

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Визначення технологічних параметрів асинхронного електродвигуна за
даними автоматизованих випробувань динамічних режимів роботи**

Виконав: студент групи ЕЕМ-22ск

Ярослав ШАРКОВ

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ШАРКОВ Ярослав Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Визначення технологічних параметрів асинхронного
електродвигуна за даними автоматизованих випробувань динамічних режимів
роботи

1. Термін подання студентом роботи: 16 червня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є визначення
технологічних параметрів асинхронного електродвигуна. Завданням є
автоматизовані випробування динамічних режимів роботи асинхронного
електродвигуна
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Аналіз методів випробувань асинхронних електродвигунів; II. Вибір вихідної
математичної моделі асинхронного електродвигуна; III. Помилки при
автоматизованих випробуваннях асинхронних електродвигунів.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Модель асинхронного електродвигуна; II. Розрахункове визначення
параметрів та характеристик АД; III. Зміни потокозчеплення статора; IV.
Зміни складових потокозчеплення статора.-

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		
III	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Аналіз методів випробувань асинхронних електродвигунів	15.05.25
2	Вибір вихідної математичної моделі асинхронного електродвигуна	21.05.25
3	Помилки при автоматизованих випробуваннях асинхронних електродвигунів	26.05.25
4	Початкова обробка даних	04.05.25
5	Похибки при визначенні потягозчеплень статора	14.06.25

Дата видання завдання 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Ярослав ШАРКОВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Визначення технологічних параметрів асинхронного електродвигуна за даними автоматизованих випробувань динамічних режимів роботи»

41 с., 10 рис., 12 літературних джерел

Дана робота присвячена вдосконаленню методів визначення електромагнітних та механічних параметрів асинхронного електродвигуна (АД) шляхом аналізу динамічних режимів його роботи. Основну увагу зосереджено на оцінюванні та зменшенні похибок, що виникають у процесі автоматизованих випробувань, зокрема при обробці миттєвих значень струмів і напруг, визначенні потокозчеплень статора та параметрів роторного кола. У роботі також розглядається теоретичне та практичне обґрунтування методу визначення моменту інерції ротора, що є важливою складовою моделі електромеханічного перетворення енергії. Запропонований підхід базується на математичному моделюванні, сучасних засобах автоматизації випробувань та обчислювальному аналізі.

Об'єкт дослідження: процеси електромеханічного перетворення енергії в асинхронному електродвигуні при динамічних режимах роботи.

Мета роботи: Підвищення точності визначення електромагнітних та механічних параметрів асинхронного електродвигуна шляхом удосконалення методів обробки експериментальних даних динамічних режимів, з урахуванням похибок, що виникають в автоматизованих системах випробувань.

Практичне значення роботи полягає в тому, що результати роботи можуть бути використані для:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розробки програмного забезпечення автоматизованих систем випробувань асинхронних електродвигунів;
- оцінювання стану двигуна після капітального або середнього ремонту;
- оптимізації вибору двигунів для роботи в умовах динамічного навантаження;
- впровадження методів експрес-діагностики в умовах виробництва та сервісного обслуговування.

Запропоновані методики підвищують достовірність визначення параметрів АД, зменшують вплив суб'єктивного чинника та дозволяють розширити застосування автоматизованих випробувань у промисловості.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, пов'язану з необхідністю визначення параметрів асинхронного електродвигуна за даними автоматизованих випробувань динамічних режимів роботи. Запропоновано застосування розрахунково-експериментальних методів, які поєднують математичне моделювання з обробкою результатів динамічних режимів роботи електродвигуна.

У **першому розділі** розглянуто існуючі підходи до випробувань асинхронних електродвигунів, зокрема стандартизовані методи та експериментальні процедури. Проаналізовано переваги й недоліки розрахункових і розрахунково-експериментальних методів визначення параметрів. Особливу увагу приділено доцільності розробки експрес-методів для оцінювання характеристик двигунів у динамічних режимах.

У **другому розділі** Описано обґрунтування вибору математичної моделі, яка відображає електромагнітні процеси в асинхронному двигуні. Наведено основні припущення, покладені в основу моделі, зокрема симетричність фаз, відсутність втрат у сталі та лінійність кривої намагнічування. Модель побудована у координатній системі (α, β) з можливістю подальшої адаптації до умов динамічного аналізу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У третьому розділі досліджуються джерела похибок, які виникають у процесі автоматизованої обробки даних при випробуваннях, а саме: аналізуються методи дискретизації та фільтрації сигналів, що зчитуються з датчиків; розглядаються неточності у чисельному інтегруванні та диференціюванні, що впливають на визначення поточозчеплень та аналізуються похибки в ідентифікації параметрів роторного кола, пов'язані з низьким рівнем сигналів та складністю обчислень у перехідних режимах.

Ключові слова: АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ, ДИНАМІЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ, АВТОМАТИЗОВАНІ ВИПРОБУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Аналіз методів випробувань асинхронних електродвигунів.....	10
Розділ 2. Вибір вихідної математичної моделі асинхронного електродвигуна	16
Розділ 3. Помилки при автоматизованих випробуваннях асинхронних електродвигунів.....	23
3.1. Початкова обробка даних.....	23
3.2. Похибки при визначенні потокозчеплень статора	35
Висновки	36
Список використаних джерел	39

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Вступ

Ефективність роботи гірничих підприємств значною мірою визначається технічним рівнем і надійністю гірничих машин, серед яких провідну роль відіграють системи електроприводу на основі асинхронних електродвигунів (АД) з короткозамкненим ротором. Асинхронні двигуни є одними з найбільш масових і надійних електромеханічних перетворювачів енергії, що знаходять широке застосування у приводах гірничого обладнання.

У складних умовах експлуатації, зокрема при змінному навантаженні, особливе значення має точність знання електромагнітних і механічних параметрів двигуна. Такі характеристики, як ККД, коефіцієнт потужності, пусковий струм, пусковий момент та момент інерції, мають прямий вплив на ефективність роботи та довговічність обладнання. Проте в умовах реального виробництва або ремонту двигунів, ці параметри не часто визначаються індивідуально для кожного виробу через високу тривалість, складність та вартість традиційних методів випробувань.

Проблема ускладнюється відсутністю прямих засобів вимірювання електромагнітних параметрів, складністю врахування динамічних явищ, а також чутливістю існуючих методик до похибок. Зокрема, значні обчислювальні похибки виникають при визначенні поточозчеплень, похідних сигналів та параметрів роторного кола на основі експериментальних даних.

Одним з перспективних напрямів вирішення проблеми є застосування розрахунково-експериментальних методів, які поєднують математичне моделювання з обробкою результатів динамічних режимів роботи електродвигуна. Такий підхід дозволяє отримати параметри без необхідності створення складного випробувального обладнання, мінімізувати втручання у конструкцію двигуна та скоротити час тестування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

У цій роботі проведено аналіз існуючих методів випробувань, обґрунтовано вибір математичної моделі, виявлено основні джерела похибок при автоматизованій обробці сигналів, а також розроблено методику визначення моменту інерції ротора асинхронного двигуна за результатами динамічного процесу пуску. Запропоновано підхід, що дозволяє враховувати нелінійності магнітного кола та змінні параметри без втрати точності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Аналіз методів випробувань асинхронних електродвигунів

Випробування електричних машин проводять з метою перевірки відповідності їхньої якості вимогам стандартів або технічних умов. Вони також є необхідними після капітального або середнього ремонту машини. Для реалізації цієї мети потрібен комплекс технічних і програмних засобів для випробувань асинхронних двигунів.

Загальноприйнятими показниками, які регламентуються стандартами та визначають якість асинхронного двигуна, є: коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності $\{\cos\varphi\}$, максимальний момент $\{M_{\max}\}$, початковий пусковий момент $\{M_{\text{п}}\}$, початковий пусковий струм $\{I_{\text{п}}\}$.

