

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ НАПРЯМОК
ІНЖЕНЕРНО-ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ СПЕЦІАЛІЗАЦІЙНИЙ НАПРЯМОК
ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 631.371:621.31

ПОГОДЖЕНО

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Директор Інституту енергетики,
автоматики і енергозбереження

Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

проф., д.т.н.

КАПЛУН В.В.

доц., в.т.н.

ОКУШКО О.В.

(підпис)

(підпис)

« » 2023 р.

« » 2023 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ НАПРЯМОК
ІНЖЕНЕРНО-ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ СПЕЦІАЛІЗАЦІЙНИЙ НАПРЯМОК
ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАНСНИЙ НАСОС ТЕПЛОГЕНЕРАТОР
ДЛЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ»

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

Усенко С.М.

(підпис)

(ПІБ)

Керівник магістерської роботи

д.т.н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

Заблодський М.М.

(підпис)

(ПІБ)

Виконав

Орлов Е.М.

(підпис)

(ПІБ)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ НАПРЯМОК
ІНЖЕНЕРНО-ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ СПЕЦІАЛІЗАЦІЙНИЙ НАПРЯМОК
ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

КИЇВ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРТЕХНІКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

НУБІП України

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

НУБІП України

к.т.н., доц. Окушко О.В.
(підпис) « » 2023 р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ

НУБІП України

Орлову Едуарду Миколайовичу

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської роботи: «Електричний резонансний насос-теплогенератор для систем автономного теплопостачання»

затверджена наказом ректора НУБІП України від 06.03.2023 № 324”С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 05.11.2023

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Всебічне вивчення патентно-кон'юктурної та прикладної бази закордонного і вітчизняного досвіду з енергоощадних технологій та обладнання систем автономного теплопостачання.
2. Розробка удосконаленого електричного резонансного насоса-теплогенератора для систем автономного теплопостачання.
3. Дослідження електродинамічних процесів і обґрунтування режимних параметрів електромагнітної системи електричного резонансного насоса-теплогенератора .
4. Питання охорони праці при роботі в системах автономного теплопостачання .

Перелік графічного матеріалу – презентація – наочні матеріали з результатами дослідження, алгоритми розрахунків і таблиці з отриманими результатами.

Дата видачі завдання 07.03.2023

Керівник магістерської роботи _____

Заблодський М.М.

(підпис)

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____

Орлов Е.М.

(підпис)

(ПІБ)

НУБІП України

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ І ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В СИСТЕМАХ НАГРІВУ ТА ПЕРЕМІЩЕННЯ 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 і т.п. 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 30-40 % 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. Найтрадиційніші джерела теплової потужності – це твердопаливні котли. Вони незручні в обслуговуванні, вимагають постійного нагляду за топочною камерою, завантаження палива, «шурування» палаючого слою, прибирання золи тощо. Більш привабливими, особливо з погляду економічності, є газові котли. Тим не менш, ця перевага безпосередньо залежить від цін на природний газ, а перехід на світові ціни може збільшити витрати на енергоносії майже

в 5 разів, і зробити середньорічні витрати на експлуатацію газових котлів порівнянними з рідиннопаливними і електричними. Тому в ряді країн, у тому числі з широкою газифікацією (США, Франція та ін.), все частіше застосовують електричний нагрів. Одна з головних причин цього – прагнення виробників електроенергії заповнити нерівномірність добового графіку навантаження енергосистем ввімкненням теплоакumuлюючих електронагрівачів у нічний час. В Англії, Німеччині та інших країнах, де нічний «провал» особливо сильно виражений і майже немає пікових електростанцій, з метою заохочення використання теплоакumuляційних електроводонагрівачів встановлена система тарифів на електроенергію, диференційованих по годинах доби. У країнах, багатих ресурсами гідроенергії (Норвегія, Швеція, Швейцарія, Ісландія, та ін.), багато електроенергії витрачається на низькотемпературний нагрів, при цьому річні витрати теплової енергії, в порівнянні з неконтрольованим централізованим споживанням, скорочується майже в два рази.

На теперішній час існує досить багато типів різного теплоенергуючого обладнання використовуваного як установки автономного теплопостачання, однак, найчастіше знаходять застосування установки, що перетворюють електричну енергію в теплову [1-3]. Класифікація приладів електронагріву за типом виконавчих пристроїв представлена на рисунку 1.1. Дані установки характеризуються високою екологічністю, безпекою, низькими втратами теплової енергії (внаслідок відсутності необхідності використання протяжних теплоtras), 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, пожежобезпека. До переваг цих пристроїв відносяться простота конструкції, невисока вартість, а також можливість швидко легко замінити.



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 індуктування в ньому змінним магнітним полем вихрових струмів (ВС). Установки індукційного типу характеризуються високим ступенем безпеки, однак мають невисокі енергетичні показники [4, 5].

До перспективних типів пристроїв електронагріву відносяться електронагрівачі трансформаторного типу, що представляють собою трансформатор з короткозамкненою вторинною обмоткою. Вони відрізняються простою конструкцією, а також високими показниками надійності і електробезпеки при експлуатації [4, 6, 7]. Істотними недоліками електронагрівачів трансформаторного типу є велика металосмістність 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 перероблених речовин і сумішей, як охолоджуючого середовища [8].

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 [9]. На даний момент вони представлені невеликою кількістю конструктивних варіантів, які передбачають, в якості основного джерела потужності нагрівання, використання втрат електромагнітної системи перетворювача [10-12], а також комплексне використання втрат електромагнітної системи і гідродинамічних ефектів, що виникають в робочій рідині [13-15]. 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 XXI сторіччя.

Кінцевим продуктом усього ланцюга енергетичних перетворень у сучасних способах генерації енергії є речовина [16]. Причому ця кінцева речовина є та, як правило, більш небезпечною для біосфери, ніж вихідний енергоносі.

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 багатofакторного впливу на рідину, а області її застосування в різних технологічних процесах дуже широкі (рисунк 1.2). 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 перетворення кінетичної енергії рідини в теплову енергію за рахунок кавітаційних і вихрових ефектів [17, 18].

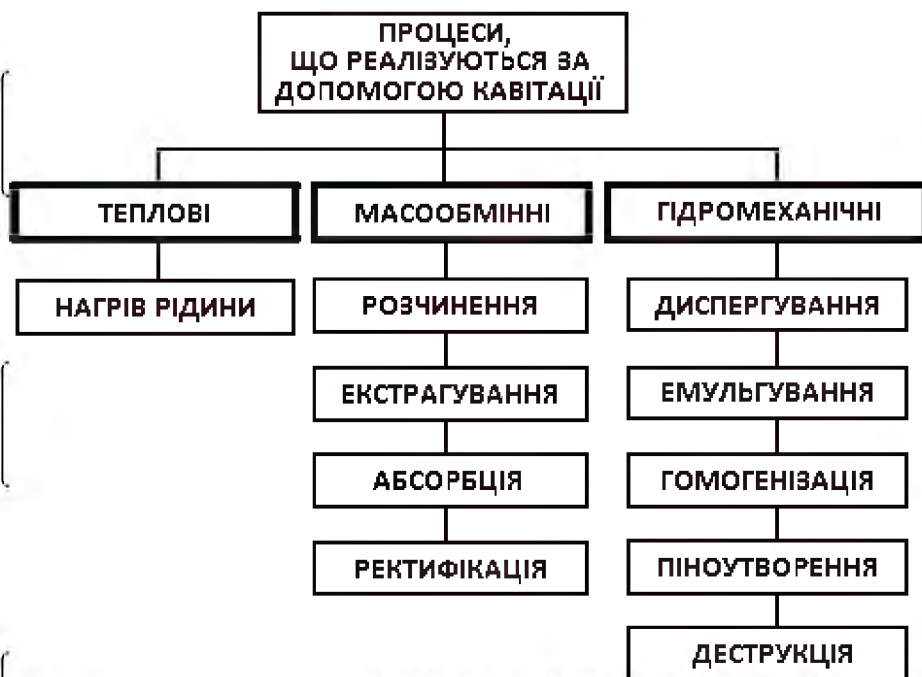


Рисунок 1.2 – Области застосування кавітації в технологічних процесах

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 (телові 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.

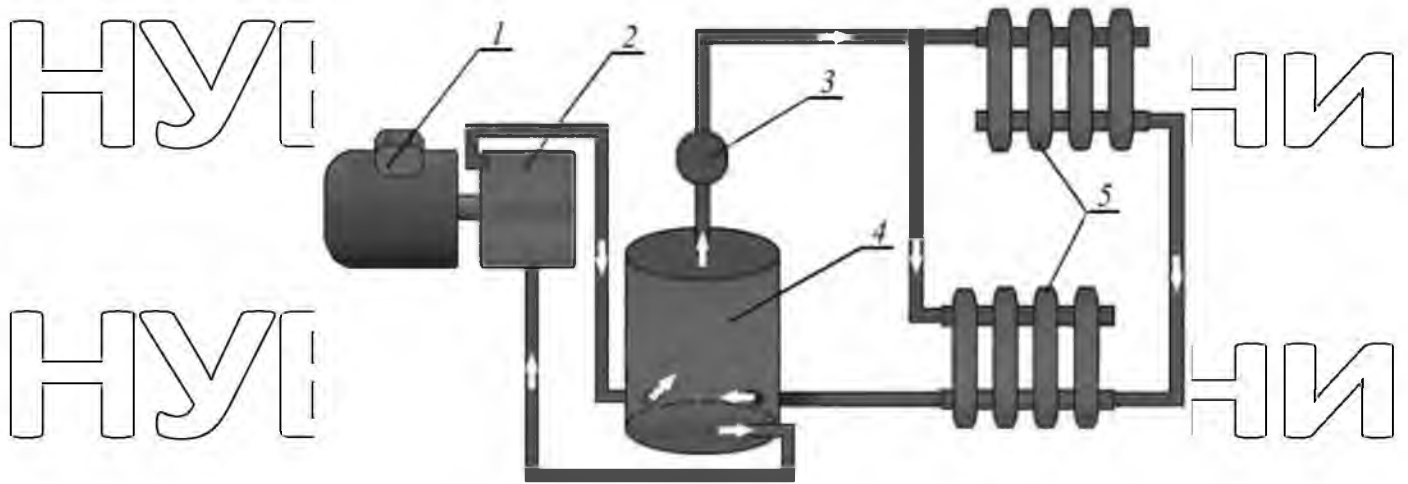
Аналіз [19] показав, що серед великої кількості конструкторських рішень ГТ, найбільш перспективними для практичного використання виявляються ГТ динамічного типу, в яких механічна активація робочої рідини відбувається в результаті впливу на рідину рухливих активуючих елементів – обертових, коливальних 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 та ін. [20-26].

В останнє десятиліття опубліковані сотні робіт, що прямо або побічно обґрунтовують можливість отримання надлишкової теплоти при використанні ГТ [19]. На думку їхніх конструкторів і дослідників, ГТ відрізняються високою ефективністю – відношенням виробленої теплоти до споживаної енергії. Так, наприклад, чисельні значення ефективності теплогенераторів, запропонованих в [27, 28], наближаються до одиниці, в [29, 30] перевершують її в межах можливої похибки калориметричних вимірів, а в [31-33], на думку авторів, перевищують одиницю. Запропоновані гіпотези про причини надпродуктивності ГТ – численні і часом взаємовиключні [34-38], що свідчить про невивченості явищ генерації надлишкового тепла при механоактивації води в ГТ.

Незважаючи на неоднозначність у визначенні ефективності, ГТ різних кон-

струкцій і потужностей виробляються в країнах СНД, Європи, Азії [39-42] і підтверджують свою працездатність в системах опалення, гарячого водопостачання та при обробці різних рідин. Встановлено [43, 44], 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 вивесеним за контур системи циркуляції теплоносія [39, 42, 45-48]. До того ж, для роботи динамічних ГТ в системах опалення, зазвичай після резервуара з водою встановлюється циркуляційний насос [49]. На рисунку 1.3 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 0,72...0,85, а втрати в механічній передачі від двигуна до виконавчого механізму дорівнюють 7...10% [8].



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

Рисунок 1.3 – Типова схема опалення з використанням ГТ динамічного типу

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. 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 $(66,5 \pm 3,5)$ оС [29-31]. 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 [50].

1.2. Огляд конструкцій електричних машин, що працюють в системах нагріву і транспортування 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.

Надалі ми розглянемо 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.

На сьогоднішній день відомо застосування герметичних насосів з «мокрим» статором, в яких асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором компонується в одному блоці з насосом, представляючи собою єдиний агрегат [51, 52]. Ізоляція обмотки статора виконується водонепроникною. Робоче колесо насоса насаджується на консольний кінець вала ротора. Корпус такого насоса заповнений водою, яка служить для охолодження статора і ротора, а також для

змащення й охолодження підшипникових опор.

На рис. 1.4 представлена конструкція електродвигуна з рідинним охолодженням [53], що містить коаксіально розташований насос для контуру охолоджуючої рідини. Усі обертові деталі розташовані всередині герметичного складального вузла «двигун-насос», який заповнений робочою рідиною. У такому технічному рішенні тепло може бути повернуто в систему циркуляції рідини, у випадку якщо рівень температури в камері маховика перевищує рівень температури робочої рідини. Даний електродвигун, зважаючи на його призначення і конструктивні особливості, передбачає можливість лише часткової рекуперації теплової енергії. Разом з тим, робота при високих швидкостях обертання ротора супроводжується великими низькими тепловиділеннями в активній частині.

Відомий пристрій [54, 55], призначений для перекачування нафтопродуктів та інших в'язких рідин, що представляє собою АД з масивним ротором, причому останній суміщений з робочим колесом насоса (рис. 1.5). Статор виконаний секційним для пониження швидкості обертання робочого колеса-ротора. Між статором і ротором встановлений ізолюючий екран. Завдяки екрануванню вдається виключити вплив рідкого середовища на обмотку статора. Теплові втрати, що виділяються в екрані і роторі при роботі насоса, витрачаються на підігрів рідини, що перекачується, що знижує її в'язкість і обумовлює прискорення процесу перекачування.

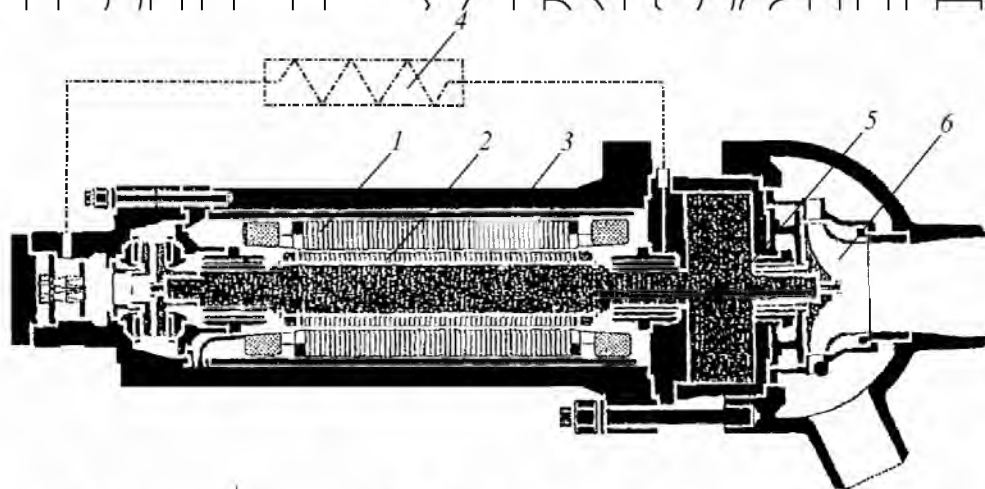


Рисунок 1.4 – Електродвигун з коаксіально розташований насосом: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – корпус; 4 – система охолодження; 5 – маховик; 6 – лопастне колесо.

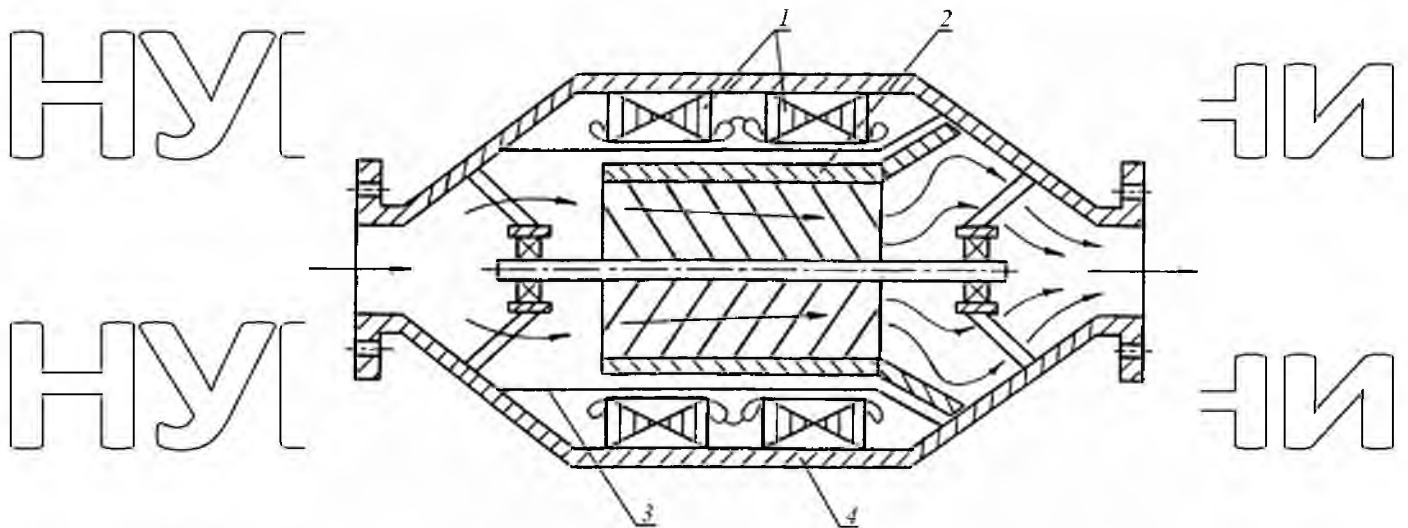


Рисунок 1.5 – Двигун-насос для перекачки нафтопродуктів: 1 – секційний статор, 2 – масивний ротор, 3 – ізолюючий екран; 4 – корпус.

До недоліків двигуна-насоса можна віднести неповне використання дисипативної складової енергії, внаслідок герметизації статора, а також невисокий коефіцієнт тепловіддачі з внутрішньої поверхні ізолюючого екрана.

Ефективне відведення тепла втрач АД може здійснюватися через вузли приводного механізму (робоче колесо насоса, барабан центрифуги, ролик транспортера, мішалка і т.п.). У зв'язку з даним фактом і принципом системного проектування (вбудовування, моноблочне агрегування), є істотний резерв енергоресурсозбарігання на основі обервеної схеми АД [56]. Конструкція АД із зовнішнім двопаке́тним ротором представлена на рисунку 1.6.

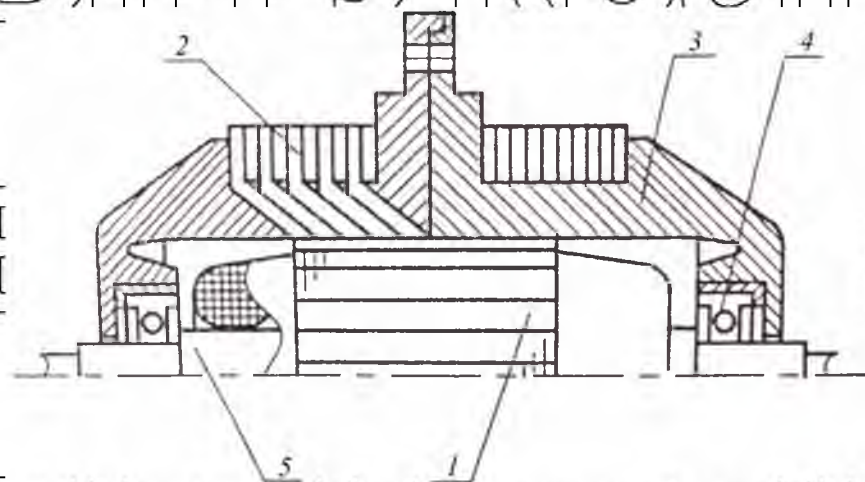


Рисунок 1.6 – АД із зовнішнім двопаке́тним ротором: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – корпус; 4 – підшипник; 5 – нерухома вісь

Перспективними пристроями електропідігріву є електронагрівальні пристрої трансформаторного типу [58-60]. Ці пристрої, що є, по суті, електричними машинами, поєднали основою для створення електромеханічних теплогенеруючих перетворювачів. Перша звітка 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 [6].

