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 для визначення механічних характеристик електричних машин

Виконав – студент 4 курсу, групи 41-кн
освітньої програми "Комп’ютерні науки"
спеціальності 122 Комп’ютерні науки
Носач Артем Андрійович
Науковий керівник – д.т.н., професор
Кучерук Володимир Юрійович

Умань – 2023

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів

ОВ	Об’єкт вимірювання
МС	Муфта спряження
НП	Навантажуючий пристрій
ВД	Випробуваний двигун
ТМ	Торсіонний моментомір
АД	Асинхронний двигун
ЦЧ	Цифровий частотомір
BIOS	Basic Input/Output System
PCI	Peripheral Component Interconnect

Вступ

Для вирішення економічних і соціальних проблем стабілізації економіки України необхідне використання найновіших досягнень сучасних технологій, складовою частиною яких є випробування готової продукції та її сертифікація.

Трифазні асинхронні машини загального призначення є найбільш масовою продукцією електромашинобудування. Асинхронні електроприводи складають близько 95% загальної кількості електроприводів, а асинхронні машини споживають більше половини електроенергії, що виробляється у нашій країні. Тому розробка ефективних методів визначення характеристик цих двигунів в процесі виробництва і після їх виготовлення є актуальним завданням.

В теперішній час найбільш недослідженими та неавтоматизованими є випробування в динамічному режимі роботи електричної машини.

Розвиток засобів вимірювання у напрямку все більш широкого використання мікроконтролерів, персональних комп'ютерів, ускладнення об'єктів вимірювання, і як наслідок, алгоритмів вимірювання, вимагає використання інтелектуальних комп'ютеризованих систем. Не сформованість до теперішнього часу теорії побудови засобів вимірювання для визначення характеристик електричної машини в динамічному режимі їх роботи призводить до відсутності автоматизованих засобів вимірювання характеристик електричної машини. Ця обставина не дозволяє у повній мірі розв'язати задачу аналізу стану електричної машини як в статичному, так і в динамічному режимі роботи електричної машини, синтезувати сучасні структурні схеми та алгоритми функціонування засобів вимірювання з покращеними метрологічними характеристиками, здійснювати випробовування експериментальних промислових зразків електричної машини.

Динамічні методи оцінки стану електричної машини мають цілий ряд позитивних якостей: відсутність впливу температури на результати оцінок, короткочасність вимірювань, простота конструкції механічної частини засобу вимірювань.

Актуальність

Актуальність теми роботи пов’язана із тим, що використання справних електричних машин у сільському господарстві може призвести до значного зменшення витрат на паливо та енергію, а також зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Механічна характеристика визначає залежність моменту від швидкості обертання і є одною із самих важливих характеристик, за якою визначається справність електричної машини.

Об’єкт дослідження – процеси, що виникають у інформаційних підсистемах для визначення механічних характеристик електричних машин.

Мета дослідження

Мета дослідження – розробка апаратної частини, алгоритмічного забезпечення та програмного забезпечення інформаційної підсистеми механічних характеристик електричних машин.

Задачі дослідження:

– аналіз предметної області;

– проєктування апаратної частини, алгоритмічного та програмного забезпечення інформаційної підсистеми механічних характеристик електричних машин;

– вибір інструментарію, методів реалізації апаратної частини та програмного забезпечення інформаційної підсистеми механічних характеристик електричних машин.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи проєктування інформаційної підсистеми механічних характеристик електричних машин.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра був проведений аналіз наукової та технічної літератури, технічної документації, міжнародних стандартів у даній предметній галузі, а також проведено розробку математичного та програмного забезпечення підсистеми.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Особливості вимірювання механічної характеристики електричних машин

Використання електричних машин у сільському господарстві може призвести до значного зменшення витрат на паливо та енергію, а також зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Один з найбільш важливих аспектів використання електричних машин у аграрному секторі - це підвищення ефективності роботи. Зокрема, електричні машини дозволяють виконувати роботи швидше та точніше, що призводить до збільшення продуктивності та зменшення часу, потрібного для виконання робіт.

Наприклад, електричні трактори та комбайни можуть замінити більш традиційні машини, що працюють на дизельному паливі. Електричні трактори можуть бути оснащені більш точними та автоматизованими системами керування, що дозволяє знизити витрати на робочу силу та збільшити продуктивність. Електричні комбайни також можуть забезпечувати більш точний та ефективний збір врожаю, що сприяє збільшенню врожайності та підвищенню якості продукції.

Крім того, електричні машини можуть бути більш екологічно чистими, оскільки вони не викидають в атмосферу шкідливих викидів, що можуть негативно впливати на здоров’я людей та навколишнє середовище.

У зв’язку зі зростанням свідомості щодо охорони навколишнього середовища, все більше фермерів переходять на використання електричних машин. Це дозволяє не лише зменшити негативний вплив на довкілля, а й покращити імідж підприємства.

Крім того, використання електричних машин у аграрному секторі може мати значний економічний ефект. Наприклад, зменшення витрат на паливо та енергію може дозволити знизити вартість виробництва та збільшити прибуток. Також, за допомогою електричних машин можна забезпечити більш точний та ефективний контроль за виробництвом, що дозволяє зменшити відходи та

збільшити якість продукції.

Одним з найбільш важливих викликів, з якими стикається аграрний сектор, є забезпечення стабільної та ефективної роботи в умовах зміни клімату. Використання електричних машин може допомогти вирішити це завдання, забезпечуючи зниження викидів в атмосферу та зменшення використання природних ресурсів.

Наприклад, електричні машини можуть бути оснащені сонячними батареями або вітрогенераторами, що дозволяє забезпечити додаткове джерело енергії та зменшити витрати на електроенергію. Також, електричні машини можуть бути оснащені системами збору та переробки відходів, що забезпечує зниження викидів та забезпечує більш ефективну роботу.

Отже, використання електричних машин у аграрному секторі має значний потенціал для забезпечення ефективної та стабільної роботи, зменшення витрат та підвищення продуктивності, а також зниження негативного впливу на навколишнє середовище. З метою досягнення цих цілей необхідно продовжувати дослідження та розвиток нових технологій, що дозволяють забезпечити більш ефективне та стійке виробництво.

Одним з найбільш перспективних напрямів є розвиток автономної техніки та системи штучного інтелекту, які дозволять забезпечити більш точний та ефективний контроль за процесами виробництва. Наприклад, за допомогою датчиків та систем штучного інтелекту можна забезпечити точніше та ефективніше розподілення добрив, що дозволяє зменшити їх витрати та забезпечити кращий ріст рослин.

Також, розвиток електричної техніки для аграрного сектору може забезпечити нові можливості для виробництва екологічно чистих та органічних продуктів. Наприклад, електричні трактори можуть бути оснащені системами обробки ґрунту, які забезпечують його додаткове поживлення та підвищують якість продуктів.

У зв’язку з цим, використання електричних машин у аграрному секторі має

значний потенціал для забезпечення стійкого та ефективного виробництва, зменшення витрат та підвищення якості продуктів. Продовження досліджень та розвитку нових технологій в цьому напрямку дозволить досягти ще більш високих результатів та забезпечити ефективне використання ресурсів в аграрному секторі.

Тому досить актуальним є визначення механічних характеристик електричних машин.

Механічні характеристики електричних машин визначають їх ефективність та надійність, тому є важливими факторами при розробці та виробництві цих пристроїв.

Однією з ключових механічних характеристик електричних машин є момент обертання. Це значення визначає силу, з якою машина може приводити в рух механізм, і залежить від багатьох факторів, включаючи форму та розмір обмоток, кількість магнітних полюсів та струм, що протікає через них. Від моменту обертання залежить не тільки швидкість роботи машини, але і її спроможність працювати при великому навантаженні.

Ще однією важливою механічною характеристикою є коефіцієнт корисної дії. Це відношення потужності, що видається машини, до потужності, яка споживається для її роботи. Цей параметр дозволяє визначити ефективність машини та розрахувати кількість енергії, що можна заощадити, якщо використовувати більш ефективні пристрої.

Також, при розробці та виробництві електричних машин важливо враховувати їх масу та габарити, оскільки ці параметри можуть обмежувати можливість використання машини в різних умовах та середовищах. Наприклад, у побутовій техніці зазвичай використовують компактні та легкі машини, так як вони повинні бути зручними для транспортування та зберігання. У той же час, промислові машини можуть бути більш великими та важкими, оскільки вони зазвичай встановлюються на постійному місці та працюють з більш великими навантаженнями.

Крім того, механічні характеристики електричних машин можуть бути покращені за допомогою спеціальних матеріалів та конструкцій. Наприклад, використання магнітів з більшою силою поля може збільшити момент обертання машини, а використання матеріалів з більш високою міцністю може дозволити збільшити максимальне навантаження.

Усі ці механічні характеристики є важливими при розробці та виробництві електричних машин, оскільки вони дозволяють покращити ефективність та надійність пристроїв, що в свою чергу може призвести до зменшення витрат на енергію та ресурси, збільшення продуктивності та підвищення якості життя людей.

При різних видах випробовувань електричних машин виникає необхідність вимірювання характеристик руху, а саме: обертаючого моменту *M*; механічної характеристики; приведеного моменту інерції ротора електричної машини *J*; моменту механічних втрат M_0. Перераховані фізичні величини входять в загальне рівняння руху електричної машини, що дає можливість об’єднати їх під загальною назвою характеристик руху електричних машин. Вони повинні визначатись як в статичному, так і в динамічному режимі роботи електричної машини.

Механічна характеристика представляє собою залежність між обертаючим моментом і кутовою швидкістю обертання $M=f(\omega_r)$ або $\omega_r=f(M)$, що отримана при незмінних напрузі живлення і частоті мережі [1].

Із безлічі механічних характеристик, обумовлених різними початковими умовами і неінформативними параметрами, необхідно виділити пускову механічну характеристику. Пускова механічна характеристика, яка відповідає підключенню об’єкта вимірювання ОВ до мережі із номінальними параметрами при відсутності на валу додаткових моментів інерції і моменту опору, називається природною механічною характеристикою.

За допомогою механічних характеристик електричних машин при відповідних умовах можливо розраховувати статичні параметри електричних

машин. Так, для трифазного асинхронного двигуна механічна характеристика режиму реверсу при наявності належного додаткового моменту інерції виявляється вельми близькою на ділянці розгону до механічної характеристики, що виміряна в статичному режимі його роботи. Це дає можливість за більш короткий час визначити такі статичні параметри, як початковий пусковий момент, максимальний момент та ін. Окрім цього, механічна характеристика дозволяє оцінити деякі види браку. Так, при несиметрії обмотки ротору асинхронного двигуна, яка має місце при неякісній заливці у вигляді обриву стержнів ротору, форма механічної характеристики суттєво відрізняється від зразкової, а при невірному з'єднанні секцій обмотки статору час розбігу затягнений у порівнянні із зразковим [2].

Вимірювання механічних характеристик в перехідному режимі роботи електричних машин має суттєві особливості у порівнянні з виміром механічних характеристик в статичному режимі роботи електричних машин: проведення динамічних вимірювань за короткий проміжок часу; вимірювання інформативних параметрів у широкому діапазоні; необхідність сумісного вимірювання (наприклад, кутова швидкість - час); необхідність вияву короткочасних змін – «провалів» моменту (особливо так званих «голкових»), які суттєво погіршують якість механічної енергії, сприяючи виникненню ударів в механічній трансмісії, що має зазори (наприклад, у зубчатих передачах), з якою з'єднаний двигун; відсутність методики розрахунку динамічних метрологічних характеристик; відсутність метрологічного забезпечення засобів вимірювання.

Окрім цього, існують фактори, що суттєво ускладнюють процес вимірювань: ручні операції закріплення, підключення, центрування об'єкту вимірювання та сенсорів; безліч зовнішніх факторів, які впливають на чистоту проведення досліду (нестабільність напруги живлення, вплив муфти спряження (МС) та ін.).

Особливості вимірювань визначаються також і різноманітністю типів електричних машин, що контролюються: різні висоти осей обертання валу

об’єкту вимірювань; різні кути сполучення датчиків із вертикально чи горизонтально розташованими валами; різний діаметр первинного валу МС; розкид діапазонів зміни вимірюваних параметрів; різний час вимірювань, який визначається параметрами об’єкту вимірювань.

Розвиток комп’ютерної техніки у напрямку все більш широкого використання мікроконтролерів, персональних комп’ютерів у вимірюваннях, ускладнення об’єктів вимірювання, і як наслідок, алгоритмів процедур вимірювання вимагає використання інтелектуальних засобів вимірювання (ЗВ) [3, 4].

Аналіз вищезгаданих факторів вказує на актуальність питань, пов’язаних із розробкою засобів експериментального визначення механічних характеристик електричних машин. Однак до теперішнього часу відомо порівняно невелика кількість досліджень у цьому напрямку. Розроблені на їх основі засоби вимірювань існують в одиничних екземплярах і в своїй більшості мають метрологічні характеристики, які не відповідають у повній мірі вимогам розробників, виготовлювачів та користувачів електричних машин.

1.2 Класифікація і аналіз існуючих методів та засобів вимірювання механічних характеристик електричних машин

Нині опубліковано ряд робіт, в яких так чи по-іншому порушується питання класифікації існуючих методів і засобів вимірювання механічних характеристик [2, 5-8]. Проте, приведені в цих працях класифікації є неповними та незручними для проведення аналізу.

Враховуючи це, запропонована наступна класифікація.

Для зручності введені наступні класифікаційні ознаки: за режимом роботи засобів вимірювання; за видом інформативних параметрів; за реагуючою частиною об’єкту вимірювань.

За видом інформативних параметрів засоби вимірювання механічних характеристик розділяються на вимірювання вхідних величин, вихідних величин і вхідних та вихідних величин.

