

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Факультет економіки і підприємництва

Кафедра інформаційних технологій

Допущено до захисту

" _____ " _____ 2023 р.

Зав. кафедри, к.т.н., доцент

_____ Ліщук Р.І.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
БАКАЛАВРА

**Розробка інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з
безконтактним підвісом ротора**

Виконав – студент 4 курсу, групи 41-кн
освітньої програми "Комп'ютерні науки"
спеціальності 122 Комп'ютерні науки

Кожухар Михайло Сергійович

Науковий керівник – д.т.н., професор

Кулаков Павло Ігорович

Умань – 2023

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	10
1.1. Об'єкт та предмет дослідження	10
1.2. Особливості отримання інформації про параметри електродвигуна	12
1.3. Постановка задачі	16
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТЕХНОЛОГІЙ ТА АРХІТЕКТУРА ПІДСИСТЕМИ	17
2.1. Технологія розробки IAR Embedded Workbench.....	17
2.2. Технологія формування даних в підсистемі	21
2.3. Архітектура підсистеми	26
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДСИСТЕМИ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З БЕЗКОНТАКТНИМ ПІДВІСОМ РОТОРА	31
3.1. Розробка програмного забезпечення інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора.....	31
3.2. Розробка програмного забезпечення для пристрою отримання та передачі інформації.....	33
ВИСНОВОК.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	37
ДОДАТОК А.....	39
ДОДАТОК Б	50

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів

ІС	Інформаційна система
ІПС	Інформаційна підсистема
ЕМ	Електрична машина
АСУ	Автоматизована система управління.
БД	База даних.
ПЗ	Програмне забезпечення.
ПД	Програмний додаток.
ПЗП	Постійний запам'ятовуючий пристрій.
RTOS	Операційна система реального часу
ООП	Об'єктно-орієнтоване програмування

Вступ

Отримання високоточної та достовірної інформації про параметри електричних машин (ЕМ) має велике значення не тільки при їх випробуваннях, ремонті або обслуговуванні, а і безпосередньо під час їх функціонування. Це також 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, привідних системах, різних пристроях, що використовуються у побуті, динамічний режим роботи є основним. Особливо велике значення для систем позиціонування має високоточне визначення відхилення швидкості обертання від встановленого значення [2]. Специфічною особливістю контролю параметрів ЕМ є вимога високої точності, в більшості випадків визначення параметрів повинно проводитись з значно більшою точністю, ніж у інших галузях [3]. У теперішній час ця вимога висувається також і до динамічного режиму роботи, обумовлюючи високу швидкодію відповідних засобів. Окрім того, широке застосування математичних моделей ЕМ з метою ідентифікації їх внутрішніх параметрів зумовлює необхідність перевірки їх адекватності та уточнення. Особливо важливим завданням є розробка інформаційних підсистем параметрів ЕМ.

Актуальність

Наразі у промисловому виробництві України майже відсутні інформаційні підсистеми параметрів електродвигунів з безконтактним підвісом ротора, які базуються на сучасних інформаційних технологіях та забезпечують отримання та представлення у необхідному вигляді інформації про параметри таких ЕМ. Актуальність теми бакалаврської кваліфікаційної роботи зумовлена тим, що такі підсистеми дозволяють значно скоротити час при проведенні різноманітних видів випробувань ЕМ та підвищити ефективність їх проведення. Виходячи з вищенаведеного, розробка сучасної інформаційної підсистеми

параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора є актуальним та важливим завданням.

Об’єкт дослідження – процес та концепція побудови інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора.

Предмет дослідження – методи інформатизації підприємств з виробництва, обслуговування та ремонту електродвигунів з безконтактним підвісом ротора.

Мета дослідження

Метою та завданням бакалаврської кваліфікаційної роботи є концептуальна розробка інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора, структурної схеми цієї підсистеми та її компонентів, розробка програмного забезпечення для інформаційної підсистеми та програмного забезпечення мікроконтролерів, які входять до складу окремих компонентів підсистеми.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра був проведений аналіз наукової та технічної літератури, технічної документації, міжнародних стандартів у галузі інформатизації та автоматизації технологічних процесів, а також проведено розробку структурної схеми інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора, розробку структурної схеми її компонентів та програмних модулів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Об'єкт та предмет дослідження

У теперішній час існують наступні типи безконтактних підвісів ротора - газовий, магнітний та газоманітний. Порівняння цих трьох типів підвісів дозволяє оцінити їх недоліки та переваги, визначити перспективність розвитку, обрати об'єкт дослідження [4].

У промисловості широко розповсюджений газовий безконтактний підвіс ротора. Важливою характеристикою безконтактних підвісів є потужність витрат та момент тертя. Витрати на тертя у газовому підвісі виникають внаслідок в'язкості шару газоподібного мастильного матеріалу. Газові підшипники, у яких жорсткість вище ніж у підшипників кочення, поступаються їм у значенні несучої здатності. 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 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 [6]. Слід відзначити, що магнітний підвіс ротора за 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.

