

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ГРИЦЮК ВОЛОДИМИР ЮРІЙОВИЧ



УДК 621.313.33:621.318.122

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН
З ПОРОЖНИСТИМ ПЕРФОРОВАНИМ РОТОРОМ
ДЛЯ ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричних машин і апаратів в Донбаському державному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Заблудський Микола Миколайович,
Донбаський державний технічний університет,
завідувач кафедри електричних машин та апаратів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Петрушин Віктор Сергійович,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри електричних машин

кандидат технічних наук, доцент
Прус В'ячеслав В'ячеславович,
Кременчуцький національний університет
ім. М. Остроградського, доцент кафедри
електричних машин та апаратів

Захист відбудеться 16 травня 2013 р. о 12³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «03» квітня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема створення теплогенераційних систем для автономного теплопостачання та гарячого водозабезпечення стає особливо гострою у зв'язку із зростанням цін на традиційні енергоносії. Альтернативою для існуючих енерговитратних технологій стають електричні системи, що використовують комплекс різних за фізичною природою джерел гріючої потужності – гідродинамічних ефектів та втрат електромагнітної системи. Недоліки існуючих теплогенераційних систем усуваються за рахунок максимальної інтеграції структурних і функціональних властивостей окремих пристроїв технологічного ланцюга і відтворення їх в одному електромеханічному перетворювачі, інтеграції та повного використання його дисипативних складових енергії, а також використання рідини, що нагрівається, як охолоджуючого середовища.

Конструктивною особливістю асинхронного двигуна, суміщеного з виконавчим механізмом, є перфорована структура масиву ротора, який одночасно виконує функцію робочого колеса насоса, нагрівача і ланки електромагнітної системи. Створення та забезпечення ефективної роботи таких пристроїв вимагає вирішення низки завдань, пов'язаних з дослідженням електромагнітних і теплових полів, урахуванням особливостей геометрії та впливу охолоджуючого середовища. Складність моделювання електромагнітних процесів в асинхронному двигуні з порожнистим перфорованим ротором полягає в необхідності врахування криволінійних меж розділу середовищ, нелінійності властивостей матеріалів, а також реакції струмів, індукованих в масиві, розподіл яких, у свою чергу, носить вельми складний характер. Одночасно, наявність кризних отворів у роторі не дозволяє обмежитися розгляданням двовимірної картини електромагнітного поля. Дослідження температурного поля елементів конструкції асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором необхідне для прогнозування експлуатаційних характеристик та оптимізації параметрів для отримання заданих показників продуктивності.

Тому науково-практична задача створення та дослідження асинхронних двигунів з перфорованою структурою ротора для енергоощадних технологій є актуальною та складає предмет досліджень даної дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт Донбаського державного технічного університету відповідно до планів МОНмолодьспорту України за держбюджетними темами «Резонансний насос-теплогенератор на базі поліфункціонального електромеханічного перетворювача для енергозберігаючих технологій автономного теплопостачання та переробки рідких сумішей» (№ держ. реєстрації 0110U000100), «Розробка електромеханічного агрегату гідрогенізації і енергозберігаючої технології для виробництва якісного водовугільного палива з високою дисперсністю» (№ держ. реєстрації 0112U000363), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – створення асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором для поліпшення експлуатаційних, ресурсо- та енергозберігаючих показників теплогенераційних систем.

У відповідності до мети в дисертації поставлені такі задачі:

- аналіз конструкцій і проблем створення електричних машин, що працюють в системах нагріву та переміщення рідин;
- проведення дослідження електромагнітних процесів, механічних і частотних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором;
- проведення дослідження теплових процесів асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором;
- проведення експериментальних досліджень та розробка методики проектування асинхронних двигунів з порожнистим перфорованим ротором для теплогенераційних систем.

Об'єкт досліджень – електромагнітні, електромеханічні та теплові процеси, що протікають в асинхронному двигуні з порожнистим перфорованим ротором.

Предмет досліджень – параметри та характеристики асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором.

Методи досліджень. Дослідження проводилися з використанням теоретичних та експериментальних методів, зокрема, теорії електромагнітного поля, теорії теплопровідності, теорії узагальненого електромеханічного перетворювача енергії, чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь, а також гармонійного аналізу. При аналізі електромагнітного та теплового полів, а також розрахунку механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором використовувався скінченно-елементний метод розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних в тривимірній та двовимірній постановках. В якості інструменту аналізу полів застосовувався програмний комплекс Comsol Multiphysics, для побудови геометрії моделей з метою імпортування – AutoCAD. При розкладанні в ряд Фур'є використовувалася система комп'ютерної математики MathCAD. Розрахунок динамічних механічних характеристик асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором виконувався із застосуванням програмного забезпечення Matlab.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше запропоновано і теоретично обґрунтовано структуру електромагнітного ядра та системи охолодження асинхронного двигуна, яка відрізняється тим, що ротор виконується порожнистим перфорованим, поєднаним з виконавчим механізмом, робоче технологічне середовище є охолоджуючим, що дозволяє радикально поліпшити ККД, масогабаритні та вартісні показники теплогенераційних систем;
- на базі тривимірної скінченно-елементної моделі електромагнітного поля асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором одержано залежності просторового розподілу і гармонійного складу магнітної індукції, а також густини струму в активній частині з урахуванням крайового ефекту та амплітудної модуляції просторових складових густини вихрових струмів, що дозволяє виконувати більш обґрунтований розрахунок електромагнітних зусиль і тепловиділень в активних частинах;
- розроблено узагальнену математичну модель взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором, яка відрізняється урахуванням різниці швидкостей руху електропровідного охолоджуючого середовища та ротора, що дозволяє отримати більш адекватну розрахункову інформацію;

- вперше одержано залежності активного хвильового опору від ковзання для феромагнітного порожнистого перфорованого ротора при різних значеннях конструктивних параметрів з урахуванням реальної геометрії масиву, а також на основі результатів польових розрахунків запропоновані вирази для визначення параметрів порожнистого перфорованого ротора;

- встановлено закономірність, що визначає вплив ступеня перфорації порожнистого феромагнітного ротора на величину електромагнітного моменту. Отримано сімейства механічних і частотних характеристик асинхронного двигуна при різних схемах перфорації порожнистого ротора, а також при різних значеннях його конструктивних параметрів.

Практичне значення отриманих результатів для електромашинобудівної та енергетичної галузі полягає в розробці основних положень методики розрахунку температурного поля асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором на базі скінченно-елементної моделі взаємозв'язаних електромагнітних і теплових процесів. Реалізована методика дозволяє обирати розмірні співвідношення елементів конструкції для оптимізації параметрів системи охолодження та отримання заданих показників продуктивності.

Створені дослідні зразки шнекового асинхронного двигуна-нагрівача та резонансного насоса-теплогенератора з порожнистим перфорованим ротором, що мають поліпшені експлуатаційні, масогабаритні та вартісні показники.

