

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до випускної роботи магістра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ТЕМА ВИПУСКНОЇ РОБОТИ

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА
З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ В АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ РОТОР-
НОГО КОЛА

Виконав: студент групи ЕМО-23м

Данило ГОНЧАР

Керівник випускної роботи

д.т.н., проф. Валерій ТИТЮК

Нормоконтролер

д.т.н., проф. Валерій ТИТЮК

Декан ЕТФ

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми

д.т.н., проф. Станіслав ТОЛМАЧОВ

Кривий Ріг 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА
ВИПУСКНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**
Гончару Данилу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження діагностичних ознак асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в аварійних режимах роторного кола»

2. Строк подання здобувачем роботи : 5 грудня 2024 р.

3. Мета та завдання випускної роботи

Мета та завдання випускної роботи – обґрунтування можливості діагностування несправностей роторного кола асинхронного короткозамкненого двигуна при вимірюванні статорних величин; удосконалення математичної моделі асинхронного двигуна для вивчення параметричної асиметрії роторного кола на показники роботи АД, визначення діагностичних ознак аварійного стану білячої клітки асинхронного двигуна.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди презентації у кількості _____ штук _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Титюк В.К.	05.09.2024	10.10.2024
II	Титюк В.К.	05.09.2024	3.11.2024
III	Титюк В.К.	05.09.2024	25.11.2024

7. Календарний план виконання роботи та консультацій

№	Назва етапів роботи	Дата виконання
1	Огляд науково-технічної літератури з питань аварійності асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, огляд існуючих методів визначення параметрів АД та напрямків діагностики їх технічного стану.	28.09.2024
2	Формулювання об'єкта, предмета та мети дослідження	3.10.2024
3	Математичне моделювання асинхронних двигунів з використанням теорії узагальнено-го електромеханічного перетворювача.	14.10.2024
4	Розробка математичної моделі асинхронного двигуна з білячою кліткою на роторі з використанням теорії узагальненого електромеханічного перетворювача та її верифікація.	24.10.2024
5	Аналіз режимів роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при несиметрії напруги живлення.	28.10.2024
6	Аналіз режимів роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при витковому замиканні статора.	3.11.2024
7	Аналіз режимів роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при обриві стрижнів білячої клітки.	10.11.2024
8	Визначення діагностичних ознак асинхронних двигунів в аварійних режимах роботи	17.11.2024
9	Оформлення пояснювальної записки та презентації випускної роботи	05.12.2024

Дата видачі завдання 05.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Гончар Д.О. _____
(ПІБ)

Титюк В.К. _____
(ПІБ)

ЗМІСТ

Реферат	
Вступ	
Розділ 1 Сучасний стан електромеханічних перетворювачів енергії в промисловому виробництві	
1.1 Аналіз технічного стану електромеханічних перетворювачів енергії та причин їх аварійності	
1.2 Огляд англомовних літературних джерел.	
Висновки по розділу 1	
Розділ 2. Математичне моделювання асинхронного двигуна з білячою кліткою на роторі	
2.1 Математичне моделювання асинхронного двигуна в трифазній координатній системі	
2.2 Математичне моделювання АД білячою кліткою з використанням теорії узагальненого електромеханічного перетворювача	
2.3 Реалізація математичної моделі АД з білячою кліткою у MATLAB	
Висновки по розділу 2	
Розділ 3 Дослідження діагностичних ознак асинхронного двигуна з білячою кліткою на роторі в аварійних режимах	
3.1 Спектральний аналіз миттєвої потужності асинхронного двигуна з білячою кліткою на роторі в аварійних режимах	
3.2 Годограф струму статора асинхронного двигуна з білячою кліткою на роторі в аварійних режимах	
Висновки по розділу 3	
Висновки по роботі	
Література	

Реферат

__ сторінок, __ таблиць, __ рисунків, __ джерел літератури.

Тема випускної роботи: «Дослідження діагностичних ознак асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в аварійних режимах роторного кола»

Метою роботи є обґрунтування можливості діагностування несправностей роторного кола асинхронного короткозамкненого двигуна при вимірюванні статорних величин.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є процеси електромеханічного перетворення асинхронного електродвигуна.

Предметом дослідження магістерської роботи є особливості електромеханічного перетворення асинхронного електродвигуна у різноманітних несиметричних режимах, включаючи обрив стрижня білячої клітки короткозамкненого ротора.

Випускна робота присвячена створенню математичної моделі асинхронного двигуна з урахуванням реальної конструкції короткозамкненого ротора у формі білячої клітки, що дозволило б вивчати режими роботи асинхронного двигуна при різноманітних видах мережевої та параметричної несиметрії з боку статора та ротора. Вивчення режимів роботи асинхронного двигуна у несиметричних режимах дозволило виявити діагностичні ознаки, які вказують на обрив стрижня білячої клітки.

З використанням Matlab/Simulink створено повну математичну модель асинхронного двигуна з білячою кліткою та можливістю урахування різних видів асиметрії та їх комбінування.

У значному обсязі використані різноманітні методи дослідження, такі як математичні розрахунки, графічні побудови, математичні залежності та теоретичні положення з курсів «Теорія електропривода», «Електричні машини», «Теоретичні основи електротехніки», «Сучасні методи ідентифікації, моніторингу та діагностики електромеханічного обладнання».

Ключові слова: АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, БІЛЯЧА КЛІТКА, НЕСИМЕТРІЯ ЖИВЛЕННЯ, ПАРАМЕТРИЧНА НЕСИМЕТРІЯ, ДІАГНОСТИЧНІ ОЗНАКИ.

ВСТУП

Незважаючи на активне впровадження в практику роботи вітчизняних підприємств гірничо-видобувної та металургійної промисловості, транспорту нових сучасних типів електроприводів (ЕП), очікувана ефективність їх роботи продовжує залишатися проблемою, яка вимагає свого вирішення.

Перш за все, це пов'язано з такою важливою складовою проблеми, як надійність електроприводів. Серед головних складових електромеханічного обладнання, що потребують вирішення задачі підвищення їх надійності, особливо у післяремонтний період, в першу чергу, необхідно виділити електричні двигуни як постійного (ДПС), так і змінного струму: асинхронних (АД) та синхронних двигунів (СД). Щорічно виходить з ладу і ремонтується до 30% парку електричних двигунів (ЕД), що використовуються в промисловості, і до 70%, що використовуються на транспорті. В переважній більшості, після ремонту електричні двигуни повертаються на підприємства, де продовжують експлуатуватися до наступного виходу з ладу. Кількість ремонтів може становити 3 - 4 при значному зменшенні часу напрацювання на відмову до 0,5 - 1,5 року. Дана ситуація пояснюється тим, що електротехнічна сталь в процесі ремонту піддається механічних пошкоджень, і електричні двигуни, які знову надійшли на виробництво, мають реальні експлуатаційні показники значно нижче, ніж задекларовані заводом-виробником. Крім того, імпульсний характер напруги живлення, який властивий сучасним перетворювачам, без прийняття допоміжних заходів, також прискорює процес виходу електричного двигуна з ладу.

Також важливим є підвищення надійності менш поширених у народному господарстві СД та ДПС, які також мають високий відсоток аварійності. Можна виділити ряд можливих підходів підвищення надійності ЕМ: розвиток нових підходів при розробці післяремонтної діагностики електричного обладнання; розробку і впровадження засобів моніторингу ЕМ у процесі їх життєвого циклу; розробку і впровадження пристроїв інтелектуального захисту (ІЗ) ЕМ. А це, у свою чергу, призводить до зміни експлуатаційних характеристик систем

регулювання та режимів енергоспоживання силового устаткування. Тому діагностика параметрів, визначення реальної роботоздатності ЕМ в післяремонтний період – задача безпосередньо забезпечення збереження електричного устаткування.

По-друге, підвищення надійності електромеханічного устаткування нерозривно зв'язано з неперервним контролем параметрів технічного стану функціонуючих механізмів, тобто, проблемою технічної діагностики взагалі. Досвід показує, що упровадження засобів діагностики стану є одним з найважливіших чинників підвищення економічної ефективності використання машин і механізмів у виробництві. У сучасних умовах призначення діагностики полягає не тільки у виявленні вже виниклих, скільки в попередженні можливих відмов і несправностей, а також в підтримці оптимальних експлуатаційних характеристик встановлених вимогами технологічного процесу, в прогнозуванні їх стану з метою повнішого використання доремонтного і післяремонтного ресурсу. Теорія і практика діагностики розвиваються на основі реалізації принципів безрозбірності, універсальності методів і засобів, забезпечення високої оперативності їх використання.

Розділ 1 Сучасний стан електромеханічних перетворювачів енергії в промисловому виробництві

1.1 Аналіз технічного стану електромеханічних перетворювачів енергії та причин їх аварійності

Стан аварійності електричних приводів на підприємствах України, особливо в гірничодобувній галузі, є критично незадовільним. Визначальним чинником виступає надійність електродвигунів, показники яких за останній період значно погіршилися, місцями знизившись у десятки разів.

Детальний аналіз причин виходу електричних машин з ладу дає змогу виділити два ключові аспекти:

- Низький рівень технічного обслуговування електроустаткування виробничим персоналом, що характеризується некваліфікованими діями, недотриманням встановлених регламентів і, як наслідок, передчасним виходом обладнання з експлуатації.
- Брак уніфікованих захисних механізмів під час експлуатації, які б не лише забезпечували дотримання чинних режимних вимог, але й унеможливили технічні помилки з боку обслуговуючого персоналу.

Якщо перша причина пов'язана з некваліфікованим обслуговуванням, то друга безпосередньо стосується нехтування та неналежного розуміння експлуатаційних правил і норм. Парк електричних машин нараховує значну кількість електродвигунів різноманітних конструкцій, більшість з яких неодноразово проходили ремонтні процедури.

Високі показники аварійності таких машин зазвичай зумовлені не низькою якістю ремонту, а відсутністю необхідної технічної документації та інформаційного забезпечення.

За наявних умов бракує вичерпних даних, які б дозволили об'єктивно оцінити навантажувальну спроможність електричної машини після проведеного ремонту [1].

Практичний досвід переконливо демонструє, що відремонтована електрична машина найчастіше має відмінні від первісних заводських паспортні характеристики, що зумовлено специфічними технічними особливостями та факторами впливу.

Електричні машини різних модифікацій, як правило, проходять відновлення у спеціалізованих ремонтних цехах і підприємствах. У деяких випадках, особливо при незначних пошкодженнях або для великогабаритного електрообладнання, ремонтні роботи здійснюються безпосередньо на місці експлуатації.

Технологічна складність та різноманітність ремонтних процесів безпосередньо залежать від специфіки електрообладнання. Зокрема, в складних системах електроприводу, оснащених, наприклад, тиристорними перетворювачами, основний обсяг електроремонтних робіт виконується безпосередньо на місці: несправності тиристорних перетворювачів діагностуються профільними службами, а логічні та релейно-контакторні системи або ремонтуються, або підлягають повній заміні.

Враховуючи тривалість терміну експлуатації електричних машин, стає очевидним, що щорічно ремонтується набагато більше електричних машин, ніж виробляється на електромашинобудівних підприємствах. Можна стверджувати, що потужність електричних машин, їх типологія, умови експлуатації та інші супутні фактори визначають можливий діапазон показників надійності систем електроприводів.

Понад 80% електроремонтних підприємств та цехів входять до структури профільної галузі, а решта перебувають у складі електротехнічної

промисловості. Технічний рівень електроремонтних підприємств, як правило, є нижчим порівняно з електромашинобудівними заводами, що зумовлено кількома об'єктивними причинами.

По-перше, в системі підприємств електромеханічної промисловості електроремонтні підприємства не є профільними або базовими, внаслідок чого їм приділяється значно менше уваги та ресурсів. По-друге, в структурі інших промислових галузей фактично відсутні реальні можливості створити умови, хоча б частково співставні з умовами, що існують на електромашинобудівних заводах.

Інтенсивність відмов виступає ключовим показником надійності електричної машини. Теорія надійності виокремлює три характерні типи відмов, які є внутрішньо притаманними машині та виявляються незалежно від дій обслуговуючого персоналу.

До основних типів відмов відносяться наступні:

1. Відмови, що виникають у ранній період експлуатації машини. Ці відмови мають назву "відмови початкового періоду" [4], та здебільшого є наслідком недосконалої технології виробництва й низької якості контролю деталей на етапах виготовлення та складання.

2. Відмови, спричинені зношуванням окремих компонентів машини [1, 4]. Відмови через природне спрацювання деталей є індикатором старіння обладнання. У багатьох випадках такі експлуатаційні порушення можна мінімізувати шляхом своєчасної заміни зношених деталей під час планових ремонтних робіт.