Ці показники характеризують режим роботи АД, коли електромагнітні перехідні процеси або відсутні, або ними можна знехтувати.

Однак при використанні АД в електроприводах гірничих машин, що працюють в умовах різко змінного навантаження, застосування показників, які описують лише статичні процеси, є ускладненим. Поряд із показниками, що оцінюють статичні властивості АД, необхідно вводити й такі, що відображають динамічні характеристики та результати роботи двигуна в реальних умовах. Такими динамічними показниками можуть бути, наприклад, величини ударних електромагнітних моментів під час пуску або екстреного гальмування, значення електричних втрат при пульсуючому навантаженні тощо.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розділ 1	<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Розробив</i>	Шарков Я.Р.						10	6
<i>Перевірів</i>	Сінчук І.О.							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Сінчук І.О.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-22ск		

Оцінювання стану та якості роботи АД у динамічних режимах може бути здійснене також за умови знання його параметрів в усіх можливих діапазонах зміни швидкості обертання ротора.

Будемо вважати, що параметри електричних машин — це коефіцієнти перед незалежними змінними в рівняннях, які описують електромеханічне перетворення енергії. Зазвичай незалежними змінними є струми. Рівняння можуть бути як диференціальними, так і комплексними або алгебраїчними.

Параметрами електричних машин є активні та індуктивні опори, а також момент інерції. Замість індуктивних опорів зручно використовувати індуктивності — повні, взаємні та розсіювання. Таким чином, L , M_M , L_σ , R обмоток машини та момент інерції J є параметрами машини.

На сьогодні виконано низку робіт, на основі яких створено комплекси технічних засобів, що дозволяють здійснювати вимірювання або оцінювання окремих параметрів АД та автоматизувати різні види випробувань, у тому числі прийнятно-здавальні за допомогою обчислювальної техніки.

У результаті визначилися два основні шляхи отримання цих параметрів:

1. *Розрахунковий* — відповідно до якого необхідно з максимальною достовірністю описувати явища, що відбуваються в двигуні при зміні його стану (поверхневий ефект, нелінійність кривої намагнічування тощо). Наприклад, до розрахункового також належить підхід, де описується методика визначення параметрів АД за каталожними даними.
2. *Розрахунково-експериментальний*:

2.1. Випробування АД, передбачені чинними стандартами;

2.2. Випробування, що передбачають створення спеціального навантажувального режиму АД без зміни умов живлення;

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			11

2.3. Випробування, що передбачають зміну умов живлення.

2.4. Випробування, що не потребують спеціальних умов навантаження або живлення АД.

Розрахункові методики можуть передбачати визначення лише частини параметрів АД, вважаючи інші невідомими. Наприклад, визначаються індуктивності розсіювання роторного кола та індуктивність кола намагнічування двигуна. Вихідною інформацією є струм і напруга фаз статора. Індуктивність розсіювання та активний опір статора визначаються з досліду холостого ходу, а активний опір ротора — за результатами досліду короткого замикання. Розглядається усталений режим роботи двигуна. Методика розрахунку, як уже зазначалося, передбачає визначення лише індуктивностей. Отримані результати можна вважати справедливими лише для однієї робочої точки або області (номінальної) характеристики АД, оскільки не враховується зміна активного опору ротора при значному змінненні швидкості його обертання.

У роботі метою є не визначення параметрів у формулюванні, а обчислення миттєвих значень величини потоку машини як для усталених, так і для перехідних режимів роботи. Додатково визначається миттєве значення електромагнітного моменту машини, а також миттєве значення кутової швидкості обертання ротора.

Проте результати є наближеними, оскільки якщо індуктивності розсіювання роторного кола та кола намагнічування визначалися, то вони приймаються як відомі постійні величини.

Слід зазначити, що використовується математична модель АД. Спільним у цих роботах є підхід до побудови алгоритму визначення параметрів — це детермінована процедура.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрім детермінованих процедур визначення параметрів АД, розглядаються також пошукові процедури. Суть останніх полягає в розробці ітераційних процедур пошуку з метою мінімізації розбіжностей між експериментальними даними та розрахунками.

Під час цього шукані параметри АД спочатку можуть задаватися наближено, а згодом уточнююватися до таких значень, які забезпечують максимальне наближення розрахункових даних до експериментальних. У [12], на основі використання математичної моделі АД згідно з [7], електромагнітні параметри АД визначаються з дослідів холостого ходу та короткого замикання. При цьому робиться припущення, що параметри кола ротора лінійно залежать від кутової швидкості обертання ротора. Крім того, в [12] додатково експериментально визначається статична механічна характеристика двигуна. Процедуру визначення параметрів поділено на три етапи. На першому етапі визначаються початкові наближені значення шуканих параметрів та характер їх зміни залежно від швидкості обертання ротора. На другому — знімається статична механічна характеристика АД. На третьому — реалізується ітераційна процедура з метою мінімізації відхилення експериментальної кривої від розрахункової.

Одним із напрямів визначення параметрів АД є забезпечення певних умов живлення двигуна та фіксація явищ, що при цьому відбуваються. Так, існує описано метод визначення параметрів АД, заснований на вимірюваннях при постійному струмі, який подається на обмотку статора. Також можливо подавати тестовий сигнал через обмотку статора, реєструють процес, що відбувається, а потім визначають параметри схеми заміщення АД. Так, нерухомий асинхронний двигун підключають до однофазного джерела живлення промислової частоти, вимірюють зміну затухаючої напруги обмотки статора та за отриманими даними визначають активні та індуктивні опори обмотки ротора.

У методі окрім режиму роботи під навантаженням, застосовується режим штучного несиметричного живлення, який отримується шляхом відключення однієї з фаз асинхронного двигуна від джерела живлення та замикання її на нульову точку джерела. Метод дозволяє опосередковано визначити індуктивності статора і ротора, індуктивність кола намагнічування, приведений активний опір ротора, відносне ковзання та швидкість обертання ротора.

Аналізуючи методи визначення параметрів АД, можна сказати, що значна частина з них орієнтована на визначення параметрів у вузькій області характеристик двигуна. Наприклад, параметри АД визначаються експериментально, але без урахування насичення машини. Параметри визначаються лише для обмеженого діапазону зміни швидкості обертання ротора; активний опір ротора або індуктивності розсіювання ротора та кола намагнічування вважаються постійними. Параметри кола намагнічування також приймаються постійними. Усі вимірювання проводяться при нерухомому роторі.

Аналогічно багато систем у якості вихідних даних використовують лише досліди холостого ходу та короткого замикання.

Таким чином, значна частина методів визначення параметрів АД має обмежений діапазон застосування.

Інші методи, що дозволяють автоматизувати стандартизовані випробування за допомогою ЕОМ, забезпечують отримання результатів у межах тих самих діапазонів, які регламентуються відповідними стандартами.