Результати досліджень використані при конструюванні та практичній реалізації дослідних зразків шнекового асинхронного двигуна-нагрівача, які впроваджено на ТДВ «Первомайський електромеханічний завод ім. К. Маркса» (м. Первомайськ), при виготовленні експериментальних зразків резонансного насоса-теплогенератора на експериментальній ділянці науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Параметр» (м. Алчевськ) під час виконання держбюджетних науково-дослідних робіт, а також у навчальному процесі на кафедрі електричних машин та апаратів Донбаського державного технічного університету при читанні лекцій з дисциплін «Моделювання електромеханічних пристроїв», «Електромагнітні системи з вихровими струмами», «Вступ до електромеханіки», при виконанні дипломних проектів і випускних кваліфікаційних робіт магістрів за спеціальністю 8.050702 «Електричні машини та апарати».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота містить теоретичні положення та результати, що отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка тривимірної скінченно-елементної моделі електромагнітного поля асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором; обґрунтування підходу до розрахунку вихрових струмів і механічних характеристик; програмна реалізація розрахунку механічних характеристик та визначення коефіцієнту повітряного зазору асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором. Здобувач брав безпосередню участь у виготовленні та проведенні експериментальних досліджень резонансного насоса-теплогенератора і шнекового асинхронного двигуна-нагрівача.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: Міжнародних симпозіумах «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (м. Харків, 2010 – 2012 р.);

Міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми енергоресурсозбереження в електро-технічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2011 р.), «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах» (м. Севастополь, 2010 р.), «Проблемы недропользования» (м. Санкт-Петербург, 2011 р.); науково-технічному семінарі «Динаміка автоматизованих електромеханічних систем» Наукової Ради «Наукові основи електроенергетики» НАН України (м. Алчевськ, 2012 р.); науково-технічних конференціях «Електрообладнання та засоби автоматизації передових технологій» (м. Алчевськ, 2010 – 2012 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 15 наукових публікаціях, серед яких 10 у наукових фахових виданнях України, 3 патенти України на корисну модель.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 228 сторінок. Робота включає 90 рисунків по тексту, 27 рисунків на 12 окремих сторінках; 6 таблиць по тексту, 1 таблицю на окремій сторінці; список використаних джерел зі 161 найменування на 17 сторінках; додатки на 33 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими темами, сформульовані мета та задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведені дані щодо апробації та структури дисертації.

У першому розділі проведено аналіз конструкцій і проблеми створення електричних машин, що працюють в системах нагріву та переміщення рідин, суміщаючи ротор з виконавчим механізмом та використовуючи дисипативну складову енергії як корисну. Надано загальну характеристику асинхронного двигуна (АД) для теплогенераційних систем і обґрунтовано структуру електромагнітного ядра та системи охолодження, яка відрізняється тим, що ротор виконується порожнистим перфорованим, поєднаним з виконавчим механізмом, робоче технологічне середовище є охолоджуючим, що дозволяє радикально поліпшити ККД, масогабаритні та вартісні показники теплогенераційних систем. Зазначено необхідність розробки математичних моделей електромагнітних, електромеханічних та теплових процесів, що враховують особливості конструкції та вплив охолоджуючого середовища.

Другий розділ присвячений дослідженню електромагнітних та електромеханічних процесів, що протікають у АД з порожнистим перфорованим ротором (ППР) в усталених режимах роботи.

Ротор трифазного двигуна що розглядається, виконаний у вигляді порожнистого феромагнітного циліндра з крізними радіальними отворами. У загальному випадку нелінійна магнітна система АД з ППР складається з декількох феромагнітних тіл з нелійними фізичними властивостями матеріалів, оточених магнітно-лінійним середовищем. Диференційне рівняння електромагнітного поля в часткових похідних відносно векторного магнітного потенціалу \vec{A}

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

де μ – абсолютна магнітна проникність; γ – питома електропровідність; \vec{v} – вектор швидкості руху електропровідного середовища відносно джерела магнітного поля; $\vec{J}_{\text{нòдò}}$ – густина сторонніх струмів.

Для випадку, коли магнітне поле змінюється за гармонійним законом, рівняння (1) приймає вигляд

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A}\right) - j\omega\gamma\vec{A} - \gamma\vec{v} \times (\operatorname{rot} \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{нòдò}}, \quad (2)$$

де ω – кутова частота зміни магнітного поля.

Для непровідних ділянок справедливе рівняння Пуассона

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A}\right) = -\vec{J}_{\text{нòдò}}. \quad (3)$$

З точки зору зменшення апаратних витрат, чисельний розрахунок квазістаціонарного електромагнітного поля АД доцільно проводити використовуючи рівняння для роторної системи координат, оскільки в ньому відсутня конвективна складова, що пов'язана з обертанням ротора відносно системи координат. У разі використання роторної системи координат, ротор залишається нерухомим. Тоді в рівняння (2) вводяться умови:

$$\omega = \omega_1 s; \quad \omega_R = 0; \quad v_x = v_y = 0, \quad (4)$$

де ω_1 – кутова частота обертання магнітного поля статора; s – ковзання ротора;

ω_R – кутова частота обертання ротора; $v_{x,y}$ – складові вектора швидкості електропровідного середовища відносно джерела магнітного поля.

Остаточно рівняння (2) запишеться у вигляді

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A}\right) - j\omega_1 s \gamma \vec{A} = -\vec{J}_{\text{нòдò}}. \quad (5)$$

Векторне рівняння (5) для тривимірного магнітного поля еквівалентно трьом рівнянням:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} - j\omega_1 s \gamma A_x &= -J_x, \\ \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial z} - j\omega_1 s \gamma A_y &= -J_y, \end{aligned} \quad (6)$$

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

де $J_{x,y,z}$ – компоненти вектору густини сторонніх струмів.

Рівняння (5) доповнюється граничними умовами. На зовнішніх межах розрахункової області (оболонка об'ємної моделі) встановлюється нульове значення векторного магнітного потенціалу, на межі розділу середовищ з різними магнітними властивостями використовується умова рівності нормальних до межі складових вектора магнітної індукції і тангенціальних складових вектора напруженості магнітного поля:

$$\vec{A} = 0, \quad \vec{B}_{n1} = \vec{B}_{n2}, \quad \vec{H}_{\tau1} = \vec{H}_{\tau2}. \quad (7)$$

Векторний магнітний потенціал обчислюється, виходячи з умови мінімуму енергетичного функціоналу

$$F = \int_V \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right] dx dy dz + \int_V j\omega \gamma |\vec{A}|^2 dx dy dz + \int_V \vec{J} \vec{A} dx dy dz. \quad (8)$$

Практична реалізація математичної моделі електромагнітного поля АД з ППР виконана в рамках програмно-обчислювального комплексу Comsol Multiphysics 3.5a, що використовує метод

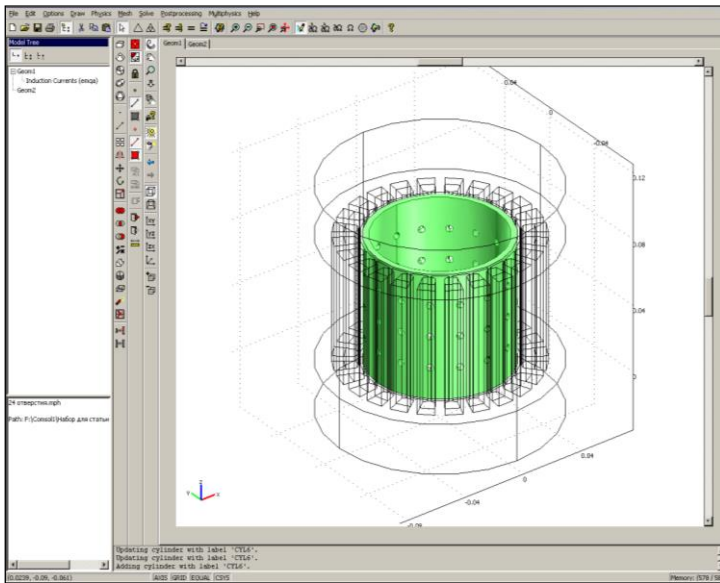


Рисунок 1 – Графічний інтерфейс програми Comsol Multiphysics 3.5a спільно з тривимірною геометрією моделі АД з ППР