Під вхідними величинами об’єкту вимірювань розуміються такі параметри, як струм в обмотках статору I, напруга U та частота мережі F. Під вихідними – кутова швидкість ω_r або прискорення ε обертання ротора, обертаючий момент на валу M.

За реагуючою частиною об’єкту вимірювань_можливо виділити такі засоби вимірювань: за реакцією статора об’єкту вимірювань; за реакцією ротора об’єкту вимірювань; комбіновані.

Різниця поміж цими засобами вимірювання полягає у використанні різних первинних перетворювачів: сенсори моменту вимірювання сили тиску на опори; сенсори частоти обертання ротора, акселерометри, сковзиметри, сенсори кутового положення, тахометри.

Загальна суть методів, заснованих на вимірюванні вхідних величин [10-13] полягає в тому, що, виходячи із математичної моделі або схеми заміщення об’єкту вимірювань, визначаються вхідні електричні та магнітні параметри, від яких залежить механічна характеристика і проводиться їх вимірювання. До переваг цих методів можна віднести те, що відсутні механічні частини вимірювальних приладів, які прикріплюються до вихідного валу чи до корпусу об’єкту вимірювань, тому засоби вимірювання мало впливають на результати вимірювань. Такі методи дозволяють використовувати неповну апріорну інформацію для проведення ідентифікації внутрішніх параметрів об’єкту вимірювань по його математичній моделі.

Проте суттєвим недоліком цих методів є неповна адекватність математичної моделі (схеми заміщення) об’єкту вимірювань реальному двигунові, що є причиною додаткових похибок, пов’язаних із спрощеним врахуванням реальних фізичних процесів у електричних машин. Додаткові похибки також вносить так звана «вторинна реакція якоря» - реакція статору на гармонічні складові поля ротору, що індукують в обмотках статора додаткові електрорухомі сили і струми, частота яких відмінна від частоти електричної мережі [14]. Це вимагає їх врахування при обробці результатів вимірювань. Внаслідок цих недоліків дані

методи не знайшли широкого застосування на практиці.

Усе вищесказане відноситься і до методів, заснованих на вимірюванні вхідних та вихідних величин [15-17], у яких для більш точного визначення механічних характеристик, складові якої взагалі є вихідними величинами об'єкту вимірювань, вимірюються деякі параметри обмотки статора об'єкту вимірювань. Враховуючи ці параметри, можливо досягнути більш точного вимірювання сковзання; компенсації нестабільності напруги та частоти мережі живлення та компенсації параметрів, що впливають на похибку вимірювань, наприклад, температури.

За режимом роботи засобів вимірювання всі засоби вимірювання механічних характеристик можливо розділити на статичні, квазистатичні і динамічні.

Ці засоби вимірювання засновані на дослідженні залежностей $M=f(\omega_r)$ або $\omega_r=f(M)$, які слідують із основного рівняння руху електричної машини:

$$M_{руху}(\omega_r) = M_J(\omega_r) + M_0(\omega_r), \qquad (1.1)$$

де $M_{руху}$ - момент, який розвивається випробовуваним двигуном, [Н·м]; M_J - момент, що створює кутове прискорення (динамічний момент навантаження), [Н·м];

$$M_J(\omega_r) = J\frac{d\omega_r}{dt} = J\varepsilon; \qquad (1.2)$$

M_0 - момент механічних втрат (статичний момент навантаження), [Н·м]; J - момент інерції ротора, [кг·м^2]; ω_r - кутова швидкість обертання ротора, [с$^{-1}$]; ε - кутове прискорення обертання ротора, [с$^{-2}$].

При статичному методі вимірювань [1,5-8,10,17-18] механічних характеристик знаходиться дискретно у статичному режимі ($\varepsilon = 0$), коли:

$$M_{руху} = M_0(\omega_r), M_J(\omega_r) = 0. \qquad (1.3)$$

Як навантажуючі машини тут звичайно використовуються машини постійного струму у балансирному виконанні та торсіонні моментоміри, які включаються по схемі ОВ-НП (об'єкт вимірювання - навантажуючий пристрій).

Проте цей метод вимірювань має наступні недоліки: при наявності аномалій у фазовому портреті $M = f(\omega_r)$ випробуваного двигуна (ВД), балансирні динамометри не в повній мірі забезпечують вимоги стійкої роботи засобів вимірювання у всьому діапазоні швидкостей. Природна жорсткість механічних характеристик двигуна постійного струму, включеного за схемою ВД-НП, складає не менше 10-152 при основній швидкості і значно збільшується на низьких швидкостях. Це може привести до неоднозначного визначення поточного моменту електричних машин [19]. При дискретному визначенні механічних характеристик часто провал моменту зовсім не виявляється, що вимагає зменшення кроку дискретизації. Це веде до збільшення часу проведення експерименту і виникнення додаткових інтерполяційних похибок; сильне нагрівання об'єкту вимірювань під час експерименту, що приводить до спотворення отриманих результатів в зв'язку із залежністю параметрів електричних машин від температури і необхідності лімітування часу вимірів ($\leq 20c$); інертність ЗВ, яка вносить запізнення у визначення моменту. Це ускладнює одержання інформації і є причиною додаткових похибок та нагрівання об'єкту вимірювань; загальна коливальність випробувального стенду ЗВ; неможливість одержання динамічних характеристик електричних машин; трудомісткість та енергоємність випробовувань.

Квазистатичний метод [5, 20-25] визначення механічної характеристики реалізується шляхом з'єднання ВД через торсіонний моментомір (ТМ) з навантажуючим пристроєм (ВД-ТМ-НП), що працює на мережу із регульованою частотою. Якщо змінювати частоту у межах $(0.1 \div 1)f_{ном}$, то можна отримати всю механічну характеристику.

Даний метод має ті самі недоліки, що і статичний метод. Крім того, виникає необхідність внесення поправок на величину моменту $J\varepsilon$, що витрачається на прискорення ротору.

До позитивних якостей цього методу можна віднести те, що, підбираючи величину прискорення зміни частоти $f_{ном}$, можливо проводити виміри як в

статичному, так і в динамічному режимах роботи об’єкту вимірювань.

При динамічному методі вимірювань [2, 5-7, 26-36] реальна механічна характеристика визначається шляхом вимірювання обертаючих моментів за прискоренням, що розвинуте випробовуваним двигуном під час розбігу, коли:

$$M_{руху} = M_J(\omega_r),\ M_0(\omega_r) = const. \quad (1.4)$$

До недоліків цього методу вимірювань відносять: необхідність малого кроку дискретизації через короткочасність процесу вимірювань; складність технічної реалізації (динамічні вимірювання); припущення, що $J=const$ та $M_0=const$, коли в дійсності момент інерції та момент механічних втрат є функціями від швидкості обертання ротора. Це є причиною додаткових похибок при визначенні механічних характеристик; складність алгоритмів обробки результатів (диференціювання та фільтрація $\omega_r(t)$).

До позитивних якостей можна віднести: відсутність впливу температури на визначену механічну характеристику внаслідок короткого часу вимірювань; можливість отримання МХ, що характеризують об’єкту вимірювань як в статичному, так і в динамічному режимах роботи [31]; мала трудомісткість операцій.

Вимірювання прискорення можливо виконувати одним із наступних способів [2, 7, 32]: шляхом вимірювання зусиль, що розвиваються при прискоренні з подальшим перетворенням цих зусиль у електричну величину (опір, ємність, індуктивність, магнітну провідність тощо) - акселерометри; шляхом вимірювання швидкості обертання з подальшим її диференціюванням.

Акселерометри при всій своїй гнучкості в роботі мають цілий ряд недоліків, що обмежують їх використання: мала чутливість елементів опору, ємності, індуктивності при невеликих деформаціях вимірювального валу, що має місце при повільному розбігу двигуна і отже, неминучість використання спеціальних підсилювачів; вплив на похибку вимірювань різних зовнішніх факторів (бруд, вібрація валу, вологість, температура тощо); наявність у вимірювальній схемі перехідних опорів в контактах кілець та щіток, що вносять велику похибку;

складність конструктивного оформлення сенсорів при розширенні сфери їх використовування; необхідність ретельної та складної попереднього тарування вимірювальних елементів.

Більш поширені методи визначення прискорення шляхом: диференціювання кривої $\omega_r = f(t)$, отриманої за допомогою тахогенераторів [37]; обробки сигналу фотодатчика кутової швидкості за допомогою електронних схем чи комп'ютера.

Диференціювання сигналу тахогенераторів має наступні недоліки: нелінійність характеристики тахогенераторів; мала чутливість при низьких швидкостях обертання; наявність колектора у тахогенератора і залізних частин, що обертаються, як правило, викликає додаткові пульсації моменту.

Тому найбільш придатним і перспективним є метод обробки сигналу фотосенсора швидкості обертання за допомогою електронних схем чи комп'ютера [2, 7].

Сенсори кутової швидкості, принципи їх побудови і теорія розглянуті в багатьох роботах. Найбільш повний, впорядкований виклад їх принципів дії найшло відображення в [7, 38-47].

В результаті проведеного порівняльного аналізу встановлено, що в промислових умовах найбільш ефективним є динамічний метод вимірювання механічних характеристик. Властиві йому недоліки обмежують область його використання, але висока інформативність, експресність і технологічність вигідно відрізняють цей метод від інших. Вказаний метод має всі необхідні передумови для удосконалення і розробки на його основі інтелектуальних засобів вимірювання механічних характеристик електричних машин.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СПОСОБУ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1 Аналіз математичної моделі об’єкта вимірювання

Математичні моделі електричних машин використовуються для дослідження та аналізу різних електричних систем, включаючи електричні машини. Ці моделі описують фізичні взаємодії між різними компонентами машини, такими як статор, ротор, магнітні поля, струми, напруги та інші параметри.

У математичній моделі електричної машини використовуються різні елементи, такі як індуктивності, опори, контури, напруги, струми та інші параметри, які описують фізичні процеси, що відбуваються в машині. Ці елементи можуть бути зіставлені з еквівалентними електричними колами, що дозволяє легко моделювати різні електричні процеси та проводити аналіз параметрів машини.

Математичні моделі електричних машин є основою для проектування та розробки електричних систем, а також для вивчення їх експлуатації та покращення їх ефективності. Застосування цих моделей дозволяє знизити ризик помилок та непередбачуваних ситуацій, що можуть виникнути в ході роботи електричних систем.

Однією з важливих складових математичних моделей електричних машин є розрахунок електричної потужності, яку вони можуть генерувати або споживати. Це важливо при проектуванні та виборі електричних машин для конкретних застосувань, таких як електромобілі, промислові установки, сонячні батареї та інші.

Для покращення точності математичних моделей електричних машин, використовуються різні методи та алгоритми, такі як метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод скінченних об'ємів та інші. Вони дозволяють урахувати різноманітні ефекти, які можуть впливати на роботу

електричних машин, такі як ефект синхронізації, динаміка струмів та напруг, ефект переносу тепла та інші.

Застосування математичних моделей дозволяє вивчити різноманітні параметри електричних машин та здійснити їх оптимізацію з точки зору ефективності, енергоефективності та інших важливих характеристик. Наприклад, застосування математичних моделей дозволяє вивчити ефект взаємодії між магнітним полем та струмами в роторі електричної машини, що може впливати на її ефективність та довговічність.

У заключенні, математичні моделі електричних машин є важливим інструментом для вивчення та аналізу електричних систем. Вони дозволяють вивчити та оптимізувати різні параметри електричних машин та визначити їх ефективність, енергоефективність та інші важливі характеристики. Застосування математичних моделей дозволяє покращити якість роботи електричних систем та зменшити ризик помилок та непередбачуваних ситуацій в ході їх роботи.

Механічну характеристику електричних машин можна побудувати, використовуючи явну формулу Клосса та її модифікації [48-51], але вона носить статичний характер, не враховує «голкових провалів» моменту і тому не придатна для визначення механічних характеристик в динамічному режимі роботи електричної машини.

Оскільки найбільш масовим представником електричних машин є асинхронні двигуни (АД), то в подальшому будемо розглядати об’єкт вимірювань як АД.

Електричні машини є важливими компонентами електромеханічних систем і використовуються в різноманітних промислових, комерційних та побутових пристроях. Серед різних типів електричних машин, одним з найбільш поширених є асинхронний двигун. Цей тип машин відрізняється від інших типів електричних машин, таких як синхронні та постійного струму, у декількох аспектах.

По-перше, асинхронні двигуни мають просту конструкцію, яка дозволяє їм бути більш доступними та дешевшими у виробництві. Наприклад, в порівнянні з синхронними двигунами, асинхронні двигуни не потребують складного регулювання частоти струму, що дає можливість скоротити витрати на виробництво та обслуговування.

По-друге, асинхронні двигуни мають високу надійність та довговічність. Завдяки відсутності колектора та інших деталей, що підлягають зношуванню, асинхронні двигуни мають мінімальну кількість деталей, що підлягають зношуванню. Це робить їх більш стійкими до різноманітних умов експлуатації, таких як висока вологість, пил та інші.

По-третє, асинхронні двигуни мають високу енергоефективність. Завдяки високому коефіцієнту потужності та низькому споживанню енергії в режимі очікування, асинхронні двигуни є одними з найбільш економічних типів електричних машин. Це робить їх ідеальними для використання в різнитих галузях, де вимагається висока енергоефективність, наприклад, у промисловості, транспорті, сільському господарстві та інших.

Проте, на відміну від інших типів електричних машин, асинхронні двигуни мають деякі обмеження в робочих режимах, особливо коли потрібна точність регулювання швидкості. Оскільки асинхронний двигун не має сталих магнітних полів, як у синхронних двигунах, точне регулювання швидкості може бути складним. Тому, коли потрібна точність регулювання швидкості, можуть використовуватися інші типи електричних машин.