Ще одна група методів — це ті, що базуються на використанні пошукових процедур, які в апаратній реалізації передбачають наявність випробувальних стендів, досить складного реєструвального обладнання та вимагають значного часу для проведення випробувань.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

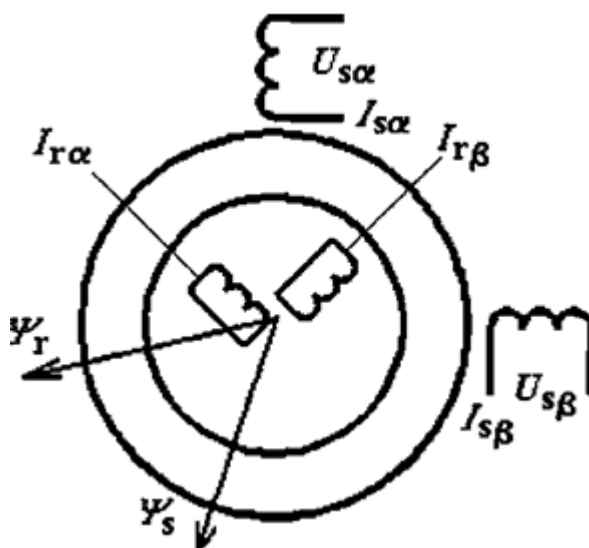
Отже, проблема проведення експрес-випробувань асинхронних електродвигунів до цього часу залишається повністю невирішеною. У зв'язку з цим можна сформулювати наступні вимоги до виконання роботи:

1. У процесі випробувань, з метою отримання достовірної інформації про стан АД, має бути забезпечене змінювання швидкості обертання ротора від нульового значення до номінального.
2. Під час змінювання швидкості обертання ротора не повинно відбуватися просторових переміщень корпусу двигуна.
3. Інформація про стан АД повинна отримуватись за допомогою мінімальної кількості датчиків, які не повинні конструктивно встановлюватися безпосередньо на двигуні.
4. Початковим результатом проведення випробувань повинні бути значення електромагнітних і механічних параметрів АД у повному діапазоні зміни швидкості обертання.
5. Протягом часу випробувань тепловий стан двигуна не повинен змінюватися.
6. Час випробування одного двигуна має бути таким, щоб оцінці підлягав увесь обсяг випущеної (або відремонтованої) продукції.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Розділ 2. Вибір вихідної математичної моделі асинхронного електродвигуна

Відома математична модель асинхронного електродвигуна. Основні рівняння цієї моделі мають вигляд:



$$U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s, \quad (2.1)$$

$$U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \rho\omega)\Psi_r, \quad (2.2)$$

$$\Psi_s = L_s I_s + L_m I_r, \quad (2.3)$$

$$\Psi_r = L_m I_s + L_r I_r, \quad (2.4)$$

$$L_s = L_{s1} + L_m, \quad (2.5)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2		
Розробив	Шарков Я.Р.						
Перевірів	Сінчук І.О.						
Реценз.							
Н. Контр.	Сінчук І.О.						
Затвердив	Пересунько І.І.				Літ.	Лист	Листів
						16	7
					КНУ ЕЕМ-22ск		

$$L_r = L_{r1} + L_m, \quad (2.6)$$

де U_s, U_r - вектори напруги живлення статорної та роторної обмоток; I_s, I_r - вектори струмів статора і ротора; Ψ_s, Ψ_r - вектори потокозчеплень статора і ротора; ω_k - електрична швидкість обертання поля статора; ω - геометрична швидкість обертання ротора; p - кількість пар полюсів; L_s, L_r - повні індуктивності кіл статора і ротора; L_{s1}, L_{r1} - індуктивності розсіювання кіл статора і ротора; L_m — індуктивність кола намагнічування.

Припущення при використанні математичної моделі АД такі:

- усі фази симетричні;
- крива намагнічування активної сталі прямолінійна;
- втрати в сталі відсутні;
- намагнічувальні сили та магнітні поля розподіляються по колу синусоїдально.

Модель на сьогодні є однією з найпоширеніших, незважаючи на спрощуючі припущення, які вона містить. З цього приводу зазначається: "... при дослідженнях використовують спрощені уявлення про фізичні процеси в машині, приблизно враховуючи, а в деяких випадках взагалі не розглядаючи вплив змінного насичення магнітного кола, ефект витіснення струму, втрати в сталі, полігармонічний склад струмів та інші фактори. Рівняння, записані з такими припущеннями, є лише наближеною математичною моделлю реальної машини, але в багатьох випадках вони описують явища в машині та її поведінку з цілком достатньою для практичних цілей точністю, якщо тільки правильно визначені основні параметри машини". Там же, стверджується: "... за прийнятого припущення про відсутність залишкового намагнічування, явищ гістерезису та втрат у сталі, взаємна індуктивність залежить лише від

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результуючого потокозчеплення та визначається статичною кривою намагнічування".

Інші автори зазначають:

"... практика дослідження асинхронних машин на АВМ і ЦВМ з урахуванням зміни їх параметрів показала, що рівняння ідеалізованої машини справедливі і для реальної насиченої асинхронної машини".

Вплив величини основного магнітного потоку на провідність розсіювання незначний і ним нехтують.

"... серед низки чинників, що мають найбільший вплив на зміну параметрів асинхронної машини (АМ) у перехідних режимах, слід відзначити насичення магнітного кола машини". Отримані висновки підтверджуються численними прикладами використання математичної моделі у прикладних галузях, а також спеціальними дослідженнями.

Зокрема, зазначається: "виявляється, і це підтверджується численними прикладами розв'язання задач на ЕОМ і ЦВМ, що рівняння електромеханічного перетворення енергії залишаються справедливими і за наявності нелінійних індуктивних параметрів".

Раніше згадувалося, що задача визначення параметрів електричної машини може розв'язуватись двома шляхами. Перший шлях — розрахунковий, другий — експериментальний шлях визначення параметрів. При реалізації першого шляху визначення параметрів, як зазначено, наприклад, важливим завданням технічної електродинаміки є розробка формул розрахунку індуктивності та активних опорів провідників і обмоток у матричних рівняннях динаміки електромеханічних перетворювачів енергії.

Структурно математичні моделі електромеханічних перетворювачів вже досягли значного рівня точності відображення. Однак цього не можна сказати про розрахунок параметрів, які в цих моделях часто визначаються

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спрощено — без урахування впливу теплових та магнітних нелінійностей, поверхневого ефекту, магнітної асиметрії тощо.

Потреба в розрахунку параметрів реалізується по-різному. Зокрема, зазначається: "... параметри асинхронної машини не залишаються постійними, а в більшій чи меншій мірі залежать від струму та ковзання. Залежність реактивних опорів від струму пов'язана зі зміною умов насичення магнітних кіл взаємної індуктивності та розсіювання.

Насичене значення реактивного опору взаємної індуктивності $X_m(H)$ у режимі холостого ходу дорівнює ненасиченому X_m , поділеному на коефіцієнт насичення, який може бути визначений за характеристикою намагнічування машини.

...коефіцієнти насичення зазвичай змінюються в межах від 1.1-1.5.

...можна показати, що для всіх типів роторів справедлива одна й та сама наближена формула для параметрів як функції ковзання.

$$R_r^*(s) = R_{r\text{ном}} \left[1 + \left(\frac{R_r^*(1)}{R_{r\text{ном}}} - 1 \right) \sqrt{s} \right]. \quad (2.7)$$

Таким чином, пропонуються розрахункові аналітичні залежності, які дозволяють обчислити значення параметрів АД.

Підсумовуючи сказане, можна зазначити, що практично всі без винятку автори приймають як вихідну структуру математичної моделі ту, що наведена в даній роботі. Також майже всі наголошують, що ця модель забезпечує правильні результати для будь-яких режимів роботи АД за умови коректного визначення параметрів моделі. При цьому особлива увага приділяється

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

урахуванню при розрахунковому визначенні параметрів магнітної нелінійності, поверхневого ефекту та інших чинників.

Якщо вважати, що обидва напрями визначення параметрів АД (розрахунковий і експериментальний) мають на меті отримання реальних достовірних характеристик двигуна, то узагальнена схема алгоритму їх визначення може виглядати так, як показано на рис. 2.1 і рис. 2.2.

