо обертового магніту в ковпачку виникають додаткові вихрові струми, що утворюють додаткове магнітне поле, що перешкоджає колі. . Таким чином, магнітоіндукційні диференціатори одночасно є магнітоіндукційними заспокійниками. Перевагою магнітоіндукційних заспокійників є те, що вони не мають тертя спокою. Як тільки ковпачок перестане вагатися. Заспокійливий момент зникає. Тому в статичних умовах перетворення на вхід магнітоіндукційного заспокійника кут α і виходом магнітоіндукційного заспокійника є той же кут α .

Передавальний коефіцієнт магнітоіндукційного заспокійника

$$K_7 = \alpha / \alpha = 1$$

Якщо прийняти кут повороту α ковпачка аз вхідну величину, а M_y - заспокійливий момент заспокійника магнітоіндукційного (диференціатора) - за вихідну величину, то передатна функція магнітоіндукційного заспокійника

$$W_7(P) = \frac{M_y(P)}{\alpha(P)} = \frac{F_0 P}{T_2 P + 1}.$$

Восьмий перетворювач - відліковий пристрій, вхідний величиною якого є кут α вказівника (стрілки) а вхідною величиною - число відліку N_1 за першою шкалою, що відповідає деякому значенню вимірюваної величини або вказує порядковий номер позначки шкали [3 стор.].

Передавальний коефіцієнт відлікового пристрою

$$K_8 = N_1 / \alpha .$$

Дев'ятий перетворювач - мультиплікатор, входом якого є кут повороту α , а виходом 10α

$$K_9 = 10\alpha / \alpha = 10$$

Десятий перетворювач - другий стрілочний відліковий пристрій, вхідний величиною якого є кут відхилення 10 α другого покажчика (стрілки), а вихідний величиною - число відліку за другою шкалою,

$$K_{10} = N_2 / \alpha .$$

Загальний передатний коефіцієнт тахометра у статичних умовах перетворення.

$$K_{1-8} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8 = \frac{M_B \cdot C \cdot N_1}{S\alpha} = \frac{\Omega F_0 C N_1}{S\alpha}$$

2.2. Передавальна функція

Наявність в кінематичній схемі анемометра, перетворювача магніт-ковпачка, в якому відбувається магнітоіндукційні процеси, що вимагає певного часу, а саме - утворення струмів Фуко при русі магнітів і утворення полів, взаємодія цих магнітних полів з полями постійних магнітів, а також рухомих мас (ковпачка , спіральної пружини, зубчастих коліс, покажчиків), яким також потрібен деякий час для повороту з одного положення в інше, призводить до інерційності тахометрів.

Інерційність є важливою характеристикою, що веде до виникнення динамічних похибок, що є складовими сумарної похибки. При повільному по відношенню до вимірювальної системи тахометра зміні вимірюваної швидкості цією похибкою можна знехтувати. Однак при швидких змінах швидкості, що вимірюється, похибка стає значною і часто настільки великою, що результат вимірювання є абсолютно неприйнятним.

Властивість протилежна інерційності називається швидкодією.

Знаючи закон руху магнітного вузла та передатну функцію, можна визначити і закон руху стрілки відлікового пристрою та за необхідності внести відповідні зміни до конструкції анемометра.

Динамічна структурна схема дозволяє вивчити динаміку приладу, оскільки вона є відображенням його динамічних властивостей і фактично є графічне умовне зображення диференціального рівняння анемометра, записане в оперативній формі Лапласа при нульових початкових умовах.

Маючи динамічну структурну схему анемометра, представлену на аркуші графічної частини дипломного проекту та керуючись правилами визначення передавальних функцій, складемо передавальну функцію рухомої системи вимірювання з ковпачковим магнітоіндукційним диференціатором.

Еквівалентна передатна функція перетворювачів 5, 6 та 7 рухомої системи вимірювання при зустрічно-паралельному з'єднанні:

$$W(P) = \frac{\alpha(P)}{M_B(P)} = \frac{1/Ip^2}{1 + (1/p^2)(\frac{Fp}{T_2p+1} + C)}$$

Перетворювачі 6 і 7 включені в ланцюг негативного зворотного зв'язку, тому знаменнику стоїть знак плюс /+/.

Помноживши чисельник на знаменник Ip^2 , отримаємо

$$W(p) = \frac{\alpha(p)}{M_B(p)} = \frac{1}{Ip^2(F_p/T_2p+1)+C}$$

Помноживши чисельник і знаменник на (T_2p+1) , отримаємо -

$$W(p) = \frac{\alpha(p)}{M_B(p)} = \frac{T_2p}{IT_2p^3 + Ip^2(CT_2 + F)p + C}$$

З урахуванням перетворювача 4 передавальна функція набуде вигляд

$$W(p) = \frac{\alpha(p)}{\Omega(p)} = \frac{F_0(T_2p+1)}{(T_1p+1)[IT_2p^3 + Ip^2 + (CT_2 + F)p + C]} \quad (1.2)$$

де α - кут повороту стрілки; Ω – кутова швидкість магнітного вузла; I – момент сил інерції рухомої системи вимірювача; F_0 - коефіцієнт природності пружини (волоска), T_1 - постійна часу магнітоіндукційного диференціатора (заспокоювача); T_2 - Постійна часу інерційного моменту системи вимірювача; $F = F_0 + F_1, F_1$ - Коефіцієнт заспокійника додаткового заспокоювача.

2.3. Кінематична схема приладу.

Для повного та наочного уявлення про принцип роботи комп'ютерної системи контролю швидкості потоку повітря, на додаток до структурної схеми, розроблено кінематичну схему, представлену в графічній частині дипломного проекту.

Прилад складається із двох частин:

- датчиків швидкості вітру (ДШВ) та температури;

- вимірювача, побудованому на ковпачковому магніто-диференціувальному елементі.

Вітер, швидкість якого вимірюється, розкручує вертушку 1, яка пов'язана з синхронним генератором 2 валом І. Вертушка служить для перетворювача лінійної швидкості вітру в кутову швидкість обертання валу. При обертанні ротора 2 генератора в обмотках статора 3 його збуджується трифазний струм з частотою, пропорційної швидкості обертання ротора. Струм за трьома проводами 4 підводиться до обмоток статора 5 синхронного двигуна. Швидкість обертання магнітного поля статора синхронного електродвигуна пропорційна частоті струмів у фазових обмотках статора і, отже, пропорційна швидкості обертання ротора генератора. Вал ротора синхронного електродвигуна обертається зі швидкістю, синхронною обертанням магнітного поля статора. На кінці валу ротора 6 електродвигуна закріплений магнітний вузол диференціатора, що складається з постійного

циліндричного магніту 9, розподіленого всередині магнітного екрану 10, термомагнітного шунта 11. Поміщеного в торці магніту і жорстко скріпленого з магнітом і екраном. У кільцевому зазорі, утвореному магнітом і магнітним екраном, поміщений ковпачок 12 з немагнітного струмопровідного матеріалу (алюмінієво-марганцевого сплаву або марганцевої бронзи), що охоплює з невеликим зазором постійний магніт. У зазорі між ковпачком та екраном поміщений концентратор магнітного поля 13.

Для забезпечення входження двигуна в синхронізм на роторі синхронного двигуна гістерезисний диск 6 асинхронного запуску двигуна і магніт 7.

Магніт пов'язаний із віссю за допомогою пружини 8. Таким чином. У міру збільшення швидкості обертання двигуна і наближення до синхронної швидкості обертання поля статора, магніт має можливість, випереджаючи ротор, увійти в синхронізм. Після входження в синхронізм магніт 7 закручуючи пружину плавно підтягує ротор двигуна до синхронної швидкості.

Принцип роботи магнітоіндукційного ковпачкового диференціатора полягає в наступному:

При кутастому переміщенні β магніту 9 в немагнітному ковпачку наводяться вихрові струми (струми Фуко), магнітне поле яких, взаємодіючи з полем постійного магніту 9, створює обертовий магнітноіндуціруючий момент M_B , який дорівнює коефіцієнту пропорційності помноженому на першу похідну кутового переміщення β по часу $M_B = F_0 d\beta / dt$. Так здійснюється операція диференціювання кутового переміщення β за часом t .

Під дією крутного моменту M_B ковпачок, що сидить на осі 14, повертається разом зі стрілкою 15 на деякий кут α , закручуючи при цьому дві спіральні пружини 16, внутрішні кільця яких закріплені на осі 14, а зовнішні - на важелі 17. на вісь, що виникає при закручуванні однієї спіральної пружини, замість однієї встановлено близько одна до одної дві пружини так, щоб їхні

зовнішні кінці знаходилися один проти одного. Для запобігання мимовільному повороту важіль 17 підпружинений тарілчастою пружиною. Кут α повороту рухомої системи тахометра в статичних умовах вимірювання визначається рівністю обертаючого магнітоіндукційного моменту M_v і протидіючого моменту M_p спіральної пружини (волоска). Стрілки 15 і 18 через індикаторну зубчасту передачу з коефіцієнтом передачі $\kappa_0 = z_4 \cdot z_6 / z_3 \cdot z_5 = 12 \cdot 13 / 40 \cdot 39 = 1/10$ взаємопов'язані залежністю $n_{15} = 10n_{18}$, отже, показання вимірювача пов'язані з відліками N_1 за шкалою 19 і за шкалою 20 залежністю, $\Pi = (N_1 + 0,1N_2)$ де K_{II} - постійна вимірювача.

До осі 14 приєднаний двигун однообертового потенціометричного перетворювача, який перетворює обертання осі 14 зміну напруги.

На датчику швидкості вітру розташований датчик температури, виконаний у вигляді термопари.

Напруга з термопари і потенціометричного перетворювача надходить в АЦП і далі в комп'ютерну систему контролю та автоматики.

2.4. Математична модель анемометра

Припустимо, що в момент часу $t = t_0 = 0$ швидкість кутового переміщення (надалі кутова швидкість) вхідного не валика, внаслідок вітру, стрибком зміниться від значення $\omega = \omega_0 = 0$ до значення $\omega = \omega_1$ і надалі залишається постійною ($\dot{\gamma} = \dot{\gamma} = 0$). Тоді кутова швидкість переміщення магніту 9 стрибком зміниться від значення $\Omega = \Omega_0 = 0$ до $\Omega = \Omega_1$ і буде постійною. При цьому рухома система вимірювача з початкового положення почне повертатися до положення рівноваги, що відповідає кутовій швидкості обертання магніту Ω_1 .

У реальних умовах коливання рухомої системи гасяться моментами тертя в опорах: тертям ковпачка, стрілки та інших частин рухомої системи повітря, силами внутрішнього тертя в матеріалі спіральних пружин, моментом заспокоєння магнітоіндукційних заспокійників, яким є магнітоіндукційний диференціатор. Отже, для точного розв'язання задачі з рухом рухомої системи вимірювача необхідно врахувати перераховані чинники.

Завдання виходить дуже складним, і рішення її у повному вигляді становить значні труднощі. З інженерної точки зору немає потреби враховувати всі перелічені фактори. Для простоти розв'яжемо ці завдання без урахування моменту тертя $M_{TP} = M_{1TP} + M_{2TP}$ в опорах рухомої системи та без урахування тертя рухомої системи про повітря. Враховуватимемо лише природне заспокоєння, створюване самими магнітоіндукційними диференціаторами, плюс заспокоєння, створюване додатковими магнітоіндукційними заспокійниками. У такому разі закон руху рухомої системи, вимірника запишеться у вигляді

$$J\ddot{\alpha} + F\dot{\alpha} + C\alpha = M_B \quad (1.3)$$

де $J\ddot{\alpha}$ - момент сил інерції рухомої системи, $\text{кг м}^2 \text{ рад с}^{-2}$; J - момент інерції рухомої системи щодо осі обертання, кг м^2 ; $\ddot{\alpha}$ - Кутове прискорення, рад с^{-2} ; $\dot{\alpha}$ - Момент заспокоєння, Н м ; F - коефіцієнт заспокоєння, чисельно рівний моменту заспокоєння при кутовій швидкості 1 рад с^{-1} ($\alpha=1$) Н м с/рад . Коефіцієнт заспокоєння самого магнітоіндукційного диференціатора під час використання додаткового магнітоіндукційного заспокійника дорівнює сумі коефіцієнтів заспокоєння $F = F_0 + F_1$, де F_0 - коефіцієнт природного заспокоєння самого магнітоіндукційного диференціатора з ковпачком; F_1 - Коефіцієнт заспокоєння додаткового магнітоіндукційного заспокоювача; α - кутова швидкість, рад с^{-1} ; 3α - момент пружини, Н м ; C - коефіцієнт жорсткості

пружини на згин, Н м. C - коефіцієнт жорсткості пружини на згин, Н м/рад; α - кут повороту рухомої системи, Мв - крутний момент, Н м.

Момент інерції рухомої системи вимірювача з ковпачком щодо осі обертання ковпачка складається з низки моментів інерції рухомих елементів. Отже, у разі необхідно визначити наведений момент інерції рухомий системи вимірювача. Наведений момент інерції – це умовний розрахунковий момент інерції рухомий системи вимірювача, яким має мати одне з ланок системи (ланка приведення). Щодо осі його обертання, щоб кінетична енергія цієї ланки дорівнювала сумі кінетичних енергій всіх ланок рухомої системи. Як ланка приведення зручно прийняти вхідну ланку рухомої системи – ковпачок.

Теоретично для нашого випадку наведений момент інерції $j = j_n$ можна визначити за такою формулою:

$$j_n = j_1 + j_2 + j_3 + j_4 + j_5 + j_{11} + \left(j_6 + j_7 + j_8 + (j_9 + j_{10}) \left(z_5 / z_6 \right)^2 \left(z_3 / z_4 \right)^2 \right) \quad (1.4)$$

I_1 - Момент інерції циліндра ковпачка щодо осі обертання 00 (див. рис. креслення), визначається за залежністю

$$j_1 = 2^{-1} \cdot \pi \gamma_1 \varepsilon_1 (r_1^2 - r_2^2) (r_1^2 + r_2^2) \quad (1.5)$$

де ν_1 - щільність матеріалу циліндра, кг M^{-3} ; ε_1 - довжина циліндра, м ; r_1 і r_2 - відповідно зовнішній і внутрішній радіус циліндра, м.

j_2 - момент інерції диска щодо осі 00:

$$j_2 = 2^{-1} \pi \gamma_2 \varepsilon_2 r_2^4 \quad (1.6)$$

де ν_2 - щільність матеріалу диска, кг m^{-3} ; ε_2 - Товщина диска, м.

Сума моментів $j_1 + j_2$ є моментом інерції ковпачка.

I_3 - момент інерції осі. j_3 складається з моментів інерції трьох циліндрів із радіусом r_3 і r_4 , і r_5 , і завдовжки ε_3 , ε_4 і ε_5 .

$$I_3 = 2^{-1} \pi \gamma_3 (r_3^4 \varepsilon_3 + r_4^4 \varepsilon_4 + r_5^4 \varepsilon_5) \quad (1.7)$$

ν_3 - щільність матеріалу осі, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

I_4 - момент інерції втулки, до якої кріпляться спіральні пружини, щодо осі O_1O_1 :

$$I_4 = 2^{-1} \pi \gamma_4 \varepsilon_6 (r_6^4 - r_3^2)(r_6^2 + r_3^2) \quad (1.8)$$

де ν_4 - щільність матеріалу втулки, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; ε_6 - Довжина втулки, м, r_6 , r_3 - відповідно зовнішній і внутрішній радіуси втулки, м.

I_5 - момент інерції колеса з числом зубів $z_3 = 40$, $m=0,25$ мм і маточкою щодо осі O_1O_1 :

$$I_5 = I_{51} + I_{52} \quad (1.9)$$

I_{51} - момент колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ будемо вважати приблизно, що момент інерції колеса дорівнює моменту інерції диска з радіусом, рівним радіусу ділового кола колеса:

$$I_{51} = 2^{-1} \pi \nu_5 \varepsilon_7 (r_7^2 - r_8^2)(r_7^2 + r_8^2) \quad (1.10)$$

I_{52} - момент інерції маточини колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$:

$$I_{52} = 2^{-1} \pi \nu_6 \varepsilon_8 (r_8^2 - r_9^2)(r_8^2 + r_9^2) \quad (1.11)$$

де ν_6 - щільність матеріалу колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ε_8 - Довжина маточини, м, r_8 , r_9 - зовнішній і внутрішній радіуси маточини, м.

I_6 - момент інерції колеса з числом зубів $z=12$, $m=0,25$ мм і маточкою щодо осі:

O_1O_1 :

$$I_6 = I_{61} + I_{62} \quad (1.12)$$

I_{61} - момент інерції колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$$I_{61} = 2^{-1} \pi \nu_7 \varepsilon_9 (r_{10}^2 - r_{11}^2)(r_{10}^2 - r_{11}^2) \quad (1.13)$$

де ν_7 - щільність матеріалу колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ε_9 - товщина колеса,

$m r_{10} = m z_4 / 2$ - радіус ділового кола колеса, м, r_{11} - радіус отвору колеса, м

I_{62} - момент інерції маточини колеса, кг

$$I_6 = 2^{-1} \pi \nu_7 \varepsilon_{10} (r_{12}^2 - r_{11}^2)(r_{12}^2 - r_{11}^2) \quad (1.14)$$

де ν_7 - щільність матеріалу маточини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ε_{10} - довжина ступиці, м,

r_{10} , r_{11} - зовнішній внутрішній радіуси ступиці, м

I_7 - момент інерції осі коліс щодо осі $O_1 O_1$.

