

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вишого навчального закладу)

Факультет інформаційних електронних систем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

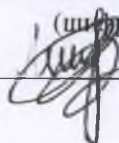
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора»

Виконала: студентка 2-го курсу, групи КІВТ-21м
спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка

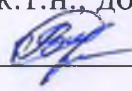
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Кулакова А.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доц. каф. ІРТС



Маньковська В.С.

(прізвище та ініціали)

« 16 » 12 2022 р.

Опонент: зав. каф. БМІОЕС, к.т.н., доц.



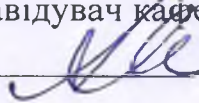
Коваль Л.Г.

(прізвище та ініціали)

« 16 » 12 2022 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС



д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 19 » 12 2022 р.

Вінницький національний технічний університет
 Факультет інформаційних електронних систем
 Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
 Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
 Спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
 Освітньо-професійна програма Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології



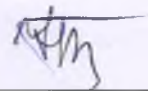
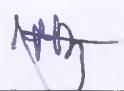
ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри ІРТС
 д.т.н., проф. Осадчук О.В.
 «16» вересня 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кулаковій Анні Павлівні
 (прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора
 керівник роботи к. т. н. доц., Маньковська В.С.
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання),
 затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» 09 2022 року № 203
- Строк подання студентом роботи 16 грудня 2022 р.
- Вихідні дані до роботи: діапазон вимірювання моменту інерції від 10^{-3} до 10^{-2} Н·м, амплітуди крутильних коливань від 10^{-5} до $1 \cdot 10^{-4}$ рад, струму споживання – 0 – 10 А, напруги живлення – 0 – 300 В; похибка вимірювання кутової швидкості – 1%, приведенного моменту інерції – 10 %, амплітуди крутильних коливань – 2%, струму живлення – 3 %; напруги живлення – 3 %.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) огляд аналогів системи, техніко-економічне обґрунтування, розробка структурної схеми інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора, розробка електричної принципової схеми інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора, метрологічні характеристики, алгоритмічне забезпечення, електричні розрахунки, економічна частина.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Схема електрична структурна інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора. Схема електрична принципова інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора. Зовнішній вигляд інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора. Схема програми інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора.

6. Консультанти розділів роботи

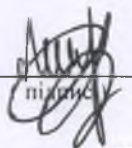
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	доцент кафедри ІРТС к.т.н. доц., Маньковська В.С.		
Економічна частина	професор кафедри ЕПВМ, професор, д. е. н, Буреннікова Н.В.		

7. Дата видачі завдання 17.09.2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2022-07.09.2022	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2022-13.09.2022	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	14.09.2022-27.09.2022	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	28.09.2022-13.10.2022	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	14.10.2022-06.11.2022	
6.	Розробка графічної частини МКР.	07.11.2022-16.11.2022	
7.	Економічна частина.	17.11.2022-24.11.2022	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	25.11.2022-02.12.2022	
9.	Нормоконтроль.	03.12.2022-10.12.2022	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	11.12.2022-19.12.2022	
11.	Захист МКР ЕК.	20.12.2022-21.12.2022	

Студентка



Кулакова А. П.

Керівник роботи


(підпис)

Маньковська В. С.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.317

Кулакова А. П. Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, освітня програма - комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології. Вінниця: ВНТУ, 2022. 94 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 23 назв; рис.: 6; табл. 13.

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено інформаційно-вимірювальну систему параметрів параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора. Розроблена система дозволяє проводити вимірювання середнього і миттєвого значення кутової швидкості, зведеного моменту інерції, амплітуди крутильних коливань, струму споживання, напруги живлення. Інформаційно-вимірювальна система забезпечує представлення вимірюваної інформації у числовому та графічному вигляді на екрані монітора персонального комп'ютера. Графічна частина складається з чотирьох плакатів, на яких наведено схему електричну структурну, схему електричну принципіву, схему програми та метрологічні характеристики розробленої інформаційно-вимірювальної системи. Також у магістерській кваліфікаційній роботі проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності розробки системи, розраховано економічний ефект від впровадження системи у виробництво.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, газоманітний підвіс, електродвигун.

ABSTRACT

Kulakova A. P. Information-measurement system of the parameters of the electric motor with the rotor gas-magnetic suspension. Master's qualification thesis on specialty 152 - metrology and information-measurement technologies, educational program - computerized information-measurement technologies. Vinnytsia: VNTU, 2022. 94 p.

In Ukrainian language. Bibliography: 23 titles; Fig.: 6; table 13.

In the master's qualification thesis, the information-measurement system of the parameters of the electric motor with the rotor gas-magnetic suspension was developed. The developed system allows to measure the average and instantaneous value of the angular velocity, the rotor moment of inertia, the amplitude of torsional oscillations, the consumption current, and the supply voltage. The information-measurement system provides the presentation of measured information in numerical and graphical form on the screen of a personal computer monitor. The graphic part consists of four posters, which show the electrical structural diagram, electrical principle diagram, program scheme diagram and metrological characteristics of the developed information-measurement system. Also, in the master's qualification thesis, a technical and economic justification of the feasibility of system development was carried out, the economic effect of the system's implementation in production was calculated.

Keywords: information-measurement system, gas magnetic suspension, electric motor.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	11
1.1 Огляд електродвигунів з безконтактним підвісом ротора.....	11
1.2 Математична модель електродвигуна з газомагнітним підвісом ротора.....	17
1.3 Задачі дослідження.....	23
2 ОГЛЯД СПОСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ГАЗОМАГНІТНИМ ПІДВІСОМ РОТОРА.....	24
2.1 Особливості вимірювання кутової швидкості обертання ротора.....	24
2.2 Особливості вимірювання моменту інерції ротора.....	27
2.3 Особливості вимірювання механічної характеристики.....	30
2.4 Особливості вимірювання динамічного моменту.....	31
2.5 Особливості вимірювання змінного струму живлення електродвигуна.....	32
2.6 Особливості вимірювання змінної напруги живлення електродвигуна.....	33
3 ОБГРУНТУВАННЯ ОБРАНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ.....	35
3.1 Критеріальне оцінювання стану електродвигуна з газомагнітним підвісом.....	35
3.2 Вимірювання середнього значення кутової швидкості з використанням вагових функцій.....	43
3.3 Вимірювання моменту інерції ротора за амплітудою крутильних коливань.....	48
3.4 Розробка електричних схем інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газомагнітним підвісом ротора.....	51

4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	54
4.1 Розробка схеми програми.....	54
4.2 Розробка програмного забезпечення.....	56
5 МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	57
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	61
6.1 Оцінювання наукового ефекту.....	61
6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	64
6.2.1 Витрати на оплату праці.....	65
6.2.2 Відрахування на соціальні заходи.....	68
6.2.3 Сировина та матеріали.....	68
6.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	69
6.2.5 Спецстаткування для наукових (експериментальних) робіт.....	70
6.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт.....	71
6.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.....	72
6.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	73
6.2.9 Службові відрядження.....	75
6.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	75
6.2.11 Інші витрати.....	76
6.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	76
6.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	77
6.4 Висновок до розділу	78
ВИСНОВКИ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	85
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки роботи.....	88
Додаток В (довідниковий) Фрагмент лістингу програмного забезпечення для мікроконтролера.....	90

ВСТУП

Актуальність теми. Високоточний контроль та вимірювання параметрів електричних машин (ЕМ) має велике значення не тільки при випробуваннях, а і безпосередньо під час їх функціонування. Це відноситься до точних приводів, систем автоматичного управління та позиціонування, у яких ЕМ є складовими компонентами, систем, у яких здійснюється керування електроприводами [1]. Для більшості ЕМ, які функціонують у різних автоматичних засобах, приводних системах, різних пристроях, що використовуються у побуті, динамічний режим роботи є основним. Особливо велике значення для систем позиціонування має прецизійне вимірювання відхилення швидкості обертання від встановленого значення [2]. Специфічною особливістю тахометрії є вимога високої точності, в більшості випадків вимірювання повинно проводитись з значно більшою точністю, ніж інших параметрів обертання [3]. У теперішній час ця вимога висувається також і до динамічного режиму роботи, обумовлюючи високу швидкодію засобу вимірювання. Окрім того, широке застосування математичних моделей електродвигунів з метою ідентифікації їх внутрішніх параметрів зумовлює необхідність перевірки їх адекватності та уточнення. Особливо важливим завданням є розробка інформаційно-вимірювальних систем параметрів ЕМ. Актуальність цього завдання зумовлена тим, що такі системи дозволяють значно скоротити час при проведенні різноманітних видів випробувань ЕМ та підвищити ефективність їх проведення. Виходячи з вищенаведеного, розробка та дослідження сучасної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора є актуальним та важливим завданням.

Мета і завдання роботи. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка сучасної інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора з покращеними технічними характеристиками.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є параметри електродвигуна з

газوماгнітним підвісом ротора та інформаційно-вимірювальна система їх вимірювання та контролю.

Предметом дослідження є методи та засоби вимірювання та контролю параметрів електродвигуна з газوماгнітним підвісом ротора та методи оцінювання його стану.

Новизна одержаних результатів. Наукова новизна магістерської кваліфікаційної роботи полягає в удосконаленні математичної моделі фотоелектричного вимірювального перетворювача площа-напруга на основі фотодіода та операційного підсилювача, який є складовою частиною тахометричного перетворювача, та створенні критерію оцінювання ступеня відхилення від норми стану електродвигуна.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні положення та результати магістерської кваліфікаційної роботи доповідались та обговорювались на: XLIX науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (Вінниця, 23-24 березня 2020 р.); LI науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (Вінниця, 31 травня 2022 р.); XXXI International Scientific Symposium «Metrology and Metrology Assurance» (2021, Bulgaria).

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи. За час навчання у Вінницькому національному технічному університеті опубліковано 28 наукових праць, у тому числі у 8 статей у наукових фахових журналах, 2 статті у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій, 16 тезах доповідей на наукових конференціях різного рівня, 1 патенті України на корисну модель та 1 патенті на корисну модель Республіки Казахстан, 4 публікації опубліковано у виданнях, які індексуються у наукометричній базі Web of Science (h=2, 10 цитувань), 3 публікації опубліковано у виданнях, які індексуються у наукометричній базі Scopus (h=1, 9 цитувань). Загальна кількість опублікованих робіт у виданнях, які індексуються у наукометричних базах Web

of Science та/або Scopus – п'ять. За тематикою магістерської кваліфікаційної роботи опубліковано 5 наукових праць, у тому числі у 2 статті у наукових фахових журналах, 1 стаття у збірнику матеріалів науково-технічної конференції, 2 тези доповіді на науково-технічній конференції, 2 публікації опубліковано у виданнях, які індексуються у наукометричній базі Web of Science та/або Scopus.

1. Kucheruk, V. Yu. Development of the mathematical model of light flux intensity sensor based on the photodiode and operational amplifier / V. Kucheruk, P. Kulakov, Yu. Moskvichova, N. Gadzhula, P. Kissabekova, A. Kulakova, D. Karabekova, A. Khassenov // Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series., ISSN 2518-7198, № 1(97) / 2020, p. 50 – 57, DOI: 10.31489/2020Ph1/50-57; (**Web of Science**)

2. Кучерук, В. Ю. Підхід до критеріального оцінювання ступеню відхилення від норми стану об'єкта / В. Ю. Кучерук, П. І. Кулаков, О. Б. Іванець, А. П. Кулакова // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2020. - № 2. - с. 10 - 15. - DOI: 10.31891/2219-9365-2020-66-2-2

3. O. Ivanets, I. Morozova, P. Kulakov, V. Kucheruk, A. Kulakova and Y. Moskvichova, "Criterion Assessment of the Probability of Deviation of Objects from the Normal State," 2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/MMA52675.2021.9610867. (**Scopus**)

4. Кулаков П. І. Удосконалення математичної моделі сенсора інтенсивності світлового потоку [Електронний ресурс] / П. І. Кулаков, А. П. Кулакова // Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2020), Вінниця, 23-24 березня 2020 р. – Електрон. текст. дані. – 2020. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2020/paper/view/9986/8370>

5. Кучерук, В. Ю. Інформаційно-вимірювальна система параметрів

електродвигуна з газоманітним підвісом ротора [Електронний ресурс] / В. Ю. Кучерук, П. І. Кулаков, А. П. Кулакова // Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2022), Вінниця, 31 травня 2022 р. – Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzp/all-frtzp-2022/paper/view/14681/12387>

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд електродвигунів з безконтактним підвісом ротора

Вирішення завдання збільшення продуктивності машин, яке пов'язане з завданням збільшення швидкості деталей механізмів, провідні компанії вирішують шляхом використання безконтактного підвісу ротора електродвигунів. У теперішній час існують наступні типи безконтактних підвісів ротора - газовий, магнітний, газомагнітний. Порівняння цих трьох типів підвісів дозволяє оцінити їх недоліки та переваги, визначити перспективність розвитку, обрати об'єкт контролю [4].

У промисловості доволі широко розповсюджений газовий безконтактний підвіс ротора електродвигуна. Важливою характеристикою безконтактних підвісів є потужність витрат та момент тертя. Витрати на тертя у газовому підвісі виникають внаслідок в'язкості шару газоподібного мастильного матеріалу. Момент тертя радіального газового підвісу визначається виразом

$$M_T = \frac{2\pi\mu R^3 L\omega}{C}, \quad (1.1)$$

де μ - динамічна в'язкість мастильного матеріалу, R - радіус підвісу, L - довжина підвісу, C - радіальний зазор, ω - кутова швидкість.

Момент тертя при симетричному навантаженні газового підвісу з гладкими поверхнями підшипнику

$$M_T = \frac{\pi\mu\omega(r_0^4 - r_1^4)}{2h}, \quad (1.2)$$

де r_0 та r_1 - зовнішній та внутрішній радіуси газового підшипника, h - зазор між поверхнями.

З виразів (1.1) та (1.2) слідує, що внаслідок малого значення в'язкості газу у шарі μ , втрати та момент тертя малі. Газові підшипники, у яких жорсткість вище жорсткості підшипників кочення, поступаються їм у значенні несучої здатності. Швидкохідність газових підшипників в першу чергу визначається максимальною швидкістю шейки валу, яка може досягати значення 300-350 м/с.

Основна причина, яка обмежує швидкохідність ротору з газовим підвісом, є динамічна нестійкість, що виникає при наявності напівшвидкісного або синхронного вихорів, що зумовлено обов'язковою наявністю дисбаланса ротора. Суттєвим недоліком газового підвісу, який обмежує його використання, є явище «пневматичний молот», яке зумовлено стискуванням газового шару, що призводить до нестійкості системи [5].

Одним з варіантів побудови безконтактного підвісу ротора є магнітний підвіс, у якому втрати на тертя зумовлені взаємодією вихорових струмів, які утворюються в цапфі при обертанні ротора, з магнітним полем інших елементів, які створюють підвіс. Як слідує з визначення втрат на тертя у роторній системі з магнітним підвісом, струм статора електродвигуна, який збільшується разом з збільшенням швидкості обертання, призводить до збільшення вихорових струмів цапфи, що в свою чергу зумовлює збільшення втрат на тертя. Момент тертя у магнітному підвісі ротора визначається

$$M_T = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.3)$$

де J - момент інерції ротора, t - час.

Втрати на тертя визначаються за виразом

$$P_T = M_T \omega. \quad (1.4)$$

З виразів (1.3) та (1.4) слідує, що момент тертя прямо пропорційно збільшується до кутового прискорення, а втрати потужності прямо пропорційно збільшуються разом із збільшенням швидкості обертання. Ця обставина є значним недоліком магнітного підвісу ротора, що суттєво зменшує його швидкохідність. Жорсткість магнітного підвісу ротора значно менша, ніж жорсткість підшипників кочення, вона зменшується при збільшенні кутової швидкості. При суттєвому збільшенні кутової швидкості у високошвидкісних роторних системах жорсткість магнітного підвісу суттєво зменшується, що зумовлює можливу втрату стійкості [6]. Слід відзначити, що магнітний підвіс ротора своєю суттю є потенційно нестійкою системою. Стійкість магнітного підвісу ротора забезпечується виключно при наявності системи автоматичного

управління напруженістю магнітного поля та щільності потоку, що дозволяє компенсувати зміни положення ротора та діючих на нього сил. Усі наведені недоліки магнітного підвісу ротора значно обмежують сфери використання такого підвісу у електродвигунах з безконтактним підвісом. Саме тому такі системи не знайшли широкого використання у техніці. Проведені дослідження у напрямку усунення недоліків газового та магнітного підвісів роторних систем призвели до створення електродвигуна з магнітним розвантаженням газового підвісу. У такому електродвигуні газові сили, що відштовхують ротор від статора, компенсуються магнітними силами, які притягують ротор до статора, і таким чином забезпечують стійкість системи. Необхідно відзначити, що це поєднання не забезпечує усунення динамічної нестійкості газового шару під час появи напівшвидкісного та синхронного вихорів, і не змінює залежність параметрів магнітного підвісу від частоти обертання, тобто не усуваються недоліки газового та магнітного підвісів. Зведений коефіцієнт тертя опор кочення швидкісних роторних систем доволі великий, та може змінюватись в межах від 0,002 (для шарикові підшипники) до 0,01 (роликові підшипники). Цей показник для газових опор складає 0,0001 та визначається в тільки тертям усередині шару газового мастила. Зведений коефіцієнт тертя у магнітних опорах зумовлюється гальмівним ефектом поля, а втрати потужності та момент тертя збільшуються із збільшенням кутової швидкості. Зведений коефіцієнт тертя у газомагнітному підвісі може бути аналогічний параметру газового підвісу та не залежить від швидкості обертання. Швидкохідність роторних систем з опорами кочення обмежена суттєвими втратами на тертя та не перевищує $2,5 \times 10^5 \text{ хв}^{-1}$ при короткому ресурсі, та $4 \times 10^4 \text{ хв}^{-1}$ при довгому ресурсі. Швидкохідність роторних систем з газовою опорою може сягати значення $6,5 \times 10^6 \text{ хв}^{-1}$. Перевищення максимальної швидкості обертання призводить до появи динамічної нестійкості підвісу, внаслідок чого виникають напівшвидкісні або синхронні вихорі. Швидкохідність магнітної опори, яка перевищує швидкохідність газової опори, обмежена зростаючими з збільшенням швидкості обертання втратами на тертя. Швидкохідність

газوماгнітного підвісу на практиці обмежена механічною міцністю вузлів роторної системи, та може суттєво перевищувати швидкохідність газового або магнітного підвісу [7].

Жорсткість опор кочення суттєво менша ніж жорсткість газової опори, що зумовлено значною різницею площин, які передають навантаження від вала електродвигуна до корпусу підвісу, а також значною кількістю механічних зазорів в опорах кочення. Жорсткість магнітного підвісу поступається жорсткості опор кочення, вона зменшується разом із збільшенням кутової швидкості обертання. Жорсткість газوماгнітної опори суттєво більша, ніж жорсткість газової опори. Ця обставина зумовлена тим, що площа газوماгнітної опори, яка забезпечує передавання навантаження, еквівалентна площі поверхні ротора, та суттєво перевищує площу поверхні газового підвісу. Також, жорсткість газوماгнітного підвісу є сумою жорсткості газового мастила з урахуванням дії магнітного поля, яке створює сили навантаження газового мастила.

