

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)

Розроблення моделі характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором  
для систем автономного теплопостачання  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи АУТПМ-20-1

Редюхін М. 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 Автоматизоване управління технологічними процесами  
(повна назва освітньої програми)

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

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАМ

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

2021р.

## 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 \_\_\_\_\_ Автоматизоване управління технологічними процесами \_\_\_\_\_  
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ \_\_\_\_\_

(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Редюхіну Микиті Миколайовичу \_\_\_\_\_  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи \_\_\_\_\_ Розроблення моделі характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання \_\_\_\_\_  
 Затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ 08.11.2021 №1699 Ст \_\_\_\_\_
- Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 06.12.2021 р.
- Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_ Потужність 400 Вт, синхронна частота обертання 3000 об/хв., номінальна напруга живлення 380 В.

- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_ Аналіз технічного завдання; Вступ; Визначення актуальності питання генерації теплової енергії; Огляд конструкцій електро-механічних перетворювачів, що працюють в системах нагріву рідин; Побудова математичної моделі та розробка підходу до чисельного моделювання механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором; Дослідження статичних та динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором; Питання з пожежної безпеки на підприємстві, де експлуатується асинхронний двигун з порожнистим ротором; 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	21.05.21	виконав
2	Визначення актуальності питання генерації теплової енергії	10.09.21	виконав
3	Огляд конструкцій електромеханічних перетворювачів, що працюють в системах нагріву рідин	24.09.21	виконав
4	Побудова математичної моделі та розробка підходу до чисельного моделювання механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором	15.10.21	виконав
5	Дослідження статичних та динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором, висновки	12.11.21	виконав
6	Оформлення пояснювальної записки	19.11.21	виконав
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	29.11.21	виконав
8	Подання роботи на рецензію	01.12.21	виконав
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	03.12.21	виконав
10	Подання роботи до ЕК	06.12.21	виконав

Дата видачі завдання 08.11.2021 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Редюхін М.М.

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 90 с., 1 табл., 33 рис., 3 дод., 54 джерела.

### АВТОНОМНЕ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ, ПОРОЖНИСТИЙ РОТОР, МЕХАНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

Об'єкт дослідження – електромеханічні процеси асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання.

Предмет дослідження – статичні та динамічні механічні характеристики асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання за результатами дослідження механічних характеристик.

Методи дослідження – визначення електромагнітного моменту за результатами рішення польових задач методом тензора магнітного натягу, кінцево-елементний метод розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних у тривимірній постановці.

Для досягнення мети було вирішено наступні завдання:

- визначено актуальність питання генерації теплової енергії;
- виконано огляд конструкцій електромеханічних перетворювачів, що працюють в системах нагріву рідин;
- розглянуто математичну модель та розроблено підхід до чисельного моделювання механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- виконано дослідження статичних та динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- розглянуто питання з пожежної безпеки на підприємстві, де експлуатується асинхронний двигун з порожнистим ротором.

Результати роботи були апробовані на міжнародній конференції.

## ABSTRACT

Explanatory note: 90 pp., 1 tabl., 33 figs., 3 app., 54 sources.

### AUTONOMOUS HEAT SUPPLY, HOLLOW ROTOR, MECHANICAL CHARACTERISTICS, MATHEMATICAL MODEL.

The research object is electromechanical processes of an asynchronous motor with a hollow rotor for autonomous heat supply systems.

The research subject is the static and dynamic mechanical characteristics of an induction motor with a hollow rotor for autonomous heat supply systems.

The qualification work purpose is the development of an asynchronous motor with a hollow rotor for autonomous heat supply systems based on the results of a mechanical characteristics study.

Research methods - determination of the electromagnetic moment based on the results of solving field problems by the magnetic tension tensor method, a finite element method for solving nonlinear differential equations in partial derivatives in a three-dimensional formulation.

To achieve the goal, the following tasks were solved:

- the relevance of the heat energy generation issue has been determined;
- a review of electromechanical converters designs operating in liquid heating systems has been carried out;
- considered the mathematical model and developed an approach to numerical modeling of the mechanical characteristics of an induction motor with a hollow rotor;
- a study of the static and dynamic mechanical characteristics of an asynchronous motor with a hollow rotor has been carried out;
- considered the issues of fire safety at an enterprise where an asynchronous motor with a hollow rotor is operated.

The qualification work results were tested at an international conference.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Огляд існуючих конструкцій електромеханічних перетворювачів, що працюють в системах нагріву рідин.....	11
1.1 Актуальність питання генерації теплової енергії .....	11
1.2 Огляд конструкцій електромеханічних перетворювачів, що працюють в системах нагріву рідин.....	18
1.3 Постановка задач досліджень.....	24
1.4 Висновки до 1 розділу .....	25
2 Загальна характеристика асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання.....	26
2.1 Загальна характеристика асинхронного двигуна з порожнистим ротором....	26
2.2 Висновки до 2 розділу .....	31
3 Моделювання механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором .....	33
3.1 Математична модель механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором .....	33
3.2 Розробка підходу до чисельного моделювання механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором .....	37
3.3 Результати дослідження статичних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором .....	44
3.4 Висновки до 3 розділу .....	51

4 Розробка моделі динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором.....	53
4.1 Математична модель динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором .....	53
4.2 Результати дослідження динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором .....	57
4.3 Пожежна безпека на підприємстві, де експлуатується асинхронний двигун з порожнистим ротором .....	60
4.4 Висновки до 4 розділу .....	61
Висновки .....	62
Перелік джерел посилання .....	63
Додаток А Програма чисельного розрахунку характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором.....	69
Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	85
Додаток В Відомість кваліфікаційної роботи магістра.....	90

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун;

ВС – вихровий струм;

ГТ – гідродинамічний теплогенератор;

ЕМ – електрична машина;

ЕМП – електромеханічний перетворювач;

КЕ – кінцеві елементи;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МКЕ – метод кінцевих елементів;

МФР – масивний феромагнітний ротор;

НТ – насос-теплогенератор;

ППР – порожнистий перфорований ротор;

СКЕ – сітка кінцевих елементів.

## ВСТУП

Однією з основних тенденцій розвитку сучасного електроприводу є суміщення електромеханічних перетворювачів з виконавчим механізмом, що реалізує конкретний технологічний процес, при цьому часто технологічне середовище виступає в ролі навантажувально-охолоджуючого.

Проблема створення теплогенераційних систем для автономного теплопостачання та гарячого водозабезпечення стає особливо гострою в зв'язку зі зростанням цін на традиційні енергоносії. Альтернативою для існуючих енерговитратних технологій стають електричні системи, що використовують комплекс різних за фізичною природою джерел потужності нагрівання – гідродинамічних ефектів і втрат електромагнітної системи. Застосування таких пристроїв дозволяє перетворювати електричну енергію безпосередньо в теплову і механічну енергію обертального руху без використання проміжних механічних передач. Недоліки існуючих теплогенераційних систем усуваються за рахунок максимальної інтеграції структурних та функціональних властивостей окремих пристроїв технологічного ланцюга і відтворення їх в одному електромеханічному перетворювачі, інтеграції та повного використання його дисипативних складових енергії, а також використання рідини, що нагрівається, як охолоджуючого середовища. Суттєвими перевагами запропонованої технології є високе значення коефіцієнта корисної дії, значні скорочення виробничої площі, кількості одиниць обладнання та термінів його окупності.

Конструктивною особливістю асинхронного двигуна, в якому ротор одночасно є виконавчим механізмом, що виконує функцію робочого колеса насоса, нагрівача і ланки електромагнітної системи, є перфорована структура масиву. Створення та забезпечення ефективної роботи подібних пристроїв вимагає вирішення ряду завдань, пов'язаних, у тому числі, з розрахунком

електромагнітного моменту з урахуванням особливостей геометрії та впливу охолоджуючого середовища.

Об'єкт дослідження – електромеханічні процеси асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання.

Предмет дослідження – статичні та динамічні механічні характеристики асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання за результатами дослідження механічних характеристик.

Методи дослідження – визначення електромагнітного моменту за результатами рішення польових задач методом тензора магнітного натягу, кінцево-елементний метод розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних в тривимірній постановці.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити актуальність питання генерації теплової енергії;
- виконати огляд конструкцій електромеханічних перетворювачів, що працюють в системах нагріву рідин;
- розглянути математичну модель та розробити підхід до чисельного моделювання механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- виконати дослідження статичних та динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- розглянути питання з пожежної безпеки на підприємстві, де експлуатується асинхронний двигун з порожнистим ротором.

Роботу було виконано відповідно до [1–3]. Результати досліджень опубліковано у [4].

## **1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В СИСТЕМАХ НАГРІВУ РІДИН**

### **1.1 Актуальність питання генерації теплової енергії**

Опалення та гаряче водозабезпечення в побуті та на виробництві, як і раніше, є найважливішими сферами теплопостачання.

Незважаючи на суттєві перетворення останніх років енергетичної галузі України залишаються притаманні такі специфічні проблеми, як фізичне зношення енергетичного обладнання джерел теплоти і теплових мереж, дефіцит теплової потужності джерел, погіршення гідравлічних режимів теплових мереж, зниження параметрів теплоносія тощо. Крім того, що традиційні централізовані системи теплопостачання потребують значних капітальних вкладень, їх ще й не можна назвати економічно вигідними. Головною причиною низької якості і високих енерговитрат централізованих систем теплопостачання, є втрати теплової енергії на стадіях виробництва, транспортування та споживання. У результаті ККД систем опалення та гарячого водозабезпечення становлять у середньому від 30 % до 40 % залежно від якості теплової ізоляції і протяжності теплотрас. Разом з тим, використання таких видів палива, як газ, нафта і вугілля – вкрай негативно позначається на стані навколишнього середовища.

Проблема енергозбереження робить актуальним питання переходу від централізованого теплопостачання до виробництва тепла безпосередньо там, де воно необхідне. В даний час існує досить багато типів різного теплогенеруючого обладнання, що використовується як установки автономного теплопостачання, однак, найчастіше знаходять застосування установки, які перетворюють електричну енергію в теплову [5-7]. Класифікація приладів електронагріву за типом виконавчих пристроїв представлена на рис. 1.1. Дані установки характеризуються високою екологічністю, безпекою, низькими

втратами теплової енергії (внаслідок відсутності необхідності використання протяжних теплотрас), низькими капітальними витратами, мобільністю.

На сьогоднішній день широке розповсюдження отримали резистивні електронагрівачі, виконані на основі трубчастих нагрівальних елементів, і так само електронагрівачі відкритого типу, виконані з матеріалу з великим питомим опором. Поряд з резистивними, широко застосовуються електродні електроводонагрівачі, що забезпечують нагрів рідини за рахунок протікання по ній електричного струму. Перераховані пристрої володіють відомими недоліками, такими як низький клас електробезпеки, накипоутворення, малі термін служби і надійність функціонування, пожежонебезпека. До переваг цих пристроїв відносяться простота конструкції, невисока вартість, а також можливість швидкої і легкої заміни.



Рисунок 1.1 – Класифікація приладів електронагріву за типом виконавчих пристроїв

У промисловості знайшли застосування електронагрівальні установки індукційного типу, що використовують принцип виділення тепла в електропровідному середовищі шляхом індукування в ньому змінним магнітним

полем вихрових струмів (ВС). Установки індукційного типу характеризуються високим ступенем безпеки, однак мають невисокі енергетичні показники [8, 9].

До перспективних типів пристроїв електронагріву відносяться електронагрівачі трансформаторного типу, що представляють собою трансформатор з короткозамкненою вторинною обмоткою. Вони відрізняються простотою конструкції, а також високими показниками надійності і електробезпеки при експлуатації [8, 10, 11]. Істотними недоліками електронагрівачів трансформаторного типу є велика металоємність і низький коефіцієнт тепловіддачі. Наслідком останнього є невисокі показники продуктивності.

Проблема генерації та забезпечення тепловою енергією загострюється унаслідок стрімкого зростання цін на традиційні енергоносії, тому, напрямки досліджень і розробок перспективних видів технологій та обладнання спрямовані, насамперед, на здешевлення технології отримання теплової енергії. Створювати енергоефективні технології шляхом розробок нових технічних рішень і матеріалів стає все складніше. У зв'язку з цим, перспективним слід вважати напрямок, що передбачає максимальну інтеграцію структурних та функціональних властивостей окремих пристроїв технологічного ланцюга і відтворення їх в одному електромеханічному перетворювачі (ЕМП), інтеграцію і повне використання його дисипативних складових енергії, а також використання перероблюваних речовин і сумішей, як охолоджуючого середовища [12].

Практична реалізація цього напрямку знайшла своє втілення в концептуально нових електронагрівальних пристроях – електромеханічних теплогенераторах. Теплогенератори електромеханічного типу практично позбавлені недоліків більшості існуючих пристроїв електронагріву і відрізняються підвищеними коефіцієнтом тепловіддачі і теплопродуктивністю [13]. На даний момент вони представлені невеликою кількістю конструктивних варіантів, які передбачають, в якості основного джерела потужності нагрівання, використання втрат електромагнітної системи перетворювача [14-16], а також

комплексне використання втрат електромагнітної системи і гідродинамічних ефектів, що виникають в робочій рідині [17–19]. Більш кращим виглядає останній варіант, що передбачає підвищення теплопродуктивності за рахунок кавітації та резонансних (гідродинамічних) коливань в системі.

Важливим є те, що такий підхід, поряд з підвищенням ефективності використання енергії дозволить вирішити проблему екологічного характеру, пов'язану із забрудненням навколишнього середовища шкідливими викидами. Безумовно, ідея використання електромеханічних пристроїв як ланок технологічного ланцюга, відноситься до сучасних тенденцій у сфері наукових досліджень і розробок ХХІ сторіччя.

Кінцевим продуктом усього ланцюга енергетичних перетворень у сучасних способах генерації енергії є речовина [20]. Причому ця кінцева речовина стає, як правило, більш небезпечною для біосфери, ніж вихідний енергоносіє. Альтернативою існуючим способам одержання енергії стають такі способи, в яких на кінцевій стадії енергетичних перетворень не з'являється небезпечна для біосфери речовина. Тому в даний час, напрямки пошуку нових способів отримання енергії змістилися на альтернативну енергетику, в тому числі і з причин зростаючих цін на традиційні енергоносії.

В якості альтернативного джерела теплової енергії відоме використання кавітації. Разом з тим, кавітація є ефективнішим методом багатофакторного впливу на рідину, а області її застосування в різних технологічних процесах дуже широкі. У промисловості для кавітаційного впливу на рідину найбільш часто використовуються гідродинамічні теплогенератори (ГТ).

ГТ – це нове покоління теплових машин, що перетворюють механічний та акустичний вплив на рідину в тепло. Нагрівання теплоносія здійснюється в процесі перетворенні кінетичної енергії рідини в теплову енергію за рахунок кавітаційних і вихрових ефектів [21, 22]. ГТ є умовно автономними джерелами теплової енергії, оскільки їм необхідний механічний привод. За своїм призначенням і характером робочого процесу ГТ найбільш близькі до інших джерел, що перетворюють електричну енергію в теплову (тенові та електродні

котли). Їх об'єднують такі переваги, як компактність, екологічність, вибухо- і пожежебезпечність, можливість роботи в автоматичному режимі. У порівнянні з електричними котлами для роботи ГТ не вимагається особлива підготовка води, не утворюється накип на внутрішніх стінках обладнання, він може працювати з будь-якими, в тому числі і агресивними рідинами.

Аналіз [23] показав, що серед великої кількості конструкторських рішень ГТ, найбільш перспективними для практичного використання виявляються ГТ динамічного типу, в яких механічна активація робочої рідини відбувається в результаті впливу на рідину рухливих активуючих елементів – обертових, коливальних або утворюючих складний рух. Ротори таких ГТ можуть виконуватися у вигляді турбін з прямими або профільованими лопатями, тіл обертання з поздовжньо профільованими поверхнями, перфорованих циліндричних або конічних барабанів, односпрямованих або протилежно обертових перфорованих дисків тощо [24–30].

В останнє десятиліття опубліковані сотні робіт, що прямо або побічно обґрунтовують можливість отримання надлишкової теплоти при використанні ГТ [23]. На думку їхніх конструкторів і дослідників, ГТ відрізняються високою ефективністю – відношенням виробленої теплоти до споживаної енергії. Так, наприклад, чисельні значення ефективності теплогенераторів, запропонованих в [31, 32], наближаються до одиниці, в [32, 34] перевершують її в межах можливої похибки калориметричних вимірів, а в [35–37], на думку авторів, перевищують одиницю. Запропоновані гіпотези про причини надпродуктивності ГТ – численні і часом взаємовиключні [38–42], що свідчить про невивченості явищ генерації надлишкового тепла при механоактивації води в ГТ.