I_7 - складається з моментів інерції двох циліндрів з радіусами r_{13} і r_{11} довжиною $2\varepsilon_{11}$ і ε_{12} відповідно.

$$I_7 = 2^{-1} \pi \nu_8 (r_{13}^4 \cdot \varepsilon_{11} + r_{11}^4 \cdot \varepsilon_{12}) \quad (1.15)$$

де ν_8 - щільність матеріалу осі, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, I_8 - момент інерції колеса з числом зубів $z_5 = 39$, $m = 0.25$ мм і ступицею щодо осі $O_1 O_1$

$$I_8 = I_{81} + I_{82} \quad (1.16)$$

I_{81} - момент інерції колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$

$$I_{81} = 2^{-1} \pi \nu_9 \varepsilon_{13} (r_{14}^2 - r_{15}^2)(r_{14}^2 + r_{15}^2) \quad (1.17)$$

де ν_9 - щільність матеріалу колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ε_{13} - товщина колеса, м,

$r_{14} = m z_5 / 2$ - радіус ділового кола колеса, м, r_{15} - радіус отвору колеса, м

$$I_{81} = 2^{-1} \pi \nu_{10} \varepsilon_{14} (r_{15}^2 - r_{11}^2)(r_{15}^2 + r_{11}^2) \quad (1.18)$$

де ν_{10} - щільність інерції маточини, ν_{10} - щільність матеріалу маточини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$,

ε_{14} - довжина маточини, м

r_{15}, r_{11} - зовнішній і внутрішній радіуси маточини, м,

I_9 - момент інерції колеса з числом зубів $z_6 = 13$, $m = 0,25$ і маточкою щодо осі 00:

$$I_9 = I_{91} + I_{92} + I_{93} \quad (1.19)$$

I_{91} - момент інерції колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$

$$I_{91} = 2^{-1} \pi \nu_{11} \varepsilon_{15} (r_{16}^2 - r_{17}^2)(r_{16}^2 + r_{17}^2) \quad (1.20)$$

де ν_{11} - щільність матеріалу колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ε_{15} - товщина колеса, м,
 $r_{16} = mz_6 / 2$ - радіус ділового кола колеса, м, r_{17} - радіус отвору колеса, $\text{м} \cdot \text{м}^2$

I_{92} - момент інерції товстої частини маточини, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$

$$I_{92} = 2^{-1} \pi \nu_{12} \varepsilon_{16} (r_{17}^2 - r_{18}^2)(r_{17}^2 + r_{18}^2) \quad (1.21)$$

де ν_{12} - щільність матеріалу маточини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, ε_{16} - довжина товстої частини маточини, м, r_{17}, r_{18} - зовнішній і внутрішній радіуси товстої частини маточини, м,

$$I_{93} = 2^{-1} \pi \nu_{12} \varepsilon_{17} (r_{19}^2 - r_{18}^2)(r_{19}^2 + r_{18}^2) \quad (1.22)$$

де ε_{17} - Довжина тонкої частини маточини, м, r_{19} , r_{18} - зовнішній і внутрішній радіуси тонкої частини маточини, м. I_{10} - момент інерції малої стрілки щодо осі 00:

$$I_{10} = I_{101} + I_{102} \quad (1.23)$$

I_{101} - момент інерції малої стрілки, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$

I_{102} - момент інерції маточини стрілки, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$

Коефіцієнт пропорційності магнітоіндукційного диференціатора та коефіцієнт природного заспокоєння магнітоіндукційного заспокійника м

ковпачком, що складається з постійного магніту, що обертається з кутовою швидкістю $d\beta/dt = \Omega$ всередині ковпачка 2, визначаються залежністю:

$$F_0 = \frac{B^2 D^2 e \delta_n m_n}{\pi \rho} \ln \left[1 + \frac{\pi B_n}{2(a_n + l)} \right] \quad (1.24)$$

де B - магнітна індукція в робочому зазорі $T_{л}$ або $B \cdot c \cdot c^{-2}$; D - діаметр магніту, м, l - довжина полюса магніту, м, δ_k - товщина ковпачка, м. P_m - число пар полюсів магніту, ρ - питомий електричний опір матеріалу ковпачка, a_n - відстань між полюсами, B_n - ширина полюса магніту, м

$$a_n = 0,3\pi D / 2P_m \quad (1.25)$$

$$B_n = 0,7\pi D / 2P_m \quad (1.26)$$

де $2P_m$ - число полюсів магніту.

Коефіцієнт жорсткості спіральної пружини на вигин, чисельно рівний моменту пружини при куті її закручування однією радіан, т.е. $\varphi = 1$ рад,

$$C = EBh^3 \varphi / 12L \quad (1.27)$$

де E - модуль пружності матеріалу пружини, Па або Н/м²; b , h , L - відповідно ширина, товщина та розгорнута довжина пружини, м.

Протидіючий момент спіральної пружини

$$M_p = C \cdot \alpha \quad (1.28)$$

де α - кут закручування пружини, рад. При розрахунку пружин використовуємо матеріали [6, стор. 350, 8 стор 117]

Обертальний момент, що діє на ковпачок, визначається залежністю:

$$M_B = F_0 d\beta / dt \quad (1.29)$$

де F_0 - коефіцієнт пропорційності магнітоіндукційного диференціатора з ковпачком, $H \cdot м \cdot c / рад$.

$d\beta/dt=\Omega$ - швидкість кутового переміщення магніту, рад/с.

Прирівнявши праві частини M_v і M_p , отримаємо статичну характеристику вимірювача з магнітоіндукційним диференціатором:

$$F_0\Omega = C\alpha \quad (1.30)$$

Підставивши значення коефіцієнта пропорційності F_0 ковпачкового магнітоіндукційного диференціатора і коефіцієнта жорсткості пружини C в (1.30), отримаємо статичну характеристику вимірювача, що являє собою залежність між встановленим значенням вхідної величини вимірюваної кутової швидкістю і вихідною величиною - кут α повороту стріл.

Статична характеристика вимірювача з ковпачковим магнітоіндукційним диференціатором визначається залежністю:

$$\alpha = \frac{12LB^2 D^2 e^2 \delta_K P_K}{\pi r E B h^3} \ln \left[1 + \frac{\pi B_n}{2(a_n + l)} \right] \Omega \quad (1.31)$$

2.5. Загальне рішення диференціального лінійного рівняння другого порядку постійними коефіцієнтами та з правою частиною.

Для встановлення закону руху рухомий системи вимірювача при переході її з одного положення в інше при зміні кутової швидкості Ω необхідно вирішити диференціальне лінійне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами і правою частиною.

Загальне рішення лінійного рівняння з правою частиною є сумою будь-якого приватного рішення та загального рішення відповідного рівняння без правої частини.

Відповідно до цього загальне рішення рівняння (1.3)

$$\alpha(t) = \alpha_{CT} + \alpha_0(t) \quad (1.32)$$

де $\alpha_{CT}(t)$ - приватне рішення рівняння (1.3); $\alpha_0(t)$ - загальне рішення рівняння (1.3) без правої частини.

Для статичних умов, коли $t \rightarrow \infty$, $\alpha = \dot{\alpha} = 0$ приватне рішення рівняння (1.3) має вигляд:

$$\alpha_{CT}(t) = M_B / C \quad (1.33)$$

Знайдемо загальне рішення рівняння (1.3), коли права частина його дорівнює нулю:

$$1a + Pa + Ca = 0 \quad (1.34)$$

Перетворимо рівняння (1.34) в такий спосіб: розділимо на I і введемо позначення. Перетворене рівняння набуде вигляду:

$$\alpha + 2\varphi = 0 \quad \alpha \div W_0^2 \alpha = 0 \quad (1.35)$$

де $\varphi = F/2I$, $W_0^2 = C/I$

Використовуючи оператор диференціювання $p = d/dt$, отримуємо характеристичне рівняння

$$p^2 + 2\varphi p + W_0^2 = 0 \quad (1.36)$$

При вирішенні рівняння (1.36) можуть мати місце три випадки:

Випадок 1: $(F/2I)^2 > C/I$

Характеристичне рівняння (1.36) має два нерівні дійсні корені

$$K_{1,2} = -\frac{F}{2I} \pm \sqrt{\left(\frac{F}{2I}\right)^2 - \frac{C}{I}} \quad (1.37)$$

Загальне рішення рівняння (1.36) у цьому випадку має вигляд:

$$\alpha_0(t) = C_1 e^{K_1 t} + C_2 e^{K_2 t} \quad (1.38)$$

Підставивши (1.33) та (1.32), отримаємо рішення рівняння (1.3).

$$\alpha(t) = \frac{M_B}{C} + C_1 e^{K_1 t} + C_2 e^{K_2 t} \quad (1.39)$$

Визначимо постійні інтегрування C_1 і C_2 , виходячи з нульових початкових умов.

Для $t=0$ і $\alpha=0$ із (1.39) отримуємо:

$$0 = \frac{M_B}{C} + C_1 e^0 + C_2 e^0$$

$$\text{звідки } C_1 + C_2 = -M_B / C$$

Для $\alpha(0) = 0$ диференціюємо рівняння (1.39)

$$0 = 0 + K_1 C_1 e^{K_1 t} + K_2 C_2 e^{K_2 t}$$

Підставивши останнє рівняння $t=0$, маємо систему рівнянь із двома невідомими:

$$C_1 + C_2 = M_B / C$$

$$K_1 C_1 + K_2 C_2 = 0$$

звідки знаходимо

$$C_1 = -\frac{M_B}{C} \frac{K_2}{K_2 - K_1}; \quad C_2 = -\frac{M_B}{C} \frac{K_1}{K_2 - K_1};$$

Підставивши C_1 , і C_2 (1.39), отримаємо загальне рішення рівняння (1.3) для випадку (1):

$$C_1 = -\frac{M_B}{C} \left[1 - \left(\frac{K_2}{K_2 - K_1} e^{K_1 t} + \frac{K_1}{K_1 - K_2} e^{K_2 t} \right) \right] \quad (1.40)$$

З рівняння (1.40), в якому є негативний ступінь при e , видно, що в цьому випадку рухома система вимірювача без коливань плавно підходить до рівноваги. Такий рух рухомої системи вимірювача називається аперіодичним.

Загальне рішення рівняння (1.3) для випадку 1 при початкових ненульових умовах, коли $\alpha(0) = 0$; $\alpha(0) = M_B F / 2IC$ знайдемо так. Складемо систему рівнянь із двома невідомими, постійними інтегруваннями C_1 та C_2 виходячи з нових початкових умов.

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 &= M_B / C \\ K_1 C_1 + K_2 C_2 &= M_B F / 2IC \end{aligned}$$

звідки знаходимо постійні інтегрування C_1 та C_2 :

$$C_1 = M_B / 2C ; \text{ та } C_2 = -M_B / 2C .$$

Підставивши C_1 і C_2 (1.39), отримаємо загальне рішення рівняння (1.3) для випадку 1 с новими початковими умовами:

$$\alpha(t) = \frac{M_B}{C} \left[1 - e^{-Ft/2I} \operatorname{cht} \sqrt{\left(\frac{F}{2I}\right)^2 - \frac{C}{I}} \right]$$

Випадок 2: $(F/2I)^2 = C/I$. Характеристичне рівняння (1.36) має два рівні корені

$$K_1 = K_2 = -F / 2I \quad (1.41)$$

Загальне рішення рівняння (1.36) у цьому випадку має вигляд:

$$\alpha_0 = (t)(C_1 + C_2 t)e^{-Ft/2I} \quad (1.42)$$

Підставивши (1.33) і (1.42) (1.32), отримаємо загальне рішення рівняння (1.3):

$$\alpha(t) = M_B / C + (C_1 + C_2 t)e^{-Ft/2I} \quad (1.43)$$

Визначимо постійні інтегрування C_1 і C_2 виходячи з нульових початкових умов. Для $t=0$ і $\alpha(0)$ з (1.43) має $0 = M_B / C(C_1 + C_2) e^0$,

$$\text{звідки } C_1 = -M_B / C$$

Для $\alpha(0)=0$ диференціюємо рівняння (1.43):

$$0 = 0 + \left[-\frac{F}{2I} C_1 + C_2 \left(1 - \frac{F}{2I} t \right) \right] e^{-Ft/2I}$$

Підставивши $t=0$, знаходимо $-FC_1/2I + C_2 = 0$

Маємо систему рівнянь

$$\begin{aligned} C_1 &= -M_B / C \\ -\frac{F}{2I} C_1 + C_2 &= 0 \end{aligned}$$

звідки знаходимо

$$C_2 = -\frac{M_B}{C} \cdot \frac{F}{2I}$$

Підставивши C_1 і C_2 в (1.43), отримаємо загальне рішення рівняння (1.3) для випадку 2:

$$\alpha(t) = \frac{M_B}{C} \left[1 - \left(1 + \frac{F}{2I} \right) e^{-Ft/2I} \right] \quad (1.44)$$

З рівняння (1.44) видно, що у цьому випадку рухома система вимірювача без коливань плавно підходить до положення рівноваги. Характер руху залишається аперіодичним, але з швидшим наближенням до положення рівноваги.

Загальне рішення рівняння (1.3) для випадку 2 за нульових початкових умов, коли $\alpha(0)=0$ і $\alpha'(0) = M_B P / 2IC$, має вигляд:

$$\alpha(t) = \frac{M_B}{C} (1 - e^{-Ft/2I})$$

Випадок 3: $(F/2I)^2 < C/I$. . Характеристичне рівняння (1.36) має два комплексні корені

$$K_{1,2} = -F/2I \pm iw \quad (1.45)$$

$$\text{де } i = \sqrt{-1}; \quad w = \sqrt{C/I - (F/2I)^2}$$

Зазвичай параметри вимірювача з магнітоіндукційним диференціатором такі, що спостерігається цей випадок. Рух рухомої системи вимірювача до положення рівноваги має характер загасаючих коливань із частотою w .

Загальне рішення рівняння (1.36) у цьому випадку має вигляд:

$$\alpha_0(t) = e^{-Ft/2I} (C_1 \cos Wt + C_2 \sin Wt) \quad (1.46)$$

Підставивши (1.33) і (1.46) (1.32), отримаємо загальне рішення рівняння (1.3) для випадку 3

$$\alpha(t) = \frac{M_B}{C} + e^{-Ft/2I} (C_1 \cos Wt + C_2 \sin Wt) \quad (1.47)$$

Знайдемо постійні інтегрування C_1 і C_2 виходячи з нульових початкових умов. Для $t=0$ та $\alpha(0)$ з (1.47) маємо:

$$0 = \frac{M_B}{C} + e^0 (C_1 \cos 0 + C_2 \sin 0)$$

звідки $C_1 = -M_B / C$. Підставивши в (1.47)

$$\alpha_0(t) = \frac{M_B}{C} + e^{-Ft/2I} \left(\frac{M_B}{C} \cos Wt + C_2 \sin Wt \right)$$

Для $\alpha(0)=0$ диференціюючи, знаходимо:

$$0 = 0 - \frac{F}{2I} \frac{M_B}{C} \cos Wt - \frac{F}{2I} C_2 \sin Wt - \frac{M_B}{C} W \sin Wt - C_2 \cos Wt$$

або, підставивши $t=0$, отримаємо $C_2 = \frac{M_B}{C} \frac{F}{2IW}$

підставивши C_2 , отримуємо:

$$\alpha(t) = \frac{M_B}{C} \left[1 - e^{-Ft/2I} \left(\cos Wt + \frac{M_B}{C} \frac{F}{2IW} \sin Wt \right) \right]$$

або в іншому вигляді:

$$\alpha(t) = \frac{M_B}{C} \left[1 - e^{-Ft/2I} \left(\cos \sqrt{\frac{C}{I} - \left(\frac{F}{2I}\right)^2} + \frac{F \sin \sqrt{\frac{C}{I} - \left(\frac{F}{2I}\right)^2}}{2I \sqrt{\frac{C}{I} - \left(\frac{F}{2I}\right)^2}} \right) \right] \quad (1.48)$$

З рівняння (1.48) видно, що у разі перехідний процес є коливальним, причому амплітуда коливань з часом зменшується, тобто. коливання будуть загасаючими.

Загальне рішення рівняння (1.3) для випадку 3 за ненульових початкових умов, коли $\alpha(0)=0$ і $\dot{\alpha}(0) = M_B F / 2IC$, має вигляд:

$$\alpha(t) = \frac{M_B}{C} \left(1 - e^{-Ft/2I} \cos \frac{\sqrt{4IC - F^2}}{2I} \right)$$

З порівняння рівнянь (1.40), (1.44) і (1.48) випливає, що характер руху рухомої системи вимірювача, коли корені характеристичного рівняння (1.36) $K_1 = K_2$ є граничним між коливальним, якщо корені характеристичного рівняння комплексні $K_{1,2} = -F/2I \pm iw$ і аперіодичним, якщо корені характеристичного рівняння $K_1 \neq K_2$. Тому рух рухомий системи вимірювача при * називають режимом критичного заспокоєння чи критичним режимом.

3. ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТУРУ

3.1. Розрахунок чашкової вертушки.