Такий параметр як стійкість є одним з найбільш вразливих місць газового підвісу, що пов'язано з явищами напівшвидкісного і синхронного вихору, і з явищем «пневмомолотка», які приводять до руйнування шару газового мастила, і до появи торкання робочих поверхонь та механічного руйнування газового підшипника з подальшим виходом його з ладу. Стійкість магнітного підвісу, яка знижується разом з підвищенням швидкості обертання, забезпечується системою автоматичного керування та сенсорами величини зазору. Газوماгнітний підвіс є потенційно стійкою системою, яка може саморегулюватися та адаптуватися до зміни зовнішнього навантаження, цих властивостей не мають інші підвіси [8].

Можливість демпфування вільних коливань ротора з газوماгнітним підвісом суттєво перевищує аналогічний показник роторних систем з газовим або магнітним підвісом. Важливою особливістю газوماгнітного підвісу є його здатність до адаптивності демпфуваних властивостей при зміні зовнішнього навантаження.

Віброакустична активність, яка є одним з важливих параметрів роторних систем, збільшується при збільшенні кутової швидкості обертання. У випадку, якщо віброакустична активність швидкісних роторних систем з опорами кочення достатньо велика (це пояснюється механічним контактом в опорах та неспіввісністю зазорів), то відсутність механічних контактів у газових та магнітних підвісах зменшує віброакустичну активність роторних систем на 10 – 15 дБ. Відсутність механічних контактів та неспіввісності зазорів в роторних системах з газоманітним підвсом зменшує їх віброакустичну активність на 10-15 дБ відносно опор кочення, та приблизно на 5-10 дБ у порівнянні з газовим та магнітним підвісами.

Як відомо, несуча здатність опори кочення суттєво більша, ніж несуча здатність газового підвісу. Підвищення несучій здатності газового підвісу пов'язано з збільшенням площі поверхні газового підшипника або із збільшенням тиску газу, і відповідно, з збільшення габаритних параметрів та енергоспоживання роторної системи. Збільшення несучої спроможності магнітного підвісу пов'язано з збільшенням щільності потоку збудження, і відповідно, з збільшенням втрат на тертя та зменшення стійкості та жорсткості підвісу при збільшенні кутової швидкості.

У газоманітному підвісі, який поєднує в одному зазорі можливості газоманітного підшипника та зазору звичайного електродвигуна, площа поверхні підвісу дорівнює площі поверхні ротору та суттєво перевищує площу поверхні газового підвсу.

Таким чином, несуча спроможність газоманітного підвісу суттєво більша, ніж несуча спроможність газового підвісу, і наближається за своїм значенням до несучої спроможності підшипників кочення. Кількість зазорів у роторних системах з опорами кочення знаходиться в межах від 3 до 6. Неспіввісність, яка може з'явитися внаслідок значної кількості зазорів, суттєво підвищує віброакустичну активність роторної системи.

Заміна опор кочення газовими або магнітними опорами не змінює схему роторної системи та збільшує кількість зазорів у зв'язку з необхідністю

застосування радіальних та вісєвих опор, що призводить до значного ускладнення конструкції [9].

Газомагнітний підвіс ротора у електродвигуні забезпечується безпосередньо в робочому зазорі, це дозволяє обмежити кількість зазорів роторної системи одним зазором, який об'єднує функції зазору безконтактної опори та зазору електричної машини. Ця конструктивна схема не потребує співвісності зазорів вузлів електродвигуна, спрощує загальну конструкцію роторної системи, забезпечує її високу технологічність.

Надійність роторних систем з газомагнітними опорами значно перевищує надійність систем з газовими та магнітними опорами та надійність опор на підшипниках кочення.

З порівняльної характеристики різних типів опор, яка наведено вище, слідує, що газомагнітна опора незначно поступається системам з опорами кочення за несучою спроможністю, а за усіма іншими параметрами перевершує швидкісні роторні системи з опорами кочення, газовими та магнітними підвісами. Це зумовлює перспективність подальшого розвитку газомагнітних підвісів [10].

Підприємствами Європейського Союзу, США, деякими компаніями електротехнічної промисловості України випускаються синхронні гістерезисні електродвигуни з газомагнітним підвісом ротора. Дві модифікації таких електродвигунів мають дисковий або конічний ротор. Такі електродвигуни широко використовуються у легкій промисловості (веретена, прядильні машини), хімічній галузі (розпилювачі), медичному обладнанні (апарати для імітації соляних печер).

Найбільш розповсюдженими електродвигунами з газомагнітним підвісом ротора є електродвигуни з конічним ротором. Ця обставина зумовлена значною стійкістю такого ротора в осєвому і радіальному напрямках [11].

В теперішній час для контролю параметрів ЕМ з газомагнітним підвісом ротору використовуються традиційні пристрої, що не завжди забезпечує високу вірогідність контролю.

1.2 Математична модель електродвигуна з газомагнітним підвісом ротора

Диференційні рівняння руху конічного гістерезисного ротора в безконтактній газомагнітній опорі витікають з динамічної моделі системи і мають вигляд [12]

$$\left. \begin{aligned}
 \ddot{\eta} &= \frac{F_{ei\eta} - N_{\eta} + F_{\eta} + G_{\eta}}{m} - \frac{\delta_{c\eta}}{m} \dot{\eta} \\
 \ddot{\zeta} &= \frac{F_{ei\zeta} - N_{\zeta} + F_{\zeta} + G_{\zeta}}{m} - \frac{\delta_{c\zeta}}{m} \dot{\zeta} \\
 \ddot{\xi} &= \frac{N_{\xi} - F_{\xi} - G_{\xi}}{m} - \frac{\delta_{c\xi}}{m} \dot{\xi} \\
 \dot{\omega}_x &= \frac{J_{Gx} - J_{Gz}}{J_{Gx}} \omega_y \omega_z - \frac{M_{\tilde{A}\eta}}{J_{Gx}} (\sin \varphi + \alpha \cos \varphi) - \frac{M_{\tilde{A}\zeta}}{J_{Gx}} (\cos \varphi - \alpha \sin \varphi) - \frac{\delta_x \omega_x}{J_{Gx}} \\
 \dot{\omega}_y &= \frac{J_{Gx} - J_{Gz}}{J_{Gx}} \omega_x \omega_z - \frac{M_{\tilde{A}\eta}}{J_{Gx}} (\cos \varphi - \alpha \sin \varphi) + \frac{M_{\tilde{A}\zeta}}{J_{Gx}} (\sin \varphi + \alpha \cos \varphi) - \\
 &\quad - \frac{\delta_y \omega_y}{J_{Gx}} - \frac{\varepsilon (N_{\xi} - F_{\xi})}{J_{Gx}} \\
 \dot{\omega}_z &= \frac{\varepsilon}{J_{Gz}} \left[(N_{\eta} + F_{\eta}) (\cos \varphi - \alpha \sin \varphi) - (N_{\zeta} + F_{\zeta}) (\sin \varphi + \alpha \cos \varphi) \right] - \\
 &\quad - \frac{\beta \varepsilon}{J_{Gz}} (N_{\xi} + F_{\xi}) \cos \varphi - \frac{\beta}{J_{Gz}} (M_{\tilde{A}\eta} - \alpha M_{\tilde{A}\zeta}) + \frac{M_D}{J_{Gz}}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

де m - маса ротора, J_{Gx} , J_{Gy} та J_{Gz} - моменти інерції ротора відносно осей η , ζ , ξ , $F_{ei\eta}$ та $F_{ei\zeta}$ радіальні складові сили інерції $F_i = m\varepsilon\omega^2$, N_{η} та N_{ζ} - радіальні складові підйомної сили газового шару, F_{η} та F_{ζ} - радіальні складові сили електромагнітного тяжіння між ротором і статором, N_{ξ} та F_{ξ} - осьові складові підйомної сили газового шару та сили електромагнітного тяжіння між ротором і статором, $M_{\tilde{A}\eta}$ та $M_{\tilde{A}\zeta}$ - відновлюючі моменти газового шару відносно осей η , ζ , M_D - обертаючий момент, ω_x , ω_y , ω_z - складові вектора кутової швидкості ω відносно осей η , ζ , ξ , α та β - кути прецесії та нутації, $\varphi = \omega t$ - кут повороту ротора відносно осі обертання, $\delta_{c\eta}$, $\delta_{c\zeta}$, $\delta_{c\xi}$ - коефіцієнти демпфірування радіальних коливань, δ_x , δ_y - коефіцієнти демпфірування крутильних коливань, ε - ексцентриситет маси ротора.

Враховуючи досить малу величину зазора між ротором і конічною розточкою статора порівняно з радіусами та довжиною ротора, а також велику

жорсткість газомагнітної опори, і нехтуючи в зв'язку з цим вельми малими кутовими перекосами осі обертання ротора, будемо вважати, що ротор обертається тільки навколо осі ξ , яка співпадає за напрямком з віссю симетрії статора і має вертикальний напрямок, і може рухатись прямолінійно за координатами ζ, η, ξ .

Зобразимо узагальнену силу Q у вигляді

$$Q = Cq \quad (1.6)$$

де q - узагальнена координата, а

$$C_q = \frac{\partial Q}{\partial q} \quad (1.7)$$

ϵ узагальнена жорсткість.

З урахуванням прийнятих припущень із системи диференціальних рівнянь (1.8) визначимо рівняння радіального переміщення

$$\ddot{\eta} + 2\delta_\eta \dot{\eta} + \frac{C_\epsilon}{m} \eta = \epsilon \omega^2 \cos \omega t, \quad (1.9)$$

$$\ddot{\zeta} + 2\delta_\zeta \dot{\zeta} + \frac{C_\epsilon}{m} \zeta = \epsilon \omega^2 \sin \omega t, \quad (1.10)$$

де власна частота коливань системи за радіальною координатою η

$$\Omega_\eta = \sqrt{\frac{C_\eta}{m}} = \sqrt{\frac{C_{N\eta} + C_{F\eta}}{m}} = \sqrt{m^{-1} \left(\frac{\partial N_\eta}{\partial \eta} + \frac{\partial F_\eta}{\partial \eta} \right)} \quad (1.11)$$

З системі диференціальних рівнянь (1.5) визначимо також (з урахуванням прийнятих припущень) рівняння обертання ротора

$$\dot{\omega} = \frac{\epsilon}{J_{Gz}} \left[(N_\eta + F_\eta) \cos \varphi - (N_\zeta + F_\zeta) \sin \varphi \right] + \frac{M_D}{J_{Cz}}, \quad (1.12)$$

де обертальний момент визначається співвідношенням

$$M_D = \frac{1}{8} B_m H_c p_e L \left[\frac{h_R}{\cos \chi} (R_0 + R_1) - \left(\frac{h_R}{\cos \chi} \right)^2 \right], \quad (1.13)$$

H_c - коерцитивна сила матеріалу ротора, яка для гістерезисних сплавів типу «вікалой» становить 200 -300 А/м, p_e - кількість пар полюсів, h_R - товщина активного шару ротора, R_0 та R_1 - радіуси відповідно більшої та меншої основ конуса ротора, L - довжина ротора, χ - кут конусності ротора.

$$B_m = \frac{\sqrt{2}\mu_0 m_\phi k_{об} w_{об} I_\phi}{\pi p_e h_M}, \quad (1.14)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, m_ϕ - кількість фазних обмоток статора, $k_{об}$ - обмотувальний коефіцієнт, $w_{об}$ - кількість витків обмотки статора, I_ϕ - фазний струм, h_M - величина магнітного зазору між ротором і статором.

Рівняння (1.12) з урахуванням виразів (1.13) і (1.14) являє собою математичний вираз залежності кутового прискорення ротора від кута повороту та струму статора [13].

Величина е радіального зміщення ротора в диференціальних рівняннях (1.9) і (1.10) може бути визначена через ексцентриситет маси ε

$$e = \frac{\varepsilon \Omega_e^2}{\Omega_e^2 - \omega^2} \quad (1.15)$$

Враховуючи початкові умови $\eta_0 = \dot{\eta}_0 = 0$ та $\zeta_0 = \dot{\zeta}_0 = 0$ та вираз (1.15), вимушені коливання ротора в радіальному напрямку знайдемо з розв'язку диференціальних рівнянь (1.9) і (1.10) у вигляді

$$\eta = \frac{\varepsilon \omega^2 \Omega_e^2}{(\Omega_e^2 - \omega^2) \sqrt{(\Omega_e^2 - \omega^2) + 4\delta_\eta^2 \omega^2}} \cos(\omega t + \Theta_2); \quad (1.16)$$

$$\zeta = \frac{\varepsilon \omega^2 \Omega_e^2}{(\Omega_e^2 - \omega^2) \sqrt{(\Omega_e^2 - \omega^2) + 4\delta_\zeta^2 \omega^2}} \sin(\omega t + \Theta_2). \quad (1.17)$$

З урахуванням ідентичності коефіцієнтів демпфірування у радіальних напрямках порівняння виразів (1.16) та (1.17) показує, що вони відрізняються за фазою на кут $\pi/2$ і збігаються за іншими параметрами (амплітуда та частота коливань), тому в подальшому будемо аналізувати лише один з цих виразів [14].

З рівнянь (1.16) і (1.17) випливає, що амплітуда вимушених коливань ротора дорівнює

$$A = \frac{\varepsilon \omega^2 \Omega_e^2}{(\Omega_e^2 - \omega^2) \sqrt{(\Omega_e^2 - \omega^2)^2 + 4\delta_e^2 \omega^2}}. \quad (1.18)$$

З (1.18) знаходимо коефіцієнт динамічності системи

$$K = \frac{\Omega_e^2}{\sqrt{(\Omega_e^2 - \omega^2)^2 + 4\delta_e^2 \omega^2}}. \quad (1.19)$$

Не враховуючи сили опору при обертанні ротора, відмітимо рівність амплітуд радіальних складових газової сили ($N_\eta = N_\zeta = N_e$) та електромагнітної сили ($F_\eta = F_\zeta = F_e$) і визначимо циклічну частоту коливань ω (кутову швидкість) в (1.16) і (1.18) з розв'язку диференційного рівняння (1.17) у вигляді

$$\omega = \frac{\sqrt{2}\mu_0 m_\delta k_{i\dot{a}} w_{i\dot{a}} H_{\dot{n}} h_R (R_0^2 - R_1^2)}{8\pi h_i J_{Gz}} I_\delta t + \frac{\varepsilon(N_e + F_e)}{2\omega J_{Gz}} \sin 2\varphi \quad (1.20)$$

Перший доданок в правій частині трансцендентного рівняння (1.20) характеризує синхронну кутову швидкість кінцевого гістерезисного ротора без урахування впливу на неї сил опору

$$\omega_c = \frac{\sqrt{2}\mu_0 m_\delta k_{i\dot{a}} w_{i\dot{a}} H_{\dot{n}} h_R (R_0^2 - R_1^2)}{8\pi h_i J_{Gz}} I_\delta t_p \quad (1.21)$$

де t_p - час розгону ротора до синхронної кутової швидкості.

Графоаналітичний розв'язок рівняння (1.21) у вигляді залежності синхронної кутової швидкості від струму статора та часу розгону ротора знайдемо з використанням обчислювального математичного пакету прикладних програм «Maple V for Windows». Залежність кутової швидкості ротора від струму статора та часу розгону ротора у вигляді графоаналітичного розв'язку рівняння (1.21) показано на рис.1.1.

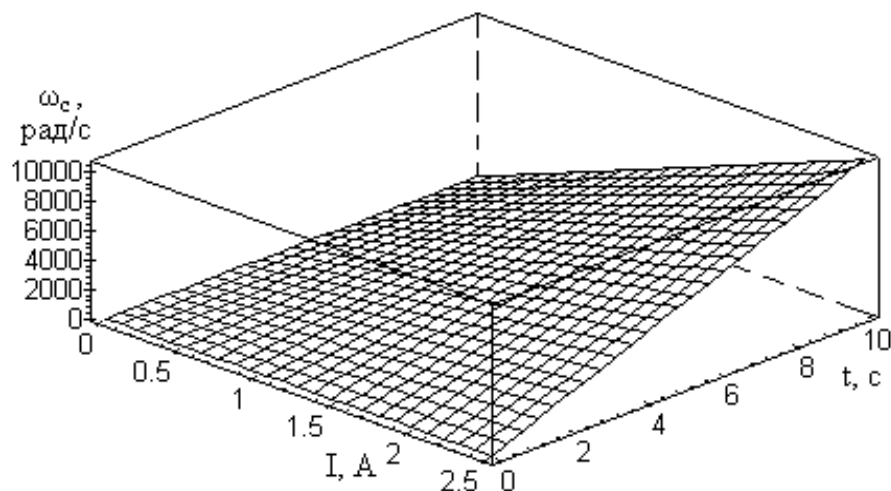


Рисунок 1.1 - Залежність кутової швидкості від струму

статора та часу розгона ротора

Підставляючи (1.21) у вираз (1.18), знайдемо з останнього залежність амплітуди радіальних коливань ротора від його кутової швидкості та струму статора. Таку амплітудно-частотну характеристику системи у вигляді графоаналітичного розв'язку рівняння (1.19) з урахуванням (1.21), одержаного з допомогою пакету прикладних програм «Maple V», наведено на рис. 1.2.

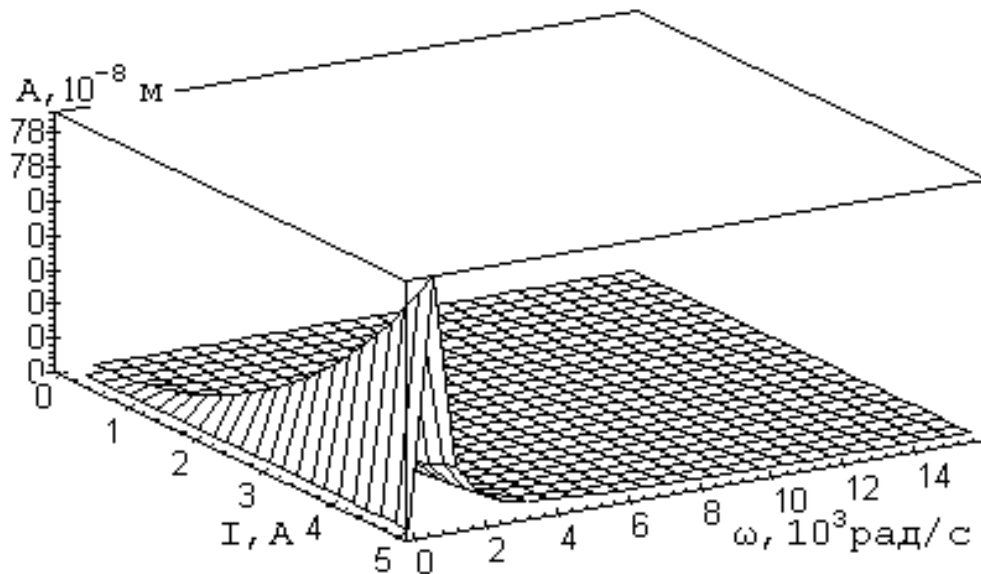


Рисунок 1.2 - Амплітудно-частотні характеристики системи та їх залежність від струму статора

Аналіз амплітудно-частотної характеристики системи показує, що зона резонансних частот зміщується в сторону більших частот при зростанні струму статора. Це пояснюється тим, що із зростанням струму зростають сила електромагнітного тяжіння між ротором і статором та жорсткість газоманітної опори.