Крім того, асинхронні двигуни можуть мати високу стартову струмову характеристику, що може призводити до проблем з електричною мережею при старті. Для того, щоб уникнути цих проблем, можуть використовуватися спеціальні пристрої, такі як плавний пуск, які дозволяють зменшити стартовий струм.

Узагалі, асинхронні двигуни є важливими елементами багатьох електромеханічних систем та знайшли широке застосування у різних галузях. Їх

проста конструкція, висока надійність та енергоефективність роблять їх більш доступними та економічними в порівнянні з іншими типами електричних машин. Однак, вони мають свої обмеження в робочих режимах, що необхідно враховувати при їх використанні.

Існує декілька підходів до моделювання електричних машин [52-60]: на базі теорії поля; на базі теорії кіл; комбінований підхід.

Найбільш досконалим є комбінований підхід, який поєднує у собі рівняння поля і рівняння кіл, коли виходячи з картини поля в повітряному зазорі електродвигуна, записують рівняння напруг, а через струми чи потокозчеплення - рівняння електромагнітного моменту. В цьому випадку розглядається ідеалізована електрична машина - симетричний електромагнітний перетворювач, який має рівний повітряний зазор, сталеві ділянки із нульовим магнітним опором та синусні обмотки. Із використанням такого підходу найбільш поширена форма запису рівнянь асинхронної машини в координатах $\alpha, \beta, 0$ має вигляд [53, 58]:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - i_{s\alpha}R_{s\alpha}; \\ \dfrac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - i_{s\beta}R_{s\beta}; \\ \dfrac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = U_{r\alpha} - i_{r\alpha}R_{r\alpha} - \omega_r\psi_{r\beta}; \\ \dfrac{d\psi_{r\beta}}{dt} = U_{r\beta} - i_{r\beta}R_{r\beta} - \omega_r\psi_{r\alpha}, \end{cases} \tag{2.1}$$

де $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ – потокозчеплення статора і ротора в координатах $\alpha, \beta, 0$; $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}$ – проекції напруг статора і ротора на вісі координат $\alpha, \beta, 0$; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ – струми в обмотках статора і ротора; $R_{s\alpha}, R_{s\beta}, R_{r\alpha}, R_{r\beta}$ – активні опори статора і ротора; ω_r – кутова швидкість обертання ротора.

Потокозчеплення в (2.1) мають вигляд:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = L_{s\alpha} i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}; \\ \psi_{s\beta} = L_{s\beta} i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \\ \psi_{r\alpha} = L_{r\alpha} i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}; \\ \psi_{r\beta} = L_{r\beta} i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}, \end{cases} \tag{2.2}$$

де $L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}$ – індуктивності в обмотках статора і ротора; L_m – взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора. Приймаючи узвичаєні допущення: $L_s = L_{s\alpha} = L_{S\beta}$; $L_r = L_{r\alpha} = L_{r\beta}$; $R_s = R_{s\alpha} = R_{s\beta}$; $R_r = R_{r\alpha} = R_{r\beta}$ і підставивши (2.2) в (2.1), отримаємо:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_{s\alpha} i_{s\alpha} + \dfrac{d}{dt}(L_s i_{s\alpha}) + \dfrac{d}{dt}(L_m i_{r\alpha}); \\ U_{s\beta} = R_{s\beta} i_{s\beta} + \dfrac{d}{dt}(L_s i_{s\beta}) + \dfrac{d}{dt}(L_m i_{r\beta}); \\ U_{r\alpha} = R_{r\alpha} i_{r\alpha} + \dfrac{d}{dt}(L_r i_{r\alpha}) + \dfrac{d}{dt}(L_m i_{r\alpha}) + \omega_r (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}); \\ U_{r\beta} = R_{r\beta} i_{r\beta} + \dfrac{d}{dt}(L_r i_{r\beta}) + \dfrac{d}{dt}(L_m i_{r\beta}) - \omega_r (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}). \end{cases} \tag{2.3}$$

Розглядаючи асинхронну машину як систему із зосередженими параметрами, запишемо:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \dfrac{d}{dt} i_{s\alpha} + L_m \dfrac{d}{dt} i_{r\alpha}; \\ U_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \dfrac{d}{dt} i_{s\beta} + L_m \dfrac{d}{dt} i_{r\beta}; \\ U_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + L_r \dfrac{d}{dt} i_{r\alpha} + \omega_r (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}); \\ U_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + L_r \dfrac{d}{dt} i_{r\beta} - \omega_r (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}). \end{cases} \tag{2.4}$$

Провівши відповідні математичні перетворення, запишемо систему рівнянь (2.4) у матричній формі:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r(U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) - L_m(U_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} + \omega_r(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta})) \\ L_r(U_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) - L_m(U_{r\beta} - R_r i_{r\beta} - \omega_r(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha})) \\ -L_m(U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) + L_s(U_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} + \omega_r(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta})) \\ -L_m(U_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) + L_s(U_{r\beta} - R_r i_{r\beta} - \omega_r(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha})) \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

де $k = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2}$.

Рівняння руху ротора електродвигуна має вигляд:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J}(M_e - M_0), \quad (2.6)$$

де M_e – електромагнітний момент електричних машин, який визначається рівнянням:

$$M_e = \frac{mp}{2} L_m(i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}); \quad (2.7)$$

M_0 – момент опору на валу; J – момент інерції ротора; m – кількість фаз; p – кількість пар полюсів.

Рівняння (2.7) встановлює параметричну залежність поміж швидкістю обертання ротору і динамічним моментом (неявна форма запису рівняння механічної характеристики). Спільний розв'язок рівнянь (2.5) – (2.7), проведений за допомогою методу Рунге-Кутта четвертого порядку, дозволив розрахувати теоретичні механічні характеристики АД. Розраховані теоретичні механічні характеристики електродвигунів зображені на рис. 2.1.

Характерними точками кривої $M=f(\omega_r)$: пусковий момент M_n при $\omega_r=0$, мінімальний момент M_{min} при $\omega_{r\ min}$, максимальний момент M_{max} при $\omega_{r\ max}$, критичний момент $M_{кр}$ при $\omega_{r\ кр}$ та номінальний момент $M_{ном}$ при $\omega_{r\ ном}$ [61].

Моменти M_n, M_{min}, M_{max} зв'язані з великими струмами (пусковий струм може у 5-7 раз перевищувати номінальний) і характеризують динамічні властивості електродвигуна. Це свідчить про велику інформативність механічних характеристик, що визначена в динамічному режимі роботи електричних машин. Але для точного визначення механічних характеристик необхідно визначати залежності $J(\omega_r)$ та $M_0(\omega_r)$.

2.2. Розробка способу вимірювання механічних характеристик

Методи ідентифікації дозволяють достатньо точно визначати параметри J та M_0, використовуючи математичну модель об'єкту вимірювань. Але при цьому електричних машин розглядається як система із зосередженими параметрами, і не дозволяє розрахувати M_0 як функцію від кутової швидкості.

З іншого боку, відомі різні методи визначення J та M_0 [2, 5, 18, 62] (метод фізичного маятника, метод крутильних коливань, метод самогальмування, метод коливання подвійного маятника, метод атвудової машини). Але всі ці методи мають значну похибку визначення J та M_0, складні в реалізації і не дозволяють автоматизувати процес проведення вимірювань.

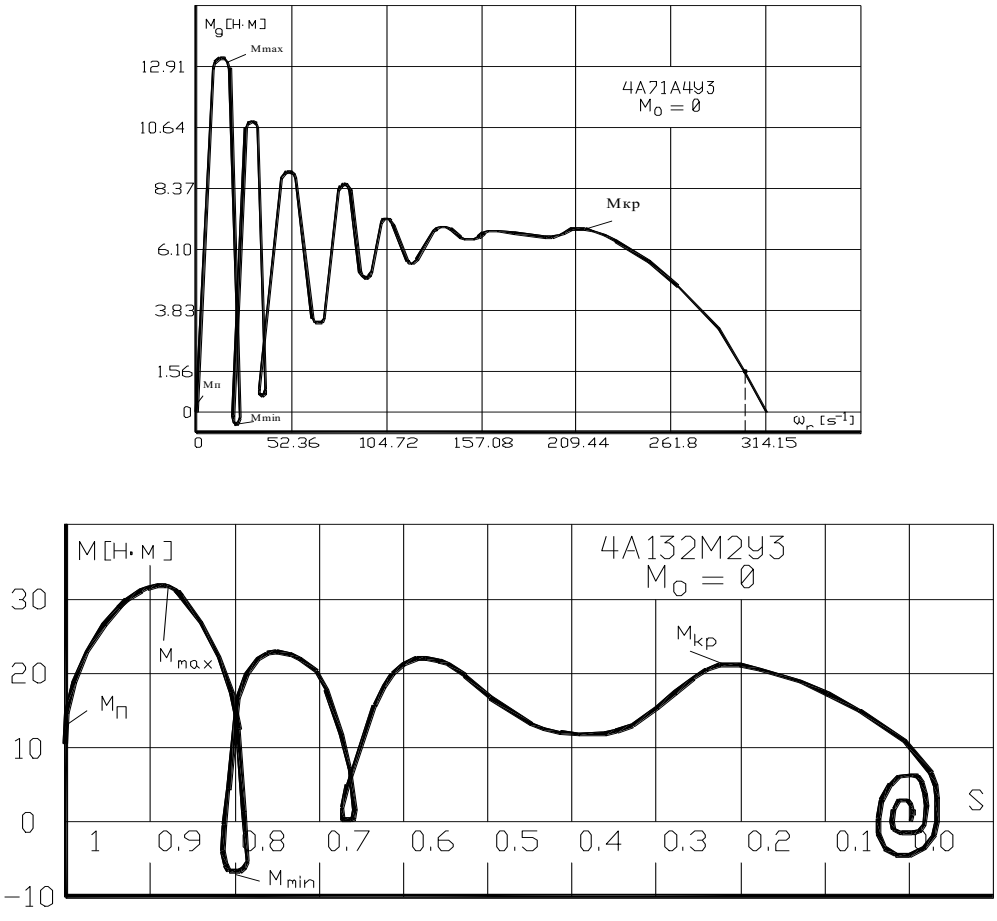


Рисунок 2.1 - Розраховані механічні характеристики АД

Авторами розроблені спосіб і засіб для визначення приведеного моменту інерції механізмів [63, 64]. На базі цього способу запропонований спосіб вимірювання механічних характеристик [65-67], в якому M_0 визначається в

функції кутової швидкості. Суть його полягає у наступному. Необхідною передумовою способу є наявність двох зразків моменту інерції, виконаних у вигляді тіл обертання, наприклад, дисків чи циліндрів. Моменти інерції зразків вираховують по їх геометричним та ваговим параметрам. На вихідний кінець валу електричних машин встановлюють перший зразок моменту інерції і вмикають електричних машин в мережу. Під час протікання перехідного процесу реєструють кутову швидкість обертання ротору ω_r; по закінченні перехідного процесу електричну машину вимикають і в процесі його самогальмування також реєструють кутову швидкість обертання ω_r.

Коли електрична машина зупиниться, знімають перший зразок моменту інерції і так само встановлюють другий зразок. Із електричної машини, з'єднаною з другим зразком моменту інерції, проводять такі самі процеси розгону і самогальмування, як і випадку з першим зразком та реєструють аналогічні параметри.

Рівняння руху електричної машини відповідно з першим і другим зразками будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} M_{ем}(\omega_r) = M_0(\omega_r) + M_{ЗВ}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ЗВ}(\omega_r) + J_{31}(\omega_r))\varepsilon_{п1}(\omega_r); \\ 0 = M_0(\omega_r) + M_{ЗВ}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ЗВ}(\omega_r) + J_{з1}(\omega_r))\varepsilon_{г1}(\omega_r); \\ M_{ем}(\omega_r) = M_0(\omega_r) + M_{ЗВ}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ЗВ}(\omega_r) + J_{32}(\omega_r))\varepsilon_{г2}(\omega_r); \\ 0 = M_0(\omega_r) + M_{ЗВ}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ЗВ}(\omega_r) + J_{з2}(\omega_r))\varepsilon_{г2}(\omega_r), \end{cases} \quad (2.8)$$

де $M_{ем}$ - динамічний електромагнітний момент; M_0 - момент механічних втрат електричної машини; $M_{ЗВ}$ - момент механічних втрат ЗВ; J - момент інерції ротору електричної машини; $J_{ЗВ}$ - момент інерції вхідного валу ЗВ; J_{31} - момент інерції першого зразку; J_{32} - момент інерції другого зразку; $\varepsilon_{п1}$ - кутове прискорення розгону електричної машини з першим зразком; $\varepsilon_{г1}$ - кутове прискорення самогальмування електричної машини з першим зразком; $\varepsilon_{п2}$ - кутове прискорення розгону електричної машини з другим зразком; $\varepsilon_{г1}$ - кутове прискорення самогальмування електричної машини з другим зразком. При цьому відмітимо, що всі вищеперераховані величини представлені в функції

кутової швидкості $\omega_{\text{г}}$.