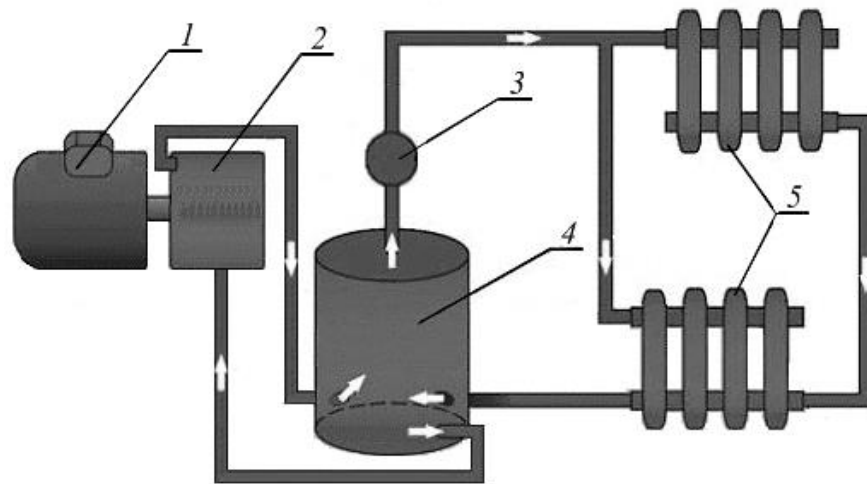
Незважаючи на неоднозначність у визначенні ефективності, ГТ різних конструкцій і потужностей виробляються в країнах СНД, Європи, Азії [43–46] і підтверджують свою працездатність в системах опалення, гарячого водопостачання та при обробці різних рідин. Встановлено [47, 48], що вихрові нагрівачі рідини мають середній умовний коефіцієнт перетворення енергії на

23 % вище в порівнянні з електродними теплогенераторами і на 42 % вище в порівнянні з ТЕНовими. Багато виробників використовують здатність ГТ перемішувати і одночасно підігрівати різні речовини. Найбільших успіхів у цій галузі на Україні досягло НВП «Інститут Текмаш». Відомі конструкції дослідно-промислових зразків гідродинамічних установок ТЕК, ТЕК-НД, ТЕК-ПГ, що виготовляються цим підприємством для систем опалення, гарячого водопостачання, приготування вологих кормів, а також пастеризатори і гомогенізатори для харчової промисловості, які мають ККД понад 90 %.

При виборі способу отримання теплової енергії визначальними є вартість джерела первинної енергії, характер її перетворення в теплову енергію, а також ефективність такого перетворення на кожному етапі. Використання ГТ передбачає поетапне перетворення енергії з одного виду в інший. Механічна енергія перетворюється в теплову з використанням кінетичної енергії робочого тіла. У якості останнього найчастіше слугує вода. Джерелом механічної енергії зазвичай слугує електричний двигун, який в переважній більшості конструкцій теплогенеруючих установок виявляється винесеним за контур системи циркуляції теплоносія [43, 46, 49–52]. До того ж, для роботи динамічних ГТ в системах опалення, зазвичай після резервуара з водою встановлюється циркуляційний насос [53]. На рис. 1.2 показана типова схема опалення з використанням ГТ динамічного типу.

Існуюча схема перетворення енергії передбачає марне розсіювання теплової енергії двигуна і механічної передачі в навколишнє середовище. У середньому ККД системи електроприводу становить від 0,72 до 0,85, а втрати в механічній передачі від двигуна до виконавчого механізму дорівнюють від 7 % до 10 %. Оскільки ККД окремих елементів системи формують загальний ККД системи, втрати вже на першому етапі перетворення енергії неприпустимі.

Створення ефективних технологічних систем, які об'єднують процеси нагріву, транспортування та перемішування, стає можливим в першу чергу за рахунок об'єднання окремих елементів обладнання в одному корпусі, а також використання дисипативної складової енергії цих же елементів.



1 – електричний двигун; 2 – теплогенератор; 3 – циркуляційний насос;  
4 – резервуар з нагрітою рідиною; 5 – споживач

Рисунок 1.2 – Типова схема опалення з використанням ГТ динамічного типу

Об'єднання в одному корпусі асинхронного двигуна (АД) і ГТ дозволяє усунути недоліки існуючих схем перетворення енергії із застосуванням ГТ. Підвищення ефективності системи здійснюється за рахунок усунення проміжних механічних передач і, що дуже важливо, за рахунок використання енергії, яка раніше при традиційній схемі перетворення марно розсіювалася в навколишнє середовище.

Використання електричних і магнітних втрат масивного ротора і статора в якості додаткового джерела теплової енергії є доцільним, ще і з тієї причини, що ефективність нагріву в ГТ стає особливо помітною, коли температура води, що піддається механоактивації, становить  $66,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [33–35]. Разом з тим, суміщення ротора АД з робочим колесом насоса дозволить відмовитися від використання спеціального циркуляційного насоса, поліпшити масогабаритні показники теплогенеруючої установки, підвищити ефективність використання активних матеріалів і надійність системи.

Необхідно відзначити, що використання таких ЕМП в якості ГТ відповідає основній тенденції розвитку сучасного електроприводу, яка полягає

в максимально можливому усуненні проміжних механічних передач, а в ідеалі – в об'єднанні електродвигуна і робочого органу в одному корпусі [54].

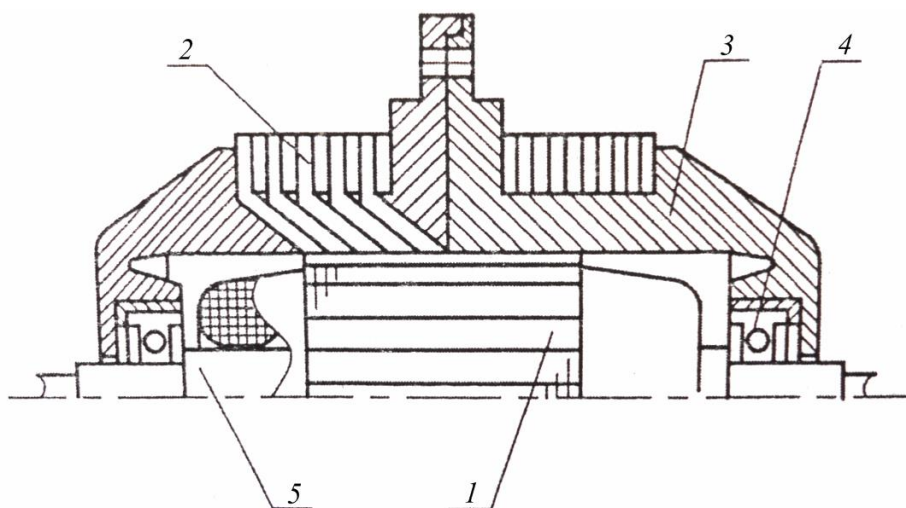
## 1.2 Огляд конструкцій електромеханічних перетворювачів, що працюють в системах нагріву рідин

За конструктивним виконанням запропонований пристрій відноситься до асинхронних машин, які мають масивний феромагнітний ротор (МФР), поєднаний з виконавчим механізмом. За способом охолодження – до пристроїв, що використовують рідинне охолодження. Його принциповою відмінністю від існуючих ЕМП є комплексне використання різних по фізичній природі джерел потужності нагрівання – гідродинамічних ефектів і втрат електромагнітної системи.

Далі розглянуто конструкції електричних машин (ЕМ), що працюють в системах нагріву і транспортування рідин (включаючи системи генерації теплової енергії), основними властивостями яких є суміщення елементів конструкції з елементами виконавчого механізму, використання теплової енергії активної частини, а також використання робочої рідини в як охолоджуючого середовища.

Ефективне відведення тепла втрат АД може здійснюватися через вузли приводного механізму (робоче колесо насоса, барабан центрифуги, ролик транспортера, мішалка тощо). У зв'язку з даним фактом і принципом системного проектування (вбудовування, моноблочне агрегування), є істотний резерв енергоресурсозберігання на основі оберненої схеми АД. Конструкція АД із зовнішнім двопаке́тним ротором представлена на рис. 1.3.

Перспективними пристроями електропідігріву є електронагрівальні пристрої трансформаторного типу. Ці пристрої, що є, по суті, електричними машинами, послужили основою для створення електромеханічних теплогенеруючих перетворювачів.



1 – статор; 2 – ротор; 3 – корпус; 4 – підшипник; 5 – нерухома вісь

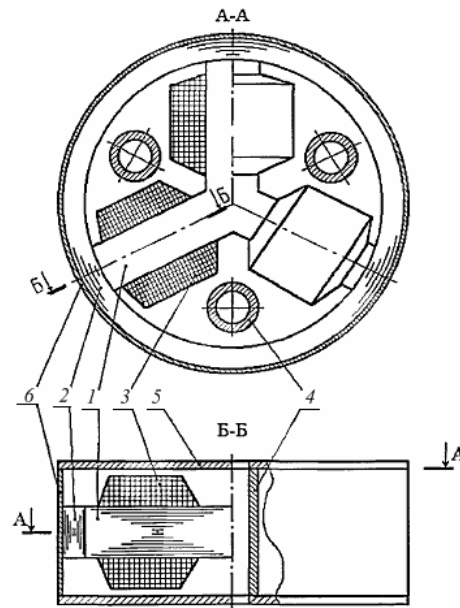
Рисунок 1.3 – АД із зовнішнім двопакетним ротором

Перша згадка про практичне застосування електронагрівачів трансформаторного типу для нагріву води з'явилася в середині 70-х років минулого століття. Відомо, що дані пристрої не тільки не поступаються, але і нерідко перевершують по експлуатаційно-технічним параметрам традиційні види установок електронагрівання.

Один з варіантів такого електронагрівального пристрою (рис. 1.4) має магнітопровід, стрижні якого розташовані в одній площині під кутом 120 градусів відносно один одного й охоплені кільцевим ярмом. На стрижнях розміщена трифазна первинна обмотка.

Короткозамкнена вторинна обмотка виконана у вигляді трубок, призначених для проходження рідини, що нагрівається, які накоротко замкнені на кінцях дисками. Вторинна обмотка разом з корпусною оболонкою створює герметичну камеру, усередині якої розміщений магнітопровід з первинною обмоткою. Внаслідок того, що конструкція електронагрівача герметична, він може використовуватися як у якості заглибного, так і в якості проточного.

До переваг цієї конструкції слід віднести повну симетрію навантаження фаз нагрівача, компактність.



- 1 – стрижні; 2 – ярмо; 3 – первинна обмотка;  
4 – вторинна обмотка; 5 – замкнені диски; 6 – корпусна оболонка

Рисунок 1.4 – Електронагрівальний пристрій трансформаторного типу з просторовою магнітною системою

Відомий пристрій технологічного нагріву рідини, індуктор якого виконаний у формі статора асинхронної машини. Масивний ротор являє собою порожнистий товстостінний циліндр, в стінці якого виконані крізні отвори, розташовані вздовж аксіальної координати. Потік рідини, що нагрівається проходить через отвори в стінці нерухомого порожнистого циліндричного ротора.

Розглянуті вище статичні електронагрівальні пристрої вже впроваджені у виробництво і використовуються в побуті та промисловості, однак, вони мають ряд недоліків, основним з яких є низький коефіцієнт тепловіддачі з нагрітої поверхні і відповідно невисока ефективність. Підвищення ефективності перетворювачів даного типу можливе за рахунок зміни фізичного процесу теплообміну, що веде до додаткових вентиляційних або гідравлічних втрат, і вимагає спеціальних зовнішніх джерел механічної потужності (вентилятори,

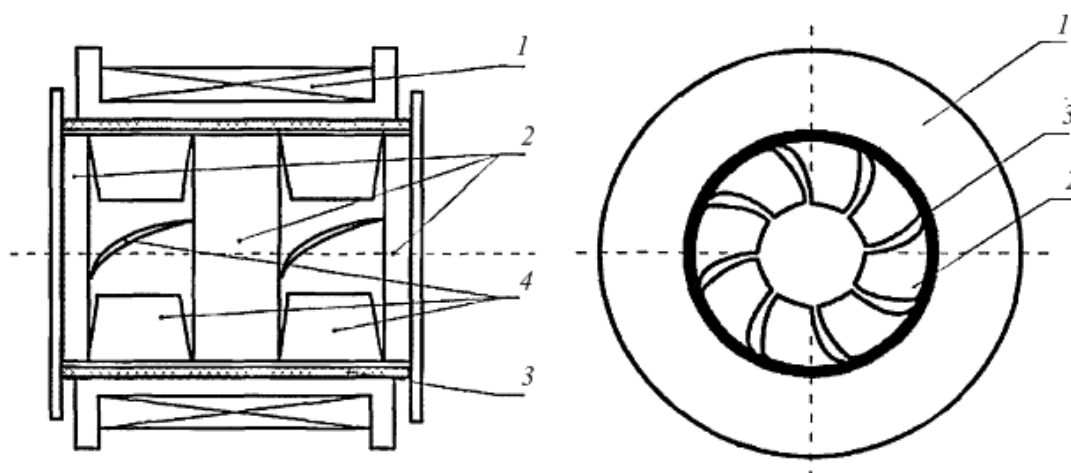
насоси тощо), та пов'язане зі зростанням вартості комплексу і зниженням його системної надійності.

Логічним розвитком електротехнічних комплексів для генерації теплової енергії стало застосування в них виконавчих пристроїв на основі ЕМП з нерухомою і обертовою вторинними обмотками [13]. Принцип дії таких пристроїв аналогічний принципу дії АД, за винятком того, що в даному випадку виникає необхідність урахування додаткової функції обертового ротора-нагрівача теплоносія за рахунок джоулевих втрат, що виділяються в ньому. Електронагрівальні пристрої з обертовими нагрівальними елементами дозволяють істотно підвищити коефіцієнт тепловіддачі з активної поверхні, однак, ці пристрої мають загальний недолік, пов'язаний з тим, що в режимах близьких до синхронних, кількість теплових втрат, що виділяються в рухомому елементі істотно зменшується. Для підвищення теплопродуктивності і зниження впливу на параметри теплогенеруючого пристрою швидкості обертання рухомого елемента в конструкції передбачені додаткові джерела тепла, показники яких не пов'язані безпосередньо зі швидкістю обертання нагрівального елемента.

Пристрої з обертовими нагрівальними елементами можуть бути класифіковані за типом перетворювача енергії обертання: осьовий, діагональний, відцентровий, шнековий; за кількістю робочих коліс: одноступінчасті і багатоступінчасті; за наявністю або відсутністю і розташуванню спрямляючих механізмів; за видом виконання: вибухозахищений, малOSHумний, ударостійкий, вбудований тощо.

Розглянемо принцип роботи даного пристрою на прикладі конструкції, представленої на рис. 1.5, що включає магнітопровід з первинною обмоткою, нерухомий нагрівальний елемент, обертовий нагрівальний елемент, виконаний у вигляді порожнього циліндра, на внутрішній поверхні якого сформовані напірні лопаті [15]. Нерухома частина теплогенератора являє собою капсульований ізоляційним, антифрикційним, самозмащувальним матеріалом статор. Обертовий нагрівальний елемент і магнітопровід відокремлені

теплоізолюючим шаром з антифрикційного неелектропровідного матеріалу, що виконує функцію одностороннього радіально-упорного підшипника ковзання і становить єдину складальну одиницю з магнітопроводом та первинною обмоткою. Робота пристрою супроводжується обертанням внутрішнього циліндра, що забезпечує переміщення рідини уздовж вісі теплогенератора з супутнім відбором тепла від внутрішньої поверхні нерухомого нагрівального елемента, який нагрівається ВС і є основним джерелом теплової потужності. Збільшення кількості переміщуваного теплоносія є наслідком низького вісьового гідравлічного опору пристрою. Кількість теплоносія, що нагрівається та/або переміщується в одиницю часу залежать в основному від величини індукованого струму і швидкості обертання.