Значне зростання амплітуди резонансу при зростанні струму статора також пояснюється зростанням жорсткості та зниженням демфіруючих властивостей газоманітної опори при зростанні струму статора [15].

З рівняння (1.21) випливає, що у відсутності сил опору синхронна кутова швидкість не залежить від кута φ повороту ротора і лінійно зростає із

зростанням часу розгону та/або струму статора. Проте, на величину кутової швидкості значний вплив чинить другий доданок правої частини рівняння (1.20), що має вигляд

$$\omega_k = \frac{\varepsilon(N_e + F_e)}{2\omega J_{Gz}} \sin 2\omega t \quad (1.22)$$

Очевидно, що рівняння (1.22) описує коливальний процес з амплітудою, яка зростає із збільшенням ексцентриситета маси ротора і зменшується при збільшенні кутової швидкості ω обертання ротора, та циклічною частотою, що вдвічі перебільшує циклічну частоту обертання ротора. Це означає, що складова ω_k частоти обертання з періодом, вдвічі меншим за період обертання, збільшує і зменшує синхронну кутову швидкість ротора, спричиняючи його крутильні коливання [16].

Рівняння крутильних коливань ротора знайдемо, інтегруючи (1.22) в межах від 0 до t

$$\varphi_k = \frac{\varepsilon(N_e + F_e)}{2\omega J_{Gz}} \int_0^t \sin 2\omega t dt = -\frac{\varepsilon(N_e + F_e)}{4\omega^2 J_{Gz}} \cos 2\omega t \quad (1.23)$$

Таким чином, з розв'язку диференціальних рівнянь руху визначені радіальні коливання ротора під дією ексцентриситета маси, що спричиняють вібраційні процеси в роторній системі, крутильні коливання ротора, та їх амплітуду, циклічну частоту крутильних коливань, її вплив на кутову швидкість ротора, та взаємозв'язок цих параметрів.

З розглянутої математичної моделі коливань кінцевого гістерезисного ротора в газоманітній опорі впливає можливість створення інформаційно-вимірювальної системи, яка при безпосередньому вимірюванні кута повороту ротора визначала б миттєві значення кутової швидкості та кутового прискорення ротора.

Вимірювання амплітуди крутильних коливань і миттєвого значення кутової швидкості ротора дозволяє визначити безконтактним методом приведенний момент інерції ротора з рівняння

$$J_{Cz} = \frac{me^2\omega^2}{\varphi_k \sqrt{(\Omega_e^2 - \omega^2)^2 + 4\delta_e^2\omega^2}} \quad (1.24)$$

Таким чином, досліджена математична модель коливань конічного гістерезисного ротора в безконтактній газомагнітній опорі може бути визначена як база для системи вимірювання динамічних параметрів роторної системи.

1.3 Задачі дослідження

Завданням дослідження є розробка сучасної інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газомагнітним підвісом ротора з покращеними технічними характеристиками. Об'єктом дослідження є параметри електродвигуна з газомагнітним підвісом ротора та інформаційно-вимірювальна система їх вимірювання та контролю. Предметом дослідження є методи та засоби вимірювання та контролю параметрів електродвигуна з газомагнітним підвісом ротора та методи оцінювання його стану. Для проведення розробки та досліджень необхідно використати методи теорії імовірності та математичної статистики, методи теорії вимірювального контролю, теорію похибок вимірювання та обробки результатів експериментальних досліджень. Практичне значення отриманих результатів дослідження полягає в підвищенні точності вимірювання параметрів електродвигуна з газомагнітним підвісом ротора, та у розробці методики оперативного оцінювання ступеня відхилення від норми стану електродвигуна з газомагнітним підвісом ротора. Наукова новизна розробки та дослідження полягає в удосконаленні математичної моделі фотоелектричного вимірювального перетворювача площа-напруга на основі фотодіода та операційного підсилювача, який є складовою частиною тахометричного перетворювача, та створенні критерію оцінювання ступеня відхилення від норми стану електродвигуна.

2 ОГЛЯД СПОСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ГАЗОМАГНІТНИМ ПІДВІСОМ РОТОРА

2.1 Особливості вимірювання кутової швидкості обертання ротора

Точне вимірювання швидкості обертання важливе не тільки при випробуваннях електродвигунів, а і в значній кількості випадків протягом їх функціонування. Це відноситься до систем приводів, автоматичних систем управління, у яких електродвигуни є складовими елементами, систем інтелектуального керування електроприводами. Важливим завданням є високоточне вимірювання кутової швидкості обертання у динамічному режимі, вимірювання швидкісних діаграм - залежності швидкості обертання від часу. Динамічний контроль швидкості обертання ускладнений певними причинами: контроль у динамічному режимі проводиться за дуже короткий інтервал часу; інформативні параметри швидко змінюються у значному діапазоні; необхідність проведення швидкісних сумісних вимірювань часу та швидкості обертання; необхідність виявлення швидких змін, швидких провалів моменту, які призводять до погіршення якості механічної енергії, призводять до виникнення механічних ударів в трансмісії, з якою поєднаний електричний двигун; недосконалість методик розрахунку та оцінювання динамічних метрологічних характеристик засобів вимірювання [17].

Рівняння обертання роторної системи електродвигуна описується рівнянням

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = M(t, \omega(t)) - M_0, \quad (2.1)$$

де M_0 - момент опору, $M(t, \omega(t))$ - обертальний (електромагнітний) момент.

Динамічний момент електродвигуна визначається лівою частиною виразу (2.1) та дорівнює різниці між обертальним моментом та моментом на валу електродвигуна

$$M_d = J \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (2.2)$$

Момент опору на валу зумовлений наявністю зовнішньої маси, яка пов'язана з валом електродвигуна. Він існує у перехідному та усталеному режимах роботи, та може бути відсутнім під час випробувань електродвигуна, може змінюватись протягом часу та в залежності від швидкості обертання, він характеризує зовнішню масу, а не саме електродвигун. При умові відсутності моменту опору на валу електродвигуна, його динамічний момент дорівнює обертальному моменту. Як слідує виразу (2.1), існує необхідність проведення вимірювання швидкості обертання в динамічному режимі та вимірювання моменту інерції ротора електродвигуна для контролю та визначення параметрів руху. Динамічний характер процесу вимірювання, широка номенклатура об'єктів контролю та їх конструктивні особливості вимагають особливого підходу до розробки вимірювального перетворення такого важливого параметра, як кутова швидкість. Найбільш суттєвими елементами вимірювального перетворювача кутової швидкості ротора є об'єкт контролю, муфта спряження та сенсор кутової швидкості. Сенсор кутової швидкості перетворює вхідну неелектричну величину в електричну (частоту або напругу), що визначає архітектуру побудови аналого-цифрового перетворювача. В теперішній час більш перспективним є напрямок перетворення кутової швидкості ω в частоту f за допомогою фотоелектричного вимірювального перетворювача, в якому здійснюється така послідовність вимірювального перетворення

$$\omega_r(t) \Rightarrow \omega_m(t) \Rightarrow f_{\phi c} = [\omega_m(t) \cdot z]/2\pi \Rightarrow N_x(t) = (f_0 \cdot 2\pi)/[\omega_m(t) \cdot z]. \quad (2.3)$$

Кутова швидкість $\omega_r(t)$ від об'єкта контролю передається на муфту

$$\begin{cases} \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{M_e(t) - c \cdot [\varphi_r(t) - \varphi_m(t)] - b \cdot [\omega_r(t) - \omega_m(t)]}{J_r}, & \frac{d\varphi_r(t)}{dt} = \omega_r(t); \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{-M_0 + c \cdot [\varphi_r(t) - \varphi_m(t)] + b \cdot [\omega_r(t) - \omega_m(t)]}{J_m}, & \frac{d\varphi_m(t)}{dt} = \omega_m(t), \end{cases} \quad (2.4)$$

потім на фотоелектричний сенсор

$$f_{\phi c} = \frac{\omega_m(t) \cdot z}{2\pi}, \quad (2.5)$$

і на виході цифрового частотоміра отримують двійковий код (вихідну величину)

$$N_x(t) = \frac{f_0 \cdot 2\pi}{\omega_M(t) \cdot z}. \quad (2.6)$$

Тому математична модель такого вимірювального перетворення має вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{r\alpha}(t)}{dt} = k(L_m(-U_{s\alpha}(t) + R_s I_{s\alpha}(t)) - L_s(R_r I_{r\alpha}(t) + \omega_r(t)(L_r I_{r\beta}(t) + L_m I_{s\beta}(t))); \\ \frac{dI_{r\beta}(t)}{dt} = k(L_m(-U_{s\beta}(t) + R_s I_{s\beta}(t)) - L_s(R_r I_{r\beta}(t) - \omega_r(t)(L_r I_{r\alpha}(t) + L_m I_{s\alpha}(t))); \\ \frac{dI_{s\alpha}(t)}{dt} = k(L_r(U_{s\alpha}(t) - R_s I_{s\alpha}(t)) + L_m(R_r I_{r\alpha}(t) + \omega_r(t)(L_r I_{r\beta}(t) + L_m I_{s\beta}(t))); \\ \frac{dI_{s\beta}(t)}{dt} = k(L_r(U_{s\beta}(t) - R_s I_{s\beta}(t)) + L_m(R_r I_{r\beta}(t) - \omega_r(t)(L_r I_{r\alpha}(t) + L_m I_{s\alpha}(t))); \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (M_{\gamma}(t) - M_o(t)); \quad k = \frac{1}{L_r L_s - L_m^2}; \\ M_{\gamma}(t) = 0.5mpL_m [I_{s\beta}(t)I_{r\alpha}(t) - I_{r\beta}(t)I_{s\alpha}(t)]; \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{M_{\gamma}(t) - c \cdot [\phi_r(t) - \phi_m(t)] - b \cdot [\omega_r(t) - \omega_m(t)]}{J_r}; \quad \frac{d\phi_r(t)}{dt} = \omega_r(t); \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{-M_o + c \cdot [\phi_r(t) - \phi_m(t)] + b \cdot [\omega_r(t) - \omega_m(t)]}{J_m}; \quad \frac{d\phi_m(t)}{dt} = \omega_m(t); \\ N_x(t) = \frac{f_0 \cdot 2\pi}{\omega_x(t) \cdot z}, \end{array} \right. \quad (2.7)$$

де J_r - момент інерції ротора і фотоелектричного сенсора ; J_m - момент інерції муфти спряження; $\omega_r(t)$ - швидкість обертання ротора; $\omega_m(t)$ - швидкість обертання муфти; c - коефіцієнт жорсткості муфти; b - коефіцієнт демпфування муфти; $\phi_r(t)$ - кут повороту ротора; $\phi_m(t)$ - кут повороту муфти, z - розрізнявальна здатність фотоелектричного сенсора.

Дане рівняння перетворення являє собою систему жорстких нелінійних рівнянь, розв'язування яких можна виконати лише чисельними методами, наприклад, методом Рунге-Кутта в середовищі символьної математики Maple V4. Дана обставина не дозволяє отримати динамічні метрологічні характеристики засобу вимірювання, що робить неможливим в повній мірі реалізувати задачу аналізу цифрових тахометрів для динамічних вимірювань кутової швидкості. Оскільки кутова швидкість є вихідним параметром для

визначення моменту інерції (в режимі самогальмування) та динамічного моменту (опосередкований метод), то виникає необхідність розробки більш придатних математичних моделей для розв'язування задачі аналізу та синтезу засобів контролю моменту інерції і динамічного моменту, прямих методів вимірювання даних інформативних параметрів.

2.2 Особливості вимірювання момента інерції ротора

Момент інерції ротора є важливою характеристикою електродвигуна, ця характеристика в значній мірі визначає його динамічні властивості. Слід відзначити, що у довідковій літературі та технічній документації на електродвигуни цей параметр вказується не завжди. Як правило, момент інерції ротора електродвигуна може мати значні відхилення від номінального значення ($\pm 10\%$). Під час проектування систем електроприводів та систем автоматики розробникам потрібні високоточні значення моменту інерції ротора електродвигуна (а інколи і роторів у комплексі з виконавчими пристроями), тому як вони визначають теплові режими та швидкість обертання. Як наслідок неоднорідності матеріалів та доволі складних геометричних форм ротора, теоретичне розрахункове визначення моменту інерції є складним завданням зі складною методикою проведення та великою кінцевою похибкою. Значно більш точними є експериментальні методи вимірювання моменту інерції. Питанням експериментального вимірювання моменту інерції різних типів роторів присвячена значна кількість наукових робіт, але прецизійного та простого і швидкодіючого пристрою для вимірювання цього параметру досі не існує.

Розповсюджений в теперішній час метод вимірювання - це метод допоміжного маятника, який застосовується для електродвигунів потужністю від 10 до 1000 кВт, метод самогальмування, який застосовується для електродвигунів потужністю вище 100 кВт, метод крутильних коливань. Останній метод є найбільш універсальним та може бути використаний для

вимірювання моменту інерції електродвигунів різної конструкції. Згідно до цього метода, частина електродвигуна, яка обертається, підвішується вздовж осі обертання та приводиться у коливальний крутильний рух, визначається період малих крутильних коливань, який далі порівнюється з періодом коливань еталона з відомим моментом інерції. Момент інерції визначається за виразом

$$J = J_E \frac{T_0^2}{T_E^2}, \quad (2.8)$$

де J_E - момент інерції еталона, T_E - період коливань еталона, T_0 - період коливань частини електродвигуна, що обертається.

Незважаючи на універсальність цього методу, він має значні недоліки. Виникає необхідність розбирання електродвигуна, що зумовлює його велику трудомісткість, це суттєво обмежує його використання. При використанні цього методу неможливий контроль моменту інерції електродвигуна в процесі його функціонування.

У теперішній час відомі розробки, які присв'ячені вимірюванню характеристик електродвигунів на основі аналізу динамічних режимів роботи. Відомий метод вимірювання моменту інерції та моменту опору на валу за допомогою зразкових мас з відомими моментами інерції, який базується на використанні інформації про миттєву зміну швидкості обертання. Метод полягає у визначенні кутового прискорення в режимі пуску та режимі самогальмування асинхронного електродвигуна при встановлених на валу зразкових масах. На основі вимірних результатів створюється та вирішується система рівнянь, з якої знаходяться величини. Даний метод має достатню точність, високу швидкодію, але він не придатний для вимірювання моменту інерції електродвигуна з газоманітним підвісом, тому як у таких машин режим самогальмування відсутній, зупинення відбувається шляхом подання постійної напруги живлення, яка створює момент гальмування [18].

Для вимірювання моменту інерції таких електродвигунів необхідно використовувати спосіб, що заснований на вимірювання амплітуди крутильних

коливань в усталеному режимі. Але цей спосіб потребує подальшого удосконалення для визначення виразів, які зв'язують момент інерції з вихідними параметрами електродвигуна з газоманітним підвісом.

Значення моменту інерції J ротора електродвигунів значно впливає на вимірюване значення динамічного моменту M_d , оскільки він є обов'язковою складовою для встановлення залежності $M_d = f(t)$, а також для вимірювання динамічної механічної характеристики $M_d = f(\omega_r)$.

Розрахункові методи вимірювання J характеризуються низькою точністю, тому використовуються рідко. Розповсюдженими на практиці є експериментальні методи: допоміжного маятника; крутильних коливань; самогальмування.

Значним недоліком перших двох методів є низька точність та ускладненість процесу автоматизації вимірювання. Отже, розглянемо сутність методу та послідовність вимірювальних перетворень під час реалізації методу самогальмування [19].

Суть методу полягає в тому, що в режимі самогальмування електродвигуна вимірюють спочатку кутове прискорення ротора ξ_{r1} разом зі зразковим моментом інерції, а потім без нього ξ_{r2} . Рівняння руху для цієї вимірювальної процедури має вигляд

$$\begin{cases} 0 = M_0(\omega_r) + M_{bc}(\omega_r) + [J(\omega_r) + J_{bc}(\omega_r)] \cdot \xi_{r1}(\omega_r); \\ 0 = M_0(\omega_r) + M_{bc}(\omega_r) + [J(\omega_r) + J_{bc}(\omega_r) + J_3(\omega_r)] \cdot \xi_{r2}(\omega_r), \end{cases} \quad (2.9)$$

де M_0 - момент механічних втрат електродвигуна; M_{bc} - момент механічних втрат вхідного вала вимірювального перетворювача (ВП); J_{bc} - момент інерції вхідного вала ВП; J_3 - величина зразкового моменту інерції тіла, що визначається за його геометричними та ваговими параметрами.

З рівнянь (2.9) знаходять

$$J = J_3 \cdot \frac{\xi_{r1}}{\xi_{r2} - \xi_{r1}}. \quad (2.10)$$

Отже, визначення інформативного параметра J зводиться в даному випадку до вимірювання кутової швидкості ω_r , цифрового диференціювання $\xi = d\omega_r/dt$ та опосередкованого визначення J . Тому математична модель вимірювального перетворення моменту інерції описується раніше представленою системою (2.9) і рівнянням (2.10). Недоліком такого підходу є невисока швидкодія та низька точність. Час вимірювання, в даному випадку, є сумою таких найбільш суттєвих складових

$$t_B = 2 \cdot (t_{\text{пр}} + t_c + t_3 + t_{\text{цд}}), \quad (2.11)$$

де $t_{\text{пр}}$ - тривалість перехідного процесу об'єкта контролю; t_c - час самогальмування електричної машини (проміжок часу від моменту закінчення перехідного процесу до моменту повної зупинки ротора); t_3 - час, необхідний для виконання операції згладжування результатів вимірювання кутової швидкості; $t_{\text{цд}}$ - час на виконання операції цифрового диференціювання.

Тому тривалість процедури вимірювання моменту інерції за даним способом складає 5 хв., що не зовсім задовольняє вимоги замовника. Невисока точність зумовлена, в першу чергу, невисокою точністю реалізації операції цифрового диференціювання [18].

2.3 Особливості вимірювання механічної характеристики

Механічна характеристика є важливою та дуже інформативною характеристикою електродвигуна, вона визначається як залежність обертового моменту від кутової швидкості

$$M=f(\omega), \quad (2.12)$$

або

$$\omega=f(M), \quad (2.13)$$

яка отримана при постійних значеннях напруги живлення та частоти мережі.