Здійснення двох експериментів є методичною основою запропонованого методу і дозволяє з використанням (2.8) скласти і вирішити систему з трьох рівнянь з трьома невідомими $M_{ем}$, M_0, J. Запишемо систему (2.8), перенісши невідомі в ліві частини рівнянь і опустивши для зручності запис кутової швидкості:

$$\begin{cases} M_{ем} - M_0 - J\varepsilon_{п1} = (J_{ЗВ} + J_{з1})\varepsilon_{п1} + M_{ЗВ}; \\ -M_0 - J\varepsilon_{г1} = (J_{ЗВ} + J_{з1})\varepsilon_{г1} + M_{ЗВ}; \\ M_{ем} - M_0 - J\varepsilon_{п2} = (J_{ЗВ} + J_{з2})\varepsilon_{п2} + M_{ЗВ}; \\ -M_0 - J\varepsilon_{г2} = (J_{ЗВ} + J_{з2})\varepsilon_{г2} + M_{ЗВ}. \end{cases} \tag{2.9}$$

Оскільки $J_{ЗВ} << J$ та $M_{ЗВ} << M_0$, то значеннями $J_{ЗВ}$, $M_{ЗВ}$ можна знехтувати. Тоді система (2.9) запишеться:

$$\begin{cases} M_{ем} - M_0 - J\varepsilon_{п1} = J_{з1}\varepsilon_{п1}; \\ -M_0 - J\varepsilon_{г1} = J_{з1}\varepsilon_{п1}; \\ M_{ем} - M_0 - J\varepsilon_{п2} = J_{з2}\varepsilon_{п2}; \\ -M_0 - J\varepsilon_{г2} = J_{з2}\varepsilon_{г2}. \end{cases} \tag{2.10}$$

Приймемо $J_{з1}=0$, $J_{з2}=J_з$. Тоді, вирішивши спільно друге і четверте рівняння системи (2.10), отримаємо:

$$M_0 = \frac{\varepsilon_{г1}\varepsilon_{г2}J_з}{\varepsilon_{г2} - \varepsilon_{г1}}; \tag{2.11}$$

$$J = \frac{J_з\varepsilon_{г2}}{\varepsilon_{г2} - \varepsilon_{г1}}. \tag{2.12}$$

Взагалі, для визначення невідомих, можна брати комбінацію із будь яких трьох рівнянь системи (2.10). Це визначається умовами проведення вимірювань. У даному випадку вибір другого і четвертого рівнянь системи (2.3) для знаходження M_0 та J обумовився тими обставинами, що в процесі самогальмування електродвигуна знешкоджується вплив нестабільності напруги та частоти мережі на результати вимірювань M_0 та J.

Електромагнітний момент $M_{ем}$ визначиться із першого рівняння системи (2.10):

$$M_{ем} = J_з \varepsilon_{п1} + \frac{\varepsilon_{г1}\varepsilon_{г2} J_з}{\varepsilon_{г2} - \varepsilon_{г1}} - \frac{J_з \varepsilon_{г2}}{\varepsilon_{г2} - \varepsilon_{г1}} \varepsilon_{п1}. \quad (2.13)$$

Відмітимо, що $M_{ем}$ - це динамічний електромагнітний момент, без врахування моменту опору M_0. Повний динамічний момент $M_Д$ визначиться як $M_{ем} + M_0$.

В Додатку А наведено лістинг програмного забезпечення для моделювання режимів роботи електричної машини з використанням мови програмування Pascal (компілятор FreePascal).

2.3. Розробка та аналіз структурної схеми вимірювального каналу для вимірювання механічних характеристик

Структурні схеми інформаційних систем є важливим інструментом для проектування та розробки. Ці схеми надають візуальне представлення структури системи, що дозволяє розуміти, як компоненти системи взаємодіють між собою та які функції вони виконують.

Одним з основних елементів структурної схеми є блок, який може представляти окремий компонент системи, такий як процесор, пам’ять, дисплей, мережевий інтерфейс тощо. Кожен блок містить вхідні та вихідні з’єднання, які дозволяють взаємодіяти з іншими блоками.

Крім блоків, структурна схема може містити лінії, які вказують на напрямок потоку даних між блоками. Ці лінії можуть мати різні характеристики, наприклад, ширину каналу передачі даних, швидкість передачі тощо.

Структурні схеми допомагають розробникам та інженерам уявити систему як цілісний об’єкт, а не як набір окремих компонентів. Це дозволяє ефективніше проектувати та розробляти систему, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів та забезпечуючи максимальну продуктивність.

Крім того, структурні схеми також можуть бути використані для візуалізації програмного забезпечення та його компонентів. Наприклад, структурна схема може відображати компоненти програми, такі як класи, об’єкти, функції, модулі

тощо, та їх зв’язки між собою. Це дозволяє розробникам краще зрозуміти структуру програми та знайти шляхи для її оптимізації та покращення.

Одним з основних переваг використання структурних схем є можливість виявлення помилок та проблем у системі на ранніх етапах проектування. Завдяки візуальному представленню компонентів та їх зв’язків, можна легко виявити помилки та неузгодженості у системі та внести необхідні зміни.

Крім того, структурні схеми допомагають зрозуміти, як компоненти системи можуть бути замінені або модифіковані без зміни загальної структури системи. Це дозволяє забезпечити більшу гнучкість та можливість масштабування системи у майбутньому.

У підсумку, структурні схеми є важливим інструментом для проектування та розробки різноманітних комп’ютерних систем. Вони дозволяють ефективніше проектувати та розробляти системи, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів та забезпечуючи максимальну продуктивність. Крім того, структурні схеми допомагають зрозуміти структуру системи та виявити помилки на ранніх етапах проектування, що дозволяє забезпечити більш високу якість та ефективність роботи системи. Також, використання структурних схем дозволяє зрозуміти, як компоненти системи взаємодіють між собою та як можна оптимізувати їх взаємодію для покращення продуктивності системи.

Отже, структурні схеми є важливим інструментом для розробки та підтримки комп’ютеризованих систем. Вони дозволяють розробникам зрозуміти структуру системи та виявити можливі проблеми, що забезпечує більш високу якість та ефективність роботи системи. Крім того, використання структурних схем дозволяє забезпечити більшу гнучкість та можливість модифікації системи для відповіді на змінні вимоги користувачів та ринку. Отже, використання структурних схем допомагає зробити комп’ютеризовані системи більш пристосованими та готовими до змін.

Вимірювальні канали є невід’ємною частиною комп’ютеризованих систем і використовуються для збору даних з різних датчиків та інших приладів. Ці дані

можуть бути оброблені та відображені на екрані, щоб дати користувачеві необхідну інформацію про стан системи або процесу. Вимірювальні канали можуть бути аналогові, цифрові або гібридні.

Аналогові вимірювальні канали збирають дані у вигляді аналогових сигналів, які вимірюються відповідними датчиками. Ці сигнали потім конвертуються в цифровий формат, щоб бути обробленими комп'ютером. Цифрові вимірювальні канали використовуються для збору даних, які вже знаходяться у цифровому форматі. Ці канали зазвичай використовуються для вимірювання цифрових сигналів, таких як сигнали з електронних лічильників або засобів вимірювання електричних параметрів.

Гібридні вимірювальні канали можуть працювати як аналогові, так і цифрові. Ці канали можуть збирати дані у вигляді аналогових сигналів, а потім конвертувати їх у цифровий формат для подальшої обробки комп'ютером. Іноді також використовуються спеціальні перетворювачі для зміни формату даних.

Вимірювальні канали дозволяють забезпечити вимірювання різноманітних параметрів, таких як температура, вологість, тиск, рівень рідини або газу та інші параметри.

Отже, вимірювальні канали є важливою складовою комп'ютеризованих систем. Вони дозволяють збирати дані про різні параметри, що впливають на вирощування рослин, та допомагають приймати обґрунтовані рішення щодо управління процесом.

Однак, важливо зазначити, що використання комп'ютеризованих систем вимагає значних фінансових витрат та спеціалізованого персоналу для налагодження та обслуговування системи. Крім того, вимірювальні канали мають певні технічні обмеження, які можуть впливати на точність та достовірність даних.

У підсумку, вимірювальні канали є важливими компонентами комп'ютеризованих систем, що дозволяють збирати більше даних про різні параметри вирощування рослин та приймати обґрунтовані рішення щодо

управління ними. Застосування комп’ютеризованих систем з вимірювальними каналами дозволяє підвищити ефективність та продуктивність роботи, знизити витрати та мінімізувати вплив на довкілля, а також забезпечити більш точне та обґрунтоване управління виробництвом. Незважаючи на технічні обмеження та витрати на встановлення та обслуговування системи, використання вимірювальних каналів у комп’ютеризованих системах в аграрному секторі стає все більш поширеним та необхідним для підвищення ефективності та продуктивності виробництва.

Для реалізації запропонованого способу комп’ютеризована система повинна вміщувати у собі лише канал вимірювання кутової швидкості. Структурна схема вимірювального каналу наведена на рис. 2.2.

Канал вимірювання частоти обертання ротора включає в себе механічний зв’язок валу об’єкта вимірювання з блоком зразків моменту інерції і первинним перетворювачем швидкості обертання через муфту спряження. Сигнал з первинного перетворювача передається на блок вимірювання швидкості обертання ротора, який зв’язаний з системним каналом мікро-ЕОМ.

Основними елементами каналу вимірювання частоти обертання є: об’єкт вимірювання (ОВ); муфта спряження (МС); сенсор кутової швидкості (СКШ); цифровий частотомір (ЦЧ). Режим роботи об’єкту вимірювань визначає архітектуру побудови ЦЧ. В статичному режимі застосовують схему частотоміра середніх значень, принцип дії якого засновано на підрахунку кількості імпульсів вихідної частоти сенсора f_C за зразковий часовий інтервал. В динамічному режимі має місце схема цифрового періодоміра (частоміра миттєвих значень), принцип дії якої полягає у квантуванні періоду T_C імпульсами зразкової частоти f_0. Підключення вимірювального каналу до комп’ютера здійснюється до шини PCI.

PCI або PCI Conventional (традиційна шина PCI), Peripheral Component Interconnect. Шина взаємодії периферичних компонентів. Призначена для підключення до материнської плати комп'ютера різноманітних плат розширення.

PCI є синхронною шиною, у якій всі сигнали синхронізуються за тактовим сигналом.

Адреса простору. PCI надає три адресні простори: 1) простір адрес пам'яті, 2) простір адрес вводу-виводу і 3) простір конфігурації.

Адреси пам'яті мають розмір 32 біти (але можуть бути довжиною до 64 біт), підтримують кешування та можуть бути пакетними транзакціями.

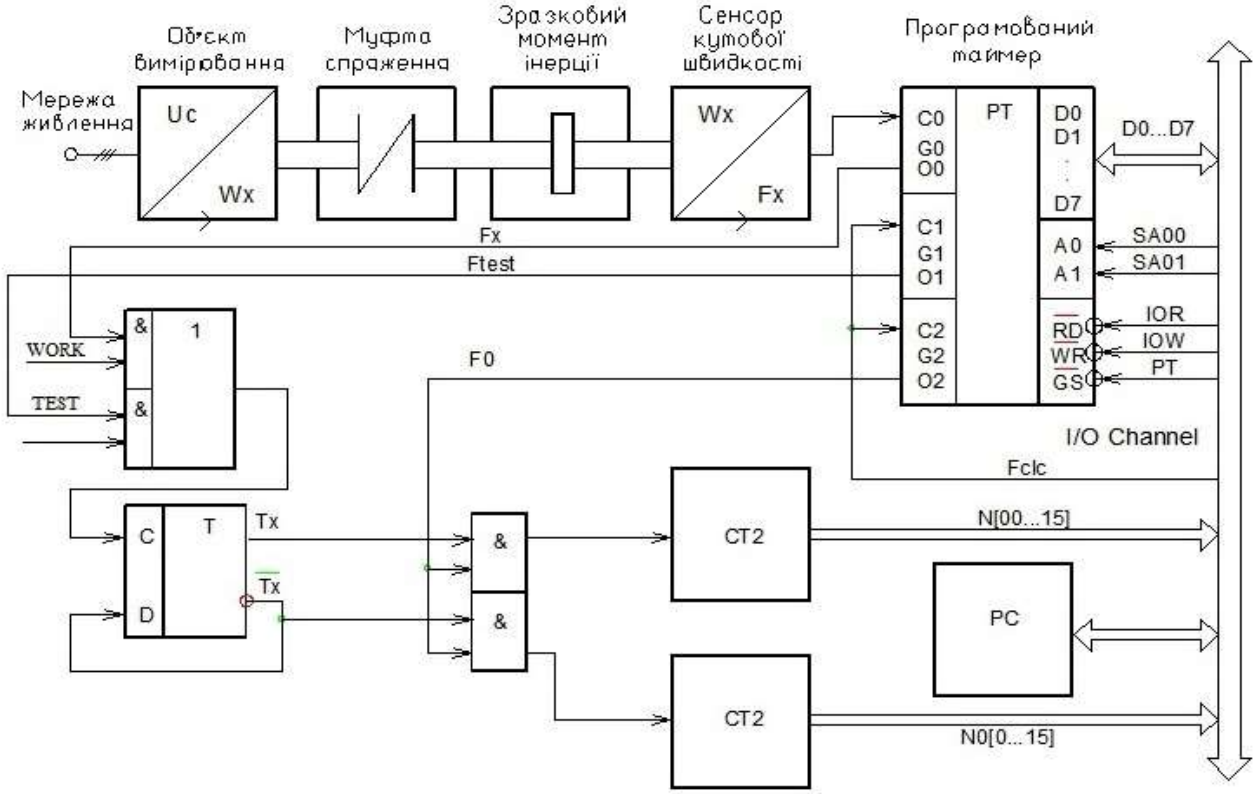


Рисунок 2.2 - Структурна схема вимірювального каналу інформаційної підсистеми механічних характеристик

Адреси вводу-виводу призначені для сумісності з адресним простором портів введення-виводу архітектури Intel x86. Хоча специфікація шини PCI допускає пакетні транзакції в будь-якому адресному просторі, більшість пристроїв підтримують її лише для адрес пам'яті, а не вводу-виводу.

Простір конфігурації PCI забезпечує доступ до 256 байт спеціальних регістрів конфігурації на кожен пристрій PCI. Кожен слот PCI отримує власний діапазон адрес простору конфігурації. Регістри використовуються для налаштування пам'яті пристроїв та діапазонів адрес вводу-виводу, на які вони

повинні реагувати від ініціаторів транзакцій. При запуску комп'ютера, його BIOS (або операційна система) опитує всі порти PCI через простір конфігурації PCI, щоб дізнатися, які пристрої є і які системні ресурси (простір пам'яті, простір введення-виводу, лінії переривання і т. д.) кожному потрібно. Потім він розподіляє ресурси і повідомляє кожному пристрою, який їх розподіл.

