

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Автоматизація чисельного розрахунку електромагнітного моменту асинхронного
двигуна з порожнистим ротором для пристроїв автоматики та управління
(тема)

Виконала:
студент 2 курсу, групи КІТПВМ-21-1

Цуркіна О. М.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Грицюк В. Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

Невлюдов І. Ш.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2022 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
 Кафедра _____ КІТАМ _____
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
 Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
 Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
 Освітня програма _____ Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва _____
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____

(підпис)

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентці _____ Цуркіній Олександрі Михайлівні _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація чисельного розрахунку електромагнітного моменту асинхронного двигуна з порожнистим ротором для пристроїв автоматики та управління
Затверджена наказом по університету від 07.11.2022 №1464 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 14.12.2022 р.
3. Вихідні дані до роботи Потужність 400 Вт, синхронна частота обертання 3000 об/хв., номінальна напруга живлення 220 В.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
Аналіз технічного завдання; Вступ; Огляд конструкцій асинхронних двигунів з порожнистим ротором, що працюють в пристроях автоматики та управління; Стан питання моделювання електромагнітних процесів в асинхронних двигунах з порожнистим ротором; Дослідження розподілу вихрових струмів в асинхронному двигуні з порожнистим ротором; Експериментальне дослідження електромагнітного моменту; Питання з пожежної безпеки на підприємстві; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 15 сторінок формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання, вступ	23.05.22	виконала
2	Огляд конструкцій асинхронних двигунів з порожнистим ротором, що працюють в пристроях автоматики та управління	12.09.22	виконала
3	Стан питання моделювання електромагнітних процесів в асинхронних двигунах з порожнистим ротором	26.09.22	виконала
4	Дослідження розподілу вихрових струмів в асинхронному двигуні з порожнистим ротором	24.10.22	виконала
5	Експериментальне дослідження електромагнітного моменту асинхронного двигуна з порожнистим ротором	14.11.22	виконала
6	Оформлення пояснювальної записки	02.12.22	виконала
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	09.12.22	виконала
8	Подання роботи на рецензію	12.12.22	виконала
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	13.12.22	виконала
10	Подання роботи до ЕК	14.12.22	виконала

Дата видачі завдання 20.05.2022 р.

Студентка _____ Цуркіна О.М.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Грицюк В.Ю.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 73 с., 5 табл., 33 рис., 2 дод., 18 джерел.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ, ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК, ПОРОЖНИСТИЙ РОТОР, УПРАВЛІННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та електромеханічні процеси в асинхронному двигуні з порожнистим ротором для пристроїв автоматики та управління.

Предмет дослідження – розподіл вихрових струмів та електромагнітний момент асинхронного двигуна з порожнистим ротором для пристроїв автоматики та управління.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка асинхронного двигуна з порожнистим ротором для пристроїв автоматики та управління.

Методи дослідження – розрахунок розподілу вихрових струмів та електромагнітного моменту за результатами рішення польової задачі, кінцево-елементний метод розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних у тривимірній постановці, експериментальні (фізичні) методи дослідження.

Для досягнення мети було вирішено наступні завдання:

- виконано огляд конструкцій асинхронних двигунів з порожнистим ротором, що працюють в пристроях автоматики та управління;
- розглянуто стан питання моделювання електромагнітних процесів в асинхронних двигунах з порожнистим ротором;
- проведено дослідження розподілу вихрових струмів та електромагнітного моменту асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- розглянуто заходи з пожежної безпеки на підприємстві.

Результати роботи були апробовані на міжнародній конференції.

ABSTRACT

Explanatory note: 73 pp., 5 tabl., 33 figs., 2 app., 18 sources.

ELECTROMAGNETIC MOMENT, NUMERICAL CALCULATION,
HOLLOW ROTOR, CONTROL, MATHEMATICAL MODEL.

The research object is electromagnetic and electromechanical processes in a hollow rotor induction motor for automation and control devices.

The research subject is the eddy current distribution and electromagnetic torque of a hollow rotor induction motor for automation and control devices.

The qualification work goal is the development of induction motor with hollow rotor for automation and control devices.

Research methods – calculation of the distribution of eddy currents and electromagnetic moment according to the results of solving a field problem, finite element method for solving nonlinear differential equations in partial derivatives in three-dimensional formulation, experimental (physical) research methods.

To achieve the goal, the following tasks were solved:

- a review of the designs of induction motors with a hollow rotor operating in automation and control devices;
- the state of the issue of modeling electromagnetic processes in induction motors with a hollow rotor is considered;
- a study of the distribution of eddy currents and electromagnetic moment of an induction motor with a hollow rotor;
- fire safety measures at the enterprise are considered.

The qualification work results were tested at an international conference.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	11
1.1 Конструкції та класифікація	11
1.2 Галузі застосування.....	17
1.3 Стан питання моделювання асинхронних двигунів із порожнистим ротором.....	22
1.4 Постановка задач досліджень	32
1.5 Висновки до 1 розділу	33
2 ОБЕРТОВИЙ МОМЕНТ І СПОСОБИ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ.....	35
2.1 Обертний момент КАД.....	35
2.2 Висновки до 2 розділу	40
3 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ	41
3.1 Попередній розрахунок вихрових струмів.....	41
3.2 Дослідження розподілу вихрових струмів в порожнистому роторі.....	43
3.3 Висновки до 3 розділу	49
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ.....	51
4.1 Експериментальне дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі АД з ППР	52

4.2 Експериментальне дослідження розподілу напруженості електричного поля вихрових струмів ротора	55
4.3 Експериментальне дослідження електромагнітного моменту АД з ППР	59
4.4 Пожежна безпека на підприємстві	66
4.5 Висновки до 4 розділу	68
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	70
ДОДАТОК А Демонстраційний матеріал.....	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун;

ВС – вихрові струми;

ЕМ – електрична машина;

ЕМП – електромеханічний перетворювач;

КЕ – кінцеві елементи;

КАД – керований асинхронний двигун;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МКЕ – метод кінцевих елементів;

МПЗК – метод провідностей зубцевих контурів;

МФР – масивний феромагнітний ротор;

ППР – порожнистий перфорований ротор;

СКЕ – сітка кінцевих елементів.

ВСТУП

Асинхронні двигуни (АД) з порожнистим ротором широко використовуються в різних пристроях автоматики та управління (тракторне управління, стежучі системи передачі кута, покажчики швидкості повороту тощо). Разом з тим, сьогоденне зростання інтересу до електричних машин з феромагнітною вторинною частиною обумовлене можливістю їх нового застосування [1]. Серед недавніх зарубіжних публікацій зустрічаються роботи, присвячені розробці обертально-лінійних електромеханічних перетворювачів, здатних одночасно здійснювати обертання та рух уздовж своєї осі. При цьому, як правило, порожнистий феромагнітний елемент циліндричної форми функціонує як ротор з декількома ступенями свободи. Такі перетворювачі становлять невелику групу електроприводів, що дозволяють забезпечити ширші можливості руху, ніж традиційні приводи, а підвищення вимог до мехатронних пристроїв тільки сприяє їхньому неухильному розвитку. Вони використовуються в пристроях, призначених для переміщення та свердління [2]. Фактично, їхнє потенційне застосування варіюється від верстатів до робототехніки та різних пристроїв, що використовуються для складання, захоплення, переміщення, упаковки, струшування тощо [3, 4, 5].

У ряді випадків наявність вікон (перфорацій) у порожнистому роторі АД зумовлена технологічною необхідністю та особливостями застосування [6, 7]. Перфорації ротора призводять до виникнення нерівномірностей магнітного поля в повітряному зазорі, як в осьовому, так і в тангенціальному напрямках, а також перерозподілу вихрових струмів в порожнистому роторі, що в свою чергу впливає на вихідні характеристики АД.

У роботі [7] завдяки наявності вікон ротора керованого асинхронного двигуна (КАД), його вихрові струми в межах активної довжини машини будуть спрямовані переважно в аксіальному напрямку, що забезпечує підвищення електромагнітного моменту, ККД та коефіцієнта потужності. Отримані

висновки сформульовані на підставі аналітичного рішення для розподілу густини вихрових струмів ротора. Однак, підвищення точності розрахунків та скорочення часу розробок вимагають створення вдосконалених тривимірних моделей та ефективних алгоритмів проектування.

Одним з основних завдань проектування КАД є отримання максимального електромагнітного моменту. Тому важливо визначити вплив конструктивних параметрів порожнистого феромагнітного ротора на величину електромагнітного моменту КАД.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та електромеханічні процеси в асинхронному двигуні з порожнистим ротором для пристроїв автоматики та управління.

Предмет дослідження – розподіл вихрових струмів та електромагнітний момент асинхронного двигуна з порожнистим ротором для пристроїв автоматики та управління.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка асинхронного двигуна з порожнистим ротором для пристроїв автоматики та управління.

Методи дослідження – розрахунок розподілу вихрових струмів та електромагнітного моменту за результатами рішення польової задачі, кінцево-елементний метод розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних у тривимірній постановці.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати огляд конструкцій асинхронних двигунів з порожнистим ротором, що працюють в пристроях автоматики та управління;
- розглянути стан питання моделювання електромагнітних процесів в асинхронних двигунах з порожнистим ротором;
- провести дослідження розподілу вихрових струмів та електромагнітного моменту асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- розглянути заходи з пожежної безпеки на підприємстві.

Роботу було виконано відповідно до [8–10]. Результати досліджень опубліковано у [11].

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1 Конструкції та класифікація

Конструкції асинхронних машин, які прийнято вважати класичними, продовжують безперервно розвиватися та видозмінюватися, що обумовлено появою нових матеріалів і технологій. Об'єднання ряду конструкцій асинхронних машин в окремий тип асинхронних двигунів зі струмопровідним шаром ротора пов'язане з появою в них ефектів, що впливають на вихідні характеристики. Йдеться про поперечний крайовий ефект, обумовлений розтіканням вихрових струмів (ВС) у поперечному (тангенціальному) напрямку, а також поверхневий ефект, що пов'язаний із загасанням електромагнітної хвилі в матеріалі струмопровідного шару ротора.

Прояв названих ефектів визначається характером розподілу параметрів електромагнітного поля в струмопровідному шарі ротора, яке, в загальному випадку, є тривимірним, при цьому врахування відповідних складових для тих чи інших варіантів конструктивної реалізації двигунів є принципово важливим.

До АД зі струмопровідним шаром ротора відносяться КАД з порожнистим ротором, АД з масивним феромагнітним ротором (МФР), а також АД з розімкненим магнітопроводом: дугостаторні АД, плоскі лінійні АД з дисковим ротором і лінійні АД з циліндричним або плоским, що містить струмопровідний шар.

Дослідженню АД з МФР приділялася значна увага багатьма відомими вченими. Значний внесок у розвиток теорії та розширення практичного застосування двигунів з масивним ротором зробили дослідження Г. Мозера, І.С. Брука, К.І. Шенфера, Б.А. Артем'єва, А.І. Вольдека, А.І. Бертинова, І.М. Постнікова, В.М. Куцевалова та ін. Головною відмінністю АД з МФР є складний характер розподілу параметрів електромагнітного поля, що пов'язано із загасанням електромагнітної хвилі в масиві (поверхневий ефект). При цьому

магнітна проникність нелінійно змінюється по глибині проникнення електромагнітної хвилі в масив.

В АД з гладким МФР, вдруге досліджених І.С. Бруком, ККД і $\cos \varphi$ в номінальному режимі мають низькі значення. Одним з рішень, що дозволяють забезпечити високу добротність пускових характеристик АД з МФР при зниженні рівня втрат у вторинному ланцюзі, є використання неферромагнітного струмопровідного шару на роторі. При використанні такого шару, величина еквівалентного електричного опору МФР знижується. В результаті збільшення струмів, що протікають в неферромагнітному шарі, результуючий магнітний потік, що замикається через поверхневий шар матеріалу масиву, зменшується за абсолютним значенням, матеріал масиву виводиться з сильного насичення, що призводить до зниження величини втрат в сталі МФР. В даний час існують різноманітні рекомендації щодо визначення у конструктивному відношенні областей МФР, на яких виконується неферромагнітний струмопровідний шар.

Ще один із шляхів підвищення енергетичних показників АД з МФР – зменшення реактивної потужності, тобто струму намагнічування, при збереженні відносно малої магнітної проникності масиву. Це забезпечено у двошаровому МФР, який являє собою порожнистий масивний циліндр, виконаний зі сплаву з заданою основною кривою намагнічування, насадженого на ярмо, набране з листів електротехнічної сталі.

Масив металу виконує функції зубцевої зони і короткозамкненої обмотки, тобто, є провідником струму і магнітного поля. Використовуються залізомідні метали СМ. Товщина втулки, виготовленої зі сплаву СМ у двигунах з висотою осі обертання до 160 мм становить 5-10 мм.

На даний час відома велика кількість конструктивних рішень МФР з більш складною, у тому числі з багатошаровою структурою. У АД єдиних серій з підвищеним пусковим моментом (тобто з глибоким пазом ротора та подвійною короткозамкненою обмоткою) також використовується ефект витіснення струму в роторі, але в МФР він виражений значно сильніше. Якщо відношення активного опору при пуску та в номінальному режимі в АД з

двошаровим ротором становить $(3\div 5)$ в.о., то в АД єдиних серій (зокрема з глибоким пазом ротора) лише $(2\div 3)$ в.о.

Застосування зубчастого МФР є одним з компромісних рішень (подібно до використання неферомагнітного струмопровідного шару на гладкому МФР), що дозволяє забезпечити високу добротність пускових характеристик машини при менших втратах у вторинному ланцюзі.

Зменшення втрат досягається за допомогою зниження впливу поперечного крайового ефекту. Розроблено АД із зубчастим МФР із торцевими короткозамкненими кільцями з міді марок М1-М3 з більш високими значеннями коефіцієнта використання габариту k_p та ККД, ніж у АД із двошаровим МФР.

Застосування стрижневої короткозамкненої обмотки на зубчастому МФР дозволяє значно більшою мірою зменшити активну складову електричного опору, а також кардинально знизити вплив поперечного крайового ефекту (у тому числі зменшити тангенціальні складові вихрових струмів у масиві), тобто, збільшити і ККД, і коефіцієнт потужності. При цьому в АД із ротором Шенфера діапазон всіх механічних характеристик, які можуть бути отримані при управлінні, наближений до максимально можливого теоретично (тобто займає область $M = f(s)$ в інтервалі опорів від $r_2 \approx 0$ до $r_2 \approx \infty$).

АД з МФР, як правило, виконуються на базі статорів АД загального призначення, що забезпечує досить високу уніфікацію різних конструкцій АД з МФР з АД єдиних серій. В даний час набули поширення п'ять основних конструкцій АД з МФР. Першою, яку можна вважати базовою, є конструкція АД з гладким МФР. У другій конструкції в МФР використаний неферомагнітний струмопровідний шар. У третій конструкції застосований двошаровий МФР. У четвертій використаний зубчастий МФР. У п'ятій зубчастий МФР містить стрижневу короткозамкнену обмотку. У кожній із розглянутих конструкцій на статорі може бути використана тонкостінна гільза (екран) з неферомагнітного матеріалу. У будь-якій із перших чотирьох конструкцій в МФР можуть бути застосовані торцеві короткозамкнені кільця.

На рис. 1.1 відображена класифікація АД з МФР за структурою та конструктивними параметрами вторинного ланцюга.