Вигляд механічної характеристики зумовлений різними початковими умовами та іншими додатковими параметрами. З великої кількості механічних

характеристик виділяють пускову механічну характеристику, яку називають природною. Вона вимірюється при живленні електродвигуна напругою та частотою з номінальними параметрами, при відсутньому моменту опору. За механічною характеристикою умовах розраховуються статичні параметри електродвигуна. Так, наприклад, для трифазного асинхронної електродвигуна, механічна характеристика у реверсному режимі, при наявності належного додаткового моменту інерції, наближається до статичної механічної характеристики, що надає змогу зменшити час вимірювання початкового пускового моменту, максимального моменту та інших. Також за механічною характеристикою оцінюються певні види браку. Наприклад, при асиметрії обмотки ротора, форма механічної характеристики значно відрізняється від ідеальної. При неправильному з'єднанні секцій обмотки статора час розбігу затягується.

З наведеного випливає, що збільшення точності вимірювання не тільки механічної характеристики, а і інших параметрів електродвигунів вимагає наявності точних засобів вимірювання кутової швидкості у статичному та динамічному режимах роботи, а також точних автоматичних засобів контролю моменту інерції ротора для будь-якого електродвигуна. Це зумовлює необхідність подальшої їх розробки та дослідження. Важливим та перспективним напрямом є розробка інформаційно-вимірювальних систем параметрів електродвигунів [20].

2.4 Особливості вимірювання динамічного моменту

В теперішній час розповсюдженим є метод опосередкованого вимірювання динамічного моменту, суть якого полягає в наступному: спочатку знаходять одним з відомих методів величину моменту інерції ротора J ; потім в динамічному режимі роботи електродвигуна вимірюють кутову швидкість обертання ротора $\omega_r(t)$ і опосередковано знаходять величину динамічного моменту $J \cdot d\omega_r(t)/dt$. Для реалізації цього методу застосовують

мікропроцесорні засоби вимірювання, що мають в своєму складі об'єкт контролю, муфту спряження, фотоелектричний сенсор з частотним виходом, цифровий частотомір і мікроконтролер. Оскільки в даному методі використовується опосередковане вимірювання динамічного моменту

$$M_{\text{дм}}(t) = J \cdot [d\omega_{\text{м}}(t)/dt], \quad (2.14)$$

то для визначення інформативного параметра необхідно виміряти залежність $\omega_{\text{м}}(t)$, виконати чисельне диференціювання $d\omega_{\text{м}}(t)/dt$ і знайти добуток кутового прискорення та моменту інерції ротора. Отже, муфта спряження та чисельне диференціювання суттєво впливають на величину динамічного моменту. Дана обставина значно обмежує нижню межу вимірювання інформативного параметра опосередкованим методом [21]. Тому більш перспективним є розробка прямого методу вимірювання динамічного моменту.

2.5 Особливості вимірювання змінного струму живлення електродвигуна

Для вимірювання сили струму промислової частоти застосовують прилади електромагнітної, електродинамічної, феродинамічної, випрямної, термоелектричної, електронної систем, цифрові амперметри, компенсатори змінного струму. Найбільшу точність вимірювань забезпечують електродинамічні прилади, а найбільш широко застосовуються електромагнітні прилади. Для вимірювань великих струмів промислової частоти використовують ті ж прилади, але включають їх через вимірювальні трансформатори струму. Струми підвищеної і високої частоти вимірюють амперметрами електростатичної, термоелектричної систем, випрямними, електронними і цифровими приладами. Застосування того чи іншого приладу залежить від частоти вимірюваного струму, вхідного опору або індуктивності приладу, тому що включення вимірювального приладу в мережу може змінити режим роботи ланцюга, її еквівалентний опір і саме вимірювану величину.

Найбільш точні вимірювання (похибка до 1%) забезпечуються цифровими вольтметрами змінного струму і цифровими комбінованими приладами. Амперметри виконуються на основі вимірювальних механізмів електромагнітної, магнітоелектричної, електродинамічної, феродинамічної або термоелектричної систем. Для розширення діапазону вимірювання, електромагнітні амперметри не використовують з шунтами, але використовують з трансформаторами струму. В сучасних інформаційно-вимірювальних системах використовуються цифрові методи вимірювання. За допомогою зразкового шунта або трансформатора струму забезпечується вимірювальне перетворення величини струму у постійну або змінну напругу. Після цього змінна або постійна напруга за допомогою аналого-цифрового перетворювача перетворюється у цифровий код, відповідний миттєвому або середньому значенню струму. Цей код для подальшої обробки та візуалізації передається до сервера інформаційно-вимірювальної системи. Також для вимірювання струму можуть використовуватися цифрові вольтметри, які забезпечують вимірювання напруги на виході шунта або вимірювального трансформатора струму.

2.6 Особливості вимірювання змінної напруги живлення електродвигуна

Аналогові вольтметри виконуються на основі магнітоелектричних, електродинамічних, феродинамічних, електромагнітних, термоелектричних та електростатичних механізмів. Магнітоелектричні вольтметри використовуються для вимірювання постійної напруги. Електродинамічні та електростатичні вольтметри можуть бути використані для вимірювання на постійному і на змінному струмах. Електромагнітні та феродинамічні вольтметри, при умові використання матеріалів з відповідними характеристиками для їх виготовлення, також використовуються на постійному і змінному струмах. Алгоритм роботи цифрових вольтметрів залежить від принципу вимірювального аналого-цифрового перетворення перетворення

напруги, вони поділяються на вольтметри безпосереднього перетворення та зрівноважувальні вольтметри. У вольтметрах безпосереднього перетворення значення вимірюваної напруги перетворюється у часовий інтервал. Тривалість цього часового інтервалу визначається цифровим лічильником-таймером, за допомогою якого рахується кількість прямокутних імпульсів зразкової частоти, які його заповнюють. У теперішній час для вимірювання значення синусоїдальної напруги використовують цифрові вольтметри, які мають у своїй схемі вимірювальний перетворювач змінної напруги у постійну, яка потім вимірюється цифровим вольтметром, який призначений для вимірювання постійної напруги. Вимірювальні перетворювачі синусоїдальної напруги в постійну мають обмежену точність перетворення, тому точність цифрових вольтметрів змінного струму менша, ніж у цифрових вольтметрів постійного струму. В сучасних інформаційно-вимірювальних системах використовуються цифрові методи вимірювання, і відповідно, цифрові вольтметри змінного струму для вимірювання напруги живлення електродвигуна. За допомогою вимірювального трансформатора та кіл випрямлення забезпечується вимірювальне перетворення величини змінної напруги живлення у постійну напругу. Після цього постійна напруга за допомогою аналого-цифрового перетворювача перетворюється у цифровий код, відповідний миттєвому або середньому значенню напруги живлення. Цей код для подальшої обробки та візуалізації передається до сервера інформаційно-вимірювальної системи.

3 ОБГРУНТУВАННЯ ОБРАНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ

3.1 Критеріальне оцінювання стану електродвигуна з газоманітним підвісом

Критеріальна оцінка використовується у різних галузях техніки для якісної та кількісної характеристики стану різних об'єктів. Під час критеріальної оцінки стану об'єктів враховується значна кількість факторів впливу та показників стану, у тому числі результати вимірювань параметрів об'єктів. На основі теоретичних і експериментальних досліджень складних об'єктів виявляються зв'язки між об'єктом і середовищем, визначаються загальні закономірності, пояснюються, узагальнюються і формалізуються емпіричні закономірності. У роботі [22] запропоновано універсальний критерій оцінки ступеня відхилення від нормального стану складових елементів технологічного процесу виробництва молока, який визначається за результатами вимірювального контролю його параметрів. Цей критерій має певну універсальність і може використовуватися для критеріальної оцінки різних інших об'єктів.

Враховуючи велику кількість галузей, в яких використовується критеріальна оцінка стану об'єктів, актуальним завданням є створення універсального критерію, придатного для використання в різних, навіть незв'язаних між собою галузях науки і техніки.

Для більшості варіантів умов відхилення складових елементів об'єкта від нормального стану можна виділити набір параметрів, значення яких, якщо є відхилення, не відповідають допустимим межах. Оптимальним кількісним показником стану складових елементів об'єктів є ймовірність наявності того чи іншого варіанту відхилення. Теоретично це можна визначити на основі визначення відповідності значень параметрів об'єкта допусковим межах з урахуванням їх співвідношення за допомогою методів теорії ймовірностей. Але цей метод визначення ймовірності є надзвичайно складним завданням, яке

вимагає дуже великого обсягу експериментальних досліджень. Цю задачу можна вирішити за допомогою універсального критерію оцінки ступеня відхилення об'єктів від нормального стану, але його недоліком є незручність у використанні, оскільки його значення коливається від деякого мінімального значення до 1, а мінімальне значення залежить від коефіцієнтів кореляції між вимірюваними параметрами об'єкта. Крім того, цей критерій не в повній мірі враховує коефіцієнт кореляції між видом відхилення від нормального стану та основним контрольованим параметром. Наведений коефіцієнт кореляції присутній лише в знаменнику критеріального відношення, а в чисельнику відсутній, що знижує ефективність критеріального оцінювання. Також наближення значення цього критерію до одиниці свідчить про збільшення ступеня відхилення від нормального стану об'єктів, які, на думку авторів, є незручними для сприйняття.

Тому актуальною є розробка універсального критерію оцінки ступеня відхилення від нормального стану зручних у експлуатації об'єктів, чисельне значення якого знаходиться в діапазоні від нуля до одиниці і визначається за результатами вимірювання параметрів об'єкта.

У процесі функціонування практично будь-якого об'єкта відбуваються події, які негативно позначаються на його ефективності. Результати вимірювань параметрів об'єкта характеризують не тільки його стан в цілому, а й окремих складових елементів. Таким чином, за результатами вимірювань параметрів об'єкта можна оцінити його стан в цілому, а також окремих його складових елементів, а також виявити наявність тих чи інших подій, які негативно впливають на ефективність функціонування об'єкта. Основною ознакою настання певної події є невідповідність результату вимірювання відповідного параметра об'єкта встановленим допустимим межах. Слід зазначити, що в багатьох випадках невідповідність значення певного параметра об'єкта допустимим межах може виникати через велику кількість різноманітних факторів, тобто ця обставина не гарантує наявності відповідної події. У багатьох випадках відхилення стану об'єкта від норми, як правило,

супроводжується одночасною зміною і виходом за межі допуску певної кількості його параметрів. Таким чином, у багатьох випадках оцінити стан складових елементів об'єкта можна за результатами вимірювань кількох його параметрів.

Під вимірюваним параметром першого рівня будемо розуміти такий параметр об'єкта, невідповідність якого допустимим межах є основною ознакою відхилення певного типу об'єкта від норми. Вимірюваний параметр першого рівня має найбільше значення модуля коефіцієнта кореляції з певним видом відхилення від норми стану об'єкта. Нехай вимірюються N_K параметрів, які співвідносяться з певним видом відхилення від норми стану об'єкта. Під вимірюваним параметром другого рівня будемо розуміти параметр, який має друге за величиною значення модуля коефіцієнта кореляції з певним видом відхилення від норми стану об'єкта. Відповідно, під вимірюваним параметром третього рівня будемо розуміти параметр, який має третє за величиною значення модуля коефіцієнта кореляції з певним видом відхилення від норми стану об'єкта. Таким чином, вимірюваним параметром i -го рівня є параметр, який має найбільше i -е значення модуля коефіцієнта кореляції з певним видом відхилення від норми стану об'єкта.

Позначимо $P_{K_1}, P_{K_2}, \dots, P_{K_i}, \dots, P_{K_{N_K}}$ результати визначення відповідності допусковим межах параметрів $1, 2, \dots, i, \dots, N_K$ рівня. Припустимо, що якщо значення вимірюваного параметра i -го рівня не відповідає межах допуску, то $P_{K_i} = 1$, якщо воно відповідає межах допуску, то $P_{K_i} = 0$. Позначимо через $\rho_{K_1}, \dots, \rho_{K_i}, \dots, \rho_{K_{N_K}}$ коефіцієнти кореляції між певним видом відхилення від норми стану об'єкта та вимірюваними параметрами, відповідно, $1, \dots, i, \dots, N_K$ рівня. Вони визначаються на основі експериментальних даних.

Розглянемо певний параметр K_{PO} , який визначається виразом

$$K_{PO} = \frac{|\rho_{K_1}|P_{K_1} + |\rho_{K_2}|P_{K_2} + \dots + |\rho_{K_i}|P_{K_i} + \dots + |\rho_{K_{N_K}}|P_{K_{N_K}}}{|\rho_{K_1}| + |\rho_{K_2}| + \dots + |\rho_{K_i}| + \dots + |\rho_{K_{N_K}}|} \quad (3.1)$$

Враховуючи, що оцінювати ступінь відхилення об'єктів від нормального стану за результатами вимірювання їх параметрів має сенс тільки при $P_{K1} = 1$, вираз (3.1) набуває вигляду

$$K_{PO} = \frac{|\rho_{K1}| + \sum_{i=2}^{N_K} |\rho_{Ki}| P_{Ki}}{\sum_{i=1}^{N_K} |\rho_{Ki}|}. \quad (3.2)$$

Параметр K_{PO} , як випливає з виразу (3.2), може приймати значення в діапазоні від мінімального значення $K_{PO\ MIN}$ до 1 за умови, що $P_{K1} = 1$. У цьому випадку мінімальне значення параметра K_{PO} визначається виразом

$$K_{PO\ MIN} = \frac{|\rho_{K1}|}{\sum_{i=1}^{N_K} |\rho_{Ki}|}. \quad (3.3)$$

Теоретично мінімальне значення параметра K_{PO} може бути в межах, визначених виразом

$$K_{PO\ MIN} \in (0; 1]. \quad (3.4)$$

З виразів (3.1) і (3.2) випливає, що чим більше значення параметра K_{PO} наближається до 1, тим більше ступінь відхилення від нормального стану об'єкта. Таким чином, числове значення параметра K_{PO} певним чином характеризує стан об'єкта і може використовуватися для критеріальної оцінки його стану. Але числове значення параметра K_{PO} в діапазоні $[K_{PO\ MIN}; 1]$ є незручним для сприйняття, більш інформативним є значення критерію, яке змінюється в діапазоні від 0 до 1 за умови, що наближення числового значення критерію до 1 свідчить про зменшення ступеня відхилення від нормального стану об'єкта.

Відповідно, враховуючи те, що наближення числового значення критерію до 1 має свідчити про зменшення ступеню відхилення від нормального стану об'єкта, критерій оцінки ступеню цього відхилення за результатами вимірювання параметрів об'єкта вимірювання пропонується визначати за виразом

$$K_S = 1 - K_{P0} = \frac{\sum_{i=1}^{N_K} |\rho_{Ki}| - \sum_{i=1}^{N_K} |\rho_{Ki}| P_{Ki}}{\sum_{i=1}^{N_K} |\rho_{Ki}|} \quad (3.5)$$

Чисельне значення критерію K_S змінюється від 0 до 1. Якщо числове значення K_S дорівнює 1, тобто $P_{K1}, P_{K2}, \dots, P_{Ki}, \dots, P_{KN_K} = 0$, то це свідчить про повну відсутність будь-яких відхилень від норми. Чим вище значення критерію K_S , тим більше стан об'єкта наближається до нормального, і навпаки. Якщо числове значення критерію K_S дорівнює 0, тобто $P_{K1}, P_{K2}, \dots, P_{Ki}, \dots, P_{KN_K} = 1$, це свідчить про те, що всі вимірювані параметри виходять за межі допуску і ступінь відхилення від нормального стану об'єкта максимальний.

Чисельне значення критерію визначає рішення про дії, спрямовані на усунення подій, що призвели до відхилення від нормального стану. Якщо критерій близький до нуля, то необхідно негайно виконати дії, спрямовані на усунення причин відхилення результатів вимірювань від норми. Слід зазначити, що коефіцієнти кореляції параметрів, що характеризують стан об'єкта, для різних варіантів відхилень від норми необхідно визначати експериментально. Ефективність запропонованого критерію зумовлена зручністю використання та простотою розрахунку.

Експериментальне дослідження розробленого критерію проведено авторами шляхом критеріальної оцінки ступеня відхилення від нормального стану при виникненні короткозамкнених витків в обмотці електродвигуна. На рис. 1 наведено типові експериментальні залежності параметрів електродвигуна від часу спостереження при появі короткозамкнених витків.

Експериментальне дослідження розробленого критерію проведено авторами шляхом критеріальної оцінки ступеня відхилення від норми стану електродвигуна, в якому виявлено короткозамкнені витки в обмотці статора. На рис. 3.1 наведено типові експериментальні залежності параметрів обмотки статора електродвигуна від часу з виникненням короткозамкнених витків.

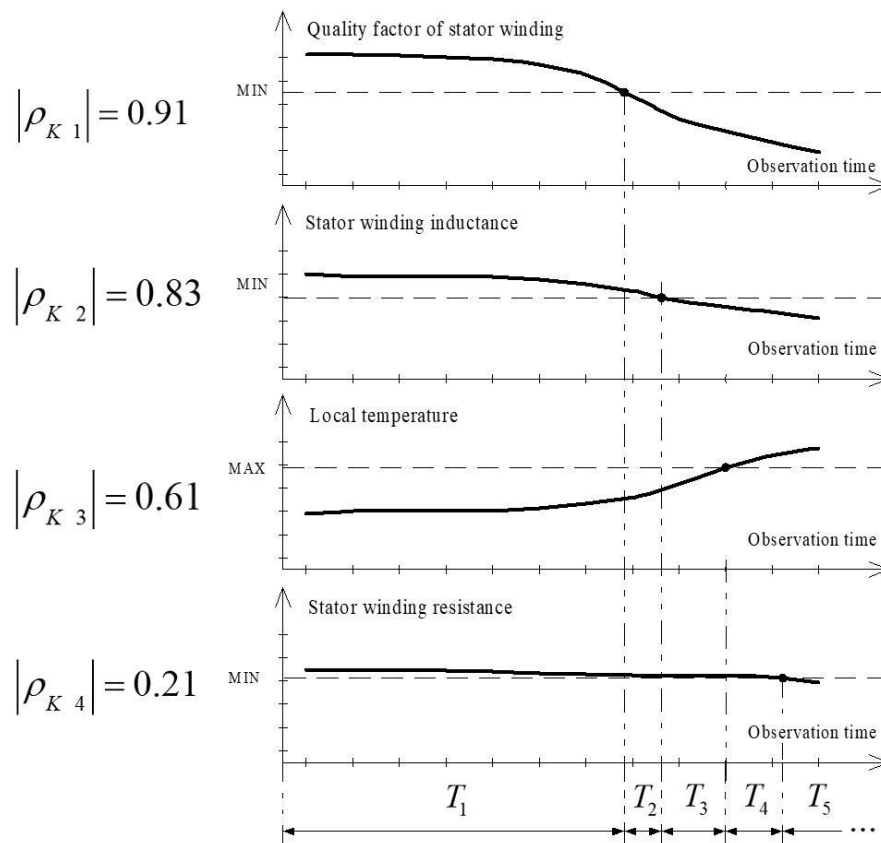


Рисунок 3.1 – Типові експериментальні залежності параметрів обмотки статора електродвигуна від часу з виникненням короткозамкнених витків

При виникненні витків короткого замикання в обмотці статора основною ознакою цього є зниження добротності обмотки статора нижче межі допуску, яка є індивідуальною для кожного типу електродвигуна. Тобто добротність обмотки, в даному випадку, є вимірюваним параметром першого рівня. Як впливає з рис. 3.1, при появі короткозамкнених витків зі зменшенням добротності обмотки статора поступово зменшується і індуктивність обмотки, яка в даному випадку є вимірюваним параметром другого рівня. Крім того, через виникнення короткого замикання в обмотці починає зростати місцева температура в місці короткого замикання, яка є вимірюваним параметром третього рівня, і середній активний опір обмотки, який є вимірюваним параметром четвертого рівня, зменшується.