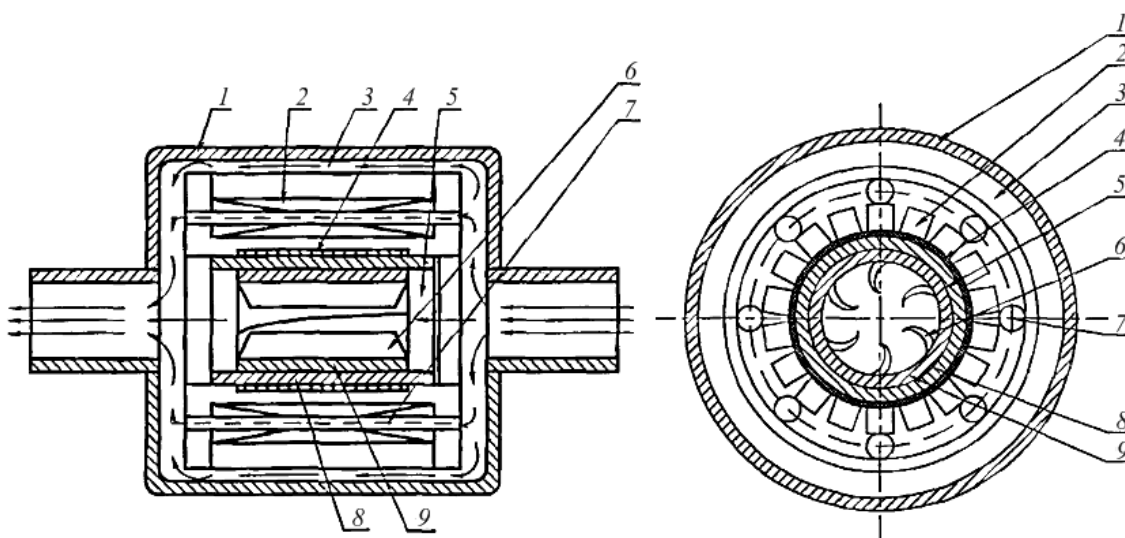
- 1 – первинна обмотка; 2 – обертовий нагрівальний елемент;  
3 – нерухомий нагрівальний елемент; 4 – напірні лопаті

Рисунок 1.5 – Електронагрівальний пристрій з капсульованим статором

На рис. 1.6 представлено електронагрівальний пристрій з обертовим нагрівальним елементом, що має підвищену ефективність нагріву за рахунок наявності декількох нагрівальних контурів, і підвищений коефіцієнт

потужності за рахунок застосування феромагнітного елемента, розташованого всередині немагнітного обертового елемента [16].

Перетворювач складається із зовнішнього кожуха, відокремленого від магнітопроводу, з укладеною в ньому обмоткою, зазором і двох вторинних елементів, виконаних з електропровідного матеріалу, – нерухомого і обертового з напірними лопатями. У статорі виконані аксіальні канали. Обертовий елемент виконаний у вигляді двох коаксіальних циліндрів, нерухомих один щодо одного, причому зовнішній циліндр складається з електропровідного немагнітного матеріалу, а внутрішній – з феромагнітного.



1 – зовнішній кожух; 2 – первинна обмотка; 3 – зазор; 4 – нерухомий нагрівальний елемент; 5 – обертовий нагрівальний елемент; 6 – напірні лопаті; 7 – аксіальні канали; 8 – немагнітний циліндр; 9 – феромагнітний циліндр

Рисунок 1.6 – Електронагрівальний пристрій з внутрішнім феромагнітним елементом

Робоча рідина, що нагрівається надходить через вхідний патрубок, циркулює всередині нерухомого елемента, де нагрівається за рахунок відводу теплової енергії нерухомого і обертового елементів, а також механічних,

гідравлічних і додаткових втрат. Завдяки зовнішньому контуру (його канал утворений зовнішньою поверхнею магнітопроводу і внутрішньою поверхнею зовнішнього кожуха), а також аксіальними каналам статора, додатковий нагрів рідини відбувається за рахунок електричних і магнітних втрат в первинній обмотці.

Огляд існуючих конструкцій показав, що об'єднання в одному блоці АД, ГТ і насоса дозволяє розглядати даний пристрій як новий тип ЕМП, забезпечення ефективної роботи якого, пов'язане з необхідністю вирішення ряду абсолютно нових завдань і неможливе без прийняття досвіду і принципів конструювання пристроїв технологічних установок нагріву, транспортування та обробки рідин. Підвищити теплопродуктивність радикальним чином у порівнянні з розглянутими конструкціями стає можливим за рахунок комплексного використання гідродинамічних ефектів і втрат електромагнітної системи, а також за рахунок створення ефективної теплообмінної системи «вузли з тепловиділеннями – охолоджуюче середовище», яка виконує функції спрямування теплової енергії в технологічну зону нагріву рідини і забезпечення допустимого перегрівання ізоляції.

### 1.3 Постановка задач досліджень

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розглянути математичну модель та розробити підхід до чисельного моделювання механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- виконати дослідження статичних та динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- розглянути питання з пожежної безпеки на підприємстві, де експлуатується асинхронний двигун з порожнистим ротором.

#### 1.4 Висновки до 1 розділу

Логічним розвитком електротехнічних комплексів для генерації теплової енергії стало застосування в них виконавчих пристроїв на основі ЕМП з нерухомою і обертовою вторинними обмотками. Принцип дії таких пристроїв аналогічний принципу дії АД, за винятком того, що в даному випадку виникає необхідність урахування додаткової функції обертового ротора-нагрівача теплоносія за рахунок джоулевих втрат, що виділяються в ньому. Електронагрівальні пристрої з обертовими нагрівальними елементами дозволяють істотно підвищити коефіцієнт тепловіддачі з активної поверхні, однак, ці пристрої мають загальний недолік, пов'язаний з тим, що в режимах близьких до синхронних, кількість теплових втрат, що виділяються в рухомому елементі істотно зменшується.

## **2 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

2.1 Загальна характеристика асинхронного двигуна з порожнистим ротором

Необхідність істотного перегляду енерго- і матеріаломістких технологій та обладнання, зростання цін на енергоносії, особливо на природний газ, спонукає до пошуку напрямків формування технологій, а також до створення обладнання, яке б забезпечувало значне зменшення витрат енергії та матеріалів на одиницю продукції і забруднень навколишнього середовища, підвищення продуктивності праці. Одним з напрямків створення таких технологій є максимальна інтеграція структурних та функціональних властивостей окремих пристроїв технологічного ланцюга і відтворення їх в одному ЕМП, інтеграція і повне використання його дисипативних складових енергії, а також використання перероблюваних речовин і сумішей, як охолоджуючого середовища для ЕМП.

Комплексами, які об'єднують в собі ці властивості, є електричні комплекси на базі ЕМП технологічного призначення, що передбачають ефективне використання дисипативної складової енергії, структурну, функціональну та теплову інтеграцію [12]. ЕМП технологічного призначення – це ряд модифікацій різного застосування, що мають спільну технічну основу і єдину ідеологію створення.

Одним з найбільш перспективних представників нового класу пристроїв ЕМП є асинхронний двигун з порожнистим ротором, який являє собою поєднану технічну систему з поліфункціональними властивостями, об'єднуючу електромеханічну, механічну, теплову та гідравлічну системи для реалізації інтегральної функції по сукупності функціональних ознак електродвигуна,

виконавчого механізму, нагрівача і кавітаційного генератора. У ньому використовується конструкція порожнистого перфорованого ротора (ППР), який виконує одночасно функції ротора АД, ротора кавітаційного генератора, нагрівача і насоса. При цьому ротор охолоджується робочою рідиною, яка за цикл проходження через апарат підігрівається за рахунок кавітаційних процесів, основних електричних і магнітних втрат в роторі і статорі, резонансних коливань, а також внутрішнього тертя рідини при гідродинамічних переміщеннях в повітряному зазорі.

Роль перфорацій ротора полягає у формуванні гідродинамічного впливу, що виникає внаслідок періодичного суміщення отворів ротора з отворами тангенціальних каналів, що виражаються в пульсаціях тиску і швидкості потоку рідини, розвиненою турбулентності, інтенсифікації кавітаційних процесів. Крім того, наявність перфорацій забезпечує створення додаткового контуру циркуляції робочої рідини, що здійснює відбір теплової потужності від зовнішньої поверхні ротора і внутрішньої поверхні немагнітної гільзи (уздовж вісі).

Поздовжній і поперечний розрізи АД з ППР [17] показані відповідно на рис. 2.1 та 2.2. Він складається з корпусу 1 усередині якого розташовуються магнітопровід 2 з обмоткою 3, виконані у вигляді статора класичної асинхронної машини, а також тонкостінна немагнітна гільза 4 і ротор 5. Ротор складається з порожнистого феромагнітного циліндра 6 з крізними радіальними отворами 9, а також лопатей 7 з кутом установлення  $\varphi = 80^\circ$  (рис. 2.3). Перегородка 8 розділяє ротор на дві рівні половини, роблячи підвід рідини двостороннім. З торців до ротора примикають резонансні диски 10 з всмоктувальними отворами 11 і нагнітальними отворами 12. Резонансні диски виконані дзеркально. З протилежних сторін від торців ротора до резонансних дисків примикають корпуси 13 з ущільненнями 14, камер 15 зниженого тиску і камер нагнітання. Всмоктувальні отвори 11 розташовані навпроти камер зниженого тиску, а нагнітальні отвори 12 – навпроти камер нагнітання. Зазор між ротором і резонансними дисками, а також між ротором і немагнітною

гільзою становить від 0,2 мм до 0,4 мм. До корпусів камер зниженого тиску і нагнітання кріпляться патрубки всмоктування 16 і патрубки нагнітання 17 з потрійними патрубками 18 і вентилями 19. У корпусі 1 виконані аксіальні, радіальні і тангенціальні канали 20, 21, 22, а в одному з корпусів 13 камер зниженого тиску і нагнітання виконані аксіальні канали 23, з'єднані з колектором 24, які мають додатковий нагнітальний патрубок 25. У порожнині радіальних каналів 21 розміщені центруючі конуси 26, основні труби Вентурі 27, а в порожнині аксіальних каналів 20 встановлені додаткові труби Вентурі 28 і заспокоювачі 29.

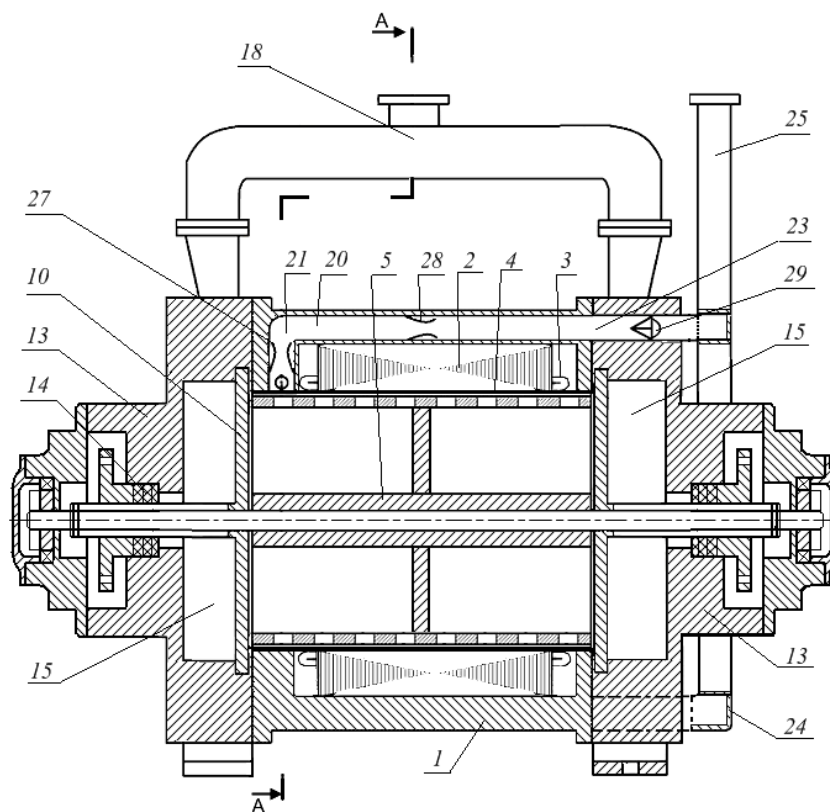


Рисунок 2.1 – Поздовжній розріз АД з ППР

Оскільки темп нагріву рідини значно підвищується за рахунок додаткової теплової енергії активних частин статора і ротора, а також створення вихрових кавітаційних потоків в радіальних і аксіальних каналах корпусу, рівень тиску, при якому створюються кавітаційні каверни, цикл від циклу збільшується. Це, в свою чергу, знижує енерговитрати на утворення кавітаційних процесів.

Теплова енергія рідини формується за рахунок таких джерел:

- локальний (точковий) нагрів при схлопуванні кавітаційних бульбашок в зонах підвищеного тиску;
- додаткова теплова енергія активних частин електромагнітної системи (дисипативна складова енергії);
- внутрішнє тертя рідини при гідродинамічних переміщеннях в системі;
- виділення тепла в рідині при резонансних коливаннях.

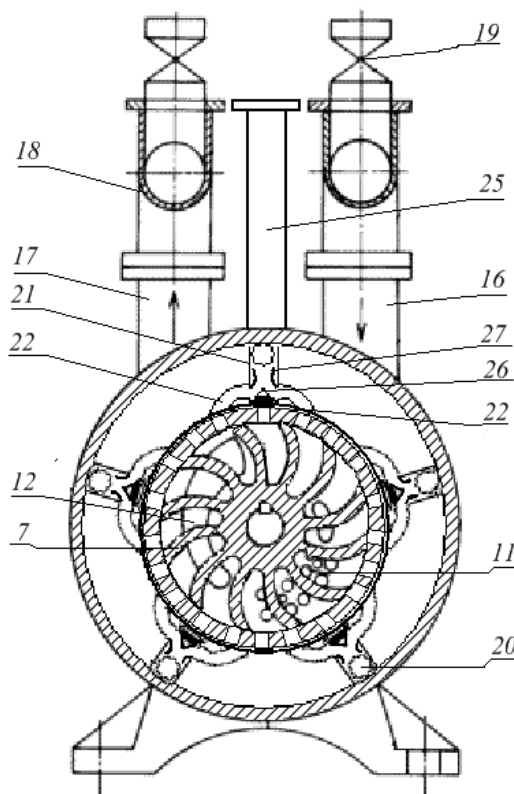


Рисунок 2.2 – Поперечний розріз АД з ППР

Розробка АД із суміщеними з ротором елементами виконавчого механізму, особливості розрахунку та завдання оптимального проектування диктують необхідність детального вивчення характеру розподілу електромагнітного поля в масивному ППР з урахуванням реальних геометричних співвідношень.

Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі АД з ППР на відміну від традиційних електричних машин має вельми оригінальний характер. Дискретне розташування отворів ротора призводить до виникнення нерівномірності

магнітного поля в повітряному зазорі, як в осьовому, так і в тангенціальному напрямках, а також до перерозподілу ВС в масивному роторі, що в свою чергу впливає на вихідні характеристики АД з ППР.

Необхідно відзначити, що у вітчизняній і зарубіжній технічній літературі відсутні роботи, в яких би розглядалися математичні моделі та методи розрахунку ЕМП з ППР, а також вплив перфорацій феромагнітного ротора на вихідні характеристики ЕМП.

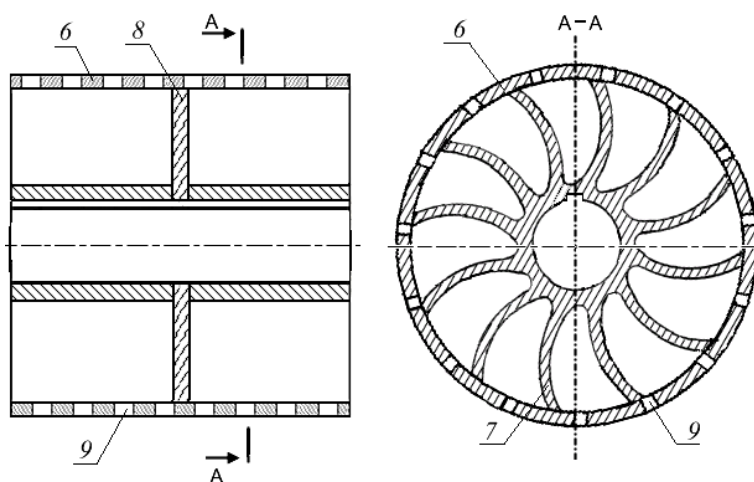


Рисунок 2.3 – Конструкція ППР

Аналітичні вирази, незважаючи на переваги при розрахунку варіантів, не дозволяють вести аналіз поля з урахуванням складної геометрії. Застосування чисельних методів дозволяє досліджувати як двомірні, так і тривимірні електромагнітні поля і вирішувати завдання, які не можуть бути вирішені аналітично. Крім того, у порівнянні з аналітичними методами, чисельні методи дозволяють значно підвищити точність розрахунку електромагнітних полів. Зазначені обставини зумовлюють необхідність аналізу розподілу електромагнітного поля АД з ППР чисельними методами в тривимірній постановці.

Одним з найбільш ефективних чисельних методів розв'язання тривимірних польових задач є метод кінцевих елементів (МКЕ). Цей метод спочатку розроблявся для вирішення статичних лінійних задач будівельної

механіки, проте останнім часом він став активно застосовуватися і для вирішення нелінійних рівнянь математичної фізики, що описують процеси поширення електромагнітного поля.