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. Швидкохідність магнітної опори, яка перевищує швидкохідність газової опори, обмежена зростаючими з збільшенням швидкості обертання втратами на тертя. Швидкохідність газоманітного підвісу на практиці обмежена механічною міцністю вузлів роторної системи, та може суттєво перевищувати швидкохідність газового або магнітного підвісу [7]. Жорсткість магнітного підвісу поступається жорсткості опор кочення, вона зменшується разом із збільшенням кутової швидкості обертання.

Газоманітний 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 газоманітним підвісом суттєво перевищує аналогічний показник роторних систем з газовим або магнітним підвісом. Важливою особливістю газоманітного підвісу є його здатність до адаптивності демпфуючих властивостей при зміні зовнішнього навантаження. 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. 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]. Це зумовлює перспективність подальшого розвитку газоманітних підвісів [10]. Підприємствами Європейського Союзу, США, деякими компаніями електротехнічної промисловості України випускаються синхронні гістерезисні електродвигуни з газоманітним 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 газоманітним підвісом ротора є електродвигуни з конічним ротором. Ця обставина зумовлена значною стійкістю такого ротора в осевому і радіальному напрямках [11]. В теперішній час для контролю параметрів ЕМ з газоманітним підвісом ротору використовуються традиційні пристрої, що не завжди забезпечує високу вірогідність отримуваної інформації про їх параметри.

1.2 Особливості отримання інформації про параметри електродвигуна

Точне визначення 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.

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. 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.

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 діапазоону вимірювання, електромагнітні амперметри не використовують з шунтами, але використовують з трансформаторами струму. В сучасних інформаційних та 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.

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 перетворювання, тому точність цифрових вольтметрів змінного струму менша, ніж у цифрових вольтметрів постійного струму.

В сучасних інформаційних та 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 інформаційної системи.

1.3 Постановка задачі

Ціллю бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора, розробка програмного забезпечення для цієї підсистеми, програмного забезпечення для мікроконтролера, під управлінням якого працює блок отримання та передачі даних, який входить до складу інформаційної підсистеми. Завданням розробки є створення на концептуальному рівні підсистеми, яка призначена для використання на підприємствах з виготовлення, ремонту та обслуговування електродвигунів, та дозволяє отримувати, зберігати, обробляти та представляти у необхідному вигляді інформацію про середнє і миттєве значення кутової швидкості обертання ротора, зведеного моменту інерції, амплітуди крутильних коливань, струму споживання, напруги живлення. Інформаційна підсистема забезпечує передавання отриманої інформації до персонального комп'ютера та представлення отриманої інформації у числовому та графічному вигляді на екрані монітора.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ТЕХНОЛОГІЙ ТА АРХІТЕКТУРА ПІДСИСТЕМИ

2.1 Технологія розробки IAR Embedded Workbench

Мова програмування C++ програмного пакету IAR Embedded Workbench for AVR використовується для створення програмного забезпечення для мікроконтролерів архітектури AVR компанії Microchip, які керують компонентами інформаційної підсистеми. IAR Embedded Workbench - це інструментарій для розробки вбудованого програмного забезпечення, який надає розробникам інтегроване середовище розробки, що включає компілятор, асемблер, компоновальник і відладчик.

Компілятор IAR C/C++ для AVR - це новітній продукт, який встановлює стандарти мов C і C++ та їх розширення. IAR Assembler для AVR - це макроасемблер з універсальним набором директив і операторів, асемблер має вбудований препроцесор мови програмування C для AVR. Асемблер IAR використовує той самий синтаксис операндів, що і AVR-асемблер Microchip Technology, що спрощує використання та міграцію існуючого коду.

IAR XLINK Linker - це потужний інструмент для розробки додатків для мікроконтролерних систем. Він використовується для компонування невеликих однофайлових програм абсолютного асемблера і для компонування великих програм з динамічними вхідними даними, багатомодульних програм на C/C++ або змішаних програм на C/C++ і асемблері. Для роботи з бібліотеками в комплекті надаються бібліотечні інструменти XAR та XLIB.

Компілятор IAR C/C++ для AVR підтримує :

- C, найбільш розповсюджену мову програмування високого рівня в індустрії мікроконтролерних систем, надає можливість створювати автономні програми, сумісні з наступними стандартами:

- Стандарт C99.
- Стандарт ANSI C.

- C++ - сучасна мова програмування з бібліотеками, придатними для модульного програмування. Можна використовувати будь-який з стандартів IAR Extended Embedded C++, EEC++, EC++ з додатковими можливостями, такими як підтримка шаблонів, нові оператори приведення, стандартна бібліотека шаблонів успадкування, підтримка просторів імен.