У результаті експериментальних досліджень встановлено значення коефіцієнтів кореляції між контрольованими параметрами першого, другого, третього та четвертого рівнів та досліджуваним відхиленням від нормального

стану: $|\rho_{K1}|=0.91$, $|\rho_{K2}|=0.83$, $|\rho_{K3}|=0.61$, $|\rho_{K4}|=0.21$. Розрахункові значення критерію ступеня відхилення від нормального стану асинхронного електродвигуна з короткозамкненими витками обмотки статора за різні інтервали часу спостереження наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Значення критерію ступеня відхилення від нормального стану електродвигуна з короткозамкненими витками обмотки статора в різні інтервали часу спостереження

Observation time intervals	P_{K1}	P_{K2}	P_{K3}	P_{K4}	K_s
T_1	0	0	0	0	1
T_2	1	0	0	0	0.64
T_3	1	1	0	0	0.32
T_4	1	1	1	0	0.08
T_5	1	1	1	1	0

Як впливає з таблиці 3.1, протягом першого інтервалу спостереження T_1 всі вимірювані параметри, включаючи параметр першого рівня, були в межах допуску. Відповідно, числове значення критерію протягом цього інтервалу дорівнює одиниці. Під час другого інтервалу спостереження T_2 добротність обмотки статора (параметр першого рівня) була нижче межі допуску, відповідно числове значення критерію знизилася до 0,64. Під час третього інтервалу спостережень T_3 внаслідок погіршення стану обмотки індуктивність статора зменшилася нижче межі допуску, відповідно числове значення критерію зменшилось до 0,32. Далі, протягом четвертого інтервалу часу T_4 , внаслідок подальшого погіршення стану обмотки, її локальна температура зросла вище межі допуску, відповідно числове значення критерію знизилася до 0,08. Протягом останнього інтервалу T_5 часу спостереження активний опір обмотки знизився нижче межі допуску. Відповідно числове значення критерію

зменшилось до нуля, оскільки всі вимірні параметри обмотки статора не відповідають межам допуску.

Нульове значення критерію фактично свідчить про наявність відповідного відхилення стану об'єкта від нормального стану. Слід зазначити, що в окремих випадках остаточний висновок про наявність тих чи інших видів відхилень стану об'єкта від нормального стану можна зробити лише після проведення відповідних лабораторних досліджень.

Для розробки критерію ступеня відхилення від нормального стану та розрахунку його числових значень і коефіцієнтів кореляції між вимірюваними параметрами та досліджуваним відхиленням було використано програмне забезпечення Maple. Результати експерименту отримані шляхом штучного створення короткозамкнених витків в обмотці статора електродвигуна з газоманітним підвісом.

Розроблений критерій може бути використаний для оцінки ступеня відхилення стану електродвигуна від нормального стану та при інших видах відхилень. Так, наприклад, підвищення температури корпусу електродвигуна, підвищення рівня шуму і вібрації, зниження крутного моменту є ознакою дисбалансу фаз в напрузі живлення або відсутності однієї з фаз. Зниження крутного моменту та підвищення температури корпусу є ознакою зниженої напруги живлення, наявності вібрації, шуму та часткового нагрівання корпусу є ознакою дисбалансу ротора. Чисельне значення запропонованого критерію, розраховане за результатами вимірювань відповідних параметрів, опосередковано характеризує ймовірність наявності того чи іншого виду відхилення від нормального стану. Слід зазначити, що запропонований критерій можна використовувати для оцінки ступеня відхилення від нормального стану практично будь-якого об'єкта, в тому числі і біологічного.

В результаті проведених досліджень розроблено універсальний критерій оцінки ступеня відхилення від нормального стану різних об'єктів за результатами вимірювань параметрів об'єктів. Розроблений критерій простий у використанні, його числове значення коливається від нуля до одиниці, чим

вище його числове значення, тим більше стан об'єкта наближається до нормального. Ефективність використання розробленого критерію підтверджено результатами експериментальних досліджень. Наведені в статті результати досліджень можуть бути використані для оцінки ступеня відхилення від нормального стану різних типів об'єктів.

3.2 Вимірювання середнього значення кутової швидкості з використанням вагових функцій

При вимірюванні швидкості переміщення (лінійного та кутового) найчастіше використовуються дискретні перетворювачі переміщень (найбільш розповсюджені – фотоелектричні), вихідним сигналом яких є послідовність імпульсів, частота якої прямо пропорційна середній швидкості переміщення, а період – зворотно пропорційний миттєвій швидкості переміщення. В залежності від того, який параметр послідовності імпульсів вимірюється, можливі два алгоритми роботи вимірювача переміщень. Проводиться підрахунок кількості вихідних імпульсів перетворювача за фіксований зразковий часовий інтервал. При використанні даного алгоритму здійснюється усереднення швидкості на зразковому часовому інтервалі. Диференціювання у цьому випадку здійснюється з постійним часом диференціювання, який дорівнює зразковому часовому інтервалу. Шукана швидкість знаходиться з виразу

$$v = k_{\Pi} N_{\Pi} / T_{зр}, \quad (3.6)$$

де v - швидкість переміщення; $T_{зр}$ - зразковий часовий інтервал; N_{Π} - кількість підрахованих за інтервал $T_{зр}$ вихідних імпульсів дискретного перетворювача переміщень; k_{Π} - коефіцієнт пропорційності між кількістю імпульсів, та переміщенням (параметр перетворювача).

Проводиться вимірювання часового інтервалу між двома сусідніми імпульсами шляхом заповнення його імпульсами зразкової високої частоти з подальшим їх підрахунком. У цьому випадку час диференціювання змінний, і

дорівнює часу між двома сусідніми імпульсами. Миттєва швидкість переміщення знаходиться з виразу

$$v = hf_{зр}/N_0, \quad (3.7)$$

де N_0 - кількість імпульсів зразкового генератора, які підраховано за час між двома сусідніми імпульсами; $f_{зр}$ - частота зразкового генератора; h - розрізнявальна здатність дискретного перетворювача переміщень.

Вимірювання швидкості за першим алгоритмом зводиться до вимірювання частоти, за другим алгоритмом – до вимірювання періоду. Внаслідок того, що відносна похибка первинного перетворення сучасних дискретних перетворювачів переміщень мала і не перевищує $10^{-5} - 10^{-6}$, домінуючою складовою загальної похибки вимірювання швидкості є похибка вимірювання частоти або періоду (при умові рівномірного переміщення). Вимірювання швидкості можна розглядати як визначення постійної складової (середнього значення) на інтервалі T_x за допомогою П-подібної вагової функції (ВФ) чи, теж саме, за допомогою усереднюючого вікна Діріхле. Як правило тривалість імпульсів, що поступають на вхід лічильника вимірювача, набагато менша періоду T_x і тому розглядатимуться як δ -імпульси

$$\varphi_0(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_0), \quad (3.8)$$

де $T_0 = 1/f_0$ - період δ -імпульсів.

Ці імпульси приходять на вхід лічильника на протязі часу, обмеженого моментами t_0 , та $t_0 + T_{xi}$. Тоді результат вимірювання знаходиться як

$$y = \int_{t_0}^{t_0+T_{xi}} \varphi_0(t) dt. \quad (3.9)$$

Представимо послідовність δ -імпульсів (3.9) у вигляді

$$\varphi_0(t) = f_0 \sum_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi k f_0 t} = f_0 + 2f_0 \sum_{k=1}^{\infty} \cos(2\pi k f_0 t). \quad (3.10)$$

Підставивши (3.5) в (3.4) одержимо

$$y = \int_{t_0}^{t_0+T_{xi}} f_0 \sum_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi k f_0 t} dt = f_0 T_x + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin(\pi k f_0 T_x) \cdot \cos[2\pi k f_0 (t_0 + 0.5T_x)]. \quad (3.11)$$

У цьому виразі міститься, як бажана, інформація $f_0 T_x$, так і похибка квантування - друга складова виразу (3.11). Для зменшення похибки квантування доречно застосувати вагові методи підвищення точності. Фізичний аспект можливості зменшення сумарної похибки цифрового тахометра полягає у наступному. Аналізуючи роботу класичних вимірювачів швидкості, можна побачити, що їх особливістю є використання інформації про фазу досліджуваного сигналу лише в моменти початку та закінчення вимірювання. Інформація про фазу сигналу у проміжних точках не використовується. Це вказує на можливість підвищення точності вимірювання швидкості за допомогою використання інформації про поточну миттєву фазу інформаційного сигналу протягом інтервалу вимірювання. Таку можливість мають вимірювачі, у яких інформативний сигнал додатково квантується за рівнем з метою підвищення розрізнявальної здатності, а також управління нею по розробленому алгоритму. А це, в свою чергу, дає можливість одержувати додаткову інформацію про фазу сигналу, тобто використовувати ступеневі осереднюючі вікна. Розглянемо алгоритм роботи цифрового вимірювача швидкості при реалізації другого алгоритму диференціювання. Нехай протягом інтервалу T_x здійснюється $k+1$ відліків фази через інтервали часу $\tau = T_x/k$: $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k, \phi_{k+1}$. Результат вимірювання будемо знаходити у вигляді зваженої суми

$$v = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^k a_i (\phi_{i+1} - \phi_i) = \frac{1}{\tau} \left[-a_1 \phi_1 + \sum_{i=2}^k (a_{i-1} - a_i) \phi_i + a_k \phi_{k+1} \right], \quad (3.12)$$

де a_i - вагові коефіцієнти (ВК), що задовільняють умові незсуненості оцінки.

Для забезпечення мінімальної похибки вимірювання кутової швидкості необхідно вирішити задачу визначення оптимальних коефіцієнтів ваги a_i , що мінімізують дисперсію σ_v^2 . Значення оптимальних ВК залежить від кореляційних зв'язків між різними відліками фази. Для некорельованих відліків фази дисперсія визначається

$$\sigma_v^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{\tau^2} \left[a_1^2 + \sum_{i=2}^k (a_{i-1} - a_i)^2 + a_k^2 \right], \quad (3.13)$$

де σ_{φ}^2 - дисперсія відліку фази в i -тій точці

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{1}{2a^2} + \frac{4\pi^2}{12}. \quad (3.14)$$

Для мінімізації σ_v^2 застосуємо метод неоднозначних співмножників Лагранжа, у відповідності з яким необхідно визначити екстремум функції

$$\Phi(a_i) = \sigma_v^2 + \lambda \left(\sum_{i=1}^k a_i - 1 \right). \quad (3.15)$$

Диференціювання (3.15) по a_i з урахуванням умови незсуненості приводить до наступної системи рівнянь

$$\begin{cases} 2a_1 - a_2 + \frac{\lambda}{2} = 0 \\ -a_{i-1} + 2a_i + a_{i+1} + \frac{\lambda}{2} = 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ -a_{k-1} + 2a_k + \frac{\lambda}{2} = 0 \\ \sum_{i=1}^k a_i = 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Вирішуючи систему (3.16) одержуємо формулу для знаходження ВК

$$a_i = (i+1) \cdot (k-1). \quad (3.17)$$

Абсолютна похибка квантування у випадку застосування ступеневої ВФ знаходиться за формулою

$$\delta_{\text{ВФ}} = (\alpha_0 - \alpha_1) \cdot a_0 + (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot a_1 + \dots + (\alpha_{k-1} - \alpha_k) \cdot a_{k-1} = \alpha_0 a_0 + \alpha_1 (a_1 - a_0) + \dots + \alpha_{k-1} (a_{k-1} - a_{k-2}) + \alpha_k a_{k-1}. \quad (3.18)$$

Середньоквадратична похибка визначається

$$\delta_{\text{ВФ}} = \frac{T_0}{2\sqrt{3}} \sqrt{a_0^2 + \sum_{i=1}^{k-1} (a_i - a_{i-1})^2 + a_{k-1}^2}. \quad (3.19)$$

Число імпульсів, що надійдуть на лічильник вимірювача, знайдемо за співвідношенням

$$N_{\text{ВФ}} = \frac{T_x f_0}{k} \sum_{i=0}^{k-1} a_i. \quad (3.20)$$

Таким чином, відносна середньоквадратична похибка квантування дорівнюватиме

$$\tilde{\delta}_{\text{ВФ}} = \frac{\delta_{\text{ВФ}}}{N_{\text{ВФ}}} = k \cdot \sqrt{a_0^2 + \sum_{i=1}^{k-1} (a_i - a_{i-1})^2 + a_{k-1}^2} / 2\sqrt{3} \cdot f_0 T_X \sum_{i=0}^{k-1} a_i. \quad (3.21)$$

Для оптимальної ВФ, що описується формулою (3.21) можна одержати оптимальне значення відносної середньоквадратичної похибки квантування та відношення похибки $\tilde{\sigma}_{\text{ВФ}}$ до похибки $\tilde{\sigma}_{\text{П}}$, яка характерна для застосування найпростішої П-подібної ВФ

$$\tilde{\sigma}_{\text{оп}} = \sqrt{\frac{k}{(k+1)(k+2)}} \cdot \frac{100}{T_X f_0}. \quad (3.22)$$

$$V_{\text{оп}} = \frac{\tilde{\sigma}_{\text{ВФ}}}{\tilde{\sigma}_{\text{П}}} = \sqrt{\frac{(k+1)(k+2)}{k}}. \quad (3.23)$$

Як бачимо, оптимальна ВФ забезпечує зменшення відносної середньоквадратичної похибки квантування в V раз, причому це зменшення збільчується із ростом числа ділянок вагової функції. Близьким до оптимальної за своїми властивостями є ступенєво-трикутна (рис. 3.1) та трапецеїдальна функція (табл. 3.2), для яких похибка квантування, наприклад при $k=8$, лише в 1,15 та 1,06 рази відповідно більша, ніж для оптимальної ВФ. Проте практична реалізація їх набагато простіша, що дає змогу більш широко їх застосувати у вимірювачах швидкості.

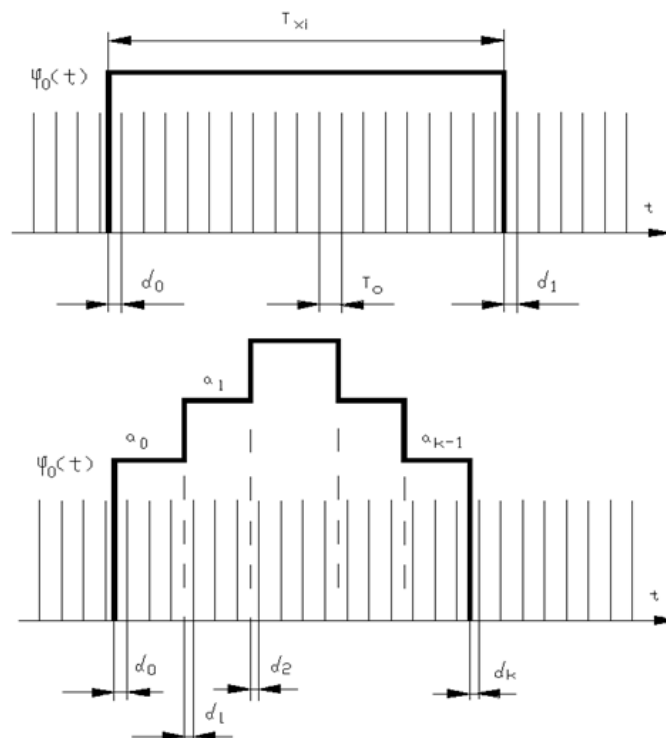
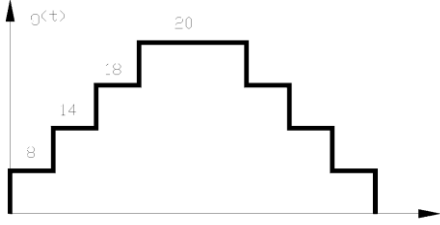
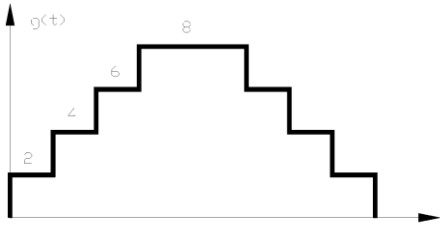
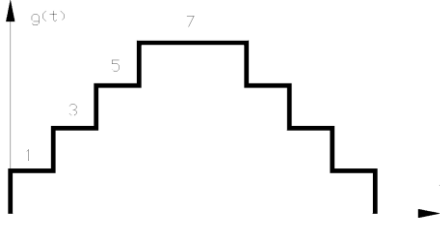
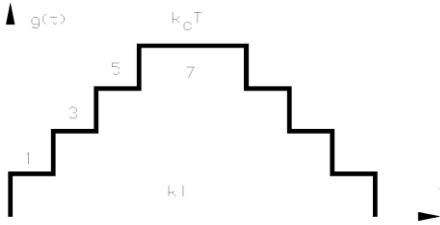


Рисунок 3.2 - До визначення похибки квантування з
П-подібною та ступенево-трикутною ВФ

Таблиця 3.2 – Порівняння вагових функцій

	Вагова функція	Вагові коефіцієнти	$V = \frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_{ВФ}}$
Оптимальна		$a_i = (i + 1) \cdot (k - 1)$	$U_{opt} \approx \sqrt{\frac{k}{6}}$
Трикутна парна		$a_i = k + 1 - k - 1 - 2i $	$U_{\Delta} \approx \sqrt{\frac{k}{6}}$
Трикутна непарна		$a_i = k - k - 1 - 2i $	$U_{\Delta} \approx \sqrt{\frac{k}{8}}$
Трапецеїдальна		$a_i = k + 1 - k - 1 - 2i $ $a_i = k - k - 1 - 2i $ $k / k_0 \approx 3$	$U_{mp} \approx \sqrt{\frac{k}{6.75}}$

3.3 Вимірювання моменту інерції ротора за амплітудою крутильних КОЛИВАНЬ

Вимірювання моменту інерції ротора відомими методами є складним та трудомістким процесом. Непряме вимірювання моменту інерції ротора з безконтактним підвісом шляхом вимірювання амплітуди крутильних коливань дає можливість автоматизувати його. Розглянемо рис. 3.3, на якому наведено залежність кута повороту ротора від часу при постійному значенні частоти обертання та відсутності крутильних коливань $\varphi_c(t)$, а також при наявності крутильних коливань $\varphi(t)$. Залежність кута повороту ротора від часу в статичному режимі роботи електродвигуна з безконтактним підвісом ротора визначається виразом

$$\varphi(t) = \varphi_c(t) + \varphi_k(t) = \omega_c t + \varphi_k(t), \quad (3.24)$$

де ω_c - середнє значення кутової швидкості,

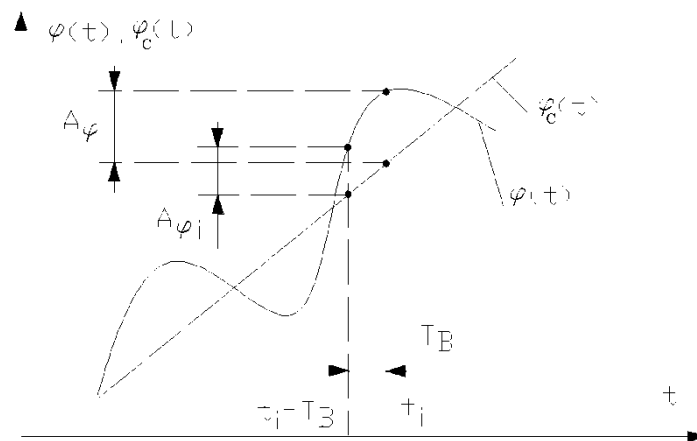


Рисунок 3.3 – Алгоритм вимірювання моменту інерції ротора електродвигуна з газоманітним підвісом

Значення тангенсу кута наклону прямої $\varphi_c(t)$, який чисельно дорівнює середньому значенню частоти обертання, визначається за допомогою багаторазових вимірювань миттєвого значення кута повороту ротора та знаходження середньоарифметичного значення першої похідної сигналу за часом при роботі електродвигуна в статичному режимі. Середнє значення частоти обертання визначається за виразом

$$\omega_c = \frac{1}{nT_B} \sum_{i=0}^n (\varphi(t_i) - \varphi(t_i - T_B)), \quad (3.25)$$

де n - кількість вимірних значень частоти обертання; T_B - крок дискретизації.