Стосовно до завдань електромагнітного поля МКЕ передбачає розбиття розрахункової області на кінцеві елементи (КЕ), апроксимацію в межах кожного КЕ розподілу щільності енергії магнітного поля як функції координат поліноміальної залежності, що однозначно пов'язують зі значеннями цієї щільності у вузлах елемента, і обчислення векторного магнітного потенціалу в цих вузлах, виходячи з умови мінімуму сумарної коенергії магнітного поля.

Істотною перевагою МКЕ є порівняльна простота і точність опису досить складних конфігурацій меж розділу середовищ, при розробці розрахункових схем ЕМП. Використання МКЕ дозволяє отримати рішення з необхідною точністю, при цьому врахувати особливості геометрії та нелінійність властивостей матеріалів розглянутої системи.

## 2.2 Висновки до 2 розділу

Зважаючи на принципові особливості розподілу електромагнітного поля в активній зоні АД з ППР, а також відсутність робіт, що розглядають вплив перфорацій феромагнітного ротора на параметри та характеристики ЕМП, актуальним завданням розрахунку електромагнітного поля, поряд з оптимізацією конструкції АД з ППР, є встановлення нових залежностей і особливостей розподілу електромагнітного поля в його активній зоні. Оцінка конкретного розподілу ВС, як по товщині, так і вздовж вісі ППР необхідна для розрахунку та проектування. Разом з тим, саме характер розподілу ВС визначає величину активного опору масивного ротора, який грає першорядну роль у формуванні вихідних характеристик і властивостей АД з ППР.

Теоретичний інтерес становить створення математичних моделей, що дозволяють враховувати реальний тривимірний характер поля (пов'язаний з кінцевою довжиною), що особливо виявляється в зоні торцевих частин машини, де вектор густини струму (індукції), крім вісьової складової, має значну

тангенціальну і радіальну складові. Однією з головних задач проектування АД з ППР є отримання найбільшого електромагнітного моменту з метою забезпечення максимального напору (продуктивності) рідини. Тому, важливо встановити залежності, що безпосередньо пов'язують параметри механічної характеристики з конструктивними параметрами ППР.

### 3 МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ

#### 3.1 Математична модель механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором

За своєю конструкцією АД з ППР є одночасно електродвигуном і рідинно-кільцевим насосом з двостороннім підведенням рідини. Обертання лопатевого ротора впливає на робочу рідину зміною статичного тиску  $H$  (напору), а також витрати  $Q$ . Однією з головних задач проектування АД з ППР є отримання найбільшого електромагнітного моменту з метою забезпечення максимального напору (витрати) рідини. Тому, важливо встановити залежності, безпосередньо зв'язують параметри механічної характеристики з конструктивними параметрами ППР.

На механічну характеристику асинхронної машини істотно впливає конструктивне виконання масивного ротора. З метою визначення впливу перфорацій ротора на величину електромагнітного моменту була проведена серія кінцево-елементних розрахунків механічних характеристик АД із різними конструктивними варіантами ППР.

На сьогодні відомі три основні методи визначення електромагнітного моменту:

- за зміною енергії або коенергії магнітного поля при нескінченно малому переміщенні;
- за об'ємною густиною електромагнітних сил;
- за тензором магнітного натягу.

Серед вітчизняних і зарубіжних публікацій останнього часу зустрічаються роботи, присвячені визначенню електромагнітного моменту за результатами рішення польових задач методом тензора магнітного натягу, що підтверджують ефективність даного методу. При чисельних розрахунках

доцільно використовувати цей метод, оскільки він є найменш трудомістким і реалізується продовженням обчислень в рамках МКЕ. У даній роботі розрахунок механічних характеристик АД з ППР виконаний за допомогою методу тензора магнітного натягу.

Відповідно до методу тензора магнітного натягу, для визначення електромагнітного моменту, прикладеного до ротора ЕМ, останній слід охопити поверхнею  $S$ , розташованої в немагнітному середовищі на нескінченно малій відстані від ротора і обмежує його обсяг  $V$ . Під силою натягу  $\vec{T}_n$  розуміють силу, що діє ззовні на одиницю поверхні  $S$ , зовнішня нормаль до якої направлена за ортою  $\vec{n}$ . Якщо система натягів на поверхні  $S$  еквівалентна електромагнітної силі по (3.1), що діє на обсяг  $V$ , то цю силу можна знайти шляхом підсумовування елементарних сил натягу  $\vec{T}_n dS$ :

$$\vec{F}_V = \int_V \vec{f}_V dV = \oint_S \vec{T}_n dS = \vec{q}_x F_x + \vec{q}_y F_y + \vec{q}_z F_z, \quad (3.1)$$

де  $q_x, q_y, q_z$  – відстань від початку системи координат по осям  $x, y, z$ .

Складові електромагнітної сили по осях прямокутної системи координат:

$$F_x = \oint_S T_{nx} dS, \quad F_y = \oint_S T_{ny} dS, \quad F_z = \oint_S T_{nz} dS, \quad (3.2)$$

де  $T_{nx}, T_{ny}$  та  $T_{nz}$  – компоненти вектора магнітного натягу  $\vec{T}_n$  по осях системи координат.

Вираз для визначення сили натягу на довільно орієнтованої в магнітному полі поверхні можна представити у вигляді:

$$\vec{T}_n = \frac{1}{\mu} (\vec{B} B_n - 0,5 B^2 \vec{n}), \quad (3.3)$$

де  $\vec{B}$  – вектор магнітної індукції в точці поверхні  $S$ , що розглядається;

$B_n$  – нормальна складова магнітної індукції;

$\vec{n}$  – нормальний орт відносно тієї сторони поверхні, на яку діє натяг  $\vec{T}_n$ .

Підсумовуючи елементарні моменти щодо початку системи координат знайдемо електромагнітний момент і його складові щодо осей  $x$ ,  $y$  і  $z$ :

$$\vec{M} = \oint_S [\vec{r} \vec{T}_n] dS = \vec{q}_x M_x + \vec{q}_y M_y + \vec{q}_z M_z, \quad (3.4)$$

де  $\vec{r}$  – радіус-вектор елемента поверхні  $S$ :

$$\begin{aligned} M_x &= \vec{q}_x \vec{M} = \oint_S (y T_{nz} - z T_{ny}) dS; \\ M_y &= \vec{q}_y \vec{M} = \oint_S (z T_{nx} - x T_{nz}) dS; \\ M_z &= \vec{q}_z \vec{M} = \oint_S (x T_{ny} - y T_{nx}) dS. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Електромагнітний момент АД з ППР розрахований за допомогою функції Torque, що використовує проєкції тензора магнітного натягу на осі системи координат. У спеціальній літературі вказується на можливість використання двох основних способів обліку механічної потужності в кінцево-елементних моделях:

- за допомогою моделей з нерухомою СКЕ;
- за допомогою моделей, що мають рухому СКЕ (Moving mesh), відтворюючи обертання ротора.

Перший спосіб передбачає аналіз поля в конкретний момент часу, при цьому використовується нерухома СКЕ. Як навантаження задаються струми обмотки статора, частота яких дорівнює частоті ковзання. Недолік даного способу полягає в тому, що його не можна використовувати для вирішення задачі проектування нової ЕМ (тобто якщо експериментальних даних про струми статора немає).

Другий спосіб дає можливість розрахунку стаціонарних і нестаціонарних режимів роботи і передбачає одночасне вирішення загальної системи диференціальних рівнянь, що включає в себе, крім рівнянь поля, рівняння електричних ланцюгів ротора і статора. Даний спосіб дозволяє в якості навантаження використовувати напругу мережі, безпосередньо прикладену до фаз обмотки статора. Для моделювання обертання ротора передбачається наявність рухомої СКЕ.

Вихідною умовою для розрахунку механічних характеристик АД з різними конструктивними варіантами ППР є ідентичність статорів і параметрів обмоток. Для попереднього розрахунку струмового навантаження можна використовувати експериментальні значення параметрів ротора при відомих параметрах статора або, експериментальні дані про струми статора при відповідних ковзаннях. У роботі чисельне дослідження механічних характеристик АД з ППР виконано з використанням експериментальних залежностей струмів статора від ковзання. Як базовий використовувався статор серійного електродвигуна АОЛ-21-2, номінальні дані якого наведені в табл. 3.1. Механічна характеристика вихідного АД з короткозамкненим ротором представлена на рис. 3.1.

Таблиця 3.1 – Номінальні дані двигуна АОЛ-21-2

№	Найменування величини	Значення
1	Потужність, Вт	400
2	Напруга, В	380
3	Струм статора, А	1
4	Частота обертання, об/хв.	2800
5	Частота мережі, Гц	50
6	ККД, %	72
7	$\cos \varphi$	0,86
8	Номінальний момент, Н·м	1,34
9	Кратність максимального моменту	2,5
10	Кратність пускового моменту	2

Необхідність попереднього вимірювання струмів статора фізичної моделі при кожному значенні ковзання збільшує трудомісткість першого способу визначення механічних характеристик АД з ППР. Постановка тривимірної електромагнітної задачі з використанням у якості вихідних даних напруги живлення усуває цю необхідність, однак призводить до важко вирішуваних проблем тривимірного моделювання.

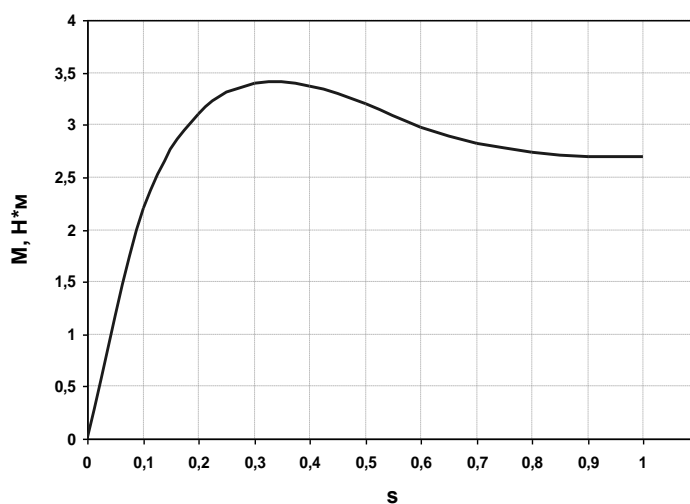


Рисунок 3.1 – Механічна характеристика вихідного АД із короткозамкненим ротором

### 3.2 Розробка підходу до чисельного моделювання механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором

Важливим етапом кінцево-елементного розрахунку є побудова СКЕ, оскільки правильний вибір її параметрів визначає точність рішення. Як показує практика, дуже часто розрахунок тривимірних моделей ЕМП представляє значні складності, що пов'язано з надзвичайно великим обсягом обчислень. Очевидно, що при моделюванні складних конфігурацій меж розділу середовищ, для отримання заданого ступеня точності, кількість КЕ має бути дуже великою, що призводить до необхідності вирішення великого числа рівнянь. Крім того, ширина стрічки матриці основної системи рівнянь стає великою і в результаті

збільшується необхідний обсяг пам'яті обчислювальної машини. Все це дещо обмежує застосування даного методу на практиці. Існує велика кількість різноманітних типів КЕ, серед яких є елементи, конкуруючі між собою, при цьому для різних моделей немає математично обґрунтованого рішення, як ефективніше розбити область.

При вирішенні тривимірних задач найбільшого поширення набув чотиривузловий симплекс-елемент – тетраедр. Цей елемент має чотири грані і дозволяє з достатньою точністю описати криволінійну геометрію моделі. Найбільшу точність обчислень (при рівній кількості КЕ) забезпечують параболічні елементи, оскільки вони мають більш точні функції форми (апроксимуючі функції). Однак розрахунок із застосуванням КЕ високих порядків вимагає великих апаратних ресурсів. Найбільший вплив на час розрахунку (число ітерацій) крім наявності нелінійностей надають розміри КЕ і ступінь відповідних апроксимуючих функцій, що визначаються числом вузлів КЕ. Мінімальний розмір КЕ (при заданому порядку полінома апроксимуючої функції) і мінімум розрахункового часу необхідно приймати виходячи з умов здобуття необхідної точності розрахунку електромагнітного поля. Зі зменшенням розміру КЕ розрахунковий час збільшується, а рішення прагне до точного (рис. 3.2).

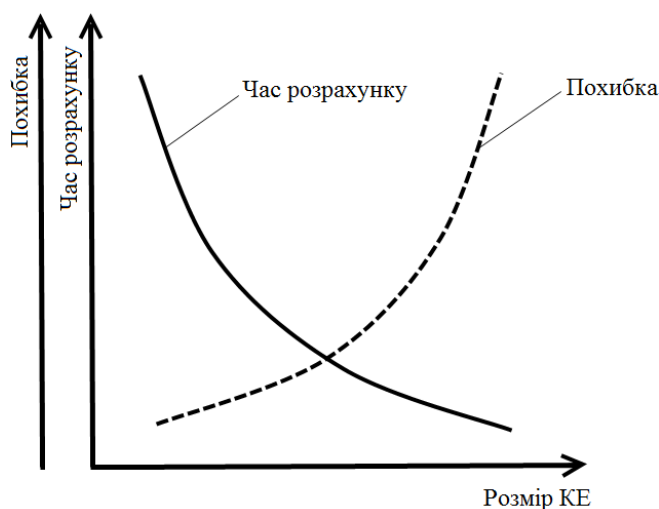


Рисунок 3.2 – Залежність часу і похибки розрахунку від розміру КЕ

Як було зазначено вище, розрахунок механічних характеристик АД з ППР виконаний за допомогою методу тензора магнітного натягу, реалізованого продовженням електромагнітного розрахунку, тому, вибір оптимальних параметрів СКЕ проводився з урахуванням вимог даного методу.

Досвід розрахунків [51] показує, що прийнятна точність визначення моменту по максвелловським натягам забезпечується, якщо на ділянці плоскої моделі, що відповідає повітряному зазору, є два-три шари трикутних КЕ. В роботі [52] запропонована модифікація методу магнітних натягів, названа методом «eggshell», ідея якого полягає в побудові сімейства концентричних еквівалентних поверхонь для розрахунку електромагнітного моменту через тензор натягів з наступним його усередненням. Перевагою цього методу є його точність при «нечутливості» до ступеня дискретизації області повітряного зазору ЕМ. Подібним чином в роботі [51] масивний ротор представляється як багатошарова структура, в котрій кожен шар має постійну магнітну проникність. При цьому точність методу натягів знижується незначно, однак суттєво скорочується обсяг обчислень.

Перераховані методи та рекомендації до вибору оптимальних параметрів СКЕ підказують можливість використання подібного підходу при вирішенні тривимірних польових задач. Виконання областей повітряного зазору і порожнистого ротора у вигляді багатошарових, що складаються з декількох еквівалентних з точки зору магнітних і електричних властивостей коаксіальних циліндрів, дозволяє отримати СКЕ з необхідним ступенем дрібності і провести коректне порівняння отриманих результатів. Всі циліндри зберігають зв'язок у вузлах СКЕ, тому введення особливих граничних умов не потрібне.

Щоб отримати необхідну кількість шарів КЕ при автоматичній або вибірковій побудові сітки потрібне істотне підвищення рівня дискретизації конкретних ділянок тривимірної моделі, що призводить до неможливості виконання розрахунку на сучасному персональному комп'ютері.

Багатошарова дискретизація дозволяє отримати необхідну кількість шарів КЕ на ділянках тривимірної моделі, відповідних повітряному зазору і

порожньому ротору (рис. 3.3), в той час як автоматична побудова СКЕ з тим же ступенем дискретизації забезпечує одержання тільки одного шару КЕ на ділянці повітряного зазору і двох шарів КЕ на ділянці ППР (рис. 3.4). Крім того, багат шарова дискретизація дозволяє отримати більш дрібну СКЕ на внутрішній поверхні ППР порівняно з автоматичним розбиттям при тому ж рівні дрібності сітки.