Компілятор IAR C/C++ для AVR підтримує усі пристрої на базі фірмового стандарту Microchip Technology AVR; інсталяція продукту IAR включає сконфігуровані файли для підтримки різних моделей мікроконтролерів. Якщо для підтримки моделі мікроконтролера потрібні додаткові файли, їх можна створити за допомогою одного з шаблонів. Стандартні периферійні пристрої визначено у файлах заголовків вводу/виводу для конкретного мікроконтролера з розширенням h. Пакет містить файли заголовків вводу/виводу для багатьох мікроконтролерів, доступних на момент випуску програмного забезпечення. У випадку необхідності додаткових файли заголовків вводу/виводу, їх можна створити за допомогою наданих шаблонів. У каталогах avrconfig та avrsrc містяться готові конфігураційні файли лінкерів для всіх підтримуваних мікроконтролерів. Ці файли мають розширення xcl і містять інформацію, необхідну для роботи лінкера.

Налагоджувач застосовує файли опису мікроконтролера для обробки певних специфічних вимог до пристрою, таких як, наприклад, визначення доступних комірок пам'яті, периферійних регістрів, службових регістрів та їх груп. Ці файли розташовані у каталозі avrconfig і мають розширення ddf. Периферійні регістри та їх групи можуть визначатися в окремому файлі (розширення імені файлу sfr), у цьому випадку вони включаються до файлу ddf.

Вбудоване програмне забезпечення, написане для спеціальних мікроконтролерів, розробляється як нескінченний цикл, який очікує на певну зовнішню подію. Програмне забезпечення знаходиться в постійному запам'ятовуючому пристрої і починає виконуватися після скидання. При

створенні такого програмного забезпечення необхідно врахувати відповідні апаратні і програмні елементи.

Мікроконтролерні системи містять різноманітні типи пам'яті, включаючи оперативну пам'ять, зовнішню DRAM або SRAM, ROM, EEPROM і флеш-пам'ять. Вбудована оперативна пам'ять працює швидше, ніж інші типи пам'яті, і змінні, до яких звертаються в критичних за часом додатках, виграють від розміщення у цій пам'яті. Деякі конфігураційні дані, до яких звертаються рідше, але які повинні зберігатися при вимкненому живленні, необхідно зберігати в EEPROM або флеш-пам'яті. Для ефективного використання пам'яті компілятор забезпечує декілька механізмів керування розміщенням функцій і об'єктів у пам'яті. Якщо до мікроконтролера підключено зовнішні пристрої, може знадобитися ініціалізація та керування інтерфейсом, наприклад, виявлення та обробка зовнішніх сигналів переривань. В більшості випадків їх потрібно ініціалізувати та контролювати під час виконання програми. Найпоширеніший спосіб вирішення цього питання це використовувати спеціальні функціональні регістри. Такі регістри зазвичай доступні за спеціальними адресами і містять біти, які керують налаштуваннями мікроконтролера.

У мікроконтролерних системах використання переривань є способом для негайної обробки зовнішніх подій, таких як, наприклад, визначення того, що була натиснута кнопка. Як правило, коли в коді виникає переривання, мікроконтролер миттєво зупиняє виконання поточної команди і починає виконувати підпрограму обслуговування переривання. Компілятори надають різноманітні примітиви для обробки апаратних та програмних переривань.

У всіх мікроконтролерних системах код запуску системи виконується для ініціалізації апаратного та програмного забезпечення перед викликом основних програмних функцій. Розробники мікроконтролерного програмного забезпечення повинні забезпечити, щоб код запуску був розташований за виділеною адресою пам'яті або доступний за вказівником з векторної таблиці.

Тобто, код запуску і початкові таблиці векторів необхідно розмістити в енергонезалежній пам'яті. Окрім того, усі глобальні змінні повинні бути ініціалізовані в програмі на C/C++, ініціалізація виконується спільно компоновальником та кодом запуску системи.

У багатьох випадках прошивка є єдиним програмним забезпеченням, яке працює в системі, але використання операційної системи реального часу (RTOS) має певні переваги. Наприклад, під час виконання високопріоритетних завдань на них не впливають інші частини програми, що виконуються менш пріоритетні завдання. Як правило, це дозволяє програмам бути більш швидкодіючими, ефективніше використовувати потужність процесорного ядра і знижувати енергоспоживання за рахунок переходу в стан низького енергоспоживання під час простою; використання RTOS полегшує читання і підтримку додатків, а також зменшує їхній розмір. Код додатків незалежний один від одного. Код програми можна чітко розділити на задачі, які не залежать одна від одної. Роботу по розробці можна розділити на окремі завдання, що виконуються одним розробником або групою розробників, що полегшує командну роботу Використання RTOS зменшує апаратну залежність і створює чистий інтерфейс програми, що полегшує перенесення програми на інше обладнання. Вбудоване мікроконтролерне програмне забезпечення зазвичай реалізується у вигляді циклу, який або керується перериванням, або використовує опитування для моніторингу зовнішніх та внутрішніх подій. У системах, керованих перериваннями, вони ініціалізуються на початку виконання основної функції. У системах, що працюють у режимі реального часу, де час відгуку є критично важливим, може знадобитися багатозадачна система. Тобто, програмне забезпечення має бути доповнене операційною системою реального часу. У цьому випадку RTOS і різні завдання також повинні бути ініціалізовані на початку основної функції.

