

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему **МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ
НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ**

ДРТР.215038.01.19.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-19-1



підпис

М. Ю. Власюк

Ініціали, прізвище

Керівник: к.т.н., доцент



підпис

В. І. Стецюк

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, доцент



підпис

С. К. Підченко


Ініціали, прізвище

7 грудня 2020 р.

Хмельницький, 2020

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій
Освітній рівень другий (магістерський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Освітня-професійна програма Телекомунікації, медійні та інтелектуальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ 
Зав. кафедрою _____
Підченко С. К.
« 2 » вересня 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

Власюку Максиму Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Моделювання та дослідження синхронних двигунів на постійних магнітах

керівник роботи Стецюк Віктор Іванович к. т. н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові) (науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом по університету від «01» вересня 2020 р. № 118.

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2020 р.

3. Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)



Мета роботи підвищення ефективності синхронних двигунів на постійних магнітах шляхом мінімізації теплових втрат

Об'єкт дослідження теплові процеси електричних машин

Предмет дослідження електричні машини, зокрема синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

1. Провести аналіз літературних та електронних джерел за темою дослідження.
2. Розглянути конструктивні особливості асинхронних, синхронних та вентильних електродвигунів
3. Побудувати математичну модель синхронного двигуна із збудженням від постійних магнітів
4. Здійснити моделювання електродвигунів за допомогою програмно-апаратних засобів.
5. Провести моделювання теплових процесів реальних конструкцій синхронних двигунів на постійних магнітах

Завдання отримав  Власюк М. Ю.
Науковий керівник  Стецюк В. І.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Одержання завдання на МР	2.09.20	Виконав
2	Пошук літературних джерел та патентних матеріалів за заданою тематикою	7.09.20	Виконав
3	Формування 1 розділу дипломної роботи	12.09.20	Виконав
4	Розробка математичної моделі	19.09.20	Виконав
5	Написання 2 розділу дипломної роботи	24.09.20	Виконав
6	Проведення моделювання у середовищах Matlab та Femlab	1.10.20	Виконав
7	Формування 3 розділу	9.10.20	Виконав
8	Проведення моделювання реальних Електричних двигунів	16.10.20	Виконав
9	Написання звіту з практики	22.10.20	Виконав
10	Формування 4 розділу МР	30.10.20	Виконав
11	Написання висновків	4.11.20	Виконав
12	Формування вступу	8.11.20	Виконав
13	Формування переліку посилань	14.11.20	Виконав
14	Створення презентації	18.11.20	Виконав
15	Підготовка роботи до перевірки на антиплагіат	24.11.20	Виконав
16	Одержання відгуків та рецензій	27.11.20	Виконав
17	Подання готової роботи на кафедру	2.12.20	Виконав

Студент



Підпис

Власюк М. Ю.

Ініціали, прізвище

Керівник роботи



Підпис

Стецюк В. І.

Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	6
Вступ	7
1. Аналіз літературних та електронних джерел за темою дослідження	12
1.1. Загальна характеристика та класифікація двигунів на постійних магнітах	12
1.2. Конструктивні особливості електричних двигунів	18
1.2.1. Асинхронні електродвигуни	18
1.2.2. Синхронні двигуни	21
1.2.3. Вентильні двигуни	25
1.2.4. Синхронні реактивні двигуни	30
1.3. Патентний пошук	32
Висновки до розділу 1	34
2. Математична модель синхронного двигуна на постійних магнітах ...	35
2.1. Загальна теплова модель електродвигуна	35
2.2. Динамічна теплова модель електродвигуна	41
2.3. Тривалий режим S1 роботи електродвигуна	46
2.4. Повторно-короткочасний режим S3 роботи електродвигуна	53
Висновки до розділу 2	55
3. Моделювання електродвигунів за допомогою програмно-апаратних засобів	57
3.1. Вибір методу моделювання	57
3.2. Вихідні дані	61
3.3. Реалізація теплової моделі електродвигуна в MATLAB/FEMLAB ...	63
3.3.1. Метод скінчених елементів в задачах теплового аналізу.....	63
3.3.2. Синтез структурної схеми теплової моделі синхронного двигуна.	72
Висновки до розділу 3	76
4. Застосування розроблених методів моделювання на прикладах реальних двигунів	77
4.1. Конструктивні особливості реальних синхронних двигунів на постійних магнітах	77
4.2. Моделювання теплових процесів реальних електричних двигунів..	79
4.2.1. Синхронний двигун із вбудованими магнітами (IPM)	79

4.2.2. Вентильний реактивний електродвигун	82
4.2.3. Синхронний двигун з поверхневим встановленням постійних магнітів (SPM)	87
Висновки до розділу 4	91
Висновки	92
Перелік джерел посилання	94
Додатки	96
Додаток А. Слайди презентації	96
Додаток Б. Копія публікації	110

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД –	асинхронний двигун
БЕМ –	безконтактні електричні машини
БДПМ –	безконтактні двигуни на постійних магнітах
ДПР –	датчик положення ротора
ДПТ –	двигун постійного струму
ЕРС –	електрорушійна сила
КНС –	коефіцієнт нелінійних спотворень
ККД –	коефіцієнт корисної дії
МД –	магнітний двигун
МСЕ –	метод скінченних елементів
ПЧ –	перетворювач частоти
СДПМ –	синхронний двигун з постійними магнітами
ТЗ –	технічне завдання
ЧП –	частотний перетворювач
ШІМ –	широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність теми.

Електродвигуни відіграють надзвичайно важливу роль в сучасному суспільстві. Вони являються невід'ємною частиною прогресу і використовуються на виробництві, в побуті, різноманітних технологічних процесах, в підймальних механізмах, та багато іншого. За останні 100 років створено велику кількість різновидів електричних машин. Однак в рамках даної роботи найбільшу цікавість представляють синхронні двигуни на постійних магнітах (СДПМ). Даний клас електричних машин має ряд істотних переваг, серед яких найбільш важливими є: високі енергоефективні показники, тривалий ресурс роботи, відсутність жорстких обмежень до якості напруги живлення, широкий діапазон регулювання швидкості незалежно від навантаження, тощо.

В даний час однією із проблем електромеханіки є точність оцінки і розрахунків електричних машин на нагрівання і тепловиділення. Причому це завдання особливо актуальне для електричних машин в закритих корпусах, замкнених просторах, в жорстких умовах експлуатації. Врахування теплових процесів важливе в ході проектування будь-яких електричних машин, однак для синхронних двигунів на постійних магнітах це має найбільшу актуальність. Адже найбільш критичними вузлами електричних машин даного класу є самі постійні магніти та мідні дроти обмоток. Причому, якщо дроти ще можуть працювати при температурах 100-180 °C і навіть більше, в залежності від матеріалу ізоляції, то постійні магніти в даних умовах поступово деградують і можуть навіть повністю втратити свої властивості. Причому із зменшенням температури їх магнітні властивості вже не відновляться ніколи. Температура і магнітні властивості для постійних магнітів мають прямо пропорційне відношення. За звичайних умов неодимові магніти довговічні і практичні, але: максимальна робоча температура для них становить близько 80-200 градусів, в залежності від класу і технології виготовлення.

СДПМ характеризуються високими магнітними і електричними навантаженнями, що автоматично передбачає великі теплові навантаження, які суттєво впливають на всі характеристики, в тому числі на його працездатність. Однак рівень теплових навантажень визначає не тільки граничний вплив на ізоляцію проводів обмоток, постійні магніти, але й багато інших вузлів, які при підвищеній температурі можуть деградувати або виходити з ладу. Це підшипникові вузли, втулки, муфти, сальники, тощо.

Оцінка теплового поля дозволяє внести необхідні зміни в параметри електричних машин, що знаходиться на етапі проектування для оптимізації їх конструкції з необхідними вихідними характеристиками, умовами і тривалістю роботи. Для цього необхідний ретельний аналіз теплового режиму виробу, що враховує алгоритм і умови його експлуатації, пов'язані з тепловими навантаженнями.

Аналіз існуючих методів розрахунку температурних полів електричних машин, виявив наявність різних способів, теорій з різним підходом та ступенем точності. Для досягнення найбільшого ефекту необхідно враховувати якомога більше факторів процесу термоударів і розглядати в динаміці теплові поля СДПМ.

Відомо ряд робіт [1-4], присвячених електромагнітним та електротехнічним аспектам роботи електричних двигунів різноманітного типу і класу. Відомо також ряд робіт [2-4], присвячених тепловим процесам електричних машин. В даній же роботі вдалося знайти суміжну грань між тепловими та електричними процесами, здійснити симбіоз двох різнонаправлених напрямків дослідження, інтегрувавши їх в загальній математичній моделі.

З огляду на вищесказане, проблема теплового аналізу електричних машин представляє значний науковий та практичний інтерес і актуальність роботи не викликає ніяких сумнівів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Магістерська робота виконана відповідно до поточних та перспективних планів наукової роботи Хмельницького національного університету, кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій за тематикою дослідження синхронних двигунів на постійних магнітах.

Мета роботи і задачі дослідження.

Метою дипломної роботи є підвищення ефективності синхронних двигунів на постійних магнітах шляхом мінімізації теплових втрат.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані наступні задачі:

- 1) провести класифікацію електричних машин, зокрема безконтактних електродвигунів;
- 2) здійснити аналіз методів моделювання процесів електромагнітних і теплових полів та визначити рівень їх взаємодіяції; на основі обраних методів створити динамічну теплову модель синхронного електродвигуна та провести її дослідження в різних режимах роботи;
- 3) провести імітаційне моделювання теплових режимів синхронного електродвигуна із визначенням температурних полів та рівня втрат в основних конструктивних складових;
- 4) перевірити результати досліджень та моделювання для реальних конструкцій найбільш поширених типів синхронних електродвигунів із збудженням від постійних магнітів.

Об'єкт дослідження – теплові процеси електричних машин.

Предмет дослідження – електричні машини, зокрема синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів.

Методи дослідження. Дослідження базуються на загальних положеннях математичного та тензорного аналізу. Теоретичні дослідження проводилися з використанням комп'ютерних методів аналізу теплових полів. Моделювання здійснювалося засобами MATLAB і FEMLAB. Експериментальні дослідження проведені з використанням теорії планування експерименту, теорії вимірів та обробки результатів експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів.

Удосконалено методику розрахунку теплових полів електричних машин.

Розроблено оригінальну методику розрахунку теплових втрат для конкретних моделей синхронних двигунів – з поверхневим встановленням постійних магнітів (SPM), із вбудованими магнітами (IPM) та вентильних двигунів.

Розроблено оригінальну динамічну теплову модель синхронного електродвигуна та проведено її дослідження в тривалому та повторно-короткочасному режимах роботи.

За аналогією з аналізом електричних схем, побудовані теплові схеми заміщення синхронних двигунів на постійних магнітах відносно термічного опору.

Практичне значення отриманих результатів.

Робота пройшла апробацію на міжнародній конференції Ванкувер, Канада: Стецюк В. І. Моделювання температурних режимів електричних машин в середовищі MATLAB/FEMLAB / В. І. Стецюк, М. Ю. Власюк // X Міжнародна науково-практична конференція “TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MODERN SCIENTIFIC THOUGHT”, Ванкувер, Канада 23-26 листопада 2020. – С. 750-755. ISBN 978-1-63649-921-5. DOI: 10.46299/ISG.2020.II.X. Одержані результати можуть бути застосовані для проектування, виготовлення та експлуатації електричних машин всіх типів і принципу дії.

Публікації. На базі даної магістерської роботи була опублікована стаття у фаховому журналі “Моделювання теплових процесів електричних машин” / В. І. Стецюк, М. Ю. Власюк // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2020. – № 5.

ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ.

1.1. Загальна характеристика та класифікація двигунів на постійних магнітах.

В наш на перше місце ставляться такі показники, як енергоефективність, екологічність і економія ресурсів. Одним із способів зниження енергоспоживання є впровадження систем регульованого електроприводу. Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) досить затребувані, так як він володіють високим ККД, що обумовлюється відсутністю втрат в роторі, кращим відношенням максимальної корисної потужності до маси в порівнянні з іншими двигунами аналогічної потужності, а також високими експлуатаційними характеристиками через відсутність ковзних контактів. Тому дослідження енергоефективного електроприводу на базі СДПМ є актуальним завданням.

Одним з радикальних шляхів підвищення надійності, розширення функціональних можливостей і поліпшення загальних характеристик електричних машин є перехід до безконтактних електричних машин (БЕМ) [1]. Це впливає з наступних міркувань:

1) статика повзує, що щітковий контакт так само як ізоляція та підшипники викликають найбільше число відмов в роботі електричних машин;

2) при жорстких впливах навколишнього середовища щітковий контакт різко погіршує свою роботу, або взагалі стає непрацездатним (наприклад, з ростом висоти різко зростає іскріння в контакті, яке сприяє його підвищеного зносу; крім того, з ростом висоти зменшуються вологість повітря і його щільність, що позбавляє контакт природною «мастилою» і також викликає швидкий механічний знос контакту, тому використання щіткового контакту при висотах більше (18-20) км практично неможливо [1]; наявність щіткового контакту неприпустимо в присутності займистих газів або парів; щітковий контакт виходить з ладу при вібраційних навантаженнях і т. п.);

3) щітковий контакт істотно обмежує допустиму швидкість ротора електричної машини (граничні лінійні швидкості не перевищують (80-100) м/с);

4) щітковий контакт створює додаткові електричні і механічні втрати, а також є джерелом акустичних шумів і електромагнітних завад;

5) щітковий контакт ускладнює обслуговування машини, забруднює внутрішні порожнини машини графітової пилом, знижує електричну міцність ізоляції, перешкоджає використанню в машині вискоефективного струминного рідинного охолодження, погіршує стабільність параметрів машини і т.п.

Особливе значення має розробка БЕМ для автономно функціонуючих систем, де перераховані вище недоліки щіткового контакту проявляються особливо різко. У зв'язку з цим створення вискоефективних БЕМ – одне з найбільш актуальних завдань. Істотну роль БЕМ покликані зіграти в хімічній технології, медицині, робототехніці та інших важливих областях, де існують вимоги підвищеної надійності роботи.

Двигуни з роботою на змінному струмі розрізняють:

- однофазні: містять одну обмотку;
- двофазні: мають дві обмотки, із зсувом на 90 градусів;
- двофазні: відрізняються наявністю 2-х обмоток на статорі, які зміщені між собою на кут 90 градусів; такі типи двигунів найчастіше підключаються до однофазної мережі, а штучний зсув на 90 градусів утворюється за рахунок конденсаторів.

- трифазні: підключається до трифазної мережі змінного струму, має 3 обмотки, їх зсунуті на 120 градусів.

Двофазні асинхронні електродвигуни мають наступні конструктиви:

- з короткозамкненим ротором;
- порожнистим магнітним ротором;
- порожнистим немагнітним ротором.

Електродвигун розрізняються також за:

1) створюваним обертальним моментом:

- гістерезисні;

- магнітоелектричні.

2) будовою кріплення:

- з валом, розташованим у горизонтальній площині;
- з валом, розташованим у вертикальній площині.

3) захистом від зовнішніх факторів:

- захищені;
- закриті;
- вибухонепроникні.

У електричних машинах гістерезисного типу обертовий момент утворюється перемагнічуванням ротора, тобто має місце явище гістерезису. Даний клас двигунів має незначне використання, наприклад з традиційними або навіть магнітоелектричними двигунами [1]. Взагалі є велика кількість різновидів двигунів.

Їх поділяють на великі групи за типом протікання струму:

- постійний струм;
- змінний струм;
- універсальні двигуни (працюють на постійному / змінному струмі).

Двигуни також бувають:

- колекторні: містять вузол передачі струму – колектор, який і являється найбільшим недоліком даного типу двигунів через механічний знос контактів і самого колектора. До речі, потребує постійного струму, хоча існують двигуни універсального типу, які можуть бути як постійними так і змінними;

- безколекторні: не містять колекторного вузла; приклад може служити вентильний двигун (працює на постійному струмі), який вважається безконтактним, але потребує спеціальної схеми керування (частотного перетворювача, енкодера, тощо).

Поділ відносно принципу роботи:

- синхронна електрична машина: електромеханічний пристрій із синхронним обертанням ротора відносно магнітного поля;
- асинхронна електрична машина: електродвигун в якого ротор обертається не синхронно з магнітним полем.

Поділ відносно способу збудження:

- зі збудженням від постійних магнітів;
- збудження паралельною обмоткою;
- - збудження послідовною обмоткою;
- змішане збудження (послідовно-паралельне).

Класифікація електродвигунів представлена на рис. 1. Тут у графічному вигляді подана описана вище класифікація, що дозволяє наглядно та компактно зрозуміти принцип класифікації сучасних електричних машин.

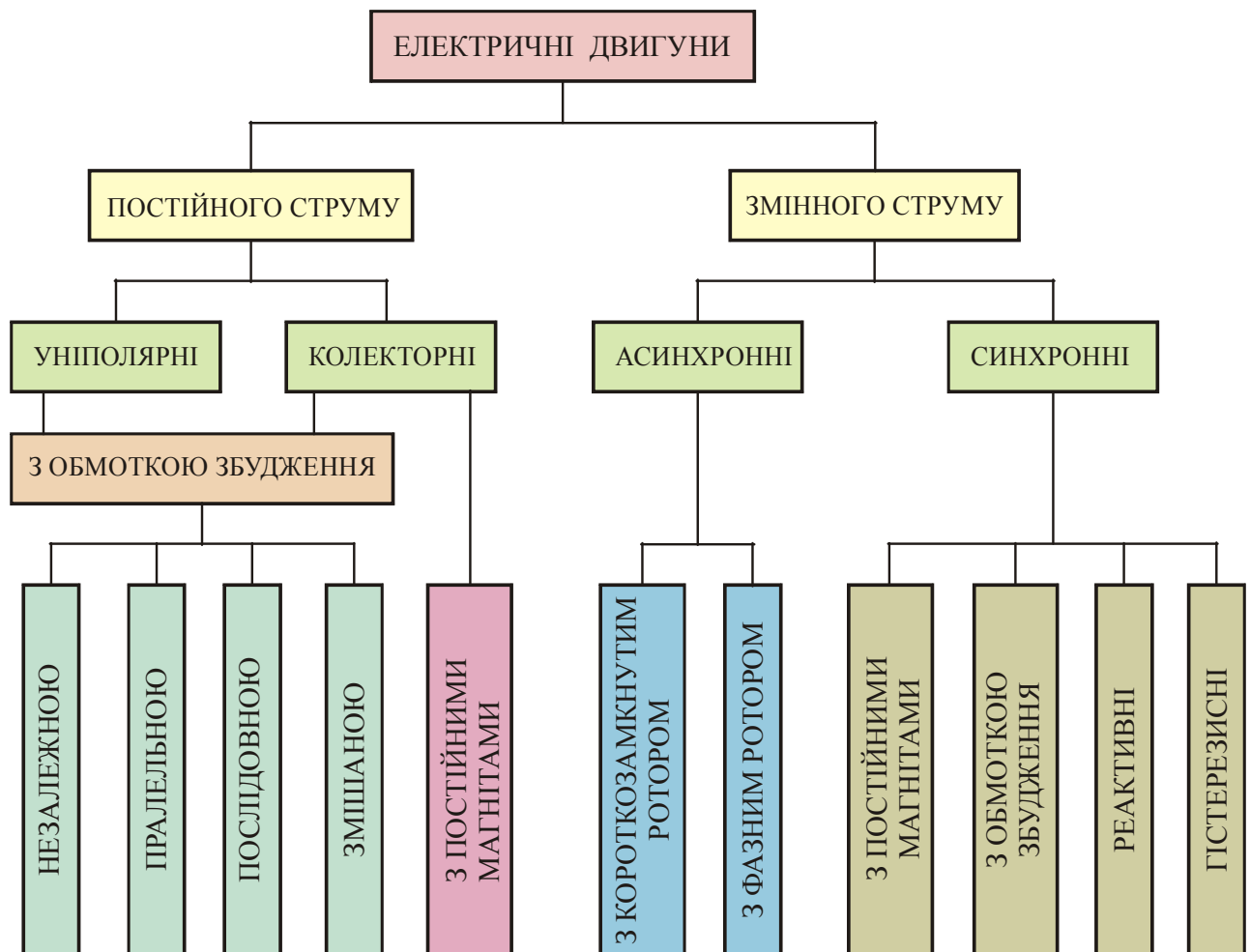


Рисунок 1.1 – Загальна класифікація електродвигунів

В контексті нашої роботи, найбільшу цікавість представляють безконтактні двигуни, а точніше їх різновид – синхронні двигуни на постійних магнітах (рис. 1.2).