Анемометри з вертушками є інтеграторами, які визначають швидкість вітру за деякий проміжок часу Δt .

Чашкова вертушка складається з кількох півкуль у нашому випадку чотири, встановлені на хрестовині, яка може вільно обертатися на підшипниках навколо осі, перпендикулярної її площині (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 - Чашкова вертушка

Оскільки коефіцієнт опору опуклої поверхні менший, ніж увігнутій, тиск повітря на верхню і нижню півкулю будуть різними, і хрестовина буде обертатися в напрямку, вказаному стрілкою, з деякою кутовою швидкістю.

Якщо швидкість потоку повітря дорівнює V , то для положення хрестовини (показаного на рис. 1.1) відносна швидкість повітряного потоку, що набігає на верхню півкулю дорівнюватиме $v_1 = v - \omega r$, а відносна швидкість потоку, що набігає на нижню півкулю дорівнюватиме $v_2 = v + \omega r$.

Кутова швидкість обертання вертушки ω буде збільшуватися до тих пір, поки моменти сил, що діють на нижню і верхню півкулі, не врівноважаться.

Виразимо моменти сил, що діють на верхню і нижню півкулі, через відносну швидкість повітря, що набігає на них.

$$M_1 = F_1 \cdot r = K_1 S \rho \frac{v_1^2}{2} r = K_1 S \rho \frac{(v - \omega r)^2}{2} r \quad (1.49)$$

$$M_2 = F_2 \cdot r = K_2 S \rho \frac{v_2^2}{2} r = K_2 S \rho \frac{(v + \omega r)^2}{2} r \quad (1.50)$$

де M_1, M_2 - моменти сил, що діють на верхню і нижню півкулі, Н-м;

F_1, F_2 - сили тиску відповідно на верхню та нижню півкулі,

S - ефективна площа однієї півкулі,

ρ - густина повітря, кг/м³

K_1, K_2 - аеродинамічні коефіцієнти опору верхнього та нижнього півкуля ($K_1 > K_2$),

r - радіус посадки чашок.

Якщо знехтувати тертям в підшипниках і моментами від двох інших півкуль, то при швидкості обертання ω моменти, що встановилася, будуть рівні.

Прирівнявши значення M_1 та M_2 формул (1.49) та (1.50), отримаємо

$$K_2 S \rho \frac{(v - \omega r)^2}{2} r = K_1 S \rho \frac{(v + \omega r)^2}{2} r$$

$$K_2 (v - \omega r)^2 = K_1 (v + \omega r)^2$$

Після перетворень знаходимо кутову швидкість обертання вертушки ω

$$\omega = \frac{1}{r} \left[\frac{\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}} \right] v = cv \quad (1.51)$$

Звідси випливає, що кутова швидкість вертушки пропорційно до справжньої швидкості повітряного потоку і не залежить від щільності повітря і розміру чашки.

Відповідно до [3] коефіцієнти опору верхньої та нижньої півкуль $K_1 = 0.9$ і $K_2 = 0.26$.

$$\text{Тоді } C = \frac{1}{0,064} \left[\frac{\sqrt{0.9} - \sqrt{0.26}}{\sqrt{0.9} + \sqrt{0.26}} \right] = 4.68$$

Визначимо кутову швидкість обертання вертушки за формулою (1.51) за максимальної швидкості $V = 60 \text{ км/год} = 16,67 \text{ м/с}$

$$\omega = 4,68 \cdot 16,67 = 78 \text{ рад/с.}$$

Число оборотів осі вертушки визначається за формулою:

$$n = (30 \cdot \omega) / \pi, \quad (1.52)$$

де ω -кутова швидкість обертання, n - число обертів, мин^{-1}

Підставивши в (1.52) числові значення отримаємо:

$$n = 30 \cdot 312 / 3,14 \approx 3000 \text{ мин}^{-1}$$

Момент створюваний вертушкою

$$M_{MAX} = F_1 r = K_1 S p \frac{v_{\max}^2}{2} r \quad (1.53)$$

$$M_{\max} = 0,9 \frac{3,14 \cdot 1,025 \cdot 66,67^2}{2} \cdot 0,064 = 301,6 H_M$$

$$M_{\min} = F_1 r = K_1 S p \frac{v_{\min}^2}{2} r$$

(1.54)

$$M_{\min} = 0,9 \frac{3,14 \cdot 1,025 \cdot 5^2}{2} \cdot 0,064 = 2,32 H_M$$

3.2. Оптимізаційний розрахунок рухомої системи вимірника.

За наведеними вище формулами передавальної функції та моментів інерції деталей рухомої системи написано програму мовою GWBASIK SPEED К.

Задаємося розмірами деталей згідно з комплектувальним кресленням та кресленнями всіх деталей рухомої системи: представленим на аркушах 42 - пояснювальної записки та в графічній частині проекту на аркуші 3.

Також задається деякими іншими значеннями: модулем, числом зубів коліс, щільністю матеріалів, що використовуються при виготовленні деталей, вимірювального механізму.

Список ідентифікаторів та сам розрахунок проведено із вказівками, викладеними в [9].

Результати розрахунку за програмою SPEED К представлені на аркушах 47-49 пояснювальної записки.

Аналізуючи отримані дані, можна сказати, що результати задовольняють

технічним завданням:

- час заспокоєння
- постійна часу
- вид перехідного процесу – періодичний, коливальний.

Отримано також статичну та динамічну характеристики, приватні характеристики: АЧХ, ФЧХ, АФЧХ, логарифмічні характеристики ЛАЧХ та ЛФЧХ.

Усі характеристики представлені у додатку пояснювальної записки та у графічній частині дипломного проекту на аркушах 3 та 4.

Відповідно до математичної моделі та аналітичних залежностей, наведених у підрозділах 1.4 та 1.5, розроблено графічний алгоритм програми SPEED K для розрахунку рухомої системи вимірювача з ковпачковим магнітоіндукційним диференціатором, зображеним на аркуші графічної частини дипломного проекту.

Після ручного введення вихідних даних для розрахунку вимірювача з ковпачковим магнітоіндукційним диференціатором (блок 1) проводиться їх виведення в блоці 2. Блоком 3 відкривається розрахунок моментів інерції окремих елементів рухомої системи вимірювача (блоки 3-15).

Отримані розрахункові значення моментів інерції виводяться на друк блоку 16. У блоці 17 проводиться розрахунок наведеного моменту інерції, яке значення виводиться на друк в блоці 18. Блоком 19 відкривається розрахунок коефіцієнта пропорційності і природного заспокоєння магнітоіндукційного диференціатора. У блоці 22 визначається сумарний коефіцієнт заспокоєння - сума природного і додаткового F_0 коефіцієнтів заспокоєння. У блоці 23 визначається крутний момент ковпачка M_v , а в блоці 24 - коефіцієнт жорсткості пружини C .

Отримані значення виводяться на друк у блоці 25. У блоці 26 та 27 проводиться завдання початкових значень циклу. Блоком 28 відкривається цикл розрахунку параметрів статичної характеристики зі змінним параметром Ω_1 - швидкістю обертання магніту, при якій обчислюється α_1 - кут повороту ковпачка.

Отримані значення виводяться на друк блоці 29. У блоці 30 проводиться збільшення параметра циклу на крок. У блоці 31 виконується виконання умови виходу з циклу.

У блоках 32 та 33 обчислюються нижня та верхня межі зони допустимої похибки, у блоках 34 та 35 - нижнє та верхнє значення кута заспокоєння. У блоках 36 і 37 задаються початкові значення лічильника перетинів M_1 нижньої та M_2 верхньої меж зони допустимої похибки, кривої зміни $\alpha(t)$ кута повороту ковпачка, блоках 38 і 39 - початкові значення I_1 і I_2 .

За блоком порівняння 40 розрахунок розгалужується на три потоки залежно від характеру коренів характеристичного рівняння (1.36). Коли корені характеристичного рівняння комплексні, значення речової частини обчислюються в блоці 41, а уявної - в блоці 42. Отримані розрахункові значення виводяться на друк у блоці 43.

У блоках 44 та 45 проводиться завдання початкових значень циклу обчислення динамічної характеристики вимірювача.

Блоком 46 відкривається цикл динамічної характеристики, що обчислюється залежно (1.48) $\alpha(t)$ зі змінним параметром t - часу повороту рухомої системи вимірювача. Обчислене значення $\alpha(t)$ порівнюється з верхнім значенням α_y - кута заспокоєння. Якщо обчислене значення $\alpha(t) \geq \alpha_y$ початковому значенню лічильника I_2 присвоюється одиниця (блок 48) і значення лічильника M_2 стає рівним одиниці (блок 49). Це означає, що крива зміни кута $\alpha(t)$ 1 раз перетнула верхнє значення α_y кута заспокоєння. У блоці значення 50 $\alpha(t)$, часу t і лічильника M_2 виводяться на друк. Потім у блоці 51 значення часу заспокоєння t_y присвоюється поточне значення t . У блоці 52 виробляється збільшення параметра циклу на крок. У блоці 53 перевіряється виконання умови виходу із циклу. Якщо умова виходу з циклу

виконується, то в блоці проводиться обчислення T_2 постійного часу, а в блоці 55 виводяться на друк значення постійного часу T_2 та часу заспокоєння t_y . Якщо умова виходу з циклу не виконується, то в блоці 46 $\alpha(t)$ знову проводиться обчислення та його порівняння в блоці 47. Якщо отримане в результаті рахунку нове значення $\alpha(t)$ не більше і не дорівнює $\alpha(y)$, то проводиться порівняння в блоці 56. Якщо $\alpha(t) \leq \alpha(y)$, то початковому значенню лічильника I_1 присвоюється одиниця (блок 57). Значення лічильника M_1 стає рівним одиниці (блок 58), що свідчить про те, що крива зміни кута $\alpha(t)$ 1 разів перетнула нижнє значення кута α_y заспокоєння. У блоці 59 значення $\alpha(t)$, t і M_1 виводяться на друк, а потім у блоці 51 часу заспокоєння α_y присвоюється поточний час t . У блоці 52 знову проводиться збільшення параметра крок, а блоці 53 перевіряється виконання умови виходу з циклу. Якщо воно не виконується, то в блоці 46 проводиться обчислення наступного $\alpha(t)$ і знову перевірка його на умову в блоці 47 або 56. Якщо в результаті перевірки виявиться, що обчислене значення $\alpha(t)$ не більше верхнього значення α_y і не менше нижнього значення $\alpha(t)$, то обчислене $\alpha(t)$ і t виводяться на друк (Блок 60). Потім проводиться збільшення параметра циклу на крок (блок 52) та перевірка умови виходу з циклу (блок 53). Якщо воно виконується, то в блоці 54 обчислюється T_2 постійного часу, а в блоці 55 значення постійного часу T_2 та часу заспокоєння t_y виводяться на друк.

Якщо після порівняння в блоці 40 виявиться, що корені - характеристичного рівняння (42) мають два рівні корені, то аналогічно розглянутому рахунок йде по гілці з блоками 67 і 79, а якщо два нерівних дійсних кореня, - то по гілці з блоками 80. 99.

Після завершення рахунку по будь-якій із гілок рахунок переходить на блок 100, який виводить на друк вигляд передавальної функції. У блоці 101 визначається значення постійної часу T_1 магнітно індукційного заспокоєння.

У блоці 102 початкове значення індексу масиву дорівнює нулю. У блоках 103 та 104 проводиться завдання початкових значень керуючої змінної та циклу обчислення параметрів частотних характеристик. У блоці 105 індекс масиву збільшується на одиницю і його значення присвоюється змінною керуючої n циклу. У блоках 106,107,108 і 109 обчислюється вираз, що становить знаменник речовинної та уявної частин АФЧХ. У блоці 110 обчислюється сума виразів, що становлять знаменник. У блоці 110 обчислюється сума виразів, що становлять знаменник. У блоці 111 обчислюється речовинна $X(n)$, а в блоці 112 уявна (n) частини АФЧХ. У блоці 113 обчислюється АЧХ $k(n)$, а блоці 114 - ЛАЧХ $L(n)$.

При обчисленні ФЧХ є одна особливість, пов'язана з властивостями тригонометричної функції арктангенса (усі кути або дуги, тангенс яких дорівнює m , виражаються формулою $\text{arctg } m = \text{arctg } m + \pi k$, де $k = \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots$). Тому при $X(n) > 0$ $\varphi(n)$ визначається за формулою $\varphi(n) = \text{arctg } (Y(n)/X(n))$, а при $X(n) < 0$ до обчисленого значення функції додається π .

$$\varphi(n) = \text{arctg } (Y(n)/X(n)) - \pi$$

Ця процедура реалізована в блоках 115,116 і 117. У блоці 118 проводиться переклад кута зсуву фаз $\varphi(n)$ з радіан градуси. Усі обчислені параметри виводяться на друк у блоці 119 у вигляді таблиці значень. У блоці 120 керуюча змінна циклу - частота обертання магніту n - збільшується на крок, а блоці 121 перевіряється умова виходу з циклу. Якщо умова не виконується, то рахунок триває, інакше рахунок припиняється.

3.3. Розрахунок моментної спіральної пружини.

Моментні спіральні пружини використовуються у вимірювачах із магнітоіндукційним диференціатором для створення протидіючого моменту $M_{\text{п}}$ рухомої системи.

Протидіючий момент спіральної пружини визначається значенням моменту, що діє, який утворюється в диференціальному елементі рухомий вимірювальної системи вимірювача.

Волосок забезпечує кінематичне закриття мультиплікатора і робить положення всіх його ланок кінематичного визначення як при прямому, так і зворотному русі.

Прямий рух стрілки здійснюється моментом, що обертає $M_{\text{в}}$, зворотний - протидіє момент $M_{\text{п}}$ волоска.

Від моментної спіральної пружини-деталі магнітоіндукційного вимірювача багато в чому залежить точність вимірювальної системи.

У вимірнику використовуються волоски виготовлені з матеріалу, що володіє антимагнітними властивостями, а також мають невеликий температурний коефіцієнт модуля пружності.

Геометричні параметри спіральних пружин обчислюються в залежності від необхідного моменту, що протидіє $M_{\text{п}}$.

Знаючи показання необхідного найбільшого протидіючого моменту $M_{\text{п}}$ спіральної пружини, можна знайти її геометричні параметри з умови надійності та жорсткості:

$$\sigma = M_{\text{п}}/W \leq [\sigma] \quad (1.65)$$

$$\phi \frac{MnL}{E \cdot I} \leq \phi_{\text{max}} \quad (1.66)$$

де $I = bh^3/12$ і $W = bh^3/6$ - відповідно моменти інерції та опору пружини (b - ширина, h - товщина, L - довжина розгорнутої волосинки), ϕ_{max} -

найбільший кут закручування пружини, $[\sigma_F]$ - допустима напруга при згинанні, Мп.

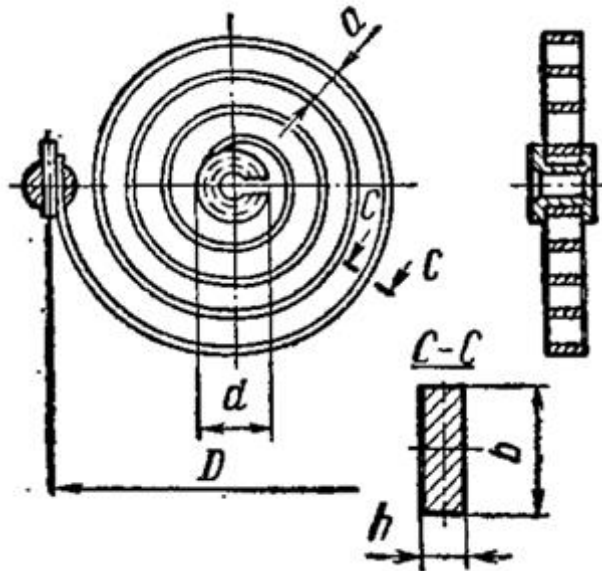


Рисунок 3.1 – Моментна спіральна пружина.

Довжина розгорнутої спіральної пружини може бути знайдена приблизно з умови рівності площ:

$$\pi(D^2 - d^2) / 4 = L_a \quad (1.67)$$

де D -зовнішній діаметр спіральної пружини, d - діаметр втулки, до якої кріпиться внутрішній кінець спіральної пружини, a - крок спіралі, що вибирається залежно від товщини пружини $h(a=kh)$.

Підставивши значення кроку спіралі в рівняння та розв'язавши спільно рівняння, знайдемо товщину пружини:

$$h = \sqrt{\pi[\sigma_F]}(D^2 - d^2) / 2kE\varphi_{\max} \quad (1.68)$$

Ширина пружини:

$$B=6M\pi/h^2[\sigma_F] \quad (1.69)$$

Остаточно значення h і b виберемо за розмірами пружинних стрічок, причому $20 > b/h > 3$

З рівняння (1.66) розрахунку жорсткість знаходимо довжину пружини.

$$L = Ebh^3\varphi_{\max} / 12M_{II} \quad (1.70)$$

Кількість витків та крок спіралі визначають за формулами

$$n=2L/\pi(D+d) \quad (1.72)$$

$$a=(D-d)/2n \quad (1.72)$$

Оскільки зменшення моменту тертя на осі ковпачка у вимірнику встановлюються дві спіралью працюючі пружини, а сумарна жорсткість двох паралельних спіральних пружин дорівнює їх сумі ($C = C_1 + C_2$), то розрахунок однієї пружини проведемо при протидії моменті $M = M_{II}0,5 = 0,087$ Нмм.