2.2. Технологія формування даних в підсистемі

Об'єктно-орієнтоване програмування - парадигма програмування, в якій основними концепціями є поняття об'єктів і класів. У центрі ООП знаходиться поняття об'єкта [12]. ООП має три основні складові - наслідування, інкапсуляція та поліморфізм. Наслідування – це механізм, який дозволяє класам нащадкам успадковувати поля класів предків, приклад лістингу зразка наслідування наведено нижче.

```
public class Base
{
    public int id { get; set; }
    public string name { get; set; }
    public int size { get; set; }
    public List<Size> sizes { get; set; }
}

public class BaseImage:Base
{
    public string img { get; set; }
    public int width { get; set; }
    public int height { get; set; }
}
```

Клас BaseImage наслідується від класу Base. Це означає, що у класі BaseImage є всі полі класу Base, окрім тих, що відмічені модифікатором доступу private.

Інкапсуляція – це механізм ООП, що дозволяє знизити зв'язність об'єктів. За концепцією ООП доступ напряму до полів об'єкту заборонений і потрібно працювати лише з публічними методами. Це дозволяє контролювати поля, їх стан та не допускати невірних значень (наприклад це дозволяє підтримувати значення температури меншим, ніж абсолютний мінімум), проте це нерідко

створює проблеми і програмісти нерідко нехтують цим правилом. Інкапсуляція забезпечується модифікаторами доступу. Існує п'ять модифікаторів доступу:

- public - доступ можливий звідки завгодно;
- private - доступ лише в межах даного класу;
- protected - доступ з поточного чи наслідуваного класу;
- internal - доступ з поточної збірки;
- protected internal - доступ з поточної збірки та наслідуваних класів;
- private protected - лише наслідувані класи з поточної збірки.

Поліморфізм є одним з базових понять ООП, суть якого в тому, що один і той же фрагмент коду може працювати з різними типами даних. До поліморфізму включають перевантаження методів, конструкторів та операторів, явне та неявне приведення типів, проте основну його суть забезпечують абстрактні класи та віртуальні методи. Нижче на лістингу наведено абстрактний клас.

```
abstract class BaseClass
{
protected int _x = 100;
protected int _y = 150;
public abstract void AbstractMethod();
public abstract int X { get; }
public abstract int Y { get; }
}
class DerivedClass : BaseClass
{
public override void AbstractMethod()
{
_x++;
_y++;
}
```

```

public override int X
{
    get
    {
        return _x + 10;
    }
}

```

Абстрактний клас - це базовий клас, від якого не можна створити екземпляр. Проте від нього можна успадковувати та перевизначати методи. Для перевизначення методів використовують ключове слово `override`. Віртуальні методи - це методи, які мусять бути присутні у наслідуваних класах. На лістингу нижче наведено роботу з віртуальними методами

```

class Person
{
    public string Name { get; set; }
    public Pers(string name)
    {
        Name = name;
    }
    public virtual void Print()
    {
        Console.WriteLine(Name);
    }
}

class Employee : Pers
{
    public string Comp { get; set; }
    public Empl(string name, string company) : base(name)
    {
        Company = company;
    }
}

```

```

}
}
Person bob = new Pers("Bob");
bob.Print();
Employee tom = new Empl("Tom", "Microsoft");
tom.Print();

```

Також віртуальні методи можна перевизначити. Для цього використовують ключове слово `override`.

Для формування файлів даних, які отримуються за допомогою інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора, необхідно використати формати JSON та XML. JSON і XML являють собою текстові формати, доступні для читання, з підтримкою створення, читання та декодування в реальних додатках [13]. Оба є ієрархічними та незалежними від мов текстових позначок для обміну даними. Незважаючи на загальні риси, вони відрізняються в багатьох аспектах, таких як типи даних, багатослів'я, стек інструментів і т. д. Хоча XML є текстовим мовним розділом, який спеціалізується на бізнес-трансляції у інтернеті, JSON – це легкий формат відкритого стандарту для обміну даними, який розширюється за допомогою JavaScript. XML розшифровується як «розширена мова розмітки», а json – це «нотація об'єктів JavaScript», який є підмножиною синтаксису мови JavaScript і є повністю незалежним від мови.

XML (скорочення Extensive Markup Language) – це текстовий формат даних, отриманий з SGML (ISO 8879) і написаний аналогічним чином, за яким слідує HTML. Формат XML існує вже багато років і був насамперед розроблений для вирішення завдань великомасштабних електронних публікацій. Те, що він робить - це аутсорсингові дані. Він зберігає дані в текстовому форматі, а не інтегрує їх у HTML-документ, що робить його ідеальним для представлення ієрархічних даних, таких як документи, транзакції, рахунки-фактури, книги та багато іншого. Це незалежний обмін

даними у форматі, який кодує документи у форматі, який є машиночитаним та легкочитаним. Це гнучкий спосіб створення інформаційних форматів та спільного використання структурованих даних у World Wide Web. Це насправді підмножина мови sgml (Стандартна узагальнена мова розмітки), схожа на HTML, яка містить розмітку символів, щоб описати зміст сторінки, що дозволяє користувачам визначати свої власні мови розмітки. Основна перевага XML - він незалежний від платформи, що означає, що користувачі можуть отримувати дані з інших програм, таких як SQL і конвертувати їх у XML, потім обмінюватися даними з іншими платформами. Простіше кажучи, це документально-орієнтована технологія, яка забезпечує можливість зберігання та відображення даних як у машино-читаному, так і в людино-читаному форматі. Це більше схоже на мета-мову не властиву семантиці, що робить її ідеальним форматом для створення спеціальних даних та документування інформаційних форматів.