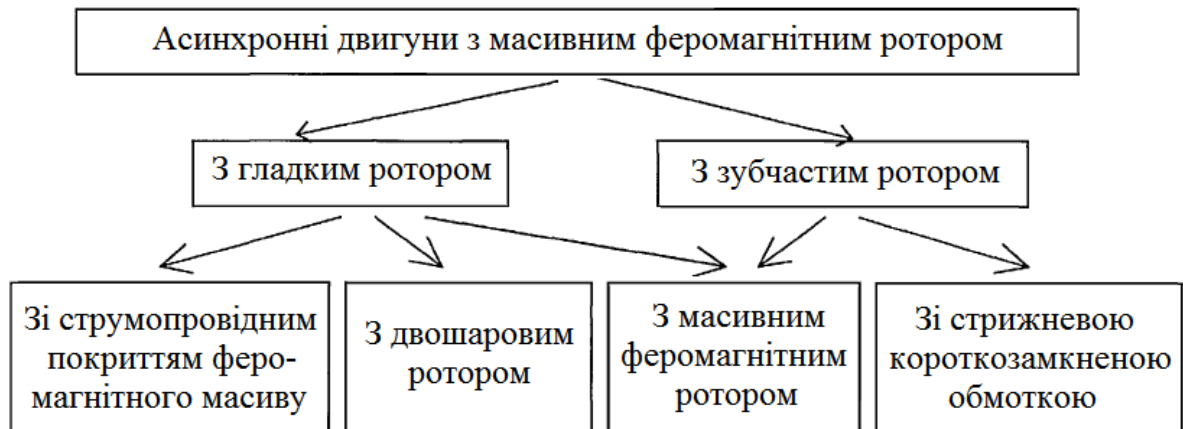


Рисунок 1.1 – Класифікація АД с МФР

В системах автоматики широкого поширення набули КАД з порожнистим ротором, особливістю застосування яких є характерні часті пуски, реверси, зупинки, тобто, нестаціонарні режими роботи. У конструктивному відношенні це двофазні машини з фазами збудження та управління на статорі, зміщеними в просторі на 90 електричних градусів, внутрішнім сердечником статора та порожнистим ротором, виконаним найчастіше зі сплавів алюмінію. Товщина стінок ротора становить $(0,15 \div 0,3)$ мм. Малий момент інерції ротора надає двигуну дуже цінних властивостей. Наявність двох конструктивних зазорів, кожен із яких складає $(0,1 \div 0,2)$ мм разом з неферомагнітним ротором призводить до великих намагнічуючих струмів (що досягають 90% від номінального значення). Конструкція КАД з порожнистим ротором показана на рис. 1.2. Нерухома частина КАД складається з зовнішнього магнітопроводу 5 з обмотками 4, внутрішнього магнітопроводу 3, корпусу 6, лівого 7 і правого підшипникових щитів 8 з підшипниками 9 і вузлів 10 з'єднання корпусу зі щитами. Рухомою частиною машини містить вал 2 з жорстко закріпленим на ньому тонкостінним циліндром 1.

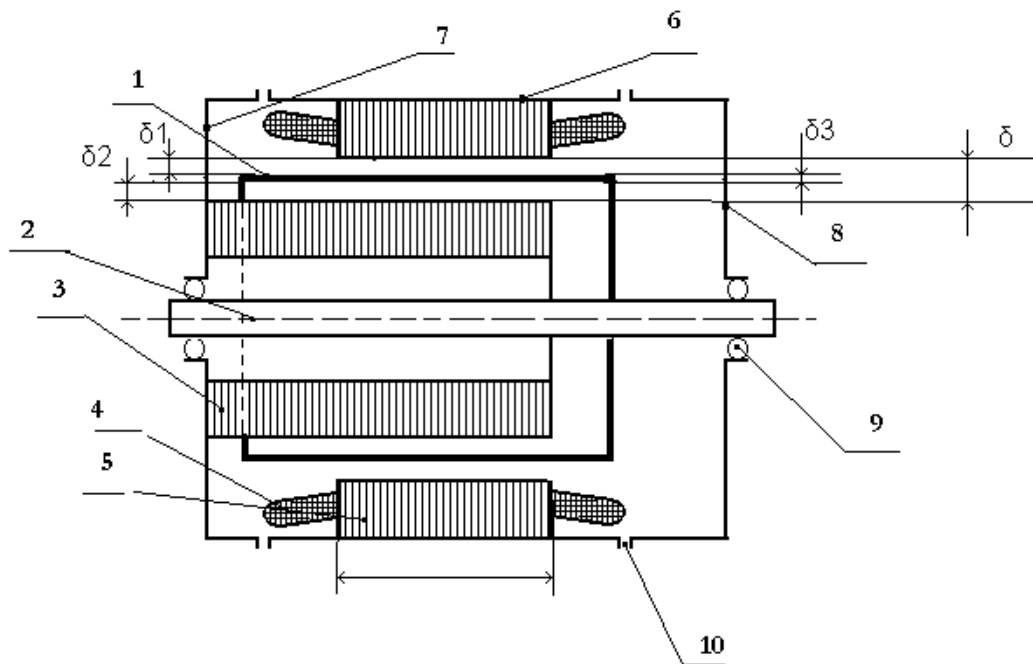


Рисунок 1.2 – Конструкція керованого асинхронного двигуна з порожнистим ротором

Зовнішній магнітопровід 5 неявнополюсний, являє собою сталеве кільце зібране з листової електротехнічної сталі, по внутрішній поверхні якого розташовані пази, в які укладаються дві розподілені обмотки, виготовлені з ізолюваного мідного дроту круглого чи прямокутного перерізу. Осі цих обмоток зміщені у просторі на 90 електричних градусів. Внутрішній магнітопровід 3 також неявнополюсний, набраний з листів електротехнічної сталі та укріплений на циліндричному виступі одного з підшипникових щитів 7. Він служить для зменшення магнітного опору на шляху робочого магнітного потоку КАД і не має пазів чи обмоток.

У мікродвигунах, потужність яких не перевищує 1,5 Вт, діаметр розточування статора (внутрішній діаметр зовнішнього магнітопроводу 6) малий і для полегшення укладання обмоток пази виконують по зовнішній поверхні внутрішнього магнітопроводу 3. При цьому його діаметр дещо збільшують для збільшення обмоткового простору. Іноді одну з обмоток розміщують на зовнішньому, а іншу на внутрішньому магнітопроводі.

Корпус та підшипникові щити у мікромашинах виконуються з алюмінієвих сплавів. У великих машинах ці частини конструкції виконуються зазвичай звареними із сталевих листів необхідної товщини, рідше литими. Підшипники найчастіше використовуються кулькові кочення, а у великих машинах – роликові.

В КАД з порожнистим феромагнітним ротором відсутній внутрішній статор, товщина стінок ротора ($0,3 \div 3$) мм. Конструктивний зазор ($0,2 \div 0,3$) мм. Тим не менш, відносне значення струму, що намагнічує, також велике. У порівнянні з КАД з порожнистим неферомагнітним ротором двигун має більший момент інерції та менший пусковий момент, що значно погіршує його швидкодію. Прийоми, пов'язані з обміднюванням ротора для збільшення пускового моменту, не дають значного ефекту. Істотним недоліком КАД із порожнистим феромагнітним ротором є наявність сил одностороннього магнітного тяжіння, що призводять до залипання ротора та відмов у роботі. У цілому нині ці двигуни значно поступаються КАД з порожнистим неферомагнітним ротором, тому де вони не отримали широкого поширення, знаходячи застосування лише як датчики моменту у гальмівному режимі ($s = 1$).

Головними вимогами, що пред'являються до КАД із порожнистим ротором є: висока швидкодія; максимально можлива лінійність механічних та регулювальних характеристик; відсутність самоходу (обертання ротора за відсутності сигналу управління); стійкість роботи у широкому діапазоні частоти обертання.

Завдяки великому активному опору ротора, електромагнітна стала часу T_e в КАД на порядок менша електромеханічної T_{em} , яка мала завдяки малому моменту інерції ротора і підвищеному пусковому струму, що обумовлено підвищеним опором ротора.

Розрізняють амплітудний, фазовий та амплітудно-фазовий способи управління КАД з порожнистим ротором, які об'єднує ідея управління деформацією поля від кругового до еліптичного, й до пульсуючого. Механічні характеристики КАД при всіх способах управління нелінійні. Зменшити їх

нелінійність можна за рахунок збільшення активного опору ротора, але це призводить до погіршення використання КАД; нелінійність близько 10 % вважається допустимою. Регульовальні параметри при всіх методах управління також нелінійні. Підвищення опору ротора є ефективним заходом для забезпечення сталої роботи КАД у широкому діапазоні частот обертання.

З метою усунення параметричного самоходу КАД з порожнистим ротором повинні мати підвищений активний опір ротора. В результаті момент однофазної машини стає не рушійним, а гальмівним. Критичні ковзання у реальних двигунах $s_K = 2 \div 3$, а в окремих випадках $s_K = 7 \div 8$.

Таким чином, забезпечення всіх вимог, що пред'являються до КАД, пов'язане з підвищенням опору ротора, що призводить до збільшення втрат та зниження механічної потужності, тому основними обмеженнями, що накладаються на ці параметри, є відповідність прийнятним енергетичним показникам. Підсумовуючи сказане, можна сказати, що основним недоліком КАД є низькі питомі енергетичні показники, що пояснюється дією поперечного крайового ефекту, а також великими струмами, що намагнічують, які визначають значні втрати в роторі і в первинних обмотках. Розподіл вихрових струмів визначає величину опору ротора, при цьому активний опір ротора не постійний, а змінюється в функції ковзання.

1.2 Галузі застосування

КАД з порожнистим неферомагнітним ротором застосовуються у різних системах автоматичного управління та випускаються цілою низкою підприємств. Їхні потужності – від десятих часток вата до сотень ватів. Вони розраховуються як на промислову частоту, і на підвищені частоти (200 Гц, 400 Гц, 500 Гц, 1200 Гц). Кутові швидкості обертання – 1500÷30000 об/хв. КАД забезпечують перетворення електричного сигналу на механічне обертання валу.

Вони є важливими елементами систем автоматики та телемеханіки, від характеристик яких багато в чому залежить якість роботи складних систем.

Відомі КАД із порожнистим неферромагнітним ротором серій АДП, ДД, ЕМ. Перша серія призначена для пристроїв наземної автоматики, друга – для авіаційної та космічної техніки, третя – для засобів обчислювальної техніки та електроніки різного призначення. КАД із порожнистим ротором широко випускаються різними іноземними компаніями. Наприклад, "Japan Savo Co Ltd", заснована в 1950 році, коли в Японії почалося виробництво електронних реєструючих і регулюючих приладів, випускає асинхронні мікромашини з порожнистим ротором серій ВМ, ВМТ, 4Е8, Е8, Е8Т, ЕЛ, JS і т.д.

Порівняльний аналіз характеристик АД з МФР та АД загального призначення дозволяє говорити, що механічна характеристика АД з МФР зміщена в область високих ковзань більшою мірою, ніж у АД з підвищеним пусковим моментом. В АД з МФР поверхневий ефект різко виражений, тому при зростанні ковзання зростає активний опір МФР, а втрати в обмотці статора зменшуються. МФР має високу механічну та термічну стійкість, необхідну при розробці приводів з частими реверсами та важкими умовами пуску. АД з МФР мають великі максимальний та пусковий моменти та меншу тривалість перехідного процесу при пуску. Втрати енергії як тепла під час перехідних процесів в обмотках їх статорів менше, при цьому максимум теплових втрат приходить на вторинний ланцюг АД з МФР.

Використання МФР у порівнянні з шихтованим дає ряд переваг, до яких необхідно віднести такі:

- у рівних габаритах і при однаковій густині струмів і моментах інерції ротора, втрати енергії під час механічних перехідних процесів у МФР та в обмотці шихтованого ротора, однакові, а втрати в обмотках статора для АД з МФР істотно менші, ніж у АД єдиних серій;

- АД із МФР порівняно з АД єдиних серій рівного габариту забезпечує меншу тривалість механічних перехідних процесів;

- при високих значеннях ковзання енергетичний фактор (добуток ККД та $\cos \varphi$) АД з МФР вище, ніж для АД єдиних серій;

– за рахунок вищого коефіцієнта потужності в зоні високих ковзань добротність АД з МФР на цій ділянці вище, ніж добротність АД єдиних серій.

АД з МФР потужністю до 200 кВт використовуються в герметичних насосах для перекачування теплоносіїв в атомних енергетичних установках.

МФР цих машин виготовлений з хромистої сталі марки 1Х17Н зі зниженою відносною магнітною проникністю і порівняно високим питомим електричним опором $\rho = (7\div 9) \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Для поліпшення енергетичних показників і збільшення корисної потужності в МФР встановлені короткозамкнені стрижні. Ці АД є екранованими, тобто пакет статора з обмотками герметично відділений від простору, зайнятого МФР, за допомогою екрану, що являє собою тонкостінну неферомагнітну металеву гільзу, запресовану по внутрішньому діаметру пакету статора. Екрановані АД з МФР застосовуються в установках, де можливе проникнення всередину машин через підшипникові вузли агресивних рідин або газів. Завдяки екрану, який, як елемент вторинного ланцюга машини, конструктивно виконаний на статорі, вдається виключити вплив агресивного середовища на первинну обмотку. Двигуни цього типу називають безсальниковими з "мокрим" ротором. Оскільки вони виконуються разом з приводним механізмом (насоси, компресори), відпадає необхідність у складних і малонадійних ущільненнях у місцях проходження валів, що обертаються.

У матеріалі екрану наводяться вихрові струми, що спричиняють додаткові втрати. Ці втрати можуть бути використані так, як вони використовуються в безсальникових сполучених електронасосах для перекачування в'язких нафтопродуктів. Такий насос є екранованим АД з МФР, суміщеним з робочим колесом насоса. Теплові втрати в екрані і втрати ковзання в МФР при роботі насоса витрачаються на підігрів нафтопродуктів, що перекачуються, що знижує їх в'язкість і призводить до прискорення процесу перекачування.

Дуже успішним виявилось застосування зубчастих МФР зі сталі 20ХНЗМФЦ, що несуть стрижневу короткозамкнену обмотку для

високошвидкісних АД великої потужності. Визначальними для матеріалу масиву цих МФР поряд з електричними та магнітними характеристиками виступають механічні властивості.

АД з МФР малої та середньої потужності зовнішньо застосовуються в регульованих і нерегульованих приводах, в системах автоматичного управління, у виконавчих механізмах. В цілому їх доцільно використовувати в приводах, що працюють в інтенсивних старт-стопних режимах, в яких нагрівання відбувається головним чином під час пуску або реверсу.

Для АД з МФР мінімальної та середньої потужності пускові і робочі показники мають найкращий вигляд, коли значення μ_r масиву лежать у інтервалі (20÷50) в.о., а саме (20÷25) в.о. в момент пуску (враховуючи сильне насичення МФР при пуску потоками розсіювання) та (40÷50) в.о. у номінальному режимі. Точка Кюрі для забезпечення сталості магнітних властивостей масиву повинна бути не меншою (300÷350) °С. У машинах малої та середньої потужності, розрахованих на тривалий режим роботи, для матеріалу МФР значення ρ повинні лежати в інтервалі $(1,0\div 2,0)\cdot 10^{-7}$ Ом·м.

АД з МФР має більш високу добротність пуску. Заміною шихтованого короткозамкненого ротора двошаровим МФР можна досягти в середньому збільшення початкового пускового моменту в 1,5 рази та зменшення початкового пускового струму в 1,4 рази. Поряд із вирішенням проблеми пуску АД від малопотужної мережі застосування МФР призводить до зменшення втрат, спричинених зменшенням падіння напруги під час пуску. Пускові втрати в АД з МФР, зумовлені зниженням напруги мережі, тим менше (порівняно з АД із шихтованим короткозамкненим ротором), чим більше момент опору при пуску. Так, втрати енергії в АД з двошаровим МФР при прямому пуску в 3,8 рази менше, ніж у АД з шихтованим короткозамкненим ротором, а при пуску через додатковий опір в ланцюзі АД з шихтованим ротором і фазною обмоткою пускові втрати зменшуються в 2,2. Якщо в умовах важких пусків АД працює в інтенсивних старт-стопних режимах, застосування МФР дає найбільший ефект.

На підвищених ковзаннях АД з МФР порівняно з АД із шихтованим ротором забезпечують найкращі енергетичні показники (починаючи від значень s порядку 0,146).

Поширюються спроби більшого використання АД з МФР в регульованому електроприводі. По-перше, це дозволяє забезпечити підвищення енергетичних показників у частотних приводах з частими реверсами та гальмуваннями, так як в результаті інвертування струмів у фазах первинної обмотки при жорсткому режимі управління та здійснення гальмування фактично противімкненням, а реверсу – перемиканням, частота перемагнічування ротора, наприклад, при реверсі змінюється в подвоєному інтервалі високих ковзань. Відомо, що застосування жорсткого режиму частотного управління АД єдиних серій, у тому числі що мають спеціальну форму паза ротора (тобто з витіснення струму), обмежується на практиці не тільки економічними міркуваннями, пов'язаними з додатковими втратами, але й з нагріванням АД, оскільки струми в жорсткому режимі в більшості випадків перевищують допустимі значення, і тоді прийнятні тільки м'які режими, різко знижують продуктивність всієї системи. Крім того, оскільки АД з МФР одних габаритів з АД єдиних серій забезпечують в 1,5 рази більші значення критичного моменту, а їх механічна характеристика наближається до екскаваторної, то в частотно-регульованому приводі, навантажувальна діаграма якого характеризується "короткими піками" порядку значення критичного моменту застосування АД з МФР при погіршенні енергетичних показників в цілому дозволяє підвищити надійність роботи, особливо якщо діапазон регулювання швидкості близький до граничного, а переривання роботи системи неприпустимо.

По-друге, при менших порівняно з АД єдиних серій втратах на високих ковзаннях, в АД з МФР відкриваються сприятливі перспективи для регулювання частоти обертання найпростішим способом – шляхом зміни амплітуди напруги живлення. Використання АД з МФР у гребних приводах з регулюванням зміною напруги забезпечує необхідне число пусків і реверс

гребного гвинта безпосередньо шляхом реверсу електроприводу, що виявляється складним при застосуванні АД з шихтованим короткозамкненим ротором. Експлуатаційний вид механічної характеристики АД з МФР дозволяє ефективно використовувати їх у приводах з вентиляторним моментом опору при регулюванні швидкості в широкому діапазоні зміною напруги, що підводиться.