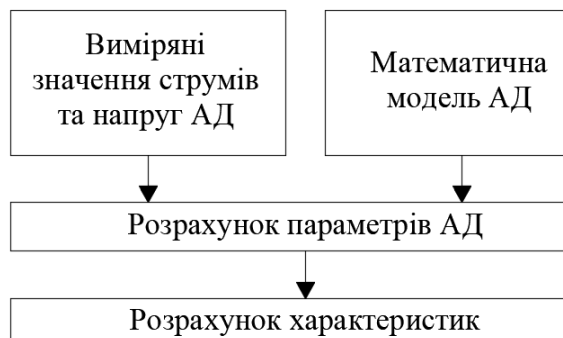
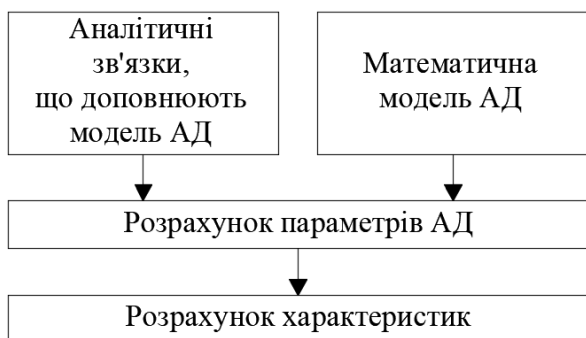


Рисунок 2.1 - Розрахункове визначення параметрів та характеристик АД

Рисунок 2.2 - Розрахунково - експериментальне визначення параметрів та характеристик АД

При розрахунковому визначенні параметрів АД достовірність результатів обумовлюється тими припущеннями та точністю аналітичних описів, які приймаються для врахування, наприклад, явищ поверхневого ефекту, полігармонічного складу потоку намагнічування тощо.

При розрахунково-експериментальному визначенні параметрів відбувається автоматичне врахування всіх явищ, що відбуваються в АД. Явища поверхневого ефекту, насичення магнітного кола двигуна, наявність гармонічних складових проявляються у значеннях фазних струмів статора, напрузі живлення АД — величинах, які легко піддаються вимірюванню. У зв'язку з цим математична модель асинхронного електродвигуна повинна бути доповнена лише тими зв'язками, які не можуть бути враховані опосередковано через виміряні значення параметрів АД.

Такою додатковою залежністю є залежність індуктивності кола намагнічування від струму намагнічування:

$$L_m = \frac{A \cdot B}{1 + B^2 \cdot I_m^2}, \quad (2.8)$$

де A і B - коефіцієнти, що характеризують форму кривої намагнічування; I_m - струм намагнічування:

$$I_m = I_s + I_r. \quad (2.9)$$

Коефіцієнти кривої намагнічування можна визначити за двома дослідями холостого ходу при різних напругах мережі за виразами:

$$B = \sqrt{\frac{k \cdot I_2 - I_1}{(I_2 - k \cdot I_1) \cdot I_2 I_1}}, \quad (2.10)$$

$$A = \frac{U_2 (1 + B^2 \cdot I_2^2)}{\omega_n \cdot I_2 \cdot B}, \quad (2.11)$$

$$k = \frac{U_1}{U_2}, \quad (2.12)$$

де U_2, U_1 - відповідно номінальна та знижена напруга живильної мережі; I_2, I_1 - струми статора відповідно при номінальній та зниженій напрузі живильної мережі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, сукупність диференціальних та алгебраїчних зв'язків, що утворюють математичну модель АД для використання в розрахунково-експериментальному визначенні параметрів, матиме такий вигляд:

$$U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s, \quad (2.13)$$

$$U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \rho\omega)\Psi_r, \quad (2.14)$$

$$\Psi_s = L_s I_s + L_m I_r, \quad (2.15)$$

$$\Psi_r = L_m I_s + L_r I_r, \quad (2.16)$$

$$L_s = L_{s1} + L_m, \quad (2.17)$$

$$L_r = L_{r1} + L_m, \quad (2.18)$$

$$L_m = \frac{A \cdot B}{1 + B^2 \cdot I_m^2}, \quad (2.19)$$

$$B = \sqrt{\frac{k \cdot I_2 - I_1}{(I_2 - k \cdot I_1) \cdot I_2 I_1}}, \quad (2.20)$$

$$A = \frac{U_2(1 + B^2 \cdot I_2^2)}{\omega_H \cdot I_2 \cdot B}, \quad (2.21)$$

$$k = \frac{U_1}{U_2}, \quad (2.22)$$

Розділ 3. Помилки при автоматизованих випробуваннях асинхронних електродвигунів

3.1. Початкова обробка даних

Під час проведення автоматизованих випробувань асинхронних короткозамкнутих електродвигунів виникають дві основні групи помилок: помилки, що містяться в початковій інформації, та помилки, обумовлені тими числовими методами, які були використані для розв'язання задачі.

Помилки в початковій інформації виникають через неточність вимірювань.

У реальних умовах, при проведенні автоматизованих випробувань АД, у кінцевих результатах можуть бути присутні різного роду погрішності, зокрема, обумовлені:

- способом визначення моменту початку пуску АД;
- способом фільтрації вимірних даних;
- величиною погрішностей вимірювань при використанні конкретних аналого-цифрових перетворювачів;
- кількістю вимірювань під час випробувань та інші.

Для контролю вимірювальних погрішностей необхідно знати кількісні та якісні впливи виникаючих вимірювальних погрішностей на проміжні та кінцеві результати визначення електромагнітних параметрів АД.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	Розділ 3	<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Розробив</i>	Шарков Я.Р.						23	13
<i>Перевіриє</i>	Сінчук І.О.							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Сінчук І.О.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-22ск		

З цією метою були проведені обчислювальні експерименти на прикладі електродвигуна А1М160 М6. Параметри статора і ротора цього двигуна (активні опори та індуктивності ланцюгів статора і ротора, індуктивність ланцюга намагнічування) були отримані за результатами статичних випробувань АД і представлені в табл. 3.1 та рис. 3.2-3.3.

Час пуску двигуна $t=0.2$ с. Крок дискретизації вимірювання вхідних даних становить $\Delta t=0.001$ с.

Обчислювальні експерименти проводились наступним чином:

1. Моделювання на ЕОМ пуску АД шляхом розв'язання диференціальних рівнянь, що описують поведінку АД, та отримання масивів напруг (U_{sa} , $U_{s\beta}$) та струмів (I_{sa} , $I_{s\beta}$) статора за відсутності вимірювальних погрішностей.
2. Визначення електромагнітних параметрів ротора АД (R_r , L_r), використовуючи як вхідні дані результати моделювання пуску АД.
3. Моделювання погрішності вимірювання шляхом внесення відповідних змін у масиви напруг (U_{sa} , $U_{s\beta}$) та струмів (I_{sa} , $I_{s\beta}$) статора, отриманих у п. 1.
4. Визначення електромагнітних параметрів ротора АД (R_r , L_r) за алгоритмом, використовуючи як вхідні дані результати моделювання погрішності вимірювання, отримані в п. 3.
5. Порівняльна оцінка результатів визначення параметрів ротора АД за п. 2 і п. 4.

Для моделювання чергової вимірювальної погрішності необхідно повторити п. 3-5.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати обчислювального експерименту щодо визначення електромагнітних параметрів за відсутності вимірювальних погрішностей (див. п. 1-2) представлені на рис. 3.1-3.2.

У ході обчислювальних експериментів моделювались наступні обчислювальні погрішності:

1. Погрішності при визначенні початку пуску АД. Розглядалися випадки випередження та затримки початку обробки відносно початку пуску АД. Для випадку затримки початку обробки на час дискретизації вимірювання $\Delta t=0.0001$ с. вхідні дані піддавалися наступним перетворенням:

$$\begin{aligned} U_{s\alpha i}^* &= U_{s\alpha i+1}, U_{s\beta i}^* = U_{s\beta i+1}, \\ I_{s\alpha i}^* &= I_{s\alpha i+1}, I_{s\beta i}^* = I_{s\beta i+1}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$, $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ - складові напруг і струмів статорного кола двигуна відповідно по осях α та β , отримані з обчислювального експерименту (ідеальний варіант); $U_{s\alpha}^*$, $U_{s\beta}^*$, $I_{s\alpha}^*$, $I_{s\beta}^*$ - складові напруг і струмів статорного кола двигуна відповідно по осях α та β , які використовуються в розрахунках при оцінці впливу погрішності на результат обчислення електромагнітних параметрів асинхронного двигуна (АД).