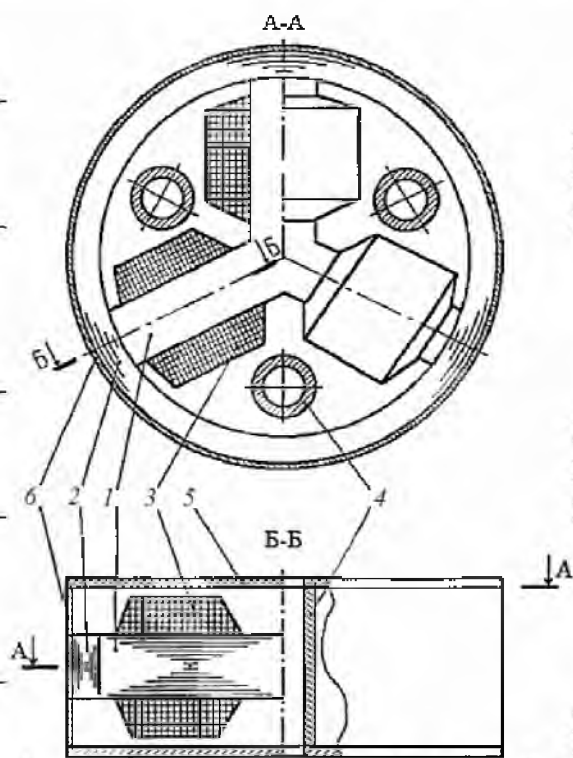


Рисунок 1.7 – Електронагрівальний пристрій трансформаторного типу з просторовою магнітною системою: 1 – стрижні; 2 – ярмо; 3 – первинна обмотка; 4 – вторинна обмотка; 5 – замкнені диски; 6 – корпусна оболонка.

Один з варіантів такого електронагрівального пристрою (рис. 1.7) має магнітопровід, стрижні якого розташовані в одній площині під кутами 120° відносно один одного й охоплені кільцевим ярмом [61]. На стрижнях розміщена трифазна первинна обмотка. Короткозамкнена вторинна обмотка виконана у вигляді трубок, призначених для проходження рідини, що нагрівається, які нагоро-

тко 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.

На рис. 1.8 представлено електронагрівальний пристрій трансформаторного типу з обертовим магнітним полем [62]. Первинна обмотка виготовляється розподіленою по пазах, виконаним в магнітопроводі, який має вигляд статора асинхронного електродвигуна. Роль вторинної обмотки виконує сталева труба, що має зовнішній діаметр, рівний внутрішньому діаметру магнітопроводу і розташована всередині магнітопроводу. Струми, індуковані в трубі обертовим магнітним полем, нагрівають трубу, від якої теплова енергія передається рідині, що проходить по трубі.

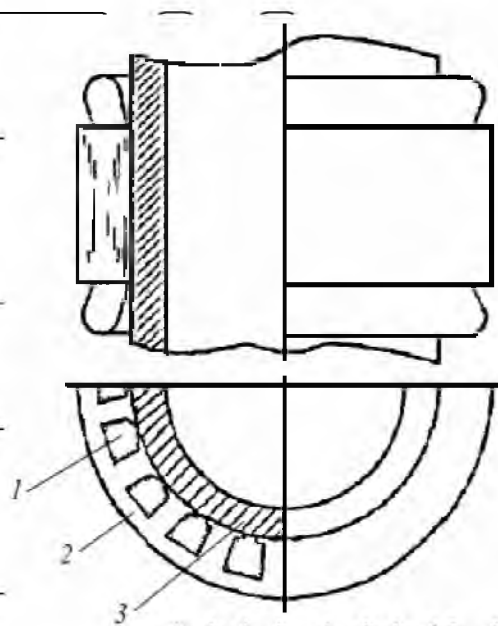


Рисунок 1.8 – Електронагрівальний пристрій трансформаторного типу з обертовим магнітним полем: 1 – первинна обмотка; 2 – магнітопровід; 3 – сталева труба.

Відомий пристрій технологічного нагріву рідини, індуктор якого виконаний у формі статора асинхронної машини [63]. Масивний ротор являє собою по-

рожнистий товстоетінний циліндр, в стінці якого виконані кризні 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 [9]. 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 багаступінчасті; за наявністю або відсутністю і розташуванням спрямлюючих механізмів; за

видом виконання: вибухозахищений, малошумний, ударостійкий, вбудований та ін.

Розглянемо принцип роботи даного пристрою на прикладі конструкції, представленої на рис. 1.9, що включає магнітопровід з первинною обмоткою, нерухомий нагрівальний елемент, обертовий нагрівальний елемент, виконаний у вигляді порожнього циліндра, на внутрішній поверхні якого сформовані напірні лопаті [64]. 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 магнітопрелеводом 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.

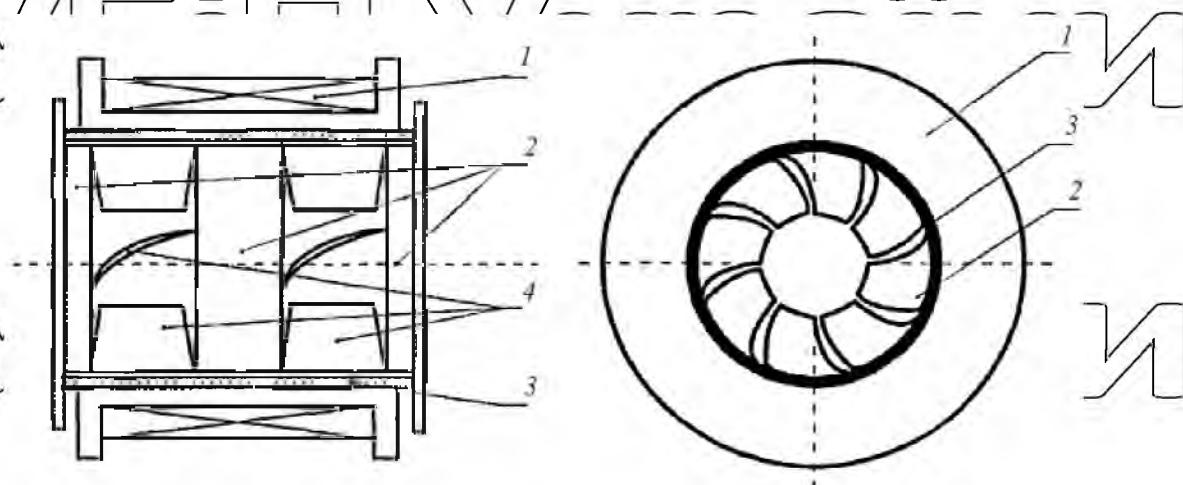


Рисунок 1.9 – Електронагрівальний пристрій з капсульованим статором: 1 – первинна обмотка; 2 – обертовий нагрівальний елемент; 3 – нерухомий нагрівальний елемент; 4 – напірні лопаті

На рисунку 1.10 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 [65]. 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.

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.

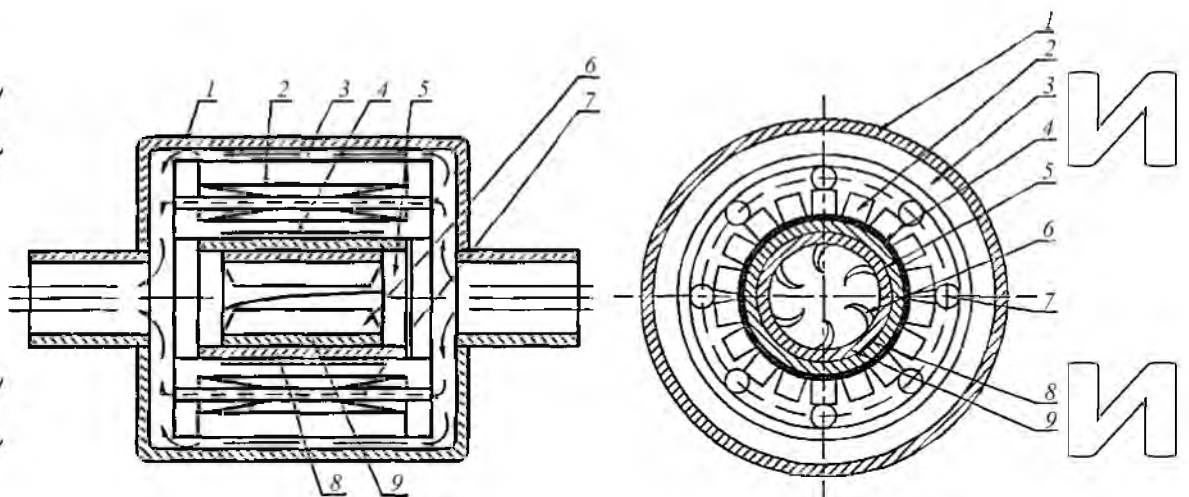


Рисунок 1.10 – Електронагрівальний пристрій з внутрішнім феромагнітним елементом: 1 – зовнішній кожух; 2 – первинна обмотка; 3 – зазор; 4 – нерухомий нагрівальний елемент; 5 – обертовий нагрівальний елемент; 6 – напірні лопаті; 7 – аксіальні канали; 8 – немагнітний циліндр; 9 – феромагнітний циліндр

Огляд існуючих конструкцій рідинозаповнених ЕМ показав, що об'єднання в одному блоці АД, ГТ і насоса дозволяє розглядати даний пристрій як новий тип ЕМ, 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 теплови-

діленнями – охолоджуюче середовище», яка виконує функції спрямування теплової енергії в технологічну зону нагріву рідини і забезпечення допустимого пере-

регрівання ізоляції.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАНСНОГО НАСОСА-ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

В Національному університеті біоресурсів і природокористування України запропонована принципово нова конструкція теплогенератора на базі поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП), призначеного для автономного теплопостачання та переробки рідинних сумішей [13-15].

2.1. Загальна характеристика нового класу поліфункціональних електромеханічних перетворювачів

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 ЕМЦ, інтеграція і повне використання його дисипативних складових енергії, а також використання перероблених речовин і сумішей, як охолоджуючого середовища для ЕМЦ.

Комплексами, які об'єднують в собі ці властивості, є електричні комплекси на базі ПЕМП технологічного призначення, що передбачають ефективне використання дисипативної складової енергії, структурну, функціональну та теплову інтеграцію [8]. ПЕМП технологічного призначення – це ряд модифікацій ЕМЦ різного застосування, що мають спільну технічну основу і єдину ідеологію створення.

2.2 Побудова електричного резонансного насоса-теплогенератора

Одним з найбільш перспективних представників нового класу пристроїв ПЕМП є резонансний насос-теплогенератор (РНТ), який являє собою поєднану технічну систему з поліфункціональними властивостями, об'єднуючу електромеханічну, механічну, теплову та гідравлічну системи для реалізації інтегральної функції поєднаності функціональних ознак електродвигуна, виконавчого механізму, нагрівача і кавітаційного генератора. В основу створення РНТ покладено результати попередніх розробок і досліджень ПЕМП технологічного призначення, а також їх впровадження на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

У РНТ використовується конструкція порожнистого перфорованого ротора (ППР), який виконує одночасно функції ротора АД, ротора кавітаційного генератора, нагрівача і насоса (рис 2.1). При цьому ротор охолоджується робочою рідиною, яка за цикл проходження через апарат підігрівается 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, розвиненої турбулентності, інтенсифікації кавітаційних процесів [66, 67].

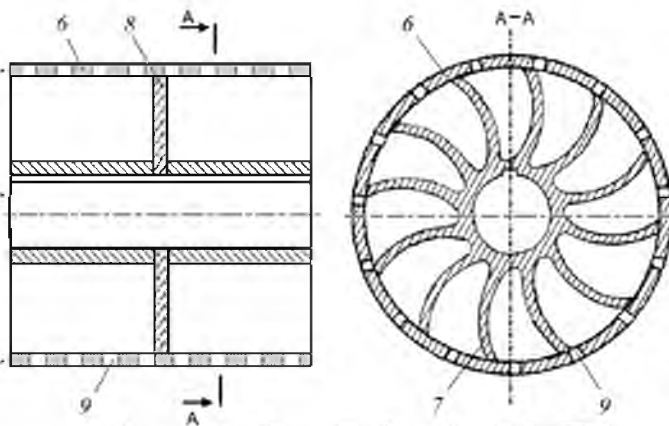


Рисунок 2.1 – Конструкція ППР

Крім того, наявність перфорацій забезпечує створення додаткового контуру циркуляції робочої рідини, що здійснює відбір теплової потужності від зовнішньої поверхні ротора і внутрішньої поверхні немагнітного гільзи (уздовж вє РНТ).

Поздовжній і поперечний розрізи РНТ [13] показані відповідно на рис 2.1 та 2.3. РНТ складається з корпусу 1 усередині якого розташовуються магнітотривід 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 установки $\phi = 80^\circ$ (рис. 2.1). Перегородка 8 розділяє ротор на дві рівні половини, роблячи підвід рідини двостороннім. З торців до ротора примикають резонансні диски 10 з всмктувальними отворами 11 і нагнітальними отворами 12. Резонансні диски виконані дзеркально.

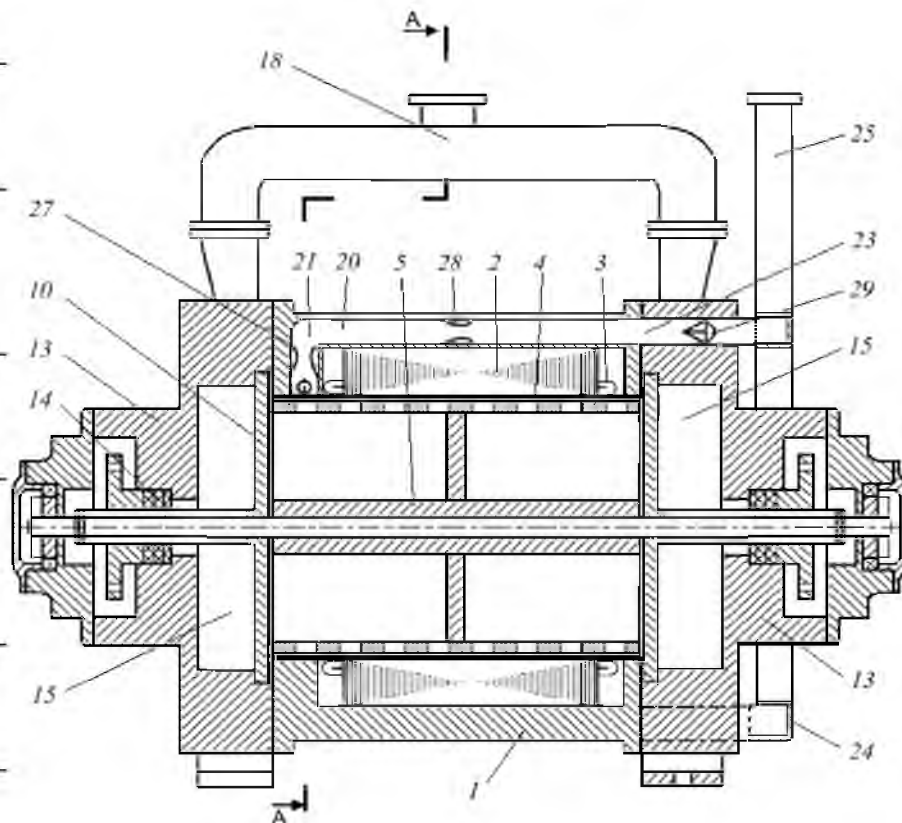


Рисунок 2.1 Поздовжній розріз РНТ

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 0,2-0,4 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.

РНТ працює таким чином. Обмотка 3 статора 2 підключається до джерела змінного струму і створює обертове магнітне поле. Створені в масивній стінці ВС розігривають ферромагнітний порожній циліндр 6 ротора 5.

Одночасно при взаємодії обертового магнітного поля і ВС створюється електромагнітний момент, що діє на ротор 5, який в процесі обертання через вентиль 19 засмоктує рідину з резервуара. Рідина розподіляється потрійним патрубком 18 на два рівних потоки і заповнює дві камери 15, що відносяться до зони зниженого тиску. Величина розрідження залежить від температури рідини, що підігривається, і знаходиться в межах $(0,8-0,3) \cdot 10^5$ Па. При зниженні величини тиску нижче зазначеного діапазону рідина інтенсивно закипає, створюючи кавітаційні бульбашки. Завдяки зниженому тиску, який виникає за лопатями 7 ротора 5, суміш рідини і кавітаційних бульбашок, проходячи через всмоктувальні отвори 11 резонансних дисків (рис.2.2), ділиться на безліч струменів. При збігу торців лопатей 7 ротора 5 з усмоктувальними отворами 11 виникають гідравлічні удари, які викликають коливання резонансних дисків в осьовому напрямку. Кожна лопать ротора, проходячи повз всмоктувальні отвори 11, послідовно відсікає

від струменів частинки, які під дією відцентрової сили відкидаються до зони підвищеного тиску. Зона підвищеного тиску, яка розташована між немагнітною гільзою 4 і ротором 5, заповнюється відкинутими частинками рідини. Величина тиску рідини достатня для подолання опору обертових лопатей ротора і рідина виштовхується через нагнітальні отвори 12 резонансних дисків до камер нагнітання. У зоні підвищеного тиску відбувається виділення теплової енергії при складуванні (конденсації) кавітаційних бульбашок.

Сумарні коливання рідини в зоні підвищеного тиску, утворені кавітацією, гідравлічними ударами при відсіканні лопатями 7 ротора 5 струменів рідини і кавітаційних бульбашок в зоні зниженого тиску, зводяться до резонансного режиму, при якому також відбувається виділення теплової енергії.



Рисунок 2.2 – Резонансний диск РІТ

Частина рідини (рис.2.3) із зони підвищеного тиску через наскрізні отвори 9 ротора потрапляє в тангенціальні канали 22 корпусу 1, де потоки рідини центруються відносно осей радіальних каналів 21 і отримують вихровий характер руху за допомогою центруючих конусів 26. Відстань між центрами наскрізних отворів феромагнітного порожнього циліндра 6 з боку тангенціальних каналів 22 і радіальних каналів 21 корпусу 1 вибрано рівним половині відстані між центрами входів тангенціальних каналів 22 корпусу 1 для забезпечення одночасного потрапляння рідини в тангенціальні канали 22.

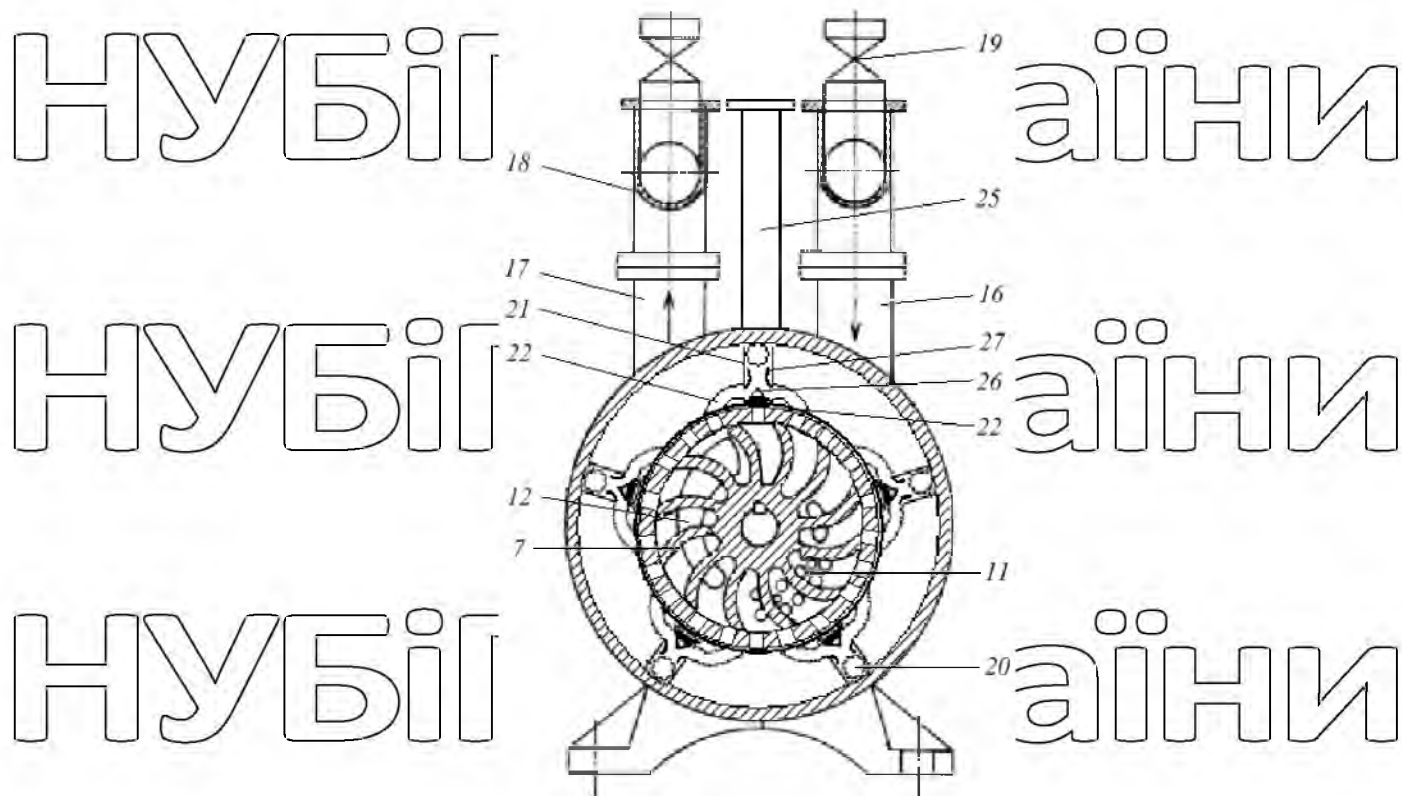


Рисунок 2.3 – Поперечний розріз РНТ

При вході в звужену область основних труб Вентурі 27 потоки гальмуються, а тиск в них зростає. Бульбашки кавітації, які потрапляють в область підвищеного тиску, лопаються, що викликає локальний (точковий) нагрів газів усередині бульбашок до високих температур. У результаті змішування таких зон із загальною масою рідини температура останньої підвищується на кілька градусів. На виході основних труб Вентурі 27 швидкість потоку знову збільшується, а тиск зменшується. При цьому вихровий характер руху зберігається. У потоці рідини на зміну бульбашок, що лопнули та віддали своє тепло, з'являються нові маси каверн з утворенням кавітаційних стовпів в аксіальних каналах 20 корпусу 1. Процес повторюється, забезпечуючи подальше підвищення температури рідини під час проходження додаткових труб Вентурі 28. Заспокоювачі 29 забезпечують перетворення вихрових потоків рідини в аксіальних каналах в ламінарні, які об'єднуються в колекторі 24 і далі через додатковий нагнітальний патрубок 25 рідина потрапляє в резервуар.