Складова виразу (3.25) $\varphi_K(t)$ має коливальний характер та залежить від наступних причин: змінні електромагнітні сили в об'єкті контролю; несінусоїдальності розподілу магнітної індукції у зазорі; нерівномірності магнітної провідності вздовж вісей; змінні механічні сили; дисбаланс ротору; зміна температури; деформації та тормозні моменти; нерівномірність обертання ротору; коливання напруги живлення та навантаження; несінусоїдальність напруги живлення, нестабільність частоти напруги живлення.

Для електродвигуна з газоманітним підвісом ротору, основною причиною, яка зумовлює виникнення крутильних коливань, є дисбаланс ротора.

У цьому випадку, при умові знехтування іншими факторами виникнення крутильних коливань

$$\varphi(t) = \varphi_c(t) + \varphi_K(t) = \omega_c t + A_\varphi \sin 2\omega t, \quad (3.26)$$

Величина A_{φ_i} , яка дорівнює різниці між значеннями кута повороту з урахуванням крутильних коливань та без їх урахування, визначається виразом

$$A_{\varphi_i}(t_i) = \varphi(t_i) - \varphi_0(t_i) = \varphi(t_i) - \omega_c t_i = \varphi(t_i) - \frac{t_i}{nT_B} \sum_{i=0}^n (\varphi(t_i) - \varphi(t_i - T_B)). \quad (3.27)$$

Для визначення амплітуди крутильних коливань необхідно використати сплайн-інтерполяцією кубічними сплайнами з наступним визначенням середнього значення максимумів та мінімумів інтерполяційного сплайну. Позначимо інтерполяційний сплайн через $P_{A\varphi}(t)$, у цьому випадку амплітуда крутильних коливань визначається як середньоарифметичне модулів максимумів та мінімумів інтерполяційного сплайну

$$A_\varphi = \left(\frac{1}{K_{\max}} \sum_{i=1}^{K_{\max}} \max P_{A\varphi}(t) + \frac{1}{K_{\min}} \sum_{i=1}^{K_{\min}} |\min P_{A\varphi}(t)| \right) / 2, \quad (3.28)$$

K_{\max} , K_{\min} - кількість максимумів і мінімумів інтерполяційного сплайну.

Завдання визначення максимумів та мінімумів сплайну розв'язується відомими методами. Момент інерції визначається за виразом (2.4)

$$J = me^2 \left(1 + \frac{1}{4A_\phi} \right). \quad (3.29)$$

3.4 Розробка електричних схем інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора

До складу інформаційно-вимірювальної системи, що розробляється, входить первинний тахометричний перетворювач, який має аналоговий вихідний сигнал, прямо пропорційний куту повороту вала електродвигуна. Шляхом обчислення першої похідної вихідного сигналу перетворювача визначається кутова швидкість, як миттєве її значення, так і середнє. Аналогові диференціатори мають доволі велику похибку та невеликий частотний діапазон, що не задовільняє умовам технічного завдання. Виходячи з цього, доцільно застосувати цифрове диференціювання вихідного сигналу сенсора кутової швидкості. Існують три види цифрового диференціювання:

- перший тип - це простий дискретний диференціатор. Принцип дії такого диференціатора полягає у відніманні миттєвих значень сигналу через однакові інтервали. Вихідний сигнал диференціатора першого типу визначається виразом

$$U_{д1} = \frac{U(t_i) - U(t_i - \Delta t)}{\Delta t}, \quad (3.30)$$

де Δt - інтервал дискретизації;

- другий тип - дискретний диференціатор з усередненням. У такому диференціаторі, через однакові інтервали часу, віднімаються проінтегровані на цих інтервалах значення вхідного сигналу. Вихідний сигнал диференціатора другого типу

$$U_{д2} = \frac{\int_{t_i}^{t_i} U(\tau) d\tau - \int_{t_i - T}^{t_i - T} U(\tau) d\tau}{T^2}, \quad (3.31)$$

- третій тип - диференціатор з усередненням на частині інтервалу. У такому диференціаторі, через однакові інтервали часу віднімаються

проінтегровані на частині них значення вхідного сигналу. Вихідний сигнал диференціатора третього типу

$$U_{ДЗ} = \frac{\int_{t_i-T}^{t_i} U(\tau) d\tau - \int_{t_i-\Delta t-2T}^{t_i-\Delta t-T} U(\tau) d\tau}{T \cdot \Delta t + T^2}, \quad (3.32)$$

Вибір одного з цих типів диференціаторів залежить від великої кількості факторів, але кожен з них зумовлює необхідність використання аналого-цифрового перетворювача. В подальшому будемо використовувати алгоритм цифрового диференціатора першого типу для отримання максимальної швидкодії. Інформаційно-вимірювальна система, що розробляється, призначена в тому числі для високоточного вимірювання кутової швидкості та інших параметрів руху електродвигуна з газоманітним підвісом у динамічному і статичному режимах. Тобто система повинна працювати в режимі реального часу, а також обчислювати залежності кутової швидкості, кутового прискорення, кута повороту валу електродвигуна від часу, фазних напруг живлення та струму споживання за кожною фазою. Вищенаведене зумовлює необхідність реалізації інформаційно-вимірювальної системи у вигляді окремого конструктиву на основі мікроконтролера, до якого приєднуються первинні вимірювальні перетворювачі параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом. Після аналого-цифрового перетворення та первинної обробки даних результати вимірювання передаються до персонального комп'ютера, де здійснюється остаточна обробка результатів вимірювання та їх візуалізація. Вихідні сигнали первинних вимірювальних перетворювачів параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом мають уніфіковані вихідні сигнали, тому ці сигнали надходять безпосередньо на входи мультиплексора, який інтегрований в мікроконтролер, і далі, на вхід аналого-цифрового перетворювача. Для забезпечення функціонування мікроконтролера, а також для запуску інтегрованого в мікроконтролер аналого-цифрового перетворювача використовується внутрішній генератор з кварцевою стабілізацією. Якщо період генератору відомий, можливо забезпечити вимірювання залежностей параметрів електродвигуна від часу, не проводячи сумісних вимірювань.

Кутова швидкість (миттєве і середнє значення) знаходиться шляхом цифрового диференціювання вихідного сигналу тахометричного перетворювача. Амплітуда крутильних коливань, яка необхідна для визначення значення приведенного моменту інерції, знаходиться шляхом цифрової фільтрації вихідного сигналу тахометричного перетворювача. Таким чином, приведенний момент інерції та кутова швидкість знаходяться шляхом цифрової обробки вихідного сигналу тахометричного перетворювача. Для вимірювання струму споживання та напруги живлення використовуються стандартні вимірювальні трансформатори напруги та струму. Тому як електричні машини з газоманітним підвісом ротора мають виключно трифазне живлення, це обумовлює наявність шістьох вимірювальних каналів. Загальна кількість вимірювальних каналів у інформаційно-вимірювальній системі, що розробляється, дорівнює сім.

Електричну структурну схему інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора представлено на рис. 3.4 та наведено у додатку А. Електричну принципову схему та зовнішній вигляд інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом наведено у додатку А.

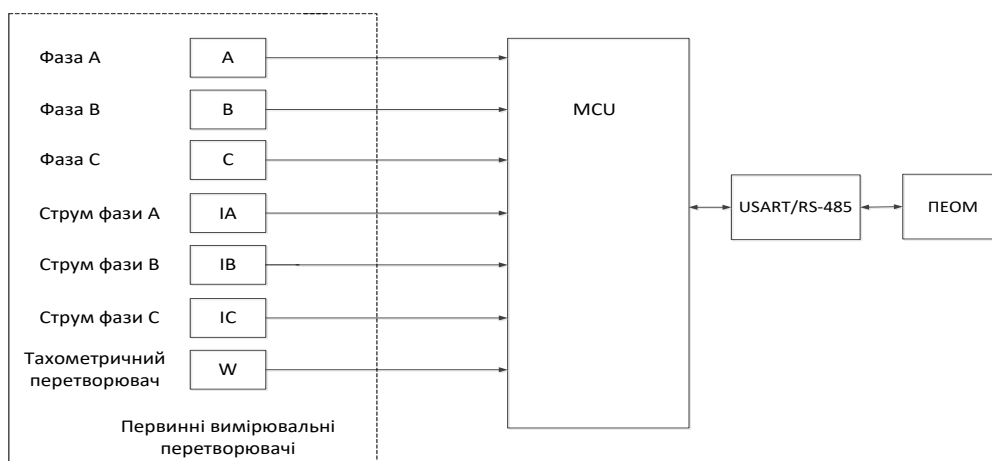


Рисунок 3.4 – Схема електрична структурна інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора

4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Розробка схеми програми

Розробка алгоритмічного і програмного забезпечення при вирішенні завдань проектування інформаційно-вимірювальних систем починається після завершення розробки структурної схеми апаратної частини. З метою створення алгоритму роботи інформаційно-вимірювальної системи необхідно провести:

- деталізований опис завдання;
- аналіз завдання;
- розробку загального алгоритму роботи системи;
- розробку деталізованих алгоритмів та підпрограм;
- розподілення робочих регістрів та пам'яті.

Після моменту увімкнення напруги живлення відбувається початкова ініціалізація системи, скидання портів уведення – виведення та обнулення внутрішніх регістрів мікроконтролера. Після цього в відповідний порт записується керуюче слово, за яким імпульси з виходу генератора поступають на вхід запуску аналого-цифрового перетворювача, а також встановлюється необхідний канал мультиплексора. Після надходження першого імпульсу створюється сигнал запиту на переривання, після чого здійснюється очікування сигналу готовності від АЦП. Після надходження сигналу готовності від АЦП перший байт його коду записується до порта, після цього з порта він читається та записується в ОЗУ, далі лічильник числа зчитувань з АЦП збільшується на одиницю, після цього до ОЗУ записується другий байт даних.

Далі обчислюється поточне значення часу за формулою

$$T(J) = J \cdot T_G, \quad (4.1)$$

де T_G - період тактового генератора.

Після цього здійснюється перевірка, чи не перша це вибірка. Якщо це перша вибірка, то відбувається перехід на початок програми та зчитується

друге слово з АЦП. Якщо вибірка не перша - обчислюється швидкість обертання за виразом

$$\omega(J) = \frac{\varphi(J) - \varphi(J-1)}{T_G} \quad (4.2)$$

Значення кутової швидкості, кута повороту, поточного часу записується до ОЗУ, а програмне забезпечення перевіряє, чи є сигнал закінчення процедури вимірювання. Якщо він відсутній, то відбувається перехід на початок програми.

Непряме вимірювання моменту інерції ротора за допомогою вимірювання амплітуди крутильних коливань дає можливість автоматизації цього процесу. Для електродвигуна з газоманітним підвісом ротору, основною причиною, яка зумовлює наявність крутильних коливань, є дисбаланс ротора. За умови знехтування іншими причинами виникають крутильні коливання

$$\varphi(t) = \varphi_C(t) + \varphi_K(t) = \omega_C t + A_\varphi \sin 2\omega t, \quad (4.3)$$

Величина A_{φ_i} , яка дорівнює різниці між вимірними значеннями кута повороту з урахуванням наявності крутильних коливань та без їх урахування, визначається виразом

$$A_{\varphi_i}(t_i) = \varphi(t_i) - \varphi_0(t_i) = \varphi(t_i) - \omega_C t_i = \varphi(t_i) - \frac{t_i}{nT_B} \sum_{i=0}^n (\varphi(t_i) - \varphi(t_i - T_B)). \quad (4.4)$$

Для вимірювання амплітуди крутильних коливань необхідно використати сплайн-інтерполяцію кубічними сплайнами з наступним визначенням середньоарифметичного значення максимумів та мінімумів інтерполяційного сплайну. Амплітуда крутильних коливань розраховується як середньоарифметичне модулів максимумів та мінімумів інтерполяційного сплайну. Максимуми та мінімуми інтерполяційного кубічного сплайну знаходяться відомими методами. Момент інерції визначається за виразом

$$J = m e^2 \left(1 + \frac{1}{4A_\varphi} \right) \quad (4.5)$$

Схема програми, яка відповідає описаному алгоритму, наведена у графічній частині магістерської кваліфікаційної роботи. Перед проведенням необхідної кількості вимірювань для визначення середнього та миттєвого

значення кутової швидкості, амплітуди крутильних коливань, приведенного значення моменту інерції, проводиться вимірювання напруги живлення та струму споживання для кожної фази трифазної напруги живлення. Для цього програмно встановлюються відповідні канали мультиплектора, на які поступає вимірюваний сигнал від вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Струм споживання за кожною фазою необхідно вимірювати під час періодичних та приймальних випробувань. Напругу живлення необхідно знати для дослідження та запобігання впливу її зміни на результати вимірювання параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора.

4.2 Розробка програмного забезпечення

Програмне забезпечення, під керуванням якого працює інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора, дозволяє реалізувати наступні режими роботи програмних засобів: режим роботи з використанням системи меню; графічне і табличне представлення інформації;

Ядром програмного забезпечення є основна програма, процедури апроксимації кубічними сплайнами, процедура цифрового диференціювання апроксимуючої функції, програмне забезпечення для процесів накопичення і представлення результатів. Наявність системи меню забезпечує вибір один з двох режимів роботи: вимірювання швидкісних діаграм; вимірювання параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора: середнього і миттєвого значення швидкості обертання, амплітуди крутильних коливань, моменту інерції, струму споживання та напруги живлення за кожною з трьох фаз, кожному режиму відповідає своя підпрограма.

Розроблену схему програми інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора наведено у додатку А, лістинг фрагменту програми, яка написана на алгоритмічній мові C++, у відповідності зі схемою програми, наведений у додатку В.

5 МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При вимірюванні струму споживання та напруги живлення за трьома фазами основною складовою похибки вимірювання є інструментальна складова, яку вносить вимірювальний трансформатор напруги або струму. Складовою похибки, яка зумовлена квантуванням вихідного сигналу трансформатора струму або напруги аналого-цифровим перетворювачем мала у порівнянні з інструментальною складовою. Тому для забезпечення необхідної похибки вимірювання цих величин, згідно умов технічного завдання, треба використовувати вимірювальні трансформатори напруги та струму відповідного класу точності. Таким чином, можна зробити висновок, що похибка вимірювання напруги живлення та струму споживання за кожній фазі визначається класом точності відповідного вимірювального трансформатора.

Похибка вимірювання амплітуди крутильних коливань має наступні складові: похибка квантування, похибка інтерполяції, похибки, що зумовлена випадковими завадами та неточністю виготовлення діафрагми. Основною складовою похибки вимірювання крутильних коливань є похибка інтерполяції. Використання інтерполяції кубічними сплайнами зумовлює можливість точно або асимптотично оцінити похибки інтерполяції на класах функцій. Якщо функція $\varphi(t)$ належить класу $C^k[a; b]$ функцій, неперервних на $[a; b]$ і, що мають неперервні похідні до k - того порядку ($k = 0, 1, 2, 3, 4$), то для похибки інтерполяції кубічним сплайном $s(t)$ функції та її похідних дійсні оцінки

$$\max_{a < t < b} |\varphi^{(p)}(t) - s^{(p)}(t)| \leq c \cdot h^{k-p}, k \geq p, \quad (5.1)$$

де c - невід'ємна константа;

$$h = \max_{0 < i < N_s - 1} |x_{i+1} - x_i|, \quad (5.2)$$

де N_s - число відліків.

Для функції $\omega(t) \in C^4[a; b]$ порядок наближення $\omega(t)$ сплайном $s(t)$ дорівнює $o(h^4)$, порядок наближення похідної $\omega'(t) = \varepsilon(t)$, дорівнює $o(h^3)$ та буде мати дуже мале значення у порівнянні з іншими складовими. Провівши оцінку за

виразами (5.1) та (5.2) за допомогою імітаційного моделювання отримано значення зведеної похибки вимірювання амплітуди крутильних коливань 1.22 %, що задовільняє умовам технічного завдання.

Складовими загальної похибки вимірювання зведеного моменту інерції ротору є: похибка вимірювання маси; похибка вимірювання радіального зміщення; похибка вимірювання амплітуди крутильних коливань. Загальна похибка вимірювання зведеного моменту інерції є функцією вище названих величин. Маса ротора є паспортною величиною і відома з високою точністю, тому вважаємо, що похибка вимірювання маси не впливає на результат вимірювання зведеного моменту інерції. Похибка вимірювання радіального зміщення складається з похибки вимірювання ексцентриситету маси, резонансної частоти системи, похибки вимірювання кутової швидкості, наближеністю розрахункового виразу, похибки, що зумовлена вібраціями та інших, серед яких неможливо виділити домінуючу складову. Це дає можливість вважати, що загальна похибка розподілена за нормальним законом. При багаторазових вимірюваннях з усередненням цю похибку можна суттєво зменшити. Припустимо, що вона дуже мала у порівнянні з похибкою вимірювання радіального зміщення, що нею можна знехтувати. Позначимо через Δe абсолютну похибку вимірювання радіального зміщення ротора, тоді

$$J + \delta_J = m(e + \Delta e)^2 \left(1 + \frac{1}{4A_\phi} \right), \quad (5.3)$$

де δ_J - абсолютна похибка вимірювання моменту інерції ротору. Після нескладних перетворень отримуємо

$$\delta_J = m(2 \cdot e \cdot \Delta e + \Delta e^2) \left(1 + \frac{1}{4A_\phi} \right). \quad (5.4)$$

Квадрат похибки вимірювання радіального зміщення є малою величиною другого порядку, тобто $2 \cdot e \cdot \Delta e \gg \Delta e^2$. Це дає можливість записати вираз для похибки вимірювання моменту інерції

$$\delta_J \approx 2 \cdot m \cdot e \cdot \Delta e \cdot \left(1 + \frac{1}{4A_\phi} \right). \quad (5.5)$$

Похибка вимірювання радіального зміщення не перевищує 5%, тобто можна записати

$$\Delta e_{\text{MAX}} = 0.05 \cdot e, \quad (5.6)$$

де Δe_{MAX} - максимальне значення похибки вимірювання радіального зміщення.