Результати розрахунків за наявності вищевказаної погрішності наведені на рис. 3.3 та рис. 3.4.

2. Погрішність, зумовлена роботою конкретних аналого-цифрових перетворювачів. Для цього у вхідні дані вносилися погрішності вимірювання напруги статора наступним чином:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$$U_{s\alpha}^+ = k \cdot U_{su}, \quad U_{sb}^+ = k \cdot U_{s\beta}, \quad (3.2)$$

де k — постійний коефіцієнт, що визначає величину похибки вимірювання.

Результати розрахунків за наявності п'ятивідсоткової похибки вимірювання напруги статора ($k = 1.05$) наведені на рис. 3.5 та рис. 3.6.

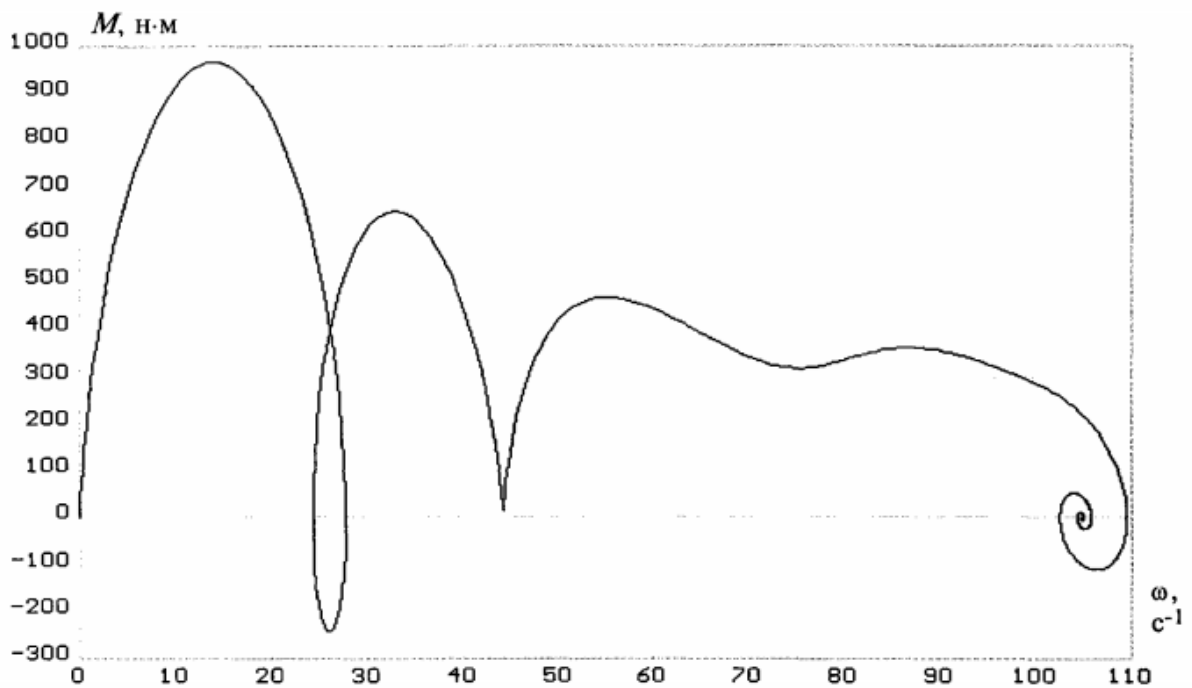


Рисунок 3.1 - Зміна електромагнітного моменту на валу АД від частоти обертання ротора за відсутності вимірювальних похибок

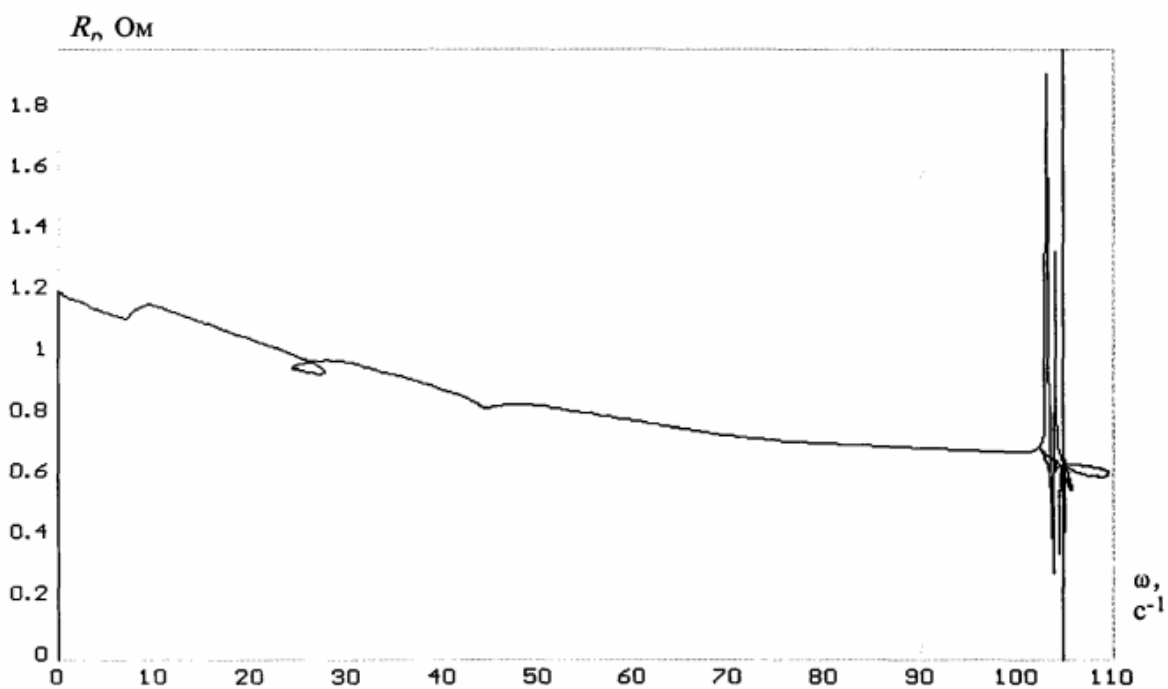


Рисунок 3.2 - Зміна активного опору роторного ланцюга від частоти обертання ротора за відсутності вимірювальних похибок