Матеріал пружини вибираємо БрОФ 0,5-0,1 із наступними характеристиками.

Модуль пружності $E = 98000$ Нпа,

Кордон пружності $\sigma_y = 770$ МПа,

Товщина пружини $H=0,06$ мм

У блоці 1 вводяться величини M_{II} , d , E , σ_y , H , k , d , n_{σ} . У блоці 2 проводиться роздрук значень введених величин. У блоках з 2 по 8 проводиться розрахунок та виведення на друк значення допустимої напруги на вигин $[\sigma_F]$ і ширини пружини b . У блоці 20 проводиться операція порівняння виконання умови $20 > B/h$, якщо воно виконується програмою переходить до блоку 11, де,

у свою чергу, перевіряється умова $V/n > 3$. За виконання цієї умови програма переходить до розрахунку напруги на вигин W (блок 14) $[\sigma_F]$. У блоці 16 перевіряється виконання умови $SF1 < SF$, тобто. $\sigma_F < [\sigma_F]$ при виконанні умови програми переходить до блоку 21, де проводиться розрахунок розгорнутої довжини волоска і далі обчислюється параметра волоска 9 блоки 22-34).

При невиконанні умов у блоках 11,14,17,20 програма зупиняється і припиняється при цьому видається повідомлення про причину помилки, що викликала.

4. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЩОДО РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДУ

4.1. Статична характеристика

Статична характеристика анемометра визначається його вимірювачем, в якому встановлюється залежність між значеннями вхідної величини, що встановилися - кутовий швидкістю Ω - і вихідної величини - кутом α повороту стрілки $X_{\text{вих}} = \text{вих} \times X_{\text{вх}}$.

Статична характеристика вимірювача з ковпачковим магнітоіндукційним диференціатором визначається залежністю згідно з формулою (1.31):

$$\alpha = \frac{12LB^2 D^2 e^2 \delta_K p_M}{\pi r E B h^3} \ln \left[1 + \frac{\pi b_n}{2(a_n + l)} \right] \Omega$$

Статична характеристика вимірювача лінійна. Лінійність характеристики є великою перевагою, так як дозволяє застосовувати

рівномірні шкали та покажчики з двома стрілками з обертанням, одна зі стрілок випереджає другу на кілька обертів, що неможливо при нелінійності характеристики.

За статичною характеристикою можна визначити чутливість вимірювального приладу - відхилення лінійного (Δl) або кутового переміщення ($\Delta\alpha$) покажчика за шкалою приладу до зміни вимірюваної величини, що викликала його.

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Omega} = \frac{15,7\text{рад}}{250\text{рад/сек}} = 0,0628$$

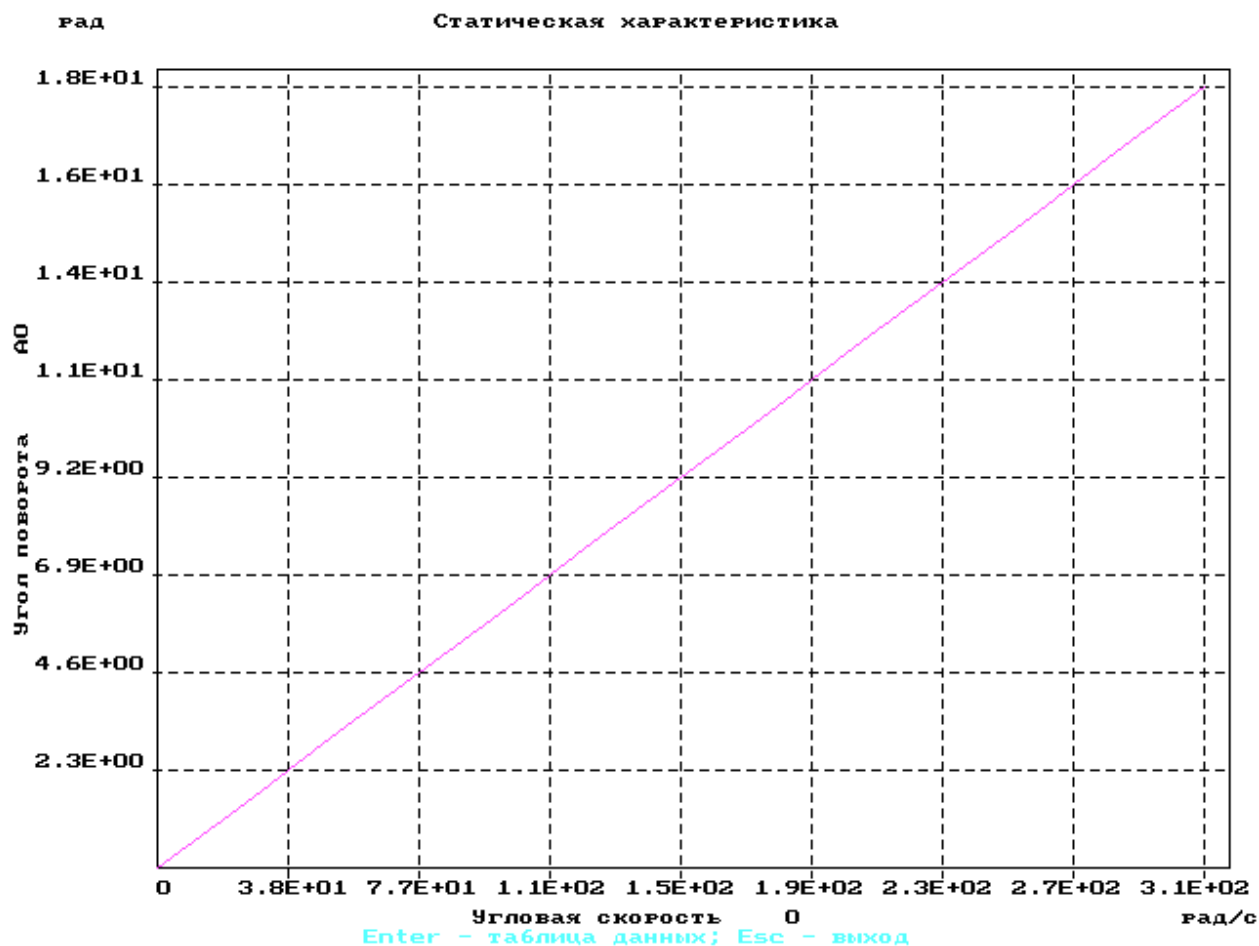


Рисунок 4.1 Статична характеристика анемометра

4.2. Динамічна характеристика

Характер руху рухомий системи вимірювача визначається корінням характеристичного рівняння (1.35).

В результаті розрахунку отримано коріння характеристичного рівняння виду:

$$K_{1,2} = -F / 2I \pm iw$$

$$K_{1,2} = -15,92254$$

Таким чином, рух рухомої системи вимірювача до положення рівноваги має характер загасаючих коливань з частотою $w = 15,92357$.

Динамічна характеристика вимірювача представляється як перехідної функції - що відбиває реакцію системи на одиничну ступінчасту функцію.

Перехідний процес характеризують його показники:

- час перехідного процесу $t_v = 0,25c$

- постійна часу $t_n = 0,002c$

- час запізнення $t_{зап} = 0,07c$

- час, протягом якого вихідна величина досягає максимального значення

$$t_{max} = 0,2c$$

-відносне перерегулювання, що відображає навантаженість елементів системи $\sigma = 4,3\%$

Амплітудно-частотна характеристика вимірювача є залежністю відношення амплітуди $A_2(n)$ коливань ковпачка до амплітуди $A_1(n)$ коливань магніту від частоти обертання магніту, що синусоїдально змінюється, n ,

$$K(m) = A_2(n) / A_1(n)$$

АЧХ визначається

$$K(n) = \sqrt{x^2(n) + y^2(n)} \quad (1.55)$$

де $x(n)$ і $y(n)$ речова та уявна частини характеристичного рівняння ,

$$x(n) = \frac{-F_0 I n^2 + F_0 C}{I^2 n^4 (F^2 - 2IC)n^2 + C^2} \quad (1.56), (1.57)$$

$$y(n) = \frac{F_0 F n}{I^2 n^4 (F^2 - 2IC)n^2 + C^2}$$

Підставляючи формулу (1.55) значення частоти обертання n від 0 до ?, отримують у результаті серію точок $K(n)=f(n)$. АЧХ із зростанням частоти обертання n зменшується, тому зменшується і амплітуда вихідний величини.

Амплитудная частотная характеристика

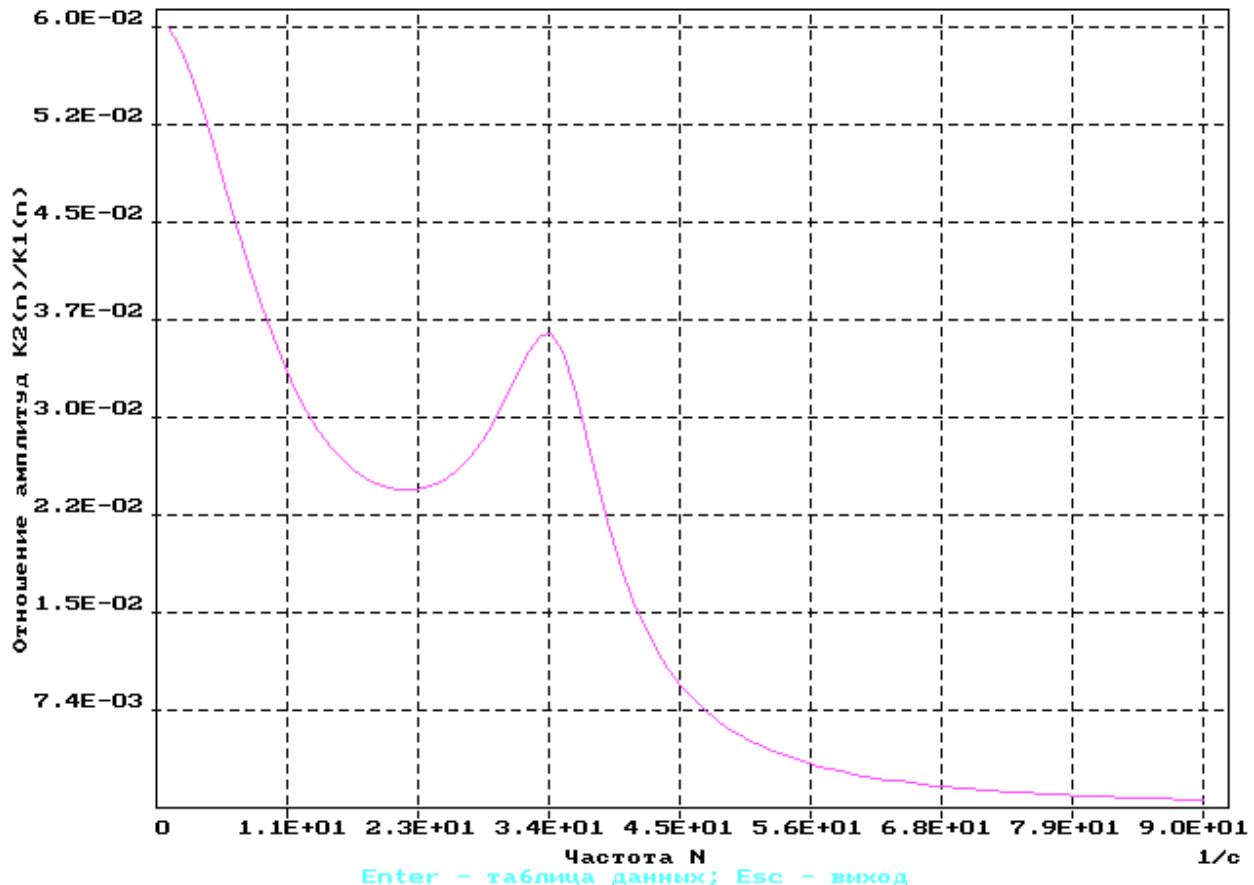


Рисунок 4.3 Амплітудно-частотна характеристика

АЧХ є важливою характеристикою, оскільки дозволяє визначити граничну частоту обертання магніту, коли відношення амплітуд досягає допустимого значення.

Фазова частотна характеристика (ФЧХ) відображає залежність різниці фаз між коливаннями магніту і коливаннями ковпачка від частоти обертання магніту, що синусоїдально змінюється $\varphi(n) = \varphi_2(n) - \varphi_1(n)$

ФЧХ визначається:

$$\varphi(n) = \arctg(y(n)/x(n)) \quad (1.58)$$

де $x(n)$ і $y(n)$ визначається за залежностями (1.56) та (1.57).

Задаючи різні синусоїдально змінні частоти обертання магніту n (від Про до 60 c^{-1}), отримуємо в результаті серію точок, за якими будують ФЧХ, $\varphi(n) = f(n)$

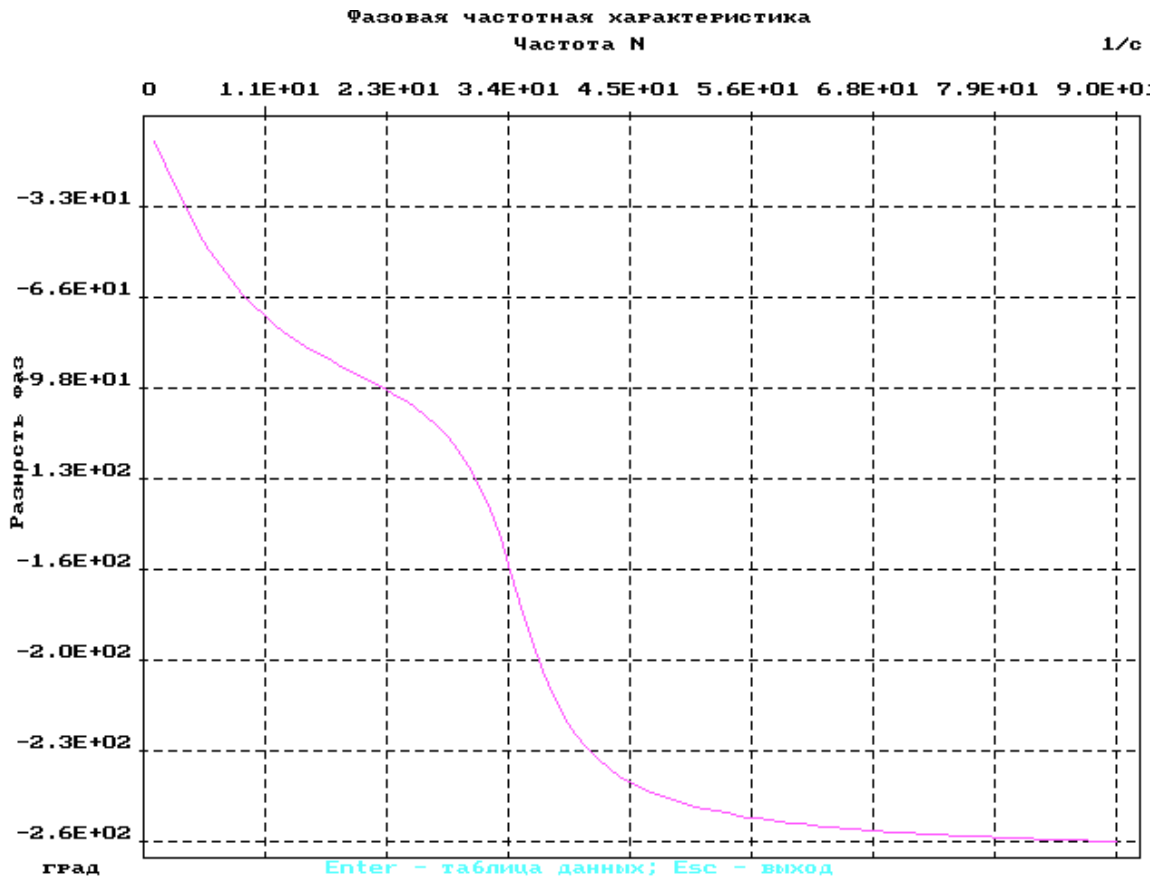


Рисунок 4.4. Фазова частотна характеристика

ФЧХ показує, що коливання ковпачка відстають від коливань магніту. При коливальному процесі величина відставання в межах $0^\circ - 270^\circ$

Вираз:

$$w(jn) = x(n) + jy(n) \quad (1.59)$$

є амплітудно-фазовою частотною характеристикою або частотною функцією, представленою на комплексній площині як геометрична сума речової $x(n)$ і уявної $jy(n)$ частин. Амплітудно-фазова частотна характеристика за амплітудною та фазовою характеристиками будуються у вигляді графіка, з цією метою для певної частоти обертання n на ФЧХ знаходять значення $\varphi(n)$ фази і відкладають його у вигляді кута від

горизонтальної осі, на прямій, проведеній під цим кутом, відкладають значення амплітуди $k(n)$, взяті з графіка АЧХ за тієї ж частоті обертання.