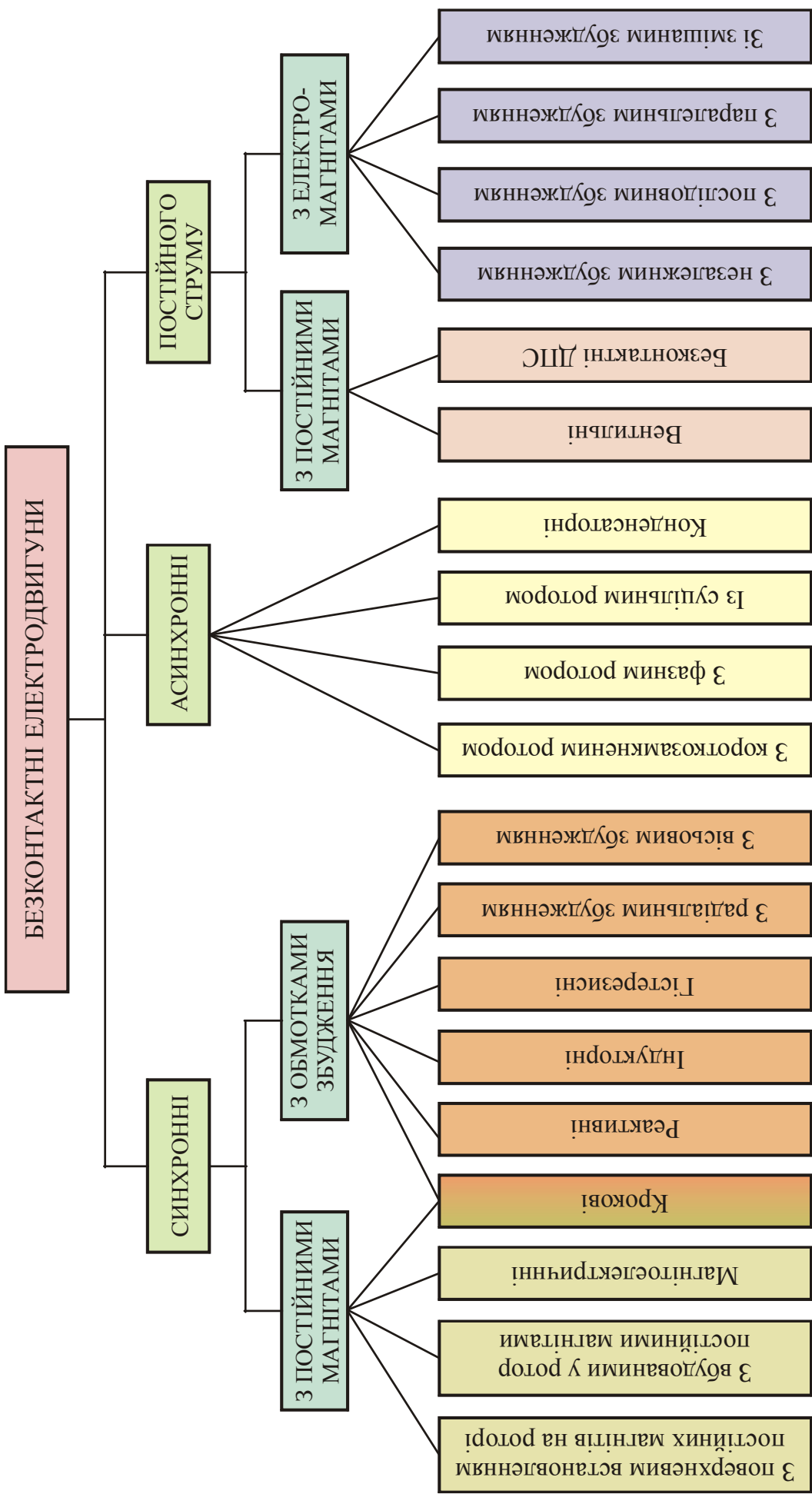


Рисунок 1.2 – Класифікація безконтактних електричних машин

Незважаючи на різноманіття БЕМ, більшість з них, як правило, основані на фізичних процесах, в тій чи іншій мірі притаманні синхронним або асинхронним машинам. Серед порівняно нових типів електродвигунів важливе місце займають безконтактні двигуни, в яких комутація обмоток здійснюється напівпровідниковими ключами за сигналами датчика положення ротора, рід збудження – магнітоелектричних від розташованих на роторі висококоерцитивних постійних магнітів [1]. Такі машини називаються безконтактними двигунами із збудженням від постійних магнітів (БДПМ), різновидом яких є вентиляльні двигуни.

У порівнянні з колекторними і асинхронними машинами БДПМ мають ряд істотних переваг:

- можливість роботи на малих обертах;
- високі регульовальні властивості, зокрема при відповідному законі управління їх використовують як крокові двигуни, при цьому момент на валу в 3-5 разів більше, ніж у крокового при тій же масі і габаритах;
- підвищена перевантажувальна здатність;
- високі динамічні характеристики;
- висока надійність, підвищений ресурс роботи;
- високі питомі енергетичні показники (відсутність втрат на збудження за рахунок застосування постійних рідкоземельних магнітів).

Безперервне зростання ролі БДПМ пояснюється швидким розвитком напівпровідникової техніки і технології виробництва постійних магнітів, тобто тих складових, поєднання яких забезпечує високий ресурс роботи, енергетичні та динамічні показники, широкі функціональні можливості і технологічність конструкції. Крім того, зростання досягнень в області створення нових магнітотвердих матеріалів, а також в галузі промислового освоєння нових силових напівпровідникових елементів і систем управління з використанням мікропроцесорів сприяє подальшому вдосконаленню цих машин в частині конструктивного виконання, підвищення питомих показників, збільшення надійності і терміну служби.

Аналіз роботи безконтактних двигунів, що працюють із збудженням від постійних магнітів показує ряд технологічних, конструктивних, енергоефективних та електротехнічних переваг:

- забезпечення високих тягово-енергетичних показників, що залежить від форми результуючого магнітного поля в повітряному зазорі, при цьому БДПМ потужністю від одиниць кіловат випускаються з розподіленою трифазною якірною обмоткою статора;

- застосування на роторі висококоерцитивних постійних магнітів зі сплавів з рідкоземельними елементами: «неодим-залізобор» (Nd-Fe-B, наприклад, Nd-30) або «самарій-кобальт» (SmCo5). Магніти такого класу володіють високими характеристиками: коерцитивна сила не менше 850 кА/м, залишкова індукція не менше 1,05 Тл. Це, в свою чергу, дозволяє отримати більший магнітний потік в робочому зазорі машини, зменшити габарити і масу активної частини двигуна;

- технологічна єдність статорів БДПМ і інформаційного каналу;

- застосування підшипникових опор з оптимізованими коефіцієнтами навантажень, що забезпечують необхідний якісний запас за рівнем гарантованого напрацювання і діапазону регулювання частоти обертання ротора;

- можливості прецизійної збірки з мінімальними допусками і забезпеченням необхідної селективності поверхонь деталей і вузлів;

- нарощування функціональної сумісності БДПМ з пристроями різного призначення (датчиком положення ротора, електромагнітною муфтою-гальмом, електровентильатором).

1.2. Конструктивні особливості електричних двигунів

1.2.1. Асинхронні електродвигуни.

Асинхронні електродвигуни були винайдені в 1889 році. В даний час випускається великий спектр електричних двигунів. З них найбільшу

популярність набув електродвигун асинхронного типу, трифазний. Половина всієї електроенергії в світі витрачається такими електродвигунами. Вони знайшли широке використання в багатьох галузях промисловості, в побуті, електроінструменті, так як мають невисоку вартість, підвищену надійність, просте обслуговування і експлуатацію.

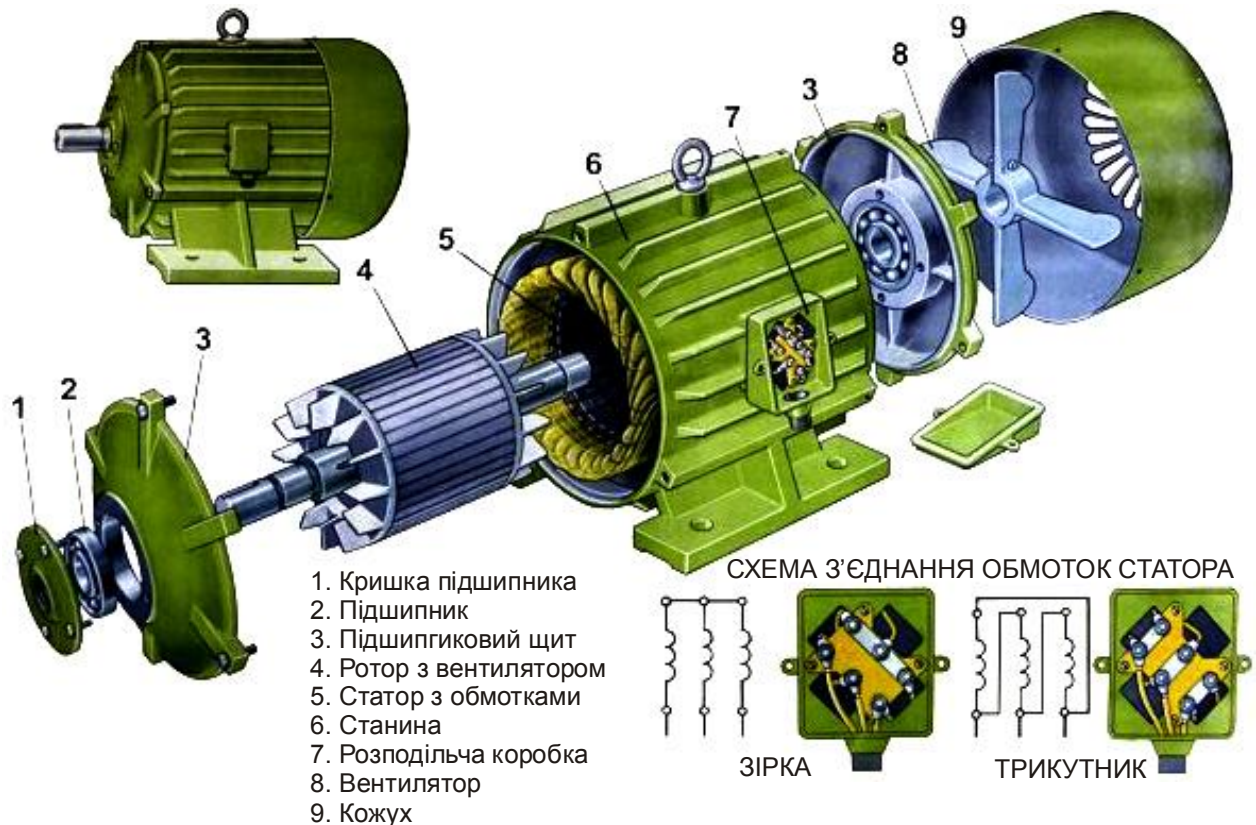


Рисунок 1.3 – Асинхронний двигун

Згідно англійських джерел двигуни такого типу називаються індукційним, адже в ньому використовується явище магнітної індукції для створення електрорушійної сили (ЕРС). Як було сказано вище, асинхронні двигуни мають механічну частоту обертання відмінну від частоти поля. Асинхронні електродвигуни складаються з ротора і статора (рис. 1.4).

Статор, складається з наступних основних частин:

Корпус. Служить для з'єднань деталей всього двигуна. У двигунів малого типорозміру корпус виготовляється суцільнолитим. Матеріалом корпусу найчастіше служить чавун, хоча використовується також алюміній або

різновиди сталі. Великі двигуни можуть конструктивно виконуватися із звареним корпусом для придання жорсткості та міцності.

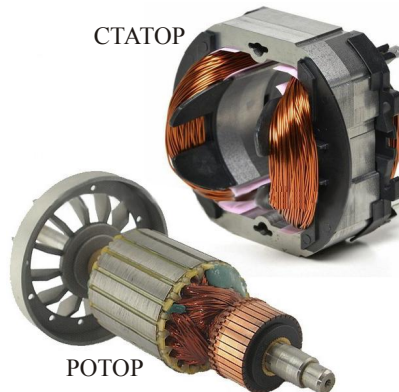


Рисунок 1.4 – Приклад конструктиву виконання ротора і статора

Сердечник. Ця деталь запресована в корпус, і призначена для підвищення магнітної індукції, виготовлена з електротехнічної сталі у вигляді пластин. Для зменшення втрат, що виникають при вихрових токах, сердечник покривається лаком.

Обмотка. Вона розташована в пазах сердечника і в більшості випадків мідна, укладена секціями які з'єднані у відповідну схему. Таким чином отримується обмотка статора, виводи якої використовуються для під'єднання напруги живлення.

Ротор – елемент двигуна, що обертається, призначений для трансформації магнітного поля в енергію руху і складається, в свою чергу, з наступних частин:

Вал. Підшипники вала знаходяться на його хвостовиках. При складанні двигуна підшипники запресовуються, фіксуються болтами до кришок корпусу.

Сердечник. Його збірку здійснюють на валу двигуна. Він складається з металевих пластин електротехнічної сталі, яка має властивість малого опору магнітного поля. Форма сердечника у вигляді циліндра використовується для укладання котушки якоря, яка називається вторинною. Вона отримує енергію від магнітного поля, що виникає навколо обмоток статора при подачі живлення.

1.2.2. Синхронні двигуни.

Синхронний електродвигун представляє собою електромашину, яка працює на змінному струмі. Як вже було сказано вище, частота обертання ротора співпадає з частотою магнітного поля. В такому випадку, механічна швидкість самого валу не залежна від навантаження. Така особливість синхронного двигуна пояснюється наявністю постійних магнітів і може бути досить корисною в багатьох областях застосування. Приклади синхронних машин представлені на рис. 1.5.

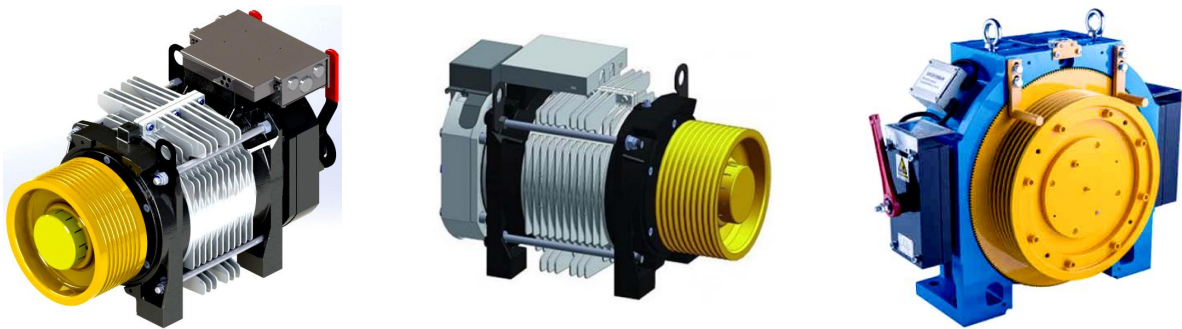


Рисунок 1.5 – Синхронний двигун

Їх поділяють на підвиди:

- реактивний;
- кроковий;
- реактивно-гістерезисний;
- на постійних магнітах;
- з обмотками збудження;
- вентильний реактивний;
- гібридно-реактивний синхронний двигун.

Синхронний двигун має наступні основні компоненти: нерухомий статор з обмотками, розміщений у корпусі (як правило міцно запресований) і рухомий ротор. Обмотка статора як вже вказувалося – мідна, хоча буває і алюмінієва (має гірші електротехнічні властивості). Статор і ротор двигуна розділені повітряним шаром, який служить ізолятором.

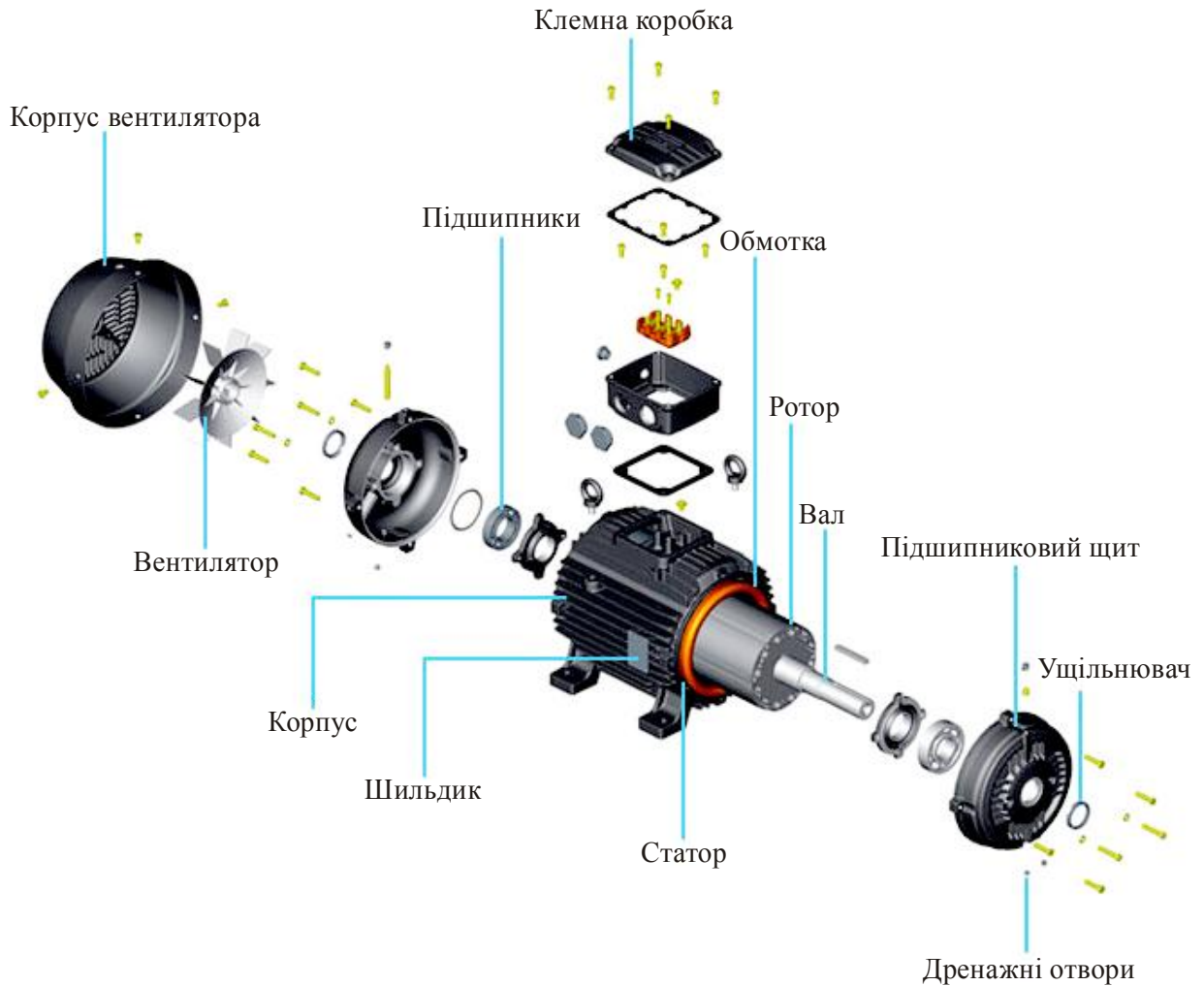


Рисунок 1.6 – Будова синхронного двигуна

Корпус. Корпус електродвигунів виготовлений з високоякісного чавуну (наприклад, марки FC-200, такої ж якості, що йде для вибухонебезпечного виконання). Корпус має стандартні ребра з покращеною тепловіддачею, що забезпечує достатнє охолодження навіть при наявності бруду на поверхні двигуна. Двигуни можуть працювати в будь-якому положенні, вертикальному і горизонтальному (за винятком парного виконання з редуктором, тоді їх положення регламентоване заводом-виробником).

Ротор являється рухомою частиною двигуна, на якій розташовані магніти високої сили, які створюють потужне постійне магнітне поле. Таким чином синхронний електродвигун має намагнічений ротор, який обертається синхронно частоті магнітного поля. Завдяки намагніченості ротора в таких двигунах забезпечується великий магнітний потік і, як наслідок, більший момент, ніж у двигунів із змінним магнітним опором. Вимогою до роторів є

знижений рівень вібрації і шуму, що досягається високоточним балансуванням, що дозволяє досягнути високої енергоефективності у всьому діапазоні регулювання швидкості. Розміри двигуна значно менше стандартного асинхронного.

Статор – нерухома частина двигуна з розташованими у ньому обмотками. Статор виконаний з високоякісної електротехнічної сталі з низькими втратами, що знижує загальні втрати і робочу температуру двигуна.

Обмотки. Найчастіше виконані з міді, підбраного діаметру і довжини, покритої високотемпературним електротехнічним лаком (наприклад, класу Н). Якісна ізоляція збільшує термін служби двигунів в умовах підвищеної вологості і надійно захищає від міжвиткових замикань та механічних пошкоджень (в тому числі внутрішніх вібрацій). Кількість обмоток статора варіюється в залежності від конструкції та необхідної кількості полюсів.

Вал. Це міцна сталевна деталь, яка передає механічне зусилля до навантаження. Як правило, це вуглецева сталь (наприклад, марок SAE/AISI 1040/45). Така сталь забезпечує високу механічну міцність, запобігає вигину вала під навантаженням і зменшує знос. Конструкція вала спеціально розроблена для роботи з високими моментами прискорення і гальмування. Робочий кінець вала може мати шліци, шпонку і т. п.

Вентилятор. Вентилятор і кришка були спроектовані для роботи з мінімальним рівнем шуму. Вентилятори забезпечують ефективне охолодження що в підсумку підвищує ККД двигуна. Вони, як правило виготовляються з легких матеріалів (поліпропілен, алюмінієві сплави, тощо).

Кожух вентилятора. Виготовлений із сталі або чавуну, рідше поліпропілен. Має велику механічну міцність та стійкістю до корозії.

Підшипники. Двигуни, як правило забезпечуються парою підшипників (рідше бронзовими або мідними втулками), розташованими на краях вала і закритими *підшипниковими щитами*. Останні виготовляються з чавуну і мають збільшену площу поверхні для кращого охолодження підшипників. Для забезпечення довгого терміну служби навіть при експлуатації в важких умовах найкраще підходять підшипники закритого типу.

Шильдик. Це табличка з нанесеною інформацією про тип і параметри двигуна, дані виробника, вагу, режими роботи, тощо. Виготовляється, як правило з алюмінію або нержавіючої сталі.

Дренажні отвори. Пластикові втулки, які забезпечують злив конденсату з двигуна.

Ущільнювач. В процесі експлуатації на деталі машин впливають різні агресивні зовнішні чинники: волога, мастила, пил, бруд, тощо. Для збільшення терміну служби і скорочення зносу підшипників електродвигуна рекомендується використовувати високоякісні віброізоляційні ущільнення. Тому деякі електродвигуни мають ущільнення у вигляді манжетів, манжетів з пружиною, тощо.

Клемна коробка. Клемна коробка виготовлена, як правило із того ж матеріалу, що і корпус самого двигуна – з чавуну. Вона має один або два різьбових отвори для під'єднання кабелів. В отворах, як правило встановлені кабельні сальники. Розташування коробки може бути зверху або збоку двигуна.