1.3 Стан питання моделювання асинхронних двигунів із порожнистим ротором

Електромагнітні процеси в АД з гладким неферомагнітним та феромагнітним ротором мають багато спільного. Підхід до розв'язання задач поля щодо обох типів роторів вважають аналогічним. Водночас необхідно враховувати характерні якісні особливості електромагнітних процесів у МФР, пов'язані з проявом поверхневого ефекту, насиченням та гістерезисом масиву.

Основи теорії КАД становлять питання, пов'язані з дослідженням електромагнітних процесів у характерних областях основних конструкцій машин цього типу. В першу чергу, як таку область виділимо екран статора і неферомагнітне струмопровідне покриття ротора. Загалом умови розподілу параметрів електромагнітного поля у цих областях порівняно з масивом можна вважати ідеальними. Граничні умови, відповідні даним областям, аналогічні умовам в розрахунковому зазорі КАД з порожнистим неферомагнітним ротором, у зв'язку з чим повинні бути прийняті до уваги результати, отримані в теорії машин даного виду.

Наявність феромагнітного масиву визначає основні особливості розподілу напруженостей електричного та магнітного полів у вторинному ланцюзі. Дану ознаку покладено в основу класифікації конструкцій АД з МФР, тому інтерес представляють розвиток теорії електричних машин з гладким і зубчастим МФР, а також дослідження, пов'язані з поширенням електромагнітної хвилі у феромагнітному середовищі.

Наявність шихтованого феромагнітного пакета статора з симетричною розподіленою трифазною обмоткою визначає інтерес до теорії та методів дослідження асинхронних машин з односторонньою та двосторонньою зубчатістю в умовах насиченого стану магнітного ланцюга.

Таким чином, існують три напрями досліджень, що утворюють теоретичну базу, на основі якої має бути побудована методика розрахунку АД із струмопровідним шаром ротора. Для узагальнення сучасного стану теорії в напрямках, що цікавлять, з метою визначення раціонального шляху подальшого теоретичного дослідження розглянемо тенденції розвитку теорії у відповідних галузях.

У переважній більшості робіт з теорії АД з гладким ротором розглядається стаціонарний режим, визначаються параметри моделі, з різним ступенем наближення враховують реакцію провідного середовища ротора. Центральним завданням є розрахунок опору ротора, що надає значний вплив на вихідні показники. Опір ротора може бути визначений, якщо відомий закон розподілу густини вихрових струмів у роторі, або завдання вирішується на основі теорії поля.

Вперше розподіл вихрових струмів у гладкому МФР було визначено аналітично І.С. Бруком. Мозером вперше досліджено вплив виступаючих країв (крайовий ефект) на розподіл струму в порожнистому неферомагнітному роторі та його активний опір. При цьому використовувалися такі припущення:

- у межах сталі статора струми в роторі спрямовані паралельно його осі;
- весь струм замикається в лобових частинах за межами активної довжини;
- зміна струму по колу ротора синусоїдальна;
- реакцією вихрових струмів ротора нехтується, поле в розрахунковому зазорі приймається постійним.

Точніше врахування впливу країв ротора виконано в роботі [12]. Як і Г. Мозер, передбачено, що вихрові струми в активній частині ротора проходять паралельно його осі. Розподіл струму в торцевій частині ротора розглядається

за аналогією з електричним полем між двома плоскими електродами, що мають потенціали різних знаків, відстань між якими вважається відомим.

Надалі рядом авторів проводилися численні дослідження з метою суворішого обліку впливу країв ротора у зоні лобових частин. Слід зазначити, що у цих роботах не враховується вплив струмів статора та швидкості обертання ротора. Аналітичне розв'язання задачі, наведене А.М. Ефросом для АД з порожнистим феромагнітним омідненим ротором для випадку нескінченно тонкого шару вихрового струму виходить як окремий випадок у роботі [12].

Продовженням досліджень І.С. Брука та А.М. Ефроса були роботи І.А. Вевюрко, що містять аналітичне дослідження АД з порожнистим неферомагнітним ротором на основі теорії поля. Завдання вирішено для ротора довільної довжини. При цьому зроблено такі припущення:

- розглядаються лише перші просторові гармоніки МДС;
- радіальне поле замінюється плоскопаралельним, розглядається лише нормальна складова напруженості поля;
- густина струму в роторі приймається постійною за його товщиною;
- індукція поза розрахункової довжини пакета статора дорівнює нулю;
- насичення не враховується, запроваджується розрахунковий робочий зазор.

В результаті вирішення рівнянь математичної фізики було визначено закон розподілу густини струму у всіх областях циліндра ротора. Загальне рішення диференціальних рівнянь для ротора обмеженої довжини вийшло складним. Розгляд окремих граничних випадків суттєво спрощує вирішення та дозволяє аналізувати вплив основних факторів – геометрії ротора, швидкості обертання, частоти первинного струму, питомого опору матеріалу ротора та конструктивних розмірів на характер розподілу струму та величину опору ротора, який отримано у комплексному вигляді, тобто з урахуванням індуктивної складової.

Подібні результати отримано у роботі А.А. Батовиріна, де опір порожнистого неферромагнітного ротора знаходиться шляхом розв'язання задачі з теорії поля в припущенні, що вихрові струми замикаються не тільки в частинах циліндра, що виступають, але і в активній частині ротора.

Результати аналітичного дослідження КАД з порожнистим неферромагнітним ротором викладено у роботі Е. Хабігера. Особливістю цієї роботи є обраний автором прямокутний закон розподілу індукції вздовж довжини машини в аксіальному напрямку. У цій роботі введені дві системи координат: нерухома і рухома, пов'язані відповідно зі статором і ротором. Знаходиться закон розподілу індукції в різних областях, визначається густина струму в роторі, будуються епюри тангенціальних і осьових сил, що діють на ротор, визначається момент. Рішення провадиться для двох випадків: з урахуванням і без урахування розсіювання ротора. Наведено номограми для визначення відносного опору взаємоіндукції для вторинної еквівалентної обмотки, які можуть використовуватися при інженерних розрахунках опору порожнистого неферромагнітного ротора, приведенного до обмотки статора.

Аналіз результатів досліджень електромагнітних процесів в КАД з порожнистим неферромагнітним ротором дозволяє зробити ряд висновків та виявити основні фактори, що впливають на їх перебіг:

- густину вихрових струмів за товщиною ротора для всіх реальних конструкцій машин з неферромагнітним порожнистим ротором можна вважати постійною, тобто, радіальна складова напруженості магнітного поля – постійна;
- магнітне поле в зазорі та його складова від струмів ротора залежать від частоти струму, питомого опору матеріалу ротора та його геометрії;
- магнітне поле нерівномірне вздовж аксіальної довжини, що підтверджує наявність реактивного опору розсіювання ротора;
- опір ротора залежить від розподілу вихрових струмів, причому його активна складова зростає зі зменшенням ковзання.

Аналітичні рішення задач про розподіл вихрових струмів у роторі та поля в АД з неферромагнітним порожнистим ротором підтверджувалася шляхом

експериментів, пов'язаних з визначенням густини вихрових струмів у матеріалі ротора за допомогою термопар, а також знаходженням закону розподілу індукції в робочому зазорі по довжині ротора за допомогою відповідних вимірювальних витків. Аналіз експериментальних даних, отриманих різними авторами, дозволяє зробити два основні висновки:

- для АД з підвищеною частотою первинних струмів або з великим вильотом ротора результати розрахунків за всіма формулами зближуються і добре узгоджуються з експериментом (тобто, поперечний крайовий ефект різко послаблюється на великих частотах перемагнічування ротора; збільшення вильоту ротора до певного значення знижує вплив поперечного крайового ефекту);

- при малих відношеннях полюсного поділу до активної довжини за будь-якого з аналізованих законів розподілу вихрових струмів поперечний крайовий ефект позначається слабо.

Першочерговим завданням теоретичного дослідження КАД є подальше вдосконалення методики розрахунку електромагнітних процесів з урахуванням поперечного крайового ефекту. У її межах розглядається можливість розробки нових ефективних конструкцій ротора, зокрема конструкції перфорованого порожнистого ротора (ППР), у якому поперечний крайовий ефект істотно ослаблений, а опір ротора залишається незмінним у широкому інтервалі зміни ковзання.

Аналіз електромагнітного поля в АД з МФР для різних граничних випадків проводився за умови сталості магнітної проникності на поверхні МФР. Результати такого аналізу у прямокутній системі координат зводяться до того, що напруженість електричного поля вздовж осі МФР E_y та тангенціальна напруженість магнітного поля H_y мають ідентичний експонентний закон зміни координати Z (вглиб масиву). Зіставлення цих результатів з експериментальними дослідженнями, показує, що аналіз поля МФР за умови сталості значення магнітної проникності на його поверхні не дає уявлення про закони зміни E_y та H_x по глибині масиву. В результаті один з найважливіших

параметрів – опір МФР, менший за дослідний, а його фазовий кут більший за дослідний і завжди дорівнює 45° .

Пізніше з'явилися рекомендації щодо використання класичної роботи Л.Р. Неймана, що містить вирішення одномірної задачі поширення поля та електромагнітної хвилі у феромагнітному масиві з урахуванням змінної магнітної проникності вглиб масиву та гістерезису, що дозволяє враховувати зазначені фактори для уточнення еквівалентних параметрів МФР, отриманих за умови постійної магнітної проникності на поверхні масиву.

Просторовий розподіл змінного магнітного потоку на подвійному полюсному поділі в межах розрахункової довжини машини враховувався В.М. Куцеваловим в за допомогою коефіцієнта лобового ефекту (визначає збільшення опору МФР внаслідок впливу струмів, що замикаються по торцях). Такий підхід виявився дуже вдалим і широко використовується.

Таким чином, в АД з МФР активна і реактивна складові, опори вторинного ланцюга змінюються за нелінійними законами, залежним як від частоти струмів МФР і фізичних властивостей його матеріалу, так і від співвідношень конструктивних розмірів. Частотні залежності опорів різних конструкцій МФР мають визначальний вплив на характеристики машин. Задача уточненого аналізу двомірного електромагнітного поля в МФР при змінній магнітній проникності на його поверхні, як і раніше, є актуальною. В останні роки вона вирішується з використанням ряду вихідних положень при різних припущеннях як аналітично, так і за допомогою чисельних методів розрахунку.

При дослідженні МФР з неферомагнітним струмопровідним шаром у низці робіт зазначалося, що у еквівалентному опорі МФР головну роль грає неферомагнітний шар.

Таким чином, дослідження електромагнітних полів АД з МФР проходять у двох основних напрямках:

- розрахунки з ідеалізацією магнітних властивостей сталі;

– розрахунки поля з урахуванням насичення при наближеній оцінці зубчатості на основі аналітичного рішення рівнянь математичної фізики чи у більш точній постановці за допомогою чисельних методів розрахунку.

При дослідженнях АД з МФР за першим напрямом особливості розтікання вихрових струмів МФР часто враховуються на основі ряду припущень. Наприклад, нехтується взаємним впливом відповідних ділянок магнітного ланцюга ротора при використанні неферомагнітного струмопровідного шару на МФР, а також при зубчастій будові масиву, у профрезованих пазах якого розміщена короткозамкнена обмотка. Все це істотно знижує точність результатів.

При дослідженні АД з двосторонньою зубчатістю широко використовуються чисельні методи розрахунку поля з урахуванням зубчатості та насичення сердечників, серед яких особливо прогресує МКЕ. Широко поширився метод провідностей зубцевих контурів (МПЗК), який отримав розвиток у роботах А.В. Іванова-Смоленського. Відповідно до цього методу розглядається повне поле машини з урахуванням його зміни у часі при взаємному переміщенні зубчастих сердечників. Рівняння нелінійного магнітного ланцюга складаються та вирішуються на ПК у матричному вигляді на основі ідей Г. Крона. Електромагнітні процеси розраховуються шляхом спільного вирішення системи диференціальних рівнянь, записаних у матричному вигляді для контурів електричного ланцюга, до якого входять обмотки машини та зовнішні електричні ланцюги.

Методики розрахунку на основі теорії ланцюгів полягають у зведенні реального пристрою до деталізованого електричного або магнітного ланцюга із зосередженими параметрами. Відповідні ділянки магнітопроводу замінюють еквівалентними магнітними опорами, а первинні (вторинні) МДС визначають як повний струм на розглянутій ділянці. Параметри ланцюга, що інтегрально представляють властивості окремих ділянок, визначаються з розв'язання задач поля для кожної з цих ділянок при спрощених граничних умовах. МДС статора та вторинного ланцюга пов'язані з потоком на відповідній ділянці рівняннями

електричного стану. Аналогічні рівняння пов'язують МДС з напругою (ЕРС). Таким чином, електромагнітні процеси в АД описуються системою рівнянь алгебри, складених за методом контурних струмів для отриманої схеми, до яких додаються рівняння електричного стану. Структура магнітної схеми та рівняння, що її описують, не залежать від параметрів вторинного ланцюга, які враховуються тільки при записі рівнянь електричного стану.

Слід зазначити, що параметри ділянки вторинного ланцюга, що відповідає кроку розбиття у схемі магнітного ланцюга, визначаються окремо на основі розв'язування рівнянь з теорії поля. Це дозволяє досліджувати характеристики АД з різними конструкціями МФР (у тому числі екранованих АД з МФР) з урахуванням зміни значень параметрів ділянок магнітного ланцюга, відповідних кроку дискретності моделі вздовж полюсного розподілу (тобто реального насичення ділянок магнітопроводу), поперечного крайового ефекту в МФР, поверхневого ефекту в масиві, а також дискретності розподілу первинних струмів у робочому зазорі. Схеми магнітних ланцюгів мають можливість гнучкої зміни рівня деталізації. Методики розрахунку, засновані на деталізованих схемах магнітного ланцюга із зосередженими параметрами, займають проміжне положення між методиками на основі чисельних методів та класичною методикою на основі електричних схем із зосередженими параметрами.

В теорії симетричних АД відомий метод аналогового моделювання багатошарових структур. Найбільший інтерес викликає використання даного методу для аналізу електромагнітного поля АД з двошаровим МФР, а також з МФР з неферомагнітним струмопровідним шаром. Суть методу полягає в усередненні властивостей реальної області машини по координатним осям. Виділяючи характерні шари електричної машини, усереднюють властивості реальних середовищ з урахуванням аналогії з електричними ланцюгами. Реально анізотропні шари в ортотропних моделях виявляються ізотропними у напрямі координатних осей. Основний недолік методу у тому, що насичення характерних шарів машини враховується у середньому.

Особливий інтерес становлять роботи З. Ямамури, у яких викладається створена ним теорія спіральних векторів. При аналізі КАД в стаціонарному режимі роботи в лінійній постановці використовуються комплексні значення змінних величин, в які не входить параметр часу, в той час як для аналізу насичених систем, і навіть нестационарних режимів роботи, оперують з миттєвими величинами. Через два різних вирази змінних величин теоретичний аналіз виявляється некомпактним. Ямамура вводить поняття спірального вектора, який є експонентною функцією часу з комплексним коефіцієнтом при аргументі. Автор доводить сім теорем, що обґрунтовують застосування методу спіральних векторів. Метод полегшує вирішення рівнянь ланцюгів і дозволяє отримати загальне рішення, що містить сталу і перехідну складові.

Численні методи розрахунку електромагнітного поля КАД дозволяють отримати найповнішу картину електромагнітних процесів. Відповідно до кінцево-різницевого методу сіток досліджувана модель розбивається на ряд ділянок. Струми зосереджені у вузлах з координатою відповідного провідника. Диференціальні рівняння, що описують електромагнітне поле, зводяться до системи рівнянь у кінцевих різницях, вирішення якої дозволяє знайти розподіл поля та розрахувати характеристики КАД.

Відповідно до МКЕ досліджувана область розбивається на ділянки. Рішення диференціальних рівнянь зводиться до вирішення системи рівнянь алгебри, що пов'язують значення векторного потенціалу поля в вузлових точках, отриманих при розбитті на ділянки. Точність результату в основному залежить від точності відтворення геометрії, електричних та магнітних властивостей матеріалів та дрібності розбиття досліджуваної області.

На даний час в основному вирішені завдання врахування поперечного крайового ефекту та визначення індуктивної складової опору в неферромагнітному струмопровідному шарі, а також поперечного та поперечного ефектів в МФР. Для дослідження насичених машин з односторонньою і двосторонньою зубчатістю широко використовуються чисельні методи розрахунку, що реалізуються за допомогою ПК. За останні

роки широкого розвитку набули методики розрахунку електромагнітних полів КАД на основі чисельних методів.