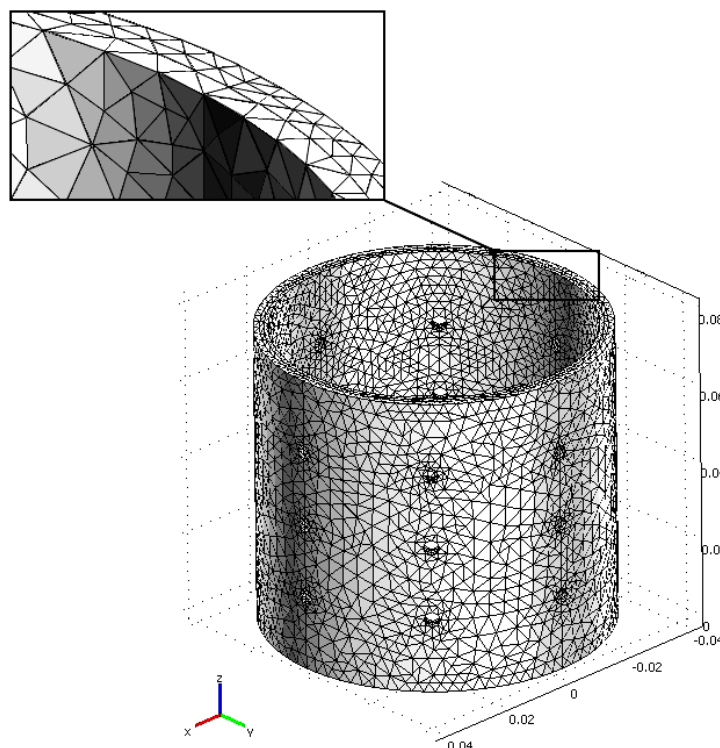


Рисунок 3.3 – Тривимірний СКЕ ротора, отриманий при багат шаровій дискретизації

Складність моделювання АД з ППР полягає в тому, що із зростанням кількості перфорацій в роторі, кількість КЕ необхідних для опису криволінійних меж тривимірної геометрії моделі істотно зростає, що призводить до надзвичайно великих обсягів обчислень. Крім того, результати розрахунків отримані для окремих ППР з різним ступенем дрібності СКЕ не підлягають порівнянню. Оскільки точність розрахунку електромагнітного поля істотно залежить від дискретизації розрахункової області, зменшувати кількість

КЕ недоцільно. Перевагою в порівнянні з автоматичною побудовою СКЕ володіє можливість завдання параметрів сітки «вручну».

Використовуючи команду Mesh Selected можливо формувати неоднорідну СКЕ, підвищуючи щільність побудови КЕ на ділянках з великим градієнтом зміни польових функцій і вибираючи КЕ досить великих розмірів на ділянках з відносно рівномірним розподілом поля. У розглянутій електромагнітній задачі найбільший інтерес представляє розподіл поля в зоні повітряного зазору АД, а також у зоні активного шару перфорованого ротора. У роботах [49–51] даються рекомендації про оптимальну дрібність сітки в повітряному зазорі (не менше трьох шарів елементів). Крім того, вимоги за ступенем дискретизації пред'являються до електропровідних елементів конструкції, в яких розраховуються ВС. У літературі [40] вказується на те, що крок сітки в них повинен бути не більше  $1/4$  глибини проникнення поля. Одночасно, для забезпечення точності рішення, відношення максимального кроку до мінімального, не повинно бути більше 8 – 10.

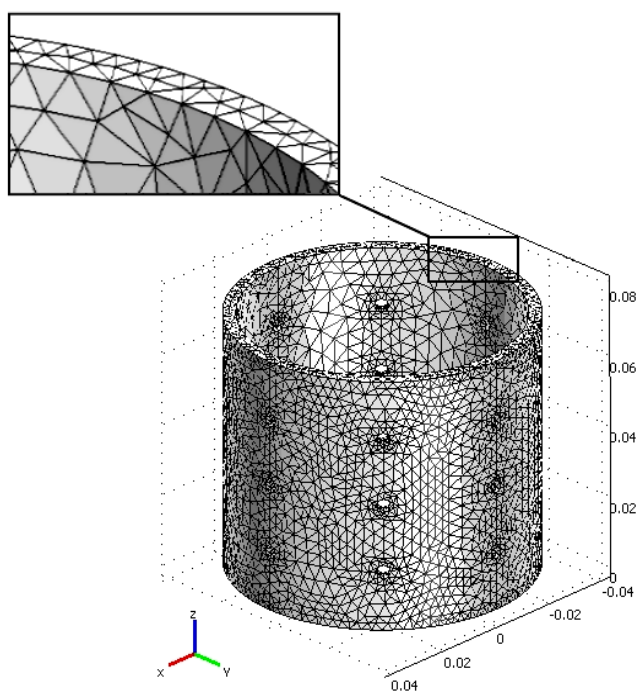


Рисунок 3.4 – Тривимірна СКЕ ротора, отримана при автоматичній побудові

Аналіз колірної гамми картини розподілу густини струму в перерізі феромагнітного ротора (рис. 3.5), отриманої з використанням багатошарової дискретизації дозволяє говорити про коректність розбиття на КЕ, оскільки мають місце плавні кольорові переходи і відсутні точки, що різко вибиваються.

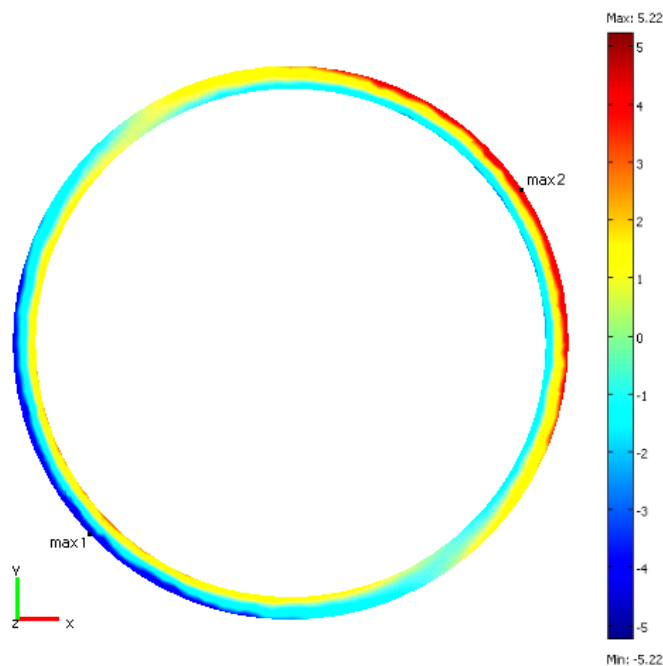


Рисунок 3.5 – Розподіл z-компоненти густини вихрових струмів у перерізі порожнистого ротора при  $s = 0,2$

Наявність різких кольорових переходів і точок, що вибиваються, зазвичай, суперечить фізичній картині модельованих процесів і викликано невдалим розбиттям на КЕ та спрощеннями геометрії конструкції.

Запропонований підхід до дослідження електромагнітного поля та механічних характеристик на основі розв'язання рівнянь поля чисельними методами випробуваний шляхом зіставлення розрахункових і дослідних даних, отриманих для фізичної моделі АД з ППР малої потужності.

Остаточний вибір параметрів і оптимізація структури СКЕ здійснюються в ході чисельних експериментів шляхом встановлення компромісу між точністю моделювання і тимчасовими витратами на виконання розрахунків. На рис. 3.6 представлений варіант тривимірної СКЕ, отриманий в результаті

пошуку компромісу між зазначеними вище обставинами і забезпечує прийнятну точність моделювання. Сітка повітряних областей, прилеглих до торців моделі, не відображена. СКЕ, що представлена на рис. 3.6 містить 149716 КЕ.

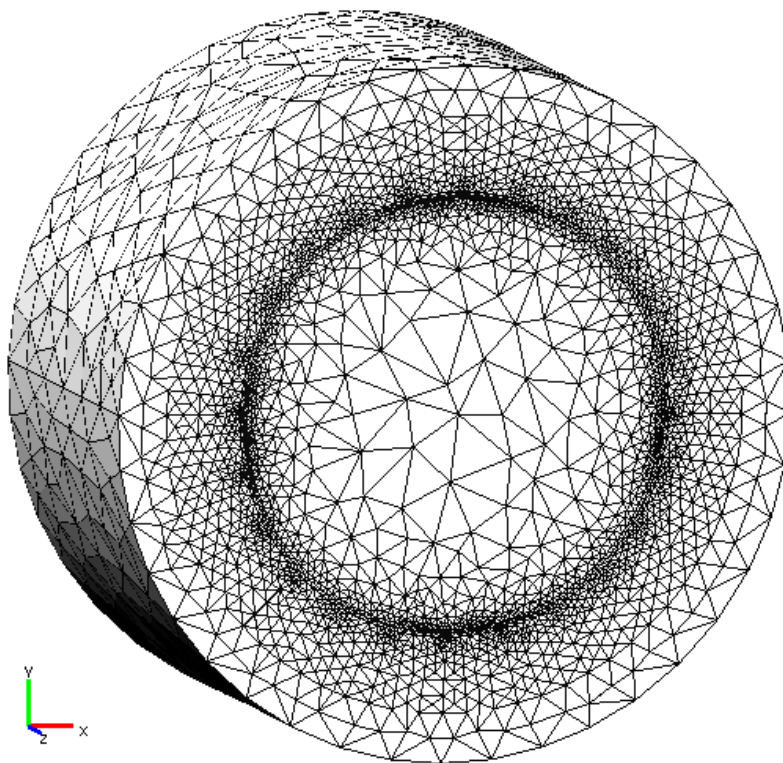


Рисунок 3.6 – Тривимірна кінцево-елементна сітка моделі

Запропоновано підхід до чисельного розрахунку електромагнітних процесів у електромеханічному перетворювачі з порожнистим феромагнітним ротором, сутність якого полягає в пошаровій дискретизації ділянок тривимірної кінцево-елементної моделі з метою отримання необхідної кількості шарів кінцевих елементів. Кінцево-елементна модель може бути використана при аналізі електромагнітних процесів у електромеханічних перетворювачах зі складною вторинної частиною. Це дозволить врахувати реальний тривимірний характер поля (викликаний особливостями конструкції та кінцевими осьовими розмірами), й відповідно, отримати більш адекватну розрахункову інформацію.

### 3.3 Результати дослідження статичних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором

Механічні характеристики АД з порожнистим феромагнітним ротором отримані за результатами параметричних розрахунків моделі. Змінним параметром є кутова частота обертання ротора, виражена через частоту струмів в пазах обмотки статора. Значення електромагнітного моменту для різних значень ковзання отримані з розв'язання рівнянь квазістаціонарного електромагнітного поля при відповідних значеннях струмового навантаження.

Таким чином, кожна точка механічної характеристики розраховується як окремий сталий режим. Механічна характеристика АД з гладким феромагнітним ротором отримана за результатами чисельного розрахунку, представлена на рис. 3.7.

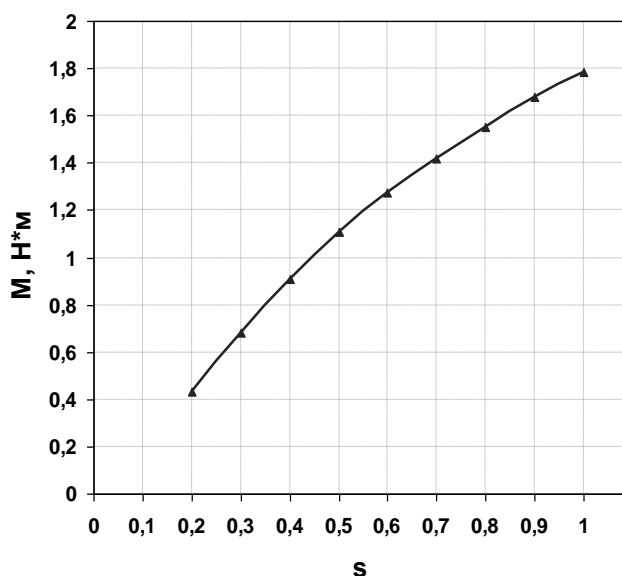


Рисунок 3.7 – Механічна характеристика АД з порожнистим гладким ротором

З представлених механічних характеристик видно, що двигун з короткозамкненим ротором має більший пусковий момент, ніж двигун з масивним ротором. Це можна пояснити тим, що в асинхронних машинах при

малих габаритних потужностях, величина відношення активної і реактивної складових первинного опору  $r_1/x_1$ , що визначає геометричне місце вторинного струму, стає більше одиниці. При середніх і великих габаритних потужностях ( $r_1/x_1 < 1$ ) практично завжди пусковий момент машини з масивним ротором більше пускового моменту звичайної асинхронної машини. У двигуні з гладким феромагнітним ротором величині номінального моменту відповідає ковзання  $s = 0,63$ . Значне номінальне ковзання викликане підвищеним активним опором порожнистого феромагнітного ротора в порівнянні з активним опором суцільного феромагнітного ротора. По мірі розгону АД із суцільним феромагнітним ротором, частота змінного магнітного потоку в роторі зменшується, а товщина шару, в якому протікають ВС, збільшується. Так, для двигунів з суцільним феромагнітним ротором потужністю від 50 Вт до 500 Вт номінальне ковзання знаходиться у межах від 0,3 до 0,4. У порожнистому феромагнітному роторі із збільшенням частоти обертання, товщина струмонесучого шару не перевищує товщини стінки циліндра, що обумовлює більший активний опір. Враховуючи велику кількість і різноманітність усіляких конструктивних варіантів ППР, обмежимося аналізом тільки окремих механічних характеристик, які дозволяють оцінити ступінь впливу конструктивних параметрів ППР на величину обертального моменту, а також характеристик, що представляють практичний інтерес. У подальшому викладі кількісне порівняння механічних характеристик проводитиметься з використанням системи відносних одиниць, в якій за базові прийняті значення номінального ( $M_{\text{ном}} = 1,34 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) і пускового ( $M_{\text{п}} = 1,79 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) моментів, відповідних АД з гладким ротором.

На рис. 3.8 представлено сімейство механічних характеристик АД з ППР при різній кількості рядів отворів. Отримані залежності моменту від ковзання для АД при різних значеннях  $Z_2$  мають вигляд, характерний для механічних характеристик АД з масивним ротором. Як видно з рис. 3.8, із збільшенням кількості рядів отворів (при  $n = \text{const}$ ,  $d = \text{const}$ ) величини моментів зменшуються практично при всіх значеннях ковзання.

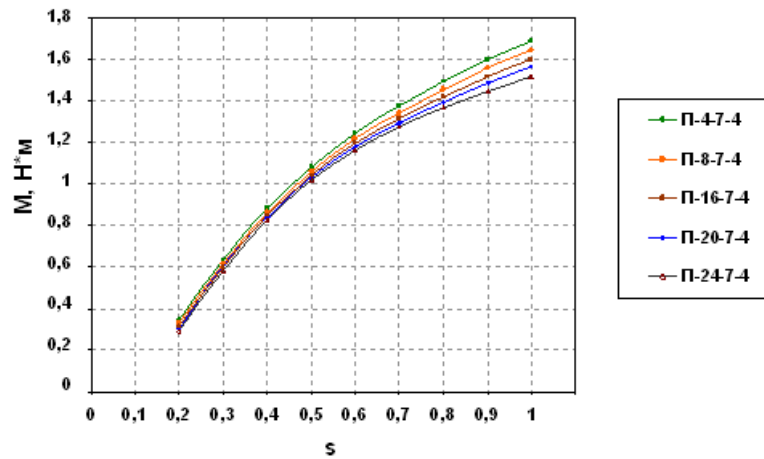


Рисунок 3.8 – Сімейство механічних характеристик АД з ППР при різних значеннях  $Z_2$  ( $n = 7$ ,  $d = 4$  мм)

При цьому із зростанням ковзання зменшення величини моменту проявляється помітніше. Так, для ППР, що має 24 ряди отворів, величина номінального моменту знижується на 9 %, а пускового на 15 %. Результати фізичного і чисельного експериментів показали, що вибір парної кількості рядів отворів (4, 8, 16, 20, 24, 40) при малій кількості отворів у ряду (1 – 4) діаметром від 2 мм до 4 мм дозволяє отримати механічну характеристику еквівалентну механічній характеристиці АД з гладким ротором.

Сімейства механічних характеристик АД з ППР при різній кількості отворів в ряду  $n$  ( $Z_2 = \text{const}$ ,  $d = \text{const}$ ) і різному діаметрі отворів  $d$  ( $Z_2 = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ) представлені відповідно на рис. 3.9. і 3.10.