Переваги синхронних двигунів:

- стабільність частоти обертання, що не залежить від механічних навантажень на валу;
- низька чутливість до перепадів напруги;
- можуть виступати в ролі генератора;
- знижують споживання електроенергії.

Недоліки:

- складнощі з запуском;
- складність конструкції;
- труднощі в регулювання частоти обертання.

Недоліки синхронного двигуна, роблять більш вигідним для використання електродвигун асинхронного типу. Тим не менше, більшість синхронних двигунів через їх роботу з постійною швидкістю затребувані для установок в якості компресорів, генераторів, насосів, та високоточного технологічного обладнання.

1.2.3. Вентильні двигуни.

Електродвигуни, що працюють від постійного струму, зазвичай мають досить високі економічні та технічні характеристики. Єдиним серйозним недоліком є наявність щіткового механізму, який істотно знижує надійність всієї конструкції, що підвищує інерційність ротора, вибухонебезпечність двигуна, а також створює радіоперешкоди.

Тому були створені двигуни з використанням безконтактної технології, що працюють від постійного струму, які отримали назву вентильні двигуни. Створення такого нового пристрою стало можливим, завдяки появі потужних, високовольтних напівпровідникових пристроїв. Ненадійний механізм передачі струму у вигляді щіток в цій конструкції замінений комутатором на основі напівпровідникових елементів. Якір є нерухомим елементом, а на роторі закріплені постійні магніти.

Вентильні двигуни – це різновид електричних машин із магнітним збудженням. Сучасні постійні магніти можуть бути різних типів – SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ і Nd-Fe-B [1]. Переваги вентильних двигунів очевидні:

- відсутність контактів тертя; двигуни не мають вузлів для обслуговування, що підвищує ККД, тривалість роботи без втручання на процедури технічного сервісу, час напрацювання на відмову, надійність;

- висока здатність до перевантажень (має більш ніж п'ятикратний запас);

- швидкодія;

- високі енергоефективні якості; так коефіцієнт корисної дії в сучасному конструктивному виконанні сягає 93-95%, що набагато більше, наприклад, ніж у асинхронних двигунів та навіть двигунів на постійних магнітах без електронної системи керування;

- низькі холості струми, струми при робочому навантаженні та пускові струми набагато менші за аналогічні у більшості двигунів; якщо ж брати знову ж таки за порівняння асинхронні двигуни, то у них пускові струми можуть сягати значень 5-10 крат від робочих; такого ніколи не спостерігається у вентильних двигунах, адже сам принцип керування ними запобігає цьому;

- досить широкий динамічний діапазон стосовно регулюючих характеристик частот обертання;
- більш простіша схема керування відносно асинхронних частотно-регульованих електродвигунів;
- вентильні електродвигуни володіють значно кращим теплообміном, тобто мають низький рівень нагрівання в процесі експлуатації, що позитивно впливає на строк експлуатації двигуна, адже при цьому менше відвернені тепловим навантаженням мідні дроти з ізоляцією;
- досить вигідні масо-габаритні показники.

Але слід зазначити, що навіть такі досконалі двигуни мають ряд суттєвих недоліків. Так, у випадках коли сам вентильний двигун і його блок керування знаходяться на значній відстані один від одного, виникає потреба у встановленні додаткового енкодера та формування відповідних сигналів керування, які потрібно подавати на велику відстань. Таке явище може виникнути на підприємствах з важкими умовами праці відносно температури, вологості, радіації, в нафто-, газодобувних галузях, тощо.

Однак, знаючи про вказаний недолік, провідні виробники промислової електроніки та автоматики вдало поєднують властивості вентильних двигунів, нівелюючи вказану проблему розробкою надійних пристроїв позиціонування, промислових контролерів, протоколів передачі даних на великі відстані, узгоджувані інтерфейсів та інш.

Конструктивно вентильні двигуни складаються з наступних основних вузлів та компонентів (рис. 1.7):

- синхронний двигун з розташованими постійними магнітами на роторі (7, 8);
- керований комутатор (12), виконаний на вентилях, який здійснює комутацію струму в обмотці статора (5);
- датчик положення ротора (11) двигуна щодо фаз обмотки, що визначає інтервал часу і послідовність комутації фаз обмотки;
- корпус та інші корпусні елементи.



Рисунок 1.7 – Будова вентильного двигуна

В цілому вентильні двигуни включають в себе три підсистеми:

- електронну;
- механічну;
- електричну.

В результаті виходить мехатронний пристрій, який дозволяє зробити корпус більш компактним, позбутися від додаткових деталей, зайвих перетворювачів, а відповідно зробити весь привід механізму більш надійним.

Вентильний електродвигун одночасно і відрізняється від колекторного, але і містить ряд подібностей. Напруга живлення подається на спеціальну плату керування, яка в свою чергу отримує сигнали енкодера, основою якого є інтегровані в конструкцію датчики на ефекті Холла.

Ротор. На роторі встановлено в певному порядку низку постійних магнітів, забезпечуючи необхідну кількість пар полюсів. Колись це були конструкції на основі феритових структур, вони були недосконалі, мали ряд суттєвих недоліків. Тому сучасні конструкції роторів містять магніти, із рідкоземельних елементів, що мають високу магнітну здатність. Вони дають можливість отримати більшу магнітну індукцію, а також зробити ротор більш компактним.

Статор. Вентильний електродвигун зазвичай має статор, що складається з шихтованих пластин електротехнічної сталі та ідних обмоток. Як правило

число обмоток рівне трьом, однак зустрічаються конструкції з більшою кількістю обмоток.

Якщо порівнювати дві схеми з'єднання, то схема «зірки» передбачає більший момент обертання і менші показники протидії ЕРС, на відміну від схеми «трикутника». Тому «зірку» найчастіше застосовують для отримання великих крутних моментів, а «трикутник» - великих швидкостей обертання.

Датчики положення і термодатчик. Цей чутливий елемент створює зворотний зв'язок, і визначає положення ротора. Такі датчики можуть працювати за різними принципами – ефектом Холла, фотоелектричним і т. д. Вказані датчики не мають інерційності і дають можливість роботи без запізнювання при визначенні положення ротора. Вентильний двигун може обладнуватися додатковими складовими, наприклад температурними здавачами або гальмівним пристроєм. Тахогенератор використовується в разі роботи мотора в режимі стабілізації швидкості з великою точністю. Термодатчик служить для запобігання перегріву обмоток і включає в себе кілька позисторів, з'єднаних послідовно.

Контролер вентильного двигуна комутує обмотки статора таким чином, щоб у самому статорі напрямок магнітного поля був перпендикулярним напрямку поля ротора. Контролер використовує відомий і досить популярний метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для керування струмами. Також сигнали контролера забезпечують у кожен робочий такт двигуна вмикання тільки відповідної пари силових ключів.

Вентильні двигуни бувають постійного і змінного струму. Крім того, їх поділяють на види за кількістю фаз:

Однофазні. Це найбільш проста конструкція вентильних двигунів з мінімальним числом зв'язків між електронною системою і мотором. До недоліків однофазних двигунів відносяться великі пульсації, неможливість пуску при деяких положеннях ротора. Однофазні мотори широко використовуються в механізмах, де необхідна висока швидкість роботи.

Двофазні. Такі вентильні двигуни працюють в механізмах, де обов'язкова наявність зв'язку обмотки і статора. До недоліків можна віднести великий момент обертання і сильні пульсації, здатні привести до негативних наслідків.

Трифазні. Цей вид моторів використовується в багатьох галузях промисловості, а також в побутових умовах. Це найбільш поширена конструкція, в порівнянні з іншими. Трифазні двигуни вентильного типу, мають парну кількість полюсів, стали хорошим варіантом для пристроїв, де потрібне поєднання невеликої швидкості і високої потужності. Недоліками 3-фазних вентильних двигунів є високий рівень шуму.

Чотирьохфазні. У таких двигунів значно зменшений момент обертання і пульсації, що зрозуміло вплинуло на досить рідкісне їх застосування. Крім того, вони володіють високою вартістю.

Області застосування вентильних двигунів досить обширні: в багатьох галузях виробництва, наприклад, на бурових установках, в системах охолодження на хімічних заводах, на нафтових свердловинах у побутових пристроях (пральні машини).

Переваги:

- невеликі втрати енергії, завдяки малому магнітному опору;
- високий рівень безпеки при роботі на максимальних навантаженнях;
- широкий інтервал робочих швидкостей;
- висока точність роботи і динаміка;
- плавне регулювання швидкостей;
- відсутність механічного вузла передачі струму у вигляді щіткового механізму, який часто виходить з ладу і потребує заміни;
- можливість експлуатації в середовищах з важкими режимами;
- тривалий експлуатації та напрацювання на відмову;
- підвищена надійність.

Недоліки:

- складність керування;
- високий показник шуму;

- підвищена вартість, через наявність інтегрованих електронних та силових компонентів. Однак даний недолік на сьогоднішній момент можна вважати не суттєвим, адже у технологічних процесах майже всі двигуни керуються частотними перетворювачами. І наявність власного вузла керування вже не викликає сумнівів.

1.2.4. Синхронні реактивні двигуни

У синхронних реактивних електродвигунах сам підхід до створення його моменту обертання дещо відрізняється від асинхронних і традиційних синхронних двигунів. Тут конструктивною особливістю є саме сердечник ротора, виконаний за “хитрою” технологією.

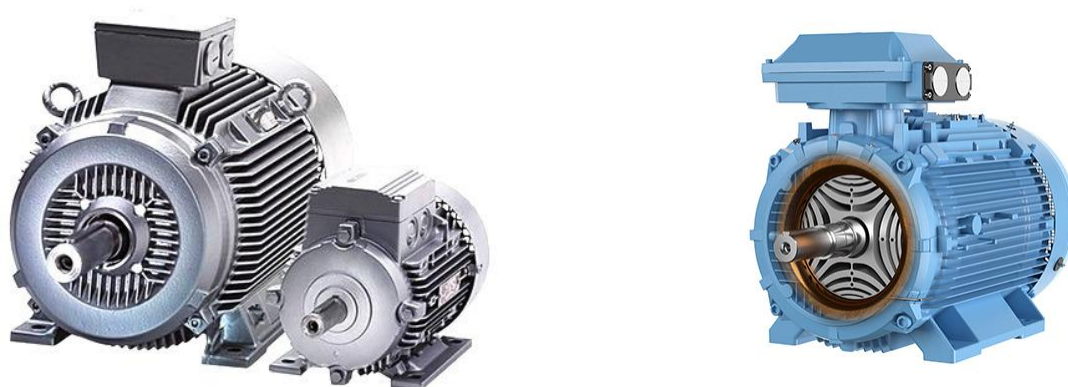
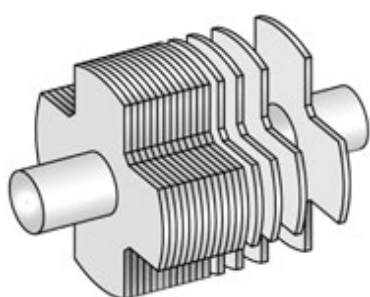


Рисунок 1.8 – Синхронний реактивний двигун

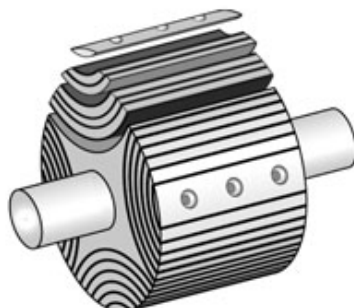
На злам усіх стереотипів ротор цієї електричної машини не має ані основних, ані короткозамкнених обмоток. Конструктивно сердечник ротора зроблений максимально неоднорідним за магнітною провідністю: магнітна провідність вздовж ротора відрізняється від магнітної провідності в поперечному напрямку. Завдяки нетрадиційному підходу конструювання електродвигунів, відпадає необхідність в самих обмотках ротора. Крім того, стають непотрібними постійні магніти. Що стосується статора, то його обмотка може бути зосередженою або розподіленою. Сердечник статора при цьому може залишатися незмінним.

Вся особливість – в сильно неоднорідному осерді ротора.

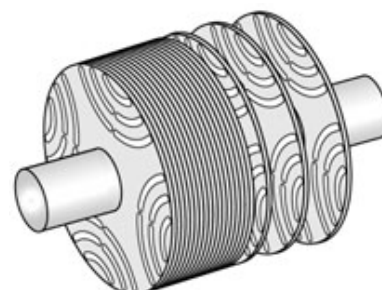
Для реактивних синхронних двигунів характерні три основні типи роторів: поперечно-розшарований ротор, ротор з явно вираженими полюсами і аксіально-розшарований ротор.



Ротор з явно вираженими
полюсами



Аксіально-
відшарований ротор



Поперечно-відшарований
ротор

Рисунок 1.9 – Конструкція ротора синхронного реактивного двигуна

Відновлений інтерес до синхронних реактивних електродвигунів пов'язаний перш за все з широкими можливостями сучасного комп'ютерного моделювання, що дозволяє знаходити найбільш ефективні версії конструкцій роторів і статорів – наукові дослідження виходять більш продуктивними і ККД сучасних версій синхронних реактивних двигунів вже досягає 98%, в той час як для асинхронних версій ККД традиційно не перевищує 90%.

Синхронні реактивні двигуни виготовляють сьогодні на базі асинхронних, і при тих же габаритах і установочно-приєднувальних розмірах виходить більш високий ККД, досягається більш висока питома потужність.

Переваги:

1) проста і надійна конструкція ротора: ротор має просту конструкцію, що складається з тонколистової електротехнічної сталі, без магнітів і короткозамкненої обмотки;

2) низький рівень нагрівання: так як в роторі відсутні струми, він не нагрівається під час роботи, збільшуючи термін служби електродвигуна;

3) немає потреби у магнітах: знижується кінцева ціна електродвигуна, так як при виробництві не використовуються рідкоземельні метали. При відсутності магнітних сил спрощується будова і технічне обслуговування електродвигуна;

4) низький момент інерції ротора: так як на роторі відсутня обмотка і магніти, його маса нижча і момент інерції ротора нижче, що дозволяє електродвигуну швидше набирати оберти і економити електроенергію;

5) можливість регулювання швидкості: з огляду на те, що синхронний реактивний електродвигун для своєї роботи вимагає наявності частотного перетворювача, є можливість управління швидкістю обертання реактивного двигуна в широкому діапазоні швидкостей.

Недоліки:

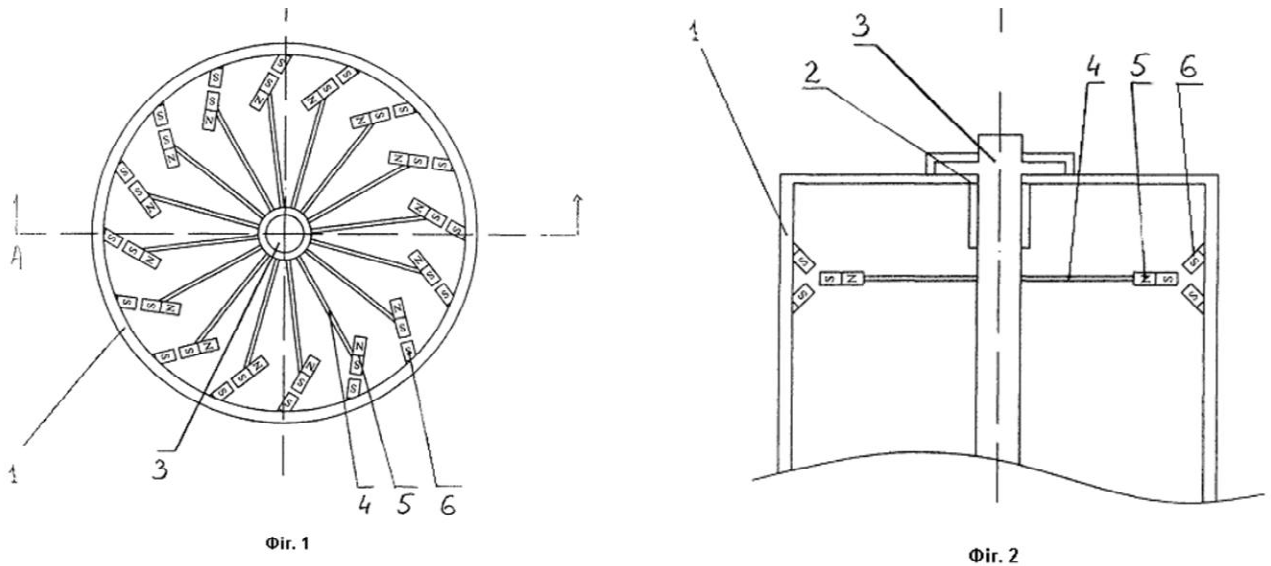
1) електронне керування: як вже пояснювалося вище, сьогодні це вже не являється недоліком, враховуючи доступність і вартість сучасних частотних перетворювачів; крім того, більшість систем керування вже містять частотний перетворювач за замовчуванням);

2) низький коефіцієнт потужності: через те, що магнітний потік створюється тільки за рахунок реактивного струму. Вирішується за рахунок використання частотного перетворювача (ЧП) з активною корекцією коефіцієнта потужності.

1.3. Патентний пошук

Даний розділ був би неповноцінним без патентного пошуку за основною тематикою. Пошук серед патентних баз даних виявив надзвичайно великий об'єм розробок, що стосуються електричних машин. Причому це і асинхронні і синхронні машини, і двигуни із збудженням від постійних магнітів. Пошук здійснювався в Україні (Укрпатент) та закордоном (IEEE).

Серед українських розробників хотілося би відмітити кілька робіт. Це магнітний двигун Пустовалова UA 18140, u200606808 (рис. 1.10) та Магнітний двигун у патенті UA 24099, u200611537.

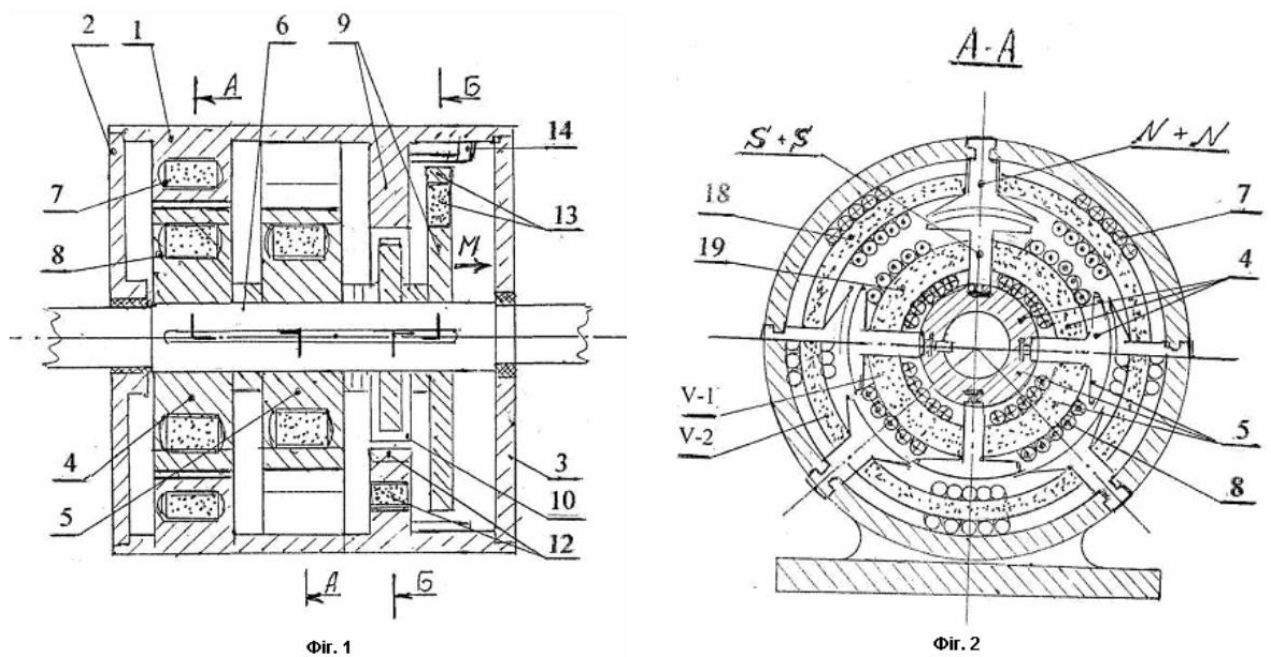


Фиг. 1

Фиг. 2

Рисунок 1.10 – Магнітний двигун Пустовалова

1 – циліндричний корпус; 2 – опора; 3 – вал; 4 – кронштейни; 5 – постійні магніти ; 6 – постійні магніти



Фиг. 1

Фиг. 2

Рисунок 1.11 – Магнітний двигун

1 – статор; 2, 3 – кришки; 4, 5, 9 – ротори; 6 – вал; 7, 8 – обмотки; 10, 11, 14, 15 – провідники; 12, 13 – пари полюсів; 13 – ; 16, 17 – постійні магніти; 18, 19 – шихтовані осердя із феромагнітних матеріалів

Дані розробки виділяються оригінальністю самої ідеї та конструкції.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. В даному розділі здійснено аналіз науково-технічної та патентної інформації стосовно основної тематики дослідження – електродвигунів. Здійснено акцент на синхронні двигуни із збудженням на постійних магнітах.

2. Приведено оригінальні класифікації електродвигунів та зокрема безконтактних електричних машин. Вказано на місце досліджуваних синхронних електродвигунів із збудженням на постійних магнітах та їх підвиди в загальній системі класифікації.

3. Розглянуто будову та принцип дії асинхронних електричних машин, синхронних, та їх різновиду – вентильних електродвигунів. Із наведеного матеріалу стає зрозумілим, що синхронні електродвигуни на постійних магнітах дозволяють досягнути невеликих масо-габаритних показників при підвищених значеннях потужності, енергоефективності, екологічності, стабільність частоти обертання, низької чутливості до перепадів напруги тощо.