Таким чином, найбільш повне уявлення про характер протікання електромагнітних процесів в КАД зі струмопровідним шаром ротора в даний час дають чисельні методи розрахунку поля, зокрема МКЕ. Головною проблемою при цьому є аналіз отриманих результатів з точки зору знаходження раціонального варіанта сукупності геометричних та інших параметрів моделі без істотних витрат часу для створення великої кількості можливих варіантів машини.

Вироблена концепція електромагнітного розрахунку КАД з струмопровідним шаром ротора полягає у поєднанні можливостей різних методів дослідження: розрахунок електромагнітного поля виконується на основі МКЕ, при цьому кожному наступному варіанту конструктивної реалізації двигуна передують оціночний розрахунок, що виробляється за допомогою виразів, що зв'язують параметри двигуна з вхідними даними, необхідними для створення його кінцево-елементної моделі, що дозволяє спрямовано враховувати кількісні результати польового розрахунку (у тому числі насичення ділянок магнітного ланцюга), одержані на попередньому етапі.

Вирази, необхідні проведення оціночних розрахунків, є результатами аналітичного дослідження електромагнітних процесів областей КАД з струмопровідним шаром ротора, що мають конкретні геометричні розміри та фізичні властивості, які є вхідними параметрами при побудові кінцево-елементних моделей.

Якщо аналіз реальної конструкції на основі МКЕ пов'язаний з підвищеними витратами часу створення та розрахунку кінцево-елементних моделей, особливо для випадків, коли необхідний тривимірний аналіз, можливе застосування методики на основі теорії ланцюгів, яку слід розглядати як наближений варіант МКЕ. Даний підхід у частині аналізу зберігає за можливостями переваги класичного підходу на основі електричних схем із

зосередженими параметрами, а за точністю наближається до чисельного методу кінцевих елементів.

На сьогодні широко застосовується моделювання електромагнітних полів на основі МКЕ за допомогою комп'ютерних програм. До відомих, апробованих і доступних широкому використанню програмних продуктів, що реалізують МКЕ, відносяться пакети програм Ansys, Comsol Multiphysics, FEMM, Maxwell та Elcut. Дані пакети дозволяють вирішувати завдання, у яких одночасно можуть бути враховані складні межі розділу середовищ, їхнє взаємне переміщення, нелінійність властивостей матеріалів тощо. Основним недоліком сучасних кінцево-елементних програм є високі вимоги до апаратних ресурсів під час побудови тривимірних моделей.

1.4 Постановка задач досліджень

Характер розподілу ВС визначає товщину струмонесучого шару, а значить і величину активного опору порожнистого ротора. Це відіграє першорядну роль у формуванні вихідних показників і властивостей КАД, в першу чергу, таких як електромагнітний момент.

Однією з основних завдань проектування КАД є отримання максимального електромагнітного моменту. Тому важливо встановити залежності, що безпосередньо пов'язують параметри механічної характеристики з конструктивними параметрами порожнистого ротора.

Теоретичний інтерес представляє створення математичних моделей, що дозволяють враховувати реальний тривимірний характер поля (пов'язаний з кінцевою довжиною), що особливо проявляється в зоні торцевих частин машини, де вектор густини струму, крім осьової складової, має значні тангенціальні та радіальні складові.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати огляд конструкцій асинхронних двигунів з порожнистим ротором, що працюють в пристроях автоматики та управління;
- розглянути стан питання моделювання електромагнітних процесів в асинхронних двигунах з порожнистим ротором;
- провести дослідження розподілу вихрових струмів та електромагнітного моменту асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- розглянути заходи з пожежної безпеки на підприємстві.

1.5 Висновки до 1 розділу

Електромагнітні процеси в АД з гладким феромагнітним та феромагнітним ротором мають багато спільного. Головною особливістю АД з МФР є складний характер розподілу параметрів електромагнітного поля у вторинному ланцюзі, пов'язаний із загасанням електромагнітної хвилі у феромагнітному масиві (поверхневим ефектом). АД з МФР за своїми енергетичними показниками у номінальному режимі роботи поступаються серійним АД основного виконання. Разом з тим – екскаваторний вид механічної характеристики АД з МФР дозволяє їм стійко працювати в широкому діапазоні зміни швидкостей обертання навантаження за більш високого енергетичного фактора на підвищених ковзаннях, ніж у АД єдиних серій. АД з МФР, що мають більш високий динамічний ККД в порівнянні з АД єдиних серій (у тому числі АД з витісненням струму ротора), доцільно використовувати в таких електроприводах, де основні втрати в електричній машині відбуваються під час пуску або реверсу. Застосування АД з МФР є перспективним також у приводах з тривалим режимом роботи, але з важкими умовами пуску, у високошвидкісних безредукторних приводах, а також у приводах підвищеної надійності.

Головною особливістю КАД із порожнистим ротором є яскраво виражений поперечний крайовий ефект. КАД отримали поширення в системах

автоматики. Для них характерні часті пуски, реверси, зупинки, тобто, нестаціонарні режими роботи. Основні вимоги до КАД – висока швидкодія, лінійність механічних та регульовальних характеристик, відсутність самоходу та стійкість роботи в широкому діапазоні кутових швидкостей. Забезпечення всіх вимог, що висуваються до них, пов'язане з підвищенням опору ротора, тому основним обмеженням, що накладається на ці параметри, є значення прийнятних енергетичних показників.

Першочерговим завданням теоретичного дослідження КАД є подальше вдосконалення методики розрахунку електромагнітних процесів з урахуванням поперечного крайового ефекту. У межах розглядається можливість розробки нових ефективних конструкцій ротора, зокрема конструкції перфорованого порожнистого ротора.

Найбільш повне уявлення про характер протікання електромагнітних процесів в КАД з струмопровідним шаром ротора в даний час дають чисельні методи розрахунку поля, зокрема МКЕ. Головною проблемою є аналіз отриманих результатів з точки зору знаходження раціонального варіанту сукупності геометричних та інших параметрів моделі без істотних витрат часу для генерації великого числа можливих варіантів машини.

2 ОБЕРТОВИЙ МОМЕНТ І СПОСОБИ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ

2.1 Обертний момент КАД

Взаємодія магнітних полів статора і ротора призводить до появи механічного обертового моменту, прикладеного як до статора, так і до ротора. Статор закріплений нерухомо і прикладений до нього момент компенсується реакцією елементів кріплення. Ротор встановлений в шарикопідшипниках і починає розкручуватися до деякої встановленої швидкості ω_2 , яка визначається умовою рівноваги твердого тіла, що обертається: сума механічних моментів прикладених до тіла повинна дорівнювати нулю:

$$\sum_{j=1}^m M_j = 0. \quad (2.1)$$

Весь процес перетворення підведеної до двигуна електричної енергії на механічну енергію обертання ротора з навантаженням, відображається схемою перетворень, наведеною на рис. 2.1.

На електричні ланцюги збудження та управління подаються напруги відповідно збудження u_B та управління u_y . Напруга збудження незмінна та її можна вважати напругою живлення пристрою, напруга управління задається пристроєм управління. Подані напруги елементарними перетворювачами ЕП1 і ЕП2 перетворюються на струми i_B та i_y .

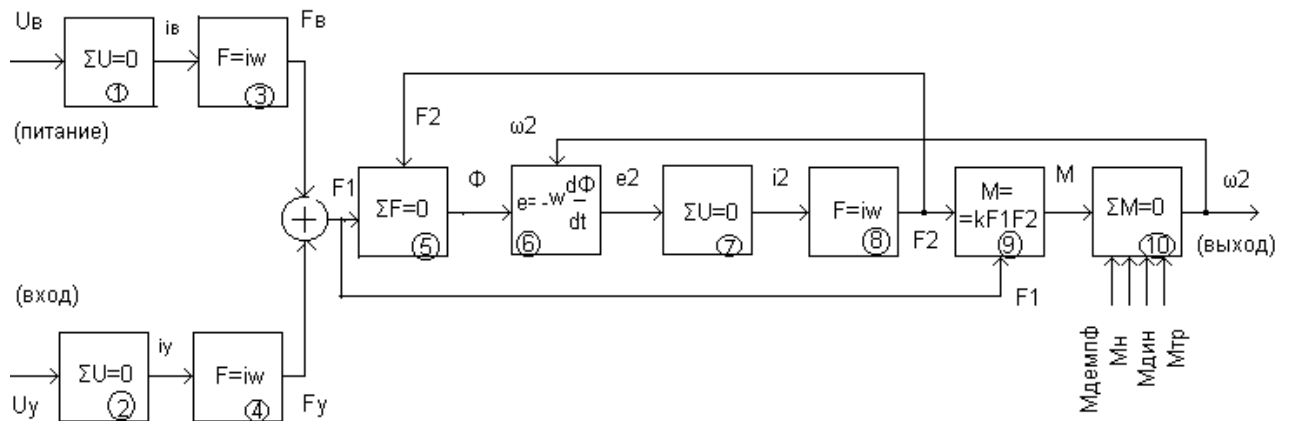


Рисунок 2.1 – Схема перетворень сигналу в КАД

Це перетворення описується умовою рівноваги електричного ланцюга: сума ЕРС, різниць потенціалів і падінь напруг в електричному ланцюгу дорівнює нулю (інакше, інтегральна форма матеріального рівняння або закону Ома для електричного ланцюга, друге правило Кірхгофа), яке умовно в ЕП1 та ЕП2 записано як $\sum U = 0$. Струми, протікаючи по обмотках, створюють намагнічуючі сили, F_B та F_Y – ЕП3 и ЕП4 (закон повного струму), діючі в магнітних ланцюгах машини і які складаються в поле, що обертається F_1 . Наступне перетворення ЕП5 призводить до появи магнітного потоку і описується умовою рівноваги магнітного ланцюга: сума намагнічувальних сил і падінь магнітної напруги в магнітному ланцюгу дорівнює нулю (друге правило Кірхгофа для магнітного ланцюга), що умовно записано в ЕП5 як $\sum F = 0$. Магнітний потік Φ обертається, перетинає ротор і згідно із законом електромагнітної індукції наводить у ньому ЕРС e_2 – ЕП6. У роторі виникає електричний струм i_2 , що також описується умовою рівноваги електричного ланцюга – ЕП7. Цей струм створює свою силу, що намагнічує F_2 – ЕП8, яка діє в магнітопроводі машини та спільно з F_1 визначають Φ в ЕП5. Взаємодія полів F_1 и F_2 згідно із законом електромагнітного зусилля створює механічний обертовий момент $\vec{M} = [\vec{p}_m \cdot \vec{B}]$, що відображено елементом ЕП9 і умовним записом у ньому $M = k \cdot F_1 \cdot F_2$. Обертаючий момент та інші моменти, що діють

на ротор – момент навантаження M_H , демпфуючий момент $M_{ДЕМПФ}$, динамічний момент $M_{ДИН}$ та момент тертя $M_{ТР}$, визначають швидкість обертання ротора ω_2 , що описується рівнянням рівноваги твердого тіла: $\sum M = 0$ – ЕП10. Швидкість ω_2 є вихідним сигналом машини. Крім того, ω_2 одночасно з Φ визначає величину ЕРС у роторі і тому подана на ЕП6. Ланцюги $F2$ на ЕП5 та ω_2 на ЕП6 показують наявність у двигуні внутрішніх негативних зворотних зв'язків. На рис. 2.1 не показані падіння електричної напруги на активних опорах ланцюгів управління, збудження та ротора, ЕРС, індуковані в обмотках збудження та управління потоком Φ , падіння магнітної напруги в магнітному опорі магнітопроводу. Ці перетворення носять допоміжний характер, проте про них слід пам'ятати та розуміти, що вони теж є негативними зворотними зв'язками, що забезпечують сталу роботу двигуна.

Схема перетворень дає якісну картину роботи двигуна. Кількісний аналіз роботи, заснований на законах, зазначених на схемі, дозволяє знайти вираз для моменту, що розвивається двигуном:

$$M = \frac{m1 \cdot U1^2 \cdot r2'}{\omega1 \cdot s \left[\left(r1 + c1 \cdot r2' / s \right)^2 + \left(x1 + c1 \cdot x2' / s \right)^2 \right]}, \quad (2.2)$$

де $m1$ – число фаз обмотки статора;

$r1, x1$ – активний та реактивний опір обмотки статора;

$r2', x2'$ – активний та реактивний опір ротора, приведені до числа витків та фаз обмоток статора;

$c1$ – коефіцієнт приведення параметрів КАД до Г-образної схеми заміщення;

Цей вираз можна розуміти так:

$$M = \frac{P_{EM}}{\omega_1}, \quad (2.3)$$

де P_{EM} – електромагнітна потужність, що передається від статора до ротора магнітним полем, що обертається з кутовою швидкістю ω_1 .

Годограф вектора обертового поля статора може мати вигляд кола або еліпса. Поле буде круговим, якщо виконані умови:

а) струми I_B^* та I_Y^* зсунуті по фазі на кут

$$\beta = 180^\circ - \theta, \quad (2.4)$$

де θ – просторовий зсув осей обмоток збудження та управління;

б) намагнічуючі сили статора обмоток рівні між собою $F_B = F_Y$.

Зазвичай θ задається кутом 90 електричних градусів, так як в такому випадку поле, що обертається, має максимальну величину

$$F_1 = F_{B_{\max}} \cdot \sin \theta = F_{Y_{\max}} \cdot \sin \theta. \quad (2.5)$$

Тому зсув фаз струмів I_B^* та I_Y^* також задається кутом 90° .

Якщо одне чи обидві з цих умов не виконуються, то поле стає еліптичним, а миттєва частота обертання вектора поля – непостійною. Чим більше відхилення від зазначених умов, тим більшою мірою поле відрізняється від кругового. Еліптичне поле може бути представлене сумою двох нерівних за величиною кругових полів, що обертаються у протилежні сторони з однаковою за абсолютною величиною швидкістю n_1 . Пряме поле має постійну максимальну амплітуду (2.5), а амплітуда зворотного поля тим більше, чим суттєвіше відхилення від зазначених умов. Пряме поле створює корисний обертовий момент $M_{\text{ПР}}$, а зворотне – гальмівний момент $M_{\text{ОБР}}$, так що підсумковий момент M , що розвивається двигуном, дорівнює

$$M = M_{\text{ПР}} - M_{\text{ОБР}}. \quad (2.6)$$

Вираз (2.2) справедливий, коли $M_{\text{обр}} = 0$, тобто коли поле статора кругове, при еліптичному полі момент дорівнює

$$M = \frac{1}{\omega l} \left[(I_B^2 + I_Y'^2) (R_{\text{ПР}} + R_{\text{ОБР}}) + 2I_B I_Y' (R_{\text{ПР}} + R_{\text{ОБР}}) \sin(\varphi_Y - \varphi_B) \right], \quad (2.7)$$

де I_Y' – струм обмотки управління, приведений до витків обмотки збудження;

φ_Y, φ_B – фази напруг управління та збудження відповідно;

$$R_{\text{ПР}} = \frac{r2' \cdot x_0^2 \cdot s}{r2'^2 + (x2' + x_0)^2 \cdot s^2},$$

$$R_{\text{ОБР}} = \frac{r2' \cdot x_0^2 (2-s)}{r2'^2 + (x2' + x_0)^2 (2-s)^2},$$

де $r2', x2'$ – активний та реактивний опір ротора, приведені до обмотки статора;

x_0 – реактивний опір намагнічування двигуна, приведений до обмотки збудження.

Вираз (2.7) як і (2.2) можна представити у вигляді (2.3).

Таким чином, змінюючи ступінь виконання умов кругового поля можна змінювати результуючий обертовий момент, що розвивається двигуном, а значить змінювати швидкість його обертання, тобто управляти двигуном. Звідси три, застосовуваних практично, способи управління КАД:

а) амплітудне управління, коли змінюється U_Y по амплітуді при незмінній фазі;

б) фазове управління, коли змінюється фаза при незмінній амплітуді;

в) амплітудно-фазове управління, коли одночасно змінюються і фаза, і амплітуда U_Y .

Аналіз роботи КАД при різних способах управління показує, що амплітудне і амплітудно-фазове управління дають практично однакові характеристики двигуна, а при фазовому управлінні потрібна підвищена потужність пристрою управління, особливо при малих сигналах управління. Крім того, практична реалізація амплітудного та фазового управління схемно складніша. Тому реальне застосування знаходить лише амплітудно-фазове управління, яке розглянуто далі.

Амплітудно-фазове управління реалізується за допомогою забезпечення зсуву фаз між U_Y та U_B , тобто в ланцюг обмотки збудження включається конденсатор C . Величина його ємності розраховується з умови отримання кругового поля під час пуску двигуна. Зміна управляючої напруги за допомогою потенціометра змінює також і кут φ . Це пояснюється тим, що $U_B^* = U_1^* - U_C^*$, $U_C^* = -j \cdot I_B^* \cdot x_C$ а струм збудження I_B^* змінюється у разі зміни \dot{U}_Y . Недолік всіх трьох методів управління КАД – мала економічність, тому що через наявність зворотного поля в статорі та роторі виникають значні електричні втрати.