Таймери затримки. Архітектура PCI передбачає таймери затримки, призначені для справедливого розподілу пропускної спроможності шини між декількома пристроями. Кожен PCI-пристрій, який може працювати в режимі майстра шини, повинен реалізувати таймер затримки, який обмежує час, протягом якого пристрій може утримувати шину PCI. Таймер запускається, коли пристрій отримує право власності на шину і веде зворотний відлік зі швидкістю тактового імпульсу PCI. Коли лічильник досягає нуля, пристрій має звільнити шину. Якщо інші пристрої не чекають своєї черги на шину, воно може просто знову захопити шину і передати більше даних.

Переривання. Переривання - сигнал від зовнішнього пристрою центральному процесору на те, що він повинен на якийсь час припинити свою поточну роботу і обробити запит від цього пристрою (прийняти дані, віддати дані тощо). Можливість подати сигнал переривання PCI реалізована чотирма лініями. Лінії не підключені паралельно як інші лінії шини PCI. Положення ліній переривання чергуються між слотами, тому те, що для одного пристрою відображається як висновок INTA#, для наступного є INTB#, а для наступного за ним INTC#. Однофункціональні пристрої зазвичай використовують свій INTA# для сигналізації переривання, тому навантаження на пристрій розподіляється рівномірно за чотирма доступними лініями переривання. Це усуває поширену проблему із спільним використанням переривань.

Якщо потрібно в транзакції вказати 64-бітну адресу, то така адреса передається у два етапи. Ініціатор передає молодші 32 біти адреси у супроводі спеціального командного коду, який говорить про те, що це ще не вся адреса. У

наступному циклі ініціатор передає 32 біта адреси, що залишилися (старші), із зазначенням код реальної команди.

Дані по шині PCI передаються у вигляді транзакцій – цілісних логічно сформованих бітових партій (фаз), кожна з яких одна без одної не має сенсу. Кожна транзакція складається із фази адреси фази даних. Є ініціатор (відправник) транзакції та є одержувач. Бувають транзакції на читання та запис даних. Будь-яка із сторін може призупинити або зупинити передачу даних у будь-який момент, якщо раптом не встигатиме обробляти дані.

Ініціювати транзакцію може будь-який пристрій, підключений до PCI. Але перш ніж почати свою транзакцію, пристрій має запитати на це дозвіл у арбітра PCI-шини, що знаходиться на материнській платі. Арбітр, залежно від стану шини, може надати або не надати такий дозвіл. Якщо дозвіл надано, ініціатор адресу в 32-бітному форматі та 4-бітний код команди, який говорить про те, що необхідно зробити за цією адресою. Після передачі своєї транзакції, пристрій чекає на відповідь від адресата.

Всі транзакції PCI контролюються п'ятьма основними сигналами, що управляють, два з яких видаються ініціатором транзакції (FRAME# і IRDY#), а три управляються метою (адресатом) (DEVSEL#, TRDY# і STOP#). Є ще два додаткові арбітражні сигнали (REQ# і GNT#), які використовуються для отримання дозволу на ініціювання транзакції.

Будь-який пристрій на шині PCI, здатний виступати в ролі провідного пристрою, може ініціювати транзакцію з будь-яким іншим пристроєм. Щоб гарантувати, що одночасно ініціюється лише одна транзакція, кожен майстер повинен спочатку дочекатися сигналу надання шини GNT від арбітра, розташованого на материнській платі.

Під час передачі можуть виникати помилки. Шина здатна виявити їх, але не здатна виправити. Натомість пошкоджені дані надсилаються заново.

Як сенсор кутової швидкості використаний інкрементний енкодер фотоімпульсного типу. Його принцип дії оснований на наступному.

Енкодери фотоімпульсного типу працюють із використанням цифрових технологій. У комплект приладу входять світло- та фотодіоди. Промінь, що відправляється, пропускається через прозоре колесо, закріплене на валу, і має спеціальні мітки. Фотодіоди приймають інформацію та відправляють сигнали в керуючий модуль. Інкрементний датчик комплектується диском, на якому відсічки розподілені рівномірно по всьому колу (рис. 2.3).

Для будь-якого енкодерного диска характерна наявність єдиної нульової позначки, за якою відміряється повний оборот валу. За допомогою цієї мітки, що має калібрувальне призначення, розраховується швидкість обертання валу електроприводу. Сигнали, отримані від фотоелементів, обробляються та перетворюються спеціальними електронними пристроями.

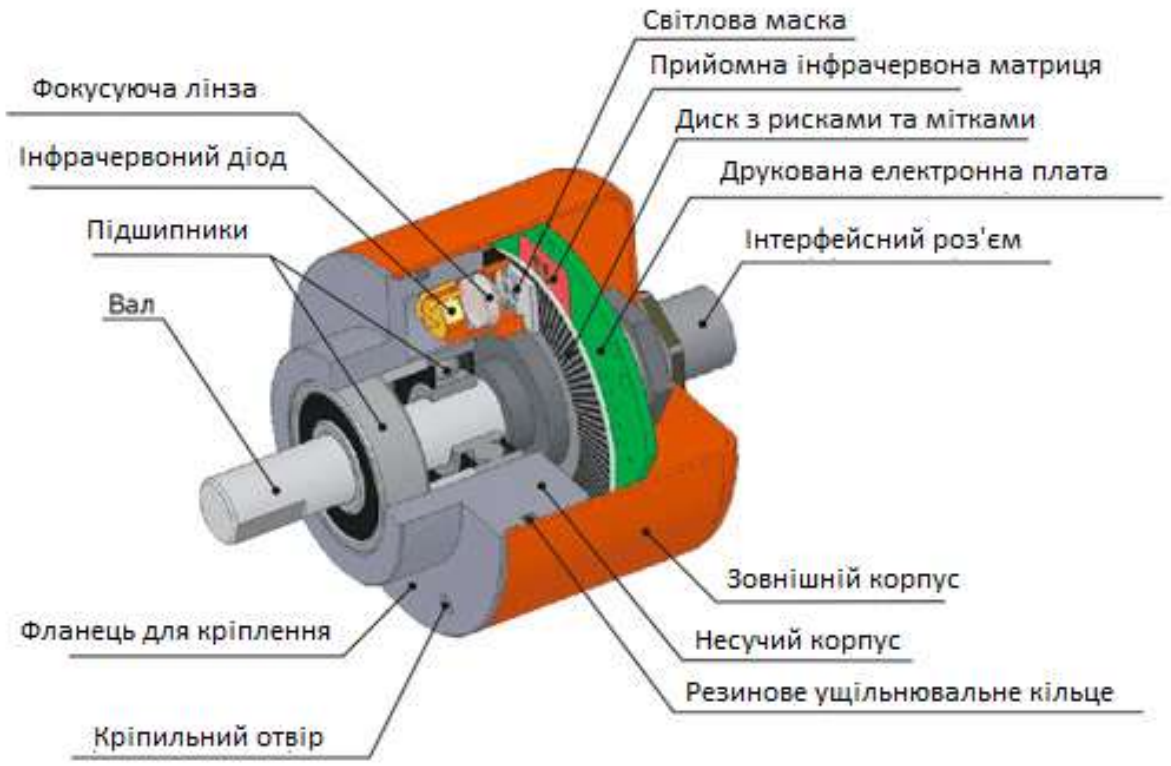


Рисунок 2.3 - Будова сенсора кутової швидкості

Муфта спряження - це механічний пристрій, який використовується для з'єднання двох валів з метою передачі обертального моменту від одного вала до

іншого. Муфти спряження забезпечують надійне з'єднання валів, одночасно дозволяючи їм обертатися незалежно один від одного.

Муфти спряження можуть бути різних типів і конструкцій, залежно від призначення та умов експлуатації. Наприклад, різні типи муфт можуть мати різну міцність, гнучкість, резонансну частоту та інші параметри.

Одним з основних типів муфт спряження є муфта зубчаста. Ця муфта складається з двох половинок, які мають зубчасті виступи. При спряженні двох половинок зубчастої муфти виступи однієї половинки збігаються з виступами іншої, що забезпечує надійне з'єднання валів.

Іншим типом муфти спряження є муфта з гумовими вставками. Ця муфта складається з двох половинок, які мають вставки з гуми або інших еластомерних матеріалів. Гумові вставки забезпечують додаткову гнучкість та зменшують вібрації, що може бути корисним у деяких додаткових застосуваннях.

Окрім цього, можуть використовуватися такі типи муфт, як муфти з фланцем, муфти з клапаном, муфти з гнучким з'єднанням та інші. В електродвигунах муфти спряження зазвичай використовуються для з'єднання ротора з валом. Це дозволяє ефективно передавати обертальний момент від ротора до вала та забезпечує більш ефективну роботу електродвигуна.

Важливими характеристиками муфт спряження є міцність та гнучкість. Міцність муфти забезпечує надійне з'єднання валів та дозволяє передавати значний обертальний момент, тоді як гнучкість дозволяє компенсувати незначні зсуви валів, що виникають у процесі роботи.

Виконаємо аналіз виділених структурних елементів комп’ютеризована система механічних характеристик.

Протягом довгого часу було прийнято вважати, що СКШ - це безінерційна ланка чи інерційна ланка першого порядку з невеликою постійною часу. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що вал об’єкту вимірювань, СКШ і МС, за допомогою якої СКШ з’єднується з валом об’єкту вимірювань (ротором електродвигуна), є складним коливальним ланцюгом.

Низькочастотні коливання цього ланцюга, які сильно впливають на роботу електроприводів і систем контролю, в більшій мірі залежать від властивостей передач, що використовуються (муфт, зубчатих пар чи ремінної передачі), ніж від самого СКШ. Крім цього, люфти та пружні деформації в передачах створюють запізнення і спотворення сигналу при ударному прикладенні моменту навантаження і відповідній зміні кутової швидкості.

На практиці найбільш часто використовують наступні способи безлюфтового з'єднання [68]: за допомогою напівжорсткої муфти; за допомогою клиноремінної передачі; за допомогою гнучкого валу; за допомогою пружних валів (сильфон, мембрана). З'єднання за допомогою жорсткої муфти використовується рідко із-за можливого ексцентриситету, який впливає на достовірність результатів вимірювань і може привести до поломки сенсора. Пружні муфти відрізняються від жорстких муфт наявністю пружного елементу, при деформації якого здійснюється взаємне переміщення напівмуфт, що надає приводу крутильну податливість ї компенсує зміщення осей з'єднаних муфтою валів.

При невірному виборі з'єднувального елементу похибки вимірювань, що пов'язані із пружними деформаціями, можуть досягати недопустимих значень. В літературі, наприклад [69-71], розглянуті питання впливу на муфту навантажень в приводах з електричною машиною і з цієї точки зору розроблені методики розрахунку та вибору з'єднувальних муфт.

Неправильний вибір МС може привести до значної похибки вимірювання кутової швидкості. Щоб з'ясувати вплив муфти на результати вимірювання $\omega_r(t)$ розглянемо її як пружну муфту [72]. Кути повороту валу електричної машини і валу сенсора кутової швидкості позначимо відповідно через $\varphi_д$ та $\varphi_м$. Приведений до валу електричної машини момент інерції муфти і сенсора $J_м$ та момент інерції рухомих частин електричної машини $J_м$ вважаємо постійними. Ця модель є універсальною для всіх видів безлюфтових з'єднань.

Розглянемо тепер принципи побудови періодоміра [73-75]. Період T_X

приходу імпульсу сенсора швидкості обертання визначиться:

$$T_X = \frac{60}{n(t)z}, \tag{2.14}$$

де $n(t)$ - кутова частота обертання ротора, об/хв; z - роздільна здатність сенсора швидкості обертання.

Тоді на виході частотоміра миттєвих значень буде код $N_X(t)$, рівний:

$$N_X(t) = T_X(t)\, f_0 = \frac{60\, f_0}{n_X z}, \tag{2.15}$$

де f_0 - частота квантуючих імпульсів.

Враховуючи, що $n(t)$, $\left[об/хв \right] = \frac{30}{\pi}\omega_r(t), \left[рад/с \right]$, рівняння (2.15) запишемо:

$$N_X(t) = \frac{2\pi f_0}{\omega_r(t) z}. \tag{2.16}$$

Максимальна ємність бінарного лічильника складає

$$N_\omega = N_{\omega\max} = 2^n, \tag{2.17}$$

де n - розрядність бінарного лічильника.

Враховуючи (2.16), рівняння (2.17) запишемо:

$$2^n = \frac{60\, f_0}{z \cdot n_{x\min}}. \tag{2.18}$$

Тоді з рівняння (2.18) визначимо нижню межу вимірювання $n_{x\ min}$:

$$n_{x\min} = \frac{60\, f_0}{z \cdot 2^n}. \tag{2.19}$$

Позначимо через $t_{x\ min}$ час, за який електрична машина досягає частоти обертання $n_{x\ min}$ в процесі пуску. Він буде залежати від n, f_0, z та від параметрів самої електричної машини. На рис. 3.2 зображено розраховане сімейство залежностей $t_{x\min} = f\left(f_0\right)$ при $n = 15$ для двигунів 4А5А4, 4А71А4, 4А80А4 при $z = 1000$. Аналіз рис. 2.4 показує, що електрична машина досягає частоти $n_{x\ min}$ менш ніж за 6 мс.