4. Приведено аналіз вітчизняної бази патентних матеріалів. Вказується на досить високу популярність різноманітних електричних машин, в тому числі електродвигунів із збудженням на постійних магнітах.

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ

2.1. Загальна теплова модель електродвигуна.

При аналізі роботи електричних машин використовують відношення потужності або моменту до маси двигуна. Для виведення математичного виразу застосовують відоме трактування електромагнітних процесів через дотичну питому силу, прикладену до поверхні ротора двигуна [2]. Масо-габаритні показники визначають за технічними параметрами двигуна. Результат моделювання описує електромеханічну ефективність роботи електричної машини. Слід також зазначити, що при однакових масо-габаритних показниках різних електричних машин їх електромеханічна ефективність буде більше при максимальних навантаженнях, коли машини працюють при більших значеннях струмів, напруг, магнітної індукції. Адже ці фактори інтегрально пов'язані з електричними та магнітними втратами в електродвигуні. Відомо, що основні електричні та магнітні втрати в роторі двигунів на постійних магнітах відсутні. Крім цього, сучасні рідкоземельні постійні магніти (так звані неодимові, NdFeB) можуть забезпечити максимальний рівень індукції в повітряному зазорі на рівні асинхронних машин, тобто порядку 0,6-0,8 Тл. Таким чином, за умови збереження сумарних втрат на одному рівні в синхронних двигунах на постійних магнітах (СДПМ) може бути підвищене лінійне навантаження, що і пояснює більш високу електромеханічну ефективність даних двигунів в порівнянні з іншими існуючими електричними машинами змінного струму.

Сумарну величину теплових втрат в вузлах синхронного двигуна на постійних магнітах можна оцінити через тепловий потік [2]. І ця величина теплового потоку від будь-якого існуючого фізичного тіла являється універсальним показником якості, який вказує на енергетику і здатність пристрою чи вузла відпрацювати необхідний ресурс. Фактичні значення температури у вузлах безконтактного двигуна і їх відносна різниця з відповідними гранично допустимими значеннями є показником оптимальності спроектованого

електродвигуна. При цьому повинно виконуватися наступне критеріальне співвідношення:

$$\frac{T_{imax} - T_i}{T_{imax}} \leq 1 - C_0, \quad (2.1)$$

T_{imax} – гранично допустиме значення температури вузла (області) двигуна;

T_i – значення температури відповідного вузла;

C_0 – рекомендований запас, обумовлений певним інженерним досвідом побудови електричних машин.

Вибір конструкції, типу і параметрів обмоток, магнітної системи в цілому, повинні здійснюватися не тільки на підставі основних технічних параметрів (наприклад, заданих у ТЗ), але і з врахуванням теплових режимів електродвигуна (величини теплових втрат).

Методика теплового розрахунку електродвигуна, як правило, побудована на основі рішень рівнянь теплопровідності [2, 3]. Оскільки втрати енергії виділяються всередині елементів конструкції двигуна, поле його температури є полем з внутрішніми джерелами тепла, і рівняння теплопровідності, яке описує це поле є неоднорідним [3].

Для виведення диференціального рівняння теплопровідності необхідно скористатися відомим законом збереження енергії [2, 3], і який в даній ситуації має вигляд: кількість теплоти dQ , що надходить у систему із-зовні за деякий проміжок часу $d\tau$ внаслідок теплопровідності, рівний зміні градієнту енергії або ентальпії речовини, що міститься в елементарному об'ємі:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (2.2)$$

де dQ_1 – кількість теплоти, що потрапляє із зовні в елементарний об'єм через теплопровідність системи за час $d\tau$,

dQ_2 – кількість теплоти, що буде виділятися в елементарному об'ємі dV за час $d\tau$ через вплив внутрішніх джерел;

dQ – зміна внутрішньої енергії за час певний проміжок часу $d\tau$, в елементарному об'ємі dV .

Кількість теплоти dQ_1 , що надходить у систему об'ємом dV за рахунок теплопровідності із (2.2) визначається так:

$$dQ_1 = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz d\tau, \quad (2.3)$$

Поширення теплових потоків в загальному випадку в одиничному об'ємі приведено на рис. 2.1.

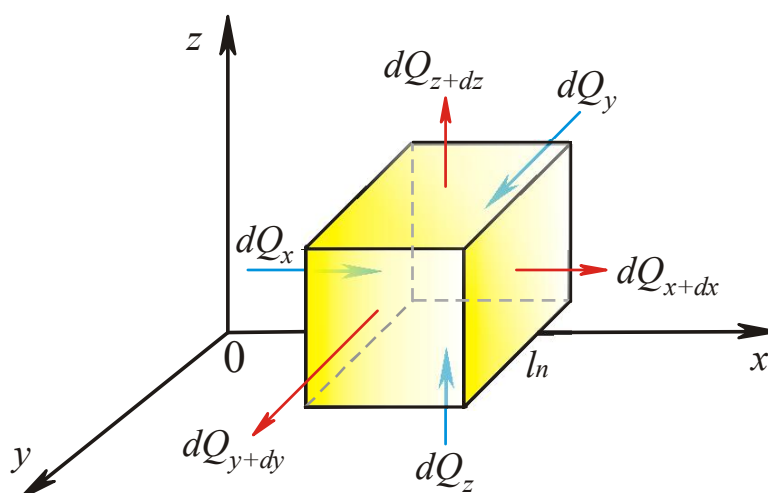


Рисунок 2.1 – Об'ємний розподіл теплових потоків

Кількість теплоти dQ_2 із рівняння (2.2):

$$dQ_2 = q_V d\vartheta d\tau, \quad (2.4)$$

де q_V – потужність внутрішніх джерел теплоти, $[Bm/m^3]$.

І, нарешті, зміна внутрішньої енергії dQ із рівняння (2.2):

$$dQ = C_V \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau d\vartheta = c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau d\vartheta, \quad (2.5)$$

де C_V – теплоємність одиниці об'єму, $[Дж/(м^3 \cdot K)]$; c_V – теплоємність одиниці маси, $[Дж/(кг \cdot K)]$; ρ – щільність речовини, $[кг \cdot м^3]$.

$$c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right), \quad (2.6)$$

$$c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \operatorname{div} \vec{q} + q_V. \quad (2.7)$$

Для функції $u(x, y, z, t)$ трьох просторових змінних (x, y, z) і часу t , рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\xi \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (2.8)$$

Для довільної системи координат:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \xi \nabla^2 u = 0, \quad (2.9)$$

де ξ – додатна константа, ∇^2 – оператор Лапласа.

Із врахуванням динаміки процесу поширення теплоти, у виразі для щільності теплового потоку Фур'є з'являється додатковий член:

$$\vec{q} = -\sigma_t \operatorname{grad}(t) - \tau_r \frac{\partial \vec{q}}{\partial \tau} \quad (2.10)$$

де σ_t – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $[Вт/(м \cdot K)]$.

Основним недоліком такого підходу для аналізу поля температури є невизначеність при виборі коефіцієнтів теплопровідності вузлів електродвигуна і значень коефіцієнтів теплопередачі. З метою уточнення цих параметрів розрахунок виконується на основі застосування законів теплопровідності, а величини коефіцієнтів теплопровідності і теплообміну визначаються

експериментально на модельних установках. При цьому доводиться оперувати поняттями середніх величин коефіцієнтів теплопровідності і теплообміну, що відносяться до двигунів в цілому, або до великих конструктивних вузлів [4].

Основний закон теплопровідності встановлює кількість тепла, що проходить через поверхню dF за час $d\tau$ в залежності від $grad$ і властивостей матеріалу – встановлений емпірично. Якщо $d\bar{q}/d\tau = 0$ виразу (2.10), то:

$$\bar{q} = -\sigma_t grad(t), \quad (2.11)$$

Або інакше, повна потужність втрат тепла:

$$P = -\sigma_t \frac{S \Delta t}{l_n} \quad (2.12)$$

де S – площа перетину паралелепіпеда, Δt – різниця температур, l_n – лінійні розміри об'єкта охолодження.

Градiєнт температури – це вектор, спрямованим по нормалі до ізотермічної поверхні, а отже:

$$grad(t) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta t}{\Delta n} \right| \quad (2.13)$$

Розглянемо характер зміни температури по товщині стінки і тепловий потік через стінку. Нескінченно велика плоска стінка товщиною l і теплопровідністю σ передає тепло при постійних температурах на границі t_1 і t_2 (граничні умови):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \xi \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (2.14)$$

При розглянутих умовах теплота може поширюватися тільки вздовж осі x і температурне поле буде одновимірним:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \quad (2.15)$$

Після інтегрування виразу (1.14) та підстановок t_1 і t_2 , отримаємо рівняння температурного поля:

$$t = \frac{t_2 - t_1}{l_{t_2}} \cdot x + t_1 \quad (2.16)$$

де l_{t_2} – товщина стінки з боку температури t_2 .

Щільність теплового потоку через плоску стінку:

$$q = -\sigma_t \frac{dt}{dx} = \frac{\sigma_t(t_1 - t_2)}{l} = \frac{t_1 - t_2}{R_t}, \quad (2.17)$$

$$R_t = \frac{l}{\sigma_t}.$$

де R_t – термічний опір плоскої стінки.

Подальше рішення зводиться до розгляду теплової схеми заміщення, де використовується аналогія із законом Ома для електричного кола. Термічні опори вилучаються із простих геометричних фігур, на які можна розбити весь аналізований об'єм електричного двигуна.

Зв'язок коефіцієнта теплопровідності σ_t з питомою електричною провідністю σ_e в металах встановлює закон Відемана-Франца:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_e} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 T, \quad (2.18)$$

де k – постійна Больцмана;

e – заряд електрона;

T – абсолютна температура.

2.2. Динамічна теплова модель електродвигуна.

Відносно питань теплового аналізу, електродвигун являє собою складну та неоднорідну систему із розосередженими внутрішніми джерелами тепла. Їх інтенсивність досить сильно залежатиме від таких параметрів, як матеріал виконання (сталь, бронза, мідь), режим роботи, тепловіддачі, тощо. Тома досить часто при спрощеному аналізі допускають однорідність моделі, матеріал якої має постійну теплоємність [4]. На початковій стадії моделювання такі припущення можна допустити. Але в серйозних детальних розрахунках або в реальних умовах експлуатації потрібно враховувати всі фактори по максимуму (прагнучи мінімізувати розбіжності між створеною моделлю і реальністю).

Із закону збереження енергії слідує, що кількість теплоти, витрачена тілами з більш високою температурою, буде дорівнювати кількості теплоти, отриманій тілами з більш низькими температурами. Рівняння теплового балансу (для замкненої системи):

$$|Q_e| = |Q_{omp.}| \quad (2.19)$$

де Q_e – кількість теплоти віддана “гарячими” тілами;

$Q_{omp.}$ – кількість теплоти отримана “холодними” тілами.

Або інакше, в нашому випадку:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0 \quad (2.20)$$

де Q_1, Q_2, Q_2, Q_n – кількість теплоти віддана обмоткою, ротором, статором, корпусом, і т. д.

Враховуючи все вище сказане, наведемо рівняння теплового балансу для деякого інтервалу часу dt :

$$\Delta Q dt = \alpha \tau dt + C d\tau \quad (2.21)$$

$$\tau = t_\theta - t_{zc}$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

τ – різниця температури двигуна t_0 і зовнішнього середовища t_{3c} ;

C – теплоємність.

Розділивши обидві частини рівняння на αdt , отримаємо:

$$\frac{\Delta Q}{\alpha} = \tau + \frac{C}{\alpha} \frac{d\tau}{dt} \quad (2.22)$$

або

$$\tau + T_T \frac{d\tau}{dt} = \tau_\kappa \quad (2.23)$$

де $T_T = C/\alpha$ – теплова постійна часу;

$\tau_\kappa = \Delta Q/\alpha$ – кінцеве (встановлене) значення температури.

При накопиченні теплової енергії, змінна, яка характеризує її запас, має експоненціальний закон, і являється рішенням (2.23):

$$\tau = (\tau_n - \tau_\kappa) e^{-t/T_T} + \tau_\kappa \quad (2.24)$$

де τ_n – початкове значення температури.

Рівняння (2.23) дозволяє представити динамічну теплову модель двигуна у вигляді передавальної функції:

$$W(p) = \frac{\tau(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{1/\alpha}{T_T p + 1} \quad (2.25)$$

Відзначимо, що постійна часу T_T , взагалі кажучи, непостійна: в початковій частині нагріву, коли гріються лише активні частини, головним чином мідь обмоток, і тепло не встигає розповсюдитися по всьому тілу електродвигуна, процес йде швидше, ніж за (2.24) – пунктир на рис. 2.2.

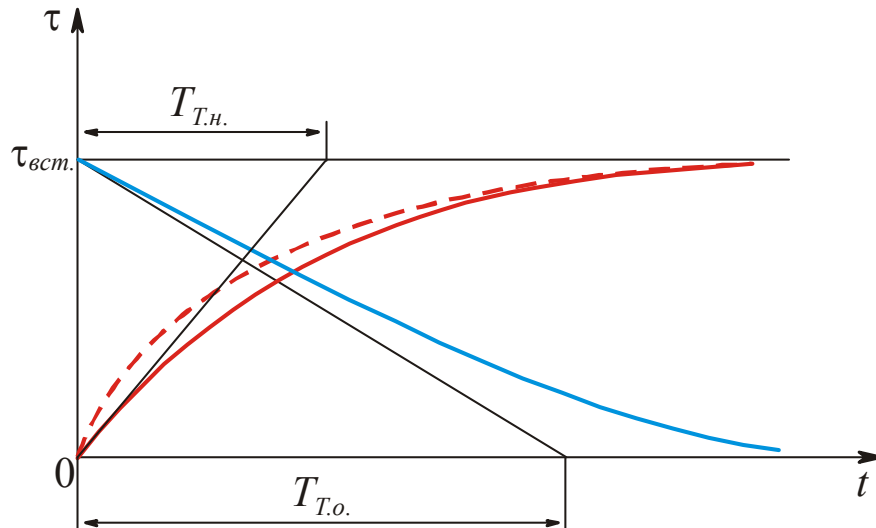


Рисунок 2.2 – Характеристики нагрівання-охолодження електродвигуна

$T_{Т.н.}$ – теплова постійна часу нагрівання; $T_{Т.о.}$ – теплова постійна часу охолодження

Для двигунів із самовентиляцією (за рахунок власного вентилятора), тепловіддача залежить від швидкості обертання, причому різниця може бути більше, ніж у 2 рази.

Як бачимо двигун реагує на швидкі зміни втрат, а реакція спостерігається на експоненціальних відрізках з достатньо тривалими постійними часу (хвилини, або навіть години для великих розмірів). В усталеному режимі ($d\tau/dt=0$) за (2.23) маємо:

$$\tau = \frac{\Delta Q}{\alpha}; \quad (2.26)$$

в номінальному режимі:

$$\tau = \frac{\Delta Q_H}{\alpha}; \quad (2.27)$$

Згідно загальноприйнятих у ДСТУ положень, розглянемо існуючі режими роботи електричних машин [5].

1. *Тривалий режим S1:*

$$t_p > 3T_{Т.н.} \quad (2.28)$$

тобто, за час роботи t_p температура перегріву досягає усталеного значення (рис. 2.3, а), тривалість паузи немає істотного значення.

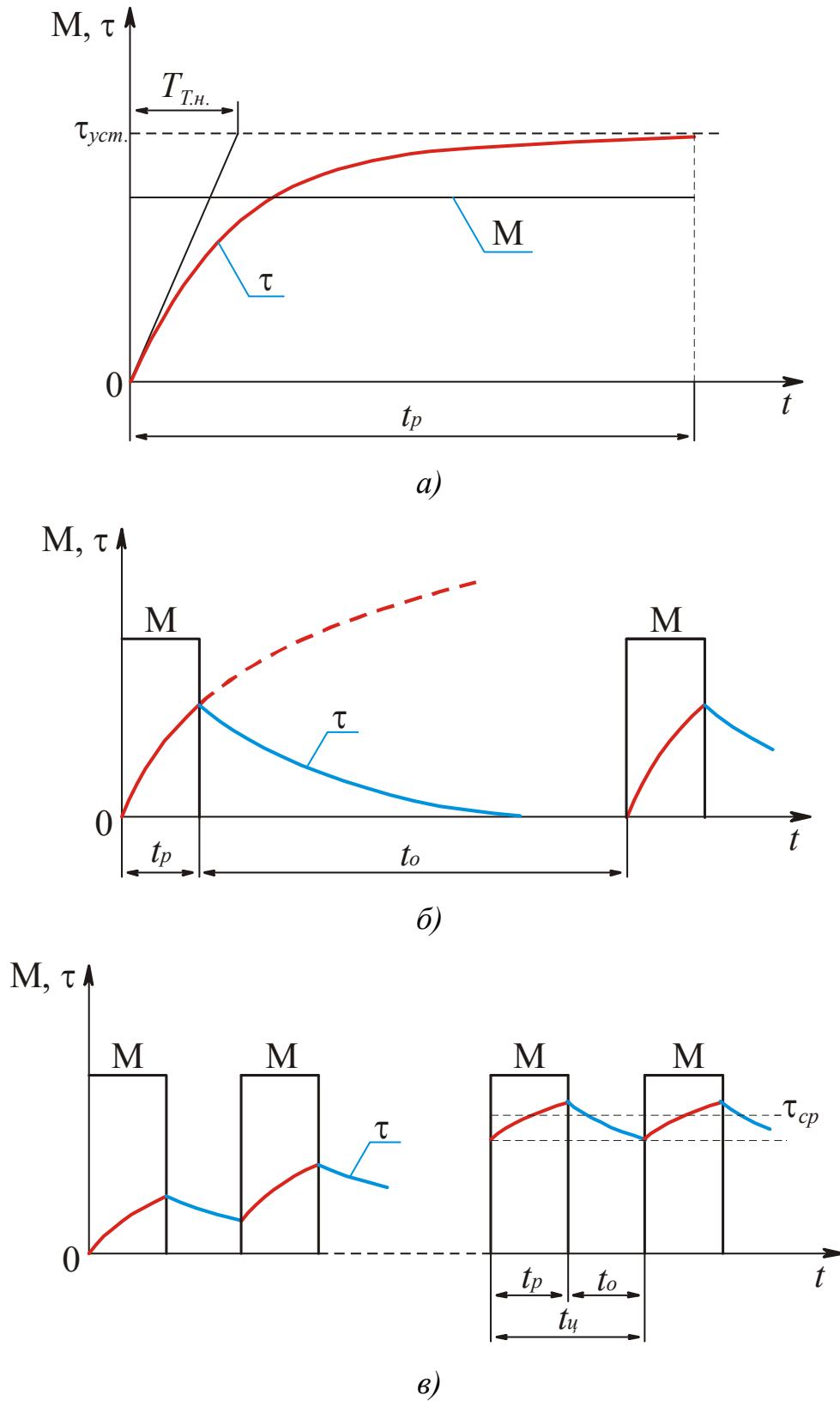


Рисунок 2.3 – Діаграми тривалого S1 (а), короткочасного S2 (б) і повторно-короткочасного S3 (в) режимів роботи електродвигуна

2. Короткочасний режим S2:

$$\begin{aligned} t_p &\ll 3T_{T.n.} \\ t_o &> 3T_{T.o.} \end{aligned} \quad (2.29)$$

тобто, за робочий цикл перегрів не встигає досягнути усталених параметрів, а протягом паузи t_o відбувається охолодження конструкції до температури зовнішнього середовища (рис. 2.3, б).

3. Повторно-короткочасний режим S3:

$$\begin{aligned} t_p &\ll 3T_{T.n.} \\ t_o &\ll 3T_{T.o.} \end{aligned} \quad (2.30)$$

тобто, за час роботи t_p перегрів досягає $\tau_{уст.}$, а за час паузи t_o не становиться рівним нулю, а має деяке залишкове значення. При достатньо тривалому повторюванню циклів процес встановлюється, а температура на початку циклу і в кінці однакова та її коливання відбуваються в околиці деякого середнього рівня $\tau_{ср.}$ (рис. 2.3, в).

Слід нагадати, що згідно ДСТУ 52776-2007 (МЕК 60034-1-2004), машини електричні обертові передбачено 10 номінальних режимів для електродвигунів, які позначаються як S1- S10:

S1 – тривалий режим роботи електродвигуна;

S2 – короткочасний режим роботи електродвигуна;

S3 – періодичний повторно-короткочасний режим роботи електродвигуна;

S4 – повторно-короткочасний режим роботи електродвигуна з впливом пускових процесів;

S5 – повторно-короткочасний режим роботи електродвигуна з електричним гальмуванням і впливом пускових процесів;

S6 – перемежуючий режим роботи електродвигуна – послідовність циклів;

S7 – перемежуючий режим роботи електродвигуна з впливом пускових струмів і електричним гальмуванням;

S8 – періодичний перемежуючий режим роботи електродвигуна з періодично змінною частотою обертання;

S9 – режим роботи електродвигуна з неперіодичними змінами навантаження і частоти обертання;

S10 – режим роботи електродвигуна з дискретними постійними навантаженнями і частотами обертання.

Серед розглянутих вище режимів роботи електродвигунів найбільший інтерес представляють тривалий S1 і повторно-короткочасний S3 режими (це основні режими, а інші введені як варіації основних і є доповняльними). Тривалий режим характеризується важкими умовами експлуатації, як у плані електротехнічних властивостей, так і у тепловому сенсі.

Що стосується повторно-короткочасного режиму, то він, звичайно, більш кращий стосовно теплових характеристик, але може бути досить важким відносно стартових струмів, перехідних процесів, особливо при коротких циклах роботи.

2.3. Тривалий режим S1 роботи електродвигуна

Раніше зазначалося, що номінальний режим роботи двигуна обумовлений в основному допустимим температурним режимом ізоляції його обмоток. Перевищення навантаження двигуна зверх номіналу призводить до зростання температури обмоток понад допустимої межі, що веде до їх передчасної деградації і, отже, скорочення терміну служби двигунів, який при номінальному навантаженні становить 15-20 років.