2.2 Висновки до 2 розділу

Процес перетворення підведеної до двигуна електричної енергії на механічну енергію обертання ротора з навантаженням, відображається схемою перетворень. Схема перетворень дає якісну картину роботи двигуна. Кількісний аналіз роботи двигуна дозволяє знайти вираз для моменту, що розвивається двигуном. Змінюючи ступінь виконання умов кругового поля можна змінювати результуючий обертовий момент, що розвивається двигуном, а значить змінювати швидкість його обертання, тобто управляти двигуном.

Крім того, практична реалізація амплітудного та фазового управління схемно складніша. Тому реальне застосування знаходить лише амплітудно-фазове управління.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ

3.1 Попередній розрахунок вихрових струмів

Конструктивне виконання порожнистого ротора спричиняє істотний вплив на параметри та характеристики асинхронних машин. Виконання крізних поздовжніх пазів в суцільному феромагнітному роторі, в межах активної довжини машини, дозволяє зменшити вплив поперечної складової вихрових струмів, завдяки чому збільшується електромагнітний момент і коефіцієнт потужності машини. Той же ефект отримано при введенні крізних прямокутних вікон у порожнистий немагнітний ротор. Крім того, дослідження показують, що існує оптимальна кількість, розміри і геометрія пазів та вікон ротора, при яких досягається значне поліпшення обертового моменту. Таким чином, поряд із завданнями проектування АД з ППР, важливим завданням є перевірка можливості зменшення впливу поперечних струмів шляхом застосування раціональної схеми перфорацій порожнистого феромагнітного ротора. Рішення даної задачі пов'язано, перш за все, з визначенням картини розподілу вихрових струмів в ППР.

У роботі [13] на підставі рівнянь Максвелла запропоновано математичну модель АД з порожнистим ротором, що представляє собою систему диференціальних рівнянь в часткових похідних, доповнену граничними умовами, при цьому вплив поперечного крайового ефекту враховується за допомогою поправочного коефіцієнта.

На даний час у зв'язку з розвитком обчислювальної техніки та програмного забезпечення, вдосконалення теорії електричних машин зі складними вторинними елементами відбувається в напрямку розробок тривимірних моделей, що враховують вплив крайового ефекту, дна ротора і т.д. Завдяки високому рівню візуалізації результатів, одержуваних при

використанні сучасних програмних комплексів, рішенням рівнянь електромагнітного поля можуть слугувати не тільки графічні залежності, але і картини просторового розподілу щільності вихрових струмів у вигляді векторних полів і контурів.

При аналізі електромагнітних полів з застосуванням тривимірних скінченно-елементних моделей істотно зростають вимоги до точності рішення. Тому, на першому етапі досліджень виконувалося тривимірне моделювання розподілу вихрових струмів в суцільному феромагнітному роторі та подальше співставлення розрахункових картин щільності струмів в поперечному перерізі з відповідними картинами, отриманими іншими авторами при вирішенні двомірних польових завдань для машин із суцільним феромагнітним ротором.

На рис. 3.1 представлена картина миттєвого розподілу z -компоненти (осьової складової) щільності вихрових струмів в поперечному перерізі суцільного феромагнітного ротора при $s = 0,1$. У разі відображення щільності вихрових струмів у вигляді ліній струму, останні будуть збігатися з класичними «контурами» вихрових струмів.

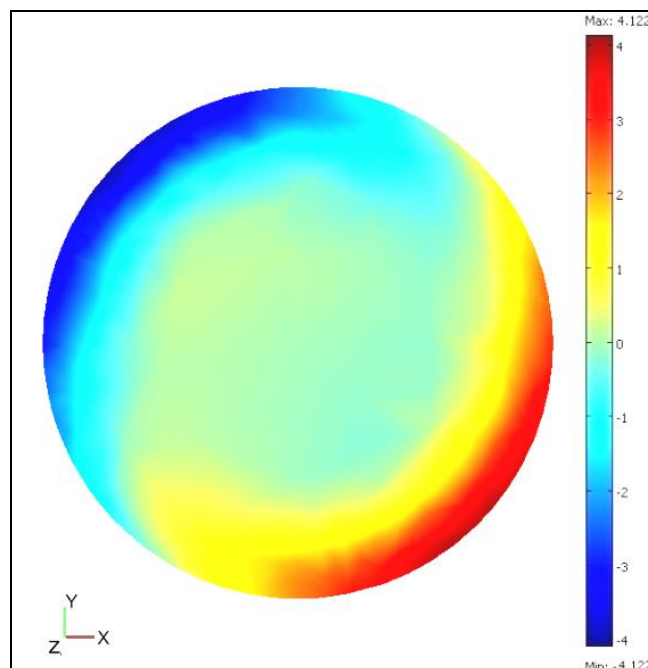


Рисунок 3.1 – Картина розподілу щільності вихрових струмів в поперечному перерізі суцільного феромагнітного ротора при $s = 0,1$

Просторова картина розподілу щільності вихрових струмів у вигляді поперечного зрізу (виконаного посередині довжини суцільного ротора) спільно з лініями струму представлена на рис. 3.2, а. На рис. 3.2, б окремо показані лінії струму, колір яких відповідає певному значенню повної щільності вихрових струмів.

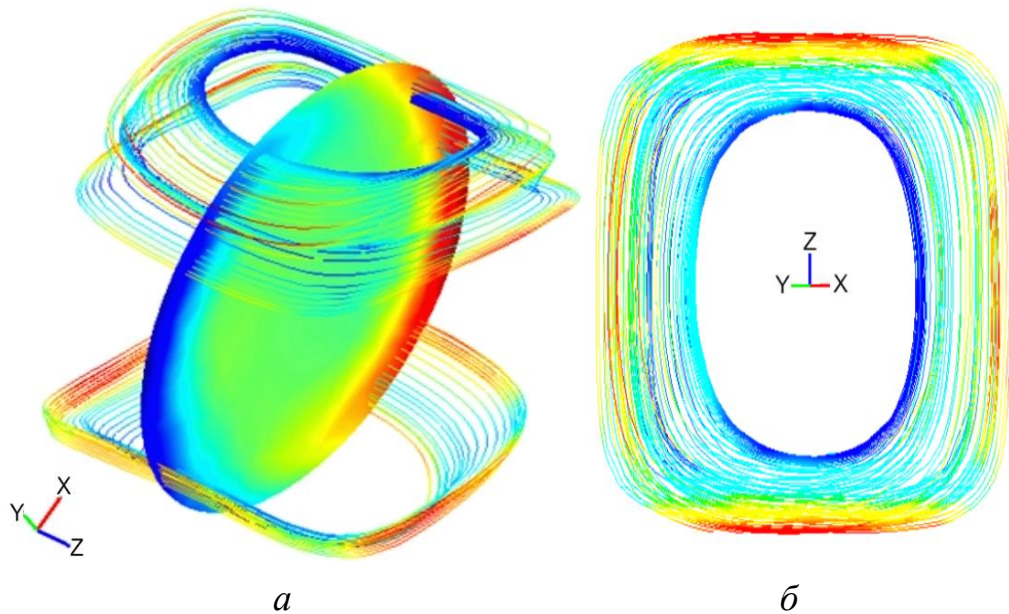


Рисунок 3.2 – Розподіл щільності вихрових струмів у вигляді зрізу в поперечному перерізі спільно з лініями струму (а) і фрагмент ліній струму (б)

В цілому отриманий характер розподілу щільності вихрових струмів в поперечному перерізі суцільного ротора якісно і кількісно відповідає результатам розрахунків двомірних моделей.

3.2 Дослідження розподілу вихрових струмів в порожнистому роторі

На рис. 3.3, 3.4 представлені картини миттєвого розподілу щільності вихрових струмів в поверхневому шарі відповідно порожнистого гладкого і перфорованого ротора при $s = 0,2$.

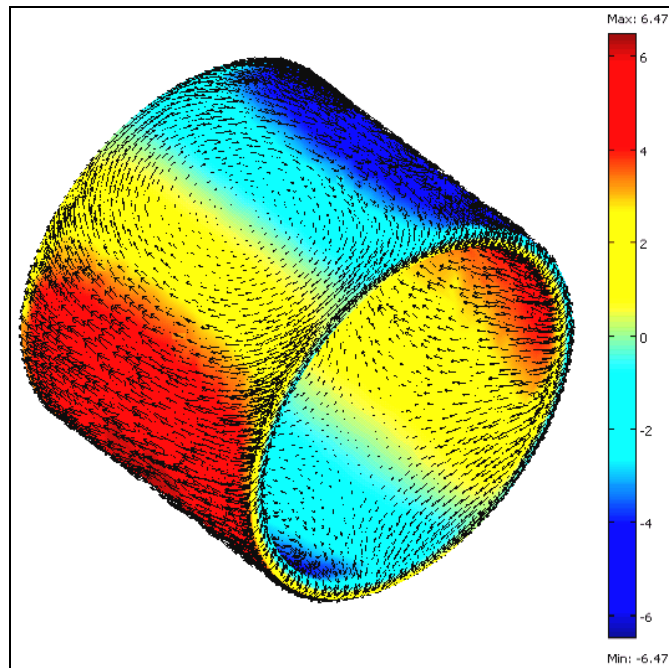


Рисунок 3.3 – Картина розподілу щільності вихрових струмів в порожнистому гладкому роторі

Розглянутий ППР має 20 прямих рядів по 5 отворів, діаметром 7 мм. Розмір векторів на рисунках пропорційний величині повної щільності струму, а її z-компонента визначається відповідно до відтінку кольорової заливки на поверхні ротора.

Відзначимо основні особливості розподілу вихрових струмів в перфорованому феромагнітному роторі. У даному режимі частота струму в роторі становить 10 Гц, при цьому в межах одного полюсного поділу максимум повної щільності вихрових струмів склав $10,05 \text{ А/мм}^2$, а мінімум $0,07 \text{ А/мм}^2$ на зовнішній і внутрішній поверхнях порожнистого ротора відповідно.

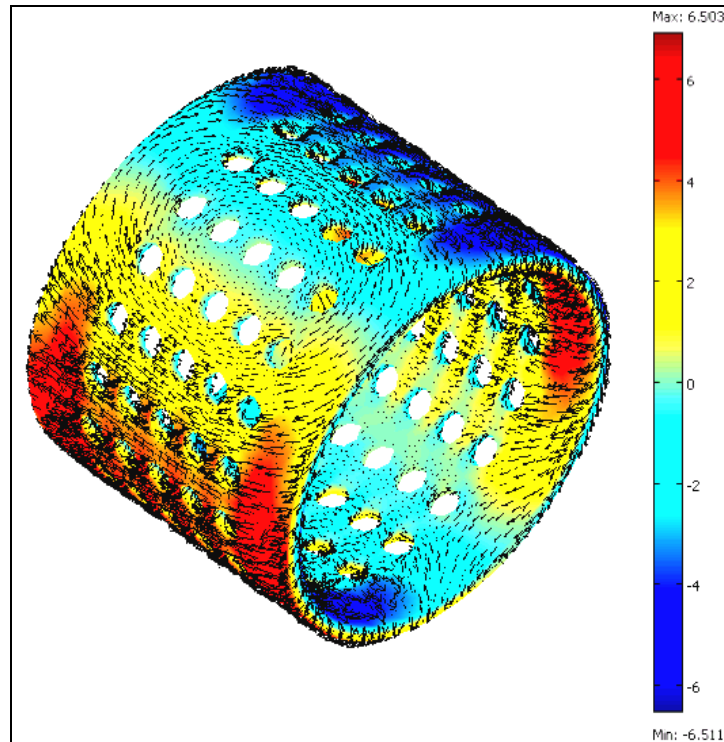


Рисунок 3.4 – Картина розподілу щільності вихрових струмів в ППР (П-20-5-7)

За винятком «крайових» зон ротора (рис. 3.5), де переважає поперечна складова вихрових струмів, а також ділянок «входу» магнітного потоку в ротор, вихрові струми мають переважно аксіальний напрямок.

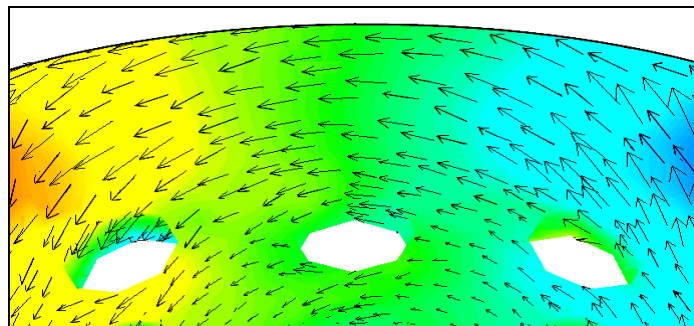


Рисунок 3.5 – Фрагмент картини розподілу щільності вихрових струмів в «крайової» зоні ППР (П-20-5-7)

Отримана картина струморозподілу поєднує в собі контури вихрових струмів у вигляді еліпсів, а також контури у вигляді прямокутників з

закругленими кутами. Такий розподіл є проміжним по відношенню до двох граничних випадків, при малій і великій частоті струму у порожнистому роторі. Дійсно, для розглянутого випадку, вираз, що визначає характер розподілу вихрових струмів в роторі має вигляд

$$\frac{\Delta}{\delta'} \mu_0 \gamma \omega \approx (\pi / \tau)^2, \quad (3.1)$$

де Δ – товщина ротора;

δ' – еквівалентний повітряний зазор;

τ – полюсний поділ.

Також спостерігаються контури, які через торці замикаються по внутрішній поверхні порожнього циліндра, і практично не мають поперечної складової вихрових струмів. Величина щільності вихрових струмів в середині активної довжини ротора, безпосередньо під «полюсами» наближається до нуля. Поперечний крайовий ефект проявляється слабо. Це обумовлено малою частотою вихрового струму, при якій його витіснення до «крайових» ділянок ротора незначне. Розрахунки, проведені для порожнистого гладкого і перфорованого роторів, показали, що з ростом ковзання картина струморозподілу змінюється, відбувається витіснення струму до країв циліндра. Розподіл повної щільності вихрових струмів по довжині гладкого і перфорованого роторів (вздовж аксіальної лінії, що проходить по середині полюса) для різних значень ковзання показано на рис. 3.6. Такий характер розподілу вихрових струмів по довжині ротора добре узгоджується з картинами розподілу струму, отриманими розрахунковим шляхом для порожнистого ротора в припущенні, що щільність вихрових струмів по товщині циліндра і радіальна складова напруженості магнітного поля не змінюються.

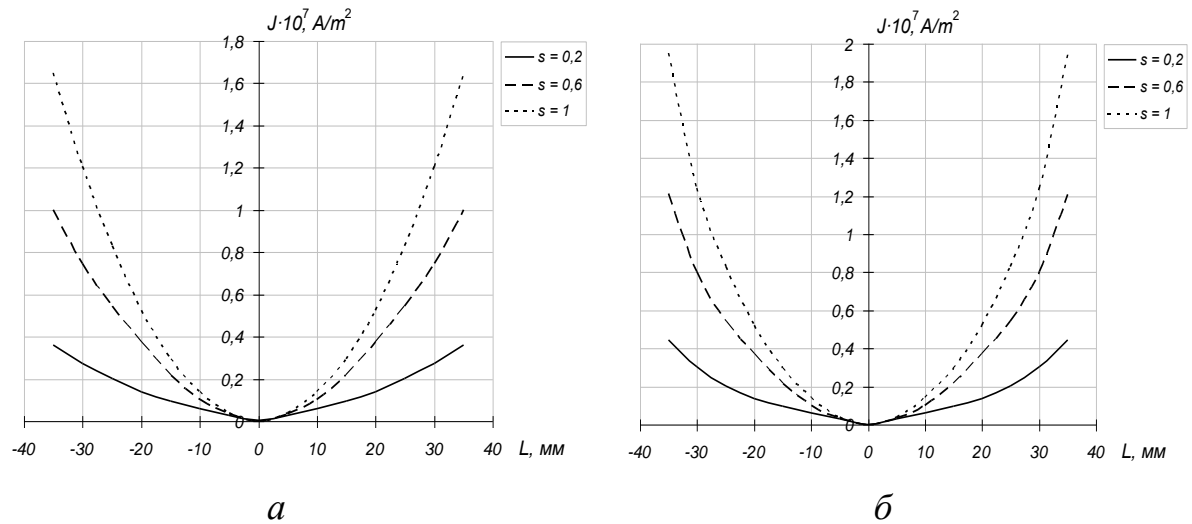


Рисунок 3.6 – Розподіл повної щільності вихрових струмів по довжині порожнистого гладкого (а) і перфорованого (б) ротора при $s = 0,2; 0,6; 1$.