По АФЧХ судять про стійкість замкнутої системи. Для визначення стійкості приладу застосуємо критерій Найквіста, який формулюється так: замкнута система стійка, якщо АФЧХ стійкої розімкнутої системи не охоплює точку з координатами $(-1; j0)$ за зміни частоти обертання n від 0 до ∞

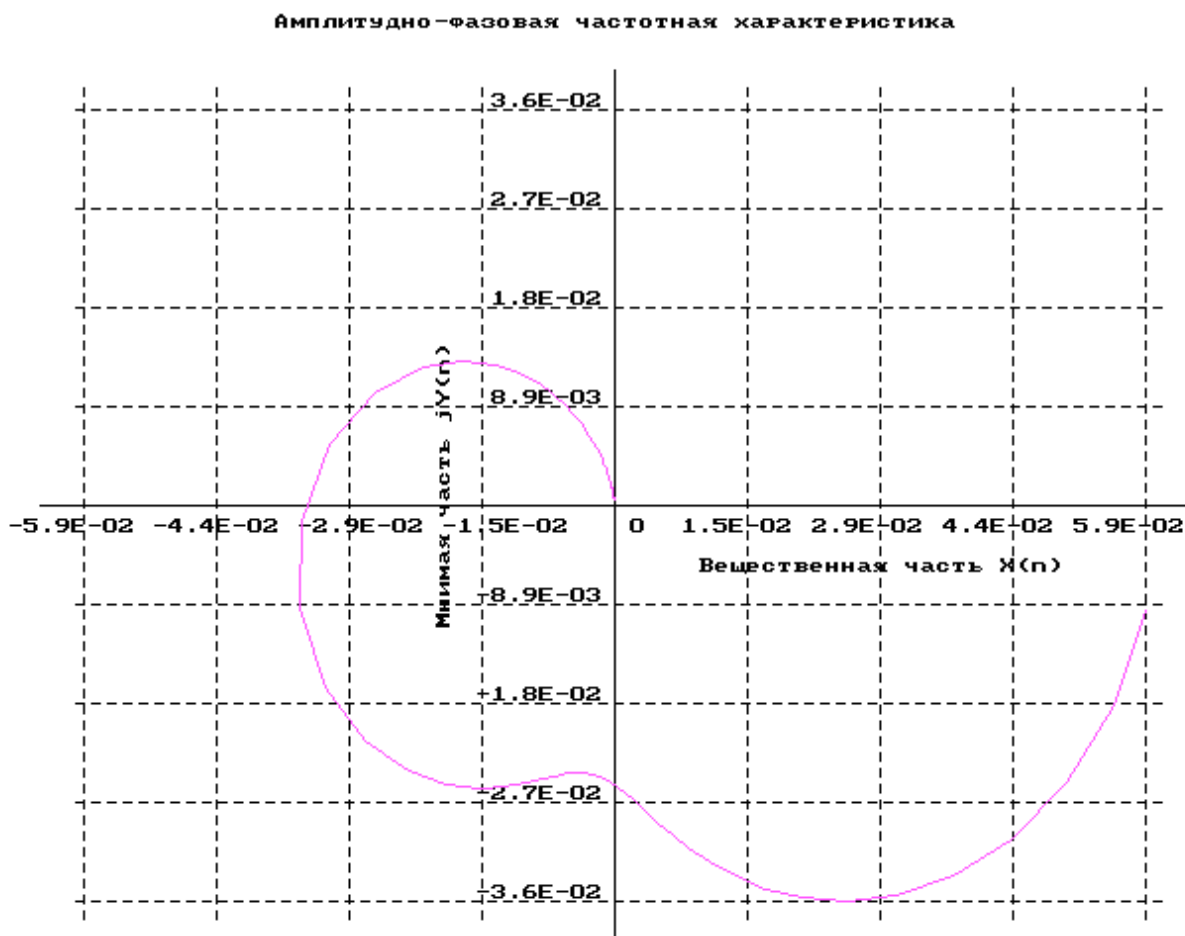


Рисунок 4.5 - Амплітудно-фазова частотна характеристика

Згідно з цим критерієм, вимірювач з ковпачковим магнітоіндукційним диференціатором є стійкою системою.

Розрізняють логарифмічну амплітудну частотну характеристику (ЛАЧХ) та логарифмічну частотну характеристику (ЛФЧХ).

ЛАЧХ $L(n)$ називається залежність від частоти обертання модуля частотної характеристики, що зображена в логарифмічному масштабі. ЛАЧХ будують, переходячи від виразу АФЧХ $W(jn)$ до виразу

$$L(n) = 20 \lg |w(jn)| = 20 \lg K(n) \quad (1.60)$$

ЛАЧХ $L(n) = 20 \lg K(n)$ будують у прямокутній системі координат. По осі абсцис відкладають частоту обертання магніту n в логарифмічному масштабі, а осі ординат $L(n)$ - децибелі (дБ) в лінійному масштабі.

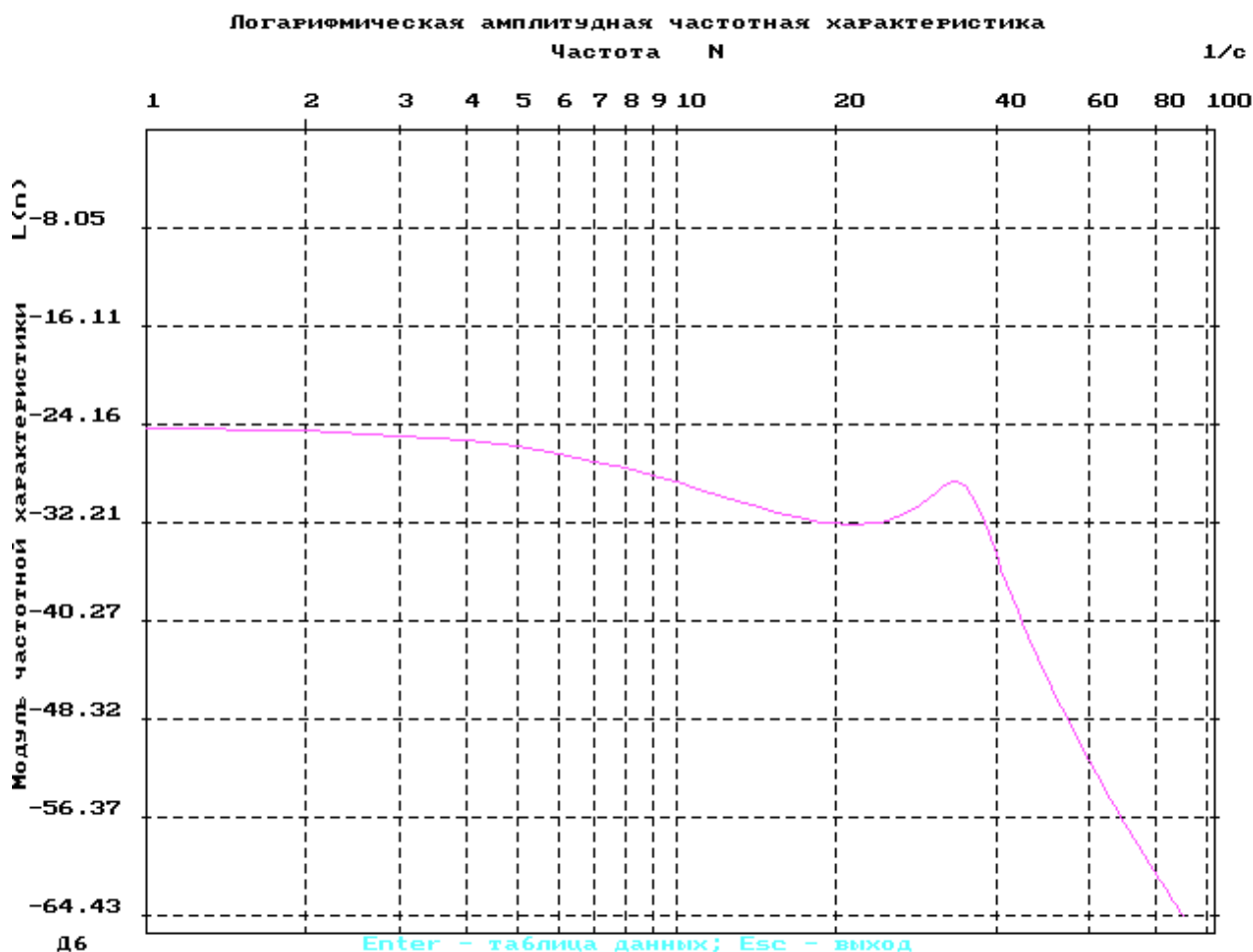


Рисунок 4.6 - Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

ЛФЧХ $\varphi(n)$ називається залежність аргументу частотної характеристики від логарифму частоти. Цю характеристику $\varphi(n)$ також будують у прямокутній системі координат, відкладаючи осі абсцис частоту обертання магніту в

повітря не перевищує в робочому діапазоні 1%, а за ним - 1,5% від верхньої межі діапазону вимірювання шкали.

Помилка магнітоіндукційного вимірювача обумовлена головним чином впливом зміни температури навколишнього середовища на наступні параметри: B - магнітну індукцію, яка при збільшенні температури, для магнітних матеріалів, зменшується ($\gamma < 0$), а при досягненні температури Кюрі зовсім зникає, ρ - електричного опору матеріалу ковпачка, який при збільшенні температури зростає ($\beta > 0$), E - модуль пружності матеріалу спіральної пружини, який при підвищенні температури зменшується ($\lambda < 0$), b , h , L - лінійні розміри пружини - відповідно ширина, товщина та висота розкрученої пружини, які з підвищенням температури збільшуються ($\alpha \epsilon > 0$).

При підвищенні температури зміна магнітної індукції, електричного опору та лінійних розмірів пружини викликає зменшення крутного моменту i , як наслідок, зменшення показань вимірювача.

Зміна модуля пружності пружини E , навпаки, викликає збільшення показань зі збільшенням температури.

Тому є можливим підбір матеріалів магніту, ковпачка та спіральної пружини для зведення до мінімуму температурної помилки вимірювача.

Температурні помилки, які виникають при зміні магнітного поля постійного магніту та пружних властивостей пружини, що протидіють, практично взаємно компенсуються.

Від матеріалу спіральної пружини значною мірою залежить температурна помилка вимірника.

Припустимо, що

$$\begin{aligned}
 B &= B_0(1 - \gamma\Delta T) \\
 \rho &= \rho_0(1 + \beta\Delta T) \\
 E &= E_0(1 - \lambda\Delta T) \\
 L &= L_0(1 - \alpha_1\Delta T)
 \end{aligned}$$

де γ - температурний коефіцієнт магнітної індукції магніту, β - температурний коефіцієнт електричного опору матеріалу ковпачка, C^{-1} , λ - температурний коефіцієнт модуля пружності матеріалу пружини, $1/^\circ\text{C}^{-1}$, α_1 - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу спіральної пружини, $^\circ\text{C}$.

Підставивши значення B , ρ , E , L в рівняння шкали (9 41), отримаємо:

$$\alpha = \frac{12LB_0^2 D^2 l^2 \delta_K p_M L_0}{\pi \rho_0 E_0 b_0 h_0} \ln \left[1 + \frac{\pi b_n}{2(a_n + l)} \right] \Omega \times$$

$$\times \frac{(1 - \gamma\Delta T)^2 (1 - \alpha l \Delta T)}{(1 - \alpha l \Delta T)^4 (1 - \lambda\Delta T)(1 - \beta\Delta T)^2} = \frac{12LB_0^2 D^2 l^2 \delta_K p_M L_0}{\pi \rho_0 E_0 b_0 h_0} \ln \left[1 + \frac{\pi b_n}{2(a_n + l)} \right] \Omega \times \quad (1.61)$$

$$[1 + (2\gamma - \lambda - \beta - 3\alpha l)\Delta T] \quad (1.62)$$

$$\text{звідки } \alpha_T = \alpha_0(1 + \sigma\Delta T)$$

де $\sigma = 2\gamma - \lambda - \beta - 3\alpha l$ - загальний температурний коефіцієнт магнітоіндукційного вимірювача.

Очевидно, що помилка буде відсутня якщо $\sigma = 0$. Цього можна досягти, якщо так підібрати матеріали деталей магнітоіндукційного вимірювача, щоб було виконано умову температурної компенсації:

$$2\gamma - \lambda - \beta - 3\alpha l = 0 \quad (1.63)$$

Точно здійснити цю умову практично неможливо, але можна звести загальний температурний коефіцієнт магнітно-індукційного вимірювача до мінімального значення.

Виберемо матеріали деталей, що використовуються в магнітоіндукційному вимірнику:

Магніт - сплав типу магніко: 63,2% Fe, 20,6% Ni, 12% Al, 4%, 0,2% Mn
($\gamma = 0,6 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$)

Ковпачок - алюмінієвий сплав АМц ($\beta = 39 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$),

Пружина (волосок) - з фосфористої бронзи БрОФ 6,5 - 0,15 ($\lambda = 4 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ и $\alpha l = 0,171 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$)

Відносна температурна помилка вимірювача $d_t = \Delta d_t / \alpha_0$

Де $d_t = \Delta d_t - \alpha_0$ - температурна зміна кута повороту ковпачка, α_0 - кут повороту ковпачка за нормальної температури.

Відносна температурна помилка виражається у відсотках:

$$d_t = (\alpha t - \alpha_0) / \alpha_0 \cdot 100\%$$

Недоліком зменшення температурної помилки шляхом підбору матеріалу ковпачка є те, що сплави, які мають невеликі температурні коефіцієнти електричного опору β , зазвичай мають відносно високий електричний опір ρ , що призводить до небажаного зменшення крутного моменту M_v .

Тому компенсація температурної помилки магнітоіндукційного вимірювача здійснюється в інший спосіб - застосування термомагнітного шунта.

За допомогою термомагнітного шунта можна впливати на коефіцієнт γ таким чином, щоб звести загальний температурний коефіцієнт магнітноіндукційного вимірювача σ до мінімуму.

Принцип компенсації температурної помилки за допомогою термомагнітного шунта лежить в наступному, що до торця постійного циліндричного магніту на його полюси накладається шайба мідно - нікелієвого сплаву (67,55% Ni , 30,2 % Cu, 2,95 % Fe), форма якої залежить від кількості полюсів, при $2P_M \geq 6$ шайбі має товщину 1мм. Ця шайба є термомагнітним шунтом, який відводить частину магнітного потоку на себе.

Конструктивно вузол компенсації температурної помилки з ковпачковим диференціатором з використанням термомагнітного шунта показано на рис.

До торця циліндричного магніту 1 притиснутий термомагнітний шунт 2. В алюмінієвому магнітному екрані 3 поміщається циліндричний концентратор магнітного потоку 4. Концентратор магнітного потоку використовується для концентрації робочого потоку магнітного потоку через стінку магнітного ковпачка.

При підвищенні температури навколишнього середовища електричний опір ковпачка 5 збільшується і струм, який протікає через ковпачок, зменшується. Це призводить до зменшення крутного моменту M_v і зменшення показань вимірювача.

Одночасно магнітний потік Φ зменшується відповідно до величини температурного коефіцієнта магнітної індукції магніту. Однак внаслідок зменшення магнітної проникності термомагнітного шунта здійснюється перерозподіл магнітних потоків у бік відносного збільшення робочого магнітного потоку Φ_r за рахунок значного зменшення загального магнітного потоку Φ_m проходить через шунт.

При правильному підборі шунта, попри зменшення загального магнітного потоку Φ , робочий магнітний потік Φ_r як зменшується, а й збільшується. Це однозначно дорівнює збільшенню магнітної індукції повітряної робочої щілини. Таким чином; використання термомагнітного

шунта можна отримати магнітну систему, яка має додатковий температурний коефіцієнт магнітної індукції γ в робочому витку магнітного потоку.

Збільшення магнітної індукції робочого потоку і зменшення модуля пружності E пружини (волоска) компенсують збільшення електричного опору ρ матеріалу ковпачка, в результаті чого здійснюється ліквідація температурної помилки вимірювача.

Обробка даних та розрахунок температурної помилки вимірювача здійснюється за програмою SPEED KT.

Вхідні та обчислені параметри, а також їх ідентифікатори для розрахунку за програмою SPEED KT представлені у таблиці 1.1.

У блоці 1 вводяться величини Ω , F , α , γ , β , λ , l , t , t_1 , h_0 .. У блоці 7 кутовий швидкості обертання магнітного вузла Ω надається значення 0. У блоці 7 до значення Ω_1 додається величина кроку зміни швидкості магнітного вузла ρ_0 і обчислюється кут повороту диска α_0 при нормальній температурі. Блоком 9 відкривається цикл. Якщо $01 < 0$ то управління передається на блок 8 або на друк виводиться значення величини α_0 , Ω_1 (блок 9).