скінченних елементів. Графічний інтерфейс програми Comsol Multiphysics 3.5a спільно з тривимірною геометрією моделі АД з ППР показаний на рис. 1. За результатами розрахунку розподілу векторного магнітного потенціалу, обчислюються величини магнітної індукції, густини вихрових струмів, напруженості магнітного та електричного поля. Обчислення магнітних потокозчеплень, ЕРС, струмів, втрат і сил проводиться шляхом інтегрування за об'ємами та поверхнями розрахункової моделі. На рис. 2 наведено картину тривимірного магнітного поля в активній частині АД з ППР у вигляді стрілок-векторів магнітної індукції при $s = 0,2$. Криві розподілу нормальної складової магнітної індукції (для різних значень ковзання) вздовж аксіальної лінії, що

проходить над центрами отворів одного ряду, через середину повітряного проміжку зображені на рис. 3. Магнітне поле у повітряному проміжку між статором і ППР розподіляється нерівномірно, що обумовлено кінцевою довжиною та наявністю отворів ротора. Витискання магнітного поля до країв активної частини викликано реакцією вихрових струмів індукованих в роторі, а спотворення прямокутної форми магнітного поля в зазорі тим більше, чим більше значення приймають параметри L/τ та $\sqrt{f\gamma/\mu_r} (\tau^2/\delta')$. З рис. 3 слідує, що перфорації надають магнітному полю в зазорі АД з ППР локально-зубчастий характер. Провали в кривій магнітної індукції в проміжку над отворами досягають 0,4 – 0,5 Тл.

На рис. 4 наведена картина миттєвого розподілу густини вихрових струмів в поверхневому шарі перфорованого ротора при $s = 0,2$. Розглянутий ППР має 20 прямих рядів по 5 отворів, діаметром 7 мм. Розмір векторів на рисунку пропорційний величині густини повного струму, а її z-компонента визначається відповідно до інтенсивності зафарбовування на поверхні ротора. Величина густини струму в середині активної довжини ротора, безпосередньо під «полюсами» сягає майже нуля.

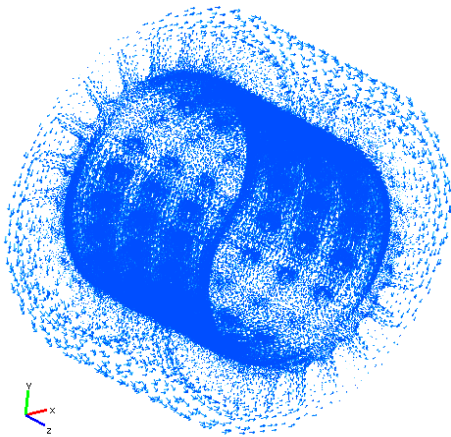


Рисунок 2 – Картина тривимірного магнітного поля в активній частині АД з ППР у вигляді стрілок-векторів магнітної індукції

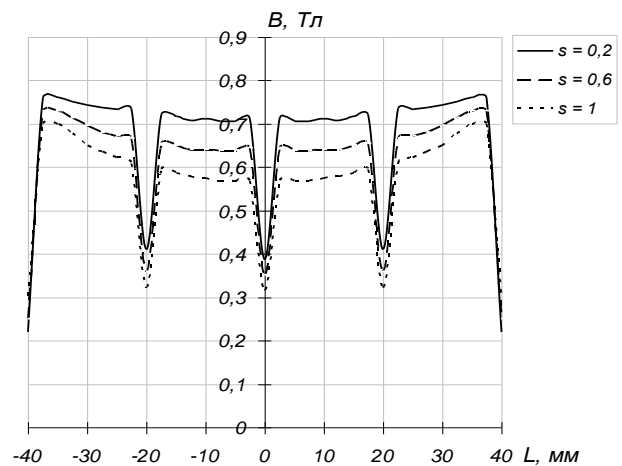


Рисунок 3 – Розподіл магнітної індукції у проміжку АД з ППР уздовж ділянки над центрами отворів одного ряду при $s = 0,2; 0,6; 1$.

Розрахунки, які проведені для порожнистого гладкого та перфорованого роторів, показали, що зі зростанням ковзання картина струморозподілу змінюється, відбувається витискання струму до країв циліндра. Розподіл густини вихрових струмів по довжині перфорованого ротора (вздовж аксіальної лінії, що проходить по середині полюса) для різних значень ковзання показано на рис. 5.

Активний хвильовий опір різних конструктивних варіантів феромагнітних роторів визначається шляхом проведення додаткових постпроцесорних розрахунків для тривимірної моделі. Значення опору для різних значень ковзання отримані за результатами розв'язання рівнянь квазістационарного електромагнітного поля, виходячи з величини потужності резистивних втрат і квадрата повного струму ротора. Результати розрахунку залежності $r_{x\sigma} = f(s)$ для суцільного феромагнітного ротора (рис. 6) показали добре узгодження з раніше встановленими залежностями. Отримані результати показують, що при товщині стінки циліндра 10 мм активний хвильовий опір ротора на ділянці $s = 1 \dots 0,7$ несуттєво перевищує опір суцільного ротора.

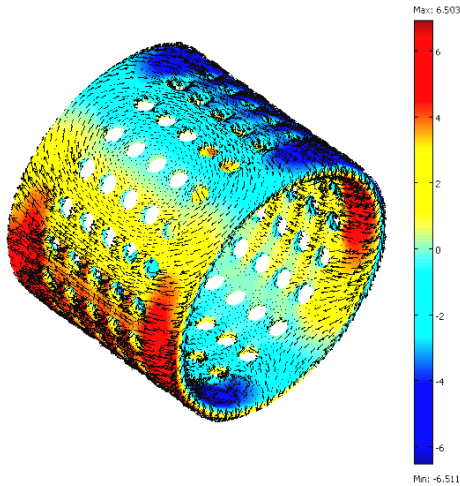


Рисунок 4 – Картина розподілу густини вихрових струмів в ППР

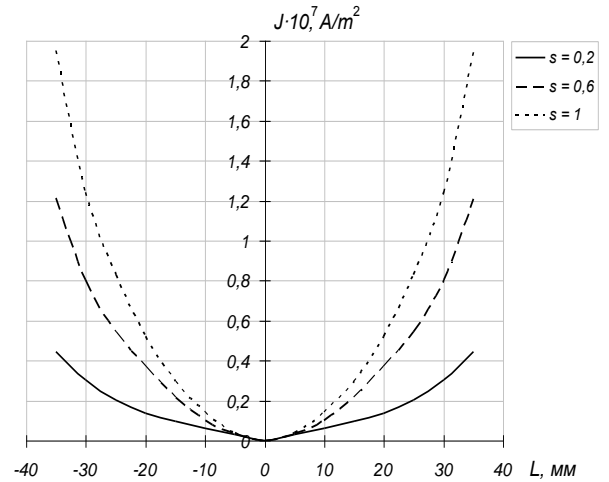


Рисунок 5 – Розподіл густини вихрових струмів по довжині ППР при $s = 0,2; 0,6; 1$.