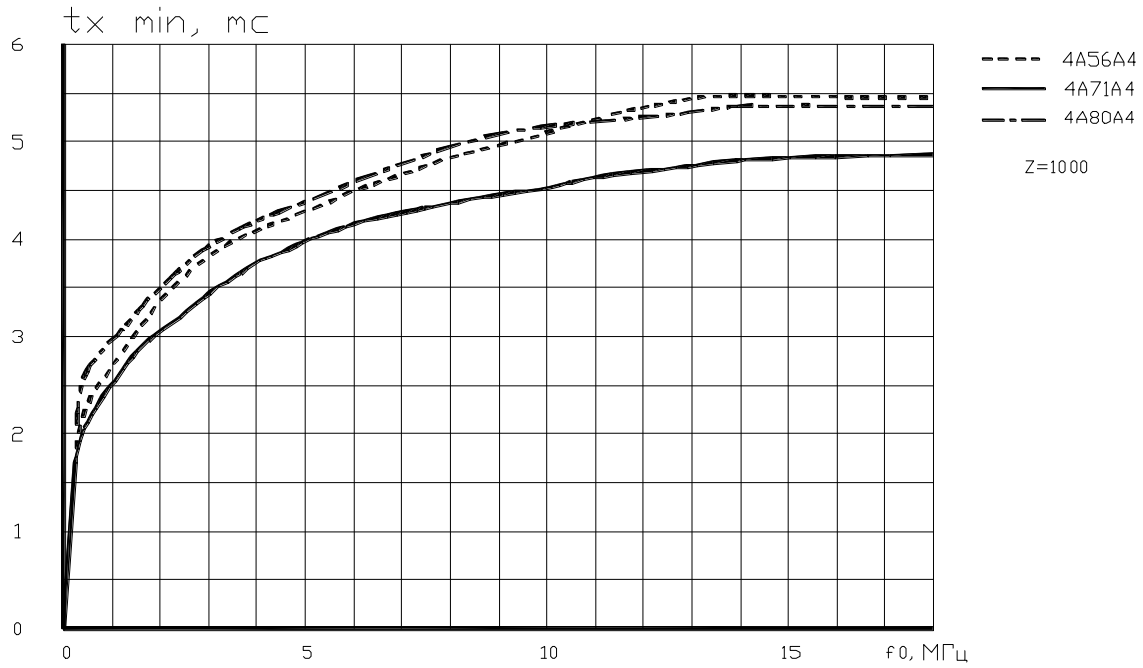


Рисунок 2.4 - До питання про визначення нижньої межі вимірювання

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДСИСТЕМИ

3.1. Розробка алгоритму та програмного забезпечення інформаційної підсистеми для визначення механічних характеристик

На основі викладеного способу розроблений узагальнений алгоритм роботи засобу вимірювання механічних характеристик, який зображений на рис. 3.1.

Таким чином, запропонований спосіб дає змогу визначати не тільки механічну характеристику $M_{ем} = f(\omega_r)$, а й інші характеристики електричної машини в динамічному режимі його роботи: електромагнітна механічна характеристика $M_д = f(\omega_r)$, залежність моменту опору ротору електричної машини від швидкості обертання $M_0 = f(\omega_r)$, момент інерції ротору електричної машини J та інші, необхідні для дослідників електричної машини, характеристики. Це дає змогу суттєво розширити область використання запропонованого способу.

В Додатку Б наведено лістинг програмного забезпечення для обміну інформації із апаратною частиною системи для визначення механічних характеристик електричної машини з використанням мови програмування Pascal (компілятор FreePascal). Пояснимо детальніше принципи її роботи.

1. Оголошення і використання модуля Dos:

```
uses Dos;
```

Модуль Dos надає доступ до низькорівневих функцій операційної системи, зокрема до портів вводу-виводу.

2. Константи PCI_ADDRESS_PORT та PCI_DATA_PORT:

```
const PCI_ADDRESS_PORT = $0CF8;
      PCI_DATA_PORT = $0CFC;
```

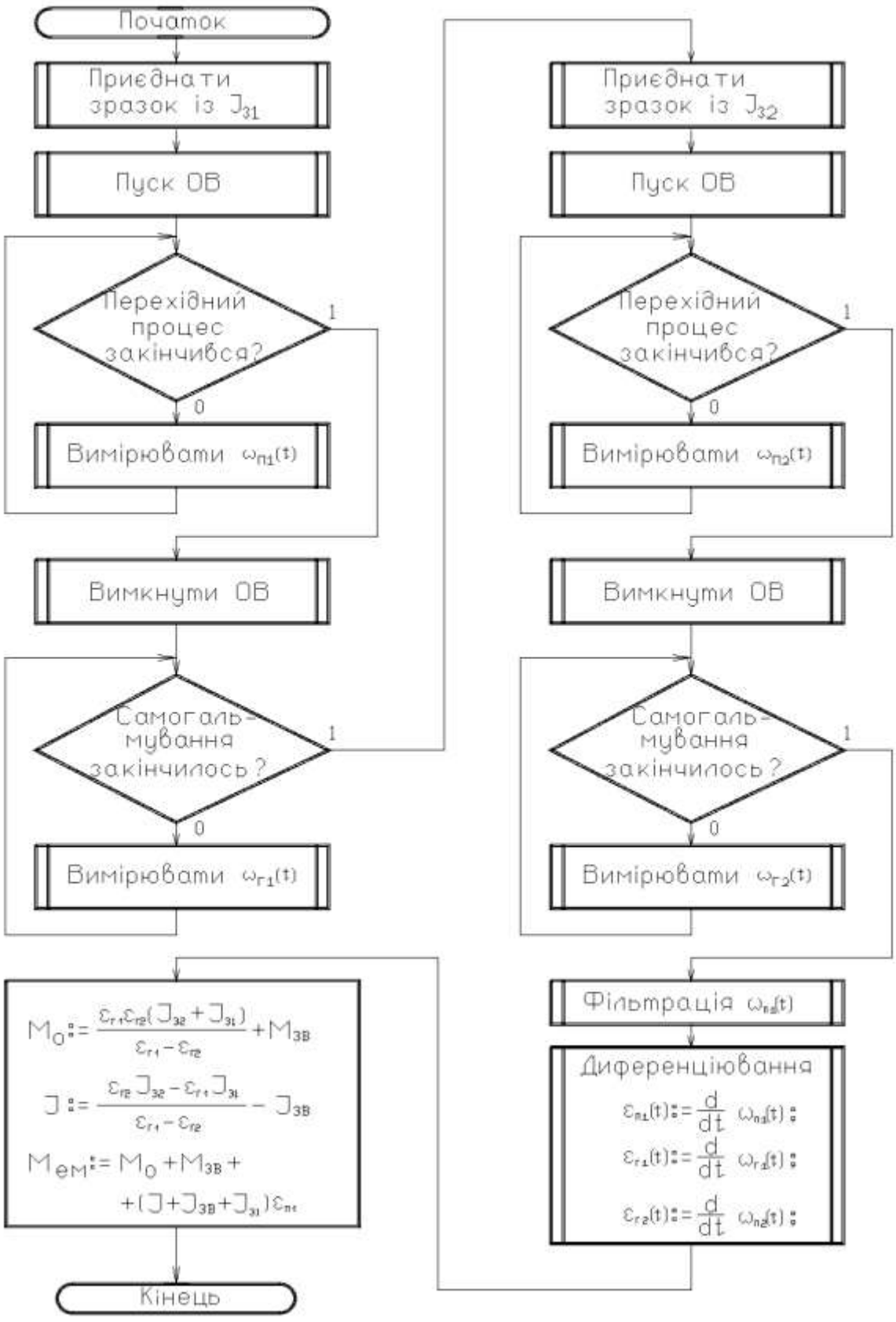


Рисунок 3.1 - Алгоритм роботи інформаційної підсистеми механічних характеристик

Ці константи визначають адреси портів для доступу до шини PCI. За допомогою порту PCI_ADDRESS_PORT встановлюється адреса пристрою, а з порту PCI_DATA_PORT здійснюється читання або запис даних.

3. Процедура WritePCIAddress:

```
procedure WritePCIAddress(bus, device, functionCode, registerOffset: Byte);
var address: LongWord;
  begin
    address := $80000000 or (bus shl 16) or (device shl 11) or (functionCode shl 8) or
(registerOffset shl 2);
    PortDWord[PCI_ADDRESS_PORT] := address;
  end;
```

Ця процедура записує адресу пристрою в порт PCI_ADDRESS_PORT. Адреса визначається за допомогою операцій побітового зсуву і побітового "або". Кожен параметр (bus, device, functionCode, registerOffset) використовується для створення 32-бітної адреси, яка відповідає конкретному реєстру пристрою на шині PCI.

4. Функція ReadPCIData:

```
function ReadPCIData: LongWord;
  begin
    ReadPCIData := PortDWord[PCI_DATA_PORT];
  end;
```

Ця функція зчитує дані з порту PCI_DATA_PORT і повертає отримане значення.

5. Процедура WritePCIData:

```
procedure WritePCIData(data: LongWord);
  begin
    PortDWord[PCI_DATA_PORT] := data;
  end;
```

Ця процедура записує передані дані data до порту PCI_DATA_PORT.

6. Процедура ExchangeDataThroughPCI:

```
procedure ExchangeDataThroughPCI;
var bus, device, functionCode, registerOffset: Byte;
data: LongWord;
```

```
  begin { Встановлюємо параметри шини PCI для пристрою }
    bus := 0; // Номер шини
    device := 10; // Номер пристрою
    functionCode := 0; // Номер функції
    registerOffset := 0; // Зсув реєстру
{ Записуємо дані до реєстру пристрою }
    WritePCIAddress(bus, device, functionCode, registerOffset);
    data := 12345; // Дані, які необхідно записати
    WritePCIData(data);
{ Читаємо дані з реєстру пристрою }
    WritePCIAddress(bus, device, functionCode, registerOffset);
    data := ReadPCIData;
{ Виводимо отримані дані }
    WriteLn('Отримані дані: ', data);
  end;
```

Ця процедура демонструє обмін даними через шину PCI. Спочатку вона встановлює параметри шини PCI, такі як номер шини, номер пристрою, номер функції та зсув реєстру, які використовуються для ідентифікації конкретного реєстру пристрою. Далі вона записує дані 12345 до вказаного реєстру за допомогою процедури WritePCIData. Потім вона знову використовує процедуру WritePCIAddress для встановлення адреси реєстру і читає дані з реєстру за допомогою функції ReadPCIData. Нарешті, отримані дані виводяться на екран.

7. Основна частина програми:

```
begin
  ExchangeDataThroughPCI;
end.
```

Основна частина програми просто викликає процедуру ExchangeDataThroughPCI, яка виконує обмін даними через шину PCI.

3.2. Оцінка метрологічних характеристик вимірювального каналу інформаційної підсистеми

Рівняння похибок вимірювального каналу кутової швидкості вміщує у собі як систематичну $\overline{\Delta}_\omega(t)$, так і випадкову складові $\dot{\Delta}_\omega(t)$. Систематична періодична складова похибки $\overline{\Delta}_\omega(t)$ визначається впливом ексцентриситетом з'єднуваних валів та похибкою квантування, яку можна записати таким чином:

$$\delta_{\text{кв}}(t) = \frac{1}{N_x(t)} = \frac{z\,\omega_r(t)}{2\pi f_0}. \tag{3.1}$$

Випадкова складова $\dot{\Delta}_\omega(t)$ в динамічному режимі роботи періодоміра визначається, в основному, такими складовими: похибкою дискретизації та похибкою, що зумовлена усередненням швидкості на шляху $2\pi/z$ радіан. При цьому перша складова випадкової похибки особливо проявляється в зоні високих швидкостей, а друга - в зоні низьких швидкостей.

Сукупність рівнянь похибок вимірювального каналу кутової швидкості являє собою його метрологічну модель:

$$\begin{cases} \Delta_\omega(t) = \overline{\Delta}_\omega(t) + \dot{\Delta}_\omega(t)\,; \\ \overline{\Delta}_\omega(t) = \dfrac{z\,\omega_r(t)}{2\pi f_0} - \dfrac{E_\gamma}{\omega_0}\cos\left(\omega_0\left(t + \dfrac{\exp(-\lambda t)}{\lambda}\right)\right); \\ \dot{\Delta}_\omega(t) = \sqrt{\left(\dfrac{\omega_r(t)\,z}{2\pi f_0}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\dfrac{\pi\varepsilon_{max}}{z\omega_r^2(t)}\right)^2 \sigma_2^2}, \end{cases} \tag{3.2}$$

де ε_{max} – максимальне прискорення руху ротора об'єкту вимірювань в динамічному режимі; $\sigma_1 = 1/\sqrt{6}$ і $\sigma_2 = 1/\sqrt{3}$ – середньоквадратичні відхилення відповідно для трикутного і рівномірного законів розподілу в інтервалі (-1; 1).