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.

У результаті комплексного впливу перерахованих теплових джерел досягається інтенсифікація процесу генерації тепла і підвищення коефіцієнта корисної дії теплогенератора. Для формування теплової енергії використовується весь спектр гармонік електромагнітного поля, тобто запропонований теплогенератор є не критичним до якості джерела живлення електричною енергією.

Загальний коефіцієнт корисної дії РНТ вельми високий, що забезпечує ефективну реалізацію принципів енергоресурсозбереження. У РНТ практично вся вхідна електрична енергія перетворюється в корисну вихідну енергію, оскільки окрім механічної енергії, що використовується для подолання сил в'язкого тертя рідини, вся дисипативна складова енергії формує другу корисну частину – теплову енергію, що витрачається на нагрів робочої рідини. Таким чином, нагрівальна рідина виступає в двох якостях: механічне навантаження для ротора РНТ, створюване силами в'язкого тертя, охолоджуюче середовище, яке омиває ППР і відбирає від нього теплову енергію. Суттєвими перевагами РНТ на базі ПЕМП є не тільки високий ККД, але і значне скорочення виробничої площі, кількості одиниць обладнання і терміну його окупності, компактність і мобільність, відсутність шкідливих викидів в атмосферу.

викидів в атмосферу.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ І ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОРОЖНИСТИМ ПЕРФОРОВАНИМ РОТОРОМ

3.1. Математична модель електромагнітного поля асинхронного двигуна с порожнистим перфорованим ротором

Ротор трифазного АД що розглядається, виконаний у вигляді порожнистого феромагнітного циліндра з радіальними отворами. У загальному випадку нелінійна магнітна система АД з ППР складається з декількох феромагнітних тіл з нелінійними фізичними властивостями матеріалів, оточених магнітно-лінійним середовищем. Електромагнітне поле в кожній точці розглянутої області визначається векторами магнітної індукції \vec{B} , напруженості магнітного поля \vec{H} , електричного зміщення \vec{D} і напруженості електричного поля \vec{E} [93]. Математичною моделлю нелінійної магнітної системи з розподіленням струмів є система рівнянь Максвелла для векторів електромагнітного поля у всіх областях АД [94, 95], що містить

закон повного струму

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}, \quad (3.1)$$

де $\vec{J} = \vec{J}_v + \vec{J}_{\text{стор}}$ – густина струмів провідності; \vec{J}_v – щільність ВС;

$\vec{J}_{\text{стор}}$ – щільність сторонніх струмів;

закон електромагнітної індукції

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.2)$$

рівняння безперервності магнітного поля

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (3.3)$$

Розглядається квазістаціонарне поле. Струмами зміщення нехтуємо.

Система рівнянь (3.1) – (3.3) доповнюється рівнянням зв'язку між

□

Н векторами індукції і напруженості магнітного поля і законом Ома в диференційній формі

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (3.4)$$

$$\vec{J} = \gamma \vec{E}, \quad (3.5)$$

де $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ – абсолютна магнітна проникність; μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ_r – відносна магнітна проникність; γ – питома електрична провідність.

Оскільки сердечник статора і ротор володіють нелінійними магнітними властивостями, то рівняння (3.4) є нелінійним.

У практиці розрахунків полів ЕМП, з метою приведення системи рівнянь Максвелла до виду, більш зручного для розв'язання, часто використовується векторний магнітний потенціал \vec{A} , який визначається виразом

$$\text{rot } \vec{A} = \vec{B}. \quad (3.6)$$

На основі рівнянь системи (3.1)-(3.3) в середовинах з нелінійними магнітними характеристиками за допомогою векторного магнітного потенціалу можна записати рівняння, що описує електромагнітне поле для розподілених змінних струмів що змінюються в часі, включаючи вихрові струми (ВС) в масивах.

Запишемо закон повного струму з урахуванням (3.4) і (3.6)

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A} \right) = \vec{J}_b + \vec{J}_{\text{стор}}. \quad (3.7)$$

З урахуванням (3.2) і (3.5), використовуючи скалярний магнітний потенціал ϕ , запишемо вираз для густини ВС

$$\vec{J}_a = \gamma \left(-\text{grad } \phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right). \quad (3.8)$$

Підставимо вираз густини ВС у рівняння (2.7). Приймаючи умови калібрування $\text{div } \vec{A} = \mu_0 \rho$ і виконавши векторні перетворення, отримаємо диференціальне рівняння електромагнітного поля в приватних похідних відносно векторного магнітного потенціалу

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A}\right) - \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \gamma (\vec{v} \times \text{rot} \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стор}}, \quad (3.9)$$

де \vec{v} – вектор швидкості руху електропровідної середовища відносно джерела магнітного поля.

Для випадку, коли магнітне поле змінюється за гармонійним законом, рівняння (3.9) приймає вид

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A}\right) - j\omega\gamma \vec{A} - \gamma \vec{v} \times (\text{rot} \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стор}}, \quad (3.10)$$

де ω – кутова частота зміни магнітного поля.

Для непровідних областей справедливо рівняння Пуассона

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A}\right) = -\vec{J}_{\text{стор}} \quad (3.11)$$

Розв'язання громіздких рівнянь поля при чисельних розрахунках тривимірних моделей супроводжується значними труднощами, а часто стає неможливим [96]. З точки зору оптимізації апаратних витрат, чисельний розрахунок квазістационарного електромагнітного поля АЧ доцільно проводити використовуючи рівняння для роторної системи координат, оскільки в ньому відсутня конвективна складова, пов'язана з обертанням ротора щодо системи координат.

Спрощення рівняння (3.10) за рахунок виключення конвективного члена не позначається на підході до вирішення завдання, проте сприяє збіжності рішення, що дає можливість практичної реалізації алгоритму чисельного розрахунку.

У разі використання роторної системи координат, ротор залишається нерухомим. Тоді в рівнянні (3.10) необхідно прийняти умови [97]:

$$\omega_s = \omega, \quad \omega_R = 0; \quad v_x = v_y = 0, \quad (3.12)$$

де ω_s – кутова частота обертання поля статора; ω_R – кутова частота обертання ротора; $v_{x,y}$ – складові швидкості руху електропровідної середовища відносно джерела магнітного поля.

Остаточне рівняння (3.10) записується у вигляді

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} A\right) - j\omega_1 s\gamma \vec{A} = -\vec{J}_{\text{стор}} \quad (3.13)$$

Якщо у двовимірних задачах одна складова вектора \vec{A} описує дві складові магнітного поля, то в тривимірних задачах необхідно розглядати всі три складові. Векторне рівняння (3.13) для тривимірного магнітного поля еквівалентно трьом рівнянням:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} - j\omega_1 s\gamma A_x = -J_x,$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial z} - j\omega_1 s\gamma A_y = -J_y, \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial z} - j\omega_1 s\gamma A_z = -J_z,$$

де J_x, J_y, J_z – компоненти вектора густини сторонніх струмів.

Рівняння (3.13) доповнюється граничними умовами. На зовнішніх межах розрахункової області (оболонка об'ємної моделі) встановлюється нульове значення векторного магнітного потенціалу (умова Діріхле)

$$\vec{A} = 0. \quad (3.15)$$

Гранична умова (3.15) обумовлює прийняття припущення про відсутність магнітних потоків розсіювання в зовнішній простір через межі, що розглядаються. На межі розділу середовищ з різними магнітними властивостями використовується умова рівності нормальних до межі складових вектора магнітної індукції і дотичних складових вектора напруженості магнітного поля (умова Неймана) [98-100]:

$$\vec{B}_{n1} = \vec{B}_{n2}, \quad \vec{H}_{\tau 1} = \vec{H}_{\tau 2}. \quad (3.16)$$

Заданося залежностями параметрів середовищ від просторових координат. Магнітна проникність, як функція напруженості магнітного поля для феромагнітних середовищ розглянутої системи в матричному вигляді [73]

$$[\mu_r] = \begin{bmatrix} \mu_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{rz} \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

де $\mu_{rx}, \mu_{ry}, \mu_{rz}$ – відносна магнітна проникність уздовж осей x, y, z відповідно. Визначається за таблично заданими кривими намагнічування.

Зв'язок між напруженістю електричного поля і густиною струмів виражається відповідно до (3.5). Матриця електропровідності для середовищ, що

проводять, має вигляд

$$[\gamma] = \begin{bmatrix} \gamma_x & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_y & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_z \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

де $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ – електропровідність вздовж осей x, y, z відповідно.

Відповідно до МКЕ, після дискретизації розрахункової області, польова функція апроксимується поліномом n -го ступеня в межах кожного КЕ.

Наприклад, в об'ємному симплекс-елементі (тетраедрі) першого порядку векторний потенціал \vec{A} лінійно залежить від просторових координат. У тривимірних

декартових координатах x, y і z апроксимаційний поліном має вигляд $A(x, y, z) =$

$a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y + a_4 \cdot z$, де a_1, a_2, a_3, a_4 – невідомі коефіцієнти, що визначаються

після розв'язання відповідної системи алгебраїчних рівнянь.

Основою для чисельного розрахунку квазістаціонарного електромагнітного поля в АД з ТШР служить диференційне рівняння (3.13) в приватних

похідних, перетворене до системи алгебраїчних рівнянь щодо значень векторного магнітного потенціалу у вузлах СКЕ. У результаті такого перетворення формується єдина матриця системи алгебраїчних рівнянь і єдиний шуканий вектор

$\{A_1, \dots, A_N\}$, де N – кількість вузлів СКЕ.

Векторний магнітний потенціал у вузлах СКЕ обчислюється виходячи з умови мінімуму енергетичного функціонала [10,11]

$$F = \int_V \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right] dx dy dz + \int_V j\omega\gamma |\vec{A}|^2 dx dy dz +$$

$$\int_V \vec{J} \vec{A} dx dy dz \quad (3.19)$$

За результатами розрахунку розподілу векторного магнітного потенціалу, обчислюються величини магнітної індукції, напруженості магнітного й електричного поля.

Складові вектора магнітної індукції:

$$\vec{B}_x = \text{rot } \vec{A}_y; \quad \vec{B}_y = \text{rot } \vec{A}_z; \quad \vec{B}_z = \text{rot } \vec{A}_x. \quad (3.20)$$

Складові вектора напруженості магнітного поля:

$$\vec{H}_x = \frac{\vec{B}_x}{\mu_0 \mu_r}; \quad \vec{H}_y = \frac{\vec{B}_y}{\mu_0 \mu_r}; \quad \vec{H}_z = \frac{\vec{B}_z}{\mu_0 \mu_r}. \quad (3.21)$$

Складові вектора напруженості електричного поля:

$$\vec{E}_x = j\omega \vec{A}_x; \quad \vec{E}_y = j\omega \vec{A}_y; \quad \vec{E}_z = j\omega \vec{A}_z. \quad (3.22)$$

Обчислення магнітних потокозчеплень, ЕРС, струмів, втрат і сил проводиться шляхом інтегрування за об'ємами та поверхнями розрахункової моделі.

Вираз для повного магнітного потокозчеплення фази статора має вигляд

$$\Psi_\phi = \frac{2w_\phi}{S_j} \int_{V_\phi} A dV, \quad (3.23)$$

де V_ϕ – об'єм інтегрування, який включає сумарний об'єм усіх послідовно з'єднаних котушок фази, що мають струми одного напрямку; w_ϕ – число витків у котушці обмотки статора в одному пази; S_j – площа перерізу ефективних провідників у пази статора.

Визначене за виразом (3.23) потокозчеплення включає в себе скла-

дові від потоків пазового і диференційного розсіювання, а також враховує вкорочення кроку котушок обмотки і розподіл котушок фази по пазах, які в класичній теорії електричних машин відображаються за допомогою обмотувального коефіцієнта. Польовий метод не вимагає введення і використання обмотувальних коефіцієнтів [98]. За допомогою виразу (3.23) розраховується значення фазної ЕРС обмотки статора для конкретної величини ковзання

$$E_{\phi} = \pi\sqrt{2}f \cdot \Psi_{\phi}, \quad (3.24)$$

де f – частота струму в обмотці статора.

Складові вектора густини ВС розраховуються наступним чином:

$$\vec{J}_x = j\omega\gamma\vec{A}_x; \quad \vec{J}_y = j\omega\gamma\vec{A}_y; \quad \vec{J}_z = j\omega\gamma\vec{A}_z. \quad (3.25)$$

Потужність втрат для провідних елементів конструкції, обчислюється як результат інтегрування для всіх KE за законом Джоуля-Ленца

$$P = \frac{1}{2} \int_V \gamma |\vec{E}|^2 \cdot dV. \quad (3.26)$$

Вектор результуючої сили, що діє на вторинне провідне середовище, знаходиться шляхом інтегрування об'ємної густини електромагнітної сили [96]

$$F_V = \int_V \vec{f}_V \cdot dV. \quad (3.27)$$

Об'ємна густина електромагнітної сили визначається за допомогою виразу

$$\vec{f}_V = \vec{B} \cdot \vec{J} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|B|^2}{\mu} \cdot \text{grad} \mu. \quad (3.28)$$

Представлені рівняння складають польову математичну модель, яка в повній мірі описує електромагнітне поле АД з ППР з урахуванням реальної конфігурації активної зони, нелінійності властивостей матеріалів, а також реакції ВС ППР. Практична реалізація математичної моделі (3.14)–(3.28) виконана в рамках програмно-обчислювального комплексу Comsol Multiphysics 3.5a.

Об'ємна модель АД з ППР містить такі розрахункові області: перфорований ротор 1, зубчастий магнітопровід статора 2, повітряну область 3, області напів обмотки статора 4. Магнітопровід статора і ротор представлені областями з матеріалів, що характеризуються відповідними залежностями магнітної індукції від напруженості поля. Повітряний зазор, порожнини перфорацій, а також порожнина ротора являють собою єдину повітряну область з постійними фізичними властивостями. Окремі розрахункові області, з яких складається тривимірна модель активної частини АД з ППР, показані на рис. 3.1.

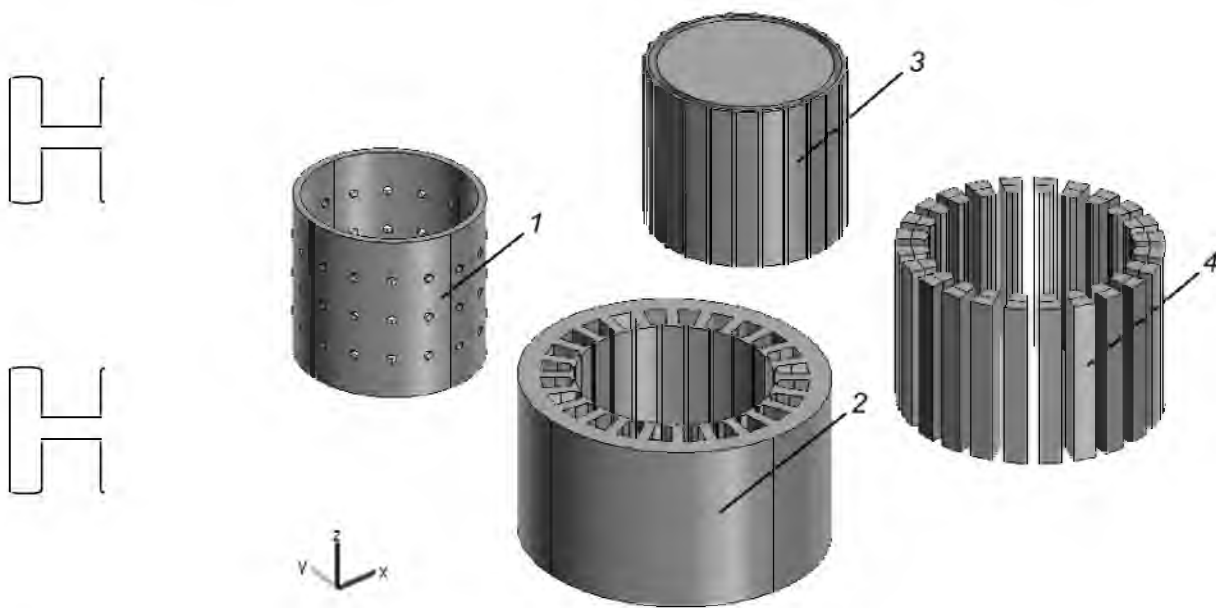


Рисунок 3.1 – Розрахункові області тривимірної моделі активної частини АД з ППР

3.2. Вихідні дані електромагнітної задачі

Вихідними даними для розрахунку електромагнітної задачі є:

- геометричні параметри моделі;
- кутова частота обертання ротора;
- густина струму в пазах статора;
- електричні і магнітні властивості матеріалів.

Розрахунок тривимірного розподілу електромагнітного поля проведеної з урахуванням реальних лінійних розмірів активної зони і об'ємних даних експериментального зразка АД з ППР. Дослідження поля АД з ППР при різних схемах перфорації ротора проводилося з використанням єдиного статора.

У розрахунках повітряний зазор прийнятий рівним 1,5 мм (в експериментальній моделі зазор збільшений для розміщення індуктивних датчиків, а в конструкції РНТ зазор складає 1-1,5 мм з метою розміщення герметизуючої гільзи). Основні конструктивні параметри статора наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Основні конструктивні параметри статора

№	Параметр	Значення
1	Зовнішній діаметр, мм	140
2	Внутрішній діаметр, мм	88
3	Довжина сердечника, мм	75
4	Число зубців	24

Дослідження впливу перфорації на електромагнітні та механічні характеристики АД проводиться з варіюванням наступних конструктивних параметрів ППР:

- число рядів отворів – Z_2 ;
- число отворів в ряду – n ;
- діаметр отворів – d ;
- схема перфорації (прямі ряди, скошені ряди, шахове розташування отворів).

Конструктивні параметри ППР: зовнішній діаметр – 85 мм, товщина стінки – 3,5 мм, довжина – 75 мм. Досліджувана модель АД з гладким ротором відрізняється тільки відсутністю отворів. Надалі для зручності будемо використовувати короткі позначення конструктивних варіантів ППР. Наприклад, позначенню П-20-3-4, відповідає ротор, що має 20 прямих рядів по 3 отвори діаметром 4 мм. У прийнятому позначенні перша буква визначає тип схеми перфорації (П – прямі

ряди; С – скошені ряди; Ш – шахове розташування отворів), друга, третя і четверта цифри визначають параметри Z_2, n, d відповідно.

Кутова частота обертання ротора задається у вигляді частоти джерел поля у відповідності з умовами (3.12) для роторної системи координат. Джерела поля в правій частині рівняння (3.13) задаються сторонньою густиною струму на ділянках пазів статора згідно з трифазною схемою з'єднання обмотки. На рисунку 3.2 схематично представлений статор двополюсного АД з ППР з числом пазів на полюс і фазу рівним чотирьом.