3. Раптові відмови, що виникають у період штатної експлуатації машини. Такі несправності є результатом стрибкоподібної зміни характеристик або параметрів машини внаслідок несподіваних перевантажень чи інших зовнішніх факторів [1, 4]. Незважаючи на свою випадковість, ці відмови підкоряються певним статистичним закономірностям, а їхня інтенсивність залишається приблизно незмінною протягом тривалого періоду експлуатації обладнання.

Незважаючи на постійне вдосконалення технологій виготовлення конструкційних матеріалів і ремонтних процесів, світові показники надійності електрообладнання залишаються практично незмінними. З усієї кількості пошкоджених електродвигунів близько 78% проходять ремонт, а 22% підлягають повній заміні резервними одиницями.

Статистика типів аварій демонструє наступну картину:

- Пробій і коротке замикання на землю: 28%
- Електричні несправності: 32%
- Механічні ушкодження: 31%

Місця первинного прояву пошкоджень розподіляються так:

- Ізоляція обмоток: 50%
- Підшипникові вузли: 29%

Причини аварій включають:

- Пробій ізоляції: 30%
- Перегрів: 26%
- Механічні ушкодження: 20%

Додаткові фактори виникнення несправностей:

- Природне фізичне старіння та знос: 34%
- Незадовільна якість мастила: 15%
- Підвищена вологість: 10%
- Недостатнє профілактичне обслуговування: 17%

Використовуючи статистичні дані про відмови машин та застосовуючи методи теорії ймовірностей і математичної статистики, можна визначити середній час безвідмовної роботи між двома потенційними несправностями, що слугує важливим кількісним показником експлуатаційної надійності обладнання.

Електроприводи з асинхронними двигунами.

У переважній більшості випадків виходу з ладу підлягають електродвигуни потужністю понад 5 кВт. Статистика пошкоджень виглядає наступним чином [9]:

- Міжвиткові замикання: до 93%
- Пробої міжвиткової ізоляції: до 5%
- Пробої пазової ізоляції: до 2%
- Механічні пошкодження: до 8%

Характер пошкоджень асинхронних двигунів розподіляється так:

- Експлуатаційні причини: до 50%
- Технологічні причини, пов'язані з виробниками: до 30%

Відмови через замикання в обмотці статора мають різноманітну природу, зокрема:

- Робота в двофазному режимі
- Локальні перегіви
- Складні умови запуску

Значна частина цих причин обумовлена багаторазовими ремонтами та специфічною технологічною обробкою статора і ротора, тобто пов'язана з операціями, що призводять до змін характеристик конструкційних матеріалів.

Робота АД зазвичай відбувається в умовах, далеких від ідеальних, що призводить до необхідності враховувати різні види несиметрії, які негативно впливають як на експлуатаційні режими, так і на техніко-експлуатаційні показники роботи АД.

Перелічимо види несиметрії, які найчастіше зустрічаються і мають найістотніший вплив на роботу АД.

Досить часто АД працює в режимі несиметричної напруги джерела живлення, що може бути зумовлено, наприклад, неточним симетруванням однофазних навантажень, а також іншими особливостями роботи системи електропостачання.

Іншим широко поширеним джерелом несиметрії є параметрична асиметрія статорних обмоток. За ДСТУ допускається розбіжність обмотувальних даних АД за окремими фазами в межах 2,5 % як прийнятний дефект процесу виготовлення АД. Параметрична асиметрія АД може виникати і в процесі

експлуатації в ході появи і розвитку несправностей АД. Основним видом несправності, що виникає під час експлуатації АД, є міжвиткове коротке замикання, яке виникає в обмоток статора, [1]. Міжвиткове замикання викликає локальний перегрів статорної обмотки, що призводить до подальшого лавиноподібного розвитку цього дефекту й остаточного виходу асинхронного двигуна з роботи.

У процесі розвитку міжвиткового замикання поступово зменшується кількість витків обмотки фази статора, що зумовлює зменшення активного опору обмотки фази статора, що зумовлено зменшенням довжини провідників. Також зменшується й індуктивний опір розсіювання, що викликано зменшення кількості витків обмотки фази статора.

У технічній літературі, [9], наведено наступні вирази для визначення активного опору фази статора:

$$R_s = \rho \cdot l_c \cdot \frac{W_a}{a} \cdot \frac{1}{A_{\cos}} \cdot K_R \quad (1)$$

де l_c - довжина витка; W_a - кількість витків в одній котушці; K_R - співвідношення між опором фази змінного і постійного струму; a - кількість котушок; ρ_{Cu} - питомий опір матеріалу обмотки; A_{\cos} - фактичний поперечний перетин провідника;

А також для розрахунку індуктивного опору розсіювання обмотки фази статора:

$$x = 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{\omega}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_i}{p \cdot q} (\lambda_{II} + \lambda_{II} + \lambda_{II}), \quad (2)$$

де f_1 - частота напруги живлячої мережі; W_1 - кількість витків на одну фазу; l_i - ідеальна довжина витка; q_1 - кількість пазів на один полюс та фазу статора; p_1 - кількість полюсів, λ_{II} , λ_{II} , λ_{II} - коефіцієнти магнітної провідності відповідно для пазового розсіювання, для диференціального розсіювання та для лобового розсіювання, м.

Отож, під час міжвиткового замикання відбувається зменшення числа витків обмотки фази статора, що супроводжується зменшенням як активного опору, так і індуктивного опору розсіювання обмотки фази статора. При цьому згідно наведених виразів маємо, що активний опір пропорційний числу витків, а індуктивний опір розсіювання пропорційний квадрату числа витків обмотки фази статора.

Параметрична асиметрія роторних обмоток, через відмінності конструкції короткозамкненого ротора, проявляється у вигляді обриву стрижнів білячої клітки ротора.

1.2 Огляд англомовних літературних джерел.

1. Messaoudi, M.; Flah, A.; Alotaibi, A.A.; Althobaiti, A.; Sbita, L.; Ziad El-Bayeh, C. Diagnosis and Fault Detection of Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors Using Combined Park's Vector and Extended Park's Vector Approaches. *Electronics* 2022, 11, 380. <https://doi.org/10.3390/electronics11030380>

The induction motor (IM) is widely regarded as one of the most critical types of motors in industrial applications. A sudden failure of this machine can result in unexpected downtime, leading to increased costs, compromised product quality, and potential safety risks. Over the past decade, numerous methods and techniques have been proposed for diagnosing and detecting faults in induction machines. This paper introduces a novel algorithm that combines the Park's Vector Approach (PVA) and the Extended Park's Vector Approach (EPVA) to detect and identify broken rotor bar (BRB) faults. Using the PVA, the fault is identified by analyzing changes in the thickness and orientation of the Park's vector pattern, while the EPVA detects specific spectral components associated with the fault. To evaluate the performance of the proposed algorithm, simulations and experiments were conducted, and the results demonstrate its accuracy and effectiveness. This algorithm shows significant potential for widespread application in IM fault detection and diagnosis.

2. Shrinathan Esakimuthu Pandarakone, Yukio Mizuno, and Hisahide Nakamura, "Distinct Fault Analysis of Induction Motor Bearing using Frequency Spectrum Determination and Support Vector Machine", DOI 10.1109/TIA.2016.2639453, IEEE Trans. Industry Applications.

In modern industrial environment, the demand for the condition monitoring and the maintenance management for the induction motor has been increased. Among all the components of the induction motor, bearing is the critical component and the fault occurring in it has to be considered as a major issue. Usually, the bearing fault can be detected by the vibrational analysis. However, this method has a disadvantage that location of the equipment is not always easily accessible and also quite costly. Thus, in this paper, the experiment for detecting the fault in the bearing of the three phase induction motor is achieved by the frequency selection in the stator current spectrum. Their feature was evaluated by Fast Fourier Transform and the diagnosis was performed by Support Vector Machine. Experimental results were obtained, considering two types of outer raceway bearing faults at different load conditions and the promising results were obtained.

3. Liu, X.; Yan, Y.; Hu, K.; Zhang, S.; Li, H.; Zhang, Z.; Shi, T. Fault Diagnosis of Rotor Broken Bar in Induction Motor Based on Successive Variational Mode Decomposition. *Energies* 2022, 15, 1196. <https://doi.org/10.3390/en15031196>.

During steady-state operation at low slip, detecting broken bar faults in an induction motor proves challenging because the fault signal is easily obscured by the dominant power frequency (50 Hz) signal. However, the distinctive characteristics of these faults become more discernible during motor startup, where the fault component reveals a V-shaped trajectory in the time-frequency domain.

This research introduces an innovative methodology for identifying and assessing broken bar faults under startup conditions. The proposed approach employs several sophisticated techniques:

1. Successive Variable Mode Decomposition (SVMD) is utilized to analyze the stator starting current and extract the fault-related component.

2. A signal reconstruction technique is implemented to maximize the energy of the fault component.

3. A quadratic regression curve method is applied to the instantaneous frequency square value, enabling determination of fault occurrence.

4. The energy of the right part of the fault component is leveraged to evaluate fault severity, based on the principle that fault component energy increases with the extent of damage.

Experimental validation was conducted using a 5.5 kW three-pole induction motor. The research findings demonstrate the method's effectiveness in both diagnosing broken bar faults and precisely determining their severity.

By focusing on the startup phase and employing advanced signal processing techniques, this approach offers a more reliable and nuanced method for identifying and quantifying induction motor defects.

3. M. Skowron, Application of deep learning neural networks for the diagnosis of electrical damage to the induction motor using the axial flux, *Bulletin of the polish academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 68, No. 5, 2020, <https://doi.org/10.24425/bpasts.2020.134663>.

Induction motors represent one of the most widespread machine types in industrial drive systems. Throughout their operational lifecycle, these machines are susceptible to various forms of damage, which can lead to substantial economic losses. Notably, electrical circuit damages account for more than 50% of all reported defects in induction motors.

Given these challenges, the early detection of machine defects has emerged as a critical priority in contemporary drive system engineering. This imperative drives continuous research into advanced diagnostic methodologies.

The research explores an innovative approach utilizing deep neural networks to identify and diagnose stator and rotor-related damages. A particularly promising technique involves leveraging axial flux signals to detect two specific types of electrical faults:

1. Shorted turns in the motor windings
2. Broken rotor bars

By employing sophisticated neural network algorithms and analyzing axial flux signals, researchers aim to develop more precise, real-time diagnostic capabilities. This approach offers the potential to enhance predictive maintenance strategies, reduce unexpected equipment failures, and minimize overall operational disruptions in industrial settings.

The proposed method represents a significant advancement in motor fault detection, bridging the gap between traditional diagnostic techniques and cutting-edge machine learning technologies.

5. S. Tierrafria-Baez, P. M. Calderon-Lopez, V. Cano-Valdez, B. K. Aviles-Diaz, C. Rodriguez-Donate and E. Cabal-Yepez, "Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors through Information Entropy Analysis on the Start-up Transient and Steady-State Current Signals," IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2021, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589669>.

Induction motors are key elements for industrial and manufacturing processes. An unexpected fault can provoke severe consequences about reparation costs, product quality or even security. The breaking of a rotor bar may produce secondary faults that will generate catastrophic damages to the motor or surrounding equipment; hence, early fault detection in induction motors has gained significant relevance in last few years. Related techniques in recent literature for broken bar detection employ the combination of distinct signal processing algorithms increasing their computational cost and making difficult their online implementation. Furthermore, previous approaches focus on the start-up transient current analysis since broken rotor bar detection is easier under this regime than under the steady state. In this work, an experimental examination about the feasibility of using information entropy analysis on the electric current supply to an induction motor is performed, during its start-up transient and its steady state. Obtained experimental results exhibit the high effectiveness

of information entropy as low computational cost index, for detecting a healthy motor or a motor with one broken bar under both operational regimes, start-up transient and steady state.

6. M'hamed, Birame, Bessedik Sid Ahmed, and Benkhoris Mohamed Fouad. "Detection of partial rotor bar rupture of a cage induction motor using least square support vector machine approach". *Diagnostyka* 22 no. 1 (2021): 57-63.
<https://doi.org/10.29354/diag/133039>.

This research explores the capabilities of Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM) in detecting partial rotor bar ruptures within squirrel cage asynchronous motors. The methodology encompasses several key analytical approaches:

First, the researchers employed stator current spectral analysis using the Fast Fourier Transform (FFT) method to extract fault-specific frequencies associated with partial rotor bar damage in cage induction motors. This spectral analysis serves as a critical preliminary step in identifying characteristic signatures of mechanical deterioration.

Subsequently, the LS-SVM approach was developed and implemented as a sophisticated monitoring system designed to assess the extent and severity of broken rotor bar defects. The training and testing datasets were derived exclusively from spectral analysis of a single stator phase current, which encapsulates critical information about characteristic harmonics related to partial rotor bar ruptures.

The research demonstrates that applying LS-SVM to fault diagnosis yields notably satisfactory and precise results. By leveraging advanced machine learning techniques and sophisticated signal processing methods, the study provides a robust framework for early detection and quantification of rotor bar damage in industrial electric motors.