На рис. 3.7 представлені картини розподілу z -компоненти щільності вихрових струмів в поперечному перерізі гладкого і перфорованого роторів, що проходить посередині активної довжини при $s = 0,2$. На рисунку видно, що складова вихрових струмів, перпендикулярна площині рисунка, протікає у двох протилежних напрямках, утворюючи тим самим контури протікання струму. При цьому спостерігаються ділянки ротора, де на його поверхні протікають струми одного напрямку, а на деякій глибині протікають затухаючі струми, спрямовані протилежно. Це ж підтверджується присутністю екстремумів на графіках розподілу повної щільності вихрових струмів за глибиною ротора (рис. 3.8), які побудовані уздовж радіальної лінії, що проходить через точку «max 1» відповідно для гладкого і перфорованого роторів. Точки «max 1» і «max 2», відзначені на рис. 3.7, – точки на зовнішній поверхні ротора в яких z -компонента щільності вихрових струмів досягає максимального значення.

Постпроцесорна функція Subdomain Integration вищезгаданого програмного комплексу дозволяє виконувати кількісну оцінку для окремих просторових складових по різним фізичним величинам. У таблиці 3.1 наведені співвідношення z -компоненти і повної щільності вихрових струмів, отримані для деяких конструктивних варіантів ППР.

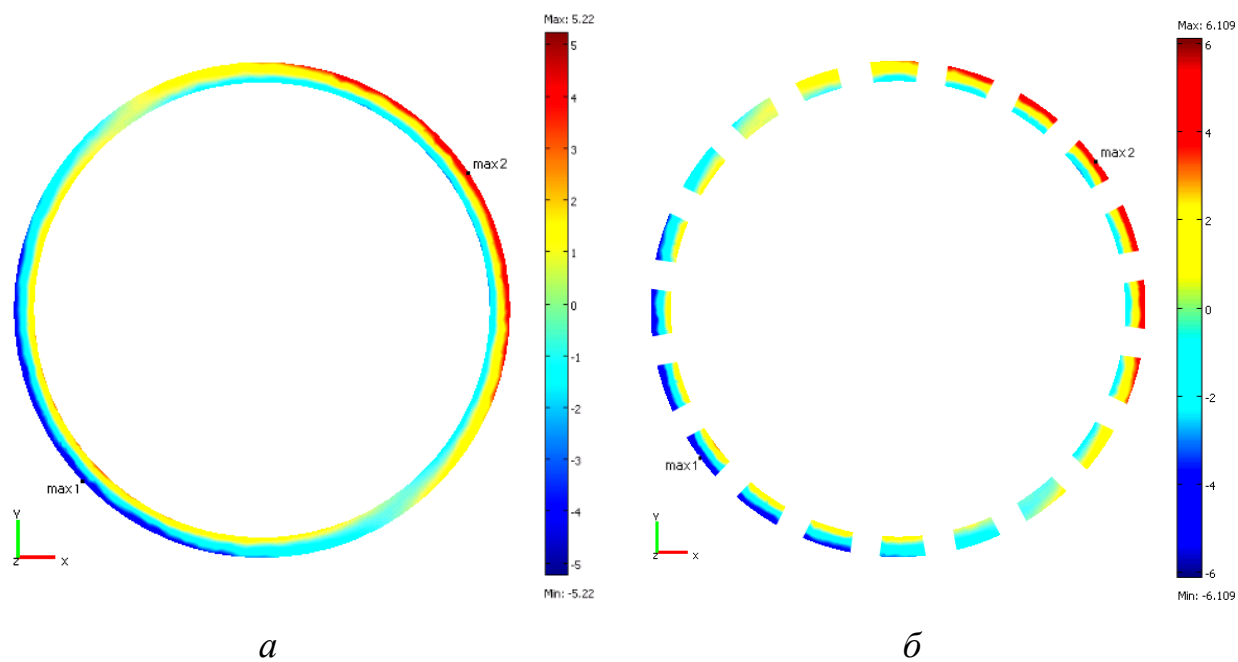


Рисунок 3.7 – Розподіл z-компоненти щільності вихрових струмів в поперечному перерізі порожнистого гладкого (а) і перфорованого (б) ротора при $s = 0,2$

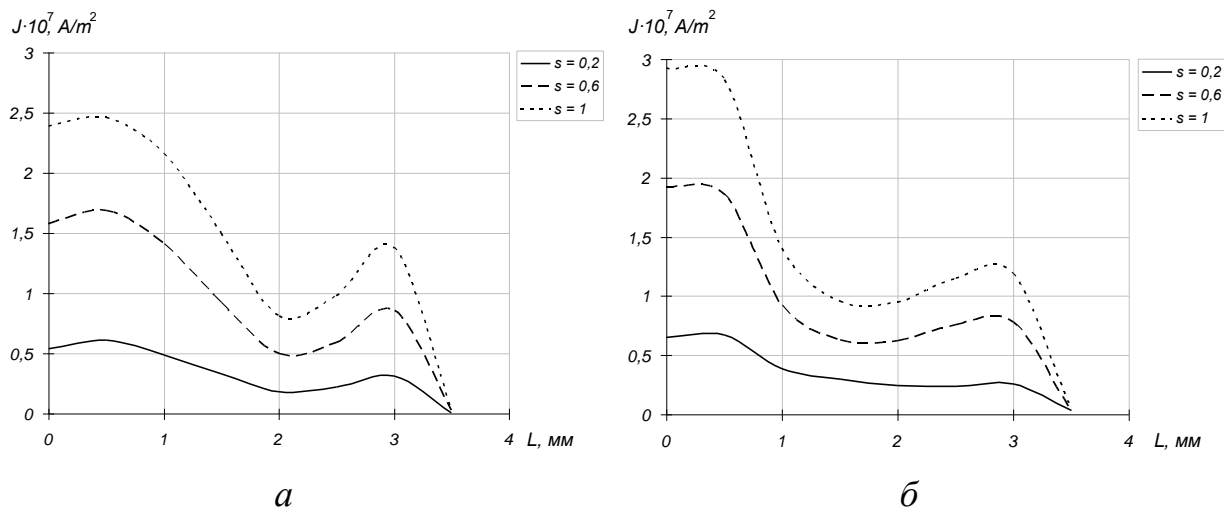


Рисунок 3.8 – Розподіл повної щільності вихрових струмів за глибиною порожнистого гладкого (а) і перфорованого (б) ротора при $s = 0,2; 0,6; 1$.

Таблиця 3.1 – Співвідношення J_z/J_Σ для деяких конструктивних варіантів ППР

Конструктивне виконання ротора	J_z/J_Σ
Гладкий	0,661
П-8-7-4	0,682
П-20-3-4	0,670
П-20-5-7	0,679
С-20-5-4	0,683
Ш-40-4-5	0,659

Розрахунки, що проведені при $s = 0,2$ показали, що розбіжність співвідношень J_z/J_Σ для різних схем перфорацій ротора знаходяться в межах розрахункової похибки, що не дає права стверджувати про безпосередній вплив типу схеми перфорації ротора на інтегральний перерозподіл просторових складових щільності струму i , відповідно, активний опір ротора.

3.3 Висновки до 3 розділу

Основою для чисельного розрахунку електромагнітного поля є рівняння в приватних похідних, зведене до системи алгебраїчних рівнянь, які вирішуються відносно векторного магнітного потенціалу A в вузлах кінцево-елементної сітки.

Отримано картини розподілу повної густини вихрових струмів по довжині гладкого і перфорованого роторів (вздовж аксіальної лінії, що проходить по середині полюса) для різних значень ковзання. Розрахунки, проведені для порожнистого гладкого і перфорованого роторів, показали, що з ростом ковзання картина струморозподілу змінюється, відбувається витіснення струму до країв циліндра.

У розглянутому режимі частота струму в роторі становить 10 Гц, при цьому в межах одного полюсного поділу максимум повної щільності вихрових струмів склав $10,05 \text{ А/мм}^2$, а мінімум $0,07 \text{ А/мм}^2$ на зовнішній і внутрішній поверхнях порожнистого ротора відповідно. За винятком «крайових» зон ротора, де переважає поперечна складова вихрових струмів, а також ділянок «входу» магнітного потоку в ротор, вихрові струми мають переважно аксіальний напрямок. Саме аксіальна складова або z-компонента густини вихрових струмів відповідає за величину створюваного електромагнітного моменту.

Кількісне порівняння величини електромагнітного моменту проведено з використанням системи відносних одиниць, у якій за базові прийнято значення номінального та пускового моментів, що відповідають двигуну з порожнистим ротором без отворів.

Встановлено, що існує зворотна залежність між моментом та коефіцієнтом перфорації $k_{\text{перф}}$. При цьому криві відносного номінального моменту з високою точністю апроксимуються відповідними залежностями $M_N^* = 1 - k_{\text{перф}}$.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ

Чисельний експеримент, що повністю або частково заміщує фізичний, може розглядатися, як основа при створенні систем автоматизованого проектування електромеханічних пристроїв. Побудова прийнятної математичної моделі, яка, з одного боку, досить повно відображає фізику, а з іншого – може бути вирішена на персональному комп'ютері, має здійснюватися шляхом поступового уточнення. Одним із способів такого уточнення є порівняння даних чисельного і фізичного експериментів, що особливо актуально, якщо мова йде про створення нового класу електромеханічних пристроїв.

Метою експериментальних досліджень АД з ППР є перевірка і порівняння отриманих даних з розрахунковими залежностями і характеристиками, які отримані при вирішенні тривимірної польової задачі в розділі 3. Тому, при експерименті логічно обмежитися дослідженням деяких залежностей і характеристик для окремих конструктивних модифікацій АД з ППР, вважаючи, що прийнятне узгодження розрахункових і експериментальних даних можливо тільки у випадку, якщо достатньою точністю володіє використовуваний метод математичного моделювання. Разом з тим, супутнім завданнями експериментальних досліджень є отримання експериментальних залежностей, що задаються в якості вихідних даних моделі, а так само оцінка впливу факторів, неврахованих при моделюванні.

Пунктами експериментальних досліджень АД з ППР є:

- дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі;
- дослідження розподілу напруженості електричного поля вихрових струмів ротора;
- дослідження механічних характеристик.

Фізична модель АД з ППР була виготовлена на базі статора серійного двигуна АОЛ-21-2.

4.1 Експериментальне дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі АД з ППР

Експеримент проводився на зразках АД з двома конструктивними виконаннями порожнистого феромагнітного ротора – гладким і перфорованим. Конструктивні параметри гладкого ротора: зовнішній діаметр – 85 мм, довжина – 75 мм; товщина стінки – 3,5 мм. Перфорований ротор має аналогічні лінійні розміри, число радіальних отворів – 24, діаметр отворів – 4 мм. Ряди отворів виконані рівномірно по довжині кола ротора (вісім аксіальних рядів по три отвори). Відстань між центрами отворів одного ряду – 19 мм. Загальний вид порожнистого перфорованого ротора представлений на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Загальний вид порожнистого перфорованого ротора

В якості бази був використаний статор серійного асинхронного двигуна, що має такі конструктивні параметри: зовнішній діаметр – 140 мм; внутрішній діаметр – 88 мм; довжина сердечника – 75 мм; повітряний зазор – 1,5 мм (збільшений з метою розміщення індуктивних датчиків); число зубців – 24.

Вимірювання магнітної індукції в повітряному зазорі АД виконувалося за допомогою вимірювальних витків і котушок. Розташування вимірювальних витків показано на рис. 4.2. Вимірювальні витки були закладені на поверхні статора і використовувалися для визначення середньозонних значень магнітної індукції в межах полюсного поділу статора, а також у межах умовного зубця ротора. На рис. 4.3 представлений загальний вид вимірювальної котушки, використовуваної для визначення локальних значень індукції в повітряному зазорі. Число витків вимірювальної котушки – 120, зовнішній діаметр – 14 мм, внутрішній – 8 мм. Вимірювальні витки і котушки виготовлені відповідно до рекомендацій [14, 15].

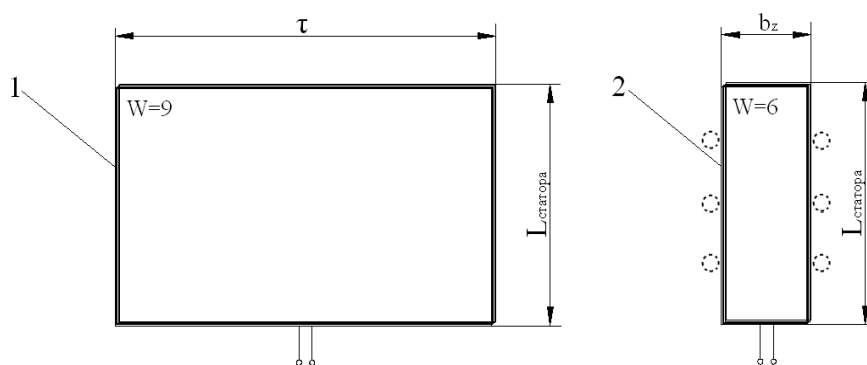


Рисунок 4.2 – Розташування вимірювальних витків



Рисунок 4.3 – Загальний вид вимірювальної котушки

Величина і форма вимірюваних ЕРС реєструвалися за допомогою цифрового осцилографа RIGOL DS5062M. На рис. 4.4 представлені результати вимірювання ЕРС, яка наведена у вимірювальних витках 1 в режимі холостого ходу, для зразка АД з гладким і перфорованим ротором.

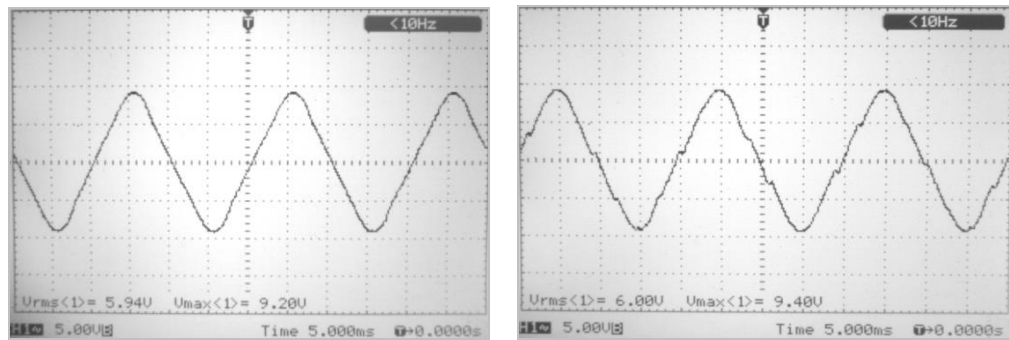


Рисунок 4.4 – Результати вимірювання ЕРС, яка наведена у вимірювальних витках 1 в режимі холостого ходу

Для кривої індукції зразка АД з перфорованим ротором характерні незначні провали, що обумовлені технологічними похибками при виконанні отворів в роторі, а також при виготовленні вимірювальних витків, оскільки сумарний магнітний потік що пронизує вимірювальні витки на полюсному поділі залишається постійним незалежно від кута повороту ротора. Середнє значення індукції на полюсному розподілі склало 0,454 Тл.

На рис. 4.5 представлені результати вимірювання ЕРС вимірювальних витків 2 для зразків АД з гладким і перфорованим ротором в режимі холостого ходу. Пікове значення індукції для АД з перфорованим ротором склало 0,783 Тл. Мінімальне значення індукції в зоні найбільшого провалу - 0,509 Тл.

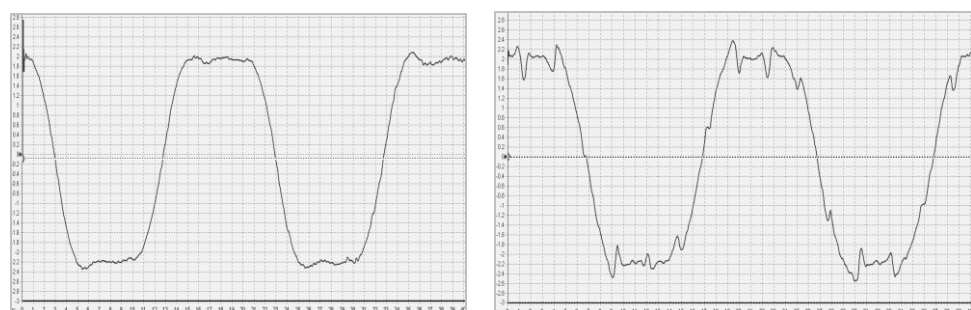


Рисунок 4.5 – Результати вимірювання ЕРС, яка наведена у вимірювальних витках 2 в режимі холостого ходу

З рисунка видно, що в кривій індукції для АД з перфорованим ротором (праворуч) присутні вісім провалів і чотири піки протягом одного періоду. Такий характер кривої пояснюється зниженням щільності силових ліній поля в межах площі отвору, і їх згущенням у зоні крайки отвору. Характер розподілу індукції в зазорі АД цілком відповідає даним, отриманим в ході чисельного розрахунку (рис. 4.6). Зона отвору на рисунку обмежена пунктирними лініями.