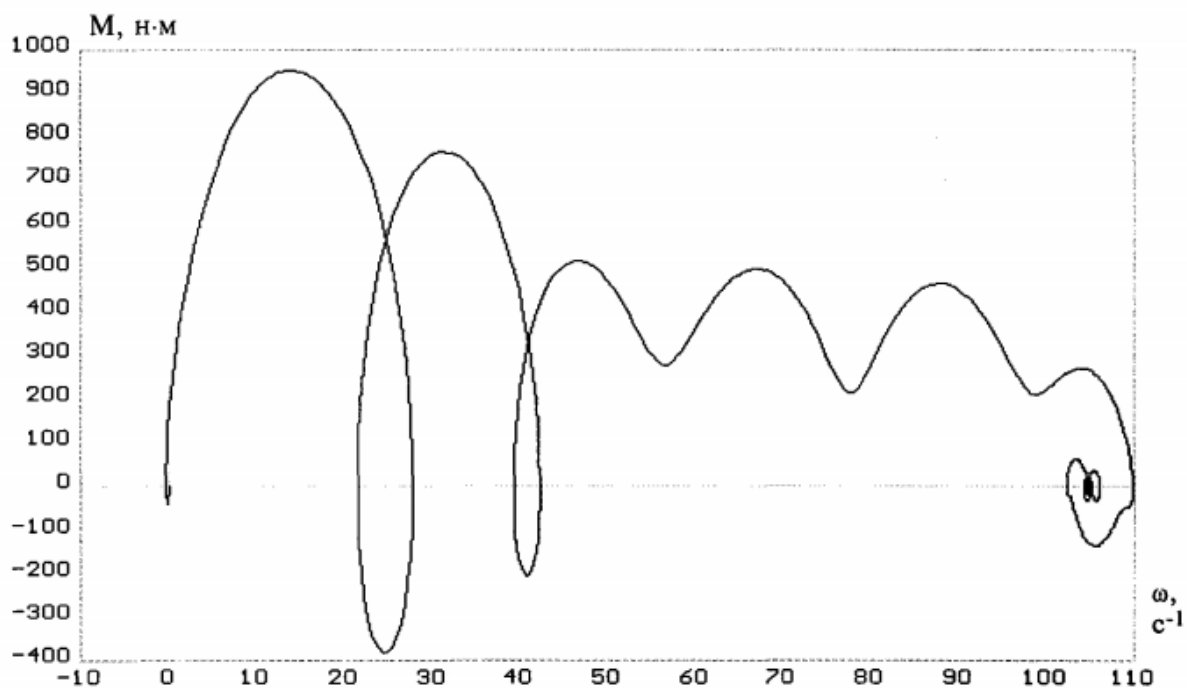


Рисунок 3.3 - Зміна електромагнітного моменту на валу АД від частоти обертання ротора за наявності вимірювальної похибки, пов'язаної з визначенням моменту початку пуску

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12

Арк.

28

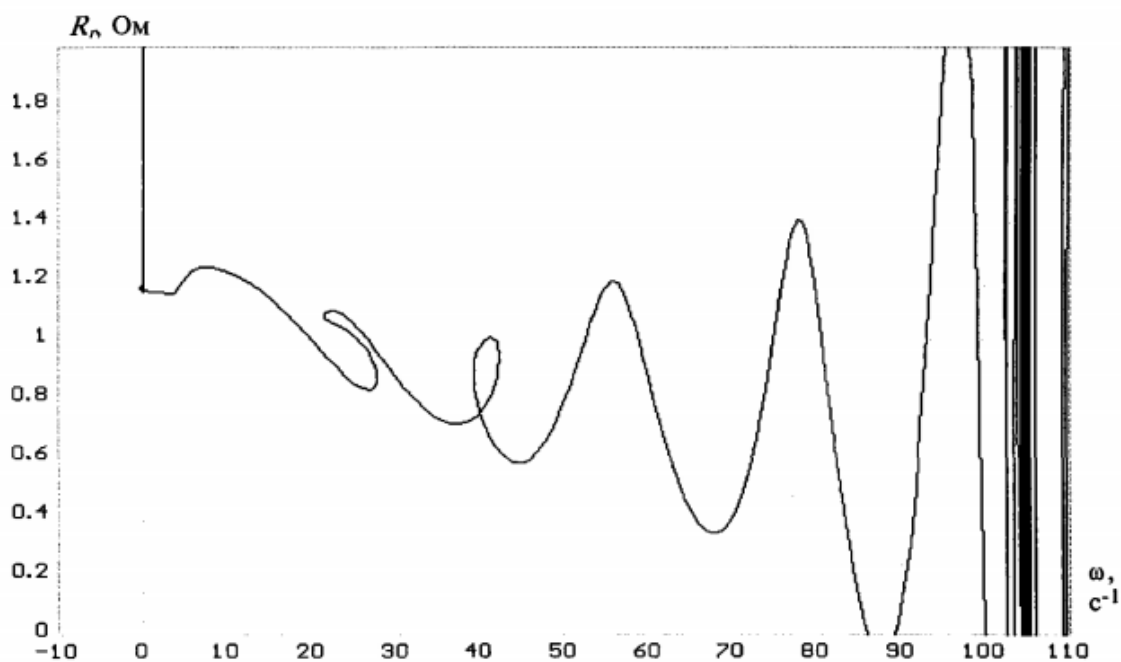


Рисунок 3.4 - Зміна активного опору роторного ланцюга від частоти обертання ротора за наявності вимірювальної похибки; пов'язаної з визначенням моменту початку пуску

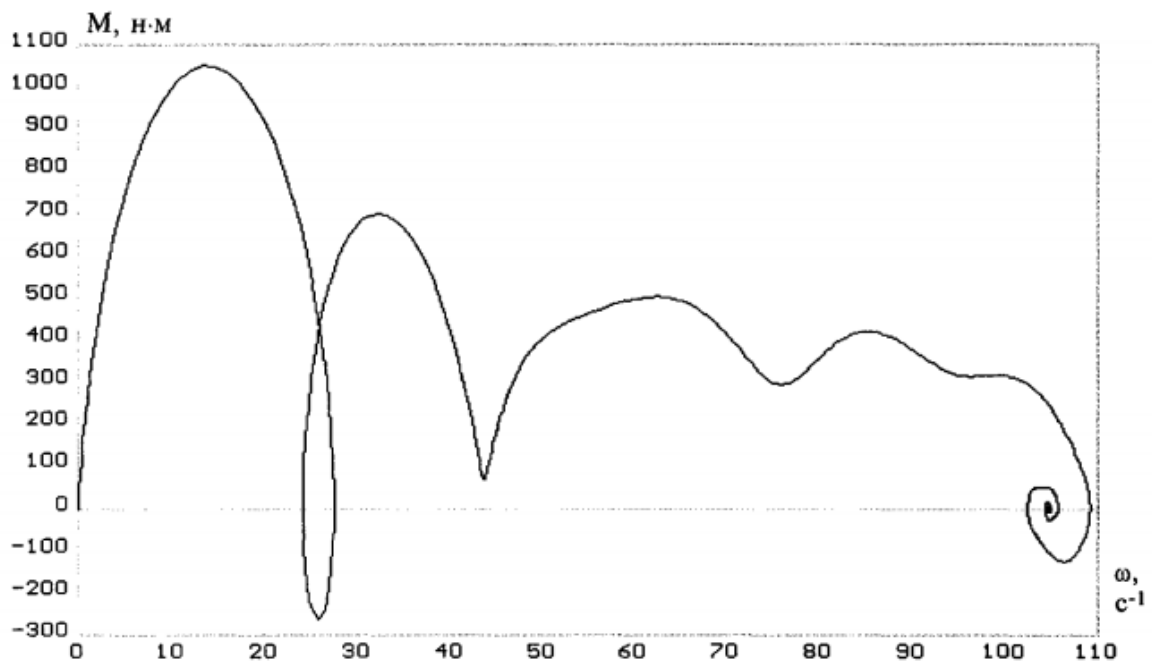


Рисунок 3.5 - Зміна електромагнітного моменту на валу АД від частоти обертання ротора за наявності вимірювальної похибки, яка вноситься роботою конкретної АЦП