При подальшому збільшенні швидкості опір порожнистого ротора знижується менш інтенсивно, що пов'язано з неможливістю подальшого збільшення струмопровідного шару. У результаті, залежність $r_{xe} = f(s)$ набуває майже лінійного характеру. Зі зменшенням товщини стінки ротора відповідна залежність $r_{xe} = f(s)$ проходить вище і стає більш пологою. Так, активний хвильовий

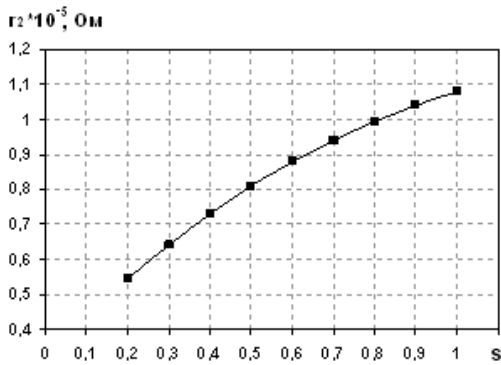


Рисунок 6 – Залежність $r_{xe} = f(s)$ для суцільного феромагнітного ротора

опір порожнистого ротора з товщиною стінки 3,5 мм, мало залежить від ковзання і, при $s = 1$ в 1,75 рази перевищує активний опір суцільного ротора. Залежності $r_{xe} = f(s)$ для порожнистих феромагнітних роторів з різною товщиною стінки представлені на рис. 7. Деякі з отриманих залежностей $r_{xe} = f(s)$ для ППР с товщиною стінки 3,5 мм представлені на рис. 8. Введення перфорацій ротора призводить до переміщення залежності $r_{xe} = f(s)$ паралельно вгору. При цьому основний вплив на величину активного опору спричиняє коефіцієнт перфорації ротора $k_{перф}$ – відношення сумарної площі перфорацій до площі зовнішньої поверхні аналогічного гладкого ротора. З рис. 8 видно, що залежності $r_{xe} = f(s)$ для роторів з прямими рядами, однаковим діаметром отворів, але різною кількістю рядів та отворів в ряду, прохо-

дять паралельно одна іншій. При цьому значення $k_{перф}$ практично рівні (0,035 і 0,037), а різниця у порівнянні з опором гладкого ротора становить $\approx 3 \dots 4 \%$. На тому ж рисунку представлена залежність $r_{xe} = f(s)$ для ротора, що має скіс рядів отворів $\alpha = 30^\circ$ та $k_{перф} = 0,063$. В даному випадку зростання опору у порівнянні з гладким ротором складає $\approx 7 \dots 9 \%$. Покладаючись на аналіз отриманих залежностей, для розрахунку активного хвильового опору ППР рекомендований наступний вираз

$$r_{\delta \hat{a} i} = r_{\delta \hat{a} \hat{a}} \cdot (1 - k_{i \hat{a} \delta \hat{\delta}})^{-1}, \quad (9)$$

де $r_{xвг}$ – активний хвильовий опір порожнистого гладкого ротора; $k_{перф}$ – коефіцієнт перфорації ротора.

Формула (9) дає задовільні результати (розбіжність з отриманими залежностями до 4 %) для різних типів схем перфорації з рівномірним розташуванням отворів в діапазоні зміни $k_{перф} = 0,02 \dots 0,4$.

У дисертаційній роботі розрахунок механічних характеристик АД з ППР виконано за допомогою методу тензора магнітного натягу, реалізованого продовженням електромагнітного розрахунку. На рис. 9 і 10 представлені сімейства механічних характеристик АД з ППР при різній кількості рядів отворів Z_2 ($n = \text{const}$, $d = \text{const}$), а також при різній кількості отворів в ряду n ($Z_2 = \text{const}$, $d = \text{const}$). Отримані залежності моменту від ковзання для АД з ППР мають вигляд, характерний для механічних характеристик АД з масивним ротором. Як видно з рис. 9, із збільшенням кількості рядів отворів 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 зменшується на 9 %, а пускового на 15 %. Результати фізичного та чисельного експериментів показали, що вибір парної кількості рядів отворів (4, 8, 16, 20, 24, 40) при малій кількості отворів в ряду (1...4) діаметром 2...4 мм дозволяє одержати механічну характеристику еквівалентну механічній характеристиці АД з гладким ротором.

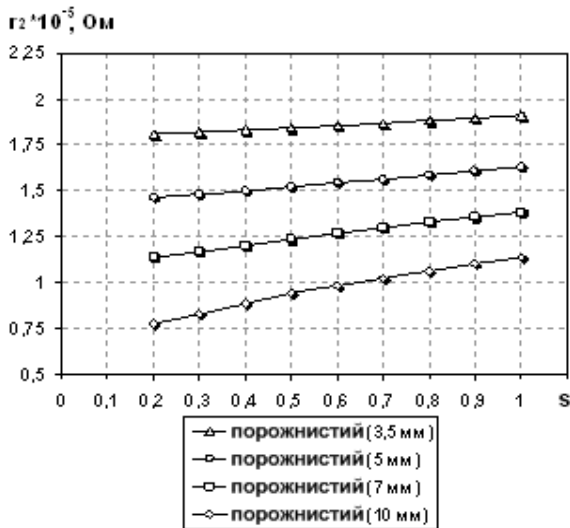


Рисунок 7 – Залежності $r_{xвг} = f(s)$ для порожнистих феромагнітних роторів з різною товщиною стінки

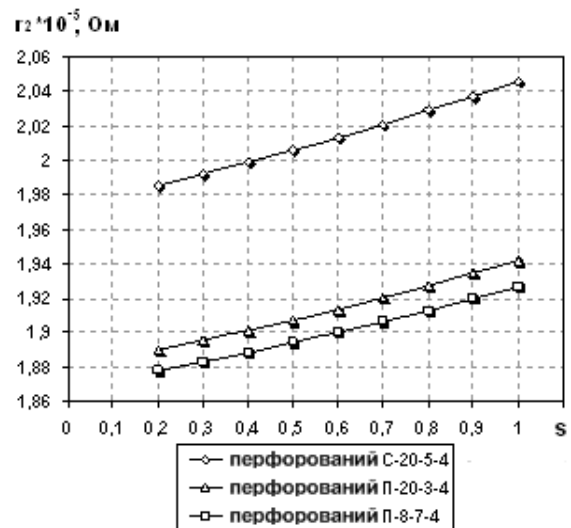


Рисунок 8 – Залежності $r_{xвг} = f(s)$ для деяких варіантів ППР

Розрахунки, проведені для різних конструктивних модифікацій ППР, показують, що існує обернено пропорційна залежність між коефіцієнтом $k_{перф}$ та величиною M_H^* . При цьому, криві відносного номінального моменту з високою точністю апроксимуються відповідними залежностями $M_H^* = 1 - k_{перф}$. Експериментально встановлено, що зазначена закономірність справедлива для переважної більшості розглянутих варіантів ППР з прямими рядами в широкому діапазоні зміни $k_{перф}$ (0,02...0,6).

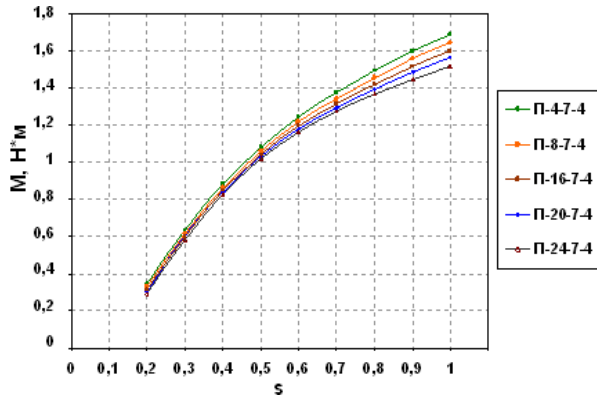


Рисунок 9 – Сімейство механічних характеристик АД з ППР при різних кількості рядів отворів

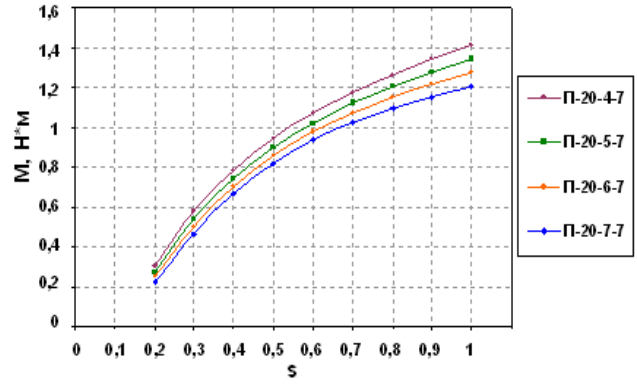


Рисунок 10 – Сімейство механічних характеристик АД з ППР при різних кількості отворів в ряду

В третьому розділі представлені результати чисельного дослідження теплових процесів в АД з ППР. У двовимірних декартових координатах рівняння електромагнітного поля для аксіальної складової векторного магнітного потенціалу A_z , а також рівняння нестационарної теплопровідності мають вигляд:

$$\frac{\partial^2 \vec{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}_z}{\partial y^2} - \mu\gamma(T) \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial t} - \mu\gamma(T) \left(v_x \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial y} \right) = -\mu \vec{J}_{z \cdot \vec{n}} \delta \delta, \quad (10)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = P(A).$$

де λ , c , ρ – відповідно теплопровідність, теплоємність і щільність матеріалу; $P(A)$ – питома потужність теплового джерела.