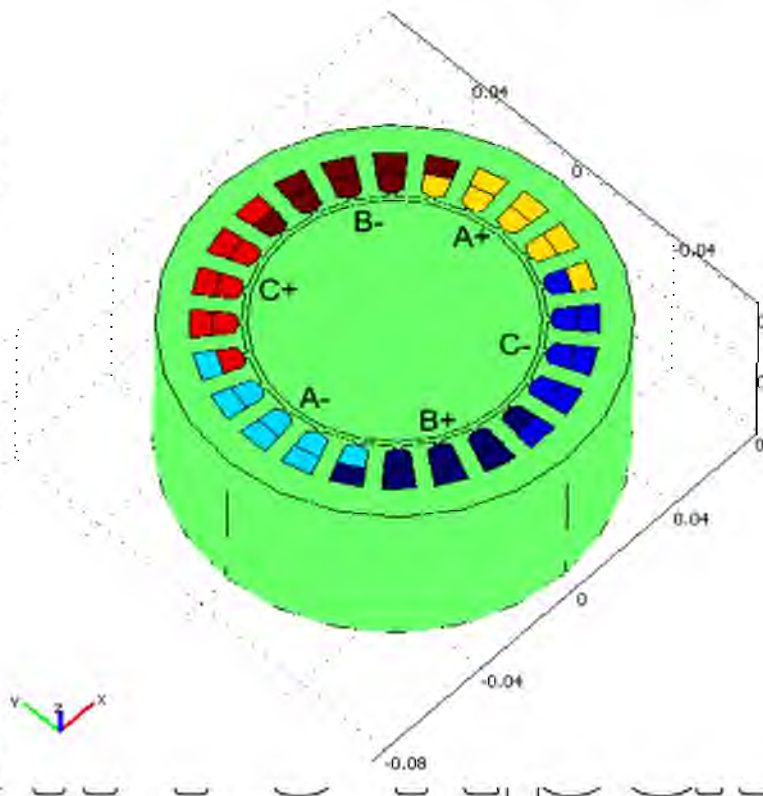


Рисунок 3.2 – Схема завдання джерел поля

Комплексні значення щільності струму в фазах обмотки статора [98]:

$$\begin{aligned} \vec{J}_A &= I_m / u_n / S_n \\ \vec{J}_B &= -I_m [\cos(-2\pi/3) - j \sin(-2\pi/3)] \cdot u_n / S_n \\ \vec{J}_C &= -I_m [\cos(-4\pi/3) - j \sin(-4\pi/3)] \cdot u_n / S_n \end{aligned} \quad (3.29)$$

де I_m – амплітуда струму у фазі статора (дані фізичної моделі);

u_n – число ефективних провідників в пазу;

S_n – площа перерізу паза.

Нелінійність магнітних властивостей масивного ротора і сердечника статора враховується завданням відповідних кривих намагнічування [105]. Необхідна точність таблично заданих кривих намагнічування забезпечується кубічною сплайн-апроксимацією. Оптимальна кількість точок, що задаються (вузлів апроксимації) знаходиться в межах 15...20. Питома електрична провідність матеріалу ротора приймалася у відповідності з довідковими даними [106]. У табл.3.2 наведені основні властивості матеріалів для кожної розрахункової області, що задаються як вихідні дані.

Таблиця 3.2 – Властивості матеріалів розрахункових областей

№ Області	Назва розрахункової області	Відносна магнітна проникність, μ_r	Питома електрична провідність, γ , См/м
1	Перфорований ротор	Крива намагнічування Ст. 3	$0,5 \cdot 10^7$
2	Магнітопровід статора	Крива намагнічування Ст. 2013	0
3	Повітряна область	1	0
4	Обмотка статора	1	$5,8 \cdot 10^7$

3.3. Результати чисельного моделювання електромагнітного поля асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором

Програмний комплекс Comsol Multiphysics надає широкі можливості аналізу отриманих результатів на основі універсальних способів візуалізації рішення: кольорні заливки по різних фізичним величинам у вигляді ребер, повер-

хонь і всіяких зрізів розрахункової області; векторні поля; лінії струму; візуалізація окремих комплексних і просторових компонент; анімації; графіки. Зокрема, просторова картина магнітного поля може бути представлена у вигляді стрілок-векторів, відображаючих модуль і напрямок векторної функції. Даний спосіб візуалізації дозволяє оцінити не тільки рівні індукції, але і конфігурацію поля в активній частині машини. Магнітне поле в повітряному зазорі між статором і ППР розподіляється нерівномірно, що зумовлено кінцевою довжиною і наявністю отворів ротора. Витіснення поля до країв активної частини викликано реакцією ВС індуктованих в роторі, а спотворення прямокутної форми поля в зазорі

тим більше, чим більше значення приймають параметри $\sqrt{\sigma/\sigma_r} (\tau^2 / \delta')$ і L/τ [113]. Фрагмент картини розподілу магнітної індукції в зазорі АД з ППР (И-20-3-4) у вигляді ліній струму показаний на рис. 3.3. З рисунка видно, що силові лінії згущуються в межах суцільних ділянок ротора і розріджуються в межах площі наскрізного отвору. Як результат, провали в кривій магнітної індукції в зазорі над отвором досягають 0,4 – 0,5 Тл. Силові лінії, що входять в ротор через отвір збоку, проходять шлях, довжина якого більше, ніж повітряний зазор, обумовлюють зменшення зони провалу в кривій магнітної індукції.

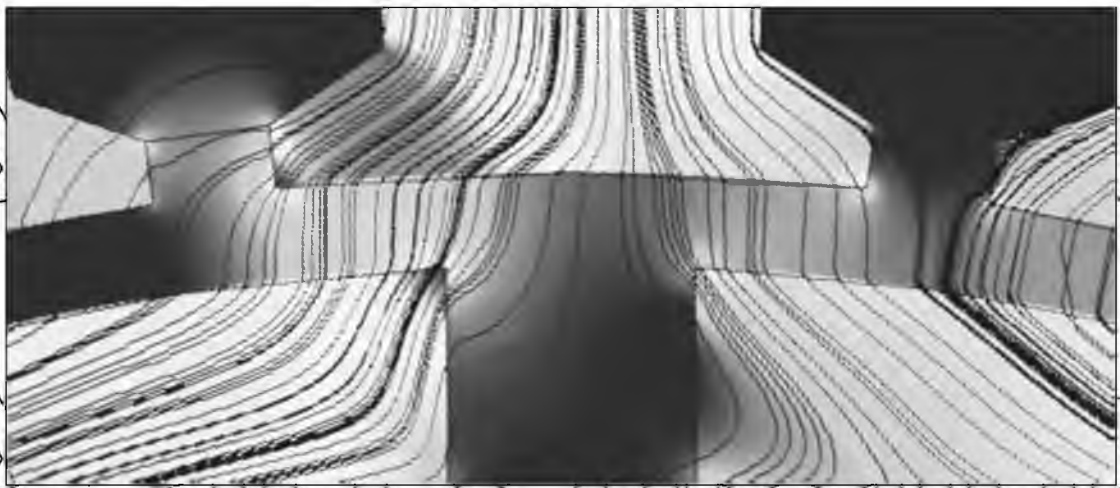


Рисунок 3.3 – Фрагмент картини розподілу магнітної індукції в зазорі АД з ППР

Фрагмент картини розподілу магнітної індукції в зазорі АД з ППР для випадку, коли ряд отворів розташований між зубцями статора, представлений на

рисунку 3.22. Поздовжній зріз (зона в межах пунктирних ліній) виконаний на відстані 0,5 мм від поверхні ротора. На рисунку темним областям повітряного зазору відповідає значення індукції 0,4 – 0,45 Тл, світлим – 0,7 – 0,72 Тл.

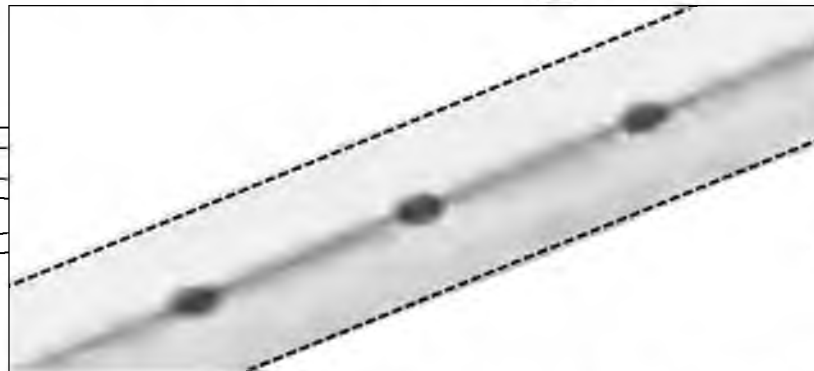


Рисунок 3.3 – Фрагмент картини розподілу магнітної індукції в зазорі АД з ППР (П-20-3-4)

Картина тривимірного розподілу магнітної індукції в ППР (П-20-3-

4) у вигляді ліній струму представлена на рис. 3.4. Проходячи вздовж стінок ротора, магнітні силові лінії мов обтікають отвір. Внаслідок цього їх густина з двох сторін отвору різко зростає, а з двох інших сторін – знижується. Темні ділянки поблизу перфорацій ротора – ділянки, на яких індукція досягає 3 – 4 Тл. Світлим ділянках відповідає індукція 0,5 – 1 Тл.

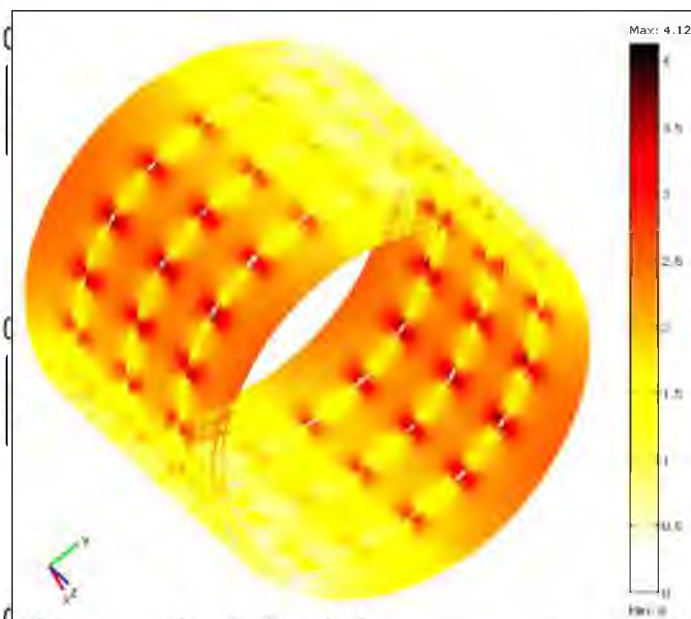


Рисунок 3.4 – Картина тривимірного розподілу магнітної індукції в ППР (П-20-3-4) у вигляді ліній струму

Як показує аналіз [114-116], конструктивне виконання МФР робить істотний вплив на параметри та характеристики асинхронних машин. Виконання наскрізних поздовжніх пазів в суцільному феромагнітному роторі, в межах активної довжини машини, дозволяє зменшити вплив поперечної складової ВС, завдяки чому збільшується електромагнітний момент і коефіцієнт потужності машини. Таким чином, поряд із завданнями проектування АД з ППР, важливим завданням є перевірка можливості зменшення впливу поперечних струмів шляхом застосування раціональної схеми перфорацій порожнистого феромагнітного ротора. Розв'язання даної задачі пов'язане, перш за все, з визначенням картини струморозподілу в ППР. На рис. 3.5 представлена картина миттєвого розподілу z-компоненти (осьової складової) щільності ВС у поперечному перерізі суцільного феромагнітного ротора при $s = 0,1$.

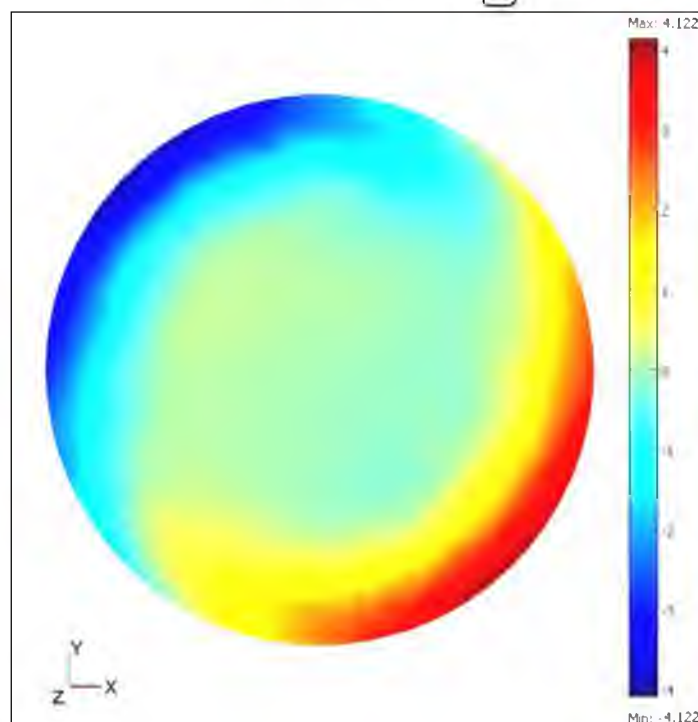


Рисунок 3.5 – Картина розподілу густини ВС у поперечному перерізі суцільного феромагнітного ротора при $s = 0,1$

На рис. 3.6, 3.7 представлені картини миттєвого розподілу густини ВС у поверхневому шарі відповідно порожнистого гладкого і перфорованого ротора при $s = 0,2$. Розглянутий ППР має 20 прямих рядів по 5 отворів, діаметром 7 мм. Розмір векторів на рисунках пропорційний величині позної щільності

струму, а її z-компонента визначається відповідно з відтінком колірної заливки на поверхні ротора.

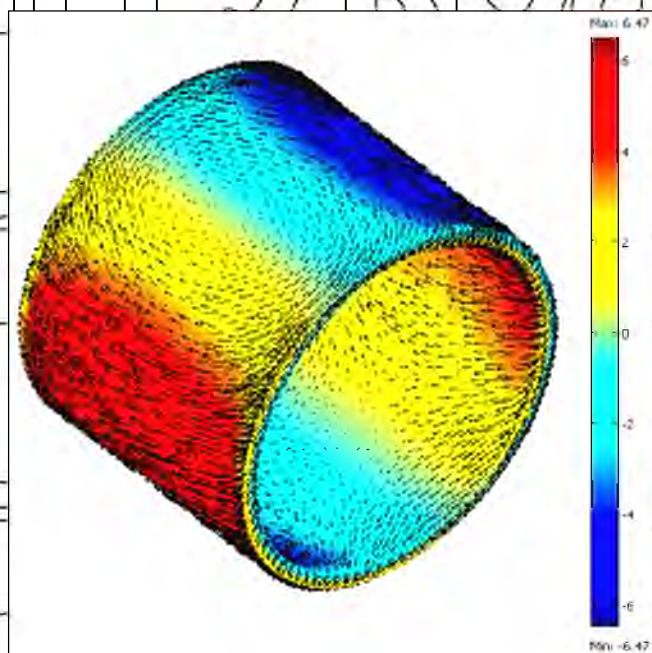


Рисунок 3.6 – Картина розподілу густини ВС в порожнистому гладкому роторі

Відзначимо основні особливості розподілу ВС в перфорованому феромагнітному роторі. У даному режимі частота струму в роторі становить 10 Гц, причому в межах одного полюсного поділу максимум повної густини ВС склав $10,05 \text{ A/mm}^2$, а мінімум $0,07 \text{ A/mm}^2$ на зовнішній та внутрішній поверхнях порожнистого ротора відповідно. За винятком «крайових» зон ротора, де переважає поперечна складова ВС, а також ділянок «входу» магнітного потоку в ротор, ВС мають переважно аксальний напрямок.

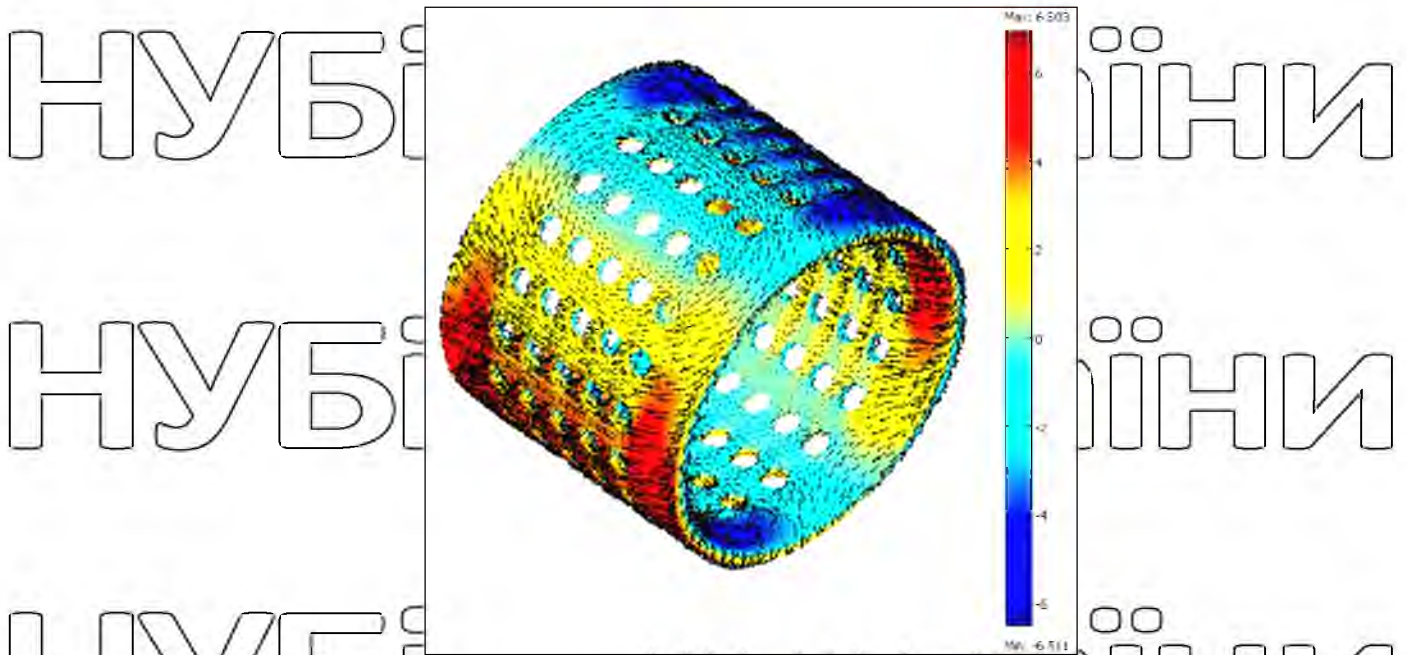
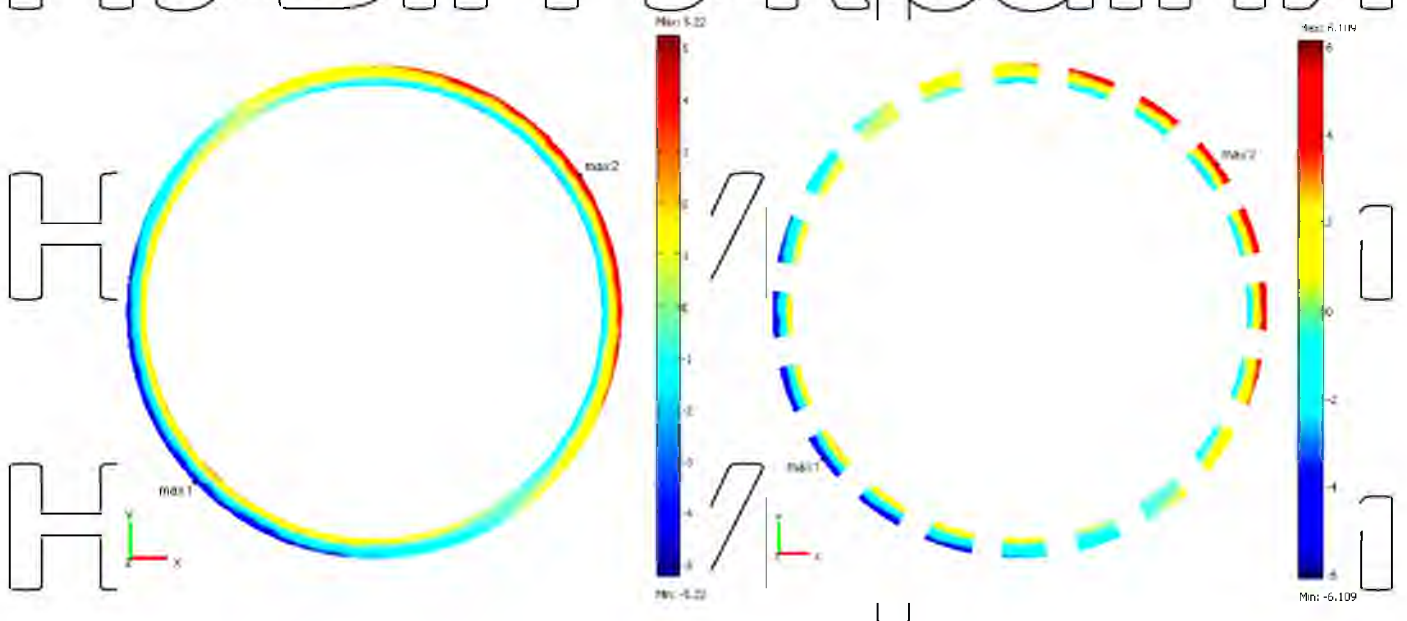


Рисунок 3.7 – Картина розподілу густини ВС у ППР (ПІ-20-5-7)

Величина густини ВС в середині активної довжини ротора, безпосередньо під «полюсами» прагне до нуля.

На рис. 3.8 представлені картини розподілу z-компоненти густини ВС у поперечному перерізі гладкого і перфорованого роторів, що проходить посередині активної довжини при $s = 0,2$. На рисунку видно, що складова ВС, перпендикулярна площині рисунка, протікає у двох протилежних напрямках, утворюючи тим самим контури протікання струму. При цьому спостерігаються ділянки ротора, де на його поверхні протікають струми одного напрямку, а на деякій глибині протікають згасаючі струми, спрямовані протилежно.