Після перетворень отримуємо

$$\delta_{J_{\text{MAX}}} \approx 0.1 \cdot m \cdot e^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{4A_\phi}\right) = 0.1 \cdot J, \quad (5.7)$$

де $\delta_{J_{\text{MAX}}}$ - максимальне значення похибки вимірювання моменту інерції.

З виразу (5.7) слідує, що похибка вимірювання моменту інерції не перевищує 10 %, що задовільняє умовам технічного завдання.

Результуюча похибка дискретного вимірювання швидкості обертання має наступні складові: методична похибка; похибка інтерполяції; похибка, що зумовлена похибкою одного відліку; похибка, що зумовлена випадковими завадами та неточністю виконання модулятора та діафрагми. Методична похибка вимірювання кутової швидкості в момент t_i визначається виразом

$$\delta_{\omega M}(t_i) = \frac{\varphi(t_i) - \varphi(t_i - T_B)}{T_B} - \varphi'(t_i) = \frac{\Delta\varphi(t_i)}{T_B} - \varphi'(t_i), \quad (5.8)$$

де T_B - час між відліками вихідного сигналу сенсора; $\varphi(t_i), \varphi(t_i - T_B)$ - значення кута повороту в моменти часу t_i та $t_i - T_B$.

Максимальна оцінка методичної похибки вимірювання

$$|\delta_{\omega M}(t_i)| \leq \max_{[t_{i-1}, t_i]} |\varphi''(t)| \frac{T_B}{2} = |\varepsilon_{\text{MAX}}| \frac{T_B}{2}, \quad (5.9)$$

де ε_{MAX} - максимальне значення другої похідної вихідного сигналу сенсора на інтервалі диференціювання, виражене у одиницях кутового прискорення. Значення ε_{MAX} зумовлене не тільки режимом роботи електродвигуна, а і імпульсними завадами у вихідному сигналі сенсора

$$\varepsilon_{\text{MAX}} = K_\phi \max_{[t_{i-1}, t_i]} |U''(t)|, \quad (5.10)$$

Середньоквадратичне відхилення методичної похибки

$$\sigma_{\omega M} = \frac{T_B}{2} |\varepsilon_{\text{MAX}}|. \quad (5.11)$$

Значний внесок в загальну похибку вимірювання кутової швидкості вносить складова, яка зумовлена квантуванням вихідного сигналу перетворювача, її середньоквадратичне значення визначається виразом

$$\sigma_{\omega D} = \frac{2\pi - \beta}{\sqrt{62^n T_B}}. \quad (5.12)$$

Випадкова похибка вимірювання швидкості обертання виникає під впливом випадкових завад та неточності виконання прорізів модулятора і діафрагми. Завада на вході диференціатору першого типу є стаціонарною випадковою функцією. Методична похибка визначення швидкості обертання та похибка квантування відсутні.

В силу стаціонарності, середньоквадратичне значення похибки вимірювання швидкості обертання, що зумовлена випадковими завадами та неточністю виконання модулятора та діафрагми

$$\sigma_{\omega U} = \sqrt{2} \sigma_U / T_B. \quad (5.13)$$

Середньоквадратичне відхилення загальної похибки вимірювання швидкості обертання знаходиться з виразу

$$\sigma_{\omega} = \sqrt{\sigma_{\omega M}^2 + \sigma_{\omega D}^2 + \sigma_{\omega U}^2} = \sqrt{\left(\frac{T_B}{2} |\varepsilon_{MAX}| \right)^2 + \left(\frac{2\pi - \beta}{\sqrt{62^n T_B}} \right)^2 + 2 \left(\frac{\sigma_U}{T_B}\right)^2}. \quad (5.14)$$

Провівши розрахунок за виразом (5.14) для вказаного у технічному завданні діапазоні зміни кутової швидкості при вимірюванні середнього та миттєвого її значення встановлено, що похибка вимірювання середнього значення кутової швидкості складає 0,81%, миттєвого значення кутової швидкості – 1,56%, що задовільняє умовам технічного завдання.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

6.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з

газомагнітним підвісом ротора» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 6.1 та 6.2.

Таблиця 6.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	61	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	58	0	57
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0

Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		58,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 6.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	0	62	60
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	58	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	60,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [23]

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (6.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 58,7, k_{\text{теор}} = 60,0$ балів;

$0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 58,7 + 0,4 \cdot 60,00 = 59,20 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора», даний рівень становить 59,20 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

6.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [23]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (6.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=24$ дні.

$$Z_o = 14530,00 \cdot 17 / 24 = 10292,08 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Науковий керівник дослідної роботи	14530,00	605,42	17	10292,08
Інженер-конструктор інформаційно-вимірювальної техніки 1-ї категорії	14125,00	588,54	17	10005,21
Науковий співробітник	14100,00	587,50	3	1762,50
Лаборант	6860,00	285,83	5	1429,17
Всього				23488,96

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (6.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (6.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [23];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 24$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,65 / (24 \cdot 8) = 63,34 \text{ (грн)}.$$

$$Z_{p1} = 63,34 \cdot 7,50 = 475,02 \text{ (грн)}.$$

Таблиця 6.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочих місць інженерів-дослідників	7,50	2	1,10	63,34	475,02
Монтаж обладнання для проведення експерименту	16,00	4	1,50	86,37	1381,88
Встановлення обчислювального обладнання	12,00	3	1,35	77,73	932,77
Інсталяція програмного забезпечення	4,50	5	1,70	97,88	440,47
Формування (введення) бази даних дослідження моделі електродвигуна	23,00	4	1,50	86,37	1986,45
Контроль за проведенням експериментів	15,00	5	1,70	97,88	1468,24
Всього					6684,82

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (6.5)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доп}} = (23488,96 + 6684,82) \cdot 11 / 100\% = 3319,12 \text{ (грн)}.$$

6.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{доо}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (6.6)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (23488,96 + 6684,82 + 3319,12) \cdot 22 / 100\% = 7368,44 \text{ (грн)}.$$

6.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Інформаційно-вимірвальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\epsilon j}, \quad (6.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

V_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 2,0 \cdot 270,00 \cdot 1,11 - 0 \cdot 0 = 599,40 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 6.6.

Таблиця 6.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір Офісний А4 500	270,00	2,0	0	0	599,40
Папір для записів А4 250	144,00	3,0	0	0	479,52
Органайзер офісний	183,00	2,0	0	0	406,26
Канцелярське приладдя	202,00	3,0	0	0	672,66
Картридж для принтера	967,00	1,0	0	0	1073,37
Диск оптичний CD-R	23,00	1,0	0	0	25,53
Flesh-пам'ять 32 GB	596,00	1,0	0	0	661,56
Всього					3918,30

6.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (6.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_6 = 1 \cdot 5820,00 \cdot 1,12 = 6518,40 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Імітатор електродвигуна з газоманітним підвісом ротора	1	5820,00	6518,40
Система інтерфейсів	2	1680,00	3763,20
Всього			10281,60

6.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (6.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$V_{\text{спец}} = 7960,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 8915,20 \text{ (грн)}.$$

Отримані результати зведемо до табл. 6.8.

Таблиця 6.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Мультиметр UNI-T UT55	1	7960,00	8915,20
Паяльна станція Раче ST-90	1	1825,00	2044,00
Ноутбук HP EliteBook 820	1	27894,00	31241,28
Всього			42200,48

6.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$V_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (6.10)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{прз} = 9680,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 10841,60 \text{ (грн)}.$$

Отримані результати зведемо до табл. 6.9.

Таблиця 6.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Прикладне програмне забезпечення PCAD 2000 Schematic	1	9680,00	10841,60
Прикладне програмне забезпечення PCAD 2000 PCB	1	8350,00	9352,00
Програмне забезпечення розробки Jar C++	1	6730,00	7537,60
Програмне забезпечення розробки Maple V Release 5	1	8180,00	9161,60
Всього			36892,80

6.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{е}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (6.11)$$

де $Ц_{б}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

T_e – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (8420,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 233,89 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 6.10.

Таблиця 6.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
ОС Windows	8420,00	3	1	233,89
Прикладний пакет Microsoft Office	7350,00	3	1	204,17
Осцилограф С1-114/1	7690,00	5	1	128,17
Метрологічний комплекс CJ500-А	12860,00	5	1	214,33
Приміщення лабораторії досліджень	468000,00	25	1	1560,00
Робоче місце інженера-конструктора	8320,00	7	1	99,05
Пристрій виводу графічної інформації (плотер)	12850,00	5	1	214,17
ЕОМ для формування та дослідження моделей (КОМП'ЮТЕР VINGA WOLVERINE A5257 (I5M16G1650.A5257))	27890,00	4	1	581,04
Всього				3234,81

6.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (6.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 6,20$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$V_e = 1,20 \cdot 60,0 \cdot 6,20 \cdot 0,95 / 0,97 = 446,40 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 6.11.

Таблиця 6.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Імітатор електродвигуна з газоманітним підвісом ротора	1,20	60,0	446,40
Мультиметр UNI-T UT55	0,01	60,0	3,72
Паяльна станція Раче ST-90	0,06	4,0	1,49
Ноутбук HP EliteBook 820	0,04	120,0	29,76
Осцилограф С1-114/1	0,12	60,0	44,64
Метрологічний комплекс CJ500-A	0,36	60,0	133,92
Робоче місце інженера-конструктора	0,15	120,0	111,60
Пристрій виводу графічної інформації (плотер)	0,22	5,0	6,82
ЕОМ для формування та дослідження моделей (КОМП'ЮТЕР VINGA WOLVERINE A5257 (I5M16G1650.A5257))	0,25	120,0	186,00
Всього			964,35

6.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (6.13)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 25\%$.

$$B_{cv} = (23488,96 + 6684,82) \cdot 25 / 100\% = 7543,44 \text{ (грн)}.$$

6.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (6.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 40\%$.

$$B_{cn} = (23488,96 + 6684,82) \cdot 40 / 100\% = 12069,51 \text{ (грн)}.$$

6.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{в}}}{100\%}, \quad (6.15)$$

де $H_{\text{в}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{\text{в}} = 75\%$.

$$I_{\text{в}} = (23488,96 + 6684,82) \cdot 75 / 100\% = 22630,33 \text{ (грн)}.$$

6.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (6.16)$$

де $H_{\text{нзв}}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{\text{нзв}} = 130\%$.

$$B_{\text{нзв}} = (23488,96 + 6684,82) \cdot 130 / 100\% = 39225,91 \text{ (грн)}.$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_v + B_{стел} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (6.17)$$

$$B_{заг} = 23488,96 + 6684,82 + 3319,12 + 7368,436745 + 3918,30 + 10281,60 + 42200,48 + 36892,80 + 3234,81 + 964,35 + 7543,44 + 12069,51 + 22630,33 + 39225,91 = 219822,87 \text{ (грн)}.$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (6.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,9$.

$$ZB = 219822,87 / 0,9 = 244247,64 \text{ (грн)}.$$

6.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (6.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 3$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 244247,64$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [23].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 3 / 244,2 \cdot 0,08 = 18,87.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора» складають 244247,64 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень науково-економічного ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено інформаційно-вимірювальну систему параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора. Розроблена система дозволяє проводити вимірювання середнього і миттєвого значення кутової швидкості, приведенного моменту інерції, амплітуди крутильних коливань, струму споживання, напруги живлення. Інформаційно-вимірювальна система забезпечує представлення вимірюваної інформації у вигляді числового та графічного подання на екран монітора персонального комп'ютера.

У першому розділі проведено аналіз стану проблеми та завдань дослідження, здійснено огляд існуючих електродвигунів з безконтактним підвісом ротора, обрано об'єкт вимірювання, проведено аналіз математичної моделі електродвигуна з газоманітним підвісом ротора, сформульовані задачі дослідження.

У другому розділі проведено огляд способів вимірювання параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора, визначено особливості вимірювання кутової швидкості обертання ротора, вимірювання моменту інерції ротора, вимірювання механічної характеристики, вимірювання динамічного моменту, вимірювання змінного струму живлення електродвигуна, вимірювання змінної напруги живлення електродвигуна.

У третьому розділі проведено обґрунтування обраних методів вимірювання та розроблено електричні схеми системи, розроблено спосіб критеріального оцінювання стану електродвигуна з газоманітним підвісом, запропоновано спосіб вимірювання середнього значення кутової швидкості з використанням вагових функцій та спосіб вимірювання моменту інерції ротора за амплітудою крутильних коливань, розроблено електричні схеми інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора та креслення її зовнішнього вигляду.

У четвертому розділі розроблено схему програми мікроконтролера, який входить до складу інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора, та програмне забезпечення на мові програмування C++.

У п'ятому розділі розраховано похибку вимірювання зведеного моменту інерції ротору, похибку вимірювання кутової швидкості та інших характеристик електродвигуна з газоманітним підвісом ротора.

Також, у шостому розділі магістерській кваліфікаційній роботі розраховано економічну ефективність від впровадження системи у виробництво. На основі порівняння системи з існуючими аналогами доведено її перевагу над ними.

Розроблена інформаційно-вимірювальна система має широкі межі застосування у промисловому виробництві та наукових дослідженнях. Умови технічного завдання виконані повністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пінегін С.В., Табачніков Ю.Б., Сіпенков І.Є. Статичні і динамічні характеристики газостатичних опор. – К.: Наука, 1982. – 265 с.
2. Шнайдер А.Г., Сокол В.М. Порівняльні характеристики безконтактних опор для електромашинобудування // Вісник машинобудування. – 1987. – № 7. – С. 18-22.
3. Сокол В.М., Шнайдер А.Г., Толкачов Э.А. Газомагнітний підвіс ротора мотор-підшипників как саморегульована система // Технічна електродинаміка. – 1992. – № 5. – С. 48-55.
4. Оптимальні системи керування електроприводами / Б.І.Кузнецов, І.М.Богаєнко, М.О.Рюмшин та інші / за ред. Б.І.Кузнецова, І.М.Богаєнко. – К.: Вища школа, 1995. – 210 с.
5. Копилов І.П. Математичне моделювання електричних машин. – К.: Вища школа, 1987.
6. Гольдберг О.Д. Випробування електричних машин: Підр. для вузів за спец. “Електромеханіка”. – К.: Вища школа, 1990. – 225 с.
7. Дудикевич В.Б. Нелінійні наближення з інтерполюванням для число-імпульсних вимірювальних перетворювачів // Міжнародний НТ збірник “Вимірювальна техніка та метрологія”. – 1995. – вип. 51. – С. 8-10.
8. Sunderland L.D., Arthur E.F., Solid State Angular Rate Sensor (VYRO). AIAA Guidance and Control Conference, Danvers, Mass, Collection technical papers, 1980. P. 183-187.
9. Sebastian S. Analysis of Conical Aerostatic Bearing. - In.: Paper Presented at 8-th International Gas Bearing Symposium. BRNA, Fluid Engineering, Granfield, U.K., April 1981, Paper 18, p. 236-250.
10. Сокол В.М., Кулаков П.І., Поджаренко А.В. Коливання конічного гістерезисного ротора в газомагнітній опорі // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – №3.

11. Поджаренко В.О., Михалевич В.М., Кулаков П.І. До питання вибору форми модулятора тахометричного перетворювача // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1988. – №1. – С. 12-18.
12. Поджаренко В.О., Кулаков П.І. Сучасний стан та перспективи розвитку цифрових тахометрів // “Контроль і управління в технічних системах”. Матеріалами четвертої міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця. – 1997. – С. 49-55.
13. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., та інш. Пристрій для вимірювання і контролю кутової швидкості та кута повороту // “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – 1998. – №2. – С. 45-50.
14. Шрюфер Е. Обробка сигналів: цифрова обробка дискретизованих сигналів / За ред В.П.Бабака. – К.: Либідь, 1992. – 296 с.
15. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Поджаренко А.В Цифровий тахометричний перетворювач із змінною розрізнявальною здатністю // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1998. – Випуск 53. – С. 84-90.
16. Пристрої вимірювання та контролю характеристик електричних машин з газоманітним підвісом / Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Войтович О.П. та інші. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.- 154 с.
17. Оптимальні системи керування електроприводами / Б.І.Кузнецов, І.М.Богаєнко, М.О.Рюмшин та інші / за ред. Б.І.Кузнецова, І.М.Богаєнко. – К.: Вища школа, 1995. – 210 с.
18. Кулаков П. І. Удосконалення математичної моделі сенсора інтенсивності світлового потоку [Електронний ресурс] / П. І. Кулаков, А. П. Кулакова // Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2020), Вінниця, 23-24 березня 2020 р. – Електрон. текст. дані. – 2020. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2020/paper/view/9986/8370>
19. Кучерук, В. Ю. Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора [Електронний ресурс] / В. Ю.

Кучерук, П. І. Кулаков, А. П. Кулакова // Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2022), Вінниця, 31 травня 2022 р. – Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzp/all-frtzp-2022/paper/view/14681/12387>

20. O. Ivanets, I. Morozova, P. Kulakov, V. Kucheruk, A. Kulakova and Y. Moskvichova, "Criterion Assessment of the Probability of Deviation of Objects from the Normal State," 2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/MMA52675.2021.9610867.

21. Kucheruk, V. Yu. Development of the mathematical model of light flux intensity sensor based on the photodiode and operational amplifier / V. Kucheruk, P. Kulakov, Yu. Moskvichova, N. Gadzhula, P. Kissabekova, A. Kulakova, D. Karabekova, A. Khassenov // Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series., ISSN 2518-7198, № 1(97) / 2020, p. 50 – 57, DOI: 10.31489/2020Ph1/50-57;

22. Кучерук, В. Ю. Підхід до критеріального оцінювання ступеню відхилення від норми стану об'єкта / В. Ю. Кучерук, П. І. Кулаков, О. Б. Іванець, А. П. Кулакова // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2020. - № 2. - с. 10 - 15. - DOI: 10.31891/2219-9365-2020-66-2-2

23. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

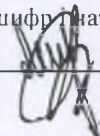
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ГАЗОМАГНІТНИМ ПІДВІСОМ РОТОРА

Виконала: студентка 2-го курсу, групи КІВТ-21м
спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кулакова А.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доц. каф. ІРТС

Маньковська В.С.

(прізвище та ініціали)

«16» 12 2022 р.