Рух провідної охолоджуючої рідини в проміжку АД з ППР представляє собою класичну модель течії між двома співвісними циліндрами. При цьому електропровідна рідина протікає по кільцевому проміжку внаслідок обертання внутрішнього циліндра відносно зовнішнього, нерухомого. Схема такого руху представлена на рис. 11. Стінка при $y = 0$ має постійну лінійну швидкість, а при $y = \delta$ – нерухома. Тоді лінійна швидкість частинок рідини, прилеглих до поверхні рухомого ротора дорівнює

$$V = 2\pi \cdot \omega_R \cdot r, \quad (11)$$

де r – зовнішній радіус ротора.

Оскільки герметизуюча гільза нерухома, то градієнт швидкості рідини в проміжку визначається як

$$|\text{grad } v| = \frac{dV}{dy} = \frac{2\pi \cdot \omega_R \cdot r}{R - r}, \quad (12)$$

де y – координата уздовж радіальної осі; R – внутрішній радіус герметизуючої гільзи.

Локальна швидкість (y -го шару рідини) в проміжку при простому русі Куетта визначається як

$$V_y = \frac{\delta - y}{\delta} v, \quad (13)$$

де δ – величина проміжку між циліндрами.

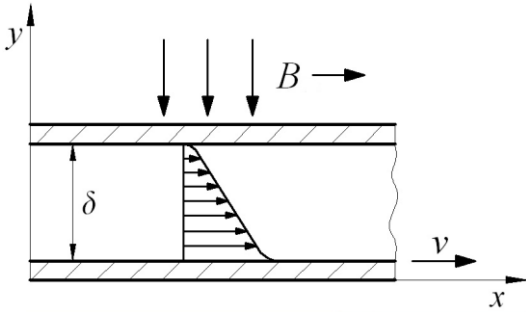


Рисунок 11 – Протікання робочої електропровідної рідини в проміжку АД з ППР

Для обертового руху ротора та електропровідного охолоджуючого середовища лінійні швидкості в кожній точці виражаються через кутову частоту обертання. При цьому складові швидкості дорівнюють $v_x = \omega \cdot y$, $v_y = \omega \cdot x$. При задаванні швидкості обертання окремих шарів робочої рідини з'являється можливість урахування реального характеру руху провідного середовища в зазорі АД з ППР, що дозволяє підвищити точність електромагнітного та теплового розрахунку.

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

$$B_x = \partial A_z / \partial y, \quad B_y = -\partial A_z / \partial x. \quad (14)$$

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

$$J_z = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right). \quad (15)$$

Сумарна теплова потужність АД з ППР розраховується за виразом

$$P(A) = J_z^2(A) / \gamma(T) + J_{\bar{n}\delta i \bar{\delta}}^2 / \gamma(T) + P_{\bar{n}l} + P_{\bar{e}\bar{a}\bar{a}} + P_{\bar{\delta}\bar{a}\bar{\delta}} + P_{\bar{\delta}\bar{a}\bar{c}} + P_{\bar{i}\bar{a}\bar{\delta}} + P_{\bar{a}\bar{i}\bar{a}}, \quad (16)$$

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

Питома електропровідність сталі ротора $\gamma(T)$ залежить від температури T у відповідності до виразу

$$\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (17)$$

де γ_0 – електропровідність масиву при температурі T_0 ; α – температурний коефіцієнт. Для ротора зі сталі марки Ст. 3 $\gamma_0 = 0,5 \cdot 10^7$ См/м, $\alpha = 0,005$.

На рис. 12, 13 представлені відповідно результати чисельного розрахунку усталеного розподілу температури та розподілу векторного магнітного потенціалу в поперечному перетині АД з ППР, які свідчать про те, що при врахуванні взаємозв'язку електромагнітного та теплового полів змінюється не тільки амплітуда густини вихрових струмів на поверхні ротора, але й повний струм ротора. Так, при нагріванні ротора до усталеної температури – 64 °С, середня густина вихрових струмів зменшується до величини 5,2 А/мм² (на 11%). Важливим фактором, який слід враховувати при проектуванні АД з ППР, поряд із зменшенням вторинного струму (інтегральних тепловиділень) по мірі нагріву, є відгалуження частини магнітного потоку через робочі лопатки ротора. У таблиці 1 наведені значення магнітної індукції в лопатках ротора, отримані в результаті серії розрахунків, проведених для конструкцій ротора з різним числом n_l і товщиною лопаток s_l .

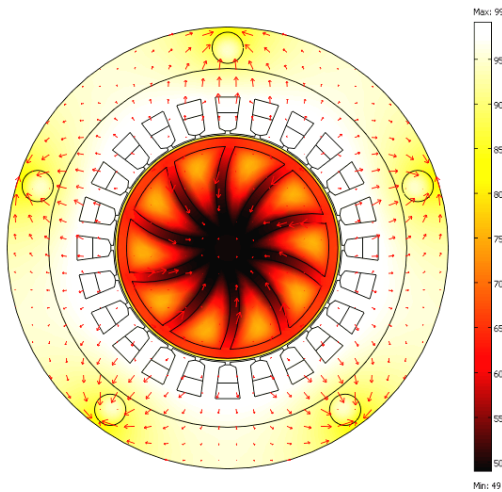


Рисунок 12 – Розподіл температури та вектора теплового потоку в поперечному перетині АД з ППР

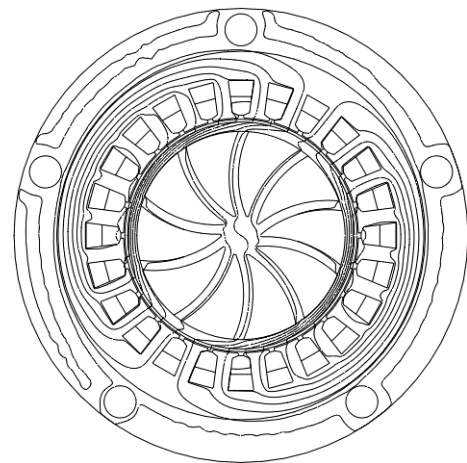


Рисунок 13 – Розподіл векторного магнітного потенціалу в поперечному перетині АД з ППР

Таблиця 1 – Значення магнітної індукції в лопатках ротора (Тл)

s_l	n_l			
	8	10	12	15
3,5 мм	1,243	1,212	1,181	1,141
5 мм	0,939	0,921	0,893	0,866
7 мм	0,831	0,817	0,794	0,771

Температурно-часові залежності окремих розрахункових вузлів моделі представлені на рис. 14. Зі збільшенням коефіцієнта перфорації ротора зростає струм статора, частота і амплітуда вихрових струмів ротора, а також зменшується швидкість протікання робочої рідини, що у свою чергу призводить до погіршення умов охолодження активної частини.