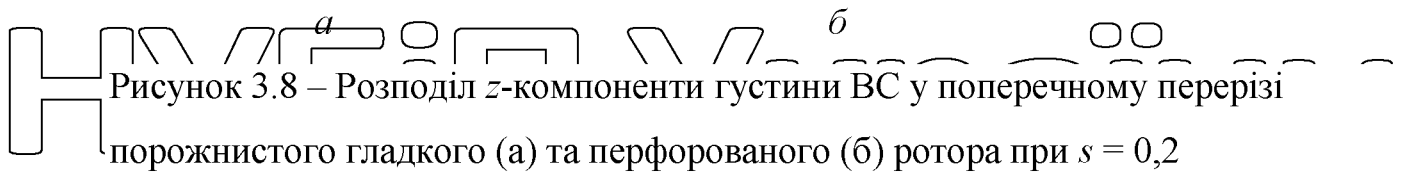


Рисунок 3.8 – Розподіл z -компоненти густини ВС у поперечному перерізі порожнистого гладкого (а) та перфорованого (б) ротора при $s = 0,2$

3.4. Дослідження Статичні механічні характеристики асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором

За своєю конструкцією АД з ППР є одночасно електродвигуном і рідинно-кільцевим насосом з двостороннім підведенням рідини. Обертання лопаткового 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 [115, 121]. З метою визначення впливу перфорацій ротора на величину електромагнітного моменту була проведена серія кінцево-елементних розрахунків механічних характеристик АД із різними конструктивними варіантами ППР. Сьогодні відомі три основні методи визначення електромагнітного моменту [122]:

- 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 [122-125], що підтверджують ефективність даного методу. При чисельних розрахунках доці-

льно 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 , розташованою в немагнітному середовищі на нескінченно малій відстані від ротора і обмежує його обсяг V [95, 122]. 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 електромагнітній силі по (2.27), що діє на обсяг V , то цю силу можна знайти шляхом підсумовування елементарних сил натягу $\vec{T}_n dS$

$$\vec{F}_V = \int_V \vec{f}_V dV = \int_S \vec{T}_n dS = \vec{q}_x F_x + \vec{q}_y F_y + \vec{q}_z F_z, \quad (3.30)$$

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:

$$F_x = \int_S T_{nx} dS, \quad F_y = \int_S T_{ny} dS, \quad F_z = \int_S T_{nz} dS, \quad (3.31)$$

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 [122]

$$\vec{T}_n = \frac{1}{4\pi} (\vec{B} B_n - 0,5 B^2 \vec{n}), \quad (3.32)$$

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 [122]

$$\vec{M} = \oint_S [\vec{r} \vec{T}_n] dS = \vec{q}_x M_x + \vec{q}_y M_y + \vec{q}_z M_z, \quad (3.33)$$

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

$$M_x = \vec{q}_x \vec{M} = \oint_S (y T_{nz} - z T_{ny}) dS;$$

$$M_y = \vec{q}_y \vec{M} = \oint_S (z T_{nx} - x T_{nz}) dS; \quad (3.34)$$

$$M_z = \vec{q}_z \vec{M} = \oint_S (x T_{ny} - y T_{nx}) dS.$$

Електромагнітний момент АД з ПКР розрахований за допомогою функції Torque, що використовує проекції 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 СKE;
- за допомогою моделей, що мають рухому СKE (Moving mesh), відтворюючи обертання ротора [127].

Перший спосіб передбачає аналіз поля в конкретний момент часу, при цьому використовується нерухома СKE. 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

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 в якості вихідних даних напруги живлення усуває цю необхідність, однак призводить до важко вирішуваних проблем тривимірного моделювання.

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. 3.3.

Таблиця 3.3 - 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

Механічна характеристика вихідного АД з короткозамкненим ротором представлена на рис. 3.10.

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.

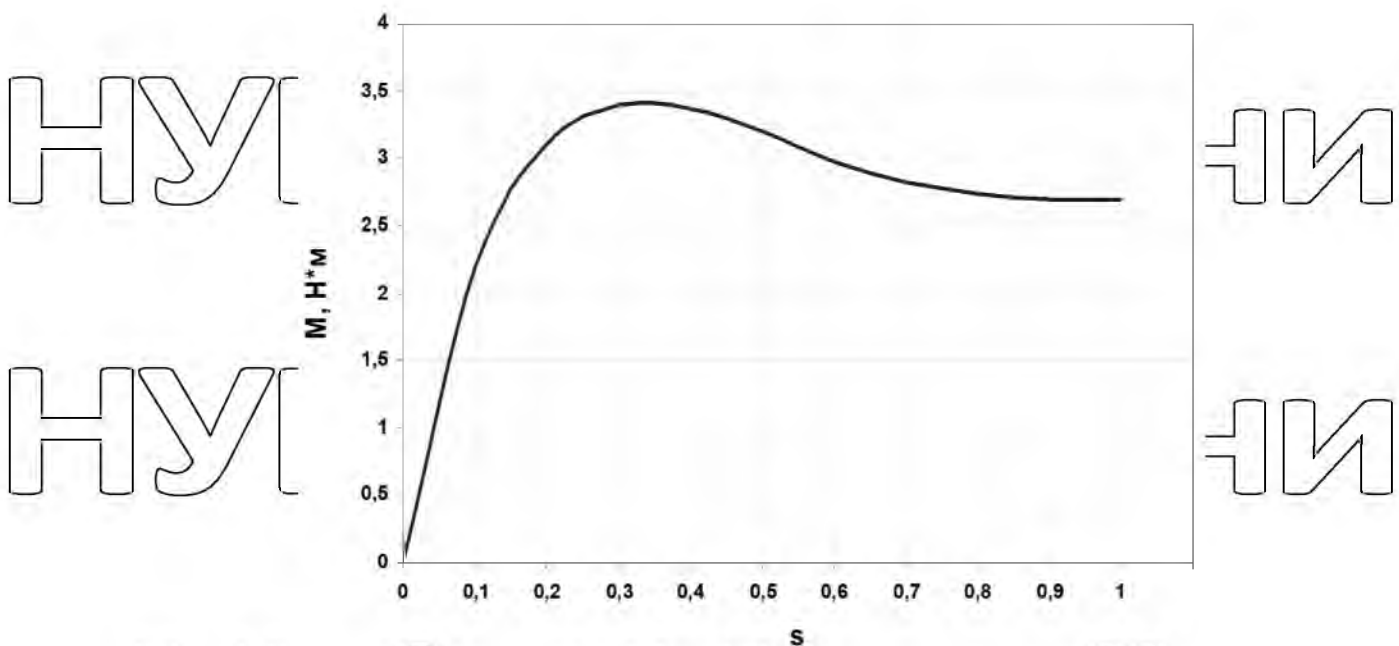


Рисунок 3.10 – Механічна характеристика вихідного АД із короткозамкненим ротором

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.

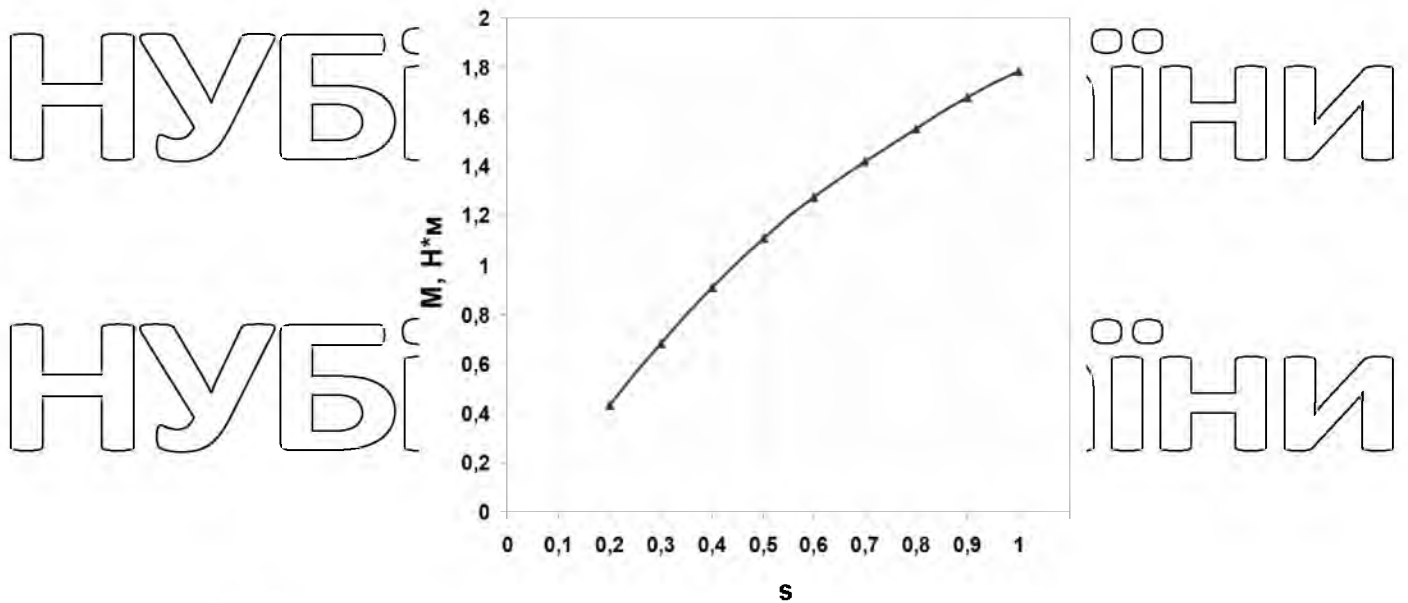


Рисунок 3.11 – Механічна характеристика АД с порожнистим гладким ротором

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 [54]. 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 підвищенням 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 50-500 Вт [128] номінальне ковзання знаходиться в межах 0,3...0,4. У порожнистому феромагнітному роторі із збільшенням частоти обертання, товщина струмонесучого шару не перевищує товщини стінки циліндра, що обумовлює більший активний опір. Брахуючи велику кількість різноманітність усіляких конструктивних варіантів ІДР, 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 ($M_{ном} = 1,34 \text{ Н}\cdot\text{м}$) і пускового ($M_{п} = 1,79 \text{ Н}\cdot\text{м}$) моментів, відповідних АД з гладким ротором.

На рис. 3.12 представлено сімейство механічних характеристик АД з ППР при різній кількості рядів отворів. Отримані залежності моменту від ковзання для АД з ППР при різних значеннях Z_2 мають вигляд, характерний для механічних характеристик АД з масивним ротором. Як видно з рис. 3.12, із збільшенням кількості рядів отворів (при $p = \text{const}$, $d = \text{const}$) величини моментів зменшуються практично при всіх значеннях ковзання. 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 2...4 мм дозволяє отримати механічну характеристику еквівалентну механічній характеристиці АД з гладким ротором.

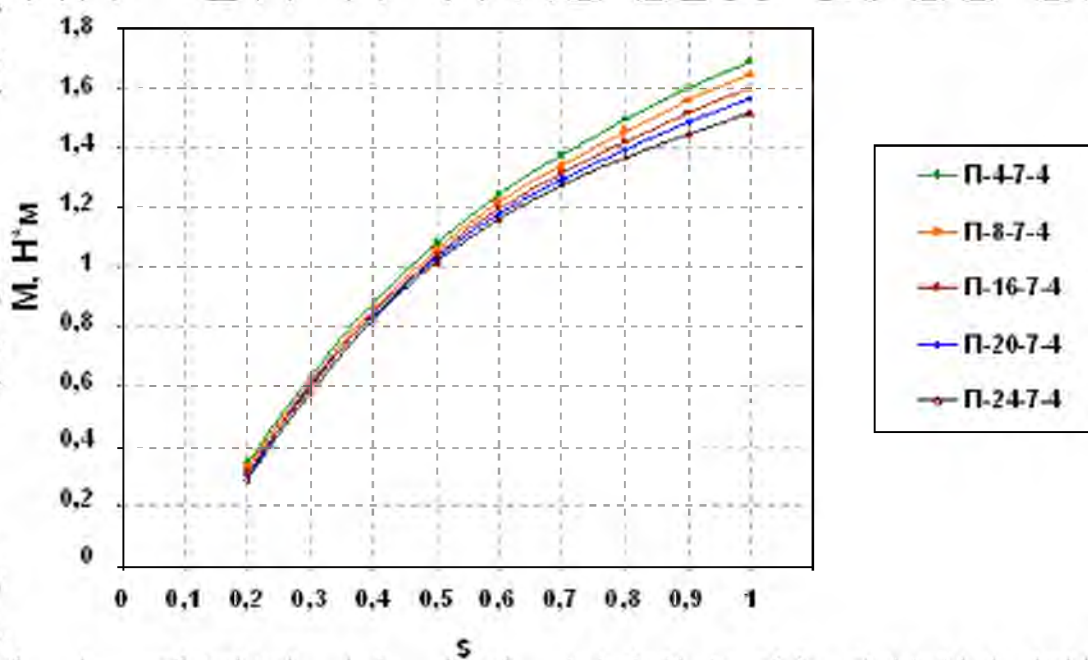


Рисунок 3.12 – Сімейство механічних характеристик АД з ППР при різних значеннях Z_2 ($n = 7, d = 4$ мм)

Збільшення числа n на одиницю впливає на механічну характеристику майже так само, як і збільшення d на 1 мм. Одночасне збільшення діаметру отворів призводить до більш різкого зниження моменту.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ З ПІРОЖНИСТИМ ПЕРФОРОВАНИМ РОТОРОМ

Основним завданням АД з ППР є нагрів теплоносія, тому при його розробці мають вирішуватися питання забезпечення заданих вихідних характеристик, і, в першу чергу, температури робочої рідини. Температура робочої рідини залежить від усіх джерел теплової потужності, тому, на відміну від традиційних ЕМ, тепловий розрахунок АД з ППР навіть наближено не може зводитися до визначення тільки температури обмотки статора, необхідної для перевірки відповідності класу нагрівостійкості ізоляції. Разом із тим, рішення таких задач, як визначення значень робочих температур елементів конструкції, що дозволяють прогнозувати експлуатаційні характеристики пристрою і оптимізувати його параметри для отримання заданих показників продуктивності, неможливе без аналізу теплових процесів.

У АД з ППР робоча рідина рухається за допомогою ротора, а момент опору, що виникає, призводить до зниження частоти обертання, що в свою чергу веде до збільшення теплових втрат. Тому, найбільшу частку від загальних тепловиділень в активних частинах АД становитимуть втрати в масиві ротора. При цьому рідина, що нагрівається виступає в двох якостях: механічне навантаження для ротора, створювана силами в'язкого тертя, охолоджуюча середовище, яка омиває ППР і відбирає від нього теплоту. Оскільки конструктивно АД з ППР є ще й рідинно-кільцевим насосом з двостороннім підведенням, то в його робочому обсязі виникає складний просторовий потік робочої рідини. Внаслідок великої складності гідравлічного тракту, а також комплексного впливу кавітаційних і вихрових гідродинамічних ефектів параметри потоку (швидкість, тиск і температура) в кожній точці робочого об'єму мають різні значення. Це в свою чергу характеризує складність ідентифікації умов охолодження активної частини і суттєво ускладнює визначення значень коефіцієнтів тепловіддачі, що мають першорядне значення в теплових розрахунках. Оскільки нагрів навколишнього середовища

визначається, перш за все, умовами тепловіддачі з поверхні [105, 129], точність визначення її температурних параметрів буде залежати від значень коефіцієнтів тепловіддачі, описуваних, як правило, емпіричними формулами і не повністю враховують технологічні та конструкційні фактори.

Певну складність представляє задача розрахунку теплових параметрів статора АД з ППР, який складається із сукупності фізично різнорідних матеріалів, що знаходяться у істотно різних умовах теплопередачі і, відповідно, що характеризуються об'ємними градієнтами температур. Наявність герметизуючої гільзи, що безпосередньо прилягає до внутрішньої поверхні сердечника, призводить до погіршення умов охолодження статора. З метою спрощення взаємозалежної задачі в розрахунковій моделі АД з ППР приймається ряд припущень, що не створюють фізичної сутності процесів:

- значення коефіцієнтів тепловіддачі приймаються середніми і визначаються відповідно до критеріальних рівнянь, структура яких залежить від режиму течії робочої рідини і форми перерізу каналу;
- градієнт температури в поздовжньому перетині АД з ППР відсутній, а теплове поле розглядається в поперечному перерізі;
- з огляду на те, що інерційність теплових процесів істотно вище інерційності електромагнітних процесів, впливом перехідних режимів електромагнітного поля нехтуємо.

4.1. Математична модель електромагнітного та теплового поля асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором

У попередньому розділі дослідження електромагнітних процесів і механічних характеристик АД з ППР проводилося без урахування взаємозв'язку з тепловим полем. По-перше, аналіз впливу безпосередньо перфорацій ротора стає зручнішим і наочним при розгляді електромагнітної задачі окремо. По-друге, незважаючи на великі можливості сучасних комп'ютерів, отримання рішення для тривимірних взаємопов'язаних завдань представляє досить складну

проблему.

Для асинхронних машин з масивним ротором облік взаємного впливу електромагнітного та теплового поля є особливо важливим [98]. Нагрівання масивного ротора призводить до істотної зміни конфігурації струмонесучого шару, до зміни щільності тепловиділень і, відповідно, температури. Дослідження впливу нагріву гладкого ротора на характер розподілу ВС [98] показали, що при обліку нерівномірного нагрівання ВС прагнуть проникнути в нижні, більш «холодні» шари ротора, що володіють більшою електричною провідністю.

При цьому зменшення амплітуди густини ВС на поверхні ротора в порівнянні з «холодним» ротором становить 35 %. Даний приклад показує необхідність урахування взаємозв'язку електромагнітних і теплових процесів з метою отримання адекватної картини розподілу теплового поля в перерізі активної частини АД з ППР.

У загальному вигляді система взаємопов'язаних диференціальних рівнянь для електромагнітного поля щодо векторного магнітного потенціалу \vec{A} і теплового поля щодо температури T має наступний вигляд:

$$\Delta \vec{A} - \mu\gamma(T) \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \mu\gamma(T)(\vec{v} \times \text{rot } \vec{A}) = -\mu \vec{J}_{\text{стор}},$$
$$\lambda \Delta T - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = P(A),$$
(4.1)

де λ , c , ρ – відповідно теплопровідність, теплоємність і щільність матеріалу, $P(A)$ – питома потужність джерел тепла. Рівняння електромагнітного поля доповнюється граничними умовами (2.15), (2.16). У двовимірних декартових координатах рівняння електромагнітного поля для аксіальної складової векторного магнітного потенціалу A_z , а також рівняння нестационарної теплопровідності будуть мати вигляд.

$$\delta^2 \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}_z}{\partial y^2} + \mu \gamma (T) \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial t} - \mu \gamma (T) (v_x \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial y}) = \mu \vec{J}_{z \text{ статор}} \quad (4.2)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + c_p \frac{\partial T}{\partial t} = P(A)$$

Рух провідної охолоджуючої рідини в зазорі АД з ППР являє собою

класичну модель течії між двома співвісними циліндрами. При цьому провідна

рідина тече по кільцевому зазору внаслідок обертання внутрішнього циліндра

щодо зовнішнього, нерухомого. Магнітне поле спрямоване перпендикулярно ци-

ліндричних стінок і обертається з синхронною швидкістю згідно з ротором. Бу-

демо вважати, що довжина кола циліндрів значно більше зазору між ними, а обе-

ртове магнітне поле представимо біжучим. Схема такого перебігу показана на

рис. 4.1. Слінка при $y = 0$ має постійну лінійну швидкість, а при $y = \delta$ – нерухома.

Тоді лінійна швидкість часток рідини, прилеглих до поверхні обертового ротора

дорівнює

$$V = 2\pi \cdot \omega_R \cdot r, \quad (4.3)$$

де r – зовнішній радіус ротора.

Оскільки герметизуюча гільза нерухома, то градієнт швидкості рідини в зазорі визначається

$$|\text{grad } v| = \frac{dV}{dy} = \frac{2\pi \cdot \omega_R \cdot r}{R - r}, \quad (4.4)$$

де y – координата вздовж радіальної вісі по перерізу зазору; R – внутрішній радіус герметизуючої гільзи.

Локальна швидкість (y -го шару рідини) в зазорі при простому перебігу Ку-етта визначається

$$V_y = \frac{\delta - y}{\delta} v, \quad (4.5)$$

де δ – величина зазору між циліндрами.

Для обертального руху ротора і провідного охолоджуючого середовища лінійні швидкості в кожній точці виражаються через кутову частоту обертання.

При цьому складові швидкості рівні $v_x = \omega \cdot y$, $v_y = \omega \cdot x$. При заданні швидкості обертання окремих верств робочої рідини з'являється можливість об-

ліку реального характеру руху провідного середовища в зазорі АД з ППР, що дозволяє підвищити точність електромагнітного та теплового розрахунку.