JSON (скорочення від JavaScript Object Notation) є ще одним текстовим форматом обміну даними, який використовує текстові та числові типи даних для представлення об'єктів. Це формат відкритого стандарту, що базується на підмножині мови програмування JavaScript і повністю не залежить від мови. Це спосіб передачі об'єктів даних, що складаються з масивів типу даних та пар атрибут-значення між сервером та веб-браузером. Він використовує формат, що легко читати, для представлення простих структур даних у веб-додатках на основі коду. Завдяки своїй гнучкості JSON краще підходить для обміну даними між веб-додатками та веб-сервісами. В якості мови розмітки XML тільки додає додаткову інформацію в простий текст, тоді як JSON, як випливає з назви, є способом представлення даних. Він також використовується в настільних та серверних середовищах програмування. На відміну від XML, JSON використовує простий підхід для представлення структурних даних без складної нотації та алгоритмів, а також його легко освоїти, що робить його ідеальним способом створення більш інтерактивних сторінок. Синтаксис XML

не містить семантики, але він багатослівний, що означає, що його складність ускладнює використання кожної програми. XML був розроблений для підвищення зручності читання, але не для ефективності. Синтаксис JSON набагато компактніший із встановленою семантикою, що робить його кращим форматом даних у порівнянні з XML. XML - це спрощена версія SGML, що використовується для зберігання та представлення структурованих даних у форматі, який є машино зчитуваним та легкочитаним. Він призначений для підвищення зручності читання, оскільки це мова розмітки, який додає додаткову інформацію в звичайний текст. JSON, з іншого боку, є легким форматом обміну даними, що використовується для представлення ієрархічних даних, і заснований на синтаксисі об'єкта JavaScript.

Хоча JSON та XML є двома найбільш популярними форматами файлів для обміну даними, вони служать для різних цілей. Обидва текстові формати для читання людиною з добре документованими відкритими стандартами в World Wide Web. Однією з фундаментальних відмінностей між ними є те, що JSON орієнтований на дані, тоді як XML документований. Обидва вони прості та зрозумілі і не залежать від мови, і кожен із них краще підходить для різних завдань. Простіше кажучи, XML - це всього лише мова розмітки, яка використовується для додавання додаткової інформації у звичайний текст, тоді як JSON - це ефективний спосіб представлення структурованих даних у легкочитаному форматі.

2.3. Архітектура підсистеми

Розроблена в процесі виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи архітектура інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора наведена на рис. 1.

Інформаційна підсистема параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора, що розробляється, призначена в тому числі для отримання високоточної інформації про кутову швидкість та інші параметри обертального

руху ротора електродвигуна з безконтактним підвісом у динамічному і статичному режимах. Тобто підсистема 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.