Роботу двигуна у режимі S1 можна представити у 2 варіантах:

1. Безпосередньо тривалий режим, при якому електродвигун годинами, днями, місяцями і не вимикається, працює з постійним і невеликим навантаженням, при цьому всі його параметри (потужність, момент,

температура) досягнули номінальних значень, знаходяться у допустимих межах і при яких він може працювати необмежено тривалий час (рис. 2.4):

$$P_{ном.} < P_{доп.}; \quad M_{ном.} < M_{доп.}; \quad \tau_{ном.} < \tau_{доп.} \quad (2.31)$$

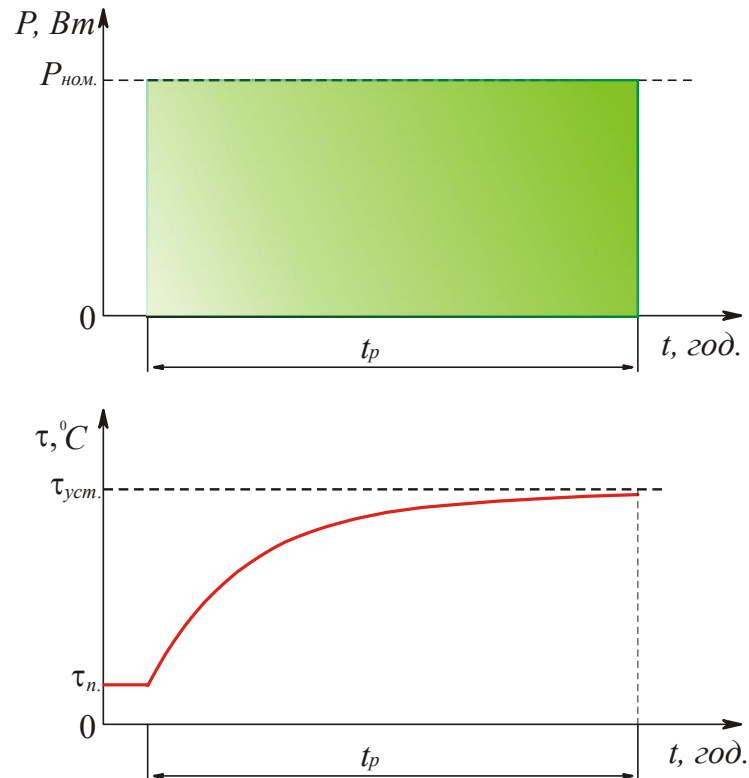


Рисунок 2.4 – Ідеалізована діаграма тривалого режиму S1 роботи електродвигуна

2. При змінному навантаженні весь час має місце несталий тепловий процес, так як в різні інтервали часу виникають відповідно й різні втрати потужності в двигуні. Форма одержуваної при цьому кривої теплового процесу для конкретного інтервалу часу буде різною, але температурні значення будуть мати флуктуації в околиці (рис. 2.5).

Перший варіант ідеалізований, як робота на холостому ході або при дуже малих і незмінних навантаженнях. Другий варіант більш наближений до реальності, так як при реальних навантаженнях, особливо коли вони знаходяться у межах $0,5P_{ном.} < P_{роб.} < P_{ном.}$ будуть мати місце флуктуації усіх параметрів в деяких межах.

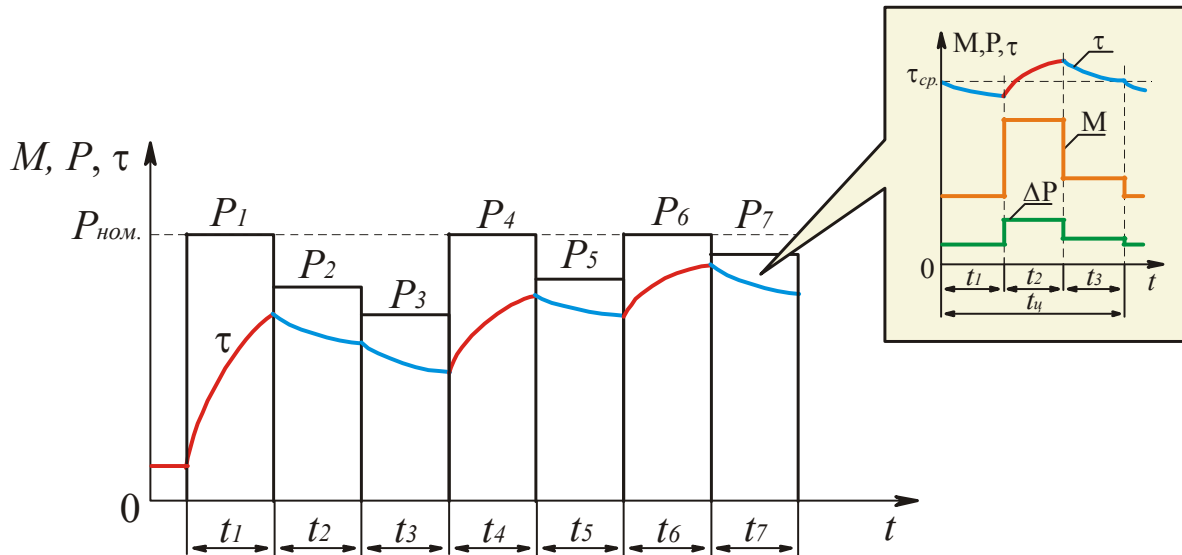


Рисунок 2.5 – Діаграми тривалого режиму S1 роботи електродвигуна

За відомими електро-механічними та температурними параметрами двигуна будується відповідний графік $\tau(t)$ та оцінюється стан реального перегріву, в порівнянні з допустимим рівнем (рис. 2.4). Але насправді в реальних умовах ми маємо більш складний режим (рис. 2.5), тому скористаємось методами, основаними на непрямій оцінці перегріву. Розглянемо так званий метод середніх втрат, для чого звернемося до змінних режимів навантаження S6, S7 або S8.

Змоделюємо усталений цикл, тобто ситуацію при якій процеси теплообміну в двигуні вже встановилися. Такий режим характерний рівністю температур на початковій та кінцевій стадіях циклу, а протягом циклу τ змінюється близько середнього рівня $\tau_{нор}$. Такий усталений режим означає, рівність кількості тепла на початку циклу з кількістю тепла в кінці циклу. Це означає, що все тепло, яке виділилася за цикл, відводиться в навколишнє середовище, тобто

$$\int_0^{t_u} \Delta P(t) dt = \alpha \tau_{cp} t_u \quad (2.32)$$

Рівняння (2.32), що виражає закон збереження енергії в інтегральній формі, можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{\int_0^{t_u} \Delta P(t) dt}{t_u} = \alpha \tau_{cp}. \quad (2.33)$$

або, очевидно,

$$\Delta P_{cp.} = \alpha \tau_{cp}. \quad (2.34)$$

тобто середня за цикл потужність втрат пропорційна середній температурі перегріву.

Для номінального режиму, маємо:

$$\Delta P_n = \alpha \tau_n \quad (2.35)$$

де ΔP_n – номінальна потужність втрат.

$$\Delta P_n = \frac{P_n(1 - \eta_n)}{\eta_n} \quad (2.36)$$

де P_n – номінальна потужність двигуна;

η_n – номінальний ККД двигуна;

$\tau_n = \tau_{дон.}$ – номінальна (допустима) температура перегріву двигуна.

Порівнюючи (2.34) і (2.35), легко прийти до формулювання методу середніх втрат: якщо середня за цикл потужність втрат не перевищує номінальну потужність втрат, тобто

$$\Delta P_{cp.} \leq \Delta P_n, \quad (2.37)$$

то середня температура перегріву не перевищує допустиму

$$\tau_{cp.} \leq \tau_n = \tau_{дон.}, \quad (2.38)$$

Враховуючи реальну навантажувальну діаграму електродвигуна, представлену на рис. 2.5, для кожного рівня навантаження двигуна (на кожній ділянці діаграми) обчислимо потужність $P_i = M_i \omega_i$ за кривою $\eta (P/P_n)$, визначимо значення ККД η_i і знайдемо втрати:

$$\Delta P_i = \frac{P_i(1-\eta_i)}{\eta_i} \quad (2.39)$$

Потім обчислимо середні втрати:

$$\Delta P_{cp.} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.40)$$

Прийнявши кількість ітерацій в розрахунках рівною n (наприклад, на рис. 2.5 $n=3$), можна розрахувати середню за цикл потужність втрат і порівняти їх з ΔP_n . Логічним буде вважати, якщо $\Delta P_{cp.} \leq \Delta P_n$, тепловий режим електродвигуна обраний правильно. Якщо при зіставленні середніх втрат за цикл з номінальними втратами виявиться, що $\Delta P_{cp.} > \Delta P_n$, то двигун буде перегріватися, що неприпустимо. І, навпаки, при $\Delta P_{cp.} \ll \Delta P_n$ – електродвигун вважатиметься недовантаженим за тепловим режимом (а отже і за потужністю), що буде свідчити про його низький коефіцієнт використання.

Перевага метод середніх втрат в тому, що він дозволяє здійснювати аналіз середніх значень перегріву, без формування залежності $\tau(t)$. Дійсні значення температури мають деякі флуктуації від середнього значення, однак, коли задовольняється умова

$$t_u \ll T_{т.н.}, \quad (2.41)$$

то різниця результату мінімальна і нею можна знехтувати.

У розглянутому метод середніх втрат бажано мати залежності ККД двигуна на графіках навантаження, що представляє певну незручність даного методу. Однак маючи побудову залежностей струму, можна здійснити тепловий аналіз двигуна, скориставшись методом еквівалентного струму. Так втрати в двигуні представляються сумою постійних втрат k , що не залежать від навантаження, і змінних I^2R , які повністю будуть визначатися навантаженням.

Можна ввести поняття еквівалентного незмінного струму, рівень втрат якого можна оцінити середнім значенням (навантаження $\rightarrow var$):

$$\Delta P_{cp.} = k + I_{екв.}^2 R \quad (2.42)$$

Тоді середня потужність втрат за цикл при змінному графіку навантаження двигуна і тривалому режимі роботи:

$$\Delta P_{cp.} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (2.43)$$

Виразивши втрати на кожній з ділянок графіка ΔP_i через постійну і змінну складові та, замінивши середні втрати їх значеннями через еквівалентні струми, отримаємо:

$$k + I_{екв.}^2 R = \frac{(k + I_1^2 R)t_1 + (k + I_2^2 R)t_2 + \dots + (k + I_n^2 R)t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (2.44)$$

Продовжимо розрахунки:

$$k + I_{екв.}^2 R = \frac{k(t_1 + t_2 + \dots + t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} + \frac{R(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \quad (2.45)$$

одержимо еквівалентний струм:

$$I_{екв.} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (2.46)$$

Або інакше:

$$I_{екв.} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \int_0^{t_y} i^2(t) dt}. \quad (2.47)$$

Одержаний еквівалентний струм співставляється з номінальним струмом обраного двигуна та у випадку $I_{екв.} \leq I_n$, маємо повне задовільнення вимогам до теплового розрахунку.

Здійснюючи розрахунки теплового поля метод середніх втрат, можна провести аналогію для аналізу моменту електродвигуна:

$$M_{екв.} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (2.48)$$

Величина еквівалентного моменту порівнюється з номінальним моментом, і якщо $M_{екв.} \leq M_n$, то двигун задовольняє тепловим вимогам.

Таку саму операцію можна провести відносно еквівалентної потужності:

$$P_{екв.} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (2.49)$$

Далі отримані значення порівнюються з номінальною потужністю електродвигуна та перевіряються на виконання умови $P_{екв.} \leq P_n$.

Однак даний метод також має ряд недоліків. У випадках, коли $k \neq const$ (наприклад, коли асинхронний двигун працює при змінній напрузі) або $R \neq const$ (асинхронний двигун з глибоким пазом або подвійною кліткою в режимі змінного ковзання), метод еквівалентного струму може призвести до істотних погрешностей.

2.4. Повторно-короткочасний режим S3 роботи електродвигуна.

Розглянемо повторно-короткочасний режим, який згідно ДСТУ має назву S3 (рис. 2.6). Тривалістю циклу тут має кінцеві рамки ($t_y \leq 10$ хв.), а відносна тривалість робочого часу ($\varepsilon \leq 0,6$). Насправді в повторно-короткочасному режим працює більшість електричних машин, адже саме таку ритміку має більшість технологічних процесів, так, наприклад, працюють підймальні механізми (башенні крани, ліфти, підйомники), тощо.

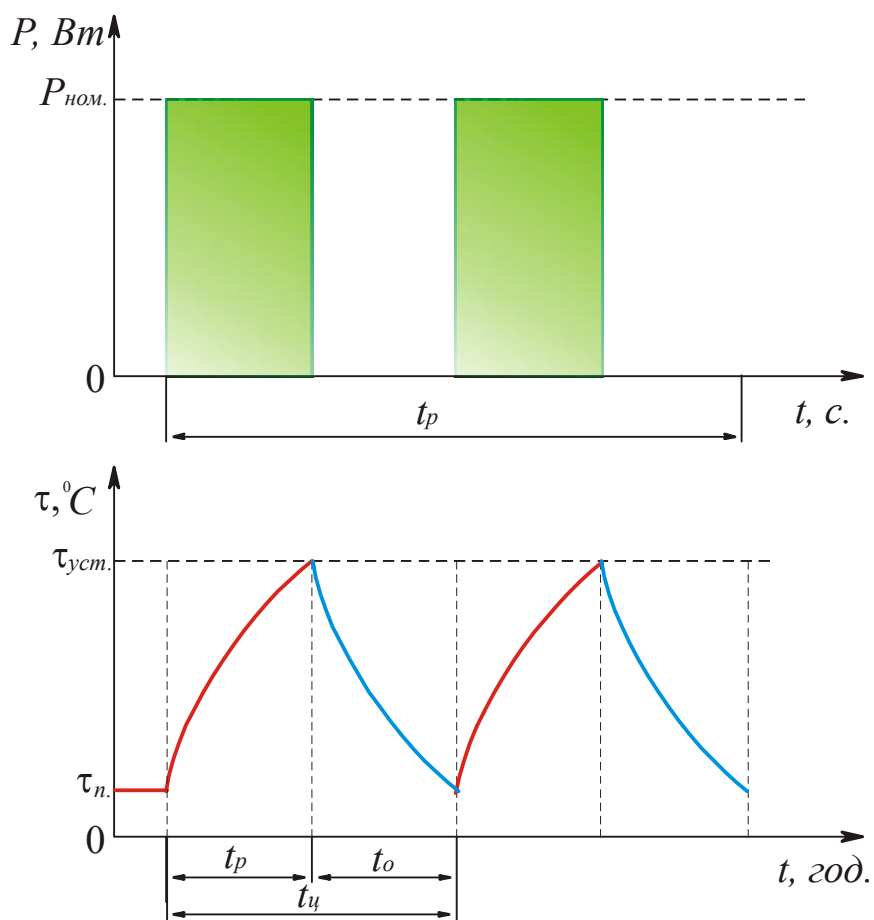


Рисунок 2.6 – Ідеалізована діаграма повторно-короткочасному режиму S3 роботи електродвигуна

Якщо навантажувальна діаграма має кілька ділянок, сформована за рахунок динамічних моментів пуску і гальмуванні (рис. 2.7, а), її можна привести до еквівалентного вигляду (рис. 2.7, б).

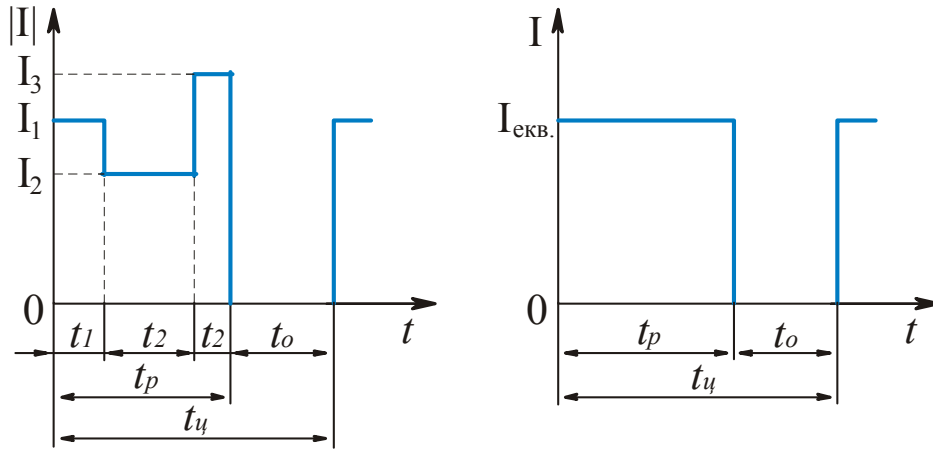


Рисунок 2.7 – Навантажувальна діаграма в повторно-короткочасному режимі (а) та її еквівалентне представлення (б)

Так для рис. 2.7, а, отримуємо:

$$I_{екв.} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}, \quad (2.50)$$

Наступний крок – аналіз одержаних значень по відношенню до відносної тривалості робочого часу, ε , обирається найближче стандартне значення $\varepsilon_{ст}$ і тоді маємо:

$$I_{екв.}^2 R \frac{t_p}{t_y} = I_n^2 R \varepsilon_{ст}, \quad (2.51)$$

Звідки маємо

$$I_n = I_{екв.} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ст}}}, \quad (2.52)$$

При використанні електродвигуна, призначеного для тривалого режиму з (2.52) отримуємо:

$$I_n = I_{екв.} \sqrt{\varepsilon}, \quad (2.53)$$

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Електромагнітне і теплове поля мають взаємний вплив і являються взаємкореляційними складовими при розрахунках електродвигунів. Цей зв'язок безпосередньо впливає на конструкцію електричної машини будь-якого типу. Для раціонального аналізу необхідно знайти оптимальне співвідношення між інтенсивністю і розподілом електромагнітних і теплових полів. Необхідно здійснити симбіоз методик електромагнітних і теплових розрахунків, інтегрувавши їх в загальній математичній моделі, яка повинна надати наочну картину загальних процесів, що протікають в електродвигунах.

2. Створено динамічну теплову модель електродвигуна, в якій враховано, що у тепловому відношенні це складний, неоднорідний за матеріалом об'єкт, який має розосереджені внутрішні джерела тепла, інтенсивність яких залежить від матеріалу кожної складової, режиму роботи, тепловіддачі, тощо.

3. Здійснено аналіз електричних машин у двох найбільш важких режимах роботи: тривалому режимі S1 та повторно-короткочасному S3. Причому тривалий режим S1 розбито на два підрежими: безпосередньо тривалий режим, при якому електродвигун працює з постійним і невеликим навантаженням, при цьому всі його параметри (потужність, момент, температура) досягнули номінальних значень, знаходяться у допустимих межах і при яких він може працювати необмежено тривалий час та режим змінного навантаження, при якому весь час має місце несталий тепловий процес, так як в різні інтервали часу виникають різні втрати потужності в двигуні. Розроблену методику аналізу електродвигунів у постійному режимі поширено також на повторно-короткочасний режим S3 та змішані режими S4-S10.

4. У роботі використано та удосконалено метод середніх втрат, який дозволяє оцінювати середню температуру перегріву, не вдаючись до побудови діаграм теплових процесів. Даний метод було поширено також на тепловий аналіз електродвигуна методом еквівалентного струму та еквівалентного моменту. Причому, метод еквівалентного моменту можна з легкістю застосовувати як для перевірки синхронних, так і асинхронних двигунів, а

також для двигунів незалежного збудження при роботі з номінальним потоком. Однак даний метод також має ряд недоліків. У випадках, коли сума постійних втрат, $k \neq const$ (наприклад, коли асинхронний двигун працює при змінній напрузі) або змінних втрат, $R \neq const$ (асинхронний двигун з глибоким пазом або подвійною кліткою в режимі змінного ковзання), метод еквівалентного струму може призвести до істотних погрешностей.

5. Математичне моделювання синхронних двигунів на постійних магнітах, направлене на вивчення теплових процесів виявило універсальність даної методики для всіх інших класів електричних машин.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ

3.1. Вибір методу моделювання

Велике різномаяття електричних машин, все більше поширення їх в технологічних процесах і побуті вимагають постійного вдосконалення існуючих конструкцій та розробки нових типів електродвигунів [1]. Як зазначалося вище, найбільш перспективними в цьому сенсі є синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів, серед яких слід виділити:

- двигуни із зовнішнім розташуванням магнітів на роторі (SPM, Surface Permanent Magnet);
- двигуни із внутрішнім розташуванням магнітів у роторі (IPM, Interior Permanent Magnet);
- вентильні двигуни – синхронний безщітковий електронно-комутований двигун постійного струму (BLDC або BL).

Зростання чисельності електродвигунів, їх номенклатури і типів призводить до зростання ступеню використання активних матеріалів: електротехнічної сталі та обмотувальної міді, збільшення концентрації енергії магнітного поля, що досягається збільшенням щільності струму в обмотках і індукції в магнітному осерді. Все це призводить до збільшення втрат енергії, а значить і проблем відведення тепла.

Загальна модель теплообміну електродвигуна (рис. 3.1) характеризує ступінь проблематики моделювання теплових процесів. Адже з одного боку ми маємо складну замкнену систему перерозподілу тепла між елементами двигуна (в основному від мідних обмоток до всіх інших складових). З іншого ж боку присутній процес тепловіддачі корпусу (виконаного як правило спеціально ребристим для збільшення площі) із навколишнім середовищем. Крім того, більшість двигунів, окрім пасивної системи теплообміну мають власну систему активного охолодження у вигляді вентилятора (інколи двох) жорстко посаджених на вал. І як вже було вказано вище, тепловіддача залежить від швидкості обертання вала, а отже і вентилятора та може відрізнятись більше, ніж у 2 рази.