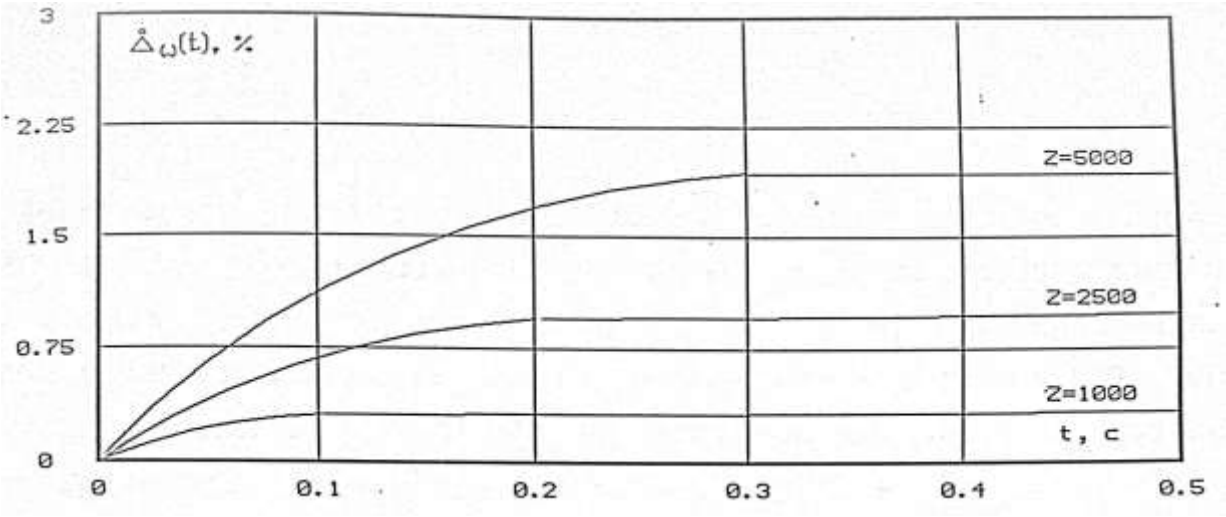


Рисунок 3.2 - Зміна випадкової складової похибки $\dot{\Delta}_\omega(t)$ в процесі розбігу об’єкту вимірювань

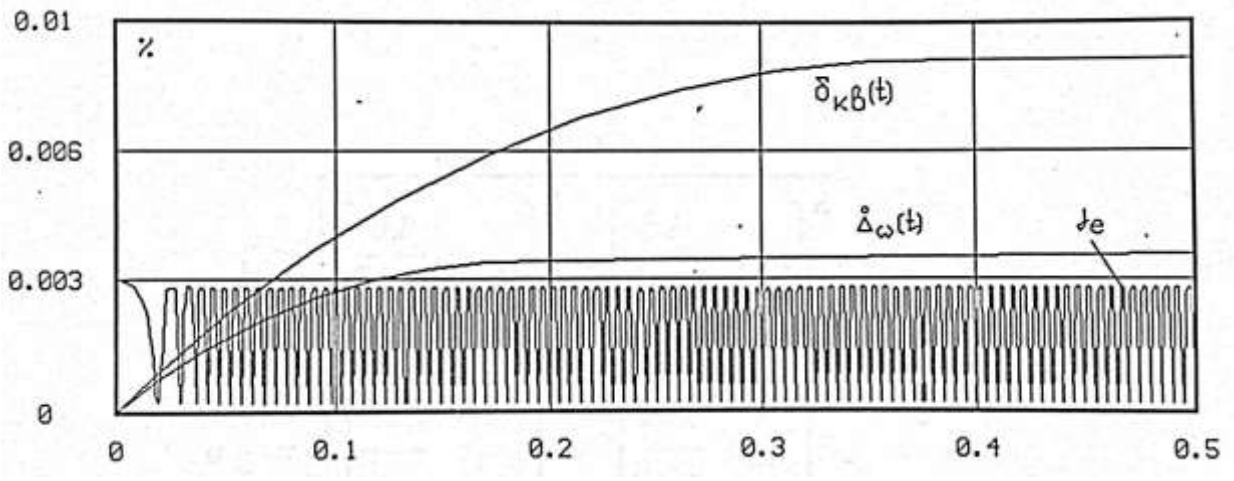


Рисунок 3.3 - Складові загальної похибки вимірювального каналу $\Delta_\omega(t)$

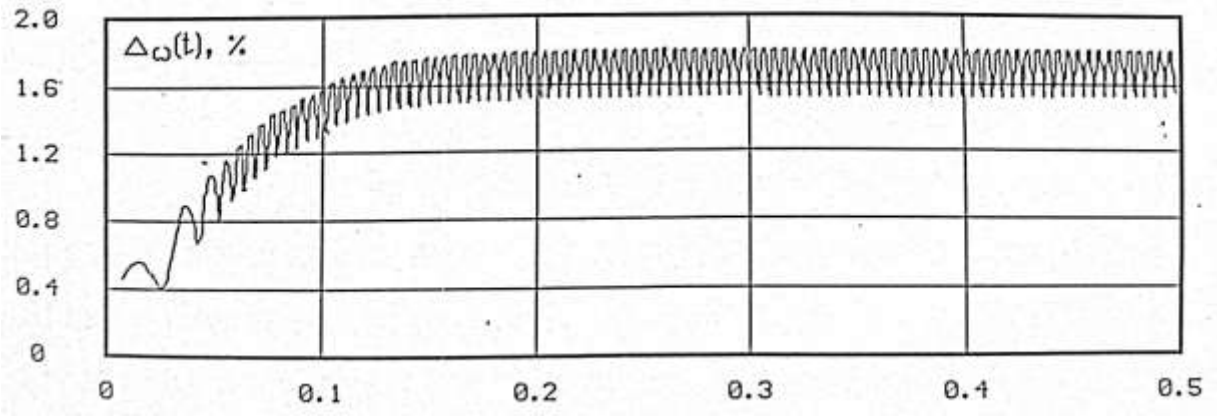


Рисунок 3.4 - Загальна похибка вимірювального каналу $\Delta_\omega(t)$

Заміна системи диференціальних рівнянь експоненціальною характеристикою розбігу в даному випадку не може суттєво вплинути на результати аналізу метрологічних характеристик, так як це означає лише підвищення вимог до інформаційної підсистеми.

Характер зміни похибки $\dot{\Delta}_\omega(t)$ при f_0 = 5МГц, ε_{max} = 100 с$^{-2}$ для різних значень z показаний на рис. 3.2. На рис. 3.3 зображені складові загальної похибки $\Delta_\omega(t)$, а на рис. 3.4 – загальна похибка $\Delta_\omega(t)$.

Аналіз формули (3.2) та рис. 3.2 ÷ 3.4 показує, що загальна похибка $\Delta_\omega(t)$ не постійна у часі і змінюється певним чином. На основі формули (3.2) можливе створення алгоритмів роботи інформаційної підсистеми, які дозволяють в процесі вимірювання змінювати параметри z чи f_0 для підтримки заданої користувачем верхньої межі похибки $\Delta_\omega(t)$ – так звані періодоміри із передвключеними чи післявключеними подільниками частоти.

3.3. Оцінка алгоритмічних похибок інформаційної підсистеми механічних характеристик

Алгоритмічні похибки є однією з найбільш поширених та важливих проблем в обчислювальних алгоритмах. Ці похибки виникають, коли алгоритми, які повинні виконувати математичні операції, роблять помилки в обчисленнях через недосконалість у програмуванні або обмеженості обчислювальної техніки.

Однією з найпоширеніших алгоритмічних похибок є помилки округлення. Ці похибки виникають, коли числа обрізаються до певного числа знаків після коми. Наприклад, якщо треба обчислити результат ділення 1 на 3, то правильний результат буде 0,3333... Однак, якщо число обрізати до двох знаків після коми, то результат буде 0,33, що є неправильним. Такі помилки можуть накопичуватись та призводити до серйозних похибок в обчисленнях.

Іншою алгоритмічною похибкою є помилки у числовій стабільності. Ці похибки виникають, коли обчислювальні алгоритми мають дуже великі або дуже малі числа. Ці числа можуть бути надто великими або маленькими для

обчислювальної техніки, що призводить до великих похибок у результаті. Наприклад, якщо використовувати дуже малі числа у формулі, то в результаті може виникнути ділення на нуль або дуже велике число.

Третім видом алгоритмічних похибок є помилки в програмуванні. Ці похибки виникають, коли програмісти роблять помилки у написанні програм, що призводить до неправильних результатів обчислень. Такі помилки можуть бути дуже складними для виявлення та виправлення, оскільки вони можуть виникати на будь-якому етап роботи програми та при різних умовах її виконання.

Для зменшення алгоритмічних похибок програмісти використовують різні техніки, такі як уточнення обчислювальних формул, використання точних числових типів даних, аналіз результатів та використання різних методів тестування програм. Також важливо забезпечити якісну технічну підтримку програми, яка зможе вчасно виявляти та виправляти помилки.

Однак, незважаючи на всі заходи для зменшення алгоритмічних похибок, вони не можуть бути повністю усунені. Це пов'язано з обмеженістю техніки та складністю деяких обчислювальних задач. Тому важливо забезпечити ретельну перевірку та валідацію результатів обчислень, а також додаткові заходи безпеки та запобігання пошкодженню даних.

У загальному, алгоритмічні похибки є серйозною проблемою в обчислювальних алгоритмах, яка може призводити до серйозних наслідків у різних областях, від фінансової до медичної сфери. Тому, програмісти повинні звертати особливу увагу на якість та точність своїх програм, а також забезпечувати їх валідацію та перевірку на вірність результатів.

До алгоритмічних похибок інформаційної підсистеми механічних характеристик відносяться похибки алгоритмічної обробки результатів вимірювань $\omega_r(t)$, а саме: диференціювання, згладжування та обчислення параметрів J, M_0, M_{EM}. Також більш докладно зупинимось на похибках $\sigma_J, \sigma_{M_0}, \sigma_{M_{EM}}$ обчислення параметрів.

Згідно теорії похибок вимірювань, середньоквадратичні похибки

вимірювання $\sigma_J, \sigma_{M_0}, \sigma_{M_{EM}}$ в дослідах пуску і самогальмування будуть рівні:

$$\sigma_J = \sqrt{\left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon_{r1}}\sigma_{\varepsilon_{r1}}\right)^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon_{r2}}\sigma_{\varepsilon_{r2}}\right)^2}, \tag{3.3}$$

$$\sigma_{M_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial M_0}{\partial \varepsilon_{r1}}\sigma_{\varepsilon_{r1}}\right)^2 + \left(\frac{\partial M_0}{\partial \varepsilon_{r2}}\sigma_{\varepsilon_{r2}}\right)^2}, \tag{3.4}$$

$$\sigma_{M_{EM}} = \sqrt{\left(\frac{\partial M_{EM}}{\partial \varepsilon_{\pi 1}}\sigma_{\varepsilon_{\pi 1}}\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{EM}}{\partial \varepsilon_{r1}}\sigma_{\varepsilon_{r1}}\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{EM}}{\partial \varepsilon_{r2}}\sigma_{\varepsilon_{r2}}\right)^2}, \tag{3.5}$$

де $\sigma_{\varepsilon_{\pi 1}}, \sigma_{\varepsilon_{r1}}, \sigma_{\varepsilon_{r2}}$ – середньоквадратичні похибки вимірювання прискорень відповідно в дослідах пуску і гальмування із J_3.

Цілком ймовірно, що $\sigma_{\varepsilon_{\pi 1}} = \sigma_{\varepsilon_{r1}} = \sigma_{\varepsilon_{r2}} = \sigma_\varepsilon$.

Провівши відповідні математичні перетворення та знайшовши частинні похідні, запишемо:

$$\sigma_J = \frac{\sigma_\varepsilon J_\varepsilon}{(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2})^2}\sqrt{\varepsilon_{r2}^2 + \varepsilon_{r1}^2}, \tag{3.6}$$

$$\sigma_{M_0} = \frac{\sigma_\varepsilon J_\varepsilon}{(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2})^2}\sqrt{\varepsilon_{r2}^4 + \varepsilon_{r1}^4}, \tag{3.7}$$

$$\sigma_{M_{EM}} = \frac{\sigma_\varepsilon J_\varepsilon}{(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2})^2} \cdot \tag{3.8}$$

$$\cdot \sqrt{[\varepsilon_{\pi 1}(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2})]^2 + [\varepsilon_{r2}(\varepsilon_{r2} + 1)]^2 + [\varepsilon_{r1}(\varepsilon_{r1} + 1)]^2}.$$

Зазначимо, що $\sigma_J, \sigma_{M_0}, \sigma_{M_{EM}}$ є функції від $\omega_r(t)$ та $\varepsilon_{r2} = f(k)$.

Тому розрахунки по формулах (3.6) ÷ (3.8) складні і їх можна провести тільки числовими методами. Результати розрахунків за формулами (3.6) ÷ (3.8) при $J_3 \approx J$, показують, що характер зміни $\sigma_J, \sigma_{M_0}, \sigma_{M_{EM}}$ в часі нелінійний, найбільші значення похибок мають місце в зоні низьких швидкостей обертання і не перевищують відповідно 0.5%, 1.9%, 1.5%.

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі бакалавра було досліджено:

1. Математична модель об’єкту вимірювання, оцінено вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів на досліджуваний параметр $\omega_r(t)$.

2. Вплив внутрішніх параметрів об’єкту вимірювання на його характеристики при різних режимах роботи об’єкту вимірювання (пуск, статичний режим, реверс, ударне навантаження, повторно-динамічний режим, самогальмування) за допомогою функцій чутливості. Проведений аналіз показав неоднакову ефективність визначення параметрів J та M_0 в різних режимах роботи об’єкту вимірювання. Статичний режим зовсім неефективний для визначення J. В режимах пуску, реверсу, ударного навантаження і повторно-динамічному режимі можна визначити всі необхідні параметри.

3. Спосіб та алгоритм визначення J та M_0 ротора об’єкту вимірювання на основі використання інформації про зміну кутової швидкості в режимі його розгону і самогальмування. Використання інформації про зміну кутової швидкості в режимі розбігу об’єкту вимірювання і визначених J та M_0 дає змогу обчислювати механічну характеристику об’єкту вимірювання.

4. Узагальнену структурну схему та алгоритм роботи інформаційної підсистеми механічних характеристик.

5. Похибки та метрологічні характеристики вимірювального каналу інформаційно-вимірювальної системи.

Для підвищення ефективності випробовувань електричних машин і дослідження вимірювальних перетворень у інформаційній підсистемі механічних характеристик необхідно використовувати їх математичні моделі, а також проводити вимірювання в динамічному режимі роботи інформаційної підсистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (2004). IEEE Std 112–2004 from 12th May 2004. (Revision of IEEE Std 112–1996). New York: American National Standard Institute.

2. Anuchin, A., Shpak D., Zharkov, A., Ostrirov, V., & Vagapov, Y. (2017). A method of determining the maximum performance torque-speed characteristic for an induction motor drive over its entire speed range. IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (12–13 October, pp. 1–5).