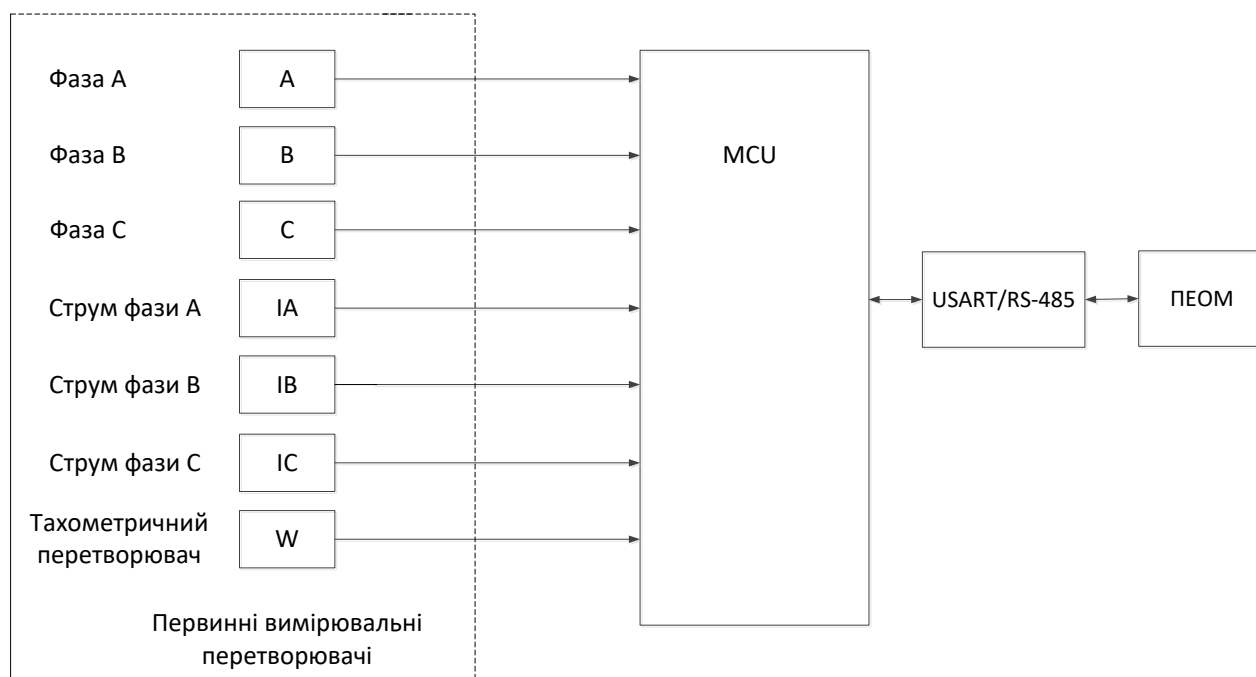


Рисунок 2.1 – Архітектура інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора

Спряження каналу отримання інформації про параметри електродвигуна з без каналу отримання інформації про кутову швидкість і момент інерції включає в себе конструктивне, електричне і алгоритмічне спряження з системним каналом мікроконтролера. Швидкодія каналу визначає вибір режиму обміну : програмний, переривання чи захват. Для вирішення задачі спряження необхідна конструктивна, схемотехнічна та алгоритмічна сумісність.

Алгоритмічна сумісність є найбільш суттєвою вимогою, оскільки вона визначає стратегію обміну між каналами, що з'єднуються. Існує три способи ініціювання передачі даних та керування цим процесом : програмно керуємий ввід - вивід; ввід - вивід по перериванню; режим прямого доступу в пам'ять. Перші два режими можуть бути реалізовані по принципу адресування пам'яті чи порту. Більше поширення набув метод, при якому порт з'єднується так, що звернення до нього здійснюється спеціальними командами. Існує два типи програмно-керуємого вводу: з умовним та безумовним переходом. При безумовній передачі обмін даними з портом здійснюється без попереднього опиту готовності порту приймати дані. Даний тип обміну має ряд недоліків: відсутність синхронізації роботи порта і процесора; надмірність звертання процесора до порта; низька продуктивність процесора. Для усунення цих недоліків використовують умовну передачу.

При умовному обміні до початку читання даних із порту здійснюється безумовна передача інформації стану каналу. Головна задача механізму переривання полягає в наданні процесору ефективного засобу для швидкого відгуку на непередбачену подію, якою є сигнал закінчення перетворення аналого-цифрового перетворювача. Внаслідок того, що крок дискретизації значно більший за час обробки переривання, він не буде значно впливати на похибку вимірювання. Тому в даному випадку доцільно використати саме такий механізм. Використання прямого доступу у пам'ять у даному випадку недоцільне, тому як нема необхідності у максимально швидкій обробці інформації.

Схемотехнічна сумісність - це сумісність по рівням системного і вимірювального каналу; забезпечення навантажувальної здатності системного каналу; вибір адресного простору. Сумісність по рівням і навантажувальна здатність реалізуються шляхом буферизації шин: адреси, даних і керування. Як правило, розробник повинен здійснювати розрахунок навантаження, щоб отримати її точне значення для конкретного вимірювального каналу. На

практиці, однак, користуються наступними емпіричними правилами. По-перше, ніколи не підключають n-канальні мікросхеми безпосередньо до системного каналу. Ці мікросхеми мають низьку навантажувальну здатність і не витримують дії негативних викидів. По-друге, не належить навантажувати ніяку сигнальну лінію більш ніж двома логічними входами. По-третє, довжина сигнальних ліній на платі вимірювального каналу має бути мінімальною. Збільшення довжини ліній додатково вводить в їх еквівалентне навантаження ємнісну складову, що приводить до спотворення шинних сигналів і їх запізненню. Отже, поблизу системного каналу необхідно розміщувати схеми сигнальних буферів.

Вищенаведене зумовлює необхідність реалізації інформаційної підсистеми у ПІ. Після аналого-цифрового перетворення та первинної обробки даних результати передаються до персонального комп'ютера, де здійснюється остаточна обробка отриманої інформації та її візуалізація.

Вихідні сигнали первинних вимірювальних перетворювачів параметрів електродвигуна надходять 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 вихідного сигналу генератора відомий, можливо забезпечити вимірювання залежностей параметрів електродвигуна від часу.

До складу інформаційної підсистеми, що розробляється, входить первинний та вторинний сигнали перетворювача визначається кутова швидкість, як миттєве її значення, так і середнє. Аналогові диференціатори мають доволі велику похибку та невеликий частотний діапазон. Виходячи з цього, доцільно застосувати цифрове диференціювання вихідного сигналу сенсора кутової швидкості.