This approach represents a significant advancement in predictive maintenance strategies, offering engineers and technicians a powerful tool for identifying potential mechanical failures before they escalate into more serious and costly equipment breakdowns.

7. N. Medeiros M Nascimento, S. P. P. Silva, P. P. Reboucas Filho and C. Marques Sa Medeiros, "Higher-Order Statistics applied to machine learning as an approach to identify broken rotor bars in induction motors," in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 8, pp. 2267-2274, Aug. 2018, <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8528245> .

Induction motors are reported as the horse power in industries. Due to its importance, researchers have been studied how to predict its faults in order to improve reliability. Condition health monitoring plays an important role in this field, since it is possible to predict failures by analyzing its operational data. This paper proposes the usage of vibration signals, combined with Higher-Order Statistics (HOS) and machine learning methods to detect broken bars in a squirrel-cage three-phase induction motor. The Multi-Layer Perceptron and Optimum-Path Forest have presented as promising approaches for faults classifications in an induction motor.

8. Skowron, M.; Orłowska-Kowalska, T. Efficiency of Cascaded Neural Networks in Detecting Initial Damage to Induction Motor Electric Windings. Electronics 2020, 9, 1313. <https://doi.org/10.3390/electronics9081314>

This research explores the potential of cascaded neural structures for detecting electrical circuit damages in squirrel cage induction motors (IM) powered by frequency converters. The study presents an innovative approach that involves sequentially connecting classic neural structures to enhance damage detection and classification capabilities.

Key highlights of the research include:

1. Diagnostic Strategy

The authors propose a novel methodology of linking neural networks sequentially to improve the overall efficiency of fault identification. This approach is particularly effective in detecting early-stage single or multiple electrical failures.

2. Diagnostic Information Source

The research utilizes the easily measurable axial flux signal as the primary source of diagnostic information. This choice allows for straightforward yet comprehensive monitoring of motor condition.

3. Implementation Platform

The developed cascaded neural networks were implemented using LabVIEW measurement and diagnostic software, ensuring practical applicability and user-friendly interface.

4. Experimental Validation

Experimental research conducted on a 1.5 kW induction motor supplied by an industrial frequency converter demonstrated the high effectiveness of the proposed approach.

5. Fault Detection Capabilities

The cascaded neural structures successfully detected:

- Inter-turn stator winding short circuits
- Broken rotor bars
- Mixed electrical failures

Critically, the method proved robust across varying load torque and supply voltage frequency ranges, offering a comprehensive diagnostic solution for industrial electric motors.

The research represents a significant advancement in predictive maintenance technologies, providing engineers with a powerful tool for early fault detection and prevention.

9. M. Sameh, A. Tarek and K. Yassine, "Bearing and Rotor Faults detection and diagnosis of Induction Motors using Statistical Neural Networks," 2020 20th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2020, pp. 77-81, <https://doi.org/10.1109/STA50679.2020.9329334>.

The Artificial Intelligence (AI) is revolutionizing extensively in various industrial fields. The robustness of AI comes from utilization of information processing in

solving complex real world problems. Contrary to other types of artificial intelligence, the Artificial Neural Networks (ANN) can monitor any industrial process, inspired by the functionality of the human brain. This paper is devoted to the diagnosis of induction machine by using the artificial neural network based on the stator current analysis as input features. The current work aims to compare the effectiveness of both types ANN classifiers: the Radial Basis Function Network (RBF) and Probabilistic Neural Network (PNN) in asynchronous machine faults (rotor and bearing faults) detection and severity evaluation. We've proved that RBF networks are better suited for assessing the severity of defects while the PNN gives better results when differentiating between rotor and bearing defects. The results presented in this work are confirmed experimentally.

10. Sinha, A.K.; Hati, A.S.; Benbouzid, M.; Chakrabarti, P. ANN-Based Pattern Recognition for Induction Motor Broken Rotor Bar Monitoring under Supply Frequency Regulation. *Machines* 2021, 9, 87. <https://doi.org/10.3390/machines9050087>.

Underground mining operations present unique challenges for squirrel cage induction motors (SCIMs), particularly due to direct-on-line (DOL) starting requirements. This starting method subjects rotor bars to extreme stress, leading to sustained rotor bar faults—a phenomenon less common in applications utilizing reduced voltage starting.

The research addresses two critical challenges faced by SCIMs in underground mining environments:

1. Severe mechanical stress during DOL starting
2. Unpredictable frequency fluctuations

To tackle these issues, the study proposes an innovative broken rotor bar detection scheme characterized by:

1. Diagnostic Methodology
 - Utilizes Discrete Wavelet Transform (DWT) for stator current analysis
 - Focuses on frequency regulation scenarios ($\pm 4\%$ of 50 Hz supply)

- Compares level-seven detailed coefficients between healthy and faulty rotors

2. Feature Extraction and Fault Identification

- Implements Artificial Neural Network (ANN) pattern recognition techniques
- Employs two ANN approaches:
 - a) Feed-forward backpropagation
 - b) Cascaded forward backpropagation

3. Technical Implementation

- Developed and analyzed using MATLAB/Simulink
- Validated through LabVIEW-based real-time implementation
- Tested on a 5.5 kW, 415 V, 50 Hz SCIM

The proposed scheme offers a sophisticated, multi-layered approach to detecting and diagnosing rotor bar faults in challenging underground mining conditions, potentially improving equipment reliability and maintenance strategies.

11. Martinez-Roman, J.; Puche-Panadero, R.; Sapena-Bano, A.; Terron-Santiago, C.; Burriel-Valencia, J.; Pineda-Sanchez, M. Analytical Model of Induction Machines with Multiple Cage Faults Using the Winding Tensor Approach. *Sensors* 2021, 21, 5076. <https://doi.org/10.3390/s21155076>

Induction machines (IMs), particularly squirrel cage IMs (SCIMs), are widely used as a primary source of mechanical power in many industrial processes due to their durability and reliability. However, their sudden stoppage caused by undetected faults can lead to costly production disruptions. One of the most common types of faults involves the cage (e.g., breakages in bars or end ring segments), which is especially prevalent in motors directly driving high-inertia loads (like fans), motors subjected to frequent starts and stops, or those with poorly manufactured cage windings. Continuous monitoring of IMs is essential to mitigate this risk, typically integrated into plant-wide condition-based maintenance (CBM) systems.

Various diagnostic techniques have been proposed in technical literature, falling into two categories: data-based methods, which detect fault-specific anomalies in IM data, and model-based methods, which identify discrepancies between data from

the actual IM and its digital twin model. Both approaches require fast and accurate IM models for the development and optimization of fault diagnosis techniques.

Finite element methods can produce highly accurate models but are computationally expensive, making them unsuitable for real-time fault diagnostics. Conversely, analytical models are significantly faster but become increasingly complex for highly asymmetrical machines, such as IMs with multiple cage faults.

This study introduces a novel analytical modeling method for IMs with asymmetrical cage windings, utilizing a tensor-based approach. By applying routine tensor algebra, this method simplifies the process of deriving the parameters of the faulty IM model from the healthy one. The theoretical foundation of the winding tensor approach is presented and validated through the diagnosis of a commercial IM with multiple cage faults.

Висновки по розділу 1

У першому розділі розглянуто сучасний стан електромеханічних перетворювачів енергії та причин їх аварійності. Значна частка аварійних виходів з ладу асинхронних двигунів викликана витковими замиканнями статора та обривом стрижней білячої клітки ротора короткозамкненого асинхронного двигуна, тобто параметричною несиметрією обмоток асинхронного двигуна. Огляд сучасної науково-технічної літератури підтверджує велику зацікавленість дослідників у вивченні питань, пов'язаних з роботою білячої клітки на показники електромеханічного перетворення асинхронного двигуна, що підтверджує актуальність теми дослідження.

Розділ 2. Математичне моделювання асинхронного двигуна з білячою кліткою на роторі

2.1 Математичне моделювання асинхронного двигуна в трифазній координатній системі

При складанні системи диференціальних рівнянь асинхронного двигуна використовують загальний підхід, розвинутий у теорії узагальненого електромеханічного перетворювача. Прийmemo наступні припущення, які пов'язані з поняттям *ідеалізована машина*:

- магнітна система електромеханічного перетворювача ненасичена;
- фазні обмотки асинхронного двигуна електрично симетричні і розташовані в поперечному перетині статора рівномірно із зсувом на 120° ;
- магнітно-рушійні сили окремих обмоток мають синусоїдальний розподіл вздовж повітряного зазору;
- ротор асинхронного двигуна електрично і магнітно симетричний;
- реальні, розподілені обмотки асинхронного двигуна замінюються зосередженими, а магнітно-рушійна сила прийнята рівною магнітно-рушійній силі реальної обмотки.

Математична модель будь-якого електромеханічного перетворювача, складається з рівнянь електричної рівноваги для всіх контурів електричної машини та рівняння руху механічної частини електромеханічного перетворювача.

Розглянемо асинхронний двигун у формі системи просторово розподілених обмоток статора та ротора, які магнітно пов'язані між собою, рис.2.1.

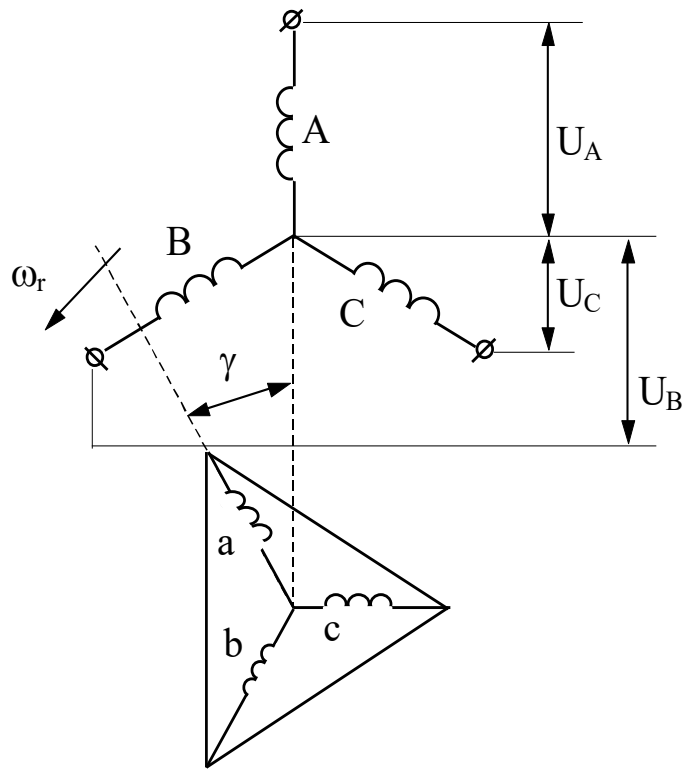


Рисунок 2.1 – Просторова схема розташування обмоток статора і ротора асинхронного двигуна

Система звичайних диференціальних рівнянь електричної рівноваги для обмоток статора і ротора виглядає наступним чином (2.1)-(2.2).

$$\begin{cases} U_A = i_A R_s + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ U_B = i_B R_s + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ U_C = i_C R_s + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} 0 = i_a R_r + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 = i_b R_r + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 = i_c R_r + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{cases} \quad (2.2)$$

де ψ_A, ψ_B, ψ_C - потокозчеплення фаз статора; ψ_a, ψ_b, ψ_c - потокозчеплення фаз ротора; R_s, R_r - активні опори фаз статора і ротора.

Потокозчеплення Ψ довільної обмотки АД залежить від власної індуктивності обмотки і значень взаємної індуктивності з усіма іншими контурами.

Отже, для потокозчеплення фази «А» матимемо наступний вираз:

$$\psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a + M_{Ab} i_b + M_{Ac} i_c \quad (2.3)$$

де L_A - індуктивність фази; M_{xy} - взаємна індуктивність між обмотками x і y .

Базуючись на прийнятому припущенні про електричну та магнітну симетрію асинхронного двигуна взаємні індуктивності між обмотками статора і ротора будуть мати однакове і постійне значення:

$$M_{AB} = M_{AC} = M_{BC} = M_s; \quad (2.4)$$

$$M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = M_r. \quad (2.5)$$

Однак взаємне просторове розміщення обмоток ротора і статора відносно одне одного безперервно змінюється через обертання ротора. Внаслідок цього величина взаємної індуктивності між обмотками статора і ротора є гармонійною функцією кута повороту ротора асинхронного двигуна.

При співпадінні напрямку осей двох контурів взаємна індуктивність сягає свого максимального значення. При перпендикулярному розташуванні осей двох контурів взаємна індуктивність дорівнює нулю.

Отже, для фази «А» отримуємо

$$M_{Aa} = M \cos \gamma, \quad (2.6)$$

де M - найбільше значення взаємної індуктивності при співпадінні осей «А» та «а»; γ - кут повороту ротора.