У блоці 11 обчислюється загальний температурний коефіцієнт β . У блоці 15 значення σ додається величина кроку зміни швидкості магнітного вузла Ω_1 . Обчислюється кут повороту диска dt при температурі t . Блоком 16 відкривається цикл. Якщо $01 < 0$, то управління передається на блок 13.. Інакше на друк виводиться значення величин AT і CT (αt , Ω_1) блок 17. У блоках 18-20 обчислюється та роздруковується значення відносної помилки dx^0 при температурі t . Блоком 21 перевіряється умова $|dx| < 0,5$. Якщо умова виконується, рахунок припиняється. В іншому випадку на друк виводиться повідомлення. Оскільки відносна помилка $> 0,5$, для компенсації температурної помилки тахометра необхідно або змінити матеріал волоска або застосувати термомагнітний шунт (блок 22). У блоках 23, 24 виконується та

роздруковується значення температурного коефіцієнта магнітної індукції термомагнітного шунту γ_{T1} . У блоках 27 до значення Ω_1 додається величина кроку зміни швидкості магнітного вузла h_0 , обчислюється кут повороту ковпачка при температурі t_1 . Блоком 29 відкривається цикл. Якщо $01 < 0$, то управління передається на блок 26. В іншому випадку на друк виводиться значення величин α_{t1}, Ω_1 (блок 28). У блоках 30,31,32 обчислюється та роздруковується значення відносної помилки $d_{\lambda 1}$ при температурі. Блоком 32 перевіряється умова $|d_{\lambda 1}| < 0,51$.

Якщо умова виконується, рахунок припиняється. В іншому випадку на друк виводиться повідомлення. Так як відносна помилка $> 0,5\%$, для компенсації температурної помилки тахометра необхідно змінити матеріал волоска або застосувати термомагнітний шунт (блок 34).

У блоках 34,35 обчислюється та роздруковується значення температурного коефіцієнта магнітної індукції термомагнітного шунта γ_{T2} .

Отримані результати розрахунку за програмою свідчать про необхідність застосування термомагнітного шунту, який виключив би вплив температури навколишнього середовища на прилад. Тим самим було результати відповідають технологічним вимогам.

4.4. Аналіз мультиплікатора відлікового пристрою

Для підвищення точності відліку у разі коли статична характеристика лінійна, а з конструктивних міркувань шкалу неможливо виготовити з

великим діаметром, відліковий механізм здійснюють з двома стрілками, які пов'язані між собою зубчастим механізмом - мультиплікатором.

Стрілки через мультиплікатор із передатним ставленням

$$i = i_{12} \cdot i_{23} = z_2 z_4 / z_1 z_3 = 12 / 40 \cdot 39 = 1 / 10 \quad (1.64)$$

взаємопов'язані залежністю , тобто один оборот першої стрілки відповідає 10 оборотів другої стрілки.

Зубчасті передачі використовуються як остання ланка передавально-розмножувального механізму (мультиплікатора), працюють при дуже малих механічних напругах і кутової швидкості, тому що служать для переміщення стрілок., Індексів, візирних ліній та інших покажчиків з малою масою і добре збалансованих. Такі зубчасті передачі іноді називають індикаторними або вексельними, зубчастими передачами.

Формули розрахунку елементів прямозубої передачі з високою корекцією наведені у таблиці 1.2.

Список ідентифікаторів вихідних та обчислюваних параметрів програмою наведено у таблиці 1.3.

Алгоритм програми представлено на рис. 1.10.

У блоці 1 друкується таблиця значень коефіцієнта змішування шестерні в залежності від числа зубів шестерні і коефіцієнт радіального зазору в залежності від величини модуля М. У блоці 1 вводяться m, α, Z^* .

Потім значення цих величин виводяться на друк (блок 3).

У блоках 3-17 обчислюються параметри:

$$I, t_0, t, d_1, d_2, d_{01}, d_{02}, d_{a1}, d_{a2}, d_{\phi 1}, d_{\phi 2}, h_1, h_2, h_{a1}, h_{a2}, h_{f1}, h_{f2}, S_1, S_2, b_{\alpha\omega}, aS_t, h_c, S_c, S_{a1}, S_{a2}, z_3, z_4, w_1, w_2, \varepsilon$$

У блоці 18 виводиться на друк обчислене значення $x_p = 1 - z_1 (\sin_2 \alpha) / 2$.

У блоках 19,20 виводяться значення обчислених параметрів в блоках 4-18. У

логічному блоці 21 визначається послідовність дій якщо $x_r < 1$, то на друк видається повідомлення: "Підрізання зубів відсутня" (блок 22), інакше "Існує підрізання зубів" (блок 23). Потім перевіряється на присутність загострення зубів. Якщо $S_3 > 0$ (блок 27), то видається повідомлення "Загострення зубів відсутня", інакше - "Має місце загострення" (блок 26). Якщо $S_3 = 0$ (блок 25) програма переходить до блоку 26, інакше видається повідомлення "Існує як загострення зубів, а й радіус вершин зубів зменшується" (блок 28).

В результаті проведених розрахунків отримані геометричні параметри прямозубої зубчастої передачі з високою корекцією.

Отримані геометричні параметри відповідають технічним вимогам.

4.5. Аналіз точності мультиплікатора.

Основними причинами, що впливають на точність кінематичних цілей із зубчастими колесами, є зазори в кінематичних парах, похибки виготовлення деталей та складання механізму, а також силові та температурні деформації деталей.

Мінімальне значення кінематичної похибки прямозубої циліндричної передачі визначаємо із співвідношень для ступенів точності 3t

$$F'_{io \min} = 0,62K_S (F'_{i1} + F'_{i2})$$

для ступенів точності 7.

$$F'_{io \min} = 0,71K_S (F'_{i1} + F'_{i2})$$

Максимальне значення кінематичної похибки передачі визначається за такою формулою:

$$F_{i0\max}' = K \left[\sqrt{(F_{i1}')^2 + (E_{\Sigma M_1})^2} + \sqrt{(F_{i2}')^2 + (E_{\Sigma M_2})^2} \right] \quad (1.73)$$

де F_{i1}', F_{i2}' – відповідно кінематичні похибки зубчастих коліс.

$E_{\Sigma M_1}, E_{\Sigma M_2}$ - відповідно сумарна наведена похибка монтажу ведучого та веденого зубчастих коліс.

K_s, K - коефіцієнти фазової компенсації.

K_B - імовірний коефіцієнт.

Перекладемо з лінійних одиниць у кутові хвилини максимальне та мінімальне значення кінематичних похибок.

$$\delta_\varphi = 6,58 F_{i0}' / d_2 \quad (1.74)$$

де d_2 - діаметр ділового кола веденого колеса.

Визначимо координату середину поля розсіювання кінематичної похибки передачі у кутових хвилинах.

$$E_{vi}^\varphi = \frac{\delta_{\varphi\max} + \delta_{\varphi\min}}{2} \quad (1.75)$$

Визначимо поле розсіювання кінематичної похибки передачі у кутових хвилинах

$$V_i^\varphi = \delta_{\varphi\max} + \delta_{\varphi\min i} \quad (1.76)$$

де $V_{\varphi i}$ - поле розсіювання всієї ланки.

Розраховуємо кінематичну похибку передачі ймовірним способом за формулою:

$$F_{i\text{ср}}' = K_e \cdot F_{i0\max}'$$

де K_e - коефіцієнт імовірнісний (визначається за таблицями). Далі визначимо мінімальне значення мертвого ходу зубчастої передачі за формулою:

$$jt_{\min} = I_{n\min} / (\cos \alpha \cdot \cos \beta)$$

де $I_{n\min}$ - гарантований бічний зазор зубчастого зачеплення (за стандартом),

α - кут вихідного профілю коліс,

β - ділительний кут нахилу лінії зуба.

Знаходимо максимальне значення мертвого ходу зубчастої передачі.

$$jt_{\max} = 0,7(E_{MS1} + E_{EM2}) + \sqrt{0,5(T_{H1}^2 + T_{H2}^2) + 2f_a^2 + Gr_1^2 + Gr_2^2}$$

де E_{MS1}, E_{MS2} - відповідно найменше зміщення вихідного контуру ведучого та веденого зубчастих коліс.

T_{H1}, T_{H2} - відповідно допуск на зміщення вихідного контуру ведучого та веденого зубчастих коліс.

f_a - граничне відхилення міжосьової відстані,

Gr_1, Gr_2 - радіальні зазори в опорах ведучого та веденого коліс.

Перекладаємо максимальне та мінімальне значення мертвого ходу зубчастої

передачі з лінійних одиниць за умов хвилини

$$f\varphi = 6,88jt / d_2 \tag{1.78}$$

Розраховуємо координату середини поля розсіювання мертвого ходу передачі

$$E_{vi}^{\varphi} = \frac{j\varphi_{\min} + j\varphi_{\max}}{2} \quad (1,79)$$

Визначаємо поле розсіювання мертвого ходу передачі

$$V_i^j = j\varphi_{\max} - j\varphi_{\max} \quad (1,80)$$

Список ідентифікаторів вихідних та обчислюваних параметрів програмою для розрахунку кінематичної похибки та мертвого ходу циліндричної зубчастої передачі наведено у таблиці 1.5.

4.6. Визначення характеристик надійності анемометра.

Працездатність приладу визначається як стан, при якому прилад здатний виконувати вимірювання швидкості вітру з параметрами, що відповідають вимогам технічного завдання на розробку приладу. Подія, що полягає у порушенні працездатності, називається відмовою. Відмови поділяються на відмови функціонування та відмови за параметром. Перші полягають у тому, що прилад перестає виконувати свою основну функцію-вимірювання швидкості вітру. Причиною такої відмови є поломка, пошкодження, заклинювання механізмів. Вихід з ладу деталей та інше. Відмови за параметром (основним є відмова за точністю) полягає в тому, що одна з основних функцій перетворювача швидкості обертання ковпачка у відхиленні стрілки відлікового пристрою виконується з недостатньою точністю [12]. Властивість приладу зберігати працездатність протягом заданого часу без вимушених перерв називається безвідмовністю. Показниками безвідмовності є: інтенсивність відмов $\lambda(t)$, середнє напрацювання на відмову T_{cp} , ймовірність іншої роботи $P(t)$.

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ - це ймовірність відмови приладу, що не ремонтується, в одиницю часу за умови, що відмова до цього моменту невелика.

Середнє напрацювання на відмову T_{cp} – тривалість (рік) роботи приладу до виникнення відмови.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ - це можливість, що у заданому інтервалі часу t виникне відмови приладу, можливість відмови у інтервалі часу t дорівнює $q(t)$.

Всі ці показники пов'язані між собою такими залежностями:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.81)$$

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} dt \quad (1.82)$$

$$p(t) = 1 - q(t) \quad (1.83)$$

Для випадку $-\lambda(t) = \lambda = const$, що має місце на практиці після приробітку елементів приладу впасти до появи зносу і старіння магнітів справедливий експоненціальний (закон розподілу $p(t)$) і тоді

$$p(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.84)$$

$$T_{cp} = 1 / \lambda \quad (1.85)$$

Залежно від стадій розробки приладів застосовують різні види розрахунку надійності.

Наведемо орієнтовний розрахунок надійності, оскільки вихідним матеріалом служить кінематична схема та склад елементів зв'язку між ними,

тому розрахунок наводиться за таких припущень:

1) Усі елементи складання, вузли, блоки з'єднані у структурній схемі надійності

(графічне зображення елементів, складання, вузлів, блоків і зв'язків між ними що показують взаємодію відмови кожного елемента складання, блоку на все виробу загалом) послідовно.

2) Під час проектування виробу спеціальні методи забезпечення надійності (Резервування, скорочення часу роботи елементів) не використані.

3) Навантаження елементів номінальні.

4) Імовірність безвідмовної роботи елементів змінюється у часі

Експоненційний закон, тобто λ - характеристики елементів постійні, $\lambda_i = \lambda_i(t) = const$.

5) Час роботи елементів однакові.

До складу приладу входять: магніт, вісь, дві спіральні пружини, механічне з'єднання ковпачка з віссю та осі з волосками, чотири циліндричні зубчасті колеса, чотири опори з тертям ковзання, дві стрілки та шкала, двигун. Всі ці елементи розміщені у корпусі вимірювача. Крім того, в корпусі датчика знаходяться: вал, генератор, два шарикопідшипники, муфти.

Дані m , відповідають кількості різних типів елементів, числу однотипних елементів n_i , середньої інтенсивності відмов елемента λ_i і всіх елементів даного типу $\lambda_i n_i$ наведені в табл. 1.6.

ТАБЛИЦЯ 1.6 Середні показники відмов

Тип елемента	n_i	$\lambda \cdot 10^{-6}$	$\lambda_i n_i \cdot 10^{-6}$
Датчик температури	1	0,5	0,5
Шарикопідшипники	4	0,65	2,6

Вал	1	0,1	0,1
Синхронний генератор	1	0,005	0,005
Роз'єм з'єднувальний	2	0,005	0,005
Шнур сполучний (Датчик ДСВ-вимірювач)	1	0,02	0,02
Двигун	1	0,005	0,005
Магніт	1	5,6	5,6
механічне з'єднання Магніти з валом	1	1,1	1,1
Ось	1	0,001	0,001
Спіральна пружина	2	0,005	0,01
механічне з'єднання Ковпачок з віссю і волосками	3	0,02	0,06
Циліндрична шестерня	4	0,1	0,4
Опора з тертям ковзання	4	0,5	2,0
Важіль	1	0,02	0,02
Механічне з'єднання стрілок з віссю і шестернями	2	0,2	0,4
Датчик корпусу ДСВ	1	1,1	1,1
Корпус вимірювача	1	1,1	1,1

1. Середня інтенсивність відмов всього приладу

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i n_i = \sum_{i=1}^{18} (0.5 + 2.6 + 0.1 + 0.005 + 0.005 + 0.02 + 0.005 + 5.6 + 1.1 + 0.001 + 0.01 + 0.06 + 0.4 + 2.0 + 0.4 + 1.1 + 1.1) \cdot 10^{-6} = 14.526 \cdot 10^{-6} \quad 1/\text{година}$$

2. Коефіцієнт K_E , що встановлює умови експлуатації приладу:

- у лабораторних умовах $K_E = 1$

- на кораблях $K_E = 17$

3. Середня інтенсивність відмов приладу з урахуванням умов експлуатації:

$$\lambda_E = \lambda \cdot K_E$$

- у лабораторних умовах $\lambda_{E1} = 14.526 \cdot 10^{-6}$ 1/година

- на кораблях $\lambda_{E2} = 17 \cdot 14.526 \cdot 10^{-6} = 246.942 \cdot 10^{-6}$ 1/година

4. Середнє напрацювання анемометра T_{cp} до першої відмови $T_{cp} = 1 / \lambda_E$:

- у лабораторних умовах*

- на кораблях *

5. Можливість безвідмовної роботи анемометра: $p(t) = e^{-\lambda t}$

- у лабораторних умовах $p(2000) = e^{-14.520 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 0.9714$

- на кораблях $p(2000) = e^{-246.942 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 0.6103$

Результати розрахунку надійності показують, що перше місце серед найменш надійних елементів у кінематичній схемі анемометра займає магніт, друге – механічне з'єднання магніту з валом, корпус датчика ДСВ, корпус вимірювача, третє – надійність шарикопідшипників, опори з тертям ковзання.

Умови експлуатації, що характеризує коефіцієнт K_E , здійснює значний вплив зменшення надійності анемометра. Тому збільшення надійності анемометра можна досягти підбором елементів з меншими λ характеристиками, а також спеціальних методів забезпечення надійності – резервування, скорочення часу роботи елементів у схемі.

4.7. Аналіз відлікового пристрою.

Отримана статична характеристика приладу лінійна, що дозволяє застосувати лінійно-рівномірну шкалу, чутливість приладу стала по всій шкалі.

Вихідними даними для розрахунку відлікового пристрою є межі зміни вимірюваної величини $X_{\max} - X_{\min}$ і максимальна помилка відліку δ [5]. Для шкали потрібно визначити такі параметри: ціну розподілу, повний робочий кут шкали, кутові координати штрихів шкали та діаметр шкали.

Необхідно також визначити кількість деталей шкали та вибрати систему оцифрування.

Ціна розподілу шкали K_{II} - число одиниць параметра, що вимірюється, що припадає на один розподіл шкали, повинна бути кратною числам 1,2 або 5.

Ціна розподілу шкали із умови

$$K_{II} \geq 2\delta \quad (1.86)$$

де δ - максимальна помилка відліку, що дорівнює при $\delta = 0,5$ м/с

$$K_{II} = 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ м/с}$$

Число поділів відлікового пристрою

$$N = (X_{\max} - X_{\min}) / K_{II}$$

$$N = (67-0) / 1 = 67.$$

Діаметр шкали вибираємо з нормального ряду 35,50,65,80,100 мм.

$$D_{III} = 65 \text{ мм}$$

Розрахункова довжина шкали:

$$L_{III} = D_{III} \cdot \pi = 65 \cdot 3,14 = 204,1 \text{ мм} \quad (1.88)$$

Довжина поділу шкали

$$b = L_{III} / N = 3 \text{ мм}$$

В анемометрі передбачено вимір вхідної величини за 3 обороти відлікового пристрою, тоді весь діапазон виміру розділимо на 3 - отримаємо, що за один повний оборот зроблено вимір від 0 до 22 м/с. Тоді, умови координата першого поділу α_1 (а наступних n поділів $\lambda_i = \alpha_1 \cdot n_i$) дорівнюватиме

$$\alpha_1 = 300 : 22 = 164\% \text{ справ.}$$

Різниця коротких та довгих штрихів не менше 0,5 мм. Стрілки з ножеподібним кінцем, товщина яких дорівнює ширині штриха шкали. Цифрова професія шкали – 0,5, 10, 152.