Амплітуда крутильних коливань, яка необхідна для визначення значення прискорення та швидкості 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 безконтактним підвісом ротора мають виключно трифазне живлення, це обумовлює наявність шістьох каналів отримання інформації про ці параметри. Загальна кількість каналів отримання інформації інформаційній підсистемі, що розробляється, дорівнює сім.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДСИСТЕМИ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З БЕЗКОНТАКТНИМ ПІДВІСОМ РОТОРА

3.1. Розробка програмного забезпечення інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора

Розробка алгоритмічного і програмного забезпечення при вирішенні завдань проектування інформаційних підсистем починається після завершення розробки її архітектури. З метою створення алгоритму роботи інформаційної

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

Програмне забезпечення, під керуванням якого працює інформаційна підсистема параметрів електродвигуна з безконтактним 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 [14]. Наявність системи меню забезпечує вибір один з двох режимів роботи: побудова швидкісних діаграм; отримання інформації про параметри електродвигуна з безконтактним 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. Нижче наведений фрагмент лістингу програми, яка встановлюється на персональному комп'ютері, що входить до складу інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора.

```
using Microsoft.Win32;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows;
using System.Windows.Data;
using System.Windows.Documents;
using System.Windows.Input;
namespace PipeConstructor
{
    public partial class WindowPipe : Window
    {
        public bool isNew;
```

```

public DataBase db;
public Core core = new Core();
public Pipe pipe;
public WindowPipe()
{
InitializeComponent();
}
private void Grid_Loaded(object sender, RoutedEventArgs e)
{
}
private void Do_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
if (isNew)
{
try
{
pipe.name = Name.Text;
}
catch { }
db.pipes.Add(pipe);
Close();
}
else
pipe.name = Name.Text;
}
Close();
}

```

Повний текст програми, яка встановлюється на персональному комп'ютері, що входить до складу інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора, наведений у додатку А.

3.2. Розробка програмного забезпечення для пристрою отримання та передачі інформації

Алгоритм роботи пристрою отримання та передачі інформації інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом полягає у наступному.

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 аналого-цифрового перетворювача. Після надходження сигналу готовності від аналого-цифрового перетворювача перший байт його коду записується до порта, після цього з порта він читається та записується в оперативну пам'ять, далі лічильник числа зчитувань з аналого-цифрового перетворювача збільшується на одиницю, після цього до оперативної пам'яті записується другий байт даних [15].

Далі на основі отриманих даних обчислюється поточне значення часу за формулою

$$T(J) = J \cdot T_G, \quad (3.1)$$

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 аналого-цифрового перетворювача. Якщо вибірка не перша - обчислюється швидкість обертання за виразом

$$\omega(J) = \frac{\varphi(J) - \varphi(J - 1)}{T_G} \quad (3.2)$$

Значення кутової швидкості, кута повороту, поточного часу записується до оперативної пам'яті, а програмне забезпечення перевіряє, чи є сигнал закінчення процедури отримання даних. 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

$$\varphi(t) = \varphi_c(t) + \varphi_k(t) = \omega_c t + A_\varphi \sin 2\omega t, \quad (3.3)$$

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

$$A_{\varphi_i}(t_i) = \varphi(t_i) - \varphi_0(t_i) = \varphi(t_i) - \omega_c t_i = \varphi(t_i) - \frac{t_i}{nT_B} \sum_{i=0}^n (\varphi(t_i) - \varphi(t_i - T_B)). \quad (3.4)$$

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

$$J = me^2 \left(1 + \frac{1}{4A_\varphi} \right) \quad (3.5)$$

Алгоритм роботи пристрою отримання та передачі інформації інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом наведений на рис. 3.1. Лістинг програми, під управлінням якої працює пристрій отримання та передачі інформації інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом, яка написана на мові програмування C++, у відповідності до наведеного алгоритму, наведений у додатку Б.