Оскільки за рис. 2.1 фаза «В» випереджає фазу «А» на 120° , отримуємо такий вираз

$$M_{Ab} = M \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2.7)$$

Оскільки фаза «С» відстає від фази «А» на 120° , отримуємо наступний вираз:

$$M_{Ac} = M \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (2.8)$$

Розмірковуючи аналогічно, для фаз «В» і «С» отримаємо наступні рівняння для взаємних індуктивностей фаз статора та ротора:

$$\begin{cases} M_{Ba} = M \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right), \\ M_{Bb} = M \cos\gamma, \\ M_{Bc} = M \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right); \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} M_{Ca} = M \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right), \\ M_{Cb} = M \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right), \\ M_{Cc} = M \cos\gamma. \end{cases} \quad (2.10)$$

Запишемо вираз для потокозчеплення фази «А» статора в розгорнутому вигляді:

$$\begin{aligned} \psi_A = L_A i_A + M_s i_B + M_s i_C + M i_a \cos\gamma + \\ + M i_b \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + M i_c \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (2.11)$$

З урахуванням першого закону Кірхгофа $i_A + i_B + i_C = 0$, то $-i_A = i_B + i_C$:

$$\psi_A = (L_s - M_s) i_A + M i_a \cos\gamma + M i_b \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + M i_c \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (2.12)$$

Визначимо першу похідну потокозчеплення фази «А» статора в розгорнутому вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} = (L_s - M_s) \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_a}{dt} \cos\gamma - M\omega i_a \sin\gamma + \\ + M \frac{di_b}{dt} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) - M\omega i_b \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ + M \frac{di_c}{dt} \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - M\omega i_c \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Остаточно отримуємо рівняння електричної рівноваги фази «А» статора у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} U - i_A R_s + M\omega i_a \sin \gamma + M\omega i_b \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + M\omega i_c \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) = \\ = (L_s - M_s) \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_a}{dt} \cos \gamma + M \frac{di_b}{dt} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ + M \frac{di_c}{dt} \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (2.14)$$

За подібними міркуваннями нескладно скласти рівняння для фаз «В» і «С» статора і фаз ротора.

У цій системі рівнянь для асинхронного двигуна (АД) відсутні потокозчеплення обмоток, а невідомими функціями є струми окремих контурів. З огляду на це така система рівнянь називається системою рівнянь відносно струмів.

Недоліки системи рівнянь відносно струмів:

1. Система диференціальних рівнянь є нелінійною, оскільки містить функції, які залежать від шуканих змінних (струмів) та кута повороту.
2. Вона не може бути записана у канонічній формі, вирішеній відносно похідних, оскільки в лівій частині кожного рівняння присутні чотири похідні від невідомих функцій.

Розв'язання такої системи можливе за наступним алгоритмом:

1. Використовуючи початкові значення струмів, швидкості та кута повороту, визначають поточні значення взаємних індуктивностей між обмотками статора та ротора.
2. Обчислюють праві частини рівнянь електричної рівноваги для всіх фаз.
3. Розглядають систему з шести рівнянь як систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно похідних струмів. Застосовують чисельні методи розв'язання (наприклад, методи Крамера, Гаусса або обернення матриці) для знаходження похідних струмів.

4. Чисельно інтегрують систему диференціальних рівнянь, отримуючи невідомі функції.

Однак й запис диференційних рівнянь відносно невідомих потокозчеплень не здатен поліпшити ситуацію. При такому підході, задаючи початкові значення потокозчеплень, можна обчислити струми, розв'язавши систему лінійних алгебраїчних рівнянь для потокозчеплень.

Таким чином, систему диференціальних рівнянь асинхронного двигуна у фазній системі координат можна використовувати для моделювання перехідних процесів. Основний недолік цього методу — громіздкість, велика кількість нелінійних елементів і необхідність розв'язання проміжної системи лінійних рівнянь.

2.2 Математичне моделювання АД білячою кліткою з використанням теорії узагальненого електромеханічного перетворювача

Відносно мало дослідженим є питання врахування складної конструкції коротко-замкненого ротора у вигляді замкненої багатострижневої білячої клітки, рис. 2.2.

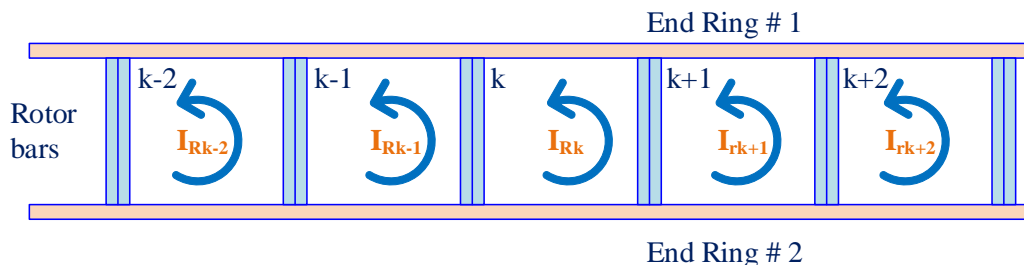


Рисунок 2.2 - Моделювання справної білячої клітки асинхронного двигуна

Для дослідження впливу обриву стрижнів білячої клітки ротора на роботу АД використовуємо подання ротора АД у вигляді системи багатофазних обмоток, у якій кожен стрижень ротора розглядається як окрема обмотка.

Для виведення рівнянь теоретичної математичної моделі АД з багатофазним ротором використовуємо теорію узагальненого електромеханічного перетворювача.

При складанні рівнянь використовуємо загальноприйняті припущення, пов'язані з поняттям ідеалізованого двигуна:

1. сталь двигуна ненасичена;
2. фазні обмотки статора рівномірно розподілені в просторі;
3. стрижні білячої клітки ротора рівномірно розподілені в просторі;
4. реально розподілені обмотки замінюють зосередженими, а МДС приймається рівною МДС реальної обмотки.

5. МДС обмоток і магнітних полів поширюються синусоїдально вздовж кола повітряного зазору;

Уявімо АД як систему магнітно пов'язаних обмоток. Для загальності викладу будемо вважати статорну обмотку багатофазною. На статорі розташовані M обмоток, підключених до M фазного джерела живлення. На роторі розташовані N короткозамкнених обмоток, де N дорівнює числу стрижнів білячої клітки, (рис. 2.3).

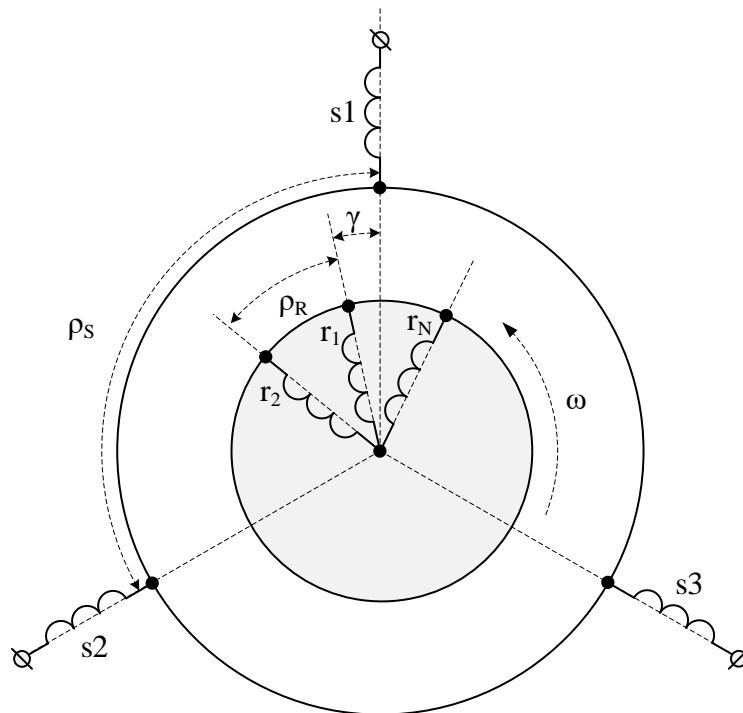


Рисунок 2.3 - Схема взаємного розташування обмоток статора і ротора багатофазного АД для випадку числа фаз статора $M = 3$.

Система рівнянь електричної рівноваги АД з багатофазним ротором у матричній формі матиме відомий вигляд:

$$[\mathbf{U}] = [\mathbf{R}] \cdot [\mathbf{I}(t)] + \frac{d}{dt} [\boldsymbol{\Psi}(t)], \quad (2.15)$$

У цьому рівнянні прийнято такі позначення:

Вектор-стовпець живильних напруг статора має розмірність M :

$$[\mathbf{U}_S] = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_M]^T \quad (2.16)$$

Уведемо додаткові позначення:

$$\rho_S = 2\pi/M; \rho_R = 2\pi/N \quad (2.17)$$

Тоді напругу живлення статора в загальному вигляді запишемо так:

$$U_k = \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \sin(\omega_c \cdot t - \rho_S \cdot (k-1)), \quad (2.18)$$

де $\omega_c = 2\pi \cdot f \cdot p$ – кутова швидкість обертання поля статора з частотою живлячої мережі f при числі пар полюсів p .

Вектор-стовпець живильних напруг для короткозамкненого ротора являє собою нульовий вектор розмірністю N .

$$[\mathbf{U}_R] = [0 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (2.19)$$

Тоді вектор-стовпець живильних напруг у клітинно-матричній формі дорівнює

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_S \\ \mathbf{U}_R \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

і має розмірність $M+N$.

Аналогічно, вектор-стовпець струмів обмоток статора має розмірність M :

$$[\mathbf{I}_S] = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_M]^T \quad (2.21)$$

Вектор-стовпець струмів обмоток ротора розмірності N:

$$\mathbf{I}_R = [I_{R1} \ I_{R2} \ \dots \ I_{RN}]^T \quad (2.22)$$

Вектор-стовпець струмів у клітинно-матричній формі дорівнює

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_S \\ \mathbf{I}_R \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Квадратна діагональна матриця активних опорів $[\mathbf{R}]$ має розмірність $(M+N) \times (M+N)$. Елементи головної діагоналі цієї матриці дорівнюють активним опорам відповідних обмоток, що дає змогу моделювати режими роботи АД з несиметричними активними опорами.

Аналогічно до струмів, вектор-стовпець потокозчеплень обмоток статора має розмірність M:

$$[\Psi_S] = [\Psi_1 \ \Psi_2 \ \dots \ \Psi_M]^T \quad (2.24)$$

Вектор-стовпець потокозчеплень обмоток ротора розмірності N:

$$\Psi_R = [\Psi_{R1} \ \Psi_{R2} \ \dots \ \Psi_{RN}]^T \quad (2.25)$$

Вектор-стовпець потокозчеплень у клітинно-матричній формі дорівнює

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_S \\ \Psi_R \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Рівняння потокозчеплення для кожної обмотки може бути записано у формі:

$$\Psi_k = I_k \cdot L_k + \sum_{j=1}^{j=N, j \neq k} I_j \cdot M_{kj} \quad (2.27)$$

де Ψ_k, I_k, L_k - потокозчеплення, струм та індуктивність обмотки з індексом k ;
 I_j, M_{kj} струм j -го контуру і взаємна індуктивність обмоток з індексами k і j .

Потокозчеплення кожної з обмоток умовно можна розділити на дві складові: утворені струмами обмоток нерухомими, одна відносно одної, і обмоток, що обертаються одна відносно одної зі швидкістю ротора.

Матриця власних індуктивностей статорних обмоток може бути записана в такому вигляді:

$$[\mathbf{L}_{SS}] = [\mathbf{L}_{\delta S}] + [\mathbf{M}_{SS}] \quad (2.28)$$

де $\mathbf{L}_{\delta S}$ – квадратна діагональна матриця власних індуктивностей розсіювання розмірністю $M \times M$; елементи головної діагоналі цієї матриці дорівнюють індуктивностям розсіювання статорних обмоток; \mathbf{M}_{SS} квадратна матриця взаємних індуктивностей між статорними обмотками розмірністю $M \times M$; елементи цієї матриці дорівнюють взаємним індуктивностям між відповідними статорними обмотками. Оскільки статорні обмотки зсунуті в просторі одна відносно одної на величину ρ_S , то вираз взаємної індуктивності між статорними обмотками з індексами j і k можна записати так:

$$\mathbf{M}_{SS}[j,k] = m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (k-j)); j=1 \dots M; k=1 \dots M \quad (2.29)$$

Окремі доданки рівняння (14) у розгорнутій формі подано нижче.

$$\mathbf{L}_{\delta S} = \begin{bmatrix} l_{1\delta} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & l_{1\delta} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & l_{1\delta} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & l_{1\delta} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{M}_{\delta SS} = \begin{bmatrix} m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (1-1)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (2-1)) & \dots & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1-1)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1)) \\ m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (1-2)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (2-2)) & \dots & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1-2)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-2)) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (1-(M-1))) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (2-(M-1))) & \dots & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1-(M-1))) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-(M-1))) \\ m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (1-M)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (2-M)) & \dots & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1-M)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-M)) \end{bmatrix}$$

Тут $l_{l\delta}$ – індуктивність розсіювання фази статора АД; m_l – максимальне значення взаємної індуктивності між фазами статора.