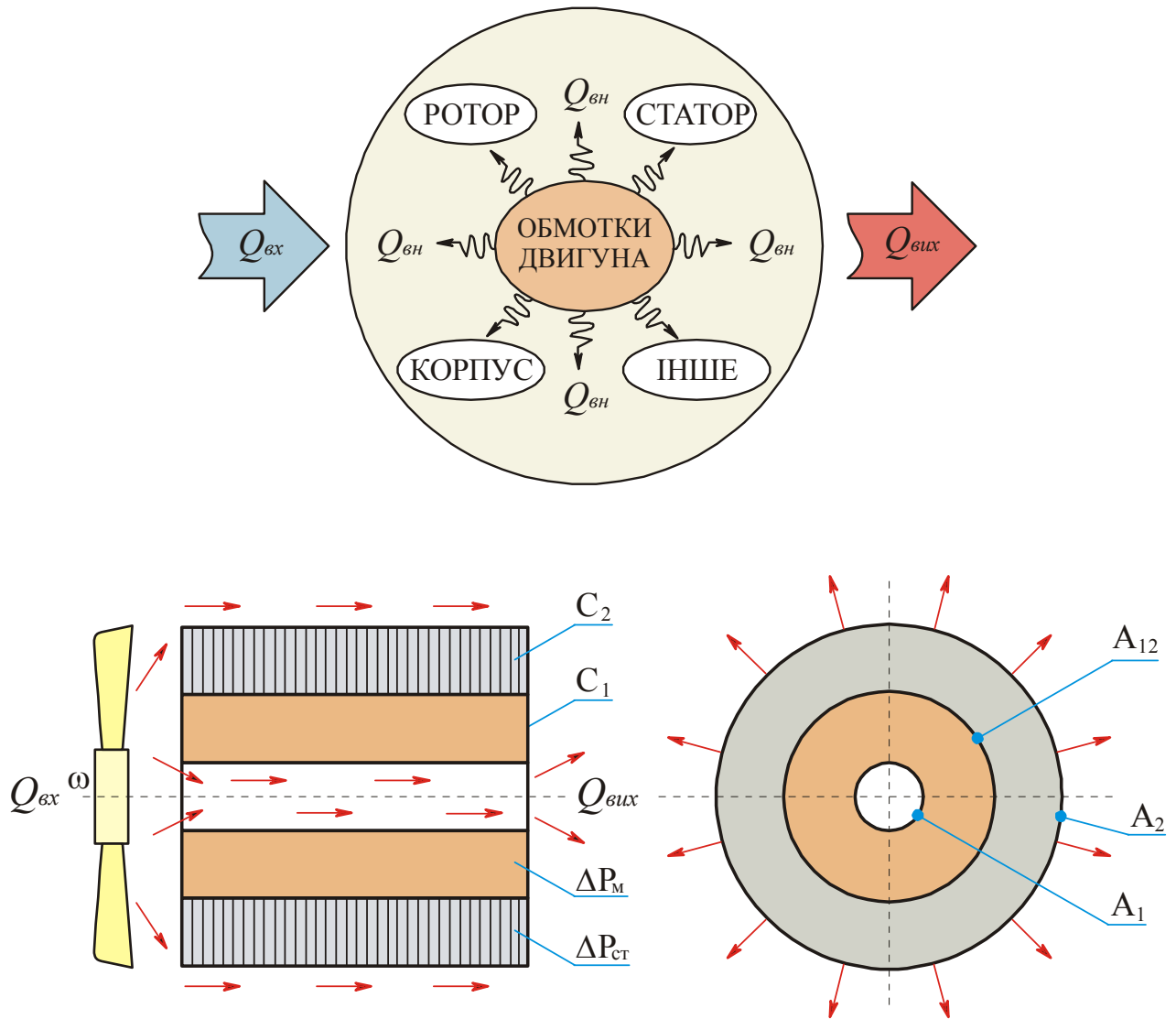


Рисунок 3.1 – Спрощена загальна модель теплообміну електричного двигуна:

$Q_{вх}$ – вхідний тепловий потік; $Q_{вих}$ – вихідний тепловий потік;

$Q_{вн}$ – внутрішній тепловий потік; C_1 – теплоємність обмотки статора; C_2 – теплоємність зовнішнього корпусу; ΔP_m – потужність теплових втрат у міді; $\Delta P_{ст}$ – потужність теплових втрат у сталі; A_1 – коефіцієнт тепловіддачі від міді статора у зовнішнє середовище; A_2 – коефіцієнт тепловіддачі від сталі у зовнішнє середовище; A_{12} – коефіцієнт тепловіддачі між міддю і сталлю

Відомо різноманітні методи відведення тепла [3]:

1. Метод аналітичного рішення систем рівнянь для двомірних та трьохмірних температурних полів.
2. Чисельний сітковий метод.

3. Метод одновимірного температурного поля.

4. Метод еквівалентних теплових схем (ЕТС) набуває популярності останнім часом, адже досить простий, але разом із тим точний. Даний метод оснований на використанні теплових опорів (певна топологія), імітуючи теплові зв'язки між складовими електродвигуна, і передбачає аналогію теплового потоку з електричним струмом, основу на однакової формі основного закону теплопровідності (закон Фур'є).

Найбільш придатними методами для моделювання процесів магнітних і теплових полів, а також врахування нелінійності феромагнітних властивостей є чисельні методи [5-11]. Чисельне рішення рівнянь поля за допомогою програмно-апаратних засобів та спеціальних програм, оснований, наприклад, на методах скінченних різниць (МСР) або скінченних елементів (МСЕ) та інших, дозволяє практично без будь-яких спрощень і припущень з високою точністю розрахувати розподіл поля в будь-якому електромеханічному пристрої. Є досить прості програми з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, освоєння яких не вимагає великих витрат часу: ELCUT, QuickField, FEMME. Є й більш серйозні професійні програми із великими можливостями, наприклад, ANSYS, Flux 2D&3D, Ansys Motor-CAD, Matlab&Simulink, Femlab [12-19].

На рис. 3.2 представлено структуру узагальненої теплової моделі при формуванні в середовищах Matlab / Femlab. Вона починається із формування розмірів конструктивних елементів та уточнення їх параметрів, таких як тип матеріалу та його фізичні характеристики, параметри теплопровідності всіх матеріалів та зовнішнього середовища (адже зовнішнім тепловідводом може служити не тільки повітря, але і вода, газоподібні суміші або будь-які додаткові теплові екрани). Для сформованої конструкції електродвигуна обираються його електротехнічні параметри: тим і матеріал обмоток, діючі значення напруг і струмів Далі формуються граничні умови

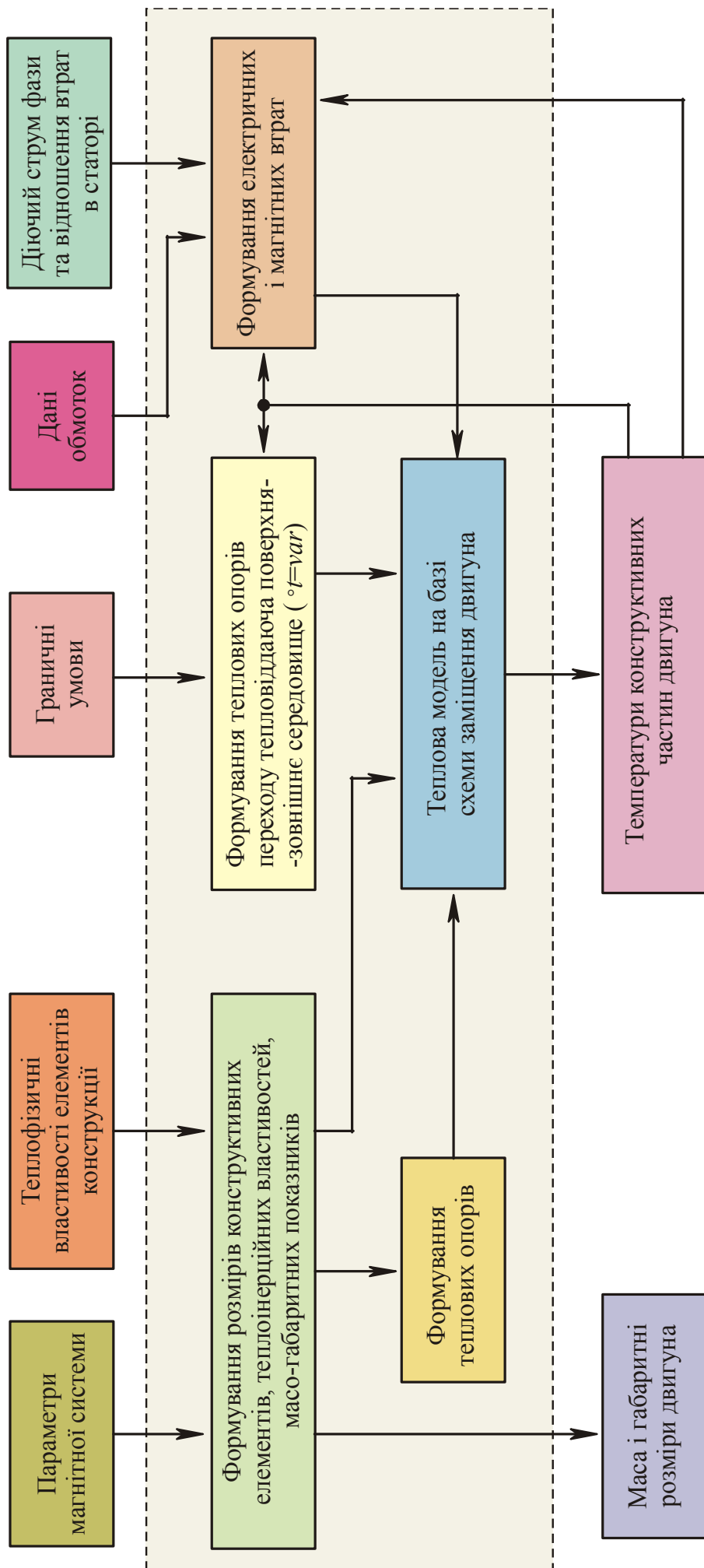


Рисунок 3.2 – Структурна схема узагальненої теплової моделі.

3.2. Вихідні дані

Процес моделювання пов'язаний не тільки із створенням математичної моделі та вибором методу моделювання. Немаловажним також є задання початкових умов, конкретизація задачі та формування переліку технічних параметрів, сталих і фізичних величин. Для здійснення процесу моделювання (розрахунку теплових втрат та опорів) необхідно задати початкові умови, в нашому випадку ряд специфічних технічних параметрів електричного двигуна та матеріалу його складових (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для моделювання

Елементи двигуна	Матеріал елемента	Коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Питома теплоємність, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$	Щільність, $кг/м^3$
Корпус	Чавун ЧГ8ДЗ	48	376	7200
Підшипниковий щит				
Вал	Сталь 30Х13	24	458	7715
Статор	Сталь електротехнічна А3413	46	620	7650
Магніти	Сплав NdFeB	9	502	7400
Підшипники	ШХ15	45	400	7800
Втулки	Берилієва бронза БрБ2	84	419	8200
Обмотки	Мідь	390	385	8890
Ізоляція обмоток	Лак полімідний електроізоляційний	0,16	800	900
Пазова ізоляція	Фторопласт Ф-40П	0,17	970	1700
Повітряна ізоляція	Повітря	0,025	1000	1

Крім властивостей матеріалів задавалися ще граничні умови:

1) температура зовнішнього середовища (наприклад, 40 °C); для того щоб двигун працював з номінальною потужністю, температура навколишнього середовища не повинна перевищувати 40 °C; дослідження показують, що нагрівання ізоляції на кожні 8-10 °C понад допустимої норми вдвічі зменшує термін її служби; чутливими до нагрівання є і деякі механічні вузли і деталі електродвигунів: для підшипників кочення – 60 °C, для підшипників ковзання – 45 °C, для сталевих деталей колекторів і контактних кілець – 70 °C;

2) максимальна зовнішня температура двигуна, яка приймається рівною максимальному значенню (наприклад 120 °C). Взагалі, рівень допустимого нагріву залежить від класу ізоляції обмоток, яка є найменш теплостійкою частиною всієї конструкції електродвигуна. Допустима температура нагріву для електродвигунів різних класів ізоляції наступна:

- Клас Y – до 90 °C (матеріали – папір, пряжа, шовкові або бавовняні тканини без просочення ізолюючим складом; самий не термостійкий);

- A – до 105 °C (матеріали ті ж, але з просоченням);

- E – до 120 °C (матеріал – синтетична органічна плівка);

- B – до 130 °C (матеріали – скловолокно, слюда, азбест з органічними речовинами);

- F – до 155 °C (матеріали ті ж що і для класу B, але із синтетичним просоченням і зв'язуючою речовиною);

- H – до 180 °C (матеріали ті ж що і для класу B, але з кремнійорганічним просоченням і зв'язуючою речовиною);

- C – понад 180 °C (матеріали – скло, кераміка, кварц, слюда з неорганічним зв'язуючим складом або без);

3) тепло від зовнішньої поверхні відводиться в навколишнє середовище, де температура нижче. Завдання полягало у визначенні температури всередині машини в припущенні, що все тепло, виділене в активних частинах,

розподіляється всередині машини, а зовнішня поверхня обмінюється теплом з навколишнім середовищем з коефіцієнтом теплообміну $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

4) в якості вихідних даних задавалися значення питомої потужності втрат в обмотках статора (електричні втрати) і в сталі (втрати на гістерезис і вихрові струми).

3.3. Реалізація теплової моделі електродвигуна в MATLAB/FEMLAB

3.3.1. Метод скінчених елементів в задачах теплового аналізу

Точні методики теплового розрахунку електричних машин часто базуються на рішеннях диференціальних рівнянь теплопровідності в тих випадках, коли особливо важливо отримати картину безперервного розподілу температури в просторі або в часі. В інших випадках на основі спрощених рівнянь користуються еквівалентними схемами для стаціонарних задач і представленням про однорідні тіла для задач нестаціонарних. Існують синтетичні методи, які використовують особливості строгих і спрощених рішень [11].

Рішення тривимірного поля, що підпорядковується розглянутим вище диференціальним рівнянням з частковими похідними, представляє значні труднощі принципового характеру. З цієї причини більшість застосовуваних в даний час методів теплового розрахунку електродвигунів оснований на тих чи інших спрощеннях. Найбільш важливим з них є зведення реального тривимірного процесу теплопровідності до умовного одномірного процесу і пошуку рішень на цій основі, які по можливості близько відповідали би реальній картині розподілу температури. Протягом останніх десятиліть, завдяки нарощуванню потужності апаратно-програмних засобів, швидко розширюється область застосування даних методів, одним із яких є метод скінчених елементів (МСЕ). Спочатку орієнтований на рішення задач міцності, МСЕ все активніше використовується в інших областях досліджень, зокрема для вирішення задач, пов'язаних з поширенням електромагнітних хвиль в різних

середовищах. До цього класу задач можна віднести і моделювання роботи електричних машин різних типів. Метод кінцевих елементів на сьогоднішній день є загально визнаним методом структурного аналізу в цілому ряді областей науки і техніки. Значною мірою це пояснюється:

- можливістю завдання локальних граничних умов;
- простою фізичною інтерпретацією його обчислювальних операцій;
- великою геометричною гнучкістю і застосовністю до широкого класу диференціальних рівнянь в часткових похідних;
- забезпеченням єдиності одержуваного рішення у всіх точках даної області;
- ефективністю і економічністю при його машинній реалізації в порівняно з іншими методами.

На сьогодні є різні програмні середовища для розрахунку теплових полів на основі чисельного моделювання. Є дуже прості польові програми із зрозумілим і простим інтерфейсом, освоєння яких не представляє великих труднощів: ELCUT, QuickField, FEMME тощо. Є і більш серйозні професійні програми, наприклад, ANSYS, Flux 2D, Flux 3D, Femlab, тощо, які мають великі можливості, але вимагають серйозних зусиль на їх освоєння.

Пакет прикладних програм MATLAB/FEMLAB найбільш краще підходить для моделювання і розрахунків завдань, оснований на диференціальних рівняннях з частковими похідними методом скінчених елементів *Partial Differential Equation* (PDE) [15-19]. Взаємодія з програмою можлива стандартним способом – через графічний інтерфейс користувача (GUI), або програмуванням за допомогою скриптів на мові COMSOL Script або мові MATLAB.

Програма оснований на системі диференціальних рівнянь з частковими похідними. Існує три математичні способи завдання таких систем:

- коефіцієнтна форма, призначена для лінійних і близьких до лінійних моделей;
- загальна форма, для нелінійних моделей;
- слабка форма (*Weak form*), для моделей з PDE на межах, ребрах або для моделей, що використовують умови із змішаними і похідними за часом.

Використовуючи ці способи, можна змінювати типи аналізу, включаючи:

- стаціонарний і перехідний аналіз;
- лінійний і нелінійний аналіз;
- модальний аналіз і аналіз власних частот.

Для вирішення PDE, COMSOL Multiphysics використовує метод скінчених елементів (FEM). Програмне забезпечення запускає кінцево-елементний аналіз разом з сіткою що враховує геометричну конфігурацію тіл і контролем помилок з використанням різноманітних чисельних вирішувачів. Окрім вище переліченого, програма дозволяє за допомогою змінних зв'язку (*coupling variables*) поєднувати моделі в різній геометрії і зв'язувати між собою моделі різних розмірностей.

Основним типом рівняння, розв'язок якого забезпечується комплектом інструментів *Partial Differential Equation (PDE) Toolbox* MATLAB [18, 19] є еліптичне рівняння:

$$-\operatorname{div}(c \cdot \operatorname{gradu}) + au = f, \quad (3.1)$$

де c, a, f і невідоме рішення u є комплексними функціями, які визначені на обмеженій в площині області Ω . Система підтримує два основних типи граничних умов – Диріхле та Неймана:

$$hu = r; \quad (3.2)$$

$$\vec{n} \cdot (c \cdot \operatorname{gradu}) + qu = g, \quad (3.3)$$

де \vec{n} – зовнішня нормальна одиниця; g, q, h, r – функції, які визначені на границі $\partial\Omega$.

Слід відзначити, що формулювання умови Неймана відрізняється від традиційного для потенційної теорії, де ці умови звичайно відносяться до випадку $q = 0$ і називаються змішаними. Для випадку $c = 0$ умови (3.3) перетворюються в умови Диріхле.

Для отримання наближеного рішення еліптичного PDE виконуються наступні дії:

1) описується геометрія області Ω і граничних умов. Це може бути зроблено або інтерактивно, з використанням інструмента *pdetool*, або через m-файли *pdegeom* і *pdebound*;

2) область визначення неперервної величини Ω розбивається на кінцеву кількість елементів. Ці елементи мають спільні вузлові точки і разом апроксимують область Ω ;

3) дискретизуються PDE і граничні умови для отримання лінійної системи $\mathbf{Ku} = \mathbf{F}$. Вектор \mathbf{u} містить значення наближеного рішення у вершинах елементів, матриця \mathbf{K} утворюється коефіцієнтами c, a, h, q , права сторона \mathbf{F} містить середні величини f навколо кожної вершини з урахуванням g .

Використання функції *assembl* дозволяє сканувати всі МСЕ трикутники. Для кожного трикутника розраховуються місцеві матриці, які містять інтеграли, що оцінюються тільки в поточному трикутнику. Інтеграли обчислюються з використанням правила середньої точки. Це наближення оптимальне, оскільки має той же порядок точності, як і кусково-лінійна інтерполяція. Розглянемо трикутник, заданий вузлами P_1, P_2, P_3 (рис. 3.3). Місцева матриця маси \mathbf{m} обчислюється як:

$$m_{i,j} = \int_{P_1P_2P_3} a(P_0) \phi_i(x) \phi_j(x) dx = a(P_0) \frac{\text{площа}(P_1P_2P_3)}{12} (1 + \delta_{i,j}), \quad (3.4)$$

де P_0 є центром маси трикутника $P_1P_2P_3$, тобто:

$$P_0 = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3}. \quad (3.5)$$

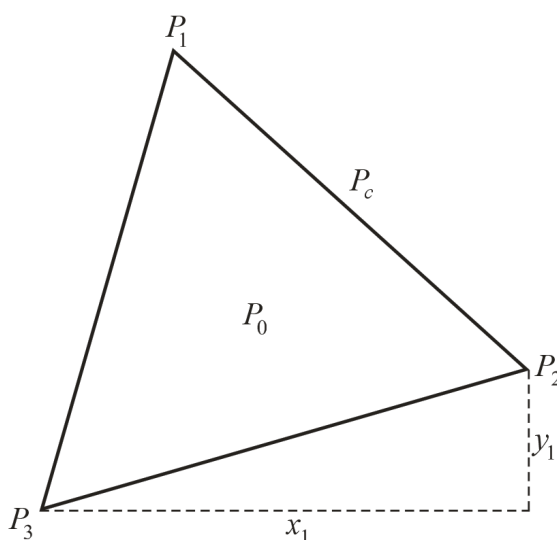


Рисунок 3.3 – Місцевий трикутник $P_1P_2P_3$

Відповідно внесок до правої сторони:

$$f_i = f(P_0) \frac{\text{площа}(\Delta P_1 P_2 P_3)}{3}. \quad (3.6)$$

Для місцевої матриці жорсткості необхідно обрахувати градієнти базисних функцій на $P_1 P_2 P_3$. Оскільки базисні функції лінійні, то ці градієнти є константами. Позначимо базисні функції ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 так, щоб $\phi_i(P_i) = 1$. Якщо $P_2 - P_3 = [x_1, y_1]^T$, тоді отримаємо:

$$\text{grad}\phi_1 = \frac{1}{2\text{площа}(P_1 P_2 P_3)} \begin{bmatrix} y_1 \\ -x_1 \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

а після інтегрування (приймаємо c як постійну):

$$k_{i,j} = \frac{1}{4\text{площа}(P_1 P_2 P_3)} [y_j - x_j] c(P_0) \begin{bmatrix} y_1 \\ -x_1 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Якщо дві вершини трикутника лежать на границі $\partial\Omega$, то вони входять до лінійних інтегралів, що пов'язані з граничними умовами. Якщо P_1 та P_2 – дві граничних точки, тоді маємо:

$$Q_{i,j} = q(P_c) \frac{\|P_1 - P_2\|}{6} (1 + \delta_{i,j}) ; \quad G_i = g(P_c) \frac{\|P_1 - P_2\|}{2}; \quad i, j = 1, 2, \quad (3.9)$$

де P_c – середня точка $P_1 P_2$ (рис. 3.3).