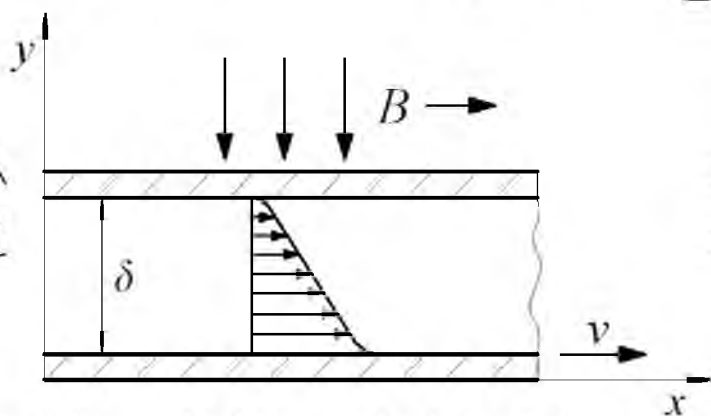


Рисунок 4.1 – Течія робочої електропровідної рідини в зазорі АД з ППР

За відомою функцією векторного магнітного потенціалу на підставі співвідношення $B = \text{rot } A$ знаходяться складові вектора магнітної індукції:

$$B_x = \partial A_z / \partial y, B_y = -\partial A_z / \partial x. \quad (4.6)$$

Для визначення густини струму в роторі використовується вираз, що випливає з першого рівняння системи рівнянь Максвелла

$$J_z = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right). \quad (4.7)$$

Сумарна теплова потужність АД з ППР розраховується за виразом

$$P(A) = J_z^2(A) / \gamma(T) + J_{стор}^2 / \gamma(T) + P_{e1} + P_{кас} + P_{тер} + P_{рез} + P_{мех} + P_{од}, \quad (4.8)$$

де P_{st} – втрати в сталі статора; $P_{кав}$ – потужність тепловиділень, обумовлених кавітацією; $P_{тер}$ – потужність втрат на тертя рідини в зазорі АД з ППР; $P_{рез}$ – потужність тепловиділень за рахунок резонансних коливань; $P_{мех}$ – механічні втрати на тертя в підшипниках; $P_{дод}$ – додаткові втрати.

У вираз (4.8) входять всі існуючі складові тепловиділень: втрати від ВС в роторі (від усіх гармонійних електромагнітного поля), втрати в міді і сталі статора, а також складові, які не можуть бути знайдені безпосередньо за результатами розрахунку електромагнітного поля. До таких відносяться тепловиділення, викликані кавітаційними і резонансними процесами, а також тертям рідини між ротором і герметизуючою (непровідною) гільзою. Втрати активної потужності в механічних вузлах і додаткові втрати, дисипуючі в тепло, у кінцевому рахунку, також беруть участь у формуванні потужності нагрівання АД з ППР.

Питома електрична провідність сталі ротора $\gamma(T)$ залежить від температури T у відповідності з виразом

$$\gamma(T) \in \gamma_0 (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (4.99)$$

де γ_0 – електрична провідність масиву при температурі T_0 ;

α – температурний коефіцієнт. Для ротора зі сталі марки Ст. 3 $\gamma_0 = 0,5 \cdot 10^7$ См/м, $\alpha = 0,005$.

Оскільки кожній точці масиву відповідає своє значення температури і електропровідності, то підсумкова закономірність просторового розподілу теплових джерел буде досить складною і може бути знайдена тільки з використанням чисельних методів розрахунку.

4.2. Чисельна реалізація математичної моделі і підготовка вихідних даних

Взаємозв'язок рівнянь електромагнітного та теплового полів проявляється у взаємному впливі температури, електропровідності, густини ВС і питомих теплових втрат, чисельна реалізація яких виконана на базі програмного комплексу Comsol Multiphysics 3.5a, що дозволяє розглядати фізичні властивості

матеріалів як залежні від температури. Для вирішення взаємопов'язаних задач у даному програмному комплексі передбачено спеціалізований модуль Multiphysics. Завдяки ідентичності форми математичного запису рівнянь елект-

ромагнітного та теплового поля розрахунок виконується з використанням єдиної СКЕ, однак, слід зазначити обставини ускладнюючі використання такої СКЕ

[98]. По-перше, теплова інерція для елементів конструкції АД з ППР істотно вище електромагнітної інерції. По-друге, просторовий градієнт зміни польової функції значно більше для електромагнітного поля. Вказані відмінності вимага-

ють адекватного врахування при чисельній реалізації взаємозалежної задачі. Так,

мінімальний розмір розрахункового тимчасового кроку і мінімальний розмір КЕ в СКЕ необхідно приймати виходячи з умов досягнення необхідної точності рішення електромагнітного поля, хоча вибрані розміри будуть надмірно малими

для досягнення такої ж точності аналізу теплового поля. На рис. 4.2 показана

СКЕ моделі спільно з двома панелями налаштувань. Одна з панелей

(Perpendicular Induction Currents) відповідає налаштуванням електромагнітної задачі, друга (Heat Transfer by Conduction) – налаштуванням теплової задачі. Пер-

шим програмним етапом вирішення взаємозалежної завдання є розрахунок квазістационарного поля, що дозволяє визначити розподіл потужності тепловиді-

лень в роторі і статорі в умовах сталого режиму роботи АД з ППР. У якості ви-

хідних для розрахунку електромагнітного поля використовувалися експериментальні дані про токи статора та частоту обертання ротора в режимі навантаження.

НУБІП України

НУБІП України

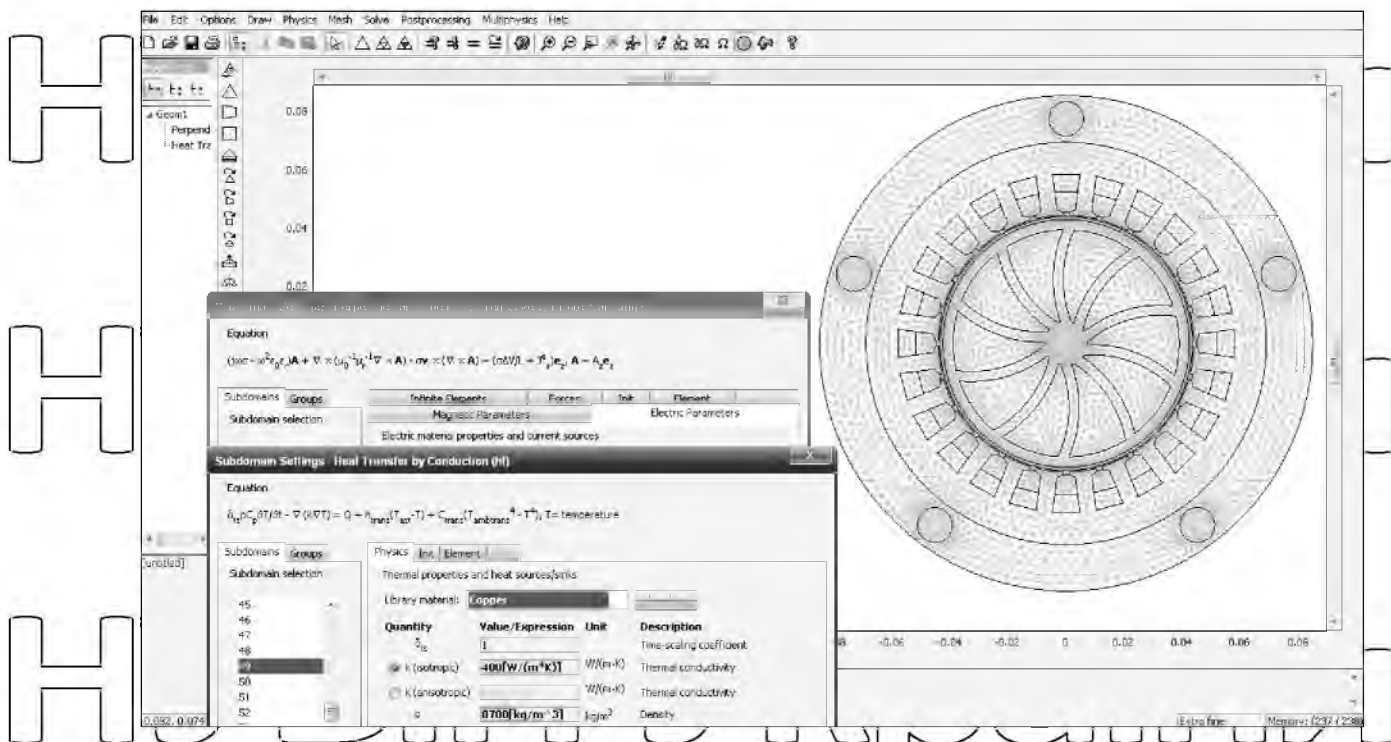


Рисунок 4.2 – СКЕ моделі сумісно з панелями налаштувань

Безпосереднє врахування перфорацій ротора в двовірній геометрії моделі є неможливим. Тому збільшення активного опору ротора внаслідок наявності перфорацій враховувалося за допомогою завдання еквівалентної питомої електропровідності для відповідної розрахункової підобласті згідно виразу

$$\gamma_{\text{екв}}(T) = \frac{\gamma(T)}{k_r} \quad (4.10)$$

де k_r – коефіцієнт, що враховує збільшення активного опору ротора внаслідок введення перфорацій.

Процедура чисельного розрахунку електромагнітного поля аналогічна тій, що розглядається в розділі 2. Потім, дані розрахунку електромагнітного поля засобами програми передаються в підпорядковану задачу нестационарної теплопередачі для розрахунку процесу нагрівання.

Початковими умовами для теплового розрахунку є значення температури усередині розрахункової області в початковий момент часу t_0

$$T(x, y, t)|_{t=t_0} = T_0(x, y, t_0) \quad (4.11)$$

З метою підвищення точності розрахунку враховані залежності теплофізичних властивостей активних матеріалів і навантажувально-охолоджувального середовища (води) від температури, а також залежності магнітної проникності масивного ротора і сердечника статора від величини магнітної індукції.

Як для рівняння електромагнітного поля, так і для рівняння теплопровідності системи (4.2) задаються граничні та початкові умови. Вибір граничних умов обумовлений особливостями охолодження АД з ППР. Основним видом теплообміну ротора та робочої рідини є конвективний теплообмін. Теплова потужність, що віддається конвекцією робочої рідини, визначається відповідно до закону Ньютона-Рихмана, а на відповідних кордонах задається гранична умова третього роду [130]

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{A, B, C, D, E} = -\frac{k_T}{\lambda} (T - T_0), \quad (4.12)$$

де k_T – коефіцієнт тепловіддачі; T_0 – температура охолоджуючого середовища.

На рис. 4.3а показана розрахункова геометрична модель, яка відтворює конструкцію АД з ППР в поперечному розрізі. Гранична умова (4.12) задається на зовнішній та внутрішній поверхнях ротора А і В, на внутрішній поверхні герметизуючої гільзи С, на зовнішній поверхні корпусу D і на поверхнях охолоджуючих аксіальних каналів Е (рисунок 4.3б).

Втрати на тертя обертових деталей з газом або рідиною, які насправді виділяються в прикредонному шарі, прийнято вважати поверхневими і представляти у вигляді ідеалізованих джерел поверхневого тепловиділення, приписуючи їм інтенсивність q_F , Вт/м² [131]. У цьому випадку гранична умова третього роду приймає вигляд

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{A, B, C, D, E} = \frac{k_T}{\lambda} (T - T_0) + \frac{q_F}{\lambda} \quad (4.13)$$

Зважаючи на складність гідравлічної конфігурації АД з ППР, основною проблемою теплового розрахунку є визначення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією, значення яких залежать від цілого ряду чинників (форми каналів, стану їх поверхні, параметрів охолоджуючого середовища тощо) і у випадку охолодження рідким середовищем можуть досягати декількох тисяч [132]. Точне встановлення значень коефіцієнтів тепловіддачі є окремою, дуже складною науковою задачею. Умови охолодження більшості частин ЕМ найбільш доцільно порівнювати з тепловіддачею в каналах, оскільки потік охолоджуючого середовища оточений в машині з усіх боків нагрітими стінками [133]. У цьому відношенні АД з ППР не є винятком, однак, так само як і канали ЕМ, канали АД з ППР відрізняються від каналів, які застосовують для вимірів коефіцієнтів тепловіддачі. Робоча рідина рухається в них з нерівномірною швидкістю і схильна до турбулентності, що викликано змінами перетину і різкими поворотами. Турбулентний характер руху рідини сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі, тому більшість встановлених експериментальним шляхом величин коефіцієнтів тепловіддачі повинні збільшуватися на так званий коефіцієнт «вихростворення» [134]

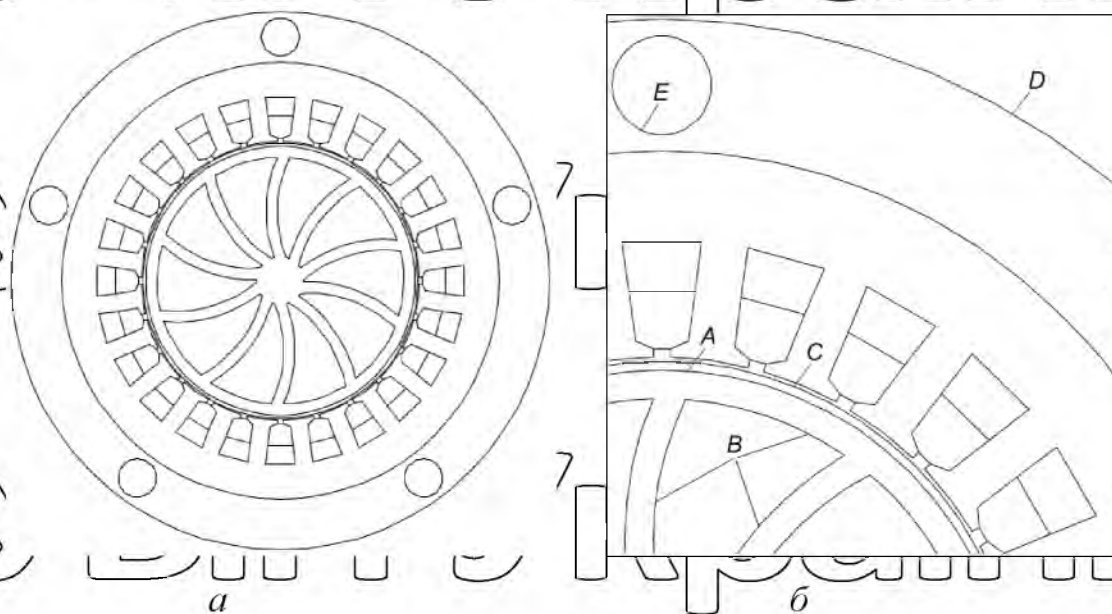


Рисунок 4.3 а) Геометрична модель АД з ППР; б) завдання граничних умов.

З метою визначення коефіцієнтів тепловіддачі проводилися чисельні теоретичні та експериментальні дослідження [133]. Покажемо деякі підходи

Н (вирази) для визначення наближених значень коефіцієнтів тепловіддачі, які використовувалися в чисельних розрахунках теплового поля РНТ при завданні граничних умов третього роду (4.12).

На зовнішній поверхні корпусу D згідно дослідних даних з герметично закритими машинами та масляними трансформаторами [133, 134] (при природному охолодженні через теплопровідність і конвекцію в повітрі) задається значення $k_T \approx 8$ Вт/(°С·м²). Для розрахунку значення коефіцієнта тепловіддачі на поверхні аксіальних каналів E статора може використовуватися ряд відомих виразів, що дозволяють визначити середній коефіцієнт тепловіддачі в круглому каналі при турбулентному режимі течії. Серед них найбільш часто використовується вираз М.А. Міхєєва [135]

$$Nu_{\text{жсд}} = 0,021 \cdot Re_{\text{жсд}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{жсд}}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{жсд}}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon, \quad (4.14)$$

де $Re_{\text{жсд}}$ – число Рейнольдса для руху рідини в круглому каналі; $Pr_{\text{жсд}}$ – число Прандтля при температурі рідини у центрі каналу; $(Pr_{\text{жсд}}/Pr_c)^{0,25}$ – поправка на змінність фізичних параметрів у поперечному перерізі каналу [136]; ε – поправка на ділянку гідродинамічної стабілізації при турбулентному режимі, що визначається згідно з [136].

На практиці теплових розрахунків ЕМП знайшла застосування емпірична формула Ріхтера, яка застосовна для каналу з нормальною турбулентністю ($104 < Re < 106$) і враховує велику кількість параметрів каналу і охолоджуючого середовища

$$k_T \approx 0,178 \lambda^{0,178} (sc)^{0,832} r^{0,088} l^{-0,256} v^{0,832}, \quad (4.15)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності робочої рідини; s – питома вага робочої рідини; c – питома теплоємність робочої рідини; r – гідравлічний радіус перетину каналу (у круглому каналі дорівнює дійсному радіусу); l – довжина каналу; v – швидкість робочої рідини.

Для наближеного розрахунку коефіцієнта тепловіддачі на зовнішній

поверхні ротора А може використовуватися вираз для середнього коефіцієнта тепловіддачі на внутрішній стінці каналу кільцевого перерізу при турбулентному протіканні рідини [136]

$$Nu_{жк} = 0,017 \cdot Re_{жк}^{0,8} \cdot Pr_{жк}^{0,4} \cdot \left(\frac{Pr_{жк}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{d_2}{d_\phi} \right)^{0,18} \cdot \varepsilon, \quad (4.16)$$

де $Re_{жк}$ – число Рейнольдса для руху рідини в кільцевому каналі;
 $Pr_{жк}$ – число Прандтля при температурі рідини в середині каналу; $d = d_2 - d_1$ – еквівалентний діаметр кільцевого каналу.

Необхідно відзначити, що метод розрахунку тепловіддачі за допомогою еквівалентного діаметра є наближеним, точні межі його застосовності не встановлені.

Суттєвою невизначеністю характеризуються умови охолодження внутрішньої поверхні ротора В. Незважаючи на суттєвий досвід проектування вихрових машин, розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі з їх робочих поверхонь проводиться за допомогою емпіричних залежностей [137]. Серед них найбільш часто використовуються залежності (4.14) і (4.16). Вираз (4.14) може бути використано для визначення коефіцієнта тепловіддачі в каналах трикутного перетину (міжлопаткових каналах), при цьому попередньо розраховується еквівалентний діаметр [136]

$$d_э = 4F/U, \quad (4.17)$$

де F – площа поперечного перерізу каналу; U – периметр каналу.

Вирази (3.14) і (3.16) відносяться до гладких поверхонь труб, в припущенні, що не виникає додаткових вихорів, викликаних раптовими змінами перетину і різкими поворотами, характерними для гідравлічного тракту АД з ИПР.

Експериментально встановлено [133], що коефіцієнт тепловіддачі підвищується за рахунок додаткових вихорів, обумовлених раптовими змінами перетину і різкими поворотами, і його підвищення не залежить від швидкості охолоджуючого середовища. Тому, воно може враховуватися за допомогою простого числового

коефіцієнта «вихроутворення». Згідно з результатами дослідів Рітшеля цей коефіцієнт досягає значення 1,75. Відповідно в експериментах поставлених фірмою A.E.G., коефіцієнт тепловіддачі може збільшитися аж до двохразового значення, внаслідок вихростворення [133]. Відповідно до вимірів Зутте, коефіцієнт «вихростворення» може приймати значення від 1,7 до 1,9 [138]. Цей коефіцієнт рекомендовано приймати великим (2...2,1) у поверхні повітряного зазору між нерухомими і обертовими частинами машини. Додаткове вихростворення при вузьких каналах позначається лише в межах невеликої ділянки по довжині каналу, отже, в середньому можна приймати цей коефіцієнт рівним 1,3 [134].

Теплообмін на внутрішній поверхні герметизуючої гільзи 6, яка примикає до зони підвищеного тиску і стикається з сумішшю рідини і кавітаційних бульбашок, має складну фізичну природу. Процес кавітації супроводжується утворенням великої кількості бульбашок, наповнених переважно парами рідини, а також газами, і має багато спільного з процесом кипіння рідини, у зв'язку з чим, коефіцієнти тепловіддачі при кавітації і кипінні повинні визначатися подібним набором теплофізичних параметрів: щільністю рідкої і парової фази, питомою теплою пароутворення, коефіцієнтом теплопровідності рідини і пари, коефіцієнтом в'язкості рідини. У результаті аналізу рівнянь динаміки двофазного середовища методами теорії розмірностей і обробки дослідних даних Д.О. Лабунцовим було отримано співвідношення для визначення коефіцієнта тепловіддачі при бульбашковому кипінні нерухокої рідини у великому обсязі [139]

$$k_0 = b \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right) \lambda^{2/3} (\zeta \nu T_n)^{-1/3} q^{-2/3}, \quad (4.18)$$

де ρ' і ρ'' – густина рідини та пари за температури насичення; ζ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини за температури насичення; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини; T_n – температура насичення; q – густина теплового потоку.