Аналогічним чином, з урахуванням кількості фаз ротора, можна подати і матриці власних індуктивностей роторних обмоток.

$$[\mathbf{L}_{RR}] = [\mathbf{L}_{\delta R}] + [\mathbf{M}_{RR}] \quad (2.30)$$

де $\mathbf{L}_{\delta R}$ – квадратна діагональна матриця власних індуктивностей розсіювання розмірністю $N \times N$; елементи головної діагоналі цієї матриці дорівнюють індуктивностям розсіювання роторних обмоток; \mathbf{M}_{RR} – квадратна матриця взаємних індуктивностей між роторними обмотками розмірністю $N \times N$; елементи цієї матриці дорівнюють взаємним індуктивностям між відповідними роторними обмотками. Оскільки роторні обмотки зсунуті в просторі одна щодо одної на величину ρ_R , то вираз взаємної індуктивності між роторними обмотками з індексами j і k можна записати таким чином:

$$\mathbf{M}_{RR}[j,k] = m_2 \cdot \cos(\rho_R \cdot (k - j)); j = 1 \dots N; k = 1 \dots N \quad (2.31)$$

Далі необхідно скласти матрицю взаємних індуктивностей між обмотками статора і обмотками ротора, що обертаються.

Виходячи з геометричних міркувань, рис. 2.3, формулу для взаємної індуктивності між обмоткою ротора з номером n і обмоткою статора з номером m можна записати таким чином:

$$M_{SmRn} = m_0 \cdot \cos(\gamma(t) - \rho_S(m-1) + \rho_R(n-1)) \quad (2.32)$$

де m_0 – максимальне значення взаємної індуктивності між обмотками статора і ротора при збігу їхніх осей; $\gamma(t)$ – миттєве значення кута повороту ротора.

Матриця взаємних індуктивностей між обмотками статора і ротора буде в загальному випадку прямокутною матрицею розмірності $M \times N$.

Тоді повна матриця взаємних індуктивностей багатозафазного АД може бути представлена в такій клітинно-матричній формі:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{SS} & \mathbf{M}_{SR} \\ \mathbf{M}_{SR}^T & \mathbf{L}_{RR} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Ця матриця є квадратною і має розмірність $(M+N) \times (M+N)$.

Обертальний момент асинхронного двигуна може бути обчислений таким чином, [14]:

$$T_E = \frac{Z_p}{\sqrt{3}} [\Psi_A (I_B - I_C) + \Psi_B (I_C - I_A) + \Psi_C (I_A - I_B)]. \quad (2.34)$$

або за найбільш загальним виразом

$$T_E = -\frac{3}{2} Z_p \cdot (\bar{\Psi}_1 \times \bar{\mathbf{I}}_1) = -\frac{3}{2} Z_p \cdot (|\bar{\Psi}_1| \cdot |\bar{\mathbf{I}}_1| \cdot \sin(\alpha_\Psi - \alpha_I)) \quad (2.35)$$

Зображувальні вектори потокозчеплення і струму статора можуть бути визначені за їхніми миттєвими значеннями з урахуванням фазового зсуву величин потокозчеплення і струму окремих фаз асинхронного двигуна:

$$\bar{\mathbf{I}}_1 = \sum_{k=1}^N I_k \cdot e^{i(k-1)} \quad (2.36)$$

Рівняння руху частин АД, що обертаються, отримуємо на основі закону збереження імпульсу, яке, за сталості моменту інерції, збігається з відомим рівнянням другого закону Ньютона для обертального руху:

$$M - M_C = M_j = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.37)$$

2.3 Реалізація математичної моделі

АД з білячою кліткою у MATLAB

Для математичного моделювання несиметричних режимів АД було використано асинхронний двигун типу 4А90 L2 з такими технічними характеристиками:

Номінальна потужність, кВт	3,0
Номінальна напруга, В	380
Номінальний струм статора, А	6,4
Номінальна частота обертання, об/хв	2860
Номінальний К.П.Д.	0,845
Номінальний коефіцієнт потужності	0,88
К.П.Д. при 75% завантаженні	0,855
Коефіцієнт потужності при 75% завантаженні	0,85
Кратність пускового струму	6,0
Перевантажувальна здатність	2,5
Момент інерції, кг м ²	0,0049
Кількість стрижнів ротора	20

Таблиця 1. Параметри Т-подібної схеми заміщення.

4А90 L2	R1	R2	X1	X2	XМ
Каталог, Ом	2,4943	1,6282	1,9747	3,464	117,7871
Розрахунок, Ом	2,3576	1,7783	2,9516	3,9878	104,405

Розв'язання запропонованих рівнянь було реалізовано за допомогою програми на мові програмування MATLAB з використанням технології LiveScript. Для чисельного розв'язання запропонованих рівнянь АД-БК було використано вирішувач ODE45 з відносною точністю $1e-6$ та максимальним кроком

інтегрування 0.0005.

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі за допомогою MATLAB було отримано розв'язки для стандартної конфігурації АД із трифазними симетричними обмотками на статорі та роторі. Отримані рішення представлені на рис. 2.4.

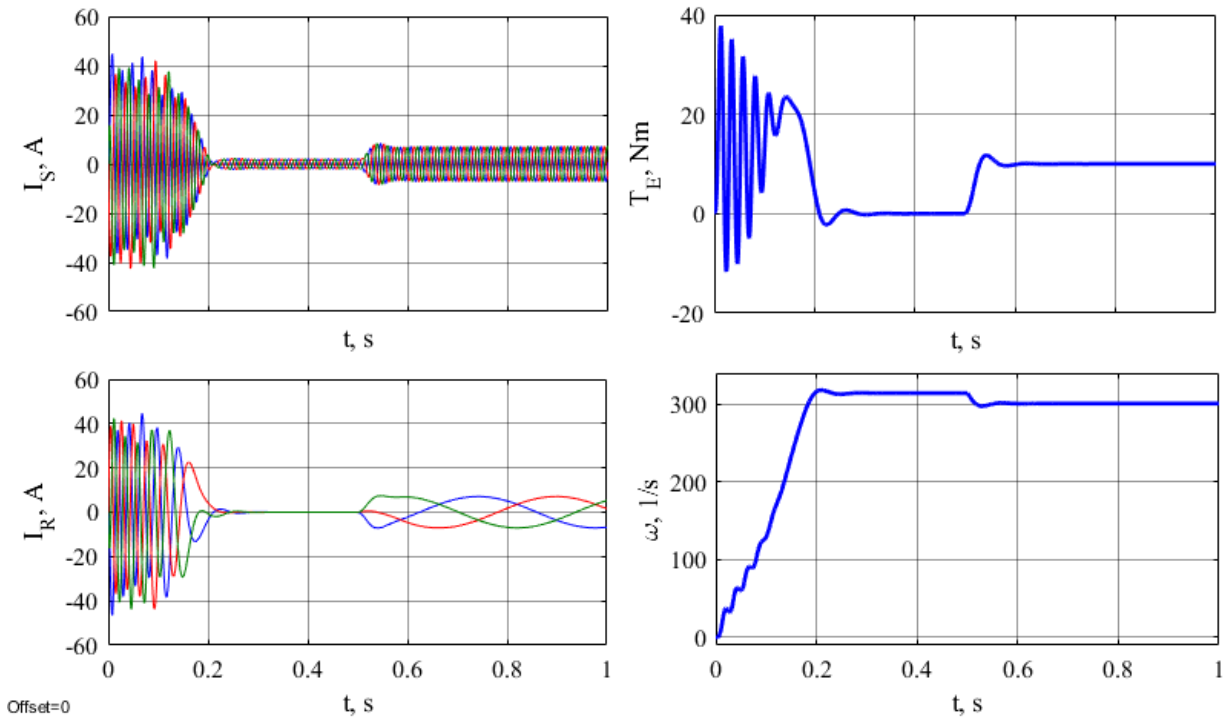


Рисунок 2.4 – Діаграми запуску і накидання номінального навантаження ($t = 0.5$ с), отримані для АД із числом фаз ротора $N = 3$: а - струми статора; б - струми ротора; в - електромагнітний момент; г - кутова швидкість.

Отримані діаграми демонструють збіг пускового струму статора, струму намагнічування і номінального струму з паспортними значеннями, що вселяє в нас оптимізм щодо адекватності моделі.

На рис. 2.5 наведено аналогічні діаграми для АД із багатозазним ротором, кількість стрижнів $N=20$.

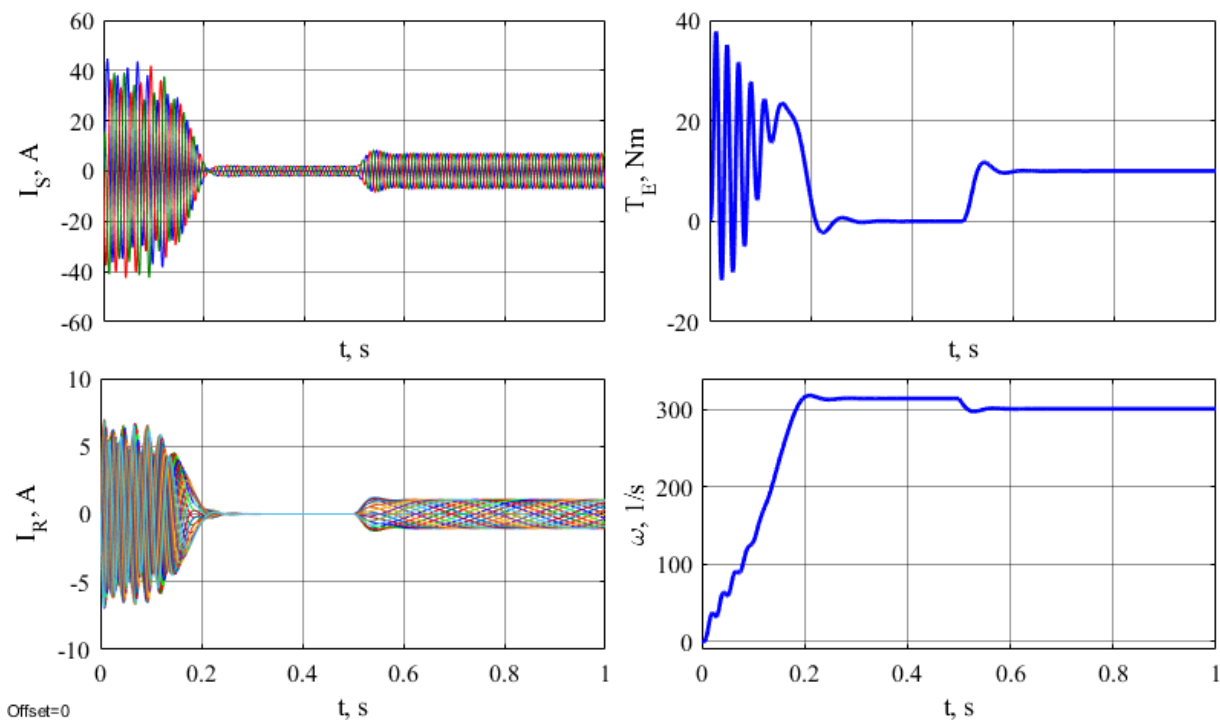


Рисунок 2.5 – Діаграми запуску і накидання номінального навантаження ($t = 0.5$ с), отримані для АД із числом фаз ротора $N = 20$: а - струми статора; б - струми ротора; в - електромагнітний момент; г - кутова швидкість.

Як впливає з наведених графіків, значення струмів статора, показники роботи механічної частини АД не змінюються, що є непрямим підтвердженням коректності розробленої моделі.

Висновки по розділу 2

У другому розділі з використанням теорії узагальненого електромеханічного перетворювача розроблено математичну модель асинхронного двигуна з у загальному випадку багатофазним статором та білячою кліткою на роторі. Розроблена математична модель має вигляд багатовимірної системи звичайних диференціальних рівнянь. Розв'язання запропонованих рівнянь було реалізовано за допомогою програми на мові програмування MATLAB з використанням технології LiveScript. Для перевірки розробленої математичної моделі було використано асинхронний двигун типу 4A90 L2 з кількістю стрижнів ротора $N = 20$.

Отримані рішення математичної моделі співпадають із загальнотеоретичними уявленнями про роботу асинхронного електродвигуна. Числові значення електромеханічних координат асинхронного двигуна співпадають з паспортними даними тестового двигуна, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі.

Розділ 3 Дослідження діагностичних ознак асинхронного двигуна з білячою кліткою на роторі в аварійних режимах

3.1 Спектральний аналіз миттєвої потужності асинхронного двигуна з білячою кліткою на роторі в аварійних режимах

Несиметричні режими роботи АД є маркерами розвитку аварійної ситуації.