Градієнти і області трикутників обчислюються за допомогою функції *pdetrg*. Програма для розв'язку еліптичних рівнянь дозволяє також розв'язувати інші види PDE, наприклад параболічні PDE. Для цього призначена функція *parabolic* із комплексу інструментів *Partial Differential Equation Toolbox* [19].

Метод скінчених елементів припускає дискретизацію диференціальних рівнянь на так званих триангулярних координатних сітках, тобто на сітках, елементарними комірками яких є трикутники для двох вимірів або призми

(тетраедри) для трьох вимірів. Розбиття Діріхле і триангуляція Делоне здійснюється наступним чином. Нехай необхідно покрити деяку двомірну область Θ триангулярною координатною сіткою. Розглянемо деякий набір точок $\{p_i \mid i=1, 2, \dots, n\}$ в області Θ . Тоді i -та комірка Діріхле Ω_i є множиною всіх точок області Θ , що лежать ближче до точки p_i , ніж до будь-якої іншої точки p_j (рис. 2.7). Така множина комірок $\{\Omega_i \mid i=1, 2, \dots, n\}$ і є розбиттям Діріхле, яке повністю покриває область Θ без накладень, як видно із рис. 3.4.

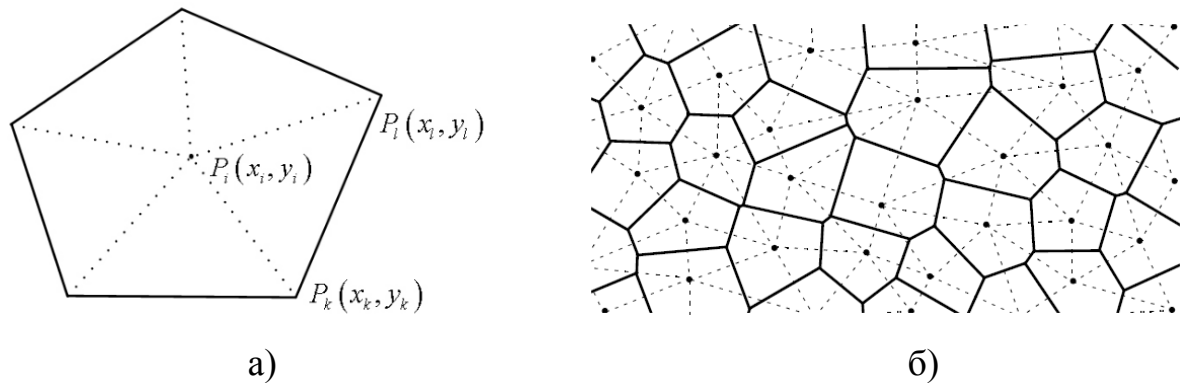


Рисунок 3.4 – Комірка (а) та розбиття (б) Діріхле

Можна сказати, що триангуляцією Делоне називається граф, який виникає внаслідок з'єднання сусідніх в сенсі Діріхле точок відрізками прямих ліній (рис. 3.4), що задовольняє наступним умовам:

- 1) вершини будь-якого елемента сітки (трикутника) лежать на деякій окружності;
- 2) не існує точок сітки усередині кола, описаного біля будь-якого елемента;
- 3) не існує двох елементів із загальним описаним колом або, іншими словами, не існує більше 3 точок сітки, що належать одній окружності.

Із зіставлення приведених визначень видно, що відповідні лінії розбиття Діріхле і триангуляції Делоне взаємно перпендикулярні (рис. 3.5). Іншими словами, побудова перпендикулярів в серединах триангуляційних ліній дає розбиття Діріхле. Це і лежить в основі процедури дискретизації диференціальних рівнянь.

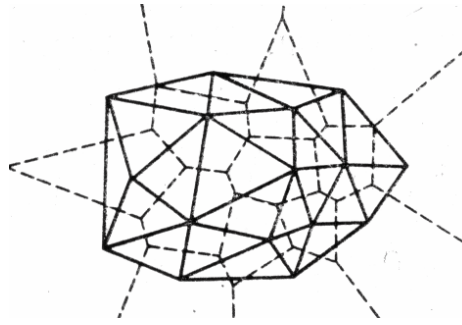


Рисунок 3.5 – Триангуляція Делоне (суцільні лінії) і відповідне розбиття Діріхле (пунктирні лінії)

Алгоритм містить в собі як стандартні процедури (вбудовані в пакети MATLAB/FEMLAB) так і процедури, розроблені автором. До стандартних відносяться наступні процедури:

- **Draw** (побудова геометричної моделі ПЕ);
- **Boundary** (завдання граничних умов);
- **PDE** (завдання параметрів диференціального рівняння);
- **Mesh** (побудова сітки МКЕ);
- **Solve** (отримання розподілу механічних напруг ПЕ).

Модель, розглянута вище, оснований на лінійній стаціонарній версії рівняння теплопровідності відносно температури T . У термінології системи FEMLAB змінна, відносно якої вирішується PDE, називається залежною змінною, а просторові координати і час – незалежні змінні. Стаціонарне диференціальне рівняння теплопровідності має вигляд:

$$-\operatorname{div}(k \cdot \operatorname{grad} T) = Q, \quad (3.10)$$

де Q – об'ємна щільність потужності теплових джерел, Вт/м³;

k – коефіцієнт теплопровідності речовини, Вт·м⁻¹·К⁻¹.

Якщо просторові координати вимірювати в міліметрах, то Q і k потрібно виражати у Вт/мм³ і Вт·м⁻¹·К⁻¹ відповідно. Згідно вище сказаному, рівняння (3.10) необхідно доповнити граничними умовами першого роду (граничними умовами Діріхле):

$$T = T_0, \quad (3.11)$$

де T_0 – розподіл температури на границі розрахункової області (наприклад, $T_0=273 \text{ K}$). У GUI-додатку FEMLAB в прикладному режимі теплопередачі підтримується також і інший тип граничних умов:

$$\mathbf{n}(k \cdot \mathbf{grad}T) = q_0 + h_0 \cdot (T_{inf} - T) + h_i \cdot (T_{amb}^4 - T^4), \quad (3.12)$$

де n – вектор одиничної нормалі до границі розрахункової області;

q_0 – незалежна щільності потоку потужності тепла;

h_0 – коефіцієнт кондуктивного або конвективного теплообміну;

h_i – коефіцієнт теплообміну випромінюванням з навколишнім середовищем;

T_{inf} , T_{amb} – значення температури навколишнього середовища, які при моделюванні

зазвичай приймаються рівними.

Вираз (3.11) називається граничною умовою другого роду (граничною умовою Неймана). Граничні умови першого і другого роду досить повно описують взаємодію розрахункової області з навколишнім середовищем. Рівняння всіх прикладних режимів роботи GUI-додатки FEMLAB є частковим випадком узагальненого PDE, підтримуваного системою FEMLAB.

Узагальнене стаціонарне скалярне PDE має вигляд:

$$-\nabla(\mathbf{c} \cdot \nabla u + \mathbf{a} \cdot u - \gamma) + a \cdot u + \mathbf{\beta} \cdot \nabla u = f \quad (3.13)$$

де u – шукана скалярна величина;

c – задане скалярне або тензорне (другої валентності) поле, зазвичай характеризує одне з матеріальних властивостей речовини;

a – задане векторне поле (зазвичай характеризує конвективні властивості);

γ – задане векторне поле, яке виконує роль джерела скалярного поля u (в електростатичній задачі це вектор залишкової поляризованості речовини);

a – задане скалярний поле (в просторово-частотних PDE виконує роль динамічного коефіцієнта);

β – задане векторне поле (зазвичай це векторний коефіцієнт конвекції);

f – скалярне джерело шуканого поля u .

Якщо порівняти (3.12) з (3.10), то можна помітити, що в стаціонарній задачі теплопровідності немає сенсу задавати коефіцієнти α , β , γ і a , так як вони рівні нулю. Їх немає навіть в діалоговому вікні введення коефіцієнтів PDE, однак якщо включений режим PDE / View as PDE Coefficients, то вони з'являються у відповідному діалоговому вікні. Коефіцієнтам c і f в (3.12) відповідають k і Q в (3.10). Коефіцієнт k в прикладному режимі теплопровідності також може здаватися в тензорній формі, якщо речовина має анізотропні теплопровідні властивості.

Узагальнена гранична умова Диріхле має вигляд:

$$h \cdot u = r \quad (3.14)$$

Узагальнена гранична умова Неймана має вигляд:

$$\bar{n}(c \cdot \nabla u + a \cdot u - \gamma) + q \cdot u = g - h^T \mu \quad (3.15)$$

(3.13), (3.14) і (3.15) – коефіцієнтна форма узагальненого PDE і граничних умов. В системі FEMLAB підтримується також загальна форма PDE і граничних умов. Коефіцієнтну форму найзручніше застосовувати при вирішенні лінійних або несуттєво-нелінійних крайових задач. Для задання істотно-нелінійних PDE або граничних умов зручніше застосовувати загальну форму.

У прикладному режимі теплопередачі в (3.15) $q=0$, $\alpha=\gamma=0$, g представляють собою праву частину (3.12). Якщо ж працювати з моделлю в недостатньо загальному прикладному режимі, то можна переключитися в

режим редагування коефіцієнтів або граничних умов узагальненого PDE. Це буває корисно при мультифізичному моделюванні, якщо потрібно представити не передбачені прикладним режимом зв'язки між модельованими полями.

3.3.2. Синтез структурної схеми теплової моделі синхронного двигуна

Побудуємо структурну схему теплової моделі в прикладному пакеті програм Matlab&Simulink у вигляді окремих але взаємозв'язаних блоків визначення теплових полів та основних втрат в окремих основних вузлах. Структурна схема для визначення температури міді приведена на рис. 3.6.

Вхідні блоки S1-S3 дозволяють обирати різноманітні режими навантаження двигуна,. Перемикання цих блоків відбувається за допомогою відповідного комутатора.

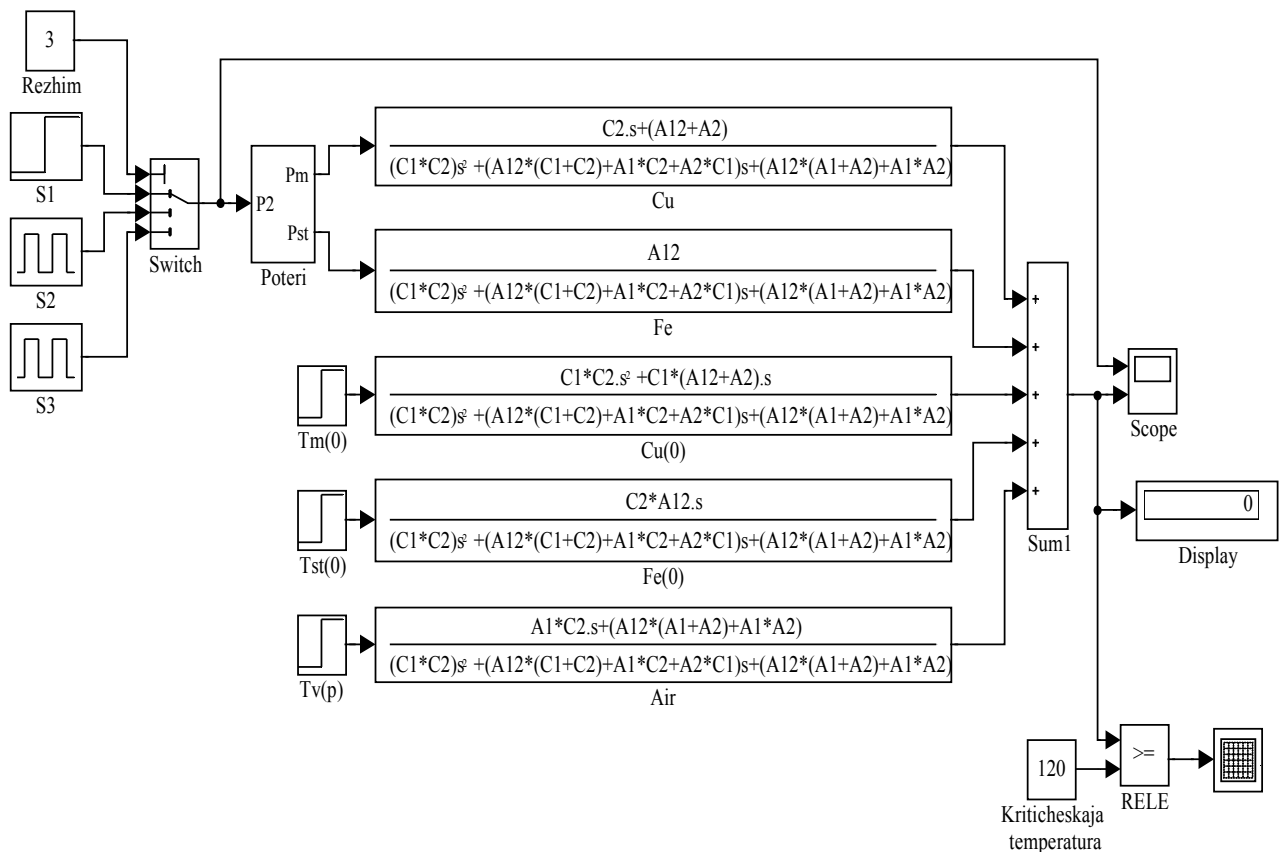


Рисунок 3.6 – Структурна схема моделі для визначення поля температури міді

Для визначення температурних полів у сталених конструкціях двигуна, сформовано відповідну структурну схему (рис. 3.7). Призначення і робота блоків даної структури однакова із попередньою, однак відмінність полягає в фізичних властивостях модельованого матеріалу. Якщо у попередньому випадку задавались початкові умови для міді, її фізичні властивості, теплопровідність, густина, питома теплоємність, тощо, то тут всі ці параметри задаються відносно сталі. Результати моделювання виводяться на дисплей у вигляді таблиць даних та графіків (рис. 3.9). Також можна сформувати 3D-модель кожної складової окремо (ротора, статора і вентилятора), як це представлено на рис. 3.10 у вигляді загальної моделі, об'єднуючої всі результати моделювання. Крім того пакет програм дозволяє зберігати результати моделювання у вигляді *m*-файлу або у форматі табличних даних (.scv), які, до речі, легко імпортуються в різноманітні програмні продукти (наприклад Microsoft Excel) та при зберіганні не займають багато місця.

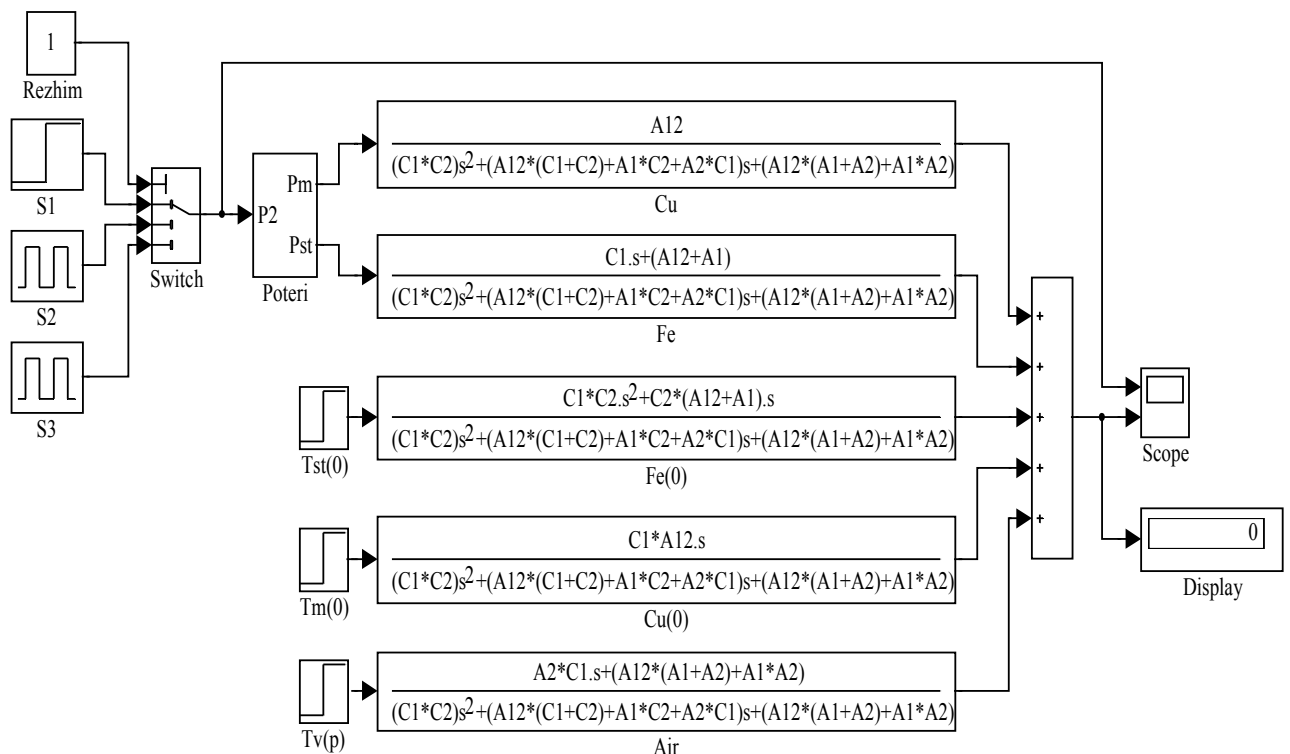


Рисунок 3.7– Структурна схема моделі визначення поля температури сталі

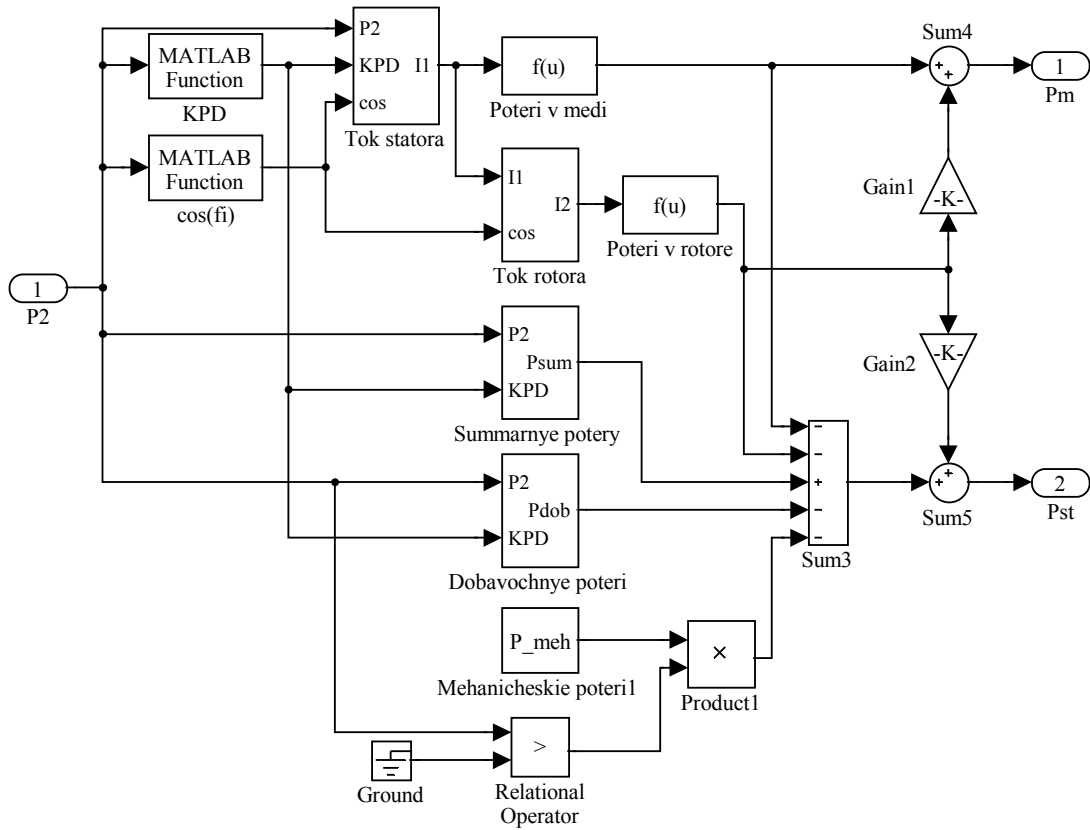


Рисунок 3.8 – Розгорнута схема підсистеми теплових втрат

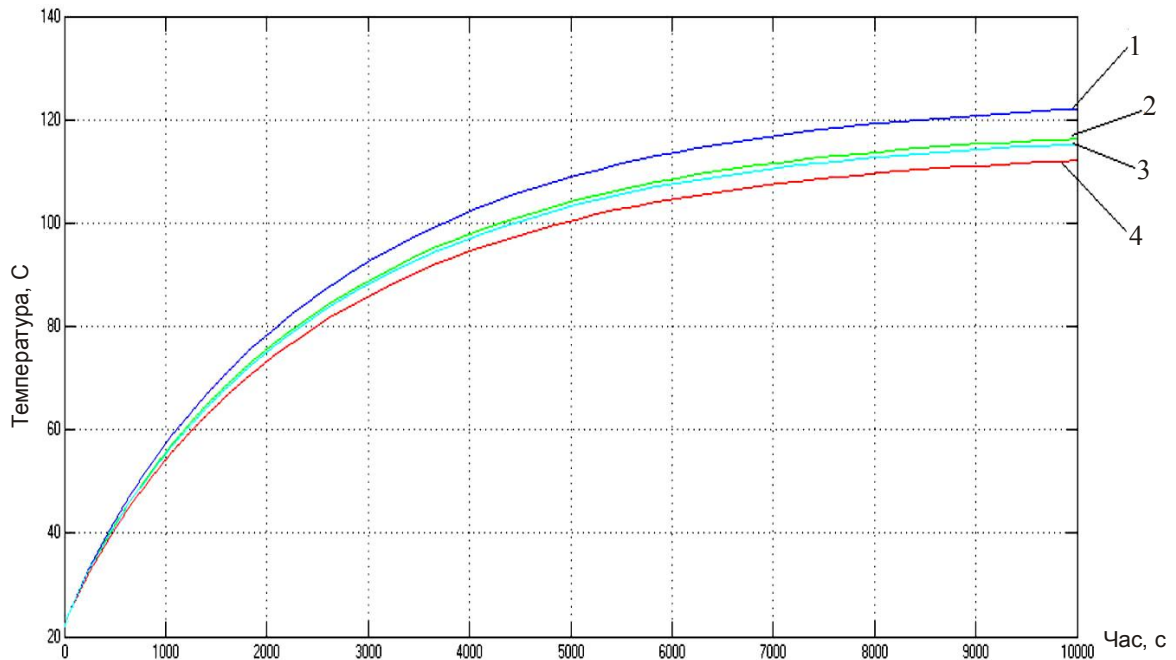


Рисунок 3.9 – Графіки зміни в часі температур конструктивних частин:

1 – лобові частини обмоток, 2 – циліндрична поверхня корпусу, 3 – постійні магніти, 4 – торцеві поверхні корпусу

Як вже було сказано вище, в результаті моделювання можна одержати об'ємний розподіл температурного поля у заданій конструкції, що досить наглядно демонструє розподіл теплових полів в конструкції двигуна.