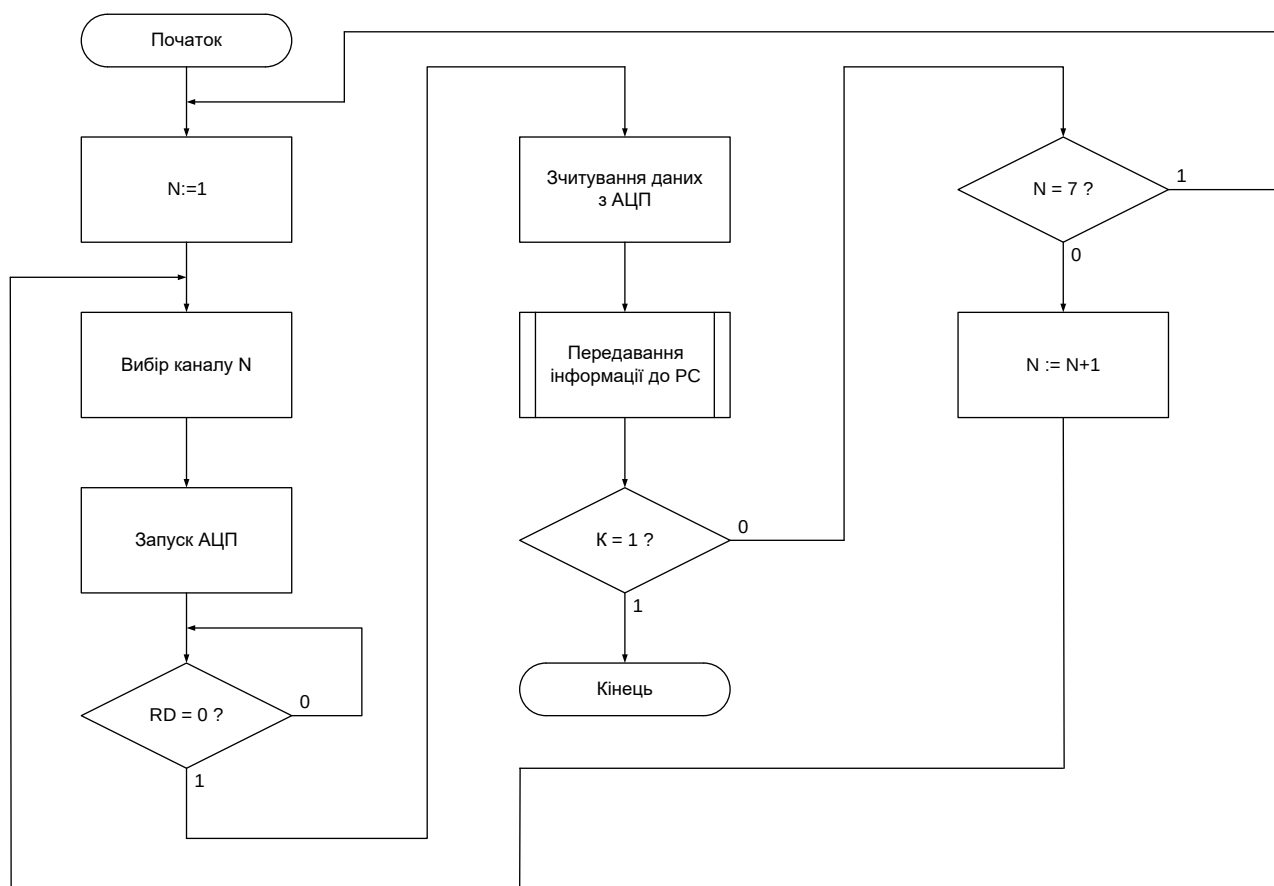


Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи пристрою отримання та передачі інформації інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом

Перед проведенням необхідної кількості вимірювань для визначення середнього та миттєвого значення кутової швидкості, амплітуди крутильних коливань, приведенного значення моменту інерції, проводиться визначення напруги живлення та струму споживання для кожної фази трифазної напруги живлення. Для цього програмно встановлюються відповідні канали мультиплексора, на які поступає 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 газомagnetним підвісом ротора.

Висновок

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено інформаційну підсистему параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора. У якості об'єкта дослідження обрано електричний двигун з газомagnetним підвісом ротора.

Розроблена система дозволяє отримувати інформацію про середнє і миттєве значення кутової швидкості, приведений момент інерції, амплітуду крутильних коливань, струм споживання, напругу живлення. Інформаційна підсистема забезпечує представлення отриманої 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 дослідження та сформульовані задачі дослідження.

У другому розділі проведено огляд та обґрунтування вибору архітектури інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора, розглянуто технологію розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів IAR Embedded Workbench, розглянуто технологію об'єктно-орієнтованого програмування та розроблено архітектуру підсистеми.

У третьому розділі розроблено програмне забезпечення для персонального комп'ютера інформаційної підсистеми параметрів електродвигуна з безконтактним підвісом ротора та програмне забезпечення для мікроконтролера пристрою отримання та передачі інформації на мові програмування C++.

Розроблена інформаційна підсистема має широкі межі застосування у промисловому виробництві та наукових дослідженнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пінегін С.В., Табачников 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.Кузнєцов, І.М.Богаєнко, М.О.Рюмшин та інші / за ред. Б.І.Кузнєцова, 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. BRHA, Fluid Engineering, Granfield, U.K., April 1981, Paper 8, p. 236-250.

10. Сокол В.М., Кулаков П.І., Поджаренко А.В. Коливання кінчного гістерезисного ротора в газомagnetній 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. Meyer, Bertrand (1997). Object-Oriented Software Construction. Prentice Hall. ISBN 0-13-629155-4.
13. Роберт Тейбор. Реалізація XML Web-служб на платформі Microsoft .NET . - К. : «Вільямс», 2002. - С. 464.
14. Шрюфер Е. Обробка сигналів: цифрова обробка дискретизованих сигналів / За ред В.П.Бабака. – К.: Либідь, 1992. – 296 с.
15. 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;