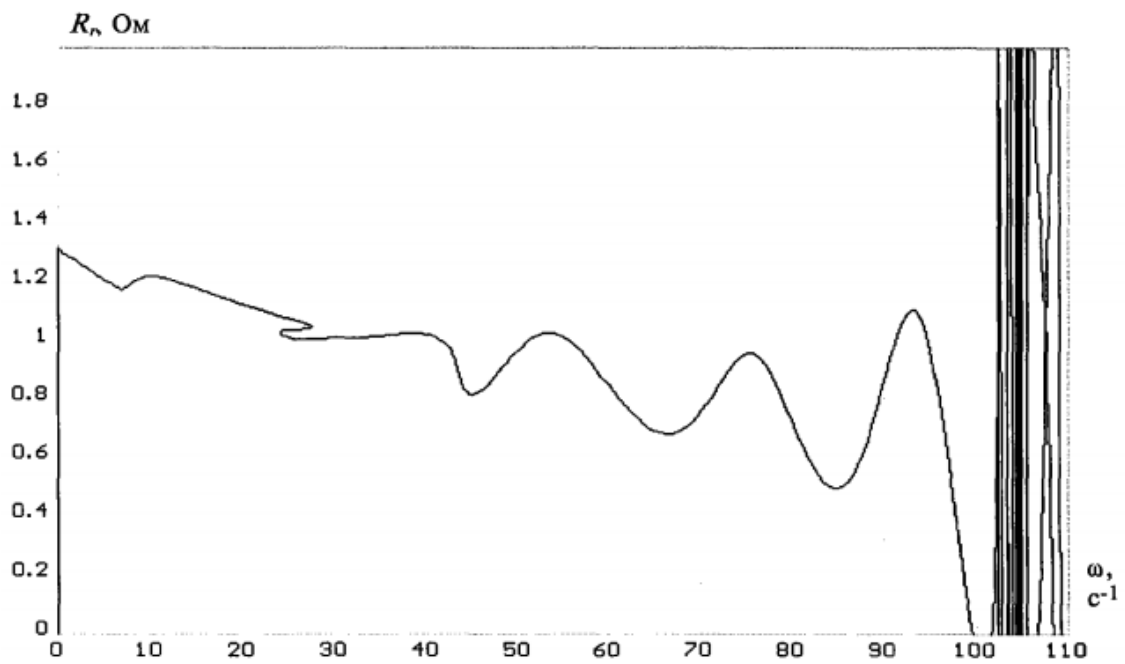


Рисунок 3.6 - Зміна активного опору роторного ланцюга від частоти обертання ротора за наявності вимірювальної похибки, яка вноситься роботою конкретної АЦП

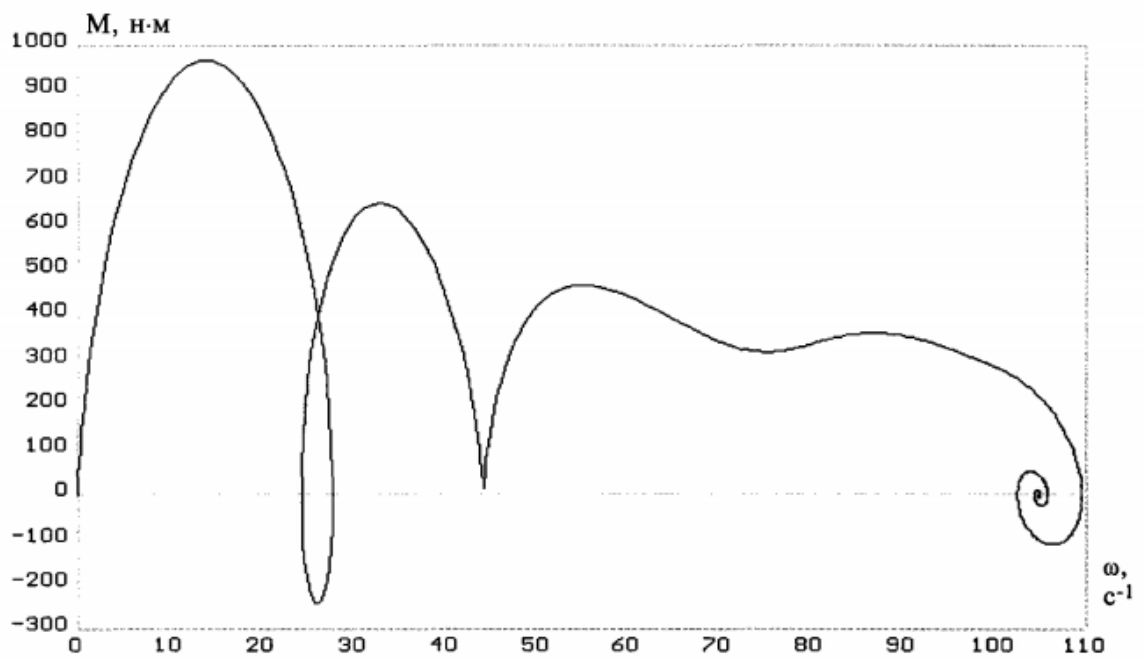


Рисунок 3.7 - Зміна електромагнітного моменту на валу АД від частоти обертання ротора за наявності вимірювальної похибки, що виникає від фазового зсуву

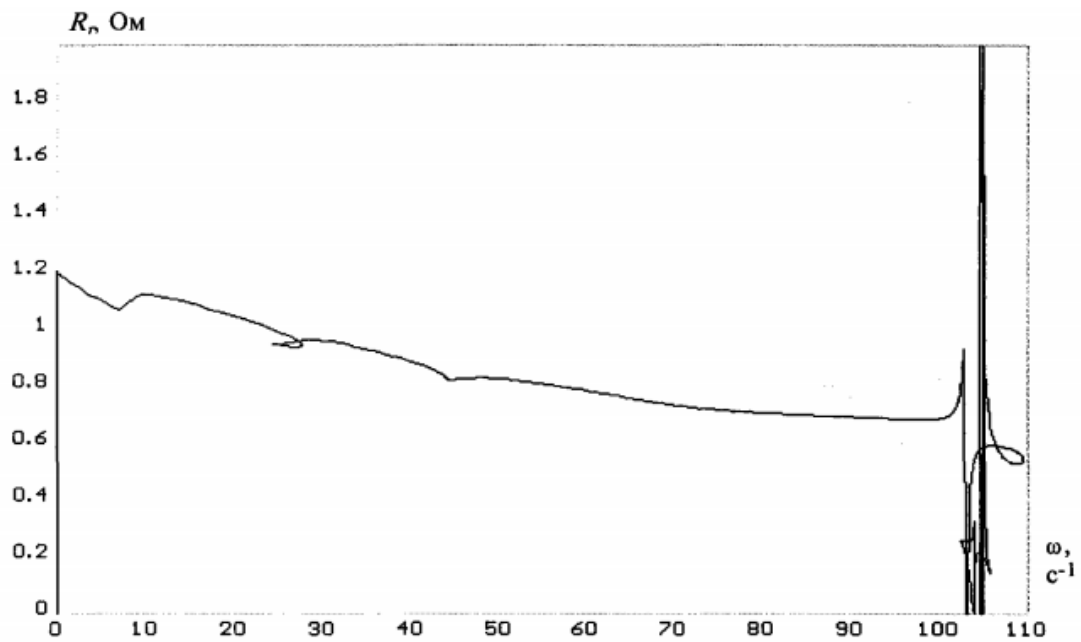


Рисунок 3.8 - Зміна активного опору роторного ланцюга від частоти обертання ротора за наявності виміральної похибки, що виникає від фазового зсуву

3. Похибка, що виникає внаслідок фазового зсуву під час вимірювання по двох каналах. Так, наприклад, при використанні двох аналого-цифрових перетворювачів, спочатку може здійснюватися вимірювання напруг, а потім струмів статора. Фазовий зсув прийнято рівним $\Delta t = \Delta t / 8 = 0,000125$ с, орієнтуючись на середній час циклу вимірювання застосовуваних нині аналого-цифрових перетворювачів. Результати розрахунків за наявності вказаного фазового зсуву наведені на рис. 3.7 та рис. 3.8.

Отримані дані свідчать про суттєвий вплив усіх розглянутих похибок на результат.

У порівнянні з похибкою, зумовленою способом обчислення результатів, похибки вимірювання дають практично неконтрольовану помилку. Величина похибки збільшується зі зростанням часу та зумовлює нестійкий характер кривих зміни параметрів.

Отримані результати свідчать про необхідність розробки спеціальних фізичних або програмних засобів усунення похибок вимірювання.