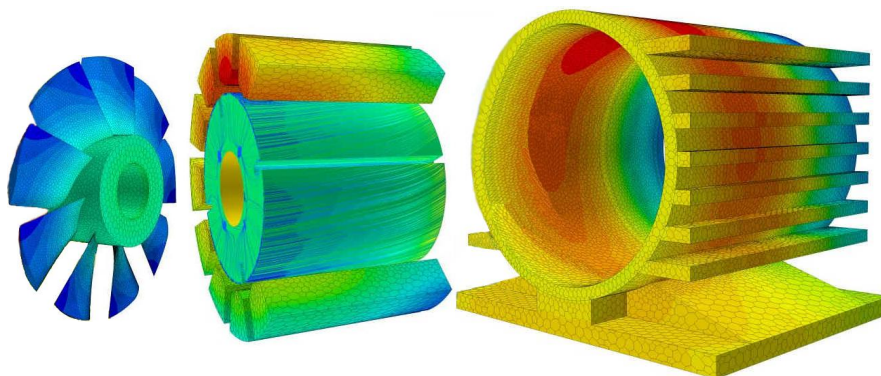


Рисунок 3.9– Результат моделювання

Оцінити точність отриманої моделі можна, порівнявши результати моделювання з даними, отриманими емпіричним (дослідним) шляхом. Для цього було би досить корисно провести натурний експеримент з використанням тепловізора. Однак подібного приладу на жаль немає. Можна було би звичайно вимірювати температуру в опорних точках конструкції, встановивши масу температурних локальних датчиків. Однак таку детальну візуальну картину поля, як дає тепловізор важко отримати традиційними методами вимірювання. Тут слід сказати, що все ж таки маючи такі програмні засоби як Matlab і Femlab ми сьогодні можемо без будь-яких дорогих приладів, без серйозних лабораторій з достатньо високою точністю здійснювати моделювання та проектування складних технічних систем.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Здійснено аналіз та вибір методу моделювання, серед яких найбільш придатними методами для моделювання процесів магнітних і теплових полів, а також обліку нелінійності феромагнітних властивостей є чисельні методи. Чисельне рішення рівнянь поля за допомогою програмно-апаратних засобів та спеціальних програм, основаних, наприклад, на методах скінченних різниць (МСР) або скінченних елементів (МСЕ) та інших, дозволяє практично без будь-яких спрощень і припущень з високою точністю розрахувати розподіл поля в будь-якому електромеханічному пристрої.

2. Побудовано спрощену узагальнену модель та схему теплообміну електричного двигуна, на основі якої проведено моделювання у середовищі MatLab&Simulink. В результаті одержано моделі для визначення поля температури міді та сталі з відповідними підсистемами теплових втрат. Процеси нагрівання і охолодження в двигуні в цьому випадку описуються системою диференціальних рівнянь другого порядку.

3. Одержані результати дозволяють моделювати теплові режими синхронного двигуна практично в будь-яких режимах його роботи. Крім того, в процесі роботи було виявлено, що дані методи з високим ступенем інтерполяції можуть бути застосовані практично для всіх інших типів двигунів.

4. Застосування таких програмних засобів як Matlab і Femlab дозволяє без будь-яких дорогих приладів, без серйозних лабораторій з достатньо високою точністю здійснювати моделювання та проектування складних технічних систем, що забезпечує колосальну економію часу та коштів.

4. ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ НА ПРИКЛАДАХ РЕАЛЬНИХ ДВИГУНІВ

4.1. Конструктивні особливості реальних синхронних двигунів на постійних магнітах

Здійснюючи моделювання різноманітних за типом і конструкцією двигунів, слід чітко уявляти не тільки їх принцип дії, але і поєднання матеріалів, і особливості їх фізичних властивостей. Так, наприклад, синхронні двигуна на постійних магнітах (СДПМ) за конструкцією ротора діляться на:

- синхронний двигун з поверхневим встановленням постійних магнітів (англ. SPM SM – surface permanent magnet synchronous motor), рис. 4.1, а;
- синхронний двигун із вбудованими магнітами (англ. IPM SM – interior permanent magnet synchronous motor), рис. 4.1, б, 4.2.

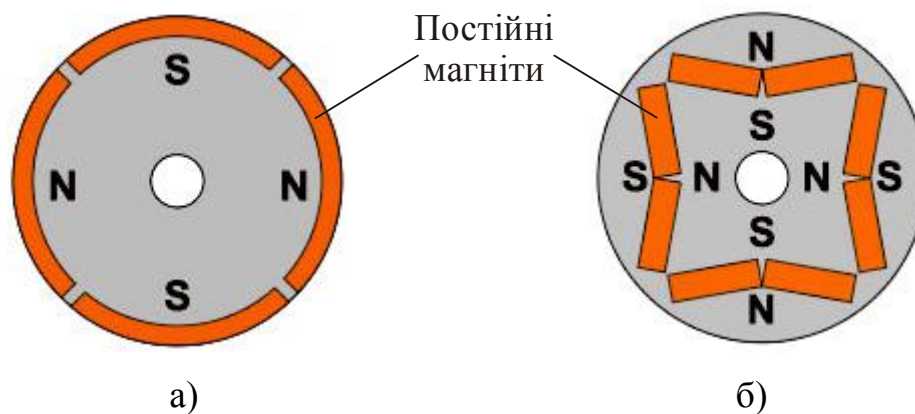


Рисунок 4.1 – Технології SPM (а) і IPM (б) двигунів із збудженням від постійних магнітів

Синхронний двигун із вбудованими магнітами (IPM) являються більш перспективними, так як забезпечують приблизно на 30% більшу потужність, в порівнянні з іншими. Однак і вартість таких двигунів дещо вище. Ротори із вбудованими магнітами застосовуються в двигунах, що працюють при значному навантаженні на валу і широким діапазоном швидкостей.

4.2. Моделювання теплових процесів реальних електричних двигунів

4.2.1. Синхронний двигун із вбудованими магнітами (IPM)

Для здійснення натурального моделювання візьмемо реальний синхронний двигун MITRON типу IPM:

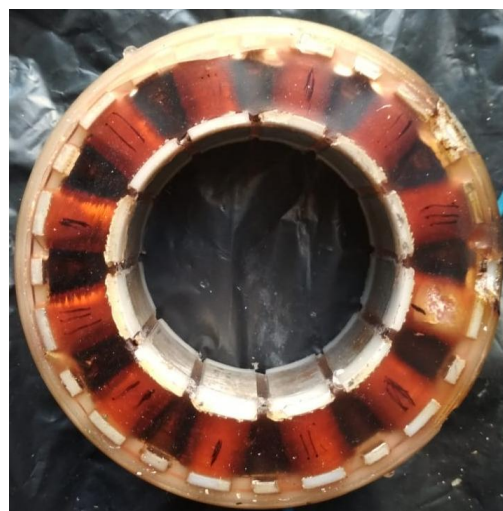
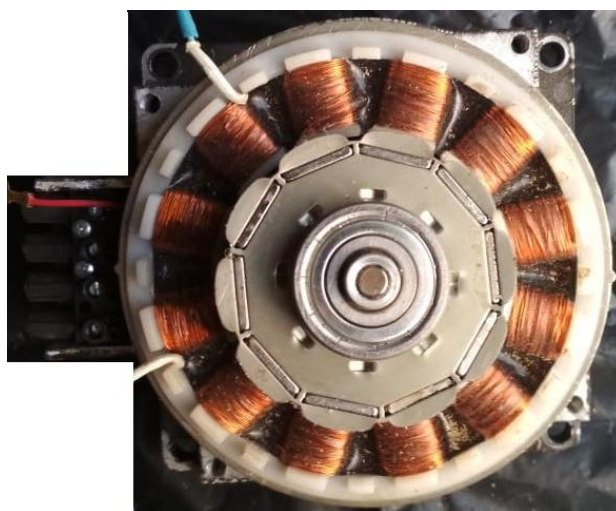
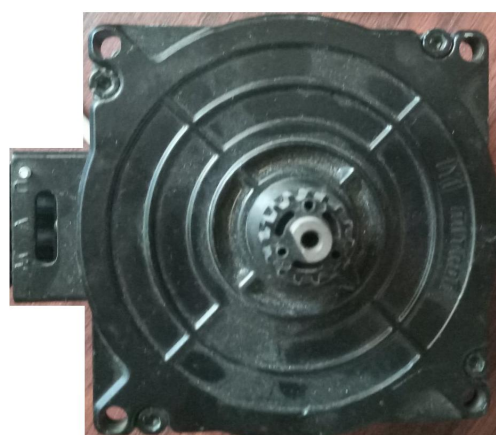
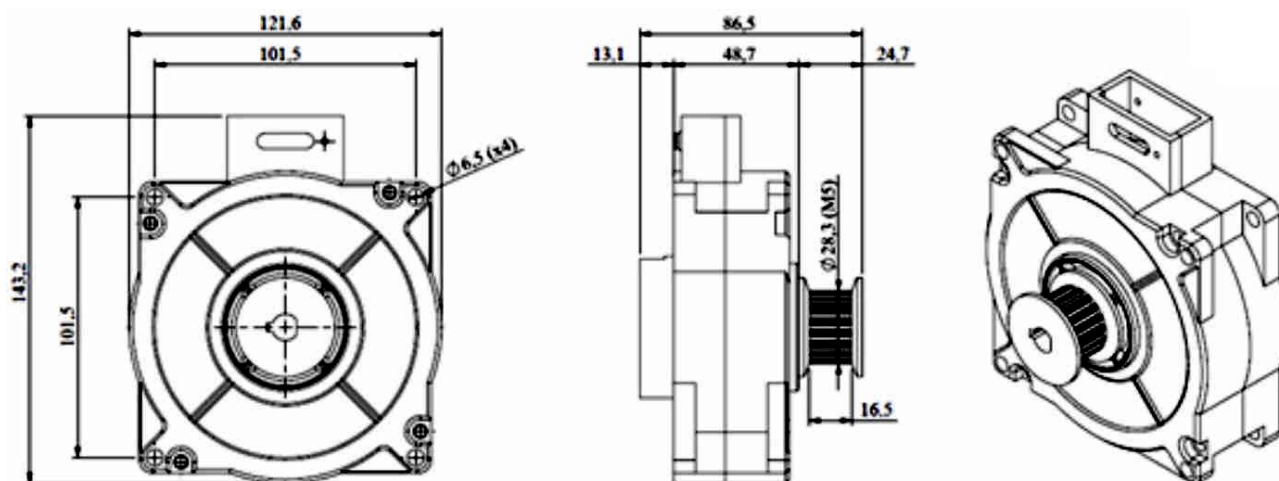


Рисунок 4.4 – Фото реального синхронного двигуна MITRON типу IPM

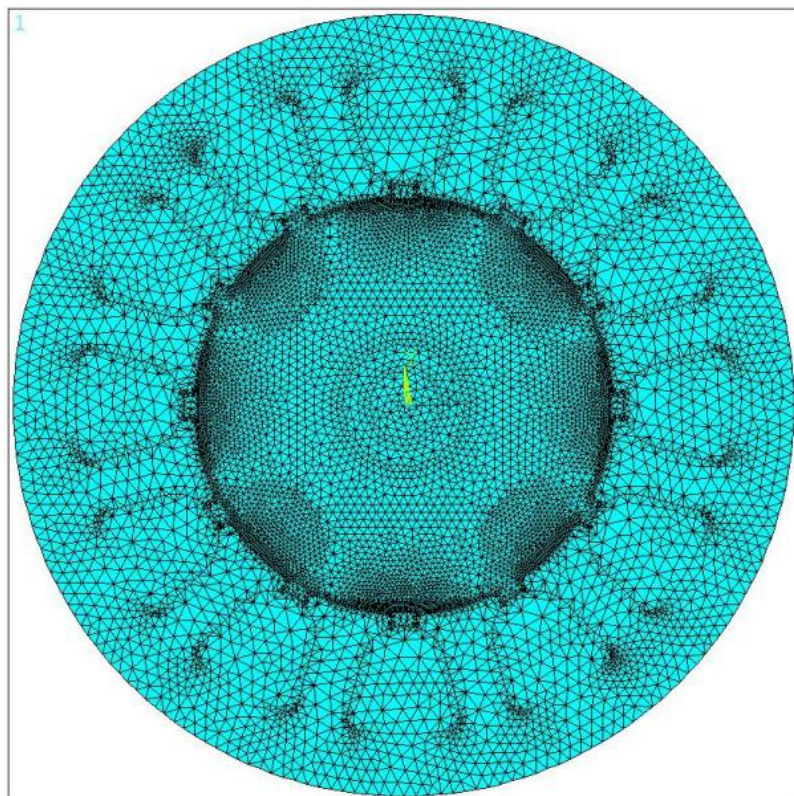


Рисунок 4.5 – Геометрія активної частини СДПМ з сіткою кінцевих елементів

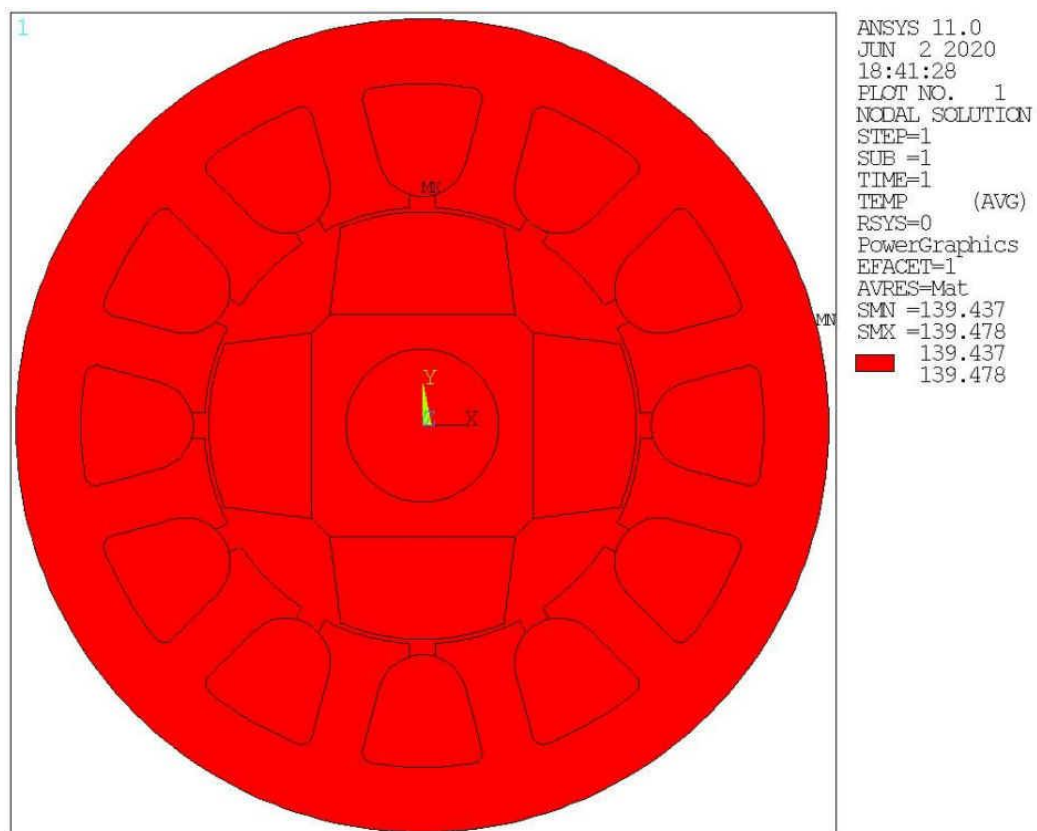


Рисунок 4.6 – Значення температури всередині двигуна (°C)

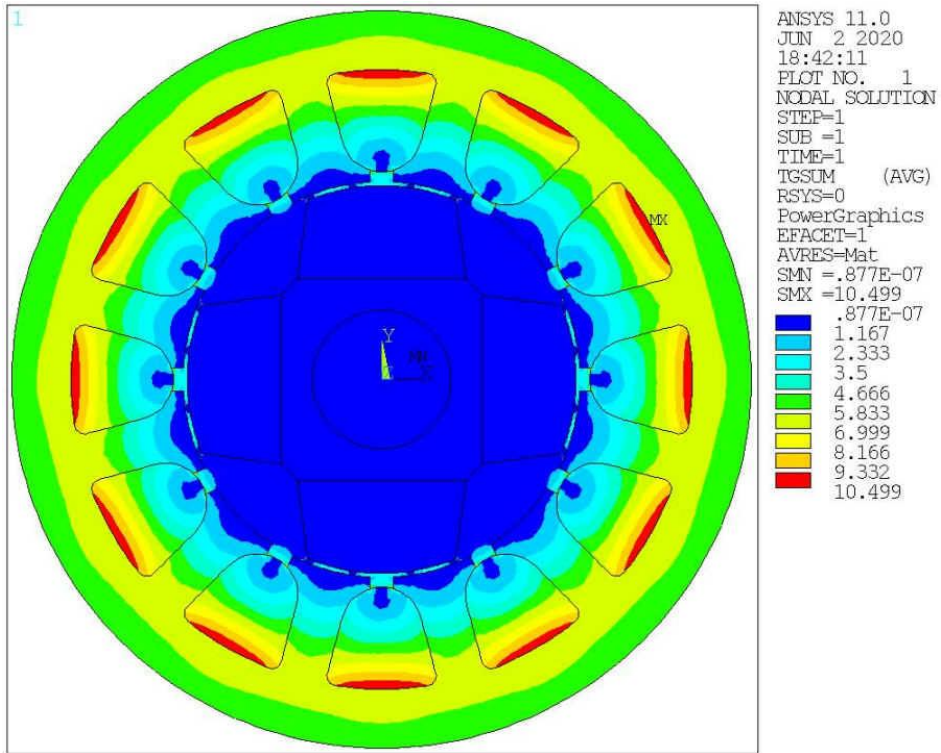


Рисунок 4.7 – Розподіл модуля вектора градієнта температури ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$)

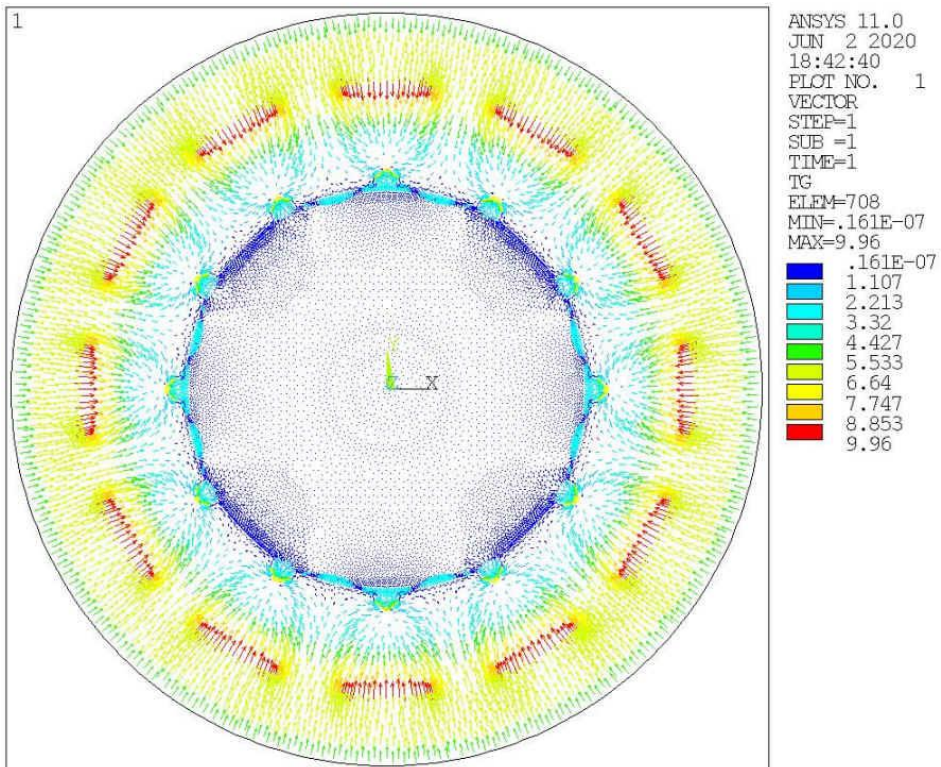


Рисунок 4.8 – Розподіл модуля вектора теплового градієнта у вигляді векторів ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$)