Оскільки ми маємо двосторонній відліковий пристрій і жоден оборот стрілки грубого відліку проходить 10 оборотів стрілки повного відліку $\alpha_r = 10\alpha_r$, отже не показання приладу Π пов'язані з розрахунками N_r, N_r (відповідно індекси грубого та повного відліку) залежні:

$$\Pi = (N_r + 0.1N_r)K_{\Pi} \quad (1.89)$$

де K_{Π} - стала приладу (ціна поділу шкали).

5. РОЗРОБКА МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ВИМІРЮВАЧА КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ.

Щоб визначити переваги застосування МПС у вимірювальній техніці, необхідно визначити вимоги, які пред'являються до приладів:

- 1) висока якість характеристики (чутливість, точність, лінійність, відображення результатів вимірювань, велика перешкодозахисність),
- 2) висока надійність, тобто. безвідмовність та тривалий період роботи,

3) технологічність (невеликі розміри та маса, простота конструкції, взаємозамінність окремих ланок, невелика собівартість).

Ці вимоги важко виконати лише одним удосконаленням вимірювальної частини приладу. Тому частину вимог можна забезпечити за рахунок обчислювальних та логічних можливостей вмонтованих МПС.

5.1. Функції МПС у цьому вимірнику.

Функції МПС у приладі, що розробляється, зводяться до наступних:

- 1) забезпечення приладу багатофункціональністю,
- 2) зменшення впливу шумів при вимірі,
- 3) здійснення корекції чутливості та зміщення нуля,
- 4) компенсація температурного впливу,
- 5) передача даних для зберігання та контролю в ЕОМ,
- 6) підвищення точності та забезпечення лінійності вимірювань.

Вимірювальною частиною проекрованої комп'ютерної системи є двох стрілочний тахометр з багатофункціональним ковпачковим диференціатором. В даний час найбільш перспективними вважаються цифрові тахометри, що складаються з датчика частоти обертання та вторинного вимірювального приладу.

Як основа цифрових тахометрів - накопичуючий кодуєний перетворювач. Використовуються два методи вимірювання:

- метод вимірювання середнього значення частоти датчика за фіксований інтервал часу
- метод виміру миттєвого значення частоти за період.

У першому методі цифровий тахометр реалізує залежність

$$N = \text{ent}\{f_g \cdot T_0\} = \text{ent}\left\{-\frac{nz}{60} \cdot T_0\right\} \quad (1.90)$$

де ent ентропія розподілу ймовірності,

N - показання цифрового тахометра,

T_0 - час виміру,

n – частота обертання

z – число імпульсів за 1 оберт датчика частоти обертання.

Основний недолік даного методу - низька здатність, що розміщує.

У другому методі цифровий тахометр реалізує залежність

$$N = \text{ent}\{T_g \cdot f_0\} = \text{ent}\left\{-\frac{nz}{60} \cdot f_0\right\} \quad (1.91)$$

Недолік другого методу - отримання результату в одиницях, обернено пропорційних частоті обертання.

Для підвищення роздільної здатності застосовують такі способи:

- множення частоти проходження імпульсів (підвищується в 2 рази).
- багаторазове випрямлення вихідного сигналу датчика частоти обертання (використовувати сигнали синусоїдальної та прямокутної форми).
- Підсумовування інфранизької частоти із заздалегідь відомою частотою обертання.

Для виконання великої кількості функцій можна використовувати мікропроцесорну систему серії КР580 (технологія n-МОП, розрядність сміття – 8 біт, число ВІС – 20 шт., продуктивність – 500*).

5.2. Вибір МПС.

Для постійно вбудованих МПС можна застосувати понад двадцять вітчизняних мікропроцесорних комплектів.

МПК - це набір великих інтегральних схем, сумісних між собою конструктивно-технологічним даним. Усі модулі МПК призначені для спільної роботи. При побудові вбудованих МПС використовують також однокристалні ЕОМ. Такий підхід має ряд недоліків, а саме дозволяє реалізувати малі обсяги пам'яті.

Процес вибору МПС ускладнюється тим, що МП однакової розрядності можуть мати різну обчислювальну потужність. Важливе значення має чинник собівартості.

На здійснення остаточного вибору значний вплив має також набір функцій, які МПС має виконувати у приладі (ці функції визначені у попередньому розділі).

Вибираючи МПС і оцінюючи її обчислювальні потужності потрібно купувати в увага 3 характеристики МП:

- 1) розрядність,
- 2) обсяг пам'яті, що адресується,
- 3) швидкість.

Враховуючи всі перераховані вище фактори, а також наявність існуючого програмного забезпечення, можна сказати, що найбільш прийнятним в даному випадку є МПК на базі МП КР530 (технологія n-МОП, розрядність процесора - 8 біт, число БІС - 20 шт., продуктивність - 500 тис. .).

Залежно від виду взаємодії МП, пам'яті та пристрої введення-виводу розрізняють три способи обміну даними:

1. Програмний (має 4 основні режими):

- запис ЗУ (ЗПЗП),
- читання ЗУ (ЧТЗУ),
- запис ВВ (ЗПВВ),
- читання ВВ (ЧТВВ).

Служать різні команди управління для реалізації 4 режимів.

2. З перериванням програми.

МП перериває виконання поточної програми і пересилає в стекову пам'ять дані про всі свої задіяні регістри, щоб потім повернути швидко колишній стан і продовжити виконання перерваної програми.

3. За допомогою прямого доступу до пам'яті (режим ПДП), МП тут виходить з гри, але вміст регістрів не втрачає і нікуди не відправляє.

5.3. Розширення каналу введення-виводу (за необхідності зняття інформації від групи однотипних датчиків).

Шина даних ОМЕОМ сумісна з 8-розрядною двонаправленою шиною МП-КРЕОНКЕОА, що забезпечує можливість підключення до МЭОМ серії КРS80 периферійних пристроїв у вигляді мікросхем серії КР580, які можна використовувати для реалізації ряду додаткових спеціальних функцій, а також для збільшення кількості каналів введення їх типів [б].

На рис. показано приєднання ОМЕОМ серії К1816 до стандартних периферійних пристроїв серії КР580-НС КР580ВВ55. Інтегральна схема КР580ВВ55 забезпечує три 8-розрядних програмованих каналу введення-виведення (РА, РВ, РС).

Для зв'язку ОМЕОМ серії К1816 з ІВ КР580ВВ55 в останній використовується 8-розрядна двонаправлена шина даних, входи RD і WR для керування читанням-записом, вхід вибору кристала CS для активізації логіки керування читанням-записом та адресні входи АТ, А1 для вибору .

Висновки ОМЕОМ ОВ, RD, WR з'єднуються з відповідними висновками ІВ КР580ВВ55. При реалізації цієї схеми вибирається спосіб, за допомогою якого мають адресуватися внутрішні регістри ІВ КР580ВВ55.

Якщо до шини даних ОМЕОМ приєднується лише один пристрій ІВ КР580ВВ55, вхід ІВ КР580ВВ55 заземлюється.

Якщо використовується кілька ІВ КР580ВВ55, для вибору адреси повинні фіксуватися додаткові розряди адреси, які використовуються для вибору мікросхеми.

ВИСНОВКИ

Отже, через те що в даний час у зв'язку з постійним розвитком науки і техніки здійснюється зміна в принципах побудови засобів вимірювання. Широке використання отримали вбудовані МП-системи, побудовані на основі однокристальних мікро-ЕОМ. Що мають спеціалізований процесор та інтерфейс.

Загалом перспективи розвитку вбудованих МП-систем будуть визначатися:

- розвитком мультимікропроцесорних систем, організацією вимірювальних систем з децентралізованою обробкою інформації,
- розвитком сенсорної техніки (інтегрування в одному кристалі ВІС процесора, ПЦП та чутливого елемента),

- розробкою діалогових методом вимірювання та обробки інформації з розвитком мов спілкування та мікро-ЕОМ, близьких до природних,
- удосконаленням методів та програм засобів самотестування,
- розширенням номенклатури БІС мікросхем, пам'яті та спеціалізованих інтерфейсів.

6. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ “АНЕМОМЕТР З ПОКРАЩЕНИМИ ЯКОСТЯМИ”

6.1. Опис ідеї проекту

Тема даної магістерської дисертації “Анемометр з покращеними характеристиками”. На даний момент використання анемометрів розширює свій діапазон застосування, з таких секторів, як метеорологія або енергія вітру, в інші, де слід враховувати вплив вітру (рухомі мости в цивільному будівництві, великі крани і навіть на інших планетах.

Залишаючи осторонь важливість наявності найточніших інструментів (оскільки потужність вітру пропорційна $1/3$ потужності швидкості вітру), сектор вітроенергетики надзвичайно стурбований двома аспектами, які вимагають використання анемометрів: прогнозування виробництва енергії вітру в польових умовах і контроль продуктивності вітряних турбін. За останні десятиліття вітроенергетичний сектор був відкрито підтриманий урядами (Німеччина, Данія, Іспанія ...), стурбованими чистою енергією і зниженням залежності їх викопного палива. Крім того, в даний час дуже активні нові сильні гравці в цій галузі, такі як Китай, США, Бразилія чи Індія, з великими показниками з точки зору встановленої потужності вітру. У світлі цих фактів

є розумним припустити, що згаданий масовий попит анемометрів з цього сектора продовжиться в найближчі роки, якщо не збільшиться.

Серед різних приладів, призначених для вимірювання швидкості вітру, чашковий анемометр в даний час як і раніше, залишається найбільш використовуваним пристроєм в секторі вітроенергетики, оскільки він недорогий в порівнянні з альтернативними пристроями (наприклад, звуковими анемометрами), він показує лінійний відгук у нормальний діапазон швидкості вітру і здатний працювати при досить екстремальних погодних умовах.

Чашкові анемометри використовуються у галузі вітроенергетики для характеристики ділянок вітроелектростанцій та прогнозування місячного та річного виробництва енергії. Їх роль важлива, оскільки прогнозування швидкості вітру залежить від їх правильної роботи. На жаль, північний клімат значно впливає на працездатність анемометрів. Обмерзання, як правило, відбувається на великих висотах (понад 600 м). Похибка прогнозування швидкості вітру, спричинена льодом, що накопичується на анемометрі, може становити від 10% до 30% протягом зимових місяців. Це створює великі помилки в прогнозуванні вітру, що призводить до заниження вітрового потенціалу ділянки або спричинення перевантажень вітрових турбін, які залежать лише від даних, отриманих від анемометра. Щоб частково усунути цю складність, застосовують нагріті чашкові анемометри.

Покращення основних захисних характеристик – це нові горизонти в вітроенергетиці та дослідженнях не тільки нашої планети. А отже розробка та удосконалення анемометрів які здатні, досить точно, визначити швидкість вітру в будь-якій кліматичній зоні, буде актуальна і надалі.

1) Цілісне уявлення та базові потенційні ринки представлено у вигляді таблиці (табл. 6.1), завдяки, якій можна визначити групи потенційних клієнтів [36].

Таблиця 6.1.Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямок застосування	Вигоди для користувача
Контроль різниць швидкості вітру в зонах з критичними показниками температури	Знаходження нових ефективних територій для вітроенергетики	Точна інформація про продуктивність ділянки
	Визначення зміни швидкості вітру на великих висотах	Контролювання параметрів зміни вітру без громіздких метеостанцій
	Можливість прогнозування лавин в гірській місцевості	Практичне застосування в зонах з великою кількістю снігів

Визначено ідею магістерської дисертації, її застосування та технікоекономічні характеристики. Дана ідея може мати широке призначення та виходу для багатьох користувачів.

2) Інформаційну карту проекту представлено у вигляді таблиці (табл. 6.2)

Таблиця 6.2. Інформаційна карта

1. Назва проекту	Анемометр з покращеними якостями
2. Автори проекту	Пигуля А.В.
3. Коротка анотація (не більше 1/3 сторінки)	Об'єктом проектування є розробка анемометру з покращеним захистом. Мета проектування: конструювання анемометру здатного до роботи в складних кліматичних умовах. Проект складається зі вступу, розділів «стартап-проект», «конструкторська частина», висновків та рекомендацій, списку

	бібліографічних джерел та додаткових матеріалів (додатків). Результати розробки можуть бути впроваджені на торгових підприємствах.
4. Термін реалізації проекту	< 2 місяців
	Тривалість проекту (в місяцях)
5. Необхідні ресурси	Термо-вакуумний прес для формування корпусу та більшості зовнішніх елементів, готові стандартні вироби (типу тахогенератора, нагрівачів, гвинтів, болтів, шайб, гайок).
	Перелік усіх необхідних ресурсів (фінансових, матеріальних інтелектуальній та ін.)
6. Опис проблеми, яку вирішує проект	Пристрій потрібен для визначення вітроефективних зон та моніторингу швидкостей вітру в зонах з екстремальними кліматичними умовами. Даний пристрій буде актуальним не тільки зараз, а й в недалекому майбутньому коли вільних вітроефективних зон не залишиться і доведеться знаходити нові в інших кліматичних умовах.
6. Головні цілі та завдання проекту	Проектування та реалізація пристрою для вимірювання

	швидкості вітру в зонах з екстремальними кліматичними умовами.
7. Очікувані результати	
(Описати позитивні зміни, які відбудуться в результаті реалізації проекту після його завершення та в довгостроковій перспективі)	
Спроекований пристрій для вимірювання швидкості вітру є перспективним проектом який розширю зону пошуку вітроефективних зон. Так як даний пристрій має не тільки гарний захист, а і гарні	

• Для того, щоб проаналізувати техніко-економічні переваги даної ідеї необхідно визначити коло конкурентів або товарів-замінників, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів конкурентів відповідно до визначеного вище переліку. В результаті порівняльного аналізу проводиться визначення показників щонають а) гіршізначення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращізначення (S, сильні) (табл. 6.3).

Таблиця 6.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Особливості	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	2	3	4	5	6
1	Економічні	Низьковартісне обслуговування та ремонт			x

		Вартість витратних матеріалів			x
		Вартість експлуатації			x
2	Надійності	Строк безвідмовного функціонування			x
		Гарантійний термін			x
		Ремонтопридатність			x
3	Технологічні	Довготривалість виготовлення			x
		Оптимізація витрат			x
		Трудомісткість виготовлення	x		
4	Призначення (технічні)	Наявність датчиків контролю		x	
		Широкий діапазон використання			x
		Мала похибка вимірювання		x	
5	Ергономічність	Відповідність виробу сприйняття інформації користувачем			x
		Зручність користування системою			x

6	Естетичні	Інформаційна виразність		x	
		Досконалість виробничого дослідження		x	
7	Транспорtabilité	Трудомісткість підготовки одиниці продукції до перевезень			x

За допомогою таблиці визначено всі переваги, недоліки проекту та з'ясовано, що проект має дуже багато сильних сторін, а саме довгий гарантійний термін, швидке виготовлення і т.д.

6.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових, які подані у таблиці 6.4:

Таблиця 6.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Корпус з ABS пластику	За допомогою ABS пластику	наявна	доступно
2	Модифікована ПО обігріву	Мова програмування C	наявна	доступно

3	Точковий обігрів чутливих елементів	Розподілені нагрівачі	наявна	доступно
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Розподілені нагрівачі				

Вибрана технологія найчастіше застосовується в приладах з великою кількістю чутливих елементів робота яких залежить від їх умов використання. Також використовується в умовах сурового клімату для покращення температурних властивостей приладу. Представляє собою систему розрізнених нагрівачів які за допомогою новітнього ПЗ проводять спрямований нагрів конкретних вузлів, що в свою чергу призводить до зменшення витрат на обігрівання та збільшення довговічності не тільки самого приладу в цілому, а й окремих його елементів. Сама технологія має безліч варіацій які залежать від потужності нагрівачів. В системі навіть можна використовувати різні типи нагрівачів, що збільшує діапазон можливих варіацій нагрівачів та робочих температур. Застосувати, запропоновану технологію можливо, для цього достатньо технічних засобів і матеріальних коштів.

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз наявності попиту, обсягу та динаміки ринку (табл. 2.5) дозволяє визначити ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту. А отже і визначити які перешкоди слід очікувати та методи їх

уникнення. Визначити загальний обсяг продаж та динаміку ринку. Знайти норму рентабельності на ринку.

Таблиця 6.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	265000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	<u>Зростає</u>
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Наявність ліцензій та сертифікатів
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ГОСТ 6376-74 Анемометр чашковий
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	55%

З'ясовано, що характеристика даного стартап – проекту дозволяє легко ввійти на потенційний ринок за допомогою зростання динаміки ринку та незначних обмежень для входу. Головною ціллю є отримання певних ліцензій та сертифікатів.

2) Надалі визначено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформовано орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 6.6).

В якій визначається цільова аудиторія, відмінності у поведінці різних цільових груп клієнтів та вимоги споживачів до товару. А отже можна проглянути основні аспекти аудиторії.

Таблиця 6.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія(цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Знаходження нових вітроефективних територій	Сектор вітроенергетики	Незначна	- надійність; - точність; -ПЗ -зручність; -швидкість діагностики.
2	Якісний контроль існуючих вітроефективних територій			
3	Можливість досліджень зон з низькою температурою			
4	Чіткий контроль лавин та зсувів	Курортні зони		

Основною цільовою аудиторією відповідно до вимог та потреб, що формує ринок, було обрано Сектор вітроенергетики, та Курортні зони.

3) Складено таблиці факторів, що перешкоджають ринковому впровадженні проекту(табл. 6.7.) для аналізу ринкового середовища.

В таблиці 6.7 розглянуто виробництво, конкуренція та інші важливі аспекти.