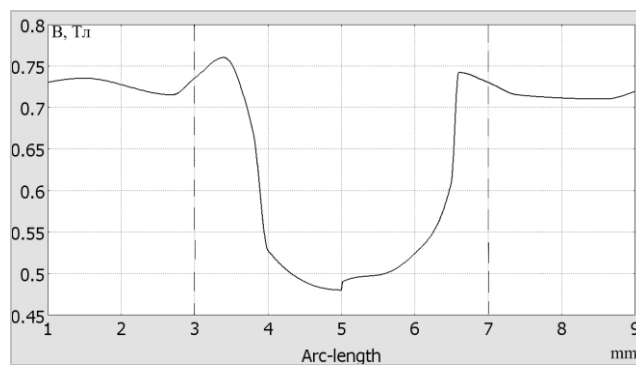


Рисунок 4.6 – Характер розподілу індукції в зазорі АД з ППР (розрахунок)

За результатами вимірювань локальних значень магнітної індукції в межах площі суцільних ділянок ротора найбільше амплітудне значення індукції склало 0,722 Тл.

4.2 Експериментальне дослідження розподілу напруженості електричного поля вихрових струмів ротора

Оцінка розподілу вихрових струмів і визначення напруженості електричного поля виконувалася на внутрішній поверхні перфорованого ротора із застосуванням потенційного зонда. Вимірювання виконані в квазіусталеному тепловому режимі при нерухомому роторі. Голчасті електроди розташовувалися впоперек осі ротора. Відстань між електродами потенційного зонда становить 10 мм.

На рис. 4.7 представлені деякі результати вимірювань напруженості електричного поля вихрових струмів. Перша крива (ліворуч) являє собою напруга між електродами для випадку розташування потенційного зонда в крайовій зоні ротора. Друга крива – напруга для випадку розташування потенційного зонда по середині довжини перфорованого ротора.

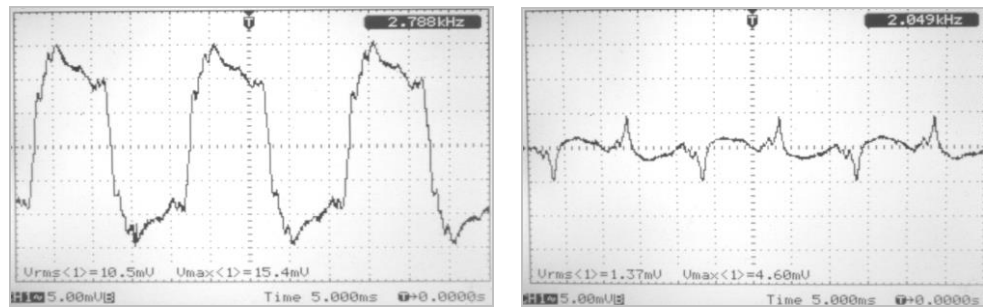


Рисунок 4.7 – Результати вимірювань напруженості електричного поля вихрових струмів

На рис. 4.8 представлена крива розподілу щільності струму вздовж довжини перфорованого ротора, побудована за результатами вимірювань напруженості електричного поля. Значення щільності струму відкладені у відносних одиницях. За одиницю прийняті значення щільності струму по краях перфорованого ротора.

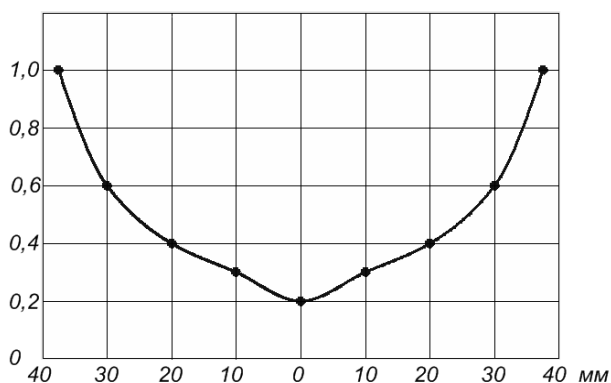


Рисунок 4.8 – Розподіл щільності струму вздовж довжини перфорованого ротора

На рис. 4.9 представлена крива розподілу щільності струму вздовж довжини перфорованого ротора в режимі короткого замикання отримана при вирішенні тривимірної польової задачі чисельним методом. Характер розрахованої кривої добре узгоджується з даними фізичного експерименту. Піки в кривій на рис. 4.9 – це розрахункова похибка, обумовлена грубою сіткою кінцевих елементів. Провали по краях кривої пов'язані з наявністю в моделі феромагнітного дна з боку торців ротора, яке відіграє роль шунта. Зважаючи на малий повітряний зазор, вимірювання напруженості електричного поля виконувалося на внутрішній поверхні ротора, з попередньо знятими феромагнітними кришками.

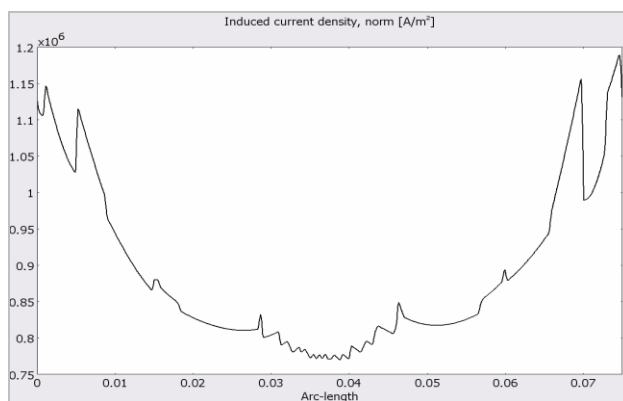


Рисунок 4.9 – Розподіл щільності струму вздовж довжини перфорованого ротора (розрахунок)

На рис. 4.10 представлені результати фізичного експерименту та чисельного моделювання напруженості електричного поля вихрових струмів вздовж внутрішньої окружності ротора в режимі короткого замикання. Амплітудне значення напруженості електричного поля для першої кривої (ліворуч) складає 0,154 В/м, тривалість періоду – 0,02 с. Друга крива – миттєва напруженість електричного поля вздовж внутрішньої окружності перфорованого ротора при частоті вихрового струму 50 Гц. Амплітудне значення розрахункової кривої складає 0,18 В/м. Розбіжність амплітудних значень фізичного та

чисельного експериментів обумовлена ідеалізацією геометричних параметрів та фізичних процесів в чисельній моделі. На рис. 4.11 представлений результат розрахунку щільності вихрового струму вздовж внутрішньої окружності перфорованого ротора в режимі короткого замикання. З рисунку видно, що форма кривої добре відтворює результат фізичного експерименту.

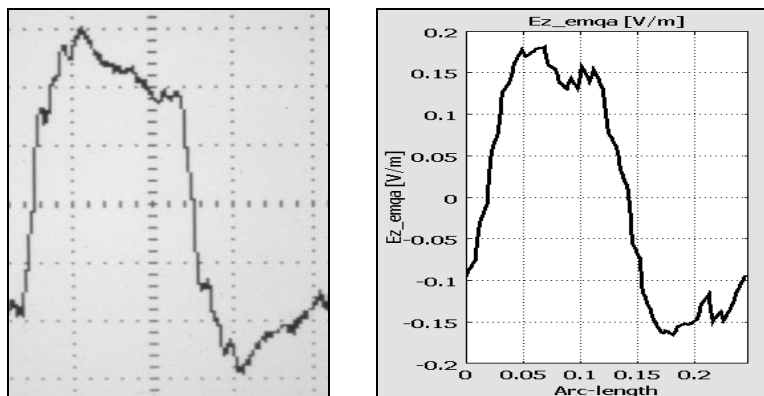


Рисунок 4.10 – Фізичний експеримент та чисельний розрахунок напруженості електричного поля вздовж внутрішньої окружності ротора

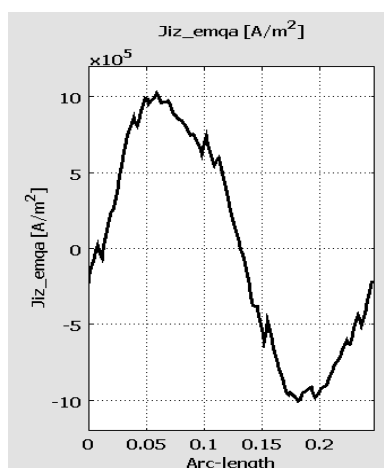


Рисунок 4.11 – Щільності вихрового струму вздовж внутрішньої окружності перфорованого ротора в режимі короткого замикання (розрахунок)

4.3 Експериментальне дослідження електромагнітного моменту АД з ППР

Експериментальний стенд і необхідне обладнання для проведення фізичного дослідження електромагнітного моменту АД з ППР показані на рис. 4.12. До складу експериментального стенду входять:

- джерела живлення (однофазний 220 В і трифазний 380 В);
- автотрансформатор однофазний;
- діодний мост КВУ6М;
- АД з ППР на базі статора двигуна АОЛ-21-2 (об'єкт дослідження);
- генератор постійного струму МУН 1;
- мультиметри ММ1202 і DT 9207А (вимірювання електричних величин);
- стрілочні прилади електромагнітної системи класу точності 0,5 (вимір електричних величин);
- цифровий тахометр АТТ – 6006 (дистанційне вимірювання частоти обертання ротора);
- цифровий інфрачервоний термометр IR608 А (дистанційне вимірювання температури поверхні ротора).

Для вимірювання електромагнітного моменту АД використовувалася експериментальна методика, запропонована в [16]. Згідно з цією методикою електромагнітний момент обчислювався за формулою:

$$M_{\text{э}} = (E_{0Г} / n_{0Г}) I_{Г} + M_0, \quad (4.1)$$

де $I_{Г}$ – струм якоря генератора;

$E_{0Г}$ – ЕРС генератора, що визначається по характеристиці холостого ходу $E_{0Г} = E_{0Г}(i_{0Г})$, знятої при постійній швидкості $n_{0Г}$;

M_0 – момент холостого ходу агрегату АД-генератор, який визначається за кривими $M_0 = M_0(n, i_{ВГ})$, знятим при роботі генератора в режимі двигуна при відключеній обмотці статора АД.

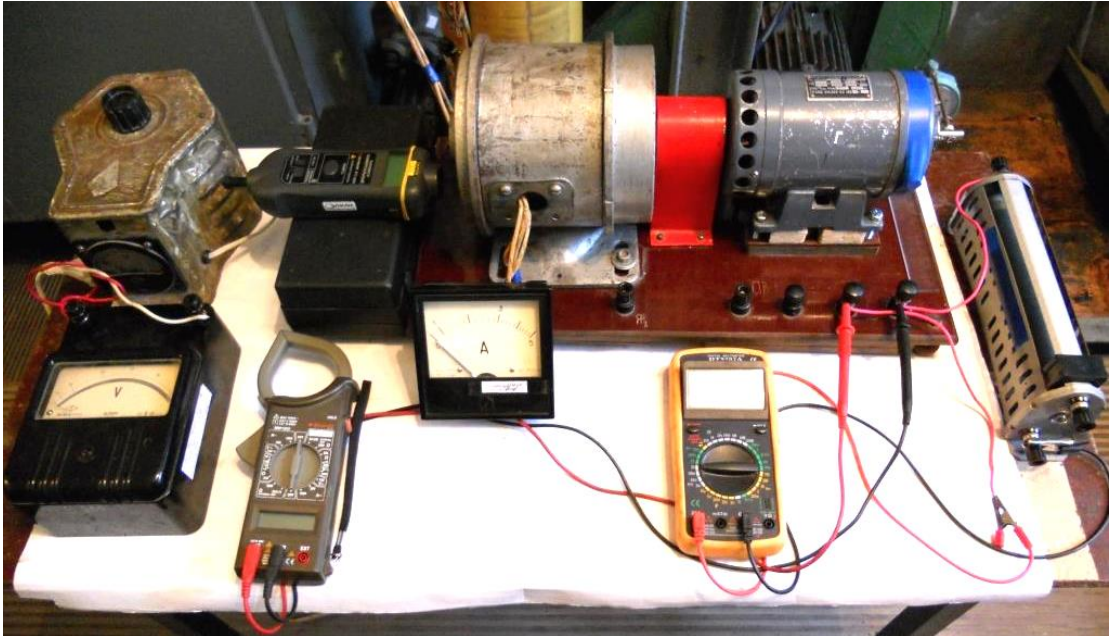


Рисунок 4.12 – Дослідження електромагнітного моменту АД з ППР

Зміна моменту навантаження здійснювалося шляхом зміни струму збудження генератора постійного струму. В процесі експерименту навантажувати досліджуваний АД за допомогою генератора постійного струму до ковзань близьких до 1 (режим КЗ) практично не вдавалося. Тому значення пускового моменту визначалося за допомогою динамометра, а ділянку механічної характеристики, відповідний ковзань 0,8...1 будувався шляхом продовження експериментально отриманої кривої.

Експериментальні механічні характеристики АД були отримані з використанням різних конструктивних виконань ППР, представлених на рис. 4.13.

Задача чисельного розрахунку електромагнітного поля та електромагнітного моменту АД з ППР вирішувалася з використанням вихідних даних, отриманих експериментально. Очевидно, що побічні чинники супроводжують експеримент (похибки вимірювальних приладів, неможливість практично ідеально витримати умови експерименту і т.д.) можуть надати істотне вплив не тільки на точність експериментальних даних, а й на точність даних отриманих в ході звичайно-елементних розрахунків, що в свою чергу призведе до втрати достовірності проведеного порівняння характеристик АД з різними конструктивними варіантами ППР. У зв'язку з цим при підготовці і проведенні експерименту, велика увага приділялася максимально можливого зниження впливу побічних факторів.

Найбільш небезпечними джерелами похибок при експериментальному дослідженні асинхронних машин є відхилення величини напруги живлення, а також несиметрія напруги живлення. Експеримент показав, що обидва чинники мають стохастичний характер і обумовлені, в основному, увімкненням великих однофазних навантажень на інших об'єктах університету. У денний час доби відхилення напруги лабораторної електромережі напругою 380 В досягало 3 %, а струми фаз АД відрізнялися на 5-10 %. Тому, для проведення експериментів було вибрано вечірній час з 18 до 20 годин, коли рівень відхилення напруги живлення, а також розбіжність значень струмів фаз не перевищували 1 %.

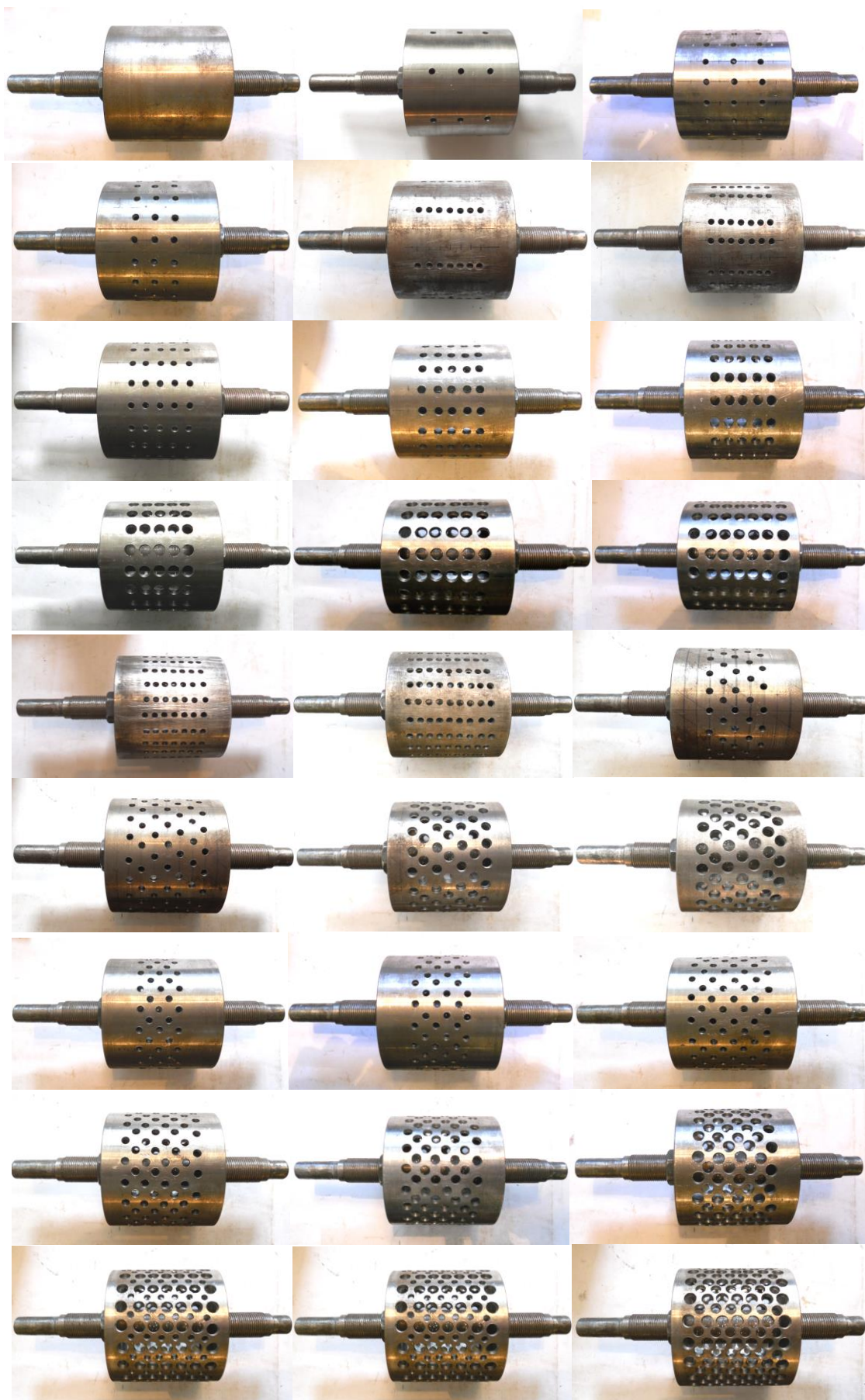


Рисунок 4.13 – Конструктивні виконання ППР

Істотний вплив на механічну характеристику АД з ППР надають ефекти, пов'язані з нагріванням масивного ротора. Дійсно, за умови рівномірності нагріву всього ротора ковзання машини, що відповідає заданим значенням напруги, частоти та електромагнітного моменту, пропорційно питомому опору матеріалу ротора, яке, як відомо, змінюється з температурою у відповідності з виразом:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0)), \quad (4.2)$$

де ρ_0 – значення питомого опору при температурі T_0 ;

$\alpha = 0,005$ – температурний коефіцієнт опору сталі;

T – температура ротора.