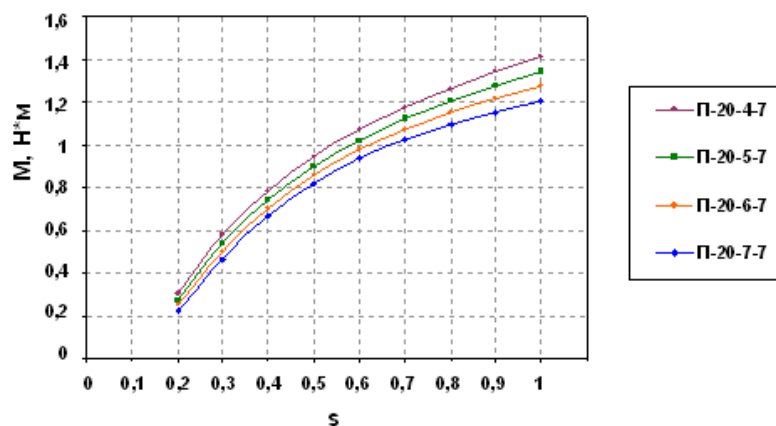


Рисунок 3.9 – Сімейство механічних характеристик АД з ППР при різних значеннях  $n$  ( $Z_2 = 20$ ,  $d = 7$  мм)

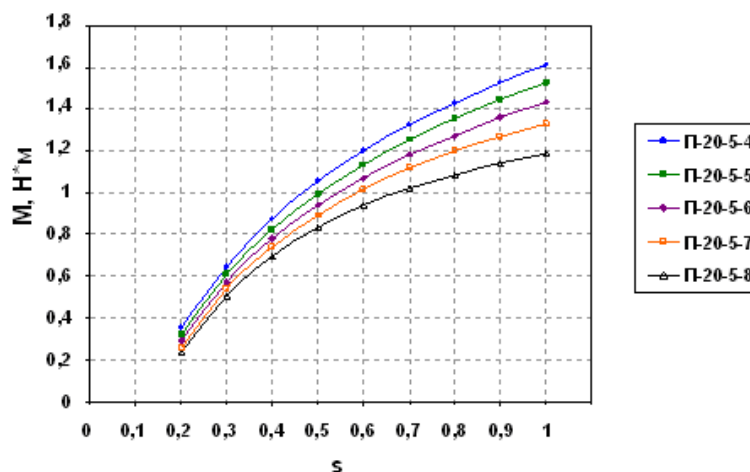


Рисунок 3.10 – Сімейство механічних характеристик АД з ППР при різних значеннях  $d$  ( $Z_2 = 20$ ,  $n = 5$  мм)

З представлених сімейств характеристик виходить, що збільшення кількості отворів в ряду і їх діаметру, також призводить до зниження моменту. При цьому, збільшення числа  $n$  на одиницю впливає на механічну характеристику майже так само, як і збільшення  $d$  на 1 мм. Покажемо вплив діаметру і кількості отворів в ряду на величину електромагнітного моменту АД з ППР на прикладі ротора з числом рядів отворів  $Z_2 = 20$ . На рис. 3.11 і 3.12 у вигляді графіків поверхні представлені залежності відповідно  $M_H^* = f(d; n)$  та  $M_H^* = f(d; n)$  при варіюванні діаметру і кількості отворів в ряду.

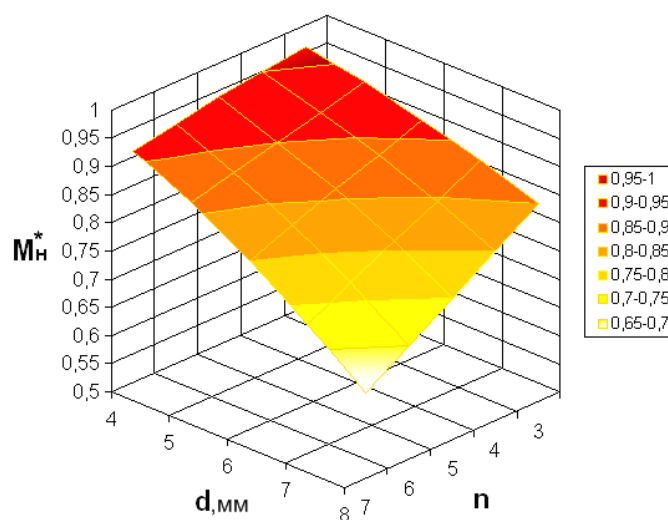


Рисунок 3.11 – Відносні значення номінального моменту АД з ППР при варіюванні діаметра та кількості отворів у ряду ( $Z_2 = 20$ )

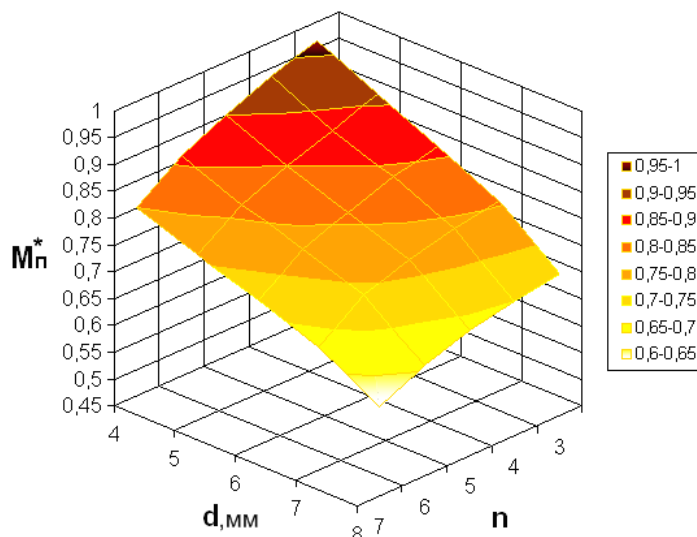


Рисунок 3.12 – Відносні значення пускового моменту АД з ППР при варіюванні діаметру та кількості отворів у ряду ( $Z_2 = 20$ )

Серія розрахунків для різних значень параметру  $n$  показала, що величина кроку перфорацій в ряду за інших рівних умов не впливає на механічну характеристику. Разом з ППР, що має прямі ряди отворів, практичний інтерес представляє використання ППР, отвори якого виконані рядами зі скосом, а також в шаховому порядку. На рис. 3.13 представлено сімейство механічних характеристик АД з ППР, ротор якого має скошені ряди отворів ( $Z_2 = 20$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ) для різних значень  $n$  та  $d$ .

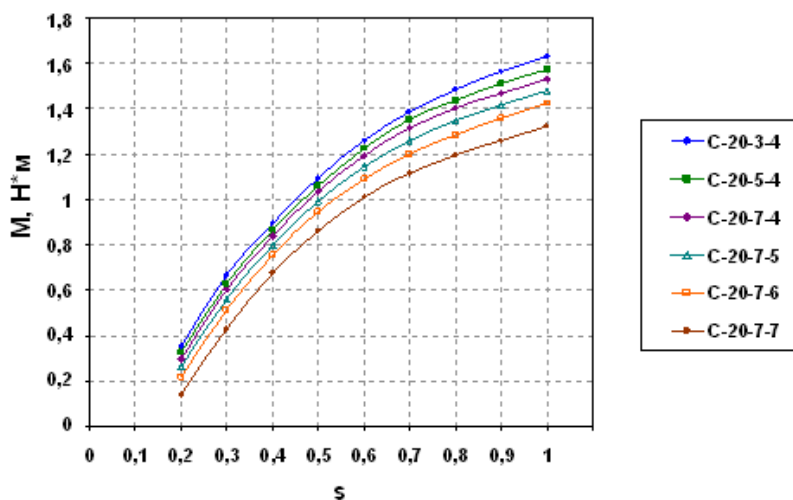


Рисунок 3.13 – Сімейство механічних характеристик АД з ППР при різних значеннях  $n$  та  $d$  ( $Z_2 = 20$ ,  $\alpha = 30^\circ$ )

Сімейство механічних характеристик для ротора з шаховим розташуванням отворів ( $Z_2 = 40$ ) при варіюванні тих самих параметрів представлено на рис. 3.14. Як і у випадку з ППР, що має прямі ряди, чим менше значення  $n$  та  $d$ , тим вище проходить відповідна механічна характеристика. Із розгляду усіх механічних характеристик витікає, що введення перфорацій ротора впливає на механічну характеристику АД з ППР подібно зниженню напруги на затискачах обмотки статора. Фізично такий результат пояснюється тим, що збільшення загальної площі отворів призводить до зростання магнітного опору ротора і, як наслідок до зниження магнітного потоку і активного струму ротора.

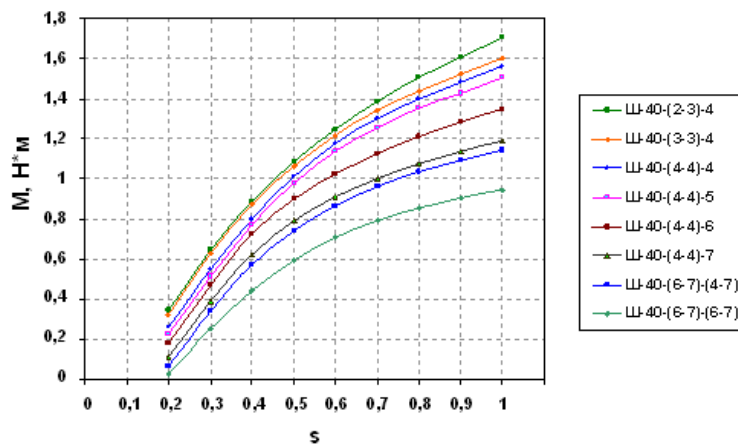


Рисунок 3.14 – Сімейство механічних характеристик АД з ППР при різних значеннях  $n$  та  $d$  ( $Z_2 = 40$ )

На рис. 3.15 – 3.17 представлені графіки, що містять у відносних одиницях дані про частку номінального і пускового моменту для всіх розглянутих конструктивних варіантів ППР по відношенню до номінального і пускового моменту двигуна з порожнистим гладким ротором. Графіки показують, що існує обернено пропорційна залежність між коефіцієнтом  $k_{перф}$  і моментом. При цьому, криві відносного номінального моменту з високою

точністю апроксимуються відповідними залежностями  $M_H^* = 1 - k_{перф}$  (на графіках показані штриховою лінією).

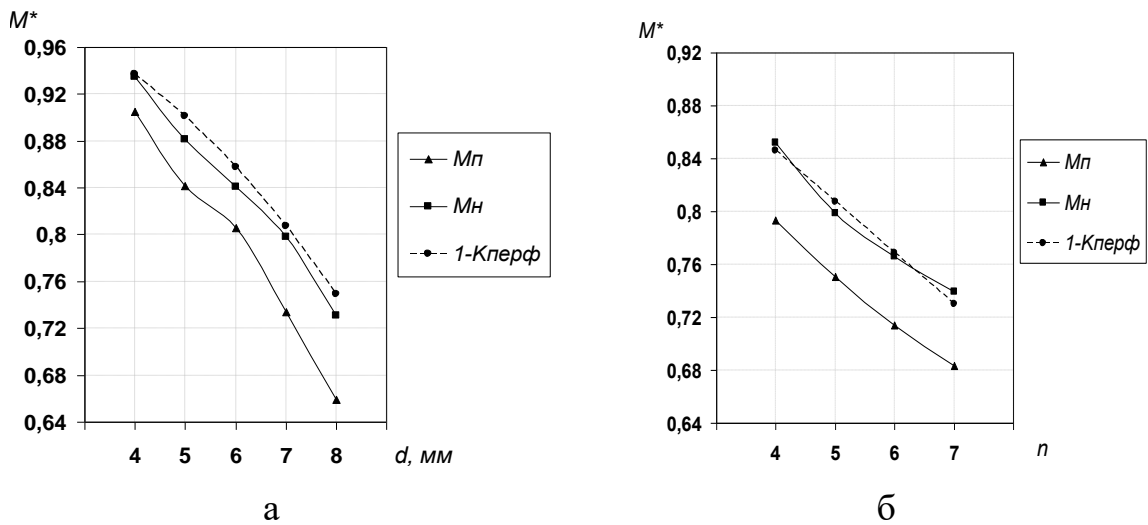


Рисунок 3.15 – Значення  $M_H^*$  та  $M_{II}^*$ : а) при зміні  $d$  (прямі ряди,  $Z_2 = 20$ ,  $n = 5$ ); б) при зміні  $n$  (прямі ряди,  $Z_2 = 20$ ,  $d = 7$ )

Подальше збільшення  $k_{перф}$  призводить до істотної зміни теплового режиму двигуна, що позначається на його механічній характеристиці і ускладнює оцінку експериментальних даних.

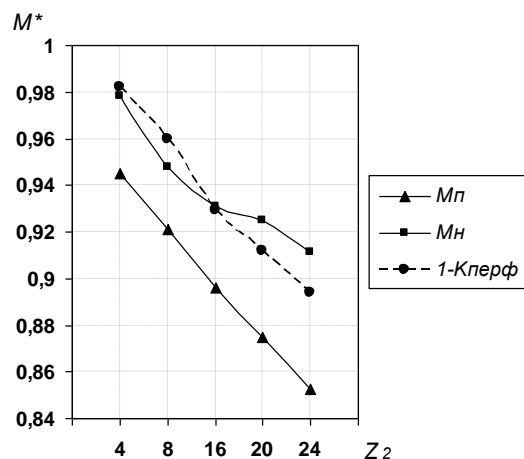


Рисунок 3.16 – Значення  $M_H^*$  та  $M_{II}^*$  при зміні  $Z_2$  (прямі ряди,  $n = 7$ ,  $d = 4$ )

Експериментально встановлено, що зазначена закономірність справедлива для переважної більшості розглянутих варіантів ППР з прямими

рядами в широкому діапазоні зміни  $k_{перф}$  від 0,02 до 0,6. Для двигуна з ротором, отвори якого виконані рядами зі скосом, а так само в шаховому порядку, значення залежності  $M_H^* = 1 - k_{перф}$  приймають проміжні положення по відношенню до значень відносного номінального і пускового моментів.

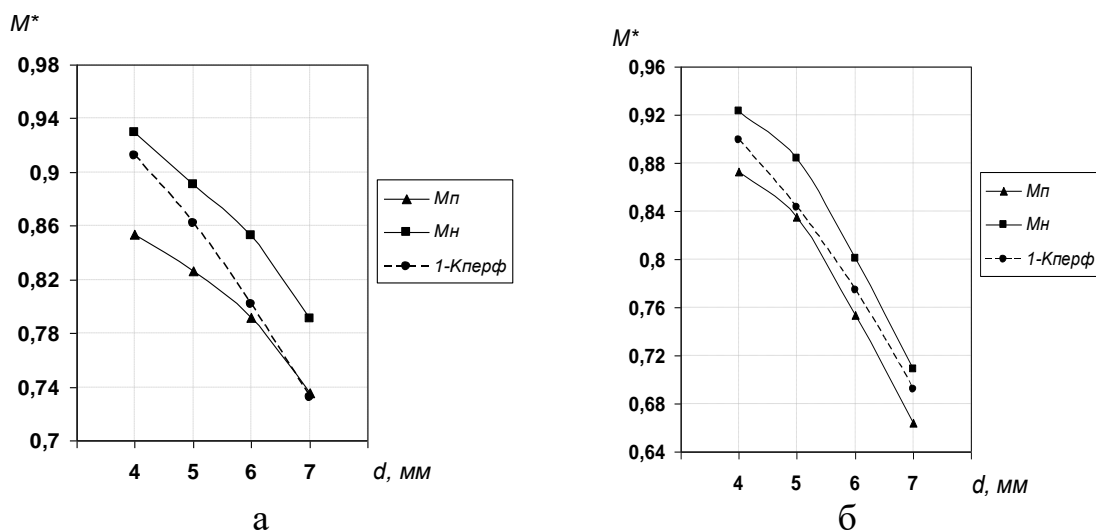


Рисунок 3.17 – Значення  $M_n^*$  та  $M_p^*$ : а) при зміні параметру  $d$  (ряди зі скосом,  $Z_2 = 20, n = 7$ ); б) при зміні параметру  $d$  (шахове розташування,  $Z_2 = 40, n = 4$ )

Таким чином, виконання двох різних ППР з рівними значеннями коефіцієнта  $k_{перф}$  дозволяє отримати практично однакові величини електромагнітного моменту (в області номінальних ковзань) незалежно від обраного типу схеми перфорацій і конструктивних параметрів.

### 3.4 Висновки до 3 розділу

Введення перфорацій ротора впливає на механічну характеристику АД з ППР подібно зниженню напруги на затискачах обмотки статора. Фізично такий результат пояснюється тим, що збільшення загальної площі отворів призводить до зростання магнітного опору ротора і, як наслідок до зниження магнітного потоку і активного струму ротора.

Отримані результати показують, що існує обернено пропорційна залежність між коефіцієнтом  $k_{перф}$  і моментом. При цьому, криві відносного номінального моменту з високою точністю апроксимуються відповідними залежностями  $M_H^* = 1 - k_{перф}$  (на графіках показані штриховою лінією). Експериментально встановлено, що зазначена закономірність справедлива для переважної більшості розглянутих варіантів ППР з прямими рядами в широкому діапазоні зміни  $k_{перф}$  від 0,02 до 0,6.