Похибки вимірювань можуть бути викликані проникненням різного роду завад у вимірювальні кола. Прикладом виникнення завад можуть бути електромагнітні наводки у слабоекранованих вимірювальних колах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Похибки при визначенні поточкозчеплень статора

Отримання параметрів і характеристик асинхронного двигуна базується на використанні сукупності диференціальних зв'язків.

$$\dot{\Psi}_{s\alpha} = U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}, \quad \dot{\Psi}_{s\beta} = U_{s\beta} - R_s I_{s\beta}, \quad (3.2)$$

З цих співвідношень видно, що достовірні значення поточкозчеплень статора ($\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$) можливо отримати, використовуючи надійний метод інтегрування (3.2) та достовірні значення величин, що входять у праві частини рівняння (3.2). Використання при інтегруванні значення активного опору статора R_s з похибкою призведе до її проникнення у кінцевий результат. Це стосується також і параметрів U_s , I_s .

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} U_{s\alpha} &= U_{s\alpha p} + \delta U_{s\alpha}, \quad U_{s\beta} = U_{s\beta p} + \delta U_{s\beta}, \\ I_{s\alpha} &= I_{s\alpha p} + \delta I_{s\alpha}, \quad I_{s\beta} = I_{s\beta p} + \delta I_{s\beta}, \\ R_s &= R_{sp} + \delta R_s, \end{aligned} \quad (3.3)$$

де $U_{s\alpha p}$, $U_{s\beta p}$, $I_{s\alpha p}$, $I_{s\beta p}$ - істинні значення складових напруг і струмів статора; R_{sp} - істинне значення активного опору статора; $\delta U_{s\alpha}$, $\delta U_{s\beta}$, $\delta I_{s\alpha}$, $\delta I_{s\beta}$ - абсолютні похибки вимірювання напруг і струмів статора; δR_s - абсолютна похибка задання активного опору статора.

Висновки

Дана робота присвячена вдосконаленню методів визначення електромагнітних та механічних параметрів асинхронного електродвигуна (АД) шляхом аналізу динамічних режимів його роботи. Основну увагу зосереджено на оцінюванні та зменшенні похибок, що виникають у процесі автоматизованих випробувань, зокрема при обробці миттєвих значень струмів і напруг, визначенні потокозчеплень статора та параметрів роторного кола. У роботі також розглядається теоретичне та практичне обґрунтування методу визначення моменту інерції ротора, що є важливою складовою моделі електромеханічного перетворення енергії. Запропонований підхід базується на математичному моделюванні, сучасних засобах автоматизації випробувань та обчислювальному аналізі.

Об'єкт дослідження: процеси електромеханічного перетворення енергії в асинхронному електродвигуні при динамічних режимах роботи.

Мета роботи: Підвищення точності визначення електромагнітних та механічних параметрів асинхронного електродвигуна шляхом удосконалення методів обробки експериментальних даних динамічних режимів, з урахуванням похибок, що виникають в автоматизованих системах випробувань.

Практичне значення роботи полягає в тому, що результати роботи можуть бути використані для:

- розробки програмного забезпечення автоматизованих систем випробувань асинхронних електродвигунів;
- оцінювання стану двигуна після капітального або середнього ремонту;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- оптимізації вибору двигунів для роботи в умовах динамічного навантаження;
- впровадження методів експрес-діагностики в умовах виробництва та сервісного обслуговування.

Запропоновані методики підвищують достовірність визначення параметрів АД, зменшують вплив суб'єктивного чинника та дозволяють розширити застосування автоматизованих випробувань у промисловості.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, пов'язану з необхідністю визначення параметрів асинхронного електродвигуна за даними автоматизованих випробувань динамічних режимів роботи. Запропоновано застосування розрахунково-експериментальних методів, які поєднують математичне моделювання з обробкою результатів динамічних режимів роботи електродвигуна.

У **першому розділі** розглянуто існуючі підходи до випробувань асинхронних електродвигунів, зокрема стандартизовані методи та експериментальні процедури. Проаналізовано переваги й недоліки розрахункових і розрахунково-експериментальних методів визначення параметрів. Особливу увагу приділено доцільності розробки експрес-методів для оцінювання характеристик двигунів у динамічних режимах.

У **другому розділі** Описано обґрунтування вибору математичної моделі, яка відображає електромагнітні процеси в асинхронному двигуні. Наведено основні припущення, покладені в основу моделі, зокрема симетричність фаз, відсутність втрат у сталі та лінійність кривої намагнічування. Модель побудована у координатній системі (α, β) з можливістю подальшої адаптації до умов динамічного аналізу.

У **третьому розділі** досліджуються джерела похибок, які виникають у процесі автоматизованої обробки даних при випробуваннях, а саме:

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			37

аналізуються методи дискретизації та фільтрації сигналів, що зчитуються з датчиків; розглядаються неточності у чисельному інтегруванні та диференціюванні, що впливають на визначення потокозчеплень та аналізуються похибки в ідентифікації параметрів роторного кола, пов'язані з низьким рівнем сигналів та складністю обчислень у перехідних режимах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Список використаних джерел

1. Гладкий В. М. Математична модель асинхронного двигуна з урахуванням витіснення струму у стрижнях ротора [Електронний ресурс] / В. М. Гладкий, Р. С. Гладкий // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2016. – № 844. – С. 47–53. – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/oct/19253/7.pdf>
2. Tytiuk V. K., Baranovskaya M. L., Chorny O. P., Burdilnaya E. V., Kuznetsov V. V., Bogatyriov K. N. (2020) Online-Identification of Electromagnetic Parameters of an Induction Motor. Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. 63 (5), 423–440. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-423-440>.
3. IEEE 12–1996 – IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. Available at: <https://standards.ieee.org/standard/112-1996.html>.
4. Немцев Е. М. Математична модель для аналізу режимів роботи асинхронного двигуна при симетричній і несиметричній напрузі живлення [Електронний ресурс] / Е. М. Немцев, О. М. Перевозников // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Електротехніка і енергетика. – 2019. – № 1. – С. 21–26. – Режим доступу: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2019-1-21-26.pdf>
5. Купін О. С. Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів [Електронний ресурс] / О. С. Купін, О. О. Кузнецов // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2014. – № 3 (41). – Режим доступу: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/706498/1/02-Kupin_Kuznetsov14.pdf

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

6. Lee S., Yoo A., Lee H. J., Yoon Y. D., Han B. M. (2017) Identification of Induction Motor Parameters at Standstill Based on Integral Calculation. IEEE Transactions on Industry Applications, 53 (3), 2130–2139. <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2650141>.
7. Peresada S., Kovbasa S., Prystupa D., Lyshevski S. E. (2013) Identification of Induction Motor Parameters Adaptively Controlling Stator Currents. IECON 2013 – 39 th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, 8476–8481. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700555>.
8. Zagirnyak M. A., Bisikalo O., Chorna O., Chorny O. (2018) Model of the Assessment of an Induction Motor Condition and Operation Life, Based on the Measurement of the External Magnetic Field. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 316–321. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559564>.
9. Лагутін В. І. Випробування електричних машин і трансформаторів в електроенергетиці : навч. посіб. / В. І. Лагутін. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 115 с. – Режим доступу:

https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/LAN/Lagutin_2011_115.pdf
10. Chorna O., Chorny O., Tytiuk V. (2019) Identification of Changes in the Parameters of Induction Motors during Monitoring by Measuring the Induction of a Magnetic Field on the Stator Surface. Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019, 150–153. <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896554>.
11. Guimaraes, Joao & Jr, José & Hermeto, Antonio & Bortoni, Edson. (2014). Parameter Determination of Asynchronous Machines From Manufacturer Data Sheet. Energy Conversion, IEEE Transactions on. 29. 689-697. 10.1109/TEC.2014.2317525.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12.Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навч. посіб. / О. І. Толочко. – Київ : НТУУ "КПІ", 2015. – 112 с. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15658/1/Modelyuvannia_asunxron_system.pdf

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41