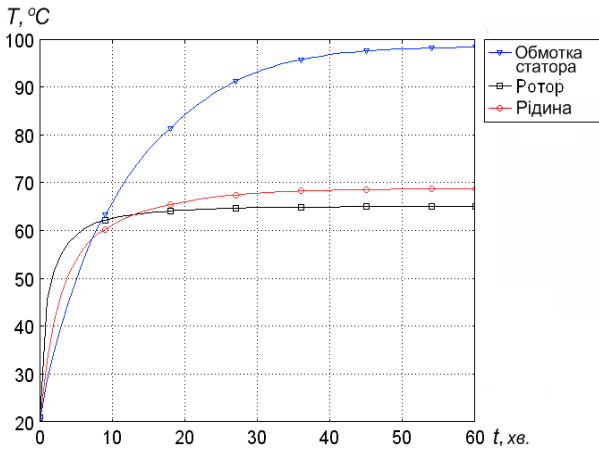


Рисунок 14 – Температурно-часові залежності окремих розрахункових вузлів моделі

У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень, а також наведена методика проектування АД з ППР. Експериментальні дослідження проводились в лабораторії електричних машин Донбаського державного технічного університету (м. Алчевськ). Порівняння експериментальних даних з розрахунковими залежностями і характеристиками, показало якісну та кількісну відповідність. Крива розподілу напруженості електричного поля уздовж довжини ППР, побудована за результатами вимірювань, а також крива, отримана при вирішенні тривимірної польової задачі чисельним методом (для режиму короткого замикання) представлені на рис. 16. Незначна кількісна розбіжність значень чисельного та фізичного експериментів (до 10%)

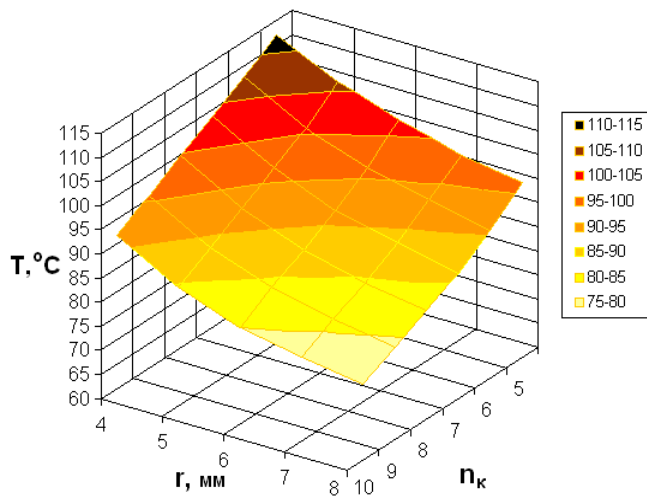


Рисунок 15 – Залежність температури найбільш нагрітої точки обмотки статора від кількості аксіальних каналів та їх радіусу

Найбільш напруженою частиною АД з ППР в тепловому відношенні є обмотка статора. Розрахунки, проведені для різних варіантів ППР, показали, що зі збільшенням кількості та діаметру перфорацій потужність об'ємних тепловиділень ротора тільки зменшується, а характер кривої не залежить від типу схеми перфорацій. Підвищений магнітний опір обумовлює напружений тепловий стан статора (98 °C) і призводить до необхідності інтенсифікації охолодження із застосуванням більшої кількості та/або перетину аксіальних каналів. На рис. 15 у вигляді графіка поверхні представлена залежність температури найбільш нагрітої точки обмотки статора від числа аксіальних каналів та їх радіусу.

обумовлена ідеалізацією геометричних параметрів і фізичних процесів у скінченно-елементній моделі. Істотний вплив на механічну характеристику АД з масивним ротором спричиняють ефекти, пов'язані з його нагріванням. Експеримент, проведений для АД з порожнистим гладким ротором (рис. 17), показав, що підвищення його температури на 25 °C призводить до зниження величини електромагнітного моменту на 8–10%. Порівняння результатів експериментального дослідження механічних характеристик АД з ППР з розрахунковими характеристиками показує, що розбіжність в усьому досліджуваному діапазоні зміни ковзання не перевищує 4–8%, залежно від коефіцієнта перфорації ротора.

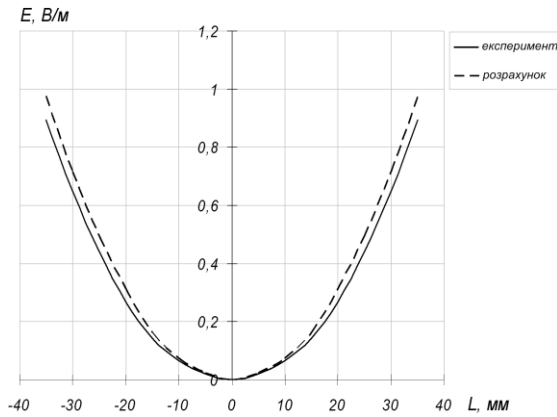


Рисунок 16 – Розподіл напруженості електричного поля уздовж довжини ППР

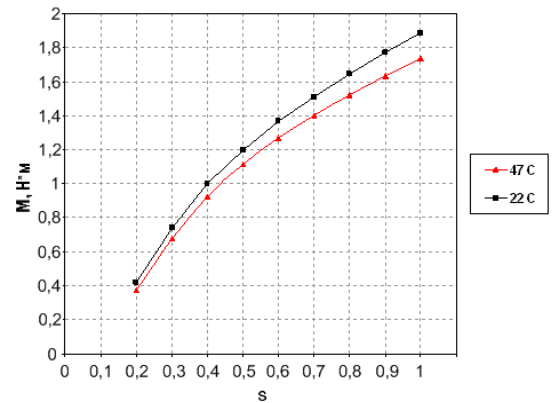


Рисунок 17 – Вплив нагріву ротора на механічну характеристику

Така розбіжність викликана похибкою завдання вихідних даних, тобто відхиленням реальних магнітних і електричних властивостей матеріалів від прийнятих в основу розрахунку, а також похибкою дискретизації, що виникає при заміні реальної конструкції обмеженою кількістю скінченних елементів.

Процес проектування АД з ППР може бути представлений у вигляді алгоритму, приведеного на рис.18.

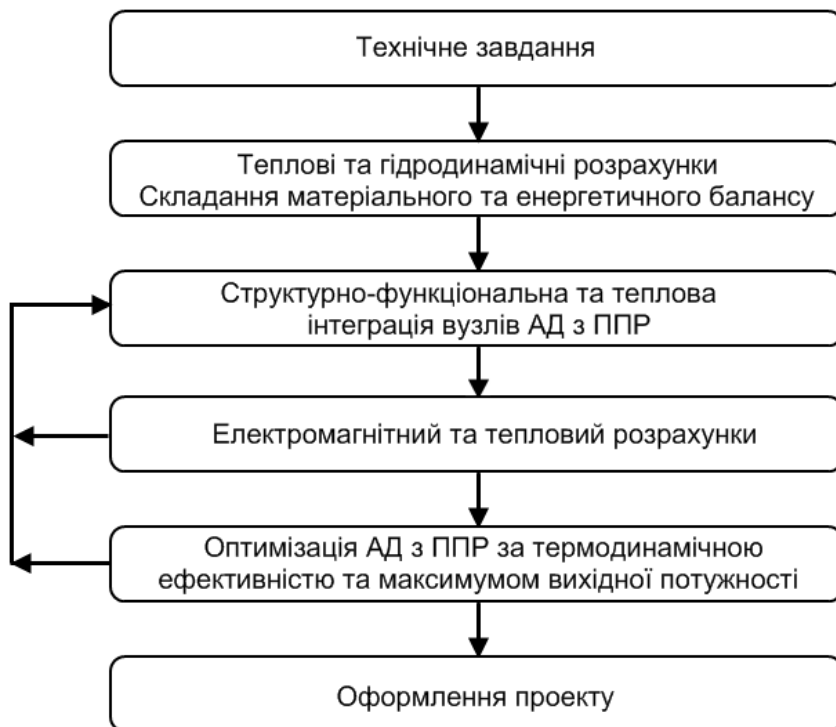


Рисунок 18 – Алгоритм проектування АД з ППР

Результати розрахунків, проведених з використанням запропонованої методики проектування показали задовільну збіжність з результатами експериментальних досліджень, як фізичних моделей, так і дослідних, а також серії промислових зразків АД з ППР з похибкою 8 – 12%, допустимою при інженерних розрахунках.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено теоретичне обґрунтування і вирішення науково-практичної задачі, що полягає в розробці комплексу науково-технічних засобів спрямованих на створення високоефективних АД для систем автономного теплопостачання та гарячого водозабезпечення.