## 4 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДИНАМІЧНИХ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОРОЖНИСТИМ РОТОРОМ

### 4.1 Математична модель динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором

Як відомо, аналіз динамічних режимів АД з феромагнітним ротором може бути виконаний з використанням теорії узагальненої електричної машини, в основі якої лежить заміна реальної машини – дво полюсною двофазною симетричною ідеалізованою машиною із взаємно ортогональними обмотками на статорі та на роторі (рис. 4.1).

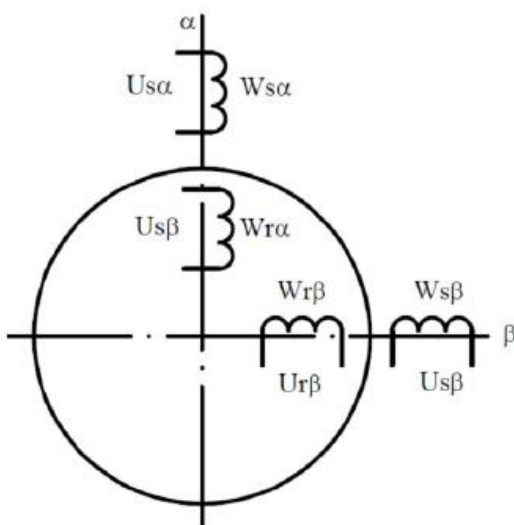


Рисунок 4.1 – Узагальнена електрична машина

Для такої машини справедлива система рівнянь (4.1) – (4.3), що складається з рівнянь Кірхгофа, рівняння електромагнітного моменту та рівняння руху. Індуктивності обмоток розраховуються з використанням відомих виразів. Важливою особливістю системи рівнянь (4.1) є залежність параметрів вторинного ланцюга від ковзання, точне встановлення яких на

основі теорії узагальненої електричної машини неможливе. Для встановлення цих залежностей доцільне застосування методів польового аналізу.

Дослідження впливу отворів феромагнітного ротора на форму динамічної механічної характеристики проводилося з урахуванням порівняння показників АД з гладким і перфорованим ротором, отриманих у середовище «Matlab-Simulink». Основними відмінностями, які обумовлені наявністю перфорацій ротора та вимагають обліку при розрахунку механічних характеристик АД з гладким та перфорованим ротором є значення параметрів феромагнітного ротора та його момент інерції. Оцінка конкретного розподілу вихрових струмів як по товщині, так і вздовж осі ротора необхідна для розрахунку та проектування. Разом з тим, саме характер розподілу вихрових струмів визначає величину активного опору масивного ротора, який відіграє першорядну роль у формуванні вихідних характеристик та властивостей двигуна із порожнистим ротором.

Активний опір гладкого та перфорованого роторів визначався за результатами чисельного експерименту для різних значень ковзання (рис. 4.2).

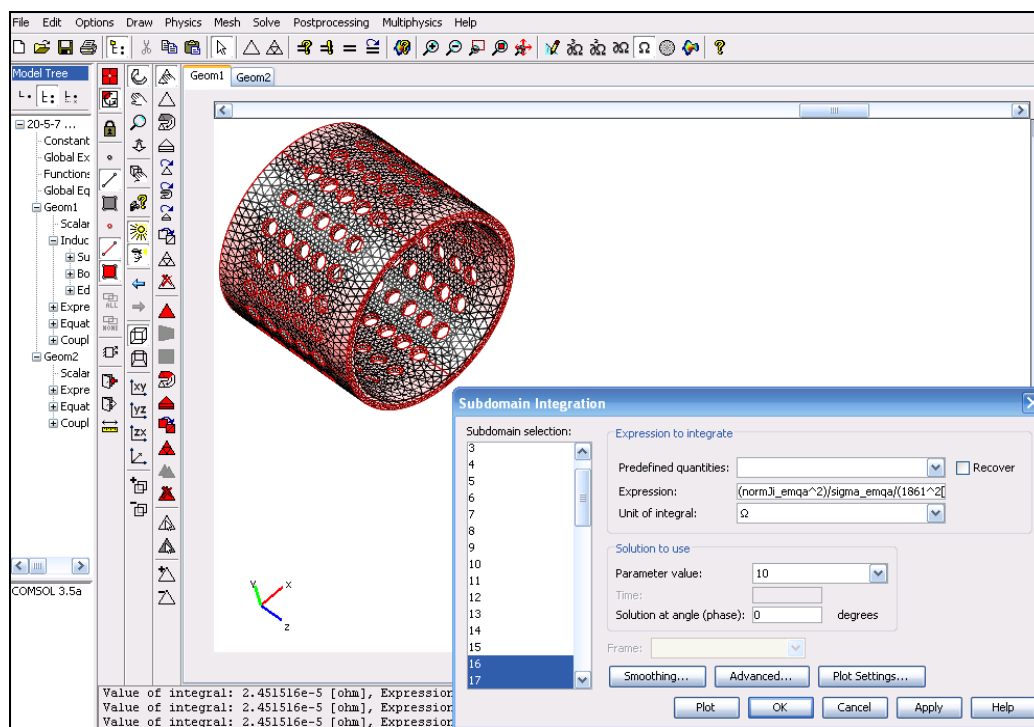


Рисунок 4.2 – Визначення активного опору ротора

Індуктивний опір розраховувався виходячи з відомого співвідношення для феромагнітного ротора [7]. Розрахунок значень моментів інерції виконувався з урахуванням тривимірних геометричних моделей гладкого і перфорованого ротора за допомогою вбудованої функції «Subdomain Properties» програми «Comsol Multiphysics».

На рис. 4.3 представлена структура моделі для дослідження динамічних механічних характеристик АД з порожнистим феромагнітним ротором, що працює у складі теплогенераційної системи. Власне, модель об'єкта дослідження згорнута у підсистему (Subsystem), що живиться від джерела (Source). Для вимірювання та побудови залежностей моменту та швидкості служать блоки Scope та Graph. Блок Lookup Table служить для завдання моменту навантаження.

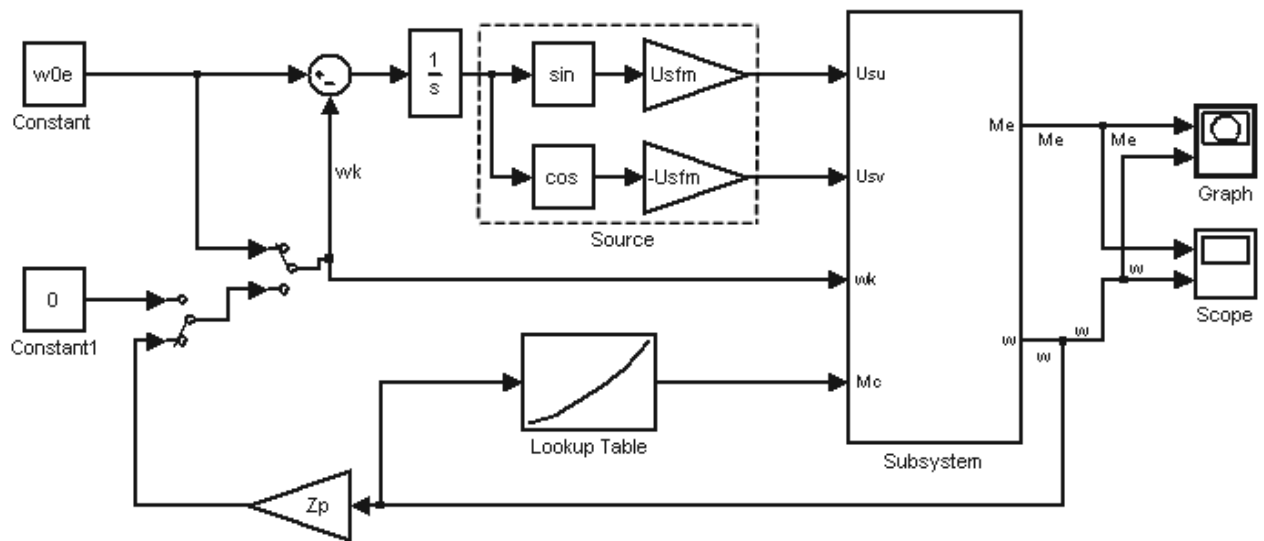


Рисунок 4.3 – Структура моделі для дослідження динамічних механічних характеристик

Навантаження такого АД визначається опором гідравлічної системи, на яку він працює. Зі зміною розходу змінюється також внутрішній опір системи, що призводить до втрати тиску. Перетин трубопроводів можна розглядати як площу живого перерізу потоку, опір змінюється квадратично.

Система рівнянь (4.1), що описує процеси перетворення енергії, складається з чотирьох рівнянь Кірхгофа для чотирьох обмоток.

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s\alpha} + \frac{d}{dt} L_{s\alpha} & \frac{d}{dt} M & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} M & r_{r\alpha} + \frac{d}{dt} L_{r\alpha} & L_{r\beta} \omega_r & M \omega_r \\ -M \omega_r & -L_{r\alpha} \omega_r & r_{r\beta} + \frac{d}{dt} L_{r\beta} & \frac{d}{dt} M \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt} M & r_{s\beta} + \frac{d}{dt} L_{s\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}; \quad (4.1)$$

$$M_e = M(i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}); \quad (4.2)$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_e - M_o(s), \quad (4.3)$$

де  $u_{s\alpha}, u_{s\beta}, u_{r\alpha}, u_{r\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  – відповідно напруги та струми в обмотках статора та ротора по осях  $\alpha$  та  $\beta$ ;

$r_{s\alpha}, r_{s\beta}, r_{r\alpha}, r_{r\beta}$  – активні опори обмоток статора та ротора;

$M$  – взаємна індуктивність;

$L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}$  – повні індуктивності обмоток статора та ротора по осях  $\alpha$  та  $\beta$ ;

$M_o(s)$  – функціональна залежність моменту опору від ковзання.

Для машин з вентиляторним навантаженням, що плавно зростає по мірі збільшення швидкості момент опору, може бути представлений у вигляді нелінійної функції:

$$M_o(s) = M_p \cdot \left( \frac{n}{n_H} \right)^2 + M_{co}, \quad (4.4)$$

де  $M_p$  – розрахунковий момент опору при  $n = n_H$ ;  $M_{co}$  = від 0,05  $M_p$  до 0,1  $M_p$ .

## 4.2 Результати дослідження динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором

Безумовно, основним фактором, що визначає відмінності механічних характеристик АД з гладким та перфорованим ротором, є значення активного та індуктивного опору ротора. Введення перфорацій ротора призводить до переміщення характеристики АД вниз паралельно до самої себе.

На рис. 4.4 представлені динамічні механічні характеристики АД з гладким і перфорованим ротором, що наочно демонструють процес пуску при вентиляторному навантаженні. З результатів моделювання видно, що характеристика АД з перфорованим порожнистим ротором знаходить робочу точку при менших значеннях моменту і швидкості, відповідно його робота супроводжуватиметься великими втратами і нагріванням.

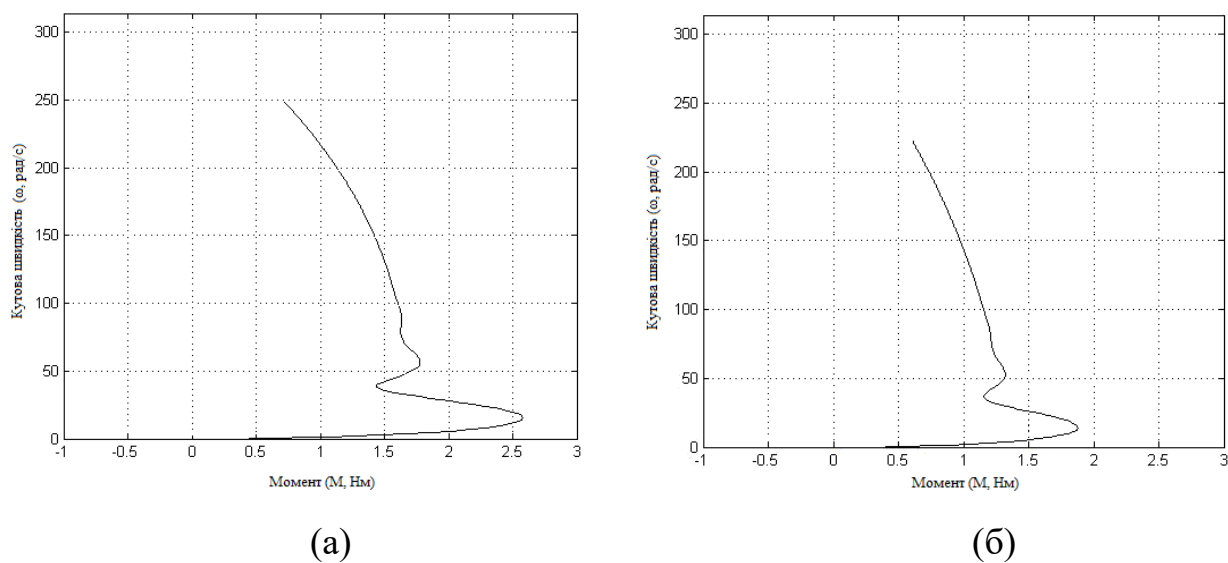


Рисунок 4.4 – Динамічні механічні характеристики АД:

з порожнистим гладким ротором (а); з порожнистим перфорованим ротором (б)

Початок пуску АД супроводжується сплеском моменту та нетривалими за часом його пульсаціями (рис. 4.5), які мають більш виражений характер для АД з гладким ротором.

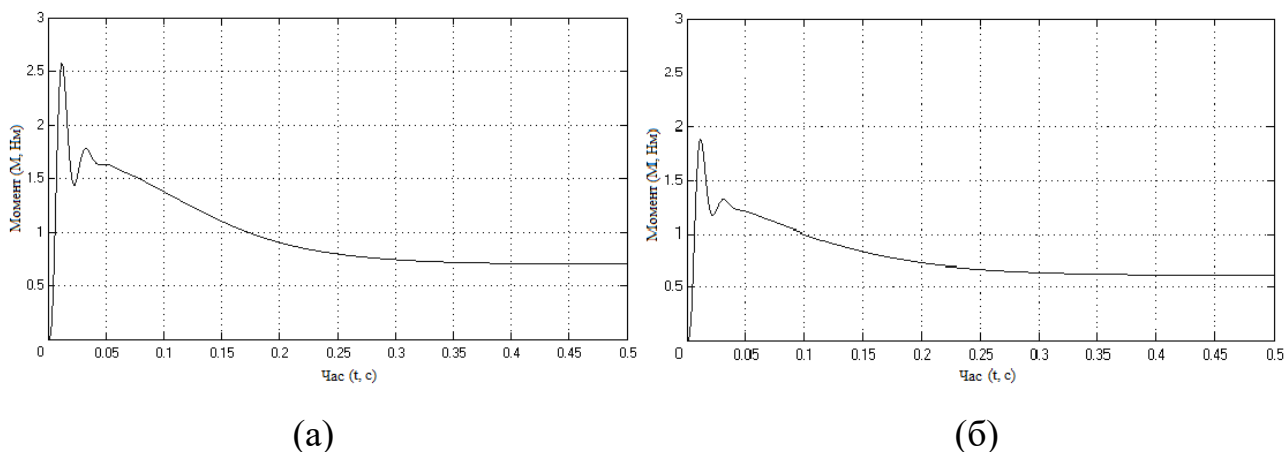


Рисунок 4.5 – Залежності  $M = f(t)$  при пуску АД:

з порожнистим гладким ротором (а); з порожнистим перфорованим ротором (б)

Амплітуда пускового моменту АД з перфорованим ротором на 27 % менше значення амплітуди пускового моменту АД з гладким ротором. При цьому час виходу на сталий режим для обох випадків практично однаковий і становить близько  $t_y \approx 0,4$  с. Залежності кутової швидкості обертання гладкого і перфорованого ротора АД від часу представлені на рис. 4.6. В обох випадках процес розгону є швидким та протікає практично без пульсацій.