Таблиця 6.7. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Виробництво	ступінь зносу запчастин	Співпраця з заводами для закупки якісних запчастин оптом
2	Конкуренція	Вихід на ринок багато конкурентоспроможних компаній	Проінформувати клієнтів про високу якість нашої продукції за меншу ціну
3	Нова компанія	Нова компанія не викликає значної довіри	Зробити ставку на маркетинг, рекламу, співпрацю з значними науковими інститутами та отримання відгуків від них.

Основними факторами, що перешкоджають ринковому впровадженні проекту є: виробництво, конкуренція, нова компанія.

Також визначаються основні фактори, що сприяють ринковому впровадженні проекту (табл. 6.8).

Таблиця 6.8. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії

1	Ціна	Низькі ціни приваблюють клієнтів	Не високі ціни на автоматизовану систему
2	Попит	Велика кількість замовлень	Збільшення потужностей
3	Інновації	удосконалення обладнання та метод контролю матеріалів	Висококваліфіковані працівники та іноземна наукова література для здійснення удосконалення обладнання.
4	Маркетинг	Залучення все більше нових клієнтів	Реклама у інтернеті, співпраця з різними інститутами та заводами для більшої популярності товару.

Основними факторами, що сприяють ринковому впровадженні проекту є: виробництво, попит, ціна, інновації та маркетинг.

4) Визначено загальні риси конкуренції на ринку (табл. 2.9).

Таблиця 2.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкуренто-спроможною)
1	2	3

<p>Тип конкуренції – <u>олігополія</u></p>	<p>Олігополія характеризується невеликою кількістю фірм (від 2 до 10), обгороджених бар'єрами, які перешкоджають вступу в галузь нових фірм, мають контроль над цінами, але при змові з іншими олігополістами</p>	<p>Має не багато конкурентів, тому може контролювати ціни на ринку</p>
<p>2. За рівнем конкурентної боротьби <u>локальний</u></p> <p>3. За галузевою ознакою - _____ міжгалузева</p>	<p>Може використовуватися, як на світовому на національному світовому ринку</p> <p>Дослідження можна використовувати у різних галузях</p>	<p>Отримання сертифікації, відповідності не тільки держ. нормам і стандартам, а й міжнародним та технічної ліцензії</p> <p>Універсальність даної установки, є можливість покращити її</p>
<p>4. Конкуренція за видами товарів: - _____ між бажаннями</p>	<p>Конкуренція між різними товарами</p>	<p>Так як система є універсальною, особливістю її є те що вона може застосовуватися у будь-якій галузі.</p>

Продовження до таблиці 6.9

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкуренто-спроможною)
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Нецінова. Проводиться головним чином за допомогою вдосконалення якості продукції, технології виробництва, інновацій та нанотехнологій, патентування	Головною характеристикою є якість та ціна доступна для багатьох клієнтів
	Цінова. Для значної частки клієнтів ціна є визначальною при виборі.	
6. За інтенсивністю не марочна	Роль торгової марки незначна, хоча самі марки можуть бути присутніми на ринку	Дана продукція не потребує марок, головними її пріоритетами є якість та технологічність

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що дана особливість конкурентного середовища має великі перспективи для конкурентної боротьби.

5) Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера) (табл. 6.10).

Таблиця 6.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачаль ники	Клієнти	Товари. замінники
	С.Е.М. everbest (Японія)	Young Company (США)	Campbell Scientific	Сектор вітроенергетики	ВАТ Меридіан

Продовження до таблиці 6.10

	Прямі конкуренти в галузі WINTAC Т (Китай)	Потенційні конкуренти	Постачаль ники	Клієнти	Товари. замінники
--	---	--------------------------	-------------------	---------	----------------------

Висновки:	Конкуренція є незначною так, як товари конкуренції суттєво відрізняються в ціні та вузькою сферою застосування.	можливість входу на ринок, але з невеликими масштабами, дуже мала кількість потенційних конкурентів.	Співпраця з багатьма постачальниками для вибору кращих, дешевших, якісніших запчастин.	Клієнти диктують умови, які стосуються якості, удосконалення та універсальності.	При утворенні загроз з боку товарівзамінників може відбуватися збільшення конкуренції, яка призведе до втрати багатьох клієнтів.
------------------	---	--	--	--	--

Аналіз конкуренції показав всіх прямих та потенційних конкурентів, постачальників та клієнтів, виявлено, що конкуренція є незначною так як є мало конкурентів, а попит на продукцію достатньо великий.

б) Використовуючи аналіз конкуренції, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 6.3), вимог споживачів до товару (табл.6.6) та факторів маркетингового середовища (табл. № 6.7-6.8) визначено та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 6.11.

Наведено значущі чинники, що роблять фактори для порівняння конкурентоспроможності значущим, тим самим обгрунтовано фактори о конкурентоспроможності.

Таблиця 6.11. Обгрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обгрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Ціна	Чим менша ціна, тим більший попит.
2	Постійні витрати на виробництво	Витрати на запчастини та на складові компоненти, які дуже швидко зношуються.
3	Попит	Розвиток галузі та виробництва, визначає попит на продукцію.
4	Інновації	Для того, щоб удосконалити продукцію необхідна велика база даних, патентів та винаходів.
5	Сертифікація	Тривалий час для отримання сертифікатів та патентну.
6	Репутація виробника	Клієнтів привертає увага реклама, перед покупкою вони ознайомлюються з відгуками.
7	Рівень організації процесу виробництва на підприємстві	Чим краще організований виробничий процес, тим воно краще розвивається.
8	Конкуренти	Вихід на ринок нових конкурентів, може суттєво вплинути на попит продукції.

7) За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 6.10) проведено аналіз сильних та слабих сторін стартап-проекту (табл. 6.12).

Таблиця 6.12.Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з автоматизованою системою						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Ціна	20	X						
2	Попит	12				X			
3	Інновації	15			X				

Продовження до таблиці 6.12

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів- конкурентів у порівнянні з автоматизованою системою						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
4	Сертифікація	14			X				
5	Постійні витрати на виробництво	9				X			
6	Репутація виробника	8						X	
7	Рівень організації процесу виробництва	14					X		
8	Конкуренти	6				X			

Найбільші бали у порівнянні з товарами-конкурентами здобули: ціна, інновації та сертифікація, слабкими факторами виявилися: конкуренти, постійні витрати на виробництво та репутація виробника.

8) Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками

(прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 6.13.SWOT_аналіз стартап _проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • нижча ціна порівняно з конкурентами (265000 грн у найближчого конкурента 324700 грн)(ціна); 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • нове підприємство викликає значні вагання зі сторони покупців
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ціна (зробити акцент на низьку ціну та якість продукції(удвічі меншу ніж у прямого конкурента)); • Інновації (удосконалення ПО та обладнання в цілому). 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Конкуренція (поява нових конкурентів на українському ринку); • Репутація виробника (початковий проект дуже важко правильно організувати).

За допомогою визначення можливих загроз та можливостей розроблено SWOT- за яким ми зможемо удосконалити та скорегувати свою стратегію конкурентної поведінки та стратегії розвитку проекту.

9) На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 6.14).

Таблиця 6.14Альтернативи ринкового впровадження стартап_проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації

1.	Динамічна(Освоєння нових ринків, впровадження інновацій, розвиток потенціалу для реалізації стратегічних цілей розвитку)	Збільшення постачальників, удосконалення ресурсів, найм досвідченого персоналу	3 роки
2.	Нестійкий (Раціоналізація асортименту продукції, утримання частки ринку, лідерство в ніші)	Поступове удосконалення ресурсів	1.5 роки
3.	Стабільний(Утримання конкурентного положення, утримання ринкової ніші, зростання частки ринку з нарощенням виробництва, акумуляція прибутку)	Значна можливість при налаштуванні робочого процесу	9 місяців

Було обрано стабільну альтернативу ринкової поведінки. Вона є найбільш безпечною, так як вона має найменші строки реалізації при чому є можливість триматися конкурентної позиції та поступово прибавляти прибуток та нарощувати виробництво.

6.4. Ринкова стратегія проекту

1) Створення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 6.15).

Таблиця 6.15. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Підприємства	висока	високий	середня	просто
2	Дослідницькі центри	низька	середній	середня	просто
3	Курортні центри	середня	середній	середня	просто
Які цільові групи обрано: підприємства та курортні центри					

Як цільову групу споживачів обрано підприємства та курортні центри так, як у даних сегментах низька інтенсивність конкуренції. У даному сегменті існують великі перспективи розвитку та можливість удосконалення автоматизації системи.

2) Для роботи в обраних сегментах ринку сформовано базову стратегію розвитку (табл. 6.16).

Таблиця 6.16. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	стабільна	Поступове збільшення виробництва, стабільне нарощування бази споживачів	Здатність до цінової війни та низькі витрати для виробництва продукту роблять його конкурентно спроможним в порівнянні з конкурентами.	Стратегія лідерства по витратам.

Обрано стабільну альтернативу розвитку тому, що вона забезпечує комфортне перебування фірми навіть під час сильного тиску конкурентів та цінової війни.

3) Обрано стратегію конкурентної поведінки (табл. 6.17).

За допомогою вірно обраної стратегії конкурентної поведінки можна забезпечити стабільне майбутнє проекту.

Визначивши новизну, дізнаємось наскільки конкурентно спроможний даний проект.

Для початкового входження на ринок було обрано стратегію наслідування лідера, так, як це дозволяє зосередити свій бізнес на отриманні прибутку

Таблиця 6.17.Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики ?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні, але напрям тільки почав розвиватись	Так, звичайно.	Структура товару схожа але основні новації звичайно ж різні. Основні характеристики які будуть однакові: діапазон швидкостей, матеріал корпусу та чашечок.	Стратегія наслідування лідеру

4) На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку розроблено стратегію позиціонування (табл.6.17). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 6.18.Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап. проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Довговічність конструктивних елементів	Позиціонування за співвідношенням "ціна – якість"	Точність та надійність товару буде конкурувати з аналогічними закордонними товарами .	"європейська якість за українськими цінами", "точність та надійність".

Було визначено стратегію позиціонування, вона буде орієнтована на низьку ціну продукту, порівняно з конкурентами, за аналогічною якістю.

6.5 Маркетингова програма стартап-проекту

- 1) Для того, щоб сформувати маркетингову концепцію товару, який отримає споживач. підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (табл. 6.19).

Таблиця 6.19. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
----------	---------	----------------------------	--

1	Точність вимірювань	Система є достатньо точною навіть при критичних умовах	Орієнтованість маркетингової стратегії на якість продукції
2	Температурні границі роботи	Можна використовувати у різних кліматичних зонах	Високоякісні елементи.

2)Визначення витрат на створення стартапу у табл. 6.20

№ з/п	Стаття витрат	Обсяги витрат в 0-й рік, тис. грн.
1	Розробка проектних матеріалів	2
2	Робоче проектування і прив'язка проекту	2
3	Витрати на придбання обладнання та устаткування та пристроїв	45
4	Витрати на приймально-здавальні випробування	20

Продовження до таблиці 2.20

№ з/п	Стаття витрат	Обсяги витрат в 0-й рік, тис. грн.
5	Витрати на придбання нематеріальних активів	3
6	Оплата юридичних послуг	2

7	Витрати на передвиробничі маркетингові дослідження і створення збутової мережі	40
8	Витрати, пов'язані з формуванням команди	15
Разом		129

3)Визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар, наведено у табл. 6.21.

Таблиця 6.21. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари. замітники	Рівень цін на товари. аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	300000	375000	Високий рівень доходів	300000-1250000 грн

Як ми бачимо даний стартап-проект виграє в ціні у конкурентів.

4) Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах яких приймаються рішення функції збуту, глибини каналу та оптимальну систему збуту. (табл. 6.22).

5) Розроблено концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 6.23).

Таблиця 6.22.Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту

	Ознайомлення клієнта з документацією та характеристиками.	-Швидке транспортування; - Інформування	Сервіс для оптимізації збуту	Використовувати незалежні служби збуту.
--	---	---	------------------------------	---

Розроблено ринкову (маркетингову) програму, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища.

Таблиця 6.23. Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
П/П	Порівняння характеристик товару основними конкурентами.	Сайти та центр комунікації	Позиціонування за співвідношенням "ціна/якість"	Висвітлити головні переваги товару перед конкурентами.	"європейська якість за українськими цінами", "точність та надійність"

Висновки:

Було розроблено стартап-проект “Анемометр з покращеними характеристиками”. При створенні стартап-проекту було проведено безліч досліджень та аналізів які дозволяють виявити головні напрямки розвитку галузі, тенденції до переваг споживачів, як корегувати подальший розвиток.

Детально розкрито та опис головної ідеї стартап-проекту як вирішення проблеми, розкритої в актуальності даної магістерської дисертації. Визначено технологічний аудит ідеї проекту, проведено аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, розроблено актуальну стратегію подальшого розвитку проекту на фоні відносин на сучасному ринку. Було розроблено маркетингову програму реалізації стартап-проекту.

Через те, що ціна продукту низька на відміну від іноземних конкурентів, які в основному виробляють аналогічні вироби, проект має значну конкурентоспроможну позицію. Було виявлено можливості та загрози ринку, сильні та слабкі сторони підприємства, конкурентні позиції на національному та міжнародному ринку.

Обрано стабільну альтернативу ринкової поведінки. Вона є найбільш безпечною, так як вона має найменший термін реалізації при чому є можливість триматися конкурентної позиції та поступово прибавляти прибуток та нарощувати виробництво.

Даний проект має гарне підґрунтя та високу конкуренто спроможність за рахунок меншої собівартості. Також високі показники захищеності та точності роблять його більш вигідним придбанням.

ВИСНОВКИ

У даній магістерській дисертації були розроблені рекомендації, щодо комп'ютерної системи контролю швидкості повітряного потоку на підприємствах залізобетонних виробів. Щоб даний прилад встановлювався у пропарювальних камерах при виробництві залізобетону та був призначений для вимірювання невеликих швидкостей водяної пари (до 17 м/с) та діапазону температур від 0 до 100°C з подальшою передачею даних у систему автоматичного контролю. Також щоб він міг застосовуватися як у підприємствах під час проведення науково-експериментальних робіт із необхідністю виміру швидкості напору повітряного потоку.

У проектно-дослідному розділі були проведені роботи з розробки статичної та динамічної структурних схем, кінематичної схеми, розрахунку розрахункових характеристик та основних деталей приладу.

У розділі стартап-проекту було проведено аналіз ринку та запропоновані найкращі шляхи для його реалізації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вимірювання параметрів [Електронний ресурс].
URL:https://pidruchniki.com/80320/ekologiya/vimiryuvannya_parametriv_vggru
2. Анемометри [Електронний ресурс].URL:<http://sfera.com.ua/prylady-laboratorni/anemometry>
3. L. Kristensen. The Perennial Cup Anemometer. Denmark. - Riso National Laboratory, 1999, 75с
4. Santiago Pindado, Imanol Pérez, Maite Aguado. Fourier analysis of the aerodynamic behavior of the cup anemometers. Spain. Barcelona. – 2013, 26
5. M.J. Brevoort, U.T. Joynner. Aerodynamic characteristics of anemometer cups. [Електронний ресурс] URL:
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930081442.pdf>
6. J.G. Albright, G.E. Klein. The Sensitivity of Anemometer Cups. [Електронний ресурс].URL:https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/3135/V_41N02_070.pdf;jsessionid=A56B71DE397533E21719A24516671F3C?sequence=1
8. Анемометр Skywatch Xplorer 1 [Електронний ресурс]. URL:
<https://bt.rozetka.com.ua/skywatch-xplorer-1/p307046/>.
9. Trotec TA300 професійний теплової анемометр [Електронний ресурс]. URL: <https://pragmatic.com.ua/trotec-ta300-professionalnyu-temlovoy.anemometr.html#PhotoSwipe1560558016501>.
10. PCE-423 професійний теплової анемометр [Електронний ресурс].URL: <https://pragmatic.com.ua/pce-423#PhotoSwipe1560558456289>.
11. Типи анемометрів [Електронний ресурс]. URL:
<https://simvolt.ua/anemometr-pribor-dlya-opredeleniya-skorosti-i-napravleniyadvizheniya-potoka.html>.

12. Обертальний момент. Потужність і крутний момент. [Електронний ресурс]. URL: <https://electric-guide.com/the-torque-moment-is-the-formula-powerand-torque-of-the-motor.html> .

13. Рух повітря та методи вимірювання його параметрів. [Електронний ресурс].URL: https://lubbook.org/book_570_glava_4_Tema%C2%A04.%C2%A0Rukh_pov%D1%96tr.html .

14. The Working of the Cup Anemometer [Електронний ресурс].URL: http://www.windsensor.com/application/files/8814/2694/4640/The_Working_of_the_Cup_Anemometer_20140619.pdf

15. Задание на расчетно-графические работы с применением ЭВМ по курсу «Методы и средства измерения скоростей и ускорений» и рекомендации по их выполнению студентам специальности «Приборостроение» УСост. Ф.Я. Загавура.-К.: КПИ. 1991.

16. Советы по использованию методики конструкторского расчета магнитоиндукционных тахометров с использованием ЭВМ по курсу «Методы и средства измерения скоростей и ускорений» ./ Сост. Ф.Я. Загавура. -К.: КПИ, 1992.