Вінниця ВНТУ - 2022 рік

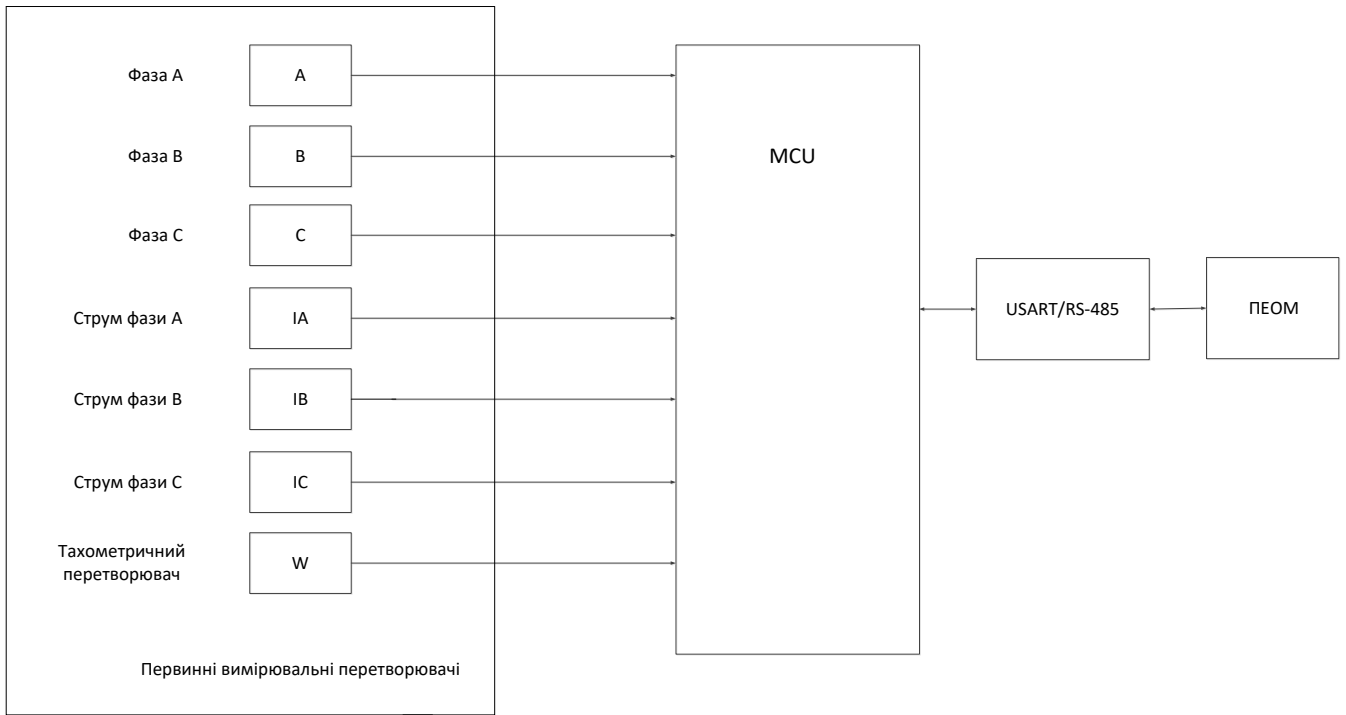


Рисунок 1 – Електрична структурна схема інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора

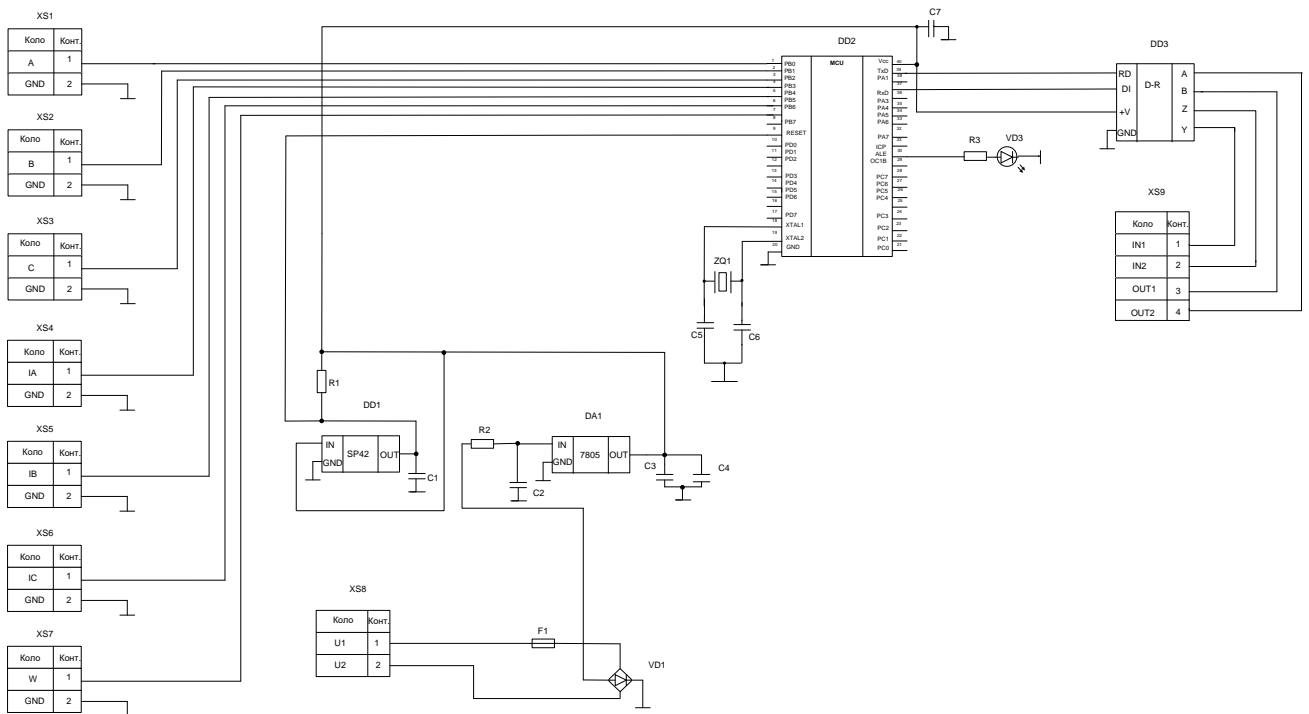


Рисунок 2 – Електрична принципова схема інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора

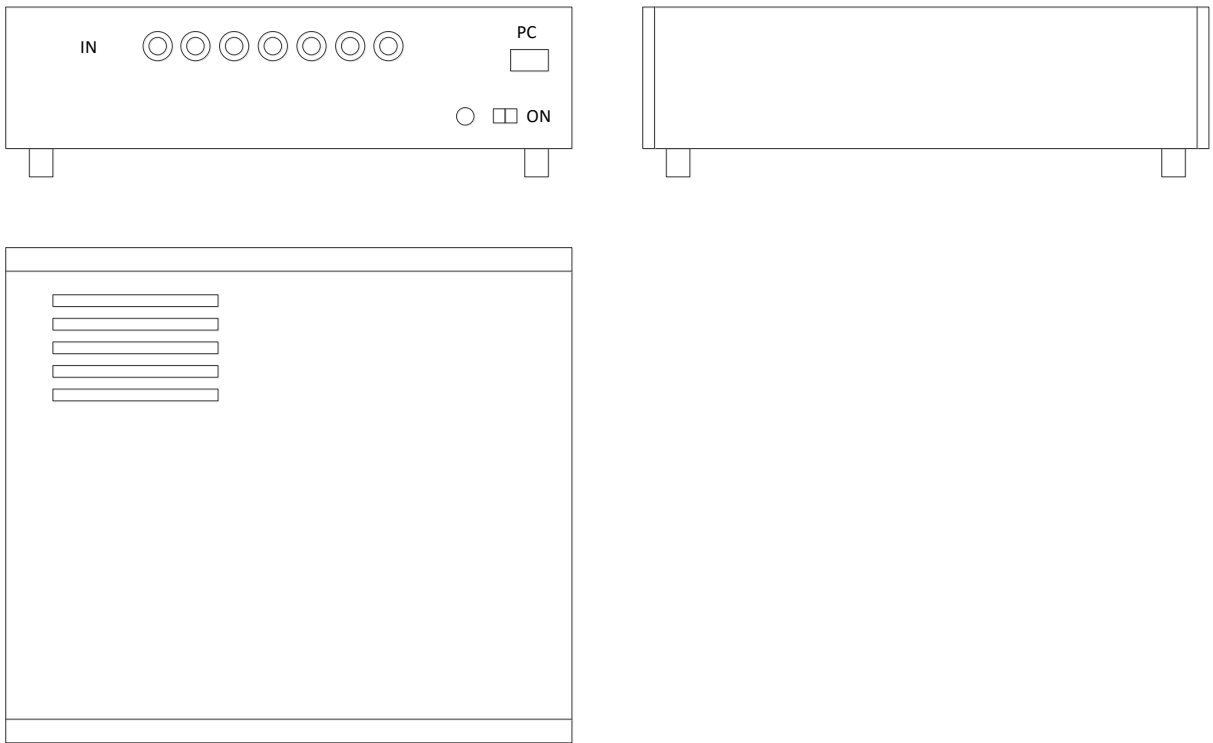


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора

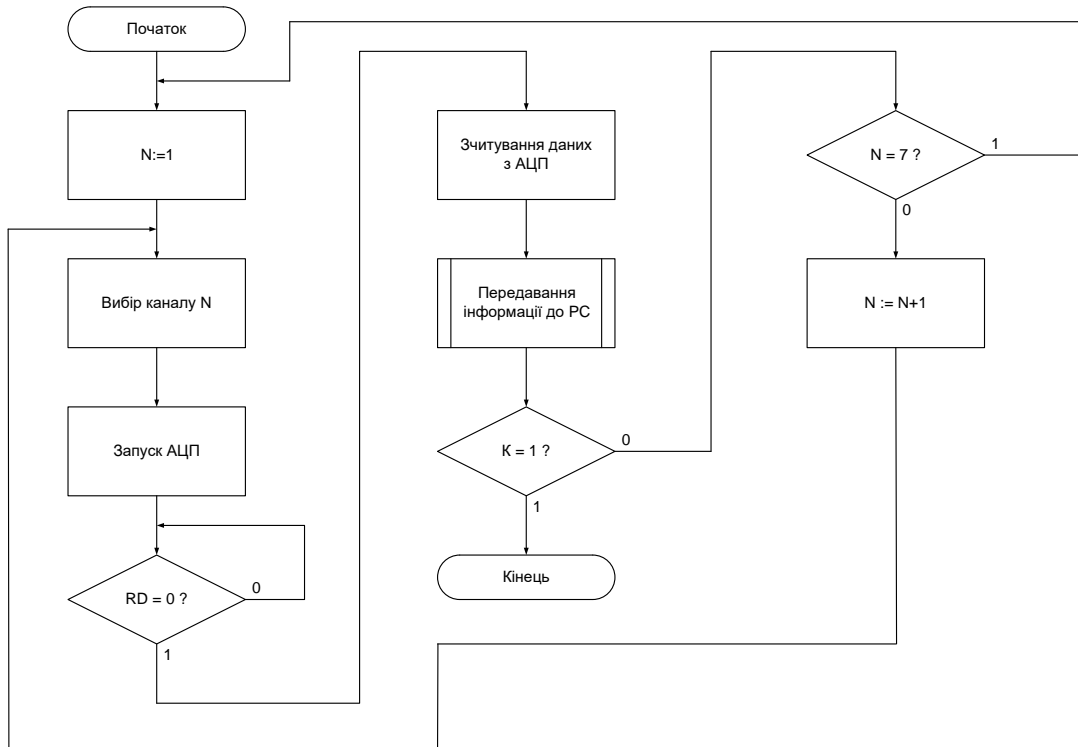


Рисунок 4 – Схема програми інформаційно-вимірювальної системи параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ПАРАМЕТРІВ
ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ГАЗОМАГНІТНИМ ПІДВІСОМ РОТОРА**

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Інформаційно-вимірювальна система параметрів електродвигуна з газоманітним підвісом ротора»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

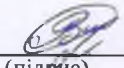
Підрозділ кафедра ІРТС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 93,24% Схожість 6,76%

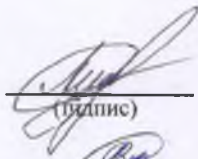
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

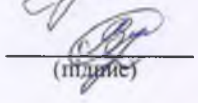
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Маньковська В.С.
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи 
(підпис)

Кулакова А. П.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи 
(підпис)

Маньковська В.С.
(прізвище, ініціали)

Додаток В (довідниковий)

Фрагмент лістингу програмного забезпечення для мікроконтролера.

```
#include <ina90.h>
#define SetBit(Address, Bit) (Address |= (0x01<<Bit))
#define ClearBit(Address, Bit) (Address &= ~(0x01<<Bit))
#define CheckBit(Address, Bit) (Address & (0x01<<Bit))
#define ComparLen 3600
#define TimeReac_30 30
#define TimeReac_60 60
#define _EEPROM_GET(VAR, ADR)
{
    while (EECR & 0x02);
    EEAR = (ADR);
    EECR |= 0x01;
    (VAR) = EEDR;
}
char digit[10] = {
    0xc0, // 0
    0xf9, // 1
    0xa4, // 2
    0xb0, // 3
    0x99, // 4
    0x92, // 5
    0x82, // 6
    0xf8, // 7
    0x80, // 8
    0x90 // 9
};
char Razrad[3] = {
    0xd7, // Razrad 0
    0xdb, // Razrad 1
    0xcf, // Razrad 2
};
char Di0, Di1, Di2, FlagHH, First2Min, Count2Min, Indicator, Delayer;
unsigned int Nx, TimeInt;
void initialization(void) // Initialization
{
    // WDTCR = 0x0f; // Initialize of Watch-Dog Timer
    DDRB = 0x3c; // Set Port B as output
    DDRD = 0xff; // Set Port D as output
    MCUCR = 0x30; // Set sleep mode in MCUCR
    ACSR |= 0x80; // Analog Comparator disable
    Di0 = Di1 = Di2 = TimeInt = First2Min = Count2Min = 0;
    Delayer = 20;
    TIMSK = 0x42; // Set of Timer/Counter Interrupt Mask Register
    TCCR1A &= 0x00; // Configure the Timer/Counter1
    OCR1H = (ComparLen >> 8);
    OCR1L = ComparLen; // 3906 = 1 sec on 4MHz, 3600 = 1 sec on 3.6864MHz
    ClearBit(PORTB, 5);
    TCCR0 = 0x05; // Configure the Timer/Counter0
}
void StartTimer(void)
{
    TCNT1H &= 0x00; // Clear of Timer/Counter1
    TCNT1L &= 0x00; // Clear of Timer/Counter1
    TCCR1B = 0x0d; // set count of CK/1024 and start
```

```

}
void SoftDelay(unsigned int tempD)
{
    unsigned int temp;
    for (temp=0; temp<tempD; temp++);
}
void ClearDisplay(void)
{
    PORTB |= 0x1c;
    PORTD |= 0xff;
}
void DetectLV(void)
{
    if (!CheckBit(PINB, 6))
    {
        EEAR = 0x00;
        EEDR = Nx;
        EECR |= 0x04;
        EECR |= 0x02;
        while (EECR & 0x02);
        EEAR = 0x01;
        EEDR = (Nx>>8);
        EECR |= 0x04;
        EECR |= 0x02;
        while (EECR & 0x02);
        EEAR = 0x02;
        EEDR = FlagHH;
        EECR |= 0x04;
        EECR |= 0x02;
        while (EECR & 0x02);
        _SLEEP();
    }
}
void GET_EEPROM(void)
{
    char NxL, NxH;
    _EEPROM_GET(NxL, 0x00);
    _EEPROM_GET(NxH, 0x01);
    Nx = (NxH << 8) + NxL;
    if (Nx > 999) Nx = 0;
    _EEPROM_GET(FlagHH, 0x02);
    switch (FlagHH)
    {
        case 1: { FlagHH = 2; break; }
        case 2: { FlagHH = 2; break; }
        default: { FlagHH = 0; break; }
    }
}
void PrintDigit(char number, char Adress)
{
    switch (FlagHH)
    {
        case 0: { PORTB = Razrad[Adress]; break; }
        case 1: { PORTB = Razrad[Adress] + Indicator; break; }
        case 2: { PORTB = Razrad[Adress] + 0x20; break; }
    }
    PORTD = digit[number];
}
void PrintLED4_Dig0(void)
{
    PrintDigit(Di0, 0);
    SoftDelay(Delayer);
}

```

```

    ClearDisplay();
}
void PrintLED4_Dig1(void)
{
    PrintDigit(Di1, 1);
    SoftDelay(Delayer);
    ClearDisplay();
}
void PrintLED4_Dig2(void)
{
    PrintDigit(Di2, 2);
    SoftDelay(Delayer);
    ClearDisplay();
}
void ConvertToLED4(unsigned int Meas)
{
    Di0 = Di1 = Di2 = 0;
    while (Meas >= 100) { Meas -= 100; Di2++; }
    while (Meas >= 10) { Meas -= 10; Di1++; }
    Di0 = Meas;
}
void Displayer(void)
{
    DetectLV();
    ConvertToLED4(Nx);
    DetectLV();
    PrintLED4_Dig0();
    DetectLV();
    PrintLED4_Dig1();
    DetectLV();
    if (Di2 != 0) PrintLED4_Dig2();
    DetectLV();
    if (!CheckBit(PINB, 7)) { Nx = FlagHH = Count2Min = First2Min = TimeInt = 0; } // Reset
// _WDR();
}
void main(void)
{
    char DetectorIncr, SetFront;
    int temp;
    initialization();
    DetectorIncr = 0;
    ClearDisplay();
    for (temp=0; temp <= 60; ++temp) SoftDelay(5000);
    GET_EEPROM();
    _SEI();
    StartTimer();
    SetFront = CheckBit(PINB, 0);
    while(1)
    {
        Displayer();
        switch (SetFront)
        {
            case 0:
            {
                if (CheckBit(PINB, 0) == 1)
                {
                    if (DetectorIncr == 0)
                    {
                        for (temp=0; temp <= 600; ++temp) Displayer();
                        if (CheckBit(PINB, 0) == 1)
                        { Nx++; TimeInt = 0; StartTimer(); }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    DetectorIncr = 1;
}
else DetectorIncr = 0;
break;
}
case 1:
{
if (CheckBit(PINB, 0) == 0)
{
if (DetectorIncr == 0)
{
for (temp=0; temp <= 600; ++temp) Displayer();
if (CheckBit(PINB, 0) == 0)
{ Nx++; TimeInt = 0; StartTimer(); }
}
DetectorIncr = 1;
}
else DetectorIncr = 0;
break;
}
}
if (Nx == 1000) Nx = 0;
if ((TimeInt > TimeReac_30) && (First2Min == 1))
{
switch (FlagHH)
{
case 0: {FlagHH = 1; break;}
case 1: {FlagHH = 2; break;}
}
TimeInt = 0;
}
// if ((TimeInt > TimeReac_30) && (FlagHH == 0) && (First2Min == 1)) {FlagHH = 1;TimeInt=0;}
// if ((TimeInt > TimeReac_30) && (FlagHH == 1) && (First2Min == 1)) {FlagHH = 2;TimeInt=0;}
Displayer();
} // While
} // End of main program

```