Для функції $b(\rho'/\rho'')$, на основі дослідних даних виведено емпіричний вираз

$$Nu_{\text{в}} \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right) = 0,075 \left(1 + 10 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{-2/3} \right) \quad (4.19)$$

При вимушеному русі киплячої рідини в трубах в умовах, коли рідина нагріта до температури насичення, коефіцієнт тепловіддачі може бути підрахований з використанням наступних виразів [140]:

$$k_T = k_1 \quad \text{при} \quad \frac{k_2}{k_1} \leq 0,5; \quad (4.20)$$

$$k_T = k_1 \quad \text{при} \quad \frac{k_2}{k_1} \leq 2; \quad (4.21)$$

$$\frac{k_T}{k_1} = \left(1 + \frac{k_2}{k_1} \right)^{1/2}, \quad \text{при} \quad 0,5 \leq \frac{k_2}{k_1} \leq 2, \quad (4.22)$$

де k_1 – коефіцієнт тепловіддачі при турбулентному русі однофазної рідини в каналі круглого перерізу, що визначається за виразом (4.14); k_2 – коефіцієнт тепловіддачі при розвиненому бульбашковому кипінні у великому обсязі, що визначається за виразами (4.18) і (4.19).

В цілому, завдання адекватних умов теплообміну в робочому зазорі між ротором і герметизуючою гільзою являє собою дуже складну проблему. Внаслідок малої величини зазору витрата рідини через нього в аксіальному напрямку Q_3 значно менше загальної витрати через теплогенератор – Q_{Σ} . Ймовірно, що область робочого зазору може бути змодельована еквівалентним шаром з малим коефіцієнтом теплопровідності, а також значеннями густини і теплоємності, характерними для парорідинної суміші. У реальних умовах частина рідини, що проходить через зазор в аксіальному напрямку і нагрівається в ньому, змішується з основним потоком, і тому підвищення температури рідини, внаслідок нагрівання в зазорі залежатиме від співвідношення Q_3 і Q_{Σ} .

З метою визначення середніх значень швидкості рідини (по перетину

каналів), необхідних для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі, попередньо визначається секундна витрата рідини АД з ППР [141]

$$Q_{\Sigma} = \left(\frac{\pi}{4} (D_l^2 - D_c^2) - \frac{zS}{2} (D_l - D_c) \right) \cdot b \frac{n}{60}, \quad (4.23)$$

де D_l та D_c – діаметр робочого колеса по крайках лопатей та діаметр ступиці відповідно; z – число лопатей; S – середня товщина лопатей; b – ширина лопаті; n – частота обертання робочого колеса.

Рівняння (4.2)-(4.9) безпосередньо використані для розрахунку температурного поля в поперечному перерізі АД з ППР з метою знаходження наближених значень робочих температур елементів конструкції, що дозволить спрогнозувати експлуатаційні характеристики пристрою і при подальших дослідженнях оптимізувати його параметри для отримання заданих показників продуктивності. Сумарна теплова потужність АД з ППР, що визначається відповідно до виразу (4.8)

дозволяє знайти температуру теплоносія, що гріється, шляхом інтегрування по площі відповідних розрахункових підобластей (каналів). При наявності теплообміну температура рідини в різних точках каналу різна. Температура частинок рідини, що стикаються зі стінкою, буде дорівнювати температурі стінки, а температура частинок, що течуть в центрі каналу, буде більше або менше в залежності від того, відбувається охолодження або нагрівання рідини. У проміжних точках перетину температура змінюватиметься між цими значеннями, як правило, по параболічному закону. Тому, для визначення показників продуктивності АД з ППР використовується поняття середньої температури рідини по перетину

[136]

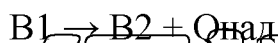
$$T_{жс} = \frac{1}{S} \int_S t_{жс} dS, \quad (4.24)$$

де S – площа інтегрування; t_p – локальне значення температури рідини.

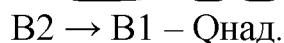
У реальних умовах осереднення температури рідини на виході з каналу відбувається за наявності будь-яких вихорів, що надають переміщуючий

вплив. Коректне завдання потужності тепловиділень, що виникають у робочому обсязі АД з ППР за рахунок гідродинамічних ефектів, може бути виконано виходячи з оцінки ефективності його роботи. Точне визначення величини цих тепловиділень вимагає проведення експериментальних, а також теоретичних досліджень гідродинамічних процесів АД з ППР і виходить за рамки даної роботи.

Серед безлічі гіпотез про причини надефективності ГГ [34-38] найбільш обґрунтованою і правдоподібною виглядає гіпотеза, в якій поява надлишкового тепла $Q_{над}$ пояснюється екзотермічним фазовим переходом рідини $B1 \rightarrow B2$, що піддається механоактивації [34]



Однак дослідженнями [34] також встановлено, що частково впорядкований стан води виявляється нестійким і супроводжується зворотнім переходом з метастабільного стану $B2$ в стабільне $B1$, причому зворотний перехід $B2 \rightarrow B1$ є ендотермічним і може відбуватися як з відносно монотонним, так і зі стрибкоподібним поглинанням тепла



Стрибкоподібний фазовий перехід $B2 \rightarrow B1$ супроводжується різким охолодженням води. Так, наприклад, температура води може понизитися від $T2 = 75^\circ\text{C}$ в дисперсній фазі $B2$ до $T1 = (45 - 55)^\circ\text{C}$ у фазі $B1$. Час релаксації при зворотному переході, в залежності від стабільності зовнішніх умов і чистоти води, може становити від кількох до десятків хвилин. Таким чином, механічна обробка води, супроводжувана інтенсивною кавітацією [34, 142], може призводити до виділення і поглинання теплоти. Важливо відзначити, що, якщо температуру $T2$ гарячої води в дисперсній фазі $B2$ понизити, наприклад, шляхом теплообміну з навколишнім середовищем, то температура $T1$ води у фазі $B1$ після зворотного переходу може виявитися нижчою, ніж первісна.

У дослідженні [35] описується механізм отримання надлишкової теплоти фазового переходу $Q_{над}$ в робочій камері теплогенератора, який знайшов експериментальне підтвердження в роботах інших авторів [28-30]. Однак, факт

наявності додаткової теплоти $Q_{над}$ не означає, що вона може бути використана для збільшення теплопродуктивності генератора. Теплопродуктивність ГТ за час τ , як правило, визначають по перепаду температури на теплообміннику $\Delta T = T_2 - T_1$ і витраті G води в контурі

$$Q = k \Delta T G \tau, \quad (4.25)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Ефективність роботи ГТ, у нехтуванні розсіюванням тепла в гідромагістралях і елементах контуру, оцінюють відношенням

$$\eta_o = \frac{Q}{W}, \quad (4.26)$$

де Q – теплота, що передана від ГТ споживачу за час τ ; W – електроенергія споживана ГТ за час τ .

Кількість тепла, що виділяється при механоактивації води в ГТ, залежить від потужності, що розсіюється у воді при її активації і теплоти фазового переходу

$$Q = \Delta Q + Q_{исб}, \quad (4.27)$$

де ΔQ – кількість тепла, отриманого водою в результаті прямого перетворення роботи в теплоту; $Q_{исб}$ – надлишкова теплота переходу $B1 \rightarrow B2$.

Теплота Q являє собою суму двох складових, одна з яких $Q_{исб}$, викликана екзотермічним перетворенням води, а інша, в кінцевому підсумку, отримана шляхом перетворення електроенергії W в еквівалентну їй теплоту ΔQ . При

безперервному виробництві теплоти генератором споживач може отримати тільки ту її частину, яка надходить до нього за допомогою теплопередачі, тобто

теплоту ΔQ , причому завжди $\Delta Q \leq W$. Теплота обумовлена тимчасовим тепловиділенням, і, після закінчення часу релаксації ця частина теплоти знову поглинається водою. Тому вона недоступна для передачі споживачеві. У той же час, якщо

використовувати ГТ за схемою з відкритим контуром, то в цьому випадку, можливо забезпечити такий режим роботи, при якому частина теплоти $Q_{исб}$ буде

безперервно видуватись з проточної води, що відчуває пряме фазове перетворення в межах контуру і релаксуючої вже після виходу за його межі. Оскільки при цьому надмірне тепло витягується з зовнішнього стосовно генератору середовища, то принципові обмеження значення ефективності роботи ГТ в подібному режимі, мабуть, відсутні [35].

В [28] наведено конкретні приклади отримання теплової енергії (описані досліди) за допомогою пристрою, конструкція якого найбільш близька до розглянутого в роботі АД з ППР. З наведених експериментальних даних випливає, що ставлення виділеної потужності до витраченої склало 1,27...2,9, в залежності від потужності приводного електродвигуна і температури рідини, що нагрівається. Якщо врахувати втрати електродвигуна, то коефіцієнт перетворення механічної енергії в теплоту склав 1,57...3,59.

Механічна потужність АД з ППР, що витрачається на створення гідродинамічних ефектів і транспортування робочої рідини визначається як

$$P_2 = P_1 - J_z^2(A) / \gamma(T) - J_{стоп}^2 / \gamma(T) - P_{ст} - P_{доп} - P_{мех}, \quad (4.28)$$

де P_1 – потужність, споживана АД з ППР.

Потужність тепловиділень, що обумовлена гідродинамічними ефектами та задається в якості об'ємної густини теплових втрат на розрахунковій ділянці між лопаткових каналів, розраховується виходячи з виразу

$$P_{20} = P_2 \cdot \eta_m, \quad (4.29)$$

де η_m – коефіцієнт перетворення механічну енергії в теплоту.

Втрати в сталі статора, додаткові, а також механічні втрати визначаються за існуючими методиками розрахунку [105, 143], і задаються як об'ємні тепловиділення на відповідних розрахункових ділянках статора і ротора.

Надалі при аналізі теплових процесів домовимося вважати, що на вхід теплогенератора забезпечується подача робочої рідини, що має постійну температуру, що справедливо як для розімкнутої системи охолодження, так і для

замкнutoї у разі передачі теплообміннику незмінної кількості теплоти. Розглядається схема руху теплоносія, при якій рідина через всмоктувальні (вхідні) отвори резонансних дисків надходить у внутрішню порожнину ротора, а виходить через нагнітальні (вихідні) отвори, а також аксіальні канали статора.

4.3. Результати чисельного розрахунку теплового поля асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором

Результатом розрахунку електромагнітної задачі є величина потужності теплових втрат для провідних елементів конструкції АД з ППР. На рис.4.4 представлені залежності потужності тепловиділень від ковзання для різних варіантів ППР. Отримані залежності показують, що зі збільшенням кількості та діаметру перфорацій потужність об'ємних тепловиділень ППР тільки знижується, а характер кривої не залежить від типу схеми перфорацій.

Інтегральні теплові характеристики теплогенеруючого ЕМП з використанням порожнистого феромагнітного елемента різної товщини представлені в роботі [9]. У цій же роботі надані рекомендації з вибору товщини порожнистого феромагнітного циліндра, показано якісний вплив на розподіл магнітного поля, а також підтверджується можливість використання ЕМП в якості пристроїв електронагріву і транспортування, що характеризуються підвищеною ефективністю теплообміну з середовищем, що нагрівається.

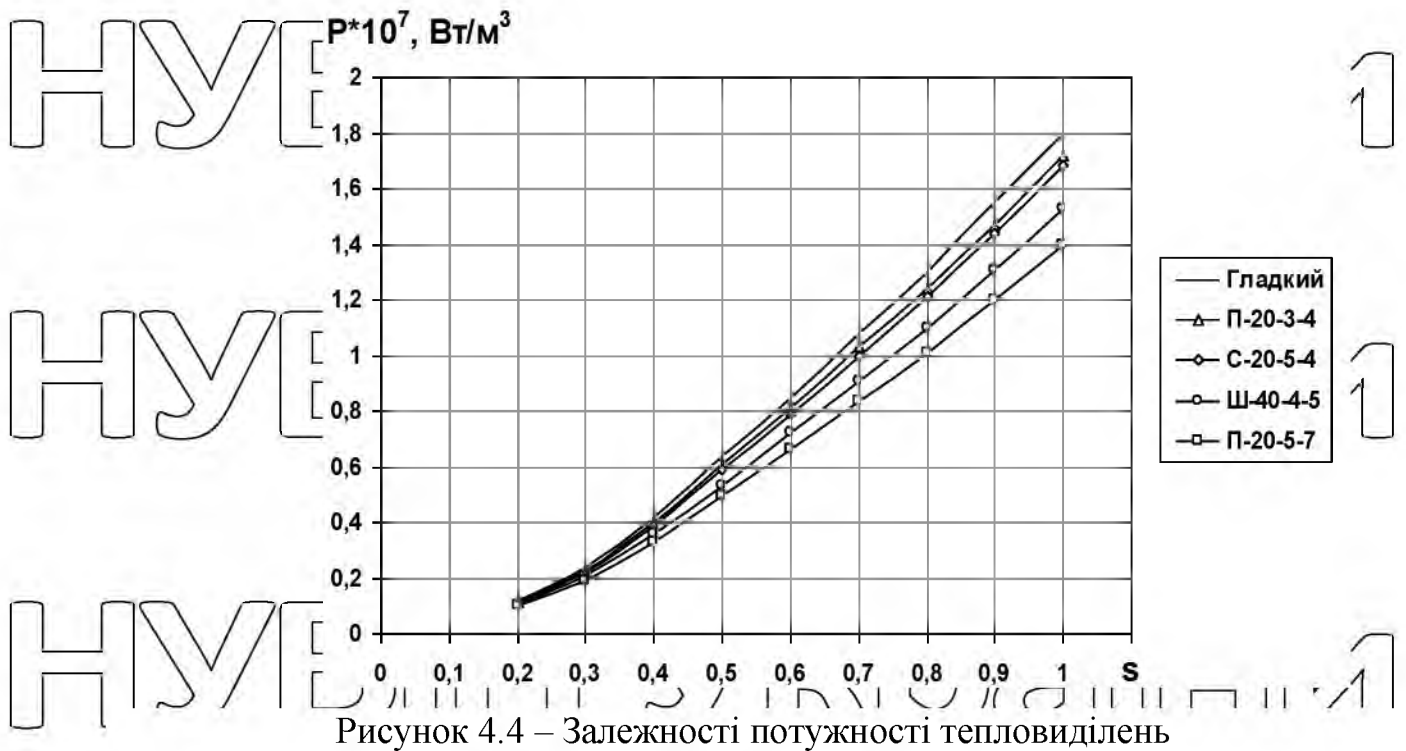


Рисунок 4.4 – Залежності потужності тепловиділень

від ковзання для різних варіантів ППР

Для отримання вичерпної оцінки теплового стану елементів конструкції АД з ППР доцільно розглянути кілька випадків, яким притаманні різні теплові навантаження і охолоджуючі властивості теплоносія:

- робота АД з ППР при різних значеннях η_e ;
- робота АД з ППР при підвищеному значенні $k_{перф.}$ ротора;
- робота АД з ППР при різних параметрах системи охолоджуючих каналів статора.

Результати чисельного розрахунку можуть бути представлені у вигляді картин температурного поля всієї розрахункової області для конкретного моменту часу, а також у вигляді температурно-часових залежностей для будь-якого з розрахункових вузлів. На рис. 4.4-4.5 представлені картини усталеного розподілу температури в поперечному перерізі АД з ППР, а також температурно-часові залежності окремих розрахункових вузлів моделі при значеннях $\eta_e = 1,3, 1,9$ і $2,5$ ($k_{перф.} = \text{const} = 0,1$). Значення температури в кожній точці перетину АД з ППР визначається відповідно до рівня інтенсивності колірної заливки, а розподіл вектора теплового потоку показано у вигляді стрілок. На графіках температурно-часових залежностей показана динаміка зростання середньої температури

робочої рідини, ротора і температури найбільш нагрітої точки обмотки статора.

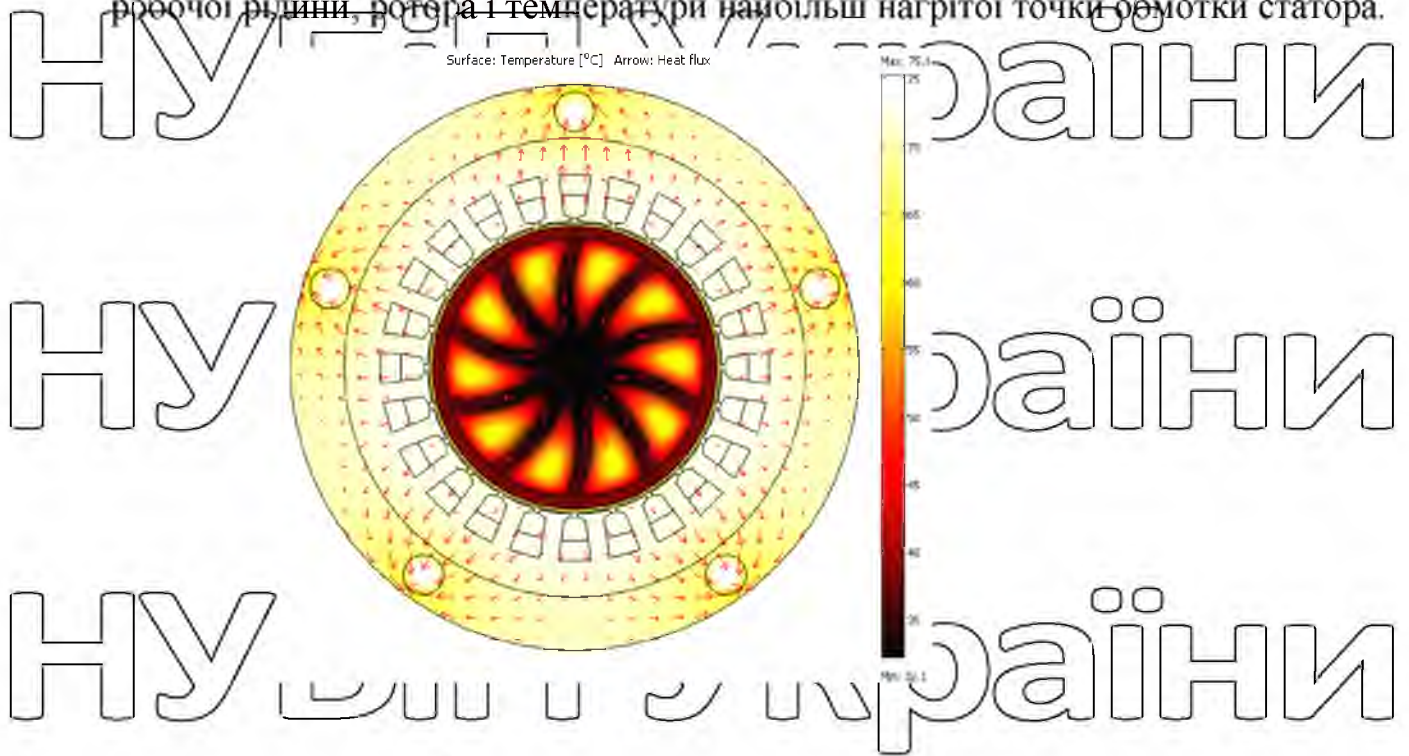


Рисунок 4.4 – Розподіл температури та вектора теплового потоку в поперечному перерізі АД з ЛСР при $\eta_e = 1,3$ і $k_{терф} = 0,1$

З представлених результатів випливає, що із зміною величини $Q_{наг}$ картина усталеного розподілу температури в перерізі АД з ЛСР змінюється несуттєво. Так, температура найбільш нагрітої точки обмотки статора змінюється в межах 73...79 °С, що свідчить про теплоізолюючі властивості робочого зазору і незначному теплообміні між статором і ротором, причому відвід тепла від ротора відбувається з його внутрішньої поверхні, а від обмотки статора – через аксіальні канали і поверхню корпусу.

Підвищена теплова інерція статора, мабуть, пояснюється слабкістю зв'язків (великим опором) з іншими джерелами теплоти. Відомо [138], що чим нижче інтенсивність охолодження, тим більшою тепловою інерцією володіє активна частина ЕМ. Тому, додатковим чинником, що визначає теплову інерційність статора, є надходження до аксіальних каналів попередньо нагрітої рідини.

Отримані картини розподілу температури свідчать про те, що в цілому, теплова напруженість АД знаходиться в допустимих межах.