Дослідження, виконані в дисертаційній роботі, дозволяють сформулювати такі висновки:

1. Проведено аналіз конструкцій і проблем створення електричних машин, працюючих в системах нагріву та переміщення рідин, який показав, що об'єднання в одному блоці АД, гідродинамічного теплогенератора і насоса дозволяє розглядати даний пристрій як новий тип електричної машини.

2. Одержано залежності просторового розподілу та гармонійного складу магнітної індукції, а також густини струму в активній частині АД з ППР на базі тривимірної математичної моделі електромагнітного поля, яка враховує крайовий ефект і амплітудну модуляцію просторових складових густини вихрових струмів, що дозволяє виконувати більш обґрунтований розрахунок електромагнітних зусиль і тепловиділень в активних частинах.

3. Одержано залежності активного хвильового опору від ковзання для феромагнітного ППР при різних значеннях конструктивних параметрів з урахуванням реальної геометрії масиву, а також запропоновані вирази для визначення параметрів ППР на основі результатів польових розрахунків. Основний вплив на величину активного хвильового опору ППР спричиняє коефіцієнт перфорації ротора.

4. Отримані сімейства механічних та частотних характеристик АД при різних схемах перфорації ППР, а також при різних значеннях його конструктивних параметрів. Чим більше кількість рядів, діаметр і кількість отворів в ряду, тим нижче проходить відповідна механічна характеристика. Величина кроку перфорацій в ряду за інших рівних умов не впливає на механічну характеристику АД з ППР. Виконання порожнистого ротора з парною кількістю рядів отворів (4, 8, 16, 20, 24, 40) при кількості отворів в ряду 1...4 діаметром 2...4 мм дозволяє отримати механічну характеристику еквівалентну механічній характеристиці АД з гладким ротором. Встановлено, що залежності $M_H^* = f(Z_2, d, n)$ для АД з прямими рядами отворів з достатньою точністю апроксимуються відповідними кривими $M_H^* = 1 - k_{перф}$.

5. На базі узагальненої математичної моделі взаємозв'язаних електромагнітних і теплових процесів АД з ППР, що враховує різницю швидкостей руху електропровідного охолоджуючого середовища та ротора, розроблені основні положення методики розрахунку температурного поля, а також отримані результати, що дозволяють обирати розмірні співвідношення елементів конструкції з метою оптимізації параметрів системи охолодження і отримання заданих показників продуктивності. При урахуванні взаємозв'язку електромагнітного та теплового полів АД з ППР змінюється не тільки амплітуда густини вихрових струмів на поверхні ротора, але й повний струм ротора. Так, при нагріванні ротора до усталеної температури 64 °С, середня густина вихрових струмів зменшується до величини 5,2 А/мм² (на 11%). Величина магнітної індукції в лопатках при їх кількості 8...15 і товщині 3,5...7 мм приймає значення 0,77...1,24 Тл.

6. Запропоновано вираз для розрахунку коефіцієнта повітряного зазору АД з ППР, а також отримано вираз, що дозволяє виконати розрахунок дисипативної складової енергії, обумовленої силами в'язкого тертя робочої рідини в зазорі АД з ППР. Створені дослідні зразки резонансного насоса-теплогенератора і шнекового АД-нагрівача з ППР, а також розроблений і реалізований комплекс фізичних моделей, метрологічного забезпечення і методології обробки результатів експериментальних досліджень АД з ППР. Загальний ККД АД з ППР досягає значення 0,98. Отримані результати підтверджують можливість використання АД з ППР в автономних теплогенераційних системах.

7. Результати досліджень використані при конструюванні та практичній реалізації дослідних зразків шнекового АД-нагрівача, які впроваджено на ТДВ «Первомайський електромеханічний завод ім. К. Маркса» (м. Первомайськ), при виготовленні експериментальних зразків резонансного насоса-теплогенератора на експериментальній ділянці науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Параметр» (м. Алчевськ) під час виконання держбюджетних науково-дослідних робіт, а також у навчальному процесі на кафедрі електричних машин та апаратів Донбаського державного технічного університету при читанні лекцій з дисциплін «Моделювання електромеханічних пристроїв», «Електромагнітні системи з вихровими струмами», «Вступ до електромеханіки», при виконанні дипломних проектів і випускних кваліфікаційних робіт магістрів за спеціальністю 8.050702 «Електричні машини та апарати».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Грицюк В.Ю. Расчёт электромагнитного момента полифункционального электромеханического преобразователя с применением численных методов / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский, А.В. Лупанов, М.А. Филатов // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2009. – Вып. 28. – С. 364–372.

Здобувачем проведено експериментальне визначення електромагнітного моменту поліфункціонального електромеханічного перетворювача та виконано порівняння експериментальних даних з результатами отриманими чисельним методом.

2. Грицюк В.Ю. Экспериментальное определение магнитной индукции в полифункциональных электромеханических преобразователях / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский, А.В. Лупанов // Вісник КрНУ. – Кременчук: КрНУ. – 2009. – Вип. 3/2009 (56). Ч. 1. – С. 86–89.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження фізичної моделі поліфункціонального електромеханічного перетворювача енергії.

3. Грицюк В.Ю. Определение коэффициента воздушного зазора для полого ротора сквозной структуры в полифункциональных электромеханических преобразователях / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский, Н.В. Лукьянов // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2010. – Вып. 31. – С. 187–192.

Здобувачем запропоновано вираз для визначення коефіцієнту повітряного зазору асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором.

4. Грицюк В.Ю. Оценка влияния сквозных отверстий в полом роторе на возможность практической реализации электромагнитной редукции / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2010. – Вып. 32. – С. 344–349.

Здобувачем обґрунтовано можливість практичної реалізації електромагнітної редукції в асинхронному двигуні з порожнистим перфорованим ротором та проведені експериментальні дослідження.

5. Грицюк В.Ю. Расчет диссипативной составляющей энергии полифункциональных электромеханических преобразователей / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2011. – Вып. 33. – С. 334–343.

Здобувачем запропоновано методикау визначення дисипативної складової енергії за рахунок в'язкого тертя рідини в зазорі асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором.

6. Грицюк В.Ю. Оценка величины активного сопротивления полого перфорированного ротора в полифункциональных электромеханических преобразователях / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский // Електротехніка і Електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 25–27.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження та запропоновано вираз для визначення активного опору порожнистого перфорованого ротора.

7. Грицюк В.Ю. Экспериментальное исследование полифункциональных электромеханических преобразователей с полым перфорированным ротором / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский, М.А. Филатов // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2011. – Вып. 35. – С. 181–187.

Здобувачем виготовлено дослідні зразки асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором та проведено експериментальні дослідження.

8. Грицюк В.Ю. Численное моделирование электромагнитных полей в полифункциональных электромеханических преобразователях с полым перфорированным ротором / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский, М.А. Филатов // Електротехніка і Електромеханіка. – 2012. – № 1. – С. 25–27.

Здобувачем розроблено тривимірну скінченно-елементну модель електромагнітного поля асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором.

9. Грицюк В.Ю. Характер течения рабочей проводящей жидкости в зазоре полифункционального электромеханического преобразователя / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 1/2012 (17). – С. 19–21.