Для діагностики несиметричних режимів роботи АД пропонується використовувати спектральний аналіз сигналів миттєвої потужності й електромагнітного моменту АД у квазісталому режимі роботи. Спектральний аналіз, як буде показано нижче, дозволяє отримати більш виражені діагностичні сигнали порівняно з аналізом миттєвих значень струмів, напруг і миттєвої потужності.

Сигнал миттєвої потужності, споживаної АД, може бути обчислений за виразом:

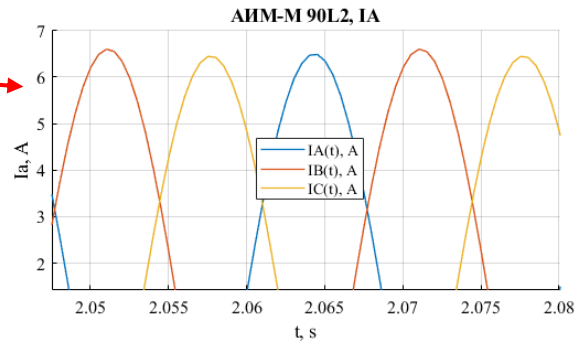
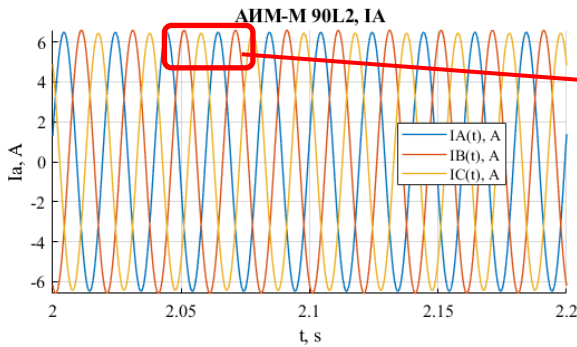
$$s(t) = \sum_{k=1}^M I_k \cdot U_k \quad (3.1)$$

Перевагою такого вибору є те, що сигнал миттєвої потужності може бути безпосередньо вимірний без зупинки виробничого процесу.

Сигнал електромагнітного моменту навпаки не може бути вимірний безпосередньо. Однак його спектральні характеристики можуть бути оцінені побічно за результатами віброакустичного аналізу роботи АД.

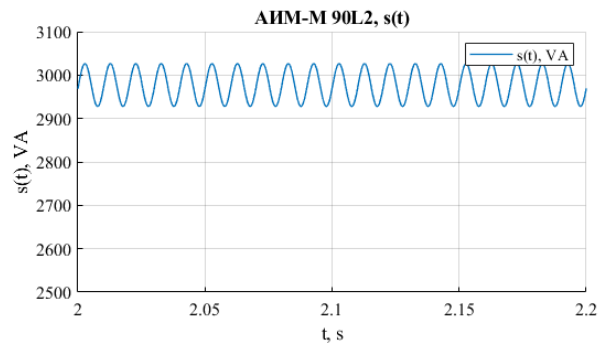
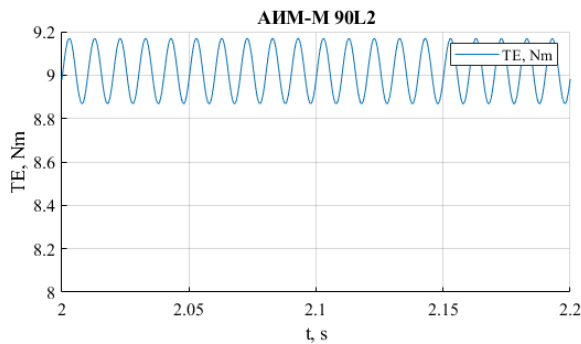
На рис. 3.1, а, б наведено діаграми струмів статора, на рис. 3.1, в, г - діаграми електромагнітного моменту і миттєвої потужності АД у квазіусталений режим роботи з несиметричною напругою статора. В обчислювальному експерименті було прийнято, що напруга фази В статора становить 90 % від номінальної.

На рис. 3.1, д, е наведено діаграми потужності спектра сигналів електромагнітного моменту і миттєвої потужності АД.



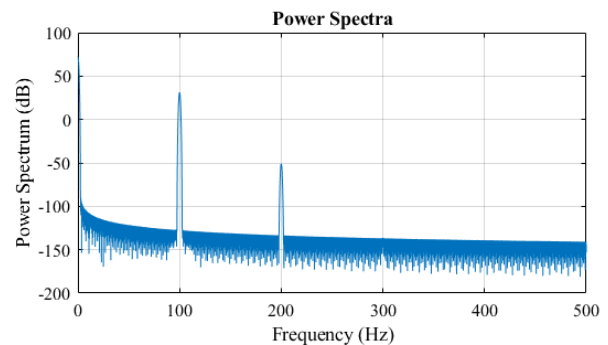
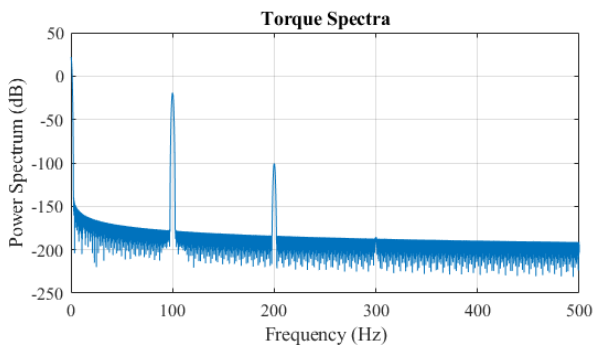
а) Струми статора АД при несиметрії напруги живлення у фазі В

б) Струми статора АД при несиметрії напруги живлення у фазі В, збільшено



в) електромагнітний момент у квазіусталеному режимі при несиметрії напруги живлення у фазі В

г) миттєва повна потужність у квазіусталеному режимі при несиметрії напруги живлення у фазі В



д) спектр потужності електромагнітного моменту в квазісталеному режимі за несиметрії напруги живлення у фазі В

е) спектр потужності миттєвої повної потужності у квазісталеному режимі за несиметрії напруги живлення у фазі В

Рисунок 3.1 – Спектральний аналіз роботи АД-БК при наявності несиметрії напруги живлення статора

Як показує детальний аналіз, зміна рівня несиметрії живлячої напруги не впливає на положення екстремумів спектральної характеристики, але супроводжується зміною їхньої амплітуди.

Аналогічні результати було отримано при аналізі роботи асинхронного двигуна при витковому замиканні статорної обмотки. Математичним моделюванням встановлено, що обрив роторного стрижня не впливає на спектральну характеристику миттєвої потужності АД.

Таким чином, наявність викидів спектральної характеристики миттєвої повної потужності на частотах 100 та 200 Гц є надійними діагностичними ознаками, що вказують на наявність несиметрії у статорі асинхронного двигуна, але не дає жодної інформації відносно стану білячої клітки.

3.2 Годограф струму статора асинхронного двигуна з білячою кліткою на роторі в аварійних режимах

Для зручності візуалізації форми струмів було побудовано годографи зображувальних векторів для струмів статора і ротора.

Просторове положення зображуючого вектора струму статора або ротора може бути визначене за їх миттєвими значеннями з урахуванням фазового зсуву значень струму і потоку окремих фаз асинхронного двигуна:

$$\vec{\mathbf{I}}_1 = \sum_{k=1}^N I_k \cdot e^{i(k-1)} \quad (3.2)$$

Як і слід було очікувати, у симетричному режимі роботи годографи зображувальних векторів для струмів статора і ротора є ідеальними колами з

центром на початку координат, рис.3.2.

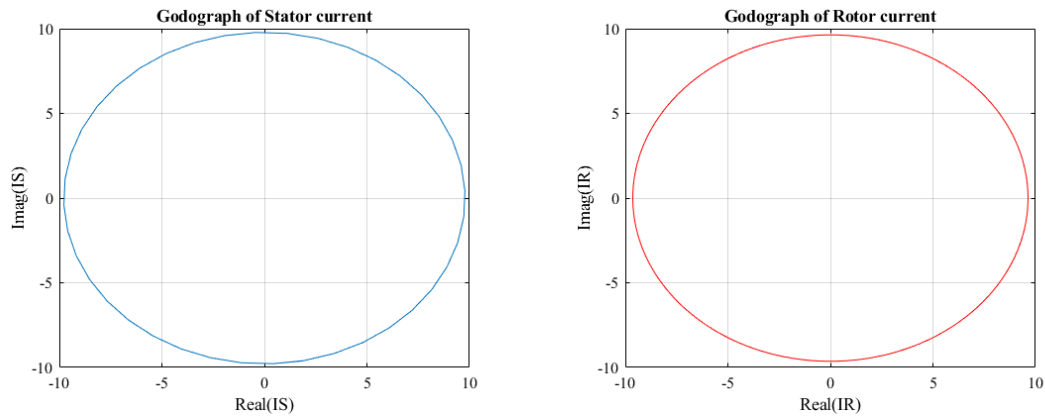


Рисунок 3.2 – Годографи зображувальних векторів для струмів статора і ротора: а - годограф зображуючого вектора струму статора; б - годограф зображуючого вектора струму ротора

На рис. 3.3 представлено діаграми фазних струмів статора АД у квазіусталеному режимі роботи з несиметричною напругою статора. В обчислювальному експерименті було прийнято, що напруга фази В статора становить 90 % від номінальної. Графіки рис. 3.3,б наочно показують відмінності фазних струмів, викликані даним видом несиметрії.

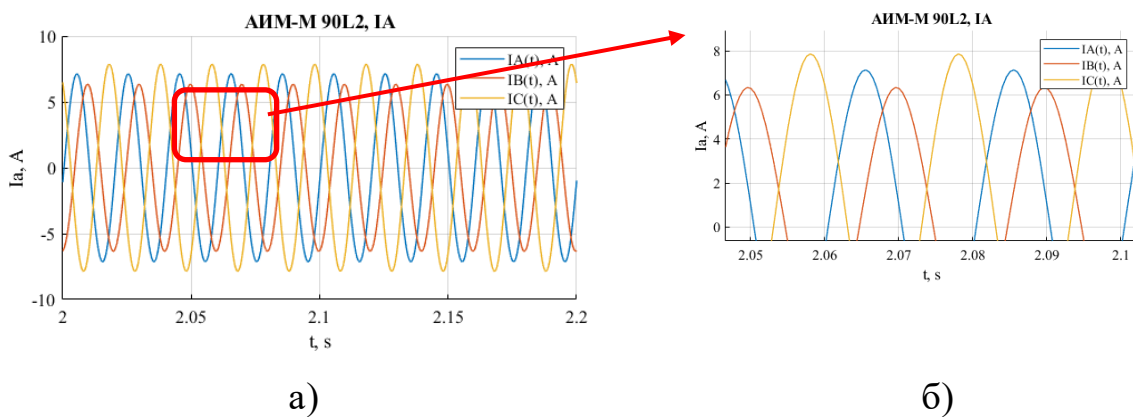


Рисунок 3.3 – Струми статора АД-БК за несиметрії напруги живлення статора: а - струми статора АД за несиметрії напруги живлення у фазі В; б - струми статора АД за несиметрії напруги живлення у фазі В

Також, при цьому спостерігаються пульсації електромагнітного моменту

АД і несиметричний розподіл струмів у стрижнях ротора.

На рис. 3.3. представлено годографи зображувальних векторів для струмів статора і ротора за несиметрії живлячих напруг.

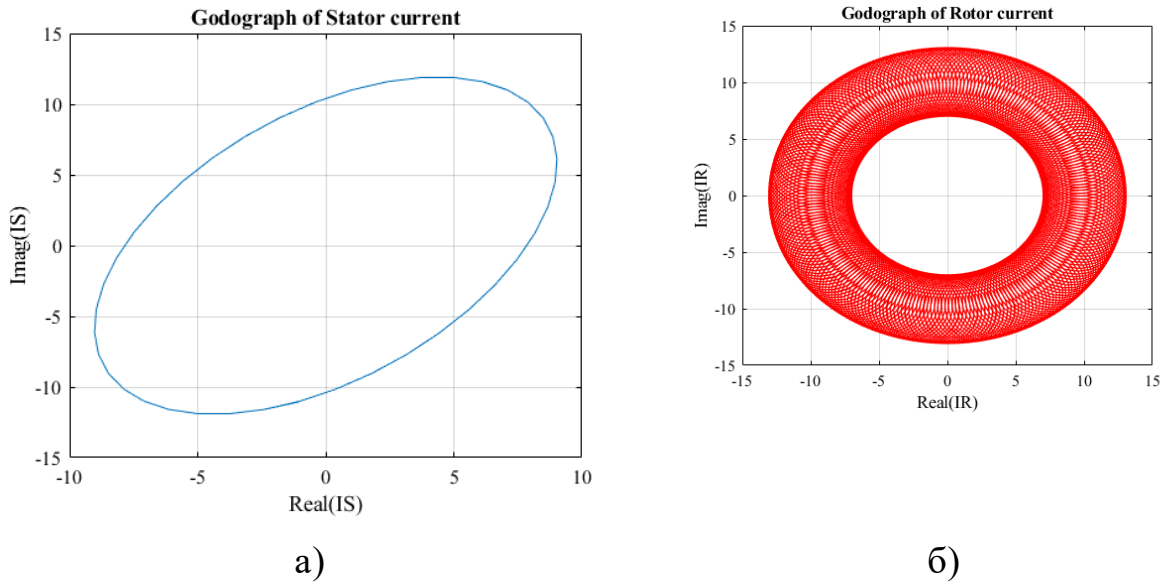


Рисунок 3.4 – Годографи зображувальних векторів для струмів статора і ротора за несиметрії напруги живлення: а - годограф зображувального вектора струму статора; б - годограф зображувального вектора струму ротора

Годограф струму статора являє собою еліпс з нахилом вправо, його форма може слугувати діагностичною ознакою несиметрії живлячої напруги, а співвідношення вісей цього еліпса вказує на степінь несиметрії.