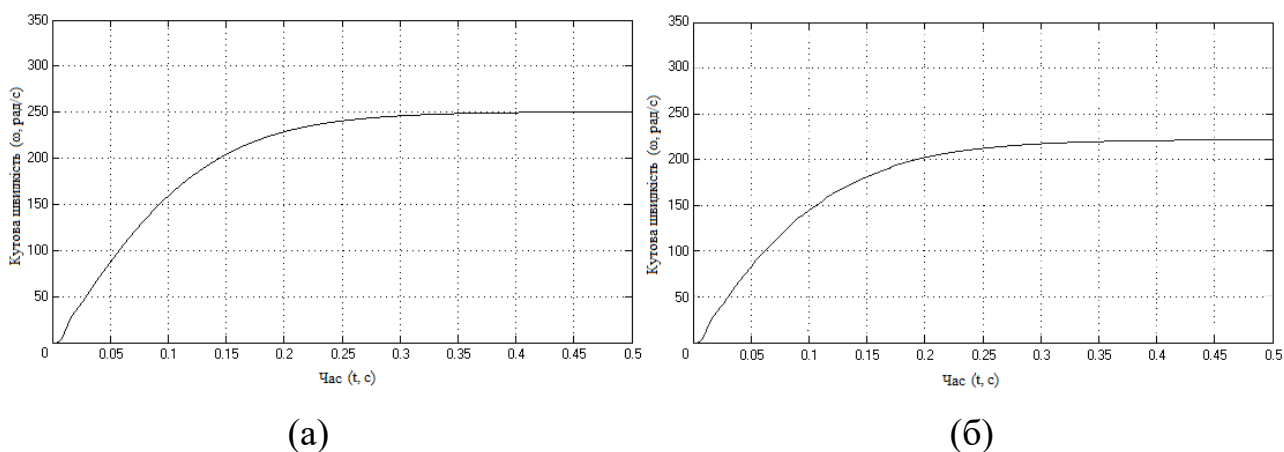


Рисунок 4.6 – Залежності  $\omega = f(t)$  при пуску АД:

з порожнистим гладким ротором (а); з порожнистим перфорованим ротором (б)

На рис. 4.7 для порівняння представлені часові залежності електромагнітного моменту (а) та кутової швидкості обертання (б) ротора базового АД при пуску з вентиляторним навантаженням.

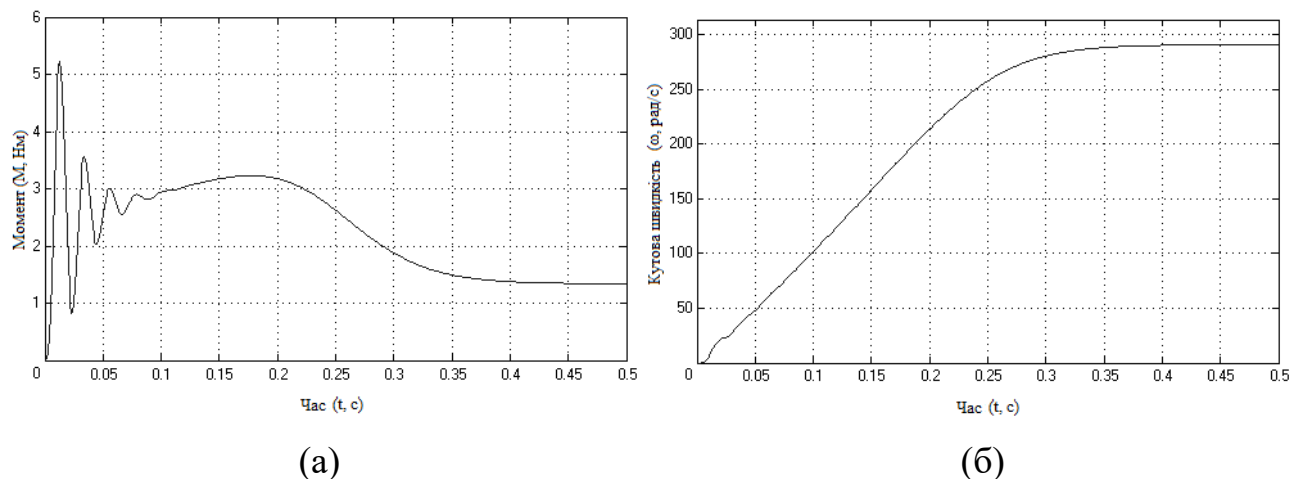


Рисунок 4.7 – Залежності  $M = f(t)$  та  $\omega = f(t)$  базового АД при пуску із вентиляторним навантаженням

У порівнянні з пуском базового асинхронного двигуна, пуск АД з порожнистим феромагнітним ротором суттєво відрізняється меншою амплітудою та кількістю пульсацій ударного електромагнітного моменту. Таким чином, пуск АД з порожнистим феромагнітним ротором можна розглядати як більш м'який, а отже, більш сприятливий з точки зору зниження гідравлічних ударів та механічних навантажень на робочий орган.

Запропоновано підхід до розрахунку динамічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим феромагнітним ротором, що полягає у поєднанні методу теорії узагальненої електричної машини з чисельним рішенням методом кінцевих елементів у тривимірній постановці. Даний підхід апробований шляхом зіставлення розрахункових та дослідних даних, отриманих для фізичної моделі двигуна з порожнистим феромагнітним ротором.

### 4.3 Пожежна безпека на підприємстві, де експлуатується асинхронний двигун з порожнистим ротором

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 відвернення 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 пожежогасіння, 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 м<sup>3</sup>;
- бочки для зберігання води місткістю не менше 0,2 м<sup>3</sup>;
- 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.

#### 4.4 Висновки до 4 розділу

У порівнянні з пуском базового асинхронного двигуна, пуск АД з порожнистим феромагнітним ротором суттєво відрізняється меншою амплітудою та кількістю пульсацій ударного електромагнітного моменту. Таким чином, пуск АД з порожнистим феромагнітним ротором можна розглядати як більш м'який, а отже, більш сприятливий з точки зору зниження гідравлічних ударів та механічних навантажень на робочий орган.

Запропоновано підхід до розрахунку динамічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим феромагнітним ротором, що полягає у поєднанні методу теорії узагальненої електричної машини з чисельним рішенням методом кінцевих елементів у тривимірній постановці. Розглянуто питання з пожежної безпеки на підприємстві, де експлуатується асинхронний двигун з порожнистим ротором

## ВИСНОВКИ

За результатами виконання кваліфікаційної роботи вирішено наступні завдання:

- визначено актуальність питання генерації теплової енергії;
- виконано огляд конструкцій електромеханічних перетворювачів, що працюють в системах нагріву рідин;
- розглянуто математичну модель та розроблено підхід до чисельного моделювання механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- виконано дослідження статичних та динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором;
- розглянуто питання з пожежної безпеки на підприємстві, де експлуатується асинхронний двигун з порожнистим ротором.

У результаті багатоваріантних кінцево-елементних розрахунків отримано механічні характеристики АД при варіюванні діаметра та кількості перфорацій порожнистого ротора. Отримані залежності свідчать про те, що введення перфорацій ротора впливає на механічну характеристику двигуна подібно зниженню напруги на виводах обмотки статора. На основі чисельних та фізичних експериментів встановлено закономірність, що визначає вплив ступеня перфорації порожнистого феромагнітного ротора на величину електромагнітного моменту. Криві відносного номінального моменту з високою точністю апроксимуються відповідними залежностями  $M_H^* = 1 - k_{перф}$ . Експериментально встановлено, що зазначена закономірність справедлива для переважної більшості розглянутих варіантів перфорованого ротора з прямими рядами у широкому діапазоні зміни  $k_{перф}$  від 0,02 до 0,6). Подальше збільшення  $k_{перф}$  призводить до суттєвої зміни теплового режиму двигуна, що позначається на його механічній характеристиці та ускладнює оцінку експериментальних даних.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 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).

2. 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.

3. 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.

4. Грицюк В., Тимофєєва О., Редюхін М., Пільгуй К. Чисельний розрахунок характеристик асинхронного двигуна з порожнистим ротором для систем автономного теплопостачання. *Виробництво & Мехатронні системи* : матеріали V Міжнародної конференції. Харків, 2021. С. 39–41.

5. Варшавский А. С., Волкова Л. В., Костылев В. А. Бытовые нагревательные приборы (конструкция, расчёты, испытания) : учебник. Москва : Энергоиздат, 1981. 328 с.

6. Ленский А. Р. Перспективы развития конструкций проточных электроводонагревателей. *Электротехническая промышленность. Бытовая электротехника*. 1977. № 5 (42). С. 5–7.

7. Гольцман Д. А., Бончковская Л. В. Применение электроэнергии для горячего водоснабжения и отопления жилых зданий. *Водоснабжение и санитарная техника*. 1976. №1. С. 30–33.

8. Кузьмин В. М. Трансформаторы для устройств электронагрева : автореф. дис. на получение научн. степени д-ра техн. наук : 05.09.01. Томск, 2002. 38 с.

9. Кузьмин В. М., Амосов О. С., Иванов С. Н., Еськова А. В. Разработка конструкций энергосберегающих электро-тепловых генераторов. *Энергосберегающие и природоохранные технологии* : материалы III междунар. научно-практ. конф. Улан-Удэ, 2005. № 7. С. 217–225.

10. Ёлшин А. И. Экономические предпосылки к использованию электроотопления. *Электронагреватели трансформаторного типа*. Новосибирск, 1997. С. 5–8.

11. Кузьмин В. М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа. Владивосток : Дальнаука, 2001. 144 с.

12. Заблодский Н. Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения : монография. Алчевск : ДонГТУ, 2008. 295 с.

13. Иванов С. Н. Электротехнические перекачивающие устройства на основе электромеханических теплогенерирующих преобразователей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03. С-Пб, 2010. 367 с.

14. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь: пат. 65336 Россия: МПК7 Н 05 В 6/10, F 25 В 29/00; № 2007109832/22; заявл. 16.03.2007; опубл. 27.07.2007, Бюл. № 21. 6 с.

15. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь: пат. 65335 Россия: МПК7 Н 05 В 6/10, F 25 В 29/00; № 2007109830/22; заявл. 16.03.2007; опубл. 27.07.2007, Бюл. № 21. 8 с.

16. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь: пат. 87855 Россия: МПК7 Н 05 В 6/10; № 2008115841/22 ; заявл. 21.04.2008; опубл. 20.10.09, Бюл. № 29. 12 с.

17. Резонансный насос-теплогенератор: пат. 43346 Украина: F 24 J 3/00; № u200903007 ; заявл. 30.03.2009; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15. 8с.

18. Резонансный насос-теплогенератор: пат. 69754 Украина: F 24 J 3/00; № u201112971; заявл. 04.11.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. 7с.

19. Резонансный насос-теплогенератор: пат. 70031 Украина: F 24 J 3/00; № u201113156; заявл. 08.11.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10. 12с.

20. «Вечный источник» дармовой электроэнергии на основе вакуумной радиолампы с автоэлектронной эмиссией. URL: <http://www.new-energy21.ru/novaya-energetika/vechniy-istochnik-elektroe-nergii-na-osnove-istochnika-elektricheskogo-polya-i-vakuumnoy-radiolampyi-s-a.html>. (дата звернения: 30.10.2021).

21. Запорожец Е. П., Холпанов Л. П., Зиберт Г. К., Артемов А. В. Исследование вихревых и кавитационных потоков в гидравлических системах. *Теор. основы хим. технологии*. 2004. Т. 38, № 3. С. 243-252.

22. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика: монография. Москва : Машиностроение, 2001. 260 с.

23. Могут ли гидродинамические теплогенераторы работать сверхэффективно? URL: <http://ecoteplo.ahosta.ru/prensa/Furmakow.htm>. (дата звернения: 15.10.2021).

24. Кавитатор для тепловыделения в жидкости: пат. 2126117 Россия: МПК7 F 24 J 3/00; № 97118384/06; заявл. 10.11.97; опубл. 10.02.99, Бюл. № 4. 6 с.

25. Автономная система отопления для здания : пат. 2162990 Россия: МПК7 F 24 D 11/00, F 24 D 15/02, F 24 J 3/00; № 2000117602/06; заявл. 06.07.2000; опубл. 10.02.2001, Бюл. № 4. 7 с.

26. Кавитационный энергопреобразователь: пат. 2224957 Россия: МПК7 F 24 J 3/00; № 2001104604/06; заявл. 21.02.2001; опубл. 27.02.2004, Бюл. № 6. 8 с.

27. Торковый теплогенератор: пат. 2338130 Россия: МПК7 F 24 J 3/00; № 2006141659/06; заявл. 27.11.2006; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11. 5 с.

28. Теплогенератор приводной кавитационный: пат. 2201562 Россия: F 24 J 3/00; № 99110538/06; заявл. 19.05.1999; опубл. 27.03.2003, Бюл. №9. 10 с.

29. Способ нагревания жидкости и устройство для его осуществления: пат. 2150055 Россия: МПК7 F 24 J 3/00; № 96104366/06 ; заявл. 18.04.1995; опубл. 27.05.2000, Бюл. № 15. 15 с.

30. Кавитационно-вихревой теплогенератор: пат. 2235950 Россия: МПК7 F 24 J 3/00; № 2002119773/06; заявл. 22.07.2002; опубл. 10.09.2004, Бюл. № 25. 10 с.

31. Apparatus for heating fluids: pat. 5188090 USA: F 24 C 9/00; № 682003; filed 08.04.1991; date of patent 23.02.1993. 16 p.

32. Теплогенератор и устройство для нагрева жидкости: пат. 2045715 Россия: МПК7 F 25 В 29/00; № 93021742/06; заявл. 26.04.1993; опубл. 10.10.1995, Бюл. № 11. 6 с.

33. Фоминский Л. П. Как работает вихревой теплогенератор Потапова : учебник. Черкассы : Око-плюс, 2001. 103 с.

34. Потапов Ю. С., Фоминский Л. П., Потапов С. Ю. Успехи вихревой теплоэнергетики. *Фундаментальные проблемы естествознания и техники*. 2002. Ч. 1. С. 348–356.

35. Способ получения тепла: пат. 2165054 Россия: МПК7 F 24 J 3/00; № 2000115268/06; заявл. 16.06.2000; опубл. 10.04.2001, Бюл. № 5. 8 с.

36. Способ получения энергии и резонансный насос-теплогенератор: пат. 2142604 Россия: МПК6 F 24 J 3/00; № 98102707/06; заявл. 26.01.1998; опубл. 10.12.1999, Бюл. № 2. 12 с.

37. Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two currents of fluids at different temperatures: pat. 1952281 USA; № 646020; application 06.12.1932; patented 27.03.1934. 6 p.

38. Фурмаков Е. Ф. Выделение тепла при изменении фазового равновесия в струе воды. *Фундаментальные проблемы естествознания*. 1999. Т 1. С. 82–94.

39. Потапов Ю. С., Фоминский Л. П. Вихревая энергетика : учебник. Кишинев – Черкассы : Око-плюс, 2000. 387 с.

40. Способ получения энергии в жидкости, теплогенератор и теплоэнергетическая установка: заявка на патент Россия: МПК7 F 24 J 3/00; № 2001121071/06; заявл. 23.11.1999; 14 с.

41. Прусов П. Д. Эффект Кочеткова. *Фундаментальные проблемы естествознания и техники*. 2003. Ч 3. С. 59–63.

42. Шипов Г. И. Теория физического вакуума. Москва : НТ – Центр, 1993. 362 с.

43. Экономические аспекты применения роторно-кавитационных теплогенераторов в системах автономного отопления. URL: <http://www.rtggenera-tor.com.ua/index.php?limitstart=40>. (дата звернення: 07.09.2021).

44. Гидродинамический нагреватель для отопления и горячего водоснабжения. URL: <http://tekmash.spravka.ua/products/2.html> (дата звернення: 12.11.2021).

45. Next generation in mixing and heating technology. URL: <http://hollandapt-blog.com> (дата звернення 01.11.2021).

46. Вихревые теплогенераторы. URL: [www.otopiteli.nm.ru](http://www.otopiteli.nm.ru) (дата звернення 03.09.2021).

47. Бутусов К. П. Вихревые теплонагреватели, цены и технические характеристики. *Новая Энергетика*. 2004. № 3. С. 82–83.

48. Как повысить эффективность вихревых нагревателей жидкости. URL: <http://energyua.com/2007/06/22/793.html> (дата звернення 10.11.2021).

49. Кавитационные технологии. URL: <http://www.eemkzn.ru/plazmohimtech/kavtech/> (дата звернення 18.11.2021).

50. Принцип кавитационного нагрева меняет представление о добыче тепловой энергии. URL: <http://energobelarus.by/articles/2719/95114/Products/> (дата звернення 15.09.2021).

51. Установка кавитационного нагрева и модификации жидкого топлива проточного типа УКНТ. URL: [http://www.jet2008.na-rod.ru/HTMLs/cav\\_f4.html](http://www.jet2008.na-rod.ru/HTMLs/cav_f4.html). (дата звернення 01.10.2021).

52. Отопление домов. Вихревые теплогенераторы. URL: <http://stroyprice.com/publications/1114.html> (дата звернення 25.10.2021).

53. Вихревые теплогенераторы (термеры): проблемы и перспективы. URL: <http://deger.com.ua/article/vortex-heat-thurmer-problems-and-prospects/> (дата звернення 30.10.2021).

54. Мамалыга В. М. Практически важные задачи сбережения энергии, потребляемой машинами и механизмами с электроприводом, и принцип достаточности. *Энергетика и электрификация*. 2000. № 5. С. 40–44.