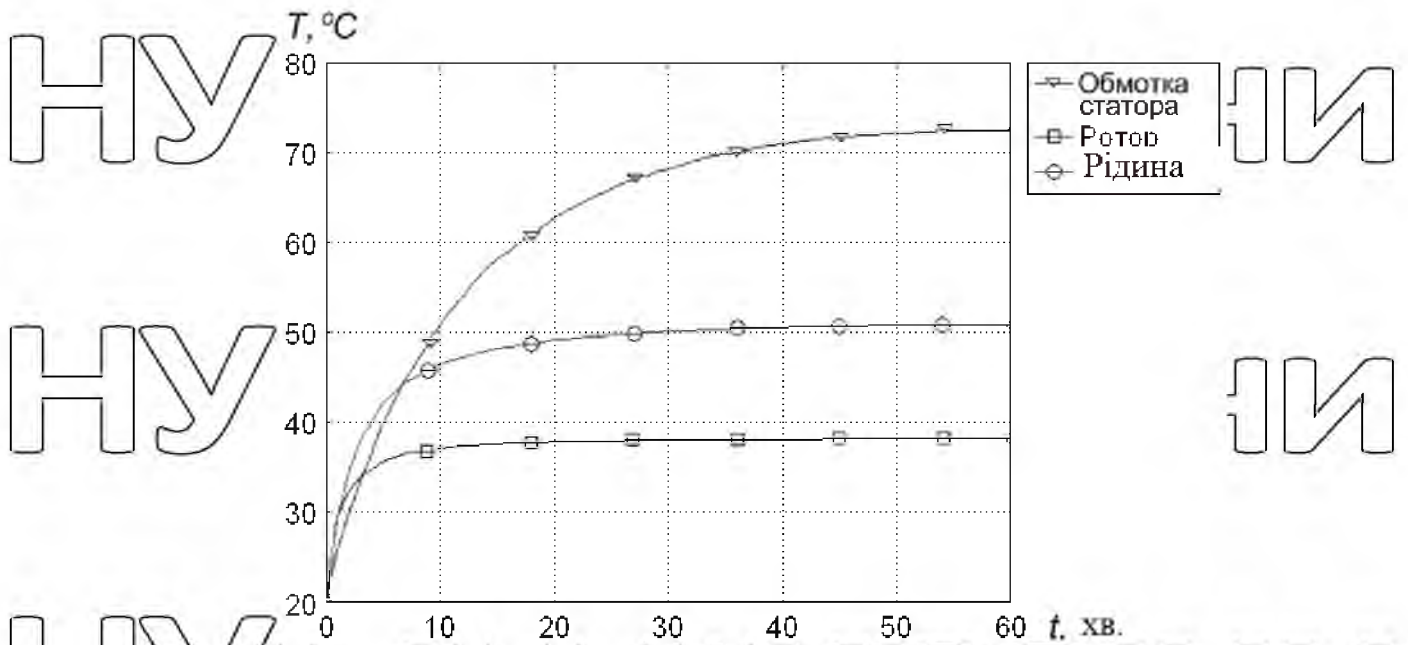


Рисунок 4.5 – Температурно-часові залежності окремих розрахункових вузлів моделі при $\eta_e = 1,3$ і $k_{перф.} = 0,1$

Необхідно відзначити, що навіть непрямий спосіб відведення тепла в класичних ЕМ дозволяє збільшити корисну потужність в 1,3...1,4 рази при охолодженні статора і майже в 2 рази при додатковому охолодженні ротора і підшипникових щитів [144, 145]. Тому циркуляція робочої рідини в аксальних каналах статора, всередині і зовні порожнистого ротора дозволяє забезпечити корисну потужність АД з ППР не нижче потужності базової ЕМ з повітряним охолодженням.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі запропонована і теоретично обґрунтована структура електромагнітного ядра і системи охолодження асинхронного двигуна, яка відрізняється тим, що ротор виконано порожнистим перфорованим, поєднаним з виконавчим механізмом, робоча технологічна середовище є охолоджуючою, що дозволяє поліпшити ККД, масогабаритні та вагові показники теплогенераційних систем.

На базі тривимірної математичної моделі електромагнітного поля асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором отримані залежності просторового розподілу і гармонійного складу магнітної індукції, а також щільності струму в активній частині, з урахуванням крайового ефекту і амплітудної модуляції просторових складових щільності вихрових струмів, що дозволяє виконувати більш точний розрахунок електромагнітних зусиль і тепловиділень в активних частинах. Встановлено залежності активного хвильового опору від ковзання для порожнистого феромагнітного ротора при різних значеннях конструктивних параметрів з урахуванням реальної геометрії масиву, і так само, на основі результатів польових розрахунків запропоновані вирази для визначення параметрів порожнистого перфорованого ротора.

На базі комплексної математичної моделі взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором, враховуючої різницю швидкостей руху електропровідного охолоджуючого середовища і ротора, розроблені основні положення методики розрахунку температурного поля, а також отримані результати, що дозволяють вибирати розмірні співвідношення елементів конструкції з метою оптимізації параметрів системи охолодження і отримання заданих показників продуктивності.

Запропоновано методику розрахунку коефіцієнта повітряного зазору для асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором, а також отримано вираз, що дозволяє виконати розрахунок дисипативної складової енергії, обумовленої силами в'язкого тертя робочої рідини в зазорі. Створені дослідні зразки

резонансного насоса-теплогенератора і шнекового асинхронного двигуна-нагрівача з порожнистим перфорованим ротором, а також розроблений і реалізований комплекс фізичних моделей, метрологічного забезпечення та методології обробки результатів експериментальних досліджень.

Конструктивні особливості асинхронних двигунів з порожнистим перфорованим ротором зумовили необхідність розгляду деяких аспектів, пов'язаних з технологією їх виробництва та випробувань.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Заблодский Н. Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения: Монография / Н. Н. Заблодский. – Алчевск : ДонГУ, 2008. – 340 с.

2. Резонансный насос-теплогенератор: патент 43346. F 24 J 3/00 / Заблодський М. М., Філатов М. А., Грицюк В. Ю. та ін.; власник патенту Донбаський держ. техн. ун-т. – № u200903007; заявл. 30.03.2009; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

3. Резонансный насос-теплогенератор: патент 69754 F 24 J 3/00 / Заблодський М. М., Філатов М. А., Грицюк В. Ю.; власник патенту Донбаський держ. техн. ун-т. – № u201112974; заявл. 04.11.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

4. Резонансный насос-теплогенератор: патент 70031: F 24 J 3/00 / Заблодський М. М., Шинкаренко В. Ф., Філатов М. А., Грицюк В. Ю.; власник патенту Донбаський держ. техн. ун-т. – № u201113156; заявл. 08.11.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.

5. «Вічне джерело» дармової електроенергії на основі вакуумної радіолампи з автоелектронною емісією [електронний ресурс] / В. Д. Дудишев // Сайт академіка екології В. Дудишева - Режим доступу до джерела: <http://www.new-energy21.ru/nova-energetika/vechniy-istochnik-elektricheskoy-enerгии-na-osnove-istochnika-elektricheskogo-polya-i-vakuumnoy-radiolampyi-s-a.html>

6. Запорожець Є. П. Дослідження вихрових та кавітаційних потоків у гідравлічних системах / Запорожець Є. П., Холпанов Л. П., Зіберт Г. К., Артемов А. В. // Теор. основи хім. технології. - 2004. - Т. 38, № 3. - С. 243-252

7. Кавітатор для тепловиділення в рідині. патент 2126117. МПК7 F 24 J 3/00 / Ларіонов Л. В., Томін І. І., Петухов В. Л., Міронідіс Д. Є.; патентовласник Фірма "МІДІЄР" -. - № 97118384/06; заявл. 10.11.97; опубл. 10.02.99, Бюл. №4.

8. Спосіб нагрівання рідини та пристрій для його здійснення: патент 2150055/ МПК7 F 24 J 3/00 / Селіванов Н. Л., патентовласник Едвансед Молекулар Текнолоджіз, Л.Л.С. - № 96104366/06; заявл. 18.04.1995; опубл. 27.05.2000, Бюл. №15.

9. Кавітаційно-вихровий теплогенератор : патент 2235950 : МПК7 F 24 J 3/00 / Кочкін С. С., Атаманов В.В., Коротков О.В., Маркевич А.В.; патентовласник ТОВ "НДІК ІНАТЕК" - № 2002119773/06; заявл. 22.07.2002; опубл. 10.09.2004, Бюл. №25.

10. Apparatus for heating fluids : patent 5188090 : F 24 C 9/00 / James L. Griggs.; assignee Hydro Dynamics, Inc. – № 682003 ; filed 08.04.1991 ; date of patent 23.02.1993.

11. Теплогенератор и устройство для нагрева жидкости : патент 2045715/ МПК7 F 25 B 29/00 / Потапов Ю. С. ; патентообладатель Потапов Ю. С. – № 93021742/06 ; заявл. 26.04.1993 ; опубл. 10.10.1995.

12. Фоминский Л. П. Как работает вихревой теплогенератор Потапова/ Фоминский Л. П. – Черкассы : Око-плюс, 2001. – 103 с.

13. Потапов Ю. С. Успехи вихревой теплоэнергетики / Потапов Ю. С., Фоминский Л. П., Потапов С. Ю. // Фундаментальные проблемы естествознания и техники / Труды Конгресса-2002. – С.Пб., 2002. – Ч. 1. – С. 348–356.

14. Способ получения тепла : патент 2165054 . МПК7 F 24 L3/00 / Потапов Ю. С., Фоминский Л. П., Толмачев Г. Ф.; патентообладатель Потапов Ю. С., Толмачев Г. Ф. – № 2000115268/06 ; заявл. 16.06.2000 ; опубл. 10.04.2001.

15. Устройство для нагрева жидкости : патент 2162571 : МПК7 F 24 D 3/02, F 24 H 4/02 / Потапов Ю. С., Сапогин Л. Г., Толмачев Г. Ф.; патентообладатель Потапов Ю. С., Сапогин Л. Г., Толмачев Г. Ф. – № 2000114548/06 ; заявл. 09.06.2000 ; опубл. 27.01.2001.

16. Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two currents of fluids at different temperatures: patent 1952281 / Georges Joseph Rangué. – № 646020 ; application 06.12.1932 ; patented 27.03.1934.

17. Фурмаков Є. Ф. Виділення тепла при зміні фазової рівноваги в струмені води / Є. Ф. Фурмаков // Фундаментальні проблеми природознавства. - 1999. - Т.1. - С. 82-94.

18. Потапов Ю. С. Вихрова енергетика / Ю. С. Потапов, Л. П. Фомінський. - Кишинів - Черкаси: Око-плюс, 2000. - 387 с.

19. Спосіб отримання енергії в рідині, теплогенератор і теплоенергетична установка. заявка на патент № 2001121071/06 : МПК7 F 24 J 3/00 / Бауров А. Ю., Бауров Ю. А., Нікітін В. І., Огарков Ст М., Полівцев Ст М., Чувашев С. М.

20. Прусов П. Д. Ефект Кочеткова / П. Д. Прусов // Фундаментальні проблеми природознавства і техніки. - 2003. - Ч 3 - С. 59-63.

21. Шипов Г. І. Теорія фізичного вакууму / Шипов Г. І. - М.: НТ-Центр, 1993. - 362 с.

22. Принцип роботи комплексу "Теплон" [електронний ресурс] // TEPLON GSM Server - Режим доступу до джерела: <http://www.teplon.com.ua/Products/>

23. Порухення нелінійних коливань у рідких середовищах гідродинамічних генераторів [електронний ресурс] / Д. А. Жебанєв // PROM-INFO: технологія машинобудування - Режим доступу до джерела: <http://www.prominfo.com/in-dex.php?m=4&id=89>

24. Енергетика майбутнього [електронний ресурс] / Юрій Бровко // ЕлектроГарант - Режим доступу до джерела: <http://elektrogarant.at.ua/publ/interesnoe/energbud/1-1-0-7>

25. Халатов А. А. Вихрові теплогенератори (термери): проблеми та перспективи / Халатов А. А., Коваленко А. С., Шевцов С. В., Франко Н. В. // ТОВ «НПО ЕНЕРГІЯ ПЛЮС» - Режим доступу до джерела: <http://deger.com.ua/article/vortex-heat-thurmer-problems-and-prospects/>

26. Электродвигатель с коаксиально расположенным насосом : патент 2386054 / МПК7 F 04 D 13/06 / Брехт-Бернард, Грабер-Ральф, Брунс-Уве, Хар-тманн-Харальд; патентообладатель КСБ-Акциенгезельшафт. № 2008102537/06 ; заявл. 07.07.2006 ; опубл. 10.04.2010, Бюл. № 17.

27. Ставинский А. А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // Электротехника і електромеханіка. - 1994. - № 1. - С. 57-61.

28. Олейников А. М. К выбору параметров двухслойного ротора асинхронного двигателя / А. М. Олейников, В. И. Орлов, Ю. П. Поветяной // Техническая электродинамика, 1986. - № 4. - С. 13-18.

29. Заблодський Н. Н. Чисельне моделювання електромагнітних полів у поліфункціональних електромеханічних перетворювачах з порожнистим перфорованим ротором / Н. Н. Заблодський, М. А. Філатов, В. Ю. Грицюк // Електротехніка і електромеханіка. - 2012. - № 1. - С. 25-27.

30. Вербовой П. Ф. Классификация и анализ конструкций роторов асинхронных двигателей / Вербовой П. Ф. - К. : ИЭД АН УССР, 1979. - 54 с. - (Препринт / ИЭД АН УССР).

31. Гречин Д. П. Математическое моделирование и исследование магнитного поля и характеристик асинхронных машин с массивными роторами : диссертация канд. техн. наук: 05.09.01 / Гречин Д. П. - Львов, 1984. - 301 с.

32. Дегтярева Е. Л. Исследование механических характеристик электрической машины с массивным ферромагнитным ротором / Дегтярева Е. Л., Потапов Л. А. // Изв. вузов. Электромеханика. - 1998. - № 2. - с. 23-27.

33. Васьковский Ю.Н. Принцип относительности и выбор системы координат при анализе электромагнитного поля в электрических машинах / Ю.Н. Васьковский, Ю.А. Гайденок // Электротехніка і Електромеханіка. - 2008. - № 2. - С. 11-14.

34. Васьковський Ю. М. Подьовий аналіз електричних машин / Юрій Миколайович Васьковський - К. : НТУУ «КПІ», 2007. - 194 с.

35. Рымина В. В. Математическое моделирование индукторных линейных

двигателей постоянного тока / В. В. Рымша, И. Н. Радимов, И. В. Меркулов // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2005. № 15. – С. 80–84.

36. Система конечноэлементных расчётов FEMLAB 3.x. Документация [электронный ресурс] / Softline Co // MATLAB and Toolboxes – Режим доступа к источнику: http://matlab.exponenta.ru/femlab/book6/3_2_1.php

37. D. Howe and Z. Q. Zhu, «The Influence of Finite Element Discretization on the Prediction of Cogging Torque in Permanent Magnet Excited Motors (Влияние дискретности конечно-элементной структуры на точность определения зубцовых пульсаций момента в двигателях с постоянными магнитами)», IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 28, pp. 1371–1374, 1992.

38. J. Skoczylas and R. Trech... «On the Reduction of Ripple Torque in Permanent Magnet Synchronous Motors Without Skewing. Accuracy problems. (О снижении пульсаций момента в синхронных двигателях с постоянными магнитами. Проблема точности)» ELECTRO-MOTION, 12(2005), 106–112.

39. Рымша В. В. Расчет статического электромагнитного момента вентильно-реактивного двигателя модифицированным методом натяжений / В. В. Рымша, И. Н. Радимов, А. С. Порайко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2003. – № 60. – С. 35–38.

40. Вербовой Петр Францевич. Асинхронные двигатели для параметрического регулирования частоты вращения и интенсивных динамических режимов работы : дис. д-ра техн. наук : 05.09.1 / Вербовой П. Ф. – К., 1989. – 542 с.

41. Лищенко А. И. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором / А. И. Лищенко, В. А. Лесник. – К. : Наукова думка, 1984. – 167 с.

42. Howe D) The influence of finite element discretisation on the prediction of cogging torque in permanent magnet excited motors / Howe D., Zhu Z. // IEEE Transactions on magnetics, 1992. – vol. 28. – № 2. – pp. 1371–1374.

43. J. Skoczylas and R. Trech. «On the Reduction of Ripple Torque in Permanent Magnet Synchronous Motors Without Skewing. Accuracy problems. (О снижении

пульсаций момента в синхронных двигателях с постоянными магнитами. Проблема точности» ELECTRO-MOTION, 12(2005), 106–112.

44. Qiao J. Calculation and error analysis of electromagnetic torque for a wheel permanent-magnet motor / Qiao J., Cai W. // IEEE Transactions on industry application. – 2006. – vol. 42. – № 5. – pp. 1151–1161.

45. Магнитные поля переменных токов [электронный ресурс] // EL CUT – новый подход к моделированию магнитных полей – Режим доступа к источнику: http://elcut.ru/acmag_r.htm

46. Березовский А. А. Потери от вихревых токов в нелинейных ферромагнитных телах // Электромагниты и полупроводниковые устройства преобразовательной техники / Березовский А. А., Нижник Л. И., Кравченко А. Ш. – К. : Наукова думка, 1966. – С. 133–149.

47. Абдурашитов С. А. Насосы и компрессоры / Абдурашитов С. А., Тупиченков А. А., Вершинин И. М., Тененгольц С. М. – М. : Недра, 1974 – 296 с.

48. Фурмаков Е. Ф. Размерный диэлектрический эффект в тонких пленках полярных жидкостей / Е. Ф. Фурмаков // Структурно-динамические процессы в неупорядоченных средах. – 1992. – Ч. 1. – С. 53–59

49. Счастливый Г. Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей / Счастливый Г. Г. – К. : Наукова думка, 1966. – 284 с.

50. Шаповаленко О.Г., Бондар В.М. Основи електричних вимірювань: Підручник. - К.: Либідь, 2002. – 320 с.

52. Заблодський Н. Н. Експериментальне дослідження поліфункціональних електромеханічних перетворювачів з порожнистим перфорованим ротором / Заблодський Н. Н., Філатов М. А., Грицюк В. Ю. // 36. наук. тр. ДонДТУ. - Алчевськ: ДонДТУ. – 2011. - Вип. 35. - С. 181-187.

51. Заблодський Н. Н. Експериментальне визначення магнітної індукції у поліфункціональних електромеханічних перетворювачах / Заблодський Н. Н., Лупанов О. В., Грицюк В. Ю. // Наукові праці КДПУ, 2009. – Вип. 3/2009 (56). Ч. 1. - С. 86-89.

52. Заблодський Н. Н. Оцінка величини активного опору цільного перфорованого ротора в поліфункціональних електромеханічних перетворювачах / Заблодський Н. Н., Грицьок В. Ю. // Електротехніка і електромеханіка. - 2011. - №1. - С. 25-27.

53. Кекот О. В. Об измерении вращающих моментов посредством тарированной машины постоянного тока / Кекот О. В., Фильц Р. В. // Материалы радиоэлектроники и электрические машины. - Львов: Изд-во Львовского университета, 1964. - Вып. 26. - С. 87-91.

54. Грицьок В. Ю. Дослідження механічних характеристик поліфункційних електромеханічних перетворювачів з порожнистим перфорованим ротором // Зб. наук. тр. ДонДТУ. - Алчевськ: ДонДТУ. - 2012. - Вип. 37. - С. 338-352.

55. Заблодський Н. Н. Оцінка впливу наскрізних отворів у порожнистому роторі на можливість практичної реалізації електромагнітної редукції / Заблодський Н. Н., Грицьок В. Ю. // Зб. наук. тр. ДонДТУ. - Алчевськ: ДонДТУ. - 2010. - Вип. 32. - С. 344-349.

56. Заблодський Н. Н. Експериментальна оцінка енергетичних процесів у масивному роторі шнекового електромеханічного перетворювача енергії / Н. Н. Заблодський, О. О. Овчаров, М. А. Філатов // Електротехніка і електромеханіка, - 2007. - № 4. - С. 22-24.

57. Заблодський Н. Н. Оцінка впливу термомеханічних вимірювань у конструкції на параметри та характеристики електротепломеханічних перетворювачів енергії / Н. Н. Заблодський, М. А. Філатов, А. А. Овчарів // Зб. наук. тр. ДонДТУ. - Алчевськ, 2006. - Вип. 21. - С. 222-229.

58. Заблодський Н. Н. Математична модель електромеханічного нагрівача, що обертається в основних режимах роботи / Н. Н. Заблодський, В. С. Плігін, Чан Дай Шон // Техн. електродинаміка. тим. віщ.: Проблеми сучасної електротехніки - 2002. - Ч. 5. - С. 71-76.

59. Заблодський Н. Н. Визначення коефіцієнта повітряного зазору для порожнього ротора наскрізної структури в поліфункціональних електромеханічних перетворювачах / Заблодський Н. Н., Грицьок В. Ю., Лук'янов Н. В. // Зб. наук.

тр. ДонДТУ. - Алчевськ: ДонДТУ. - 2010. - Вип. 31. - С. 187-192.

60. Заблодський Н. Н. Розрахунок дисипативної складової енергії поліфункціональних електромеханічних перетворювачів / Заблодський Н. Н., Грицюк В. Ю. // 36. наук. тр. ДонДТУ. - Алчевськ: ДонДТУ. - 2011. - Вип. 33. - С. 334-343.

61. Заблодський Н. Н. Характер перебігу робочої провідної рідини у зазорі поліфункціонального електромеханічного перетворювача / Заблодський Н. Н., Грицюк В. Ю. // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 1/2012 (17). – С. 19–21.

62. Лущик В. Д. Шестифазна обмотка асинхронних двигунів / В. Д. Лущик // Електротехніка і електромеханіка, – 2012. – № 2. – С. 42–44.

63. Заглибний електротепломеханічний перетворювач: патент 37505 Н05В 6/10 / Заблодський М. М., Шинкаренко В. Ф., Грінь Г. М. та інш. ; власник патенту Донбаський держ. техн. ун-т. – № 200809157 ; заявл. 14.07.2008 ; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.

64. Заглибний електронагрівач : патент 75771 Н03В 6/10 / Заблодський М. М., Дорофєєв В. М., Шинкаренко В. Ф. та інш. ; власник патенту Донбаський держ. техн. ун-т. – № 20040605162 ; заявл. 29.06.2004 ; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України