На рис.3.5 наведено діаграми фазних струмів статора АД у квазіусталеному режимі роботи з витковим замиканням в одній із фаз статора. В обчислювальному експерименті було прийнято, що у фазі В статора пошкоджено 30 % витків. Графіки рис. 3.5,б наочно показують відмінності фазних струмів, викликані даним видом несиметрії.

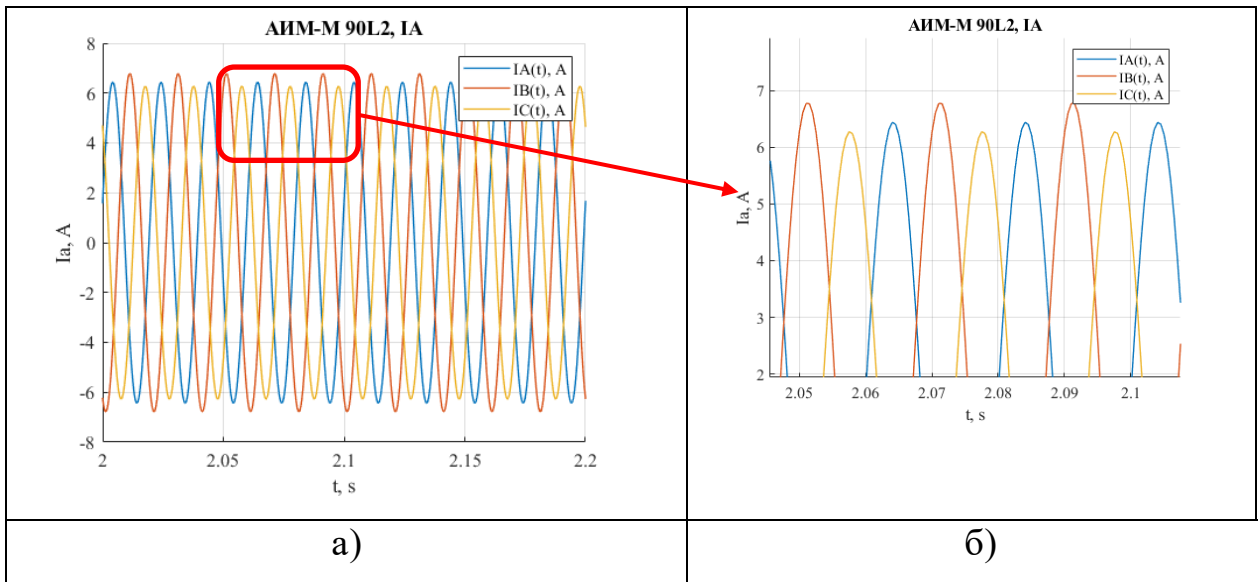


Рисунок 3.5 – Струми статора АД-БК при витковому замиканні статора: а - струми статора АД за несиметрії напруги живлення у фазі В; б - струми статора АД за несиметрії напруги живлення у фазі В

На рис. 3.6 представлено годографи зображувальних векторів для струмів статора і ротора при витковому замиканні у фазі В статора.

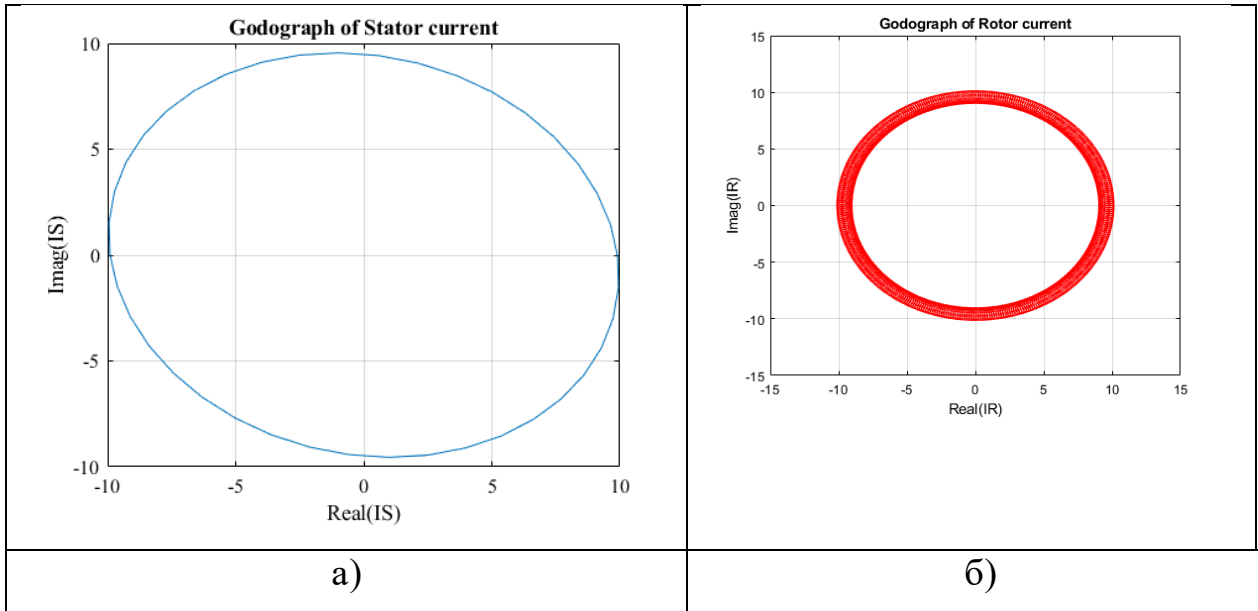
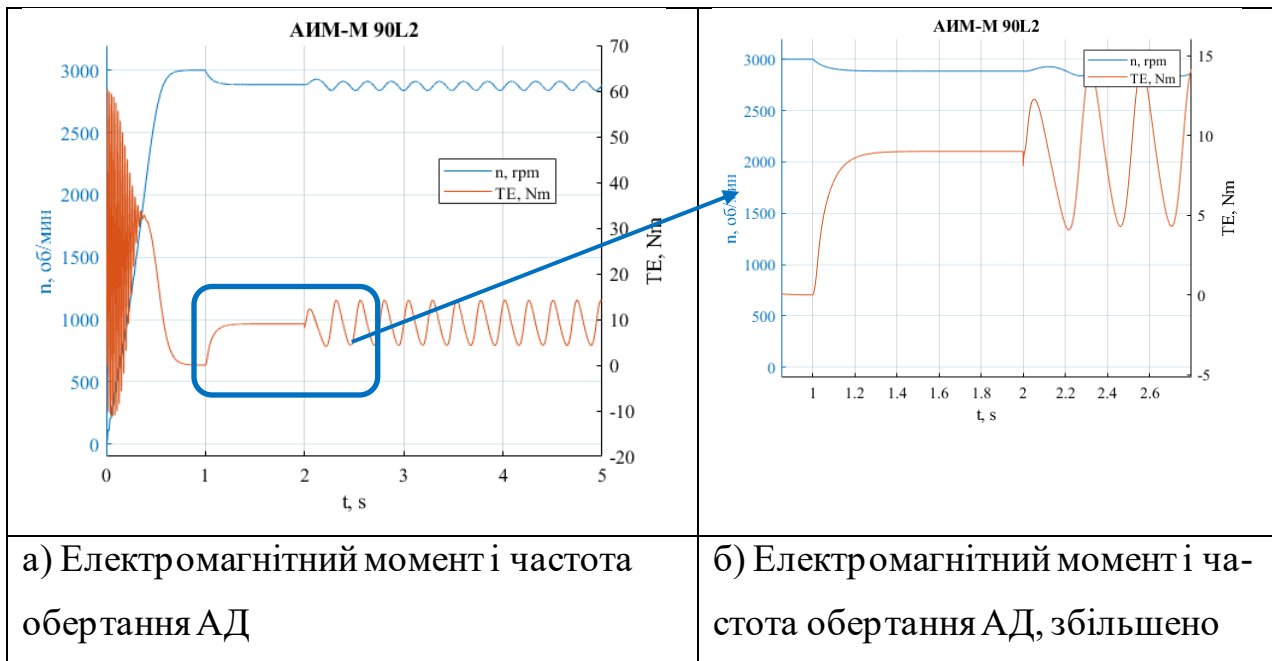
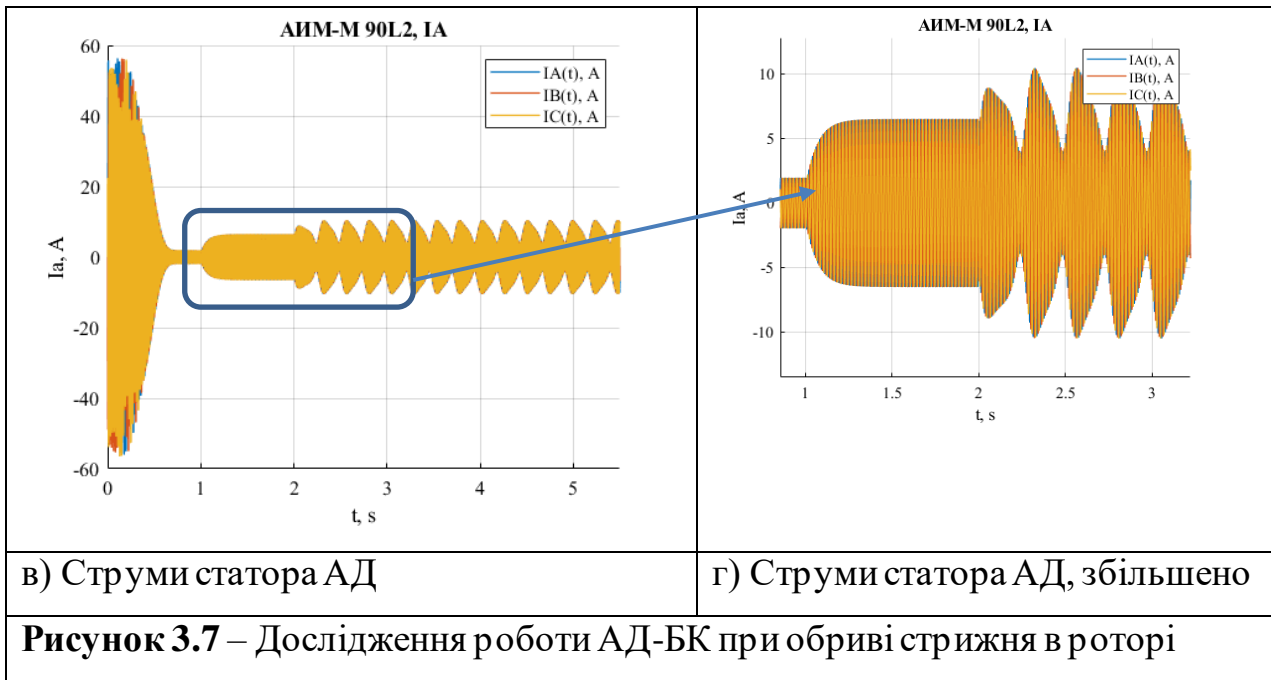


Рисунок 3.6 – Годографи зображувальних векторів для струмів статора і ротора при витковому замиканні у фазі В статора: а - годограф зображувального вектора струму статора; б - годограф зображувального вектора струму ротора