Здобувачем обґрунтовано доцільність врахування швидкості руху електропровідної охолоджуючої рідини в зазорі асинхронного двигуна з порожнистим перфорованим ротором.

10. Грицюк В.Ю. Исследование механических характеристик полифункциональных электромеханических преобразователей с полым перфорированным ротором / В.Ю. Грицюк // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2012. – Вып. 37. – С. 338–352.

11. Пат. 43346 Україна, МПК F 24 J 3/00. Резонансный насос-теплогенератор / В.Ю. Грицюк, М.М. Заблодський, Г.М. Гринь та ін.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – № u200903007; заявл. 30.03.2009; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

Здобувачем запропоновано конструктивне рішення, яке підвищує інтенсивність охолодження резонансного насоса-теплогенератора.

12. Пат. 69754 Україна, МПК F 24 J 3/00. Резонансный насос-теплогенератор / В.Ю. Грицюк,

М.М. Заблодський, М.А. Філатов; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – № u201112971; заявл. 04.11.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

Здобувачем сформульовано технічну ідею виконання додаткових прямокутних отворів у порожнистому роторі резонансного насоса-теплогенератора.

13. Пат. 70031 Україна, МПК F 24 J 3/00. Резонансний насос-теплогенератор / В.Ю. Грицюк, М.М. Заблодський, В.Ф. Шинкаренко, М.А. Філатов; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – № u201113156; заявл. 08.11.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.

Здобувачем обґрунтовано технічну ідею використання радіальних каналів магнітопроводу статора, як додаткового контуру циркуляції робочої рідини резонансного насоса-теплогенератора.

14. Грицюк В.Ю. Повышение эффективности энергопреобразований в торцевых зонах полифункциональных электромеханических преобразователей / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский, Н.В. Лукьянов: материалы Междунар. научн.-технич. конф. [«Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах»], (Севастополь, 12 – 16 сент. – Севастополь: СевНТУ. – 2010. – С. 55–57.

Здобувачем експериментально встановлені особливості розподілу вихрових струмів в порожнистому феромагнітному роторі поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

15. Грицюк В.Ю. Диссипативные структуры роторов полифункциональных электромеханических преобразователей в технологиях углеродпереработки / В.Ю. Грицюк, Н.Н. Заблодский // Сборник научных трудов Санкт-Петербургского государственного горного университета. – Проблемы недропользования. – 2011. – Ч. 1. – С. 188–190.

Здобувачем запропоновано вираз для розрахунку дисипативної складової енергії поліфункціонального електромеханічного перетворювача з порожнистим перфорованим ротором.

АНОТАЦІЇ

Грицюк В.Ю. Асинхронний двигун з порожнистим перфорованим ротором для теплогенераційних систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013.

У дисертаційній роботі представлено рішення науково-практичної задачі, що полягає в розробці комплексу науково-технічних засобів спрямованих на створення високоефективних АД для систем автономного теплопостачання та гарячого водозабезпечення.

Запропоновано і теоретично обґрунтовано структуру електромагнітного ядра та системи

охолодження АД, яка відрізняється тим, що ротор виконаний порожнистим перфорованим, суміщеним з виконавчим механізмом, робоче технологічне середовище є охолоджуючим, що дозволяє поліпшити ККД, масогабаритні та вартісні показники теплогенераційних систем. Розроблено узагальнену математичну модель взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів АД з ППР, яка відрізняється урахуванням різниці швидкостей руху електропровідного охолоджуючого середовища. Розроблено тривимірну скінченно-елементну математичну модель електромагнітного поля АД з ППР. Отримано результати, що дозволяють обирати розмірні співвідношення елементів конструкції для оптимізації параметрів системи охолодження та отримання заданих показників продуктивності.

Ключові слова: електромеханічний перетворювач, порожнистий перфорований ротор, робоча рідина, електромагнітні процеси, вихрові струми, теплове поле.

Грицюк В.Ю. Асинхронный двигатель с полым перфорированным ротором для теплогенерационных систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

В диссертационной работе представлено решение научно-практической задачи, заключающееся в разработке комплекса научно-технических средств направленных на создание высокоэффективных АД для систем автономного теплоснабжения и горячего водообеспечения. Предложена и теоретически обоснована структура электромагнитного ядра и системы охлаждения АД, отличающаяся тем, что ротор выполняется полым перфорированным, совмещенным с исполнительным механизмом, рабочая технологическая среда является охлаждающей, что позволяет улучшить КПД, массогабаритные и стоимостные показатели теплогенерационных систем.

На базе трехмерной конечно-элементной модели электромагнитного поля АД с ППР получены зависимости пространственного распределения и гармонического состава магнитной индукции, а также плотности тока в активной части. Установлены зависимости активного волнового сопротивления от скольжения для ферромагнитного ППР при различных значениях конструктивных параметров с учетом реальной геометрии массива, а так же предложены выражения для определения параметров ППР на основе результатов полевых расчетов. Получены семейства механических характеристик АД при различных схемах перфорации ППР, а также при различных значениях его конструктивных параметров. Установлена закономерность, определяющая влияние степени перфорации полого ферромагнитного ротора на величину электромагнитного момента.

На базе обобщенной математической модели взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов АД с ППР, учитывающей разницу скоростей движения электропроводящей охлаждающей среды и ротора, разработаны основные принципы расчета температурного поля, а так же получены результаты, позволяющие выбирать размерные соотношения элементов конструкции для оптимизации параметров системы охлаждения и получения заданных показателей производительности.

Предложено выражение для расчета коэффициента воздушного зазора АД с ППР, а также получе-

но выражение, позволяющее выполнить расчет диссипативной составляющей энергии, обусловленной силами вязкого трения рабочей жидкости в зазоре АД с ППР. Созданы опытные образцы резонансного насоса-теплогенератора и шнекового АД с ППР, а так же разработан и реализован комплекс физических моделей, метрологического обеспечения и методологии обработки результатов экспериментальных исследований АД с ППР. Разработанные конечно-элементные модели, расчетные алгоритмы и рекомендации для проектирования АД с ППР использованы при конструировании и практической реализации опытных образцов шнекового АД-нагревателя, которые внедрены на ОДО «Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса» (г. Первомайск), при изготовлении экспериментальных образцов резонансного насоса-теплогенератора на экспериментальном участке научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Параметр» (г. Алчевск) при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ, а также в учебном процессе на кафедре электрических машин и аппаратов Донбасского государственного технического университета.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, полый перфорированный ротор, рабочая жидкость, электромагнитные процессы, вихревые токи, тепловое поле.

Gritsyuk V.Yu. Asynchronous motor with hollow perforated rotor for heat-generating systems. – Manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree by specialty 05.09.01 – electrical machines and apparatus. – National technical university «Kharkiv polytechnical institute», Kharkiv, 2013.

The thesis presents the solution of scientific practical problem that consists in the development of complex scientific and technical means aimed at creating a highly efficient asynchronous motors for self-contained heating and hot water supply.

Proposed and theoretically grounded core structure electromagnetic asynchronous motor and cooling system, which is characterized in that the rotor is made hollow perforated, combined with actuator, the working environment is a cooling technology that can improve efficiency, dimensions and weight and cost parameters heat generation systems.

A generalized mathematical model of interconnected electromagnetic and thermal processes of AM with HPR, wherein considering difference speeds conductive cooling medium. A three-dimensional finite-element mathematical model of the electromagnetic field AM with HPR. The results, which allows you to choose the dimensional ratio of structural elements in order to optimize the parameters of the cooling system and a set of performance indicators.

The results allow for increased scientific and theoretical basis of asynchronous machines with massive ferromagnetic rotor and used to optimize the design and efficiency of AM with HPR as a heat generator.

Key words: electromechanical transducer, hollow perforated rotor, working fluid, the electromagnetic processes, eddy currents, thermal field.