3. Соболєв В.С. Актуальні питання розвитку теорії інтелектуальних вимірювальних систем. *Прибори і системи управління*, 1989. № 3. С.16-19.

4. Iserman, R. (1981). Digital Control Systems. Berlin: Springer-Verlag.

5. Toman, M., Cipin, R., Mach, M., & Vorel, P. (2017). Application of acceleration method for evaluation of induction motor torque-speed characteristics. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (6–9 June, pp. 1–4).

6. Котеленець Н.Ф., Кузнєцов Н.Л. Випробування і надійність електричних машин. М.: Вища.шк., 1988.

7. Bodolai, T. (2010). Computer-aided Measurement Method for Determination of Torque-Speed Characteristics of Electrical Motors Used in Practical Education. Journal of Physics, 1, 1–7.

8. Natrasevschi, A. (1971). Installation and Method of Recording Electric Motor’s Torque-Speed Curve Under Steady-State and Dynamic Regimes. IEEE Transactions on Industry and General Applications, 7, 500–503.

9. Кучерук В.Ю. Аналіз існуючих засобів вимірювання механічних характеристик електричних машин. *Вимірювальна техніка та метрологія*, Львів, №54. 1999. С.125-138.

10. Selim H., & Girgis, G.A. (1986). Microprocessor-Based Digital

Accelerometer and its Application in an Instrument for Motor Torque-Speed Characteristic Display During the Transient Interval. IEEE Transactions on industrial electronics, 44–48.

11. Buinac, R., & Tomljenovic, V. (2013). Determination of the torque-speed characteristic of induction motor in electric machinery education. 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (20–24 May, pp. 765–769).

12. Szabados, B., Dableh, J.H., Findlay, R.D., & Stafford, D. (1989). A new approach for measurement of the torque-speed characteristics of induction motors. Fourth International Conference on Electrical Machines and Drives (13–15 September, pp 246–350).

13. Хомерики О.К., Саонішвілі Т.П., Іванов А.В. Структурні методи підвищення точності пристроїв непрямого виміру крутного моменту. В кн.: Інформаційно-вимірювальні системи. Тези доповідей. Вінниця, 1985, С. 200-201.

14. Геллер Б., Гамата В. Вищі гармоніки в асинхронних машинах. Пер. з англ. М.: Енергія, 1981. 352 с.

15. Szabados, B., Dableh, J.H., Findlay, R.D., Obermeyer, G.M., & Draper, R.E. (1990). Measurement of the torque-speed characteristics of induction motors using an improved new digital approach. EEE Transactions on Energy Conversion, 5, 565–571.

16. А.с. 1499290 СРСР; МКИ G 01 R 31/34 Непрямий спосіб визначення механічних і пускових характеристик асинхронного електродвигуна. Фіщук В.С., Криволапчук І.Г. 4310013/24-10; заяв. 27.07.87; опубл. 07.08.89, Бюл. №29, 3 с.

17. Pfingsten, G., & Hameyer, K. (2017). Highly efficient approach to the simulation of variable-speed induction motor drives. Science Measurement & Technology IET, 11, 793-801.

18. Жерве Г.К. Промислові випробування електричних машин. Л.: *Енергоатомвидав*. Ленингр. відділення, 1984. 408 с.

19. Кралічкін Л.К. Вимірювання статичного крутного моменту асинхронних

електродвигунів. *Метрологія,* 1978. № 9. С. 12-16.

20. Chan, T.F. (1993). Determination of the Torque-Speed Characteristic of an Induction Motor Using a Curve-Fitting Technique. International Journal of Electrical Engineering Education, 366–373.

21. Podzharenko, V.O., & Kucheruk, V.Y. (1996). Computer-Measuring System of the Mechanical Characteristics of Electrical Drives. Conference of Electrical Drives and Power Electronics (1–3 October 1996, pp. 633–637).

22. Акімов Л.В., Борзяк Ю.Г., Колесник А.Д., Литвинов О.І., Сосницький І.І. Дослідження асинхронних двигунів перспективних серій. *Електротехніка*, №10, 1981. С. 29-32.

23. Акімов Л.В., Борзяк Ю.Г., Литвинов О.І., Сосницький І.І. Ідентифікація характеристик асинхронних двигунів електроприводів загальнопромислового призначення. Зб. *Електротехнічна промисловість. Сер.* «Електричні машини». М.: Інформелектро, Вип.1(131), 1982. С. 5-7.

24. Emmrich, K., Brune, A., & Ponick, B. (2014). Evaluation of an Analytical, Efficiency-Optimized Torque-Speed Characteristic of Induction Machines Coupled with a Thermal-Electromagnetic Energy Consumption Calculation. International Conference on Electrical Machines (2–5 September, pp. 762–767.).

25. Niu, S., Ho, S.L., & Fu, W. (2015). Fast Computation of Torque-Speed Characteristics of Induction Machines. IEEE International Magnetics Conference (11–15 May, p. 1).

26. Синельніков Е.М., Сомихіна Г.С. Вимірювання крутних моментів асинхронних двигунів при розгоні. *Електрика*. 1950. №7. С.48-53.

27. А.с. 343169 СРСР; МКИ G 01 M 1/10 Спосіб визначення залежності крутного моменту від швидкості двигуна. Барський С.З., М'ясников Н.А. 1404659/18-10; заяв. 17.02.70; опубл. 22.04.72, Бюл. №20, 2с.

28. Лейтман М.Б. Автоматичне вимірювання вихідних параметрів електродвигунів: (методи і апаратура). М.: *Енергоатомвидав*, 1983.

29. Aree, P. (2016). Analytical approach to determine speed-torque curve of

induction motor from manufacturer data. Procedia Computer Science, 293–296.

30. Соколов М.М., Масандрилов Л.Б. Вимірювання динамічних моментів в електроприводах змінного струму. М.: *Енергія*, 1976.

31. Bellini, A., Figalli, G., & Ulivi, G. (1986). A Microcomputer-Based Optimal Control System to Reduce the Effects of the Parametric Variations and Speed Measurement Errors in Induction Motor Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 22, 42–50.

32. Левідов В.А., Тихонов О.Н., Цивірко Г.П. Вимірювання швидкостей (вимірювальне диференціювання). М.: Вид-во стандартів, 1972. 258 с.

33. Cipin, R., Patocka, M., & Vondrus, J. (2011). Acceleration method of the IM torque-speed characteristics measurement. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (11–13 May, pp. 1–5).

34. Holecek K. Динамічне вимірювання крутного моменту. *Feinwerktechnik*. 1970, №10.

35. Giba V. Et al. Automatizovany system na meranie dynamickych charakteristik mechanikych sustav. *Strojnicky casapis*, 1978, v.29, c.3.

36. Mereanu A. Ridicarea caracteristicii mecanice in regim dinamic la motoarele asincrone trifazate. E.E.A.Electrotehnica, electronica si automatica, RSR, 1981, v.29, №5, pp.188-194.

37. Чучман Ю.І. До питання дослідження метрологічних характеристик тахогенераторів з застосуванням УВМ. Зб. ЛПІ, №10, 1978.

38. Виракас Г.І., Поцюс З.І. Огляд і класифікація засобів вимірювання кутової швидкості. Наукові праці ВУЗів Лит. РСР. *Вібротехніка*, 1971, 2(15), С. 27-34.

39. Утямишев Р.І. Техніка вимірювання швидкостей крутіння. М.-Л.: *Держенерговидав*, 1961.

40. Рябикін С.Л., Загавура Ф.Я. Засоби вимірювання параметрів руху. К.: Вища школа, 1987. 136 с.

41. А.с. 1151888 СРСР; МКИ G 01 3/489 Цифровий тахометр. Поджаренко

В.А., Мельничук П.Л. (СРСР).

42. А.с. 1262385 СРСР; МКИ G 01 P 3/489 Пристрій для вимірювання швидкості крутіння. Карпов Е.А., Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., Мельничук П.Л. 3822880/24-10; заявл.12.12.84; опубл. 07.10.86, Бюл.№37. 7с.

43. Поджаренко В.А. та ін. Мікропроцесорний реєстратор швидкопротікаючих процесів. В зб.: Мікропроцесорні системи контролю. Каунас-Вільнюс, 1985, С.104-110.

44. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Михалевич В.М., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. Датчик кутової швидкості для динамічних вимірювань. Патент України на винахід №243374А від 17.07.98р.

45. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Михалевич В.М., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. Аналоговий датчик кутової швидкості.// Патент України на винахід №22701А від 11.03.97, бюл. № 3 від 30.06.98.

46. Кулаков П.І., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. Частотний датчик кутової швидкості. Патент України на винахід №24398А від 17.07.98р.

47. Поджаренко В.А. Системне проєктування тахометрів. *В зб.: Надлишкові точкові системи обчислення, моделювання, обробка даних і системне проєктування в техніці перетворення інформації*. К.: Вища школа, 1990, С. 5-61.

48. ГОСТ 11828-87. Машини електричні, що обертаються. Загальні методи випробування. М.: Видавництво стандартів, 1987.

49. Klob M. Drehmoment und Schlupfung des Drehstrommotors. *Archiv fur Elektrotechnik*, 1916, 5, h.3, s. 53-87.

50. Буторин Н.Н. Спосіб побудови механічної характеристики асинхронного двигуна. *Електрика*. №4. 1976. С.79-80.

51. Ристхейн Е.М. Про формулу механічної характеристики асинхронного короткозамкнутого двигуна. *Праці Талліннського політ-го ін-та*, том 89, № 589. 1984. С. 37-47.

52. Alexandrovitz A/ Digital simulation of induction motor represented throught

spase phasors. Conf. Elec. and Electron. Eng. Is Israel, Tel-Aviv, Apr. 7-9, 1987.

53. Копилов І.П. Математичне моделювання електричних машин. М.: Вища шк. 1987. 248 с.

54. Коробейников Б.А., Іщенко А.І., Тадессе М. Дослідження перехідних процесів в симетричних асинхронних двигунах за допомогою узагальненого вектора. *Електромеханіка.* 1985. №4. С. 31-34.

55. Чабан В.І., Білий Л.А. Єдина математична модель синхронної і асинхронної машин як елементів системи. *Новини вузів*. *Електромеханіка*. 1984. №3. С. 24-28.

56. Малиновський А.Е., Талюко В.В. Диференційні рівняння несиметричного асинхронного двигуна, що не утримує періодичних коефіцієнтів. *Електрика*. 1981. №7. С. 64-66.

57. Сторожко С.П. Розрахунок перехідних електромагнітних процесів в асинхронному двигуні з індукційними опорами в ланцюгу ротора. *Новини вузів*. *Електромеханіка*. 1980. №1. С. 66-72.

58. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронні машини: Теорія, розрахунок, елементи проєктування. Л.: *Енергоатомвидав*. Ленінгр. відділення, 1990. 368 с.

59. Чучман Ю.І. Багатоцільова математична модель електричної машини. *Електротехніка*. 1990. №9. С.26-29.

60. Кучерук В.Ю. Огляд методів математичного моделювання електричних машин. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький. №2. 1999.

61. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Електричні машини (спеціальний курс). М.: Вища шк., 1987.

62. Гернет М.М., Ратобильский В.Ф. Визначення моментів інерції. М.: *Машинобудування*, 1969. 248 с.

63. Гоменюк А.С., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко В.А. Мікропроцесорний пристрій вимірювання приведеного моменту інерції

механізмів. *В кн. «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва*». Тези доповідей. Хмельницький, 1993. С.153.

64. Podzharenko V.A., Kucheruk V.Yu. New method of measurement of a moment of inertia of an electrical machines. XIV IMEKO World Congress, Tampere, Finland, 1-6 June 1997, Volume III, Topics 3, pp.90-95.

65. Кучерук В.Ю. Комп'ютерно-вимірювальна система динамічних механічних характеристик електродвигунів. *В кн. «Приладобудування-94».* Тези доповідей. Вінниця-Сімферополь, 1994. С. 132.

66. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю. Інформаційно-вимірювальна система механічних характеристик електричних машин. В кн. "Нові технології, материали, обладнання (дослідження, розробки, впровадження)". *Материали доповідей міжнародних академічних читань*, Украина, Киев, 1995, Укр. Техн. Акад., С.85-91.

67. Podzharenko V.A., Kucheruk V.Yu. Computer-Measuring System of the Mechanical Characteristics of Electrical Drives./ Int. Conf. "Electrical Drives and Power Electronics" EDPE'96, Proceeding volumes 2, the High Tatras, Slovakia, pp.633-637.

68. Тун А.Я. Системи контролю швидкості електроприводу. М.: *Енергоатомвидав*, 1984. 168 с.

69. Ряховский О.А., Іванов С.С. Довідник по муфтах. Л.: *Політехніка*, 1991. 384 с.

70. Ряховский О.А. Розробка конструкцій, дослідження, розрахунки та стандартизація муфт с неметалевими пружними елементами: Дис. ...докт.техн.наук: 05.02.02/МВТУ імені Н.Е. Баумана. М., 1985. 302 с.

71. Заплетохин В.А. Конструювання деталей механічних пристроїв: Довідник. Л.: *Машинобудування*. Ленингр. відділення, 1990. 669 с.

72. Левитский Н.І. Коливання в механізмах. М.: Наука, 1988. 336 с.

73. Мастюкин Ю.Н. Прецизійні вимірювання миттєвої кутової швидкості. *Приладобудування*, №11, 1978, С. 5-7.

74. Поджаренко В.О., Кухарчук В.В. Вимірювання і комп’ютерно-вимірювальна техніка: Навч посібник. К.: УМК ВО,1991. 240 с.

75. Поджаренко В.О. Дослідження та розробка інтелектуальних вимірювальних систем характеристик електромеханічних перетворювачів енергії: Дис. ...докт. техн. наук: 05.11.16/ВДТУ. Вінниця,1995. 258 с.