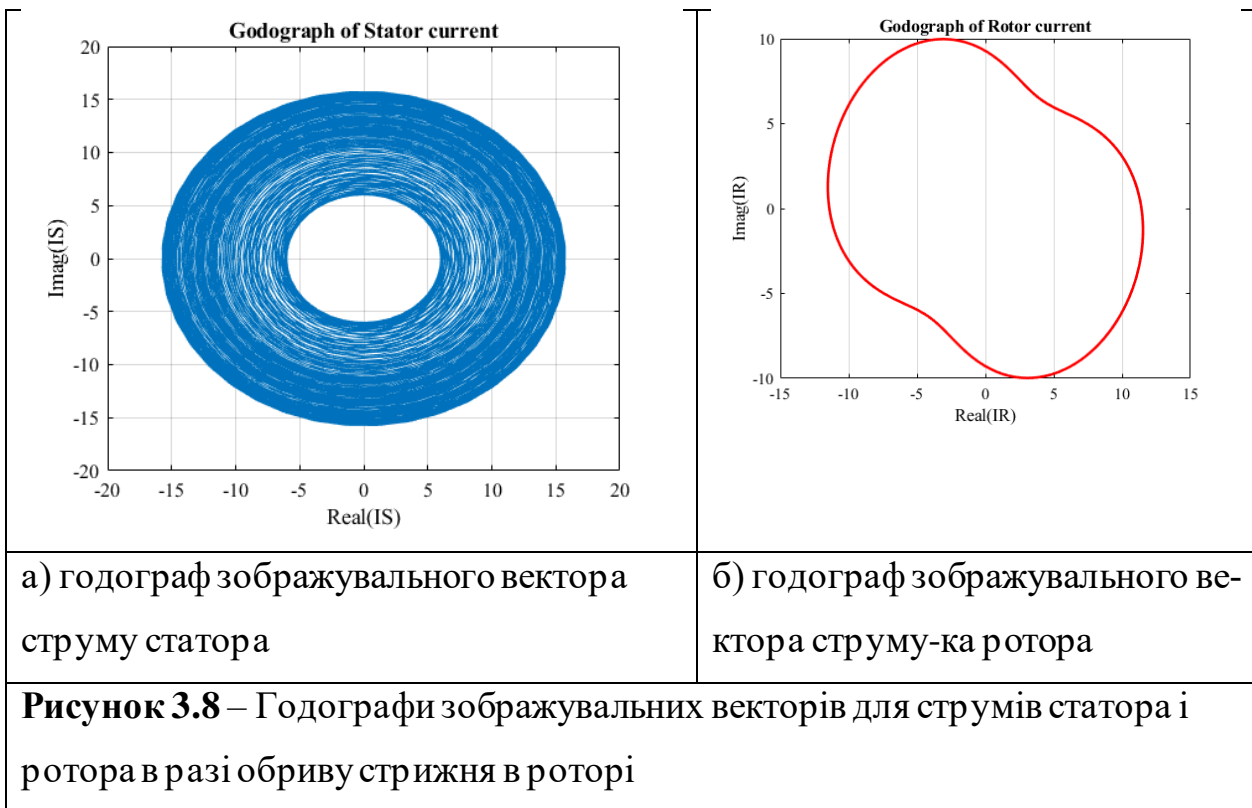
Годограф струму статора являє собою еліпс з нахилом вліво, його форма може слугувати діагностичною ознакою виткового замикання статора, а співвідношення вісей цього еліпса вказує на степiнь несиметрії.

Досліджуємо роботу АД-БК при обриві стрижня ротора. Робота АД-БК починається з повністю симетричного режиму роботи у справному стані. Після запуску вхолосту відбувається накидання навантаження в момент часу $t = 1$ с. Після настання сталого режиму роботи з номінальним навантаженням у момент часу $t = 2$ с відбувається обрив стрижня ротора, і двигун переходить в автоколивальний режим. Описані результати представлено на рис. 3.7 і рис.3.8.





На рис. 3.8 представлено годографи зображувальних векторів для струмів статора і ротора в разі обриву стрижня в роторі.



Годограф струму статора являє собою кільце досить помітної ширини,

така його форма може слугувати діагностичною ознакою обрива стрижня білячої клітки ротора. Ширина кільця годографа струму статора залежить від моменту опору на валу електродвигуна, і при незначних моментах опору ця діагностична ознака може бути недостатньо надійною.

Звертає на себе увагу, що зовнішній вигляд годографа струму статора, доступного для вимірювань, має достатньо різний вигляд для різних типів несиметричних режимів, що може бути використано надалі під час розроблення методів ідентифікації різноманітних несправностей асинхронного двигуна, включаючи обрив стрижня білячої клітки.

Висновки по розділу 3

У третьому розділі виконано дослідження роботи асинхронного двигуна з білячою кліткою при різних видах параметричної несиметрії статорних та роторних обмоток. У якості діагностичних ознак розглянуто спектральний склад сигналу миттєвої потужності живлячої мережі з боку статора та геометричну форму годографа струму статора. Ці ознаки обрано саме тому, що ці ознаки можуть бути визначені в онлайн-режимі роботи електроприводу та вимагають вимірювання лише електричних величин.

Показано, що спектральний склад миттєвої повної потужності статора має обмежений діапазон використання, не дозволяє розрізнити несиметрію живлячої напруги від виткового замикання статора, не дозволяє ідентифікувати обрив стрижня білячої клітки.

Форма годографа струму статора є більш інформативною ознакою, дозволяє диференціювати різні види несиметрії, дозволяє надійно діагностувати обрив стрижня білячої клітки. На діагностичні характеристики обриву стрижня білячої клітки впливає значення моменту опору на валу асинхронного двигуна, що вимагає додаткових досліджень для підвищення надійності використання цієї діагностичної ознаки.

Висновки

У першому розділі розглянуто сучасний стан електромеханічних перетворювачів енергії та причин їх аварійності. Значна частка аварійних виходів з ладу асинхронних двигунів викликана витковими замиканнями статора та обривом стрижней білячої клітки ротора короткозамкненого асинхронного двигуна, тобто параметричною несиметрією обмоток асинхронного двигуна. Огляд сучасної науково-технічної літератури підтверджує велику зацікавленість дослідників у вивченні питань, пов'язаних з роботою білячої клітки на показники електромеханічного перетворення асинхронного двигуна, що підтверджує актуальність теми дослідження.

У другому розділі з використанням теорії узагальненого електромеханічного перетворювача розроблено математичну модель асинхронного двигуна з узагальному випадку багатofазним статором та білячою кліткою на роторі. Розроблена математична модель має вигляд багатовимірної системи звичайних диференціальних рівнянь. Розв'язання запропонованих рівнянь було реалізовано за допомогою програми на мові програмування MATLAB з використанням технології LiveScript. Для перевірки розробленої математичної моделі було використано асинхронний двигун типу 4A90 L2 з кількістю стрижнів ротора $N = 20$.

Отримані рішення математичної моделі співпадають із загальнотеоретичними уявленнями про роботу асинхронного електродвигуна. Числові значення електромеханічних координат асинхронного двигуна співпадають з паспортними даними тестового двигуна, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі.

У третьому розділі виконано дослідження роботи асинхронного двигуна з білячою кліткою при різних видах параметричної несиметрії статорних та роторних обмоток. У якості діагностичних ознак розглянуто спектральний склад сигналу миттєвої потужності живлячої мережі з боку статора та геометричну форму годографа струму статора. Ці ознаки обрано саме тому, що ці ознаки

можуть бути визначені в онлайн-режимі роботи електроприводу та вимагають вимірювання лише електричних величин.

Показано, що спектральний склад миттєвої повної потужності статора має обмежений діапазон використання, не дозволяє розрізнити несиметрію живлячої напруги від виткового замикання статора, не дозволяє ідентифікувати обрив стрижня білячої клітки.

Форма годографа струму статора є більш інформативною ознакою, дозволяє диференціювати різні види несиметрії, дозволяє надійно діагностувати обрив стрижня білячої клітки. На діагностичні характеристики обриву стрижня білячої клітки впливає значення моменту опору на валу асинхронного двигуна, що вимагає додаткових досліджень для підвищення надійності використання цієї діагностичної ознаки.

Перелік використаних джерел

1. Статистичний щорічник України за 2001 рік. Державний комітет статистики України. К.: Техніка, 2002. – 645 с.
2. Безручко В. І. Моніторинг електродвигунів: навч. посіб. - К.: ВПЦ "Київський університет", 2010. - 96 с.
3. Моніторинг вібрації в електродвигунах / А. Д. Войтенко, А. В. Бондар, Ю. О. Хаценко та ін. // Технічна електродинаміка. - 2017. - № 1. - С. 40-45.
4. Elektronische Schwingungsanalyse von Drehstrommaschinen / G. Schiller, K. J. Schaffer, W. Haase та ін. - Berlin: Springer, 2018. - 220 с.
5. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / P. Tavner, L. Ran, J. Penman та ін. - John Wiley & Sons, 2008. - 342 с.
6. 10. Вібраційна діагностика електричних машин / В. П. Чубарев, М. М. Сушко, С. О. Резніченко та ін. - К.: НТУУ "КПІ", 2015. - 296 с.
7. Рябенко І. С., Шевчук С. П., Мейта О. В. Електрообладнання та електропостачання машин і установок геотехнічних виробництв. – 2018.
8. Луговий А.В., Максимов М.Н., Родькін Д.І., Чорний О.П., Сисюк Г.Ю. Операційна надійність змінних електродвигунів та шляхи її підвищення // Проблеми створення нових машин і технологій (Кременчуцький державний політехнічний університет) – Кременчук: КДПУ. – 2000. – Випуск 1. – С. 150-156.
9. Tytiuk V., Pozigun O., Chorny O., Berdai A. Identification of the active resistances of the stator of an induction motor with stator windings dissymmetry (2017) Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017, 2018-January, pp. 48 - 51, DOI: 10.1109/MEES.2017.8248949
10. Messaoudi, M.; Flah, A.; Alotaibi, A.A.; Althobaiti, A.; Sbita, L.; Ziad El-Bayeh, C. Diagnosis and Fault Detection of Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors Using Combined Park's Vector and Extended Park's Vector Approaches. Electronics 2022, 11, 380. <https://doi.org/10.3390/electronics11030380>
11. Shrinathan Esakimuthu Pandarakone, Yukio Mizuno, and Hisahide Nakamura, "Distinct Fault Analysis of Induction Motor Bearing using Frequency Spectrum Determination and Support Vector Machine," <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2639453>, IEEE Trans. Industry Applications.
12. Liu, X.; Yan, Y.; Hu, K.; Zhang, S.; Li, H.; Zhang, Z.; Shi, T. Fault Diagnosis of Rotor Broken Bar in Induction Motor Based on Successive Variational Mode Decomposition. Energies 2022, 15, 1196. <https://doi.org/10.3390/en15031196>.
13. M. Skowron, Application of deep learning neural networks for the diagnosis of electrical damage to the induction motor using the axial flux, Bulletin of the polish academy of sciences, Technical Sciences, Vol. 68, No. 5, 2020, <https://doi.org/10.24425/bpasts.2020.134664>.

14. S. Tierrafria-Baez, P. M. Calderon-Lopez, V. Cano-Valdez, B. K. Aviles-Diaz, C. Rodriguez-Donate, and E. Cabal-Yepez, "Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors through Information Entropy Analysis on the Start-up Transient and Steady-State Current Signals," *IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2021, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589669>.
15. M'hamed, Birame, Bessedik Sid Ahmed, and Benkhoris Mohamed Fouad. "Detection of partial rotor bar rupture of a cage induction motor using least square support vector machine approach". *Diagnostyka* 22 no. 1 (2021): 57-63. <https://doi.org/10.29354/diag/133039>.
16. N. Medeiros M Nascimento, S. P. P. Silva, P. P. Reboucas Filho and C. Marques Sa Medeiros, "Higher-Order Statistics applied to machine learning as an approach to identify broken rotor bars in induction motors," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 8, pp. 2267-2274, Aug. 2018, <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8528245>.
17. Skowron, M.; Orłowska-Kowalska, T. Efficiency of Cascaded Neural Networks in Detecting Initial Damage to Induction Motor Electric Windings. *Electronics* 2020, 9, 1314. <https://doi.org/10.3390/electronics9081314>
18. M. Sameh, A. Tarek and K. Yassine, "Bearing and Rotor Faults detection and diagnosis of Induction Motors using Statistical Neural Networks," 2020 20th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2020, pp. 77-81, <https://doi.org/10.1109/STA50679.2020.9329334>.
19. Sinha, A.K.; Hati, A.S.; Benbouzid, M.; Chakrabarti, P. ANN-Based Pattern Recognition for Induction Motor Broken Rotor Bar Monitoring under Supply Frequency Regulation. *Machines* 2021, 9, 87. <https://doi.org/10.3390/machines9050087>.
20. Puche-Panadero, R.; Martinez-Roman, J.; Sapena-Bano, A.; Burriel-Valencia, J.; Riera-Guasp, M. Fault Diagnosis in the Slip-Frequency Plane of Induction Machines Working in Time-Varying Conditions. *Sensors* 2020, 20, 3398. <https://doi.org/10.3390/s20123398>
21. Martinez-Roman, J.; Puche-Panadero, R.; Sapena-Bano, A.; Terron-Santiago, C.; Burriel-Valencia, J.; Pineda-Sanchez, M. Analytical Model of Induction Machines with Multiple Cage Faults Using the Winding Tensor Approach. *Sensors* 2021, 21, 5076. <https://doi.org/10.3390/s21155076>