Згідно з цим виразом, підвищення температури ротора на кожні $10\text{ }^\circ\text{C}$ призводить до збільшення ковзання на 5% . Експеримент, проведений з гладким ротором, показав, що підвищення його температури на $25\text{ }^\circ\text{C}$ призводить до зниження величини електромагнітного моменту на $8\text{...}10\%$ практично при всіх значеннях ковзання (рис. 4.14). Тому, зниження електромагнітного моменту внаслідок нагрівання ротора необхідно враховувати при проектуванні АД з ППР.

При проведенні експерименту вплив нагрівання ротора на механічну характеристику АД з ППР можна врахувати шляхом перерахунку вимірних значень ковзань відповідно до вимірних значень температури ротора. Однак цей спосіб недостатньо точний через нерівномірність нагрівання ротора. До того ж, практично можливим є визначення тільки температури поверхні ротора. Єдино надійною є така методика експерименту, при якій нагрів ротора практично відсутній, тобто температура ротора при знятті кожної експериментальної точки мало відрізняється від температури навколишнього середовища.

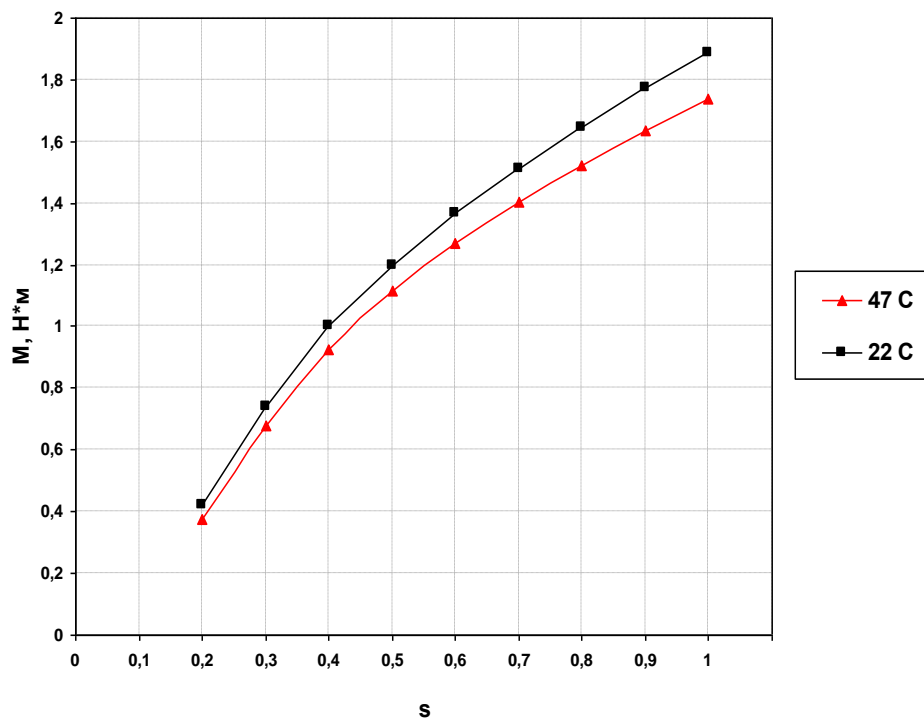


Рисунок 4.14 – Вплив нагріву ротора на механічну характеристику АД з ППР

Необхідні умови експерименту забезпечувалися шляхом інтенсивного примусового охолодження активної частини АД з ППР і мінімізації часу, необхідного для встановлення необхідного режиму та зняття показань всіх вимірювальних приладів. Час зняття однієї точки становило 5-6 секунд. При цьому, після зняття всієї характеристики (7-8 точок) температура поверхні ротора підвищувалася не більше, ніж на 5-7 °С (цьому відповідає максимальна помилка у визначенні ковзання 3,5 %). Після зняття кожної характеристики АД охолоджувався практично до температури навколишнього середовища.

У таблиці 4.1 представлені експериментальні дані про частку номінального і пускового моменту АД при всіх розглянутих конструктивних варіантах ППР по відношенню до номінального і пускового моменту двигуна з порожнистим гладким ротором.

Таблиця 4.1 – Експериментальні дані про частку номінального і пускового моменту АД при всіх розглянутих конструктивних варіантах ППР

Конструктивне виконання ППР	$M_{П}^*$	$M_{Н}^*$	$1 - k_{перф}$
Без отворів	1	1	1
П 4-7-4	0,9456	0,9780	0,9824
П 8-7-4	0,9210	0,9451	0,9648
П 16-7-4	0,8952	0,9316	0,9297
П 20-7-4	0,8767	0,9286	0,9121
П 24-7-4	0,8487	0,9112	0,8945
П 20-3-4	0,9497	1	0,9623
П 20-4-7	0,7919	0,8528	0,8462
П 20-5-7	0,7502	0,7981	0,8078
П 20-6-7	0,7155	0,7674	0,7694
П 20-7-7	0,6837	0,7384	0,7309
П 24-9-4	0,7574	0,8546	0,8644
П 20-5-4	0,9050	0,9355	0,9372
П 20-5-5	0,8424	0,8818	0,9019
П 20-5-6	0,8061	0,8413	0,8588
П 20-5-7	0,7340	0,7981	0,8078
П 20-5-8	0,6592	0,7312	0,7490
С 20-3-4	0,9106	0,9866	0,9623
С 20-5-4	0,8826	0,9525	0,9372
С 20-7-4	0,8547	0,9308	0,9121
С 20-7-5	0,8268	0,8911	0,8627
С 20-7-6	0,7932	0,8538	0,8023
С 20-7-7	0,7374	0,7910	0,7309
Ш 40-(3-2)-4	0,9776	0,9742	0,9372
Ш 40-(3-3)-4	0,8938	0,9505	0,9247
Ш 40-(4-3)-4	0,8867	0,9327	0,9121
Ш 40-(4-4)-4	0,8737	0,9238	0,8996
Ш 40-(4-4)-5	0,8379	0,8931	0,8431
Ш 40-(4-4)-6	0,7541	0,8012	0,7741
Ш 40-(4-4)-7	0,6648	0,7093	0,6925
Ш 40-(6-7)-(4-7)	0,6396	0,6671	0,6556
Ш 40-(6-7)-(6-7)	0,5268	0,5569	0,5615

Зіставлення результатів експерименту з розрахунковими характеристиками показує, що розбіжності у всьому досліджуваному діапазоні зміни ковзань не перевищують 4-8 %, залежно від ступеня перфорації ППР. Така розбіжність викликана, мабуть, похибкою завдання вихідних даних, тобто відхиленням реальних магнітних і електричних властивостей матеріалів від прийнятих в основу розрахунку. Анізотропія реальних матеріалів конструкції АД також може призводити до похибки. Одночасно, точність методу кінцевих елементів залежить від правильного вибору типу і розміру кінцевих елементів. Похибка постановки задачі виникає при невідповідності обраного типу елемента фізичній поведінці матеріалу в конструкції. Похибка дискретизації виникає при заміні реальної конструкції обмеженим числом кінцевих елементів.

4.4 Пожежна безпека на підприємстві

Пожежна безпека – стан об'єкту, при якому з встановленою вірогідністю виключається можливість виникнення і розвиток пожежі; дія на людей небезпечних факторів пожежі; забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується:

- системою попередження та відверненням пожежі;
- системою протипожежного захисту;
- організаційно-технічними заходами.

Сучасне виробництво у своїй більшості є пожежонебезпечним. На багатьох застосовуються технології з наявністю високих температур, тиску, парів легкозаймистих рідин, горючих газів, пилу тощо.

У разі несправності електромеханічного агрегату, загрозової безпеки експлуатуючого персоналу, пожежобезпеки, негайно відключити аварійну ділянку. Повідомити керівникові. Отримавши розпорядження керівника робіт, приступити до усунення несправностей устаткування.

При виявленні пожежі або загоряння працівник зобов'язаний:

- негайно повідомити про це в міську пожежну службу по телефону 101, вказавши адресу об'єкту і що горить, і керівникові об'єкту;
- прийняти заходи по забезпеченню безпеки і евакуації людей;
- приступити до гасіння пожежі за допомогою первинних засобів пожежогасінні, що є на об'єкті;
- після прибуття підрозділів пожежної служби повідомити їм необхідні відомості про вогнище пожежі і заходи, прийняті по його ліквідації;
- на період гасіння пожежі працівник повинен забезпечити охорону з метою виключення розкрадання матеріальних цінностей.

Надати необхідну першу долікарську допомогу постраждалому на виробництві, звільнивши його від дії травмуючого чинника (електроструму, механізмів, температури тощо).

У місці безпосереднього розташування агрегату встановити:

- пожежний щит;
- ящик з піском місткістю 0,5 м³;
- бочки для зберігання води місткістю не менше 0,2 м³;
- вогнегасники ВВ-5, не менше 2 шт.

Протипожежна профілактика будівель та споруд складається з протипожежних розривів та протипожежних перешкод.

Евакуація людей при виникненні пожежі. Показником ефективності процесу евакуації є період часу, протягом якого люди можуть при необхідності залишити окремі приміщення і будівлю загалом.

Безпека евакуації досягається за умови, коли тривалість евакуації людей з окремих приміщень і будівель в цілому менша критичної тривалості пожежі, яка становить небезпеку для людини.

Критична тривалість пожежі – час досягнення небезпечних для людини температур і зменшення вмісту кисню у повітрі.

4.5 Висновки до 4 розділу

В розділі експериментальних досліджень АД з ППР виконано перевірку та порівняння даних з розрахунковими залежностями і характеристиками, які були отримані при вирішенні тривимірної польової задачі.

За результатами експериментальних досліджень АД з ППР проведено:

- дослідження розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі;
- дослідження розподілу напруженості електричного поля вихрових струмів ротора;
- дослідження механічних характеристик.

Зіставлення результатів експерименту з розрахунковими характеристиками показує, що розбіжності у всьому досліджуваному діапазоні зміни ковзань не перевищують 4-8 %, залежно від ступеня перфорації ППР.

ВИСНОВКИ

Першочерговим завданням теоретичного дослідження КАД є подальше вдосконалення методики розрахунку електромагнітних процесів з урахуванням поперечного крайового ефекту. Найбільш повне уявлення про характер протікання електромагнітних процесів в КАД з струмопровідним шаром ротора в даний час дають чисельні методи розрахунку поля, зокрема МКЕ. Головною проблемою є аналіз отриманих результатів з точки зору знаходження раціонального варіанту сукупності геометричних та інших параметрів моделі без істотних витрат часу для генерації великого числа можливих варіантів машини.

За результатами виконання кваліфікаційної роботи вирішено наступні завдання:

- виконано огляд конструкцій асинхронних двигунів з порожнистим ротором, що працюють в пристроях автоматики та управління;
- розглянуто стан питання моделювання електромагнітних процесів в асинхронних двигунах з порожнистим ротором;
- проведено дослідження розподілу вихрових струмів та електромагнітного моменту асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- розглянуто заходи з пожежної безпеки на підприємстві.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Gieras J. F. Design of high-speed permanent magnet machines //Przegląd Elektrotechniczny. – 2019. – Т. 95.
2. M. Szczygiei, K. Kluszczycski, "Rotary-linear induction motor based on the standard 3-phase squirrel cage induction motor – constructional and technological features," Czasopismo Techniczne. Elektrotechnika, 2016, pp. 395-406.
3. A. Marfoli, L. Papini, P. Bolognesi, D. Genovese and C. Gerada, "Analysis of induction machine: Comparison of modelling techniques," 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017, pp. 1-7.
4. V. Biagini, C. Simonidis, A. Delpozzo and P. Bolognesi, "Development and prototyping of a rotary-linear actuation drive for vacuum contactors," IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016, pp. 530-535.
5. Zablodskiy N., Pliugin V., Gritsyuk V. Submersible electromechanical transformers for energy efficient technologies of oil extraction // Progressive technologies of coal, coaled methane, and ores mining. – 2014. – С. 223-227.
6. Zablodskiy Mykola, Volodymyr Kozyrskiy, and Volodymyr Gritsyuk. "Parameters of induction machines with a common external massive rotor." 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). IEEE, 2017.
7. Анненков А. Н., Сизиков С. В., Шиянов А. И. Асинхронный двигатель с перфорированным полым ротором // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61. – № 2.
8. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. [Чинний від 2015–06–22]. Вид. офіц. Київ, 2017. 29 с. (Інформація та документація).
9. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: /

упоряд. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2018. 320 с.

10. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків : ХНУРЕ, 2021. 50 с.

11. Грицюк В., Цуркіна О., Малишев М. Визначення впливу нагріву ротора на механічну характеристику асинхронного двигуна з порожнистим ротором // VI Міжнародна конференція Виробництво & Мехатронні системи (M&MS), Харків, Україна, – 2022, С. 34-35.

12. Gritsyuk V. et al. Numerical Analysis of Thermal Processes in an Electromechanical Pump-Heat Generator // 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2022. – С. 324-328.

13. Грицюк В.Ю., Невлюдов І.Ш., Заблодський М.М., Субраманиан П. Оцінка вихрових струмів і втрат потужності у роторі шнекового електротепломеханічного перетворювача для адитивного виробництва // Журнал "Техніка та енергетика", Київ, Т. 13, № 2, 2022. – С. 41-49.

14. Zablodskiy M. et al. The Surface Characteristics Features of The Electromagnetic Field of the Rotor of a Polyfunctional Electromechanical Converter // 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME). – IEEE, 2021. – С. 1-5.

15. Zablodskiy M., Gritsyuk V., Tymofieieva O. The Active Wave Resistance Determination of Hollow Perforated Rotor of Electromechanical Converter // 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). – IEEE, 2020. – С. 02SAMA03-1-02SAMA03-4.

16. Gritsyuk V., Nevliudov I., Zablodskiy M., Demska N. Numerical Calculation of the Electromagnetic Torque of an Induction Motor with a Hollow Rotor // XVII-th International Conference Perspective technologies and methods in MEMS design, Polyana, Ukraine, 12-16 May 2021, pp. 124-129.

17. Грицюк В., Тимофєєва О., Редюхін М., Пільгуй К. Чисельний розрахунок характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання // V Міжнародна конференція Виробництво & Мехатронні системи (M&MS), Харків, Україна, – 2021, С. 39-41.

18. Тимофєєва О.О. Огляд можливих ризиків та небезпек при експлуатації електромеханічних перетворювачів технологічного призначення // Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. – 2018. – №1. – С. 116-120.

19. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни “Основи охорони праці та цивільний захист підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету” [Текст] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стиценко, В.А Айвазов, О. В. Мамонтов, Н.М. Сердюк. – Харків, 2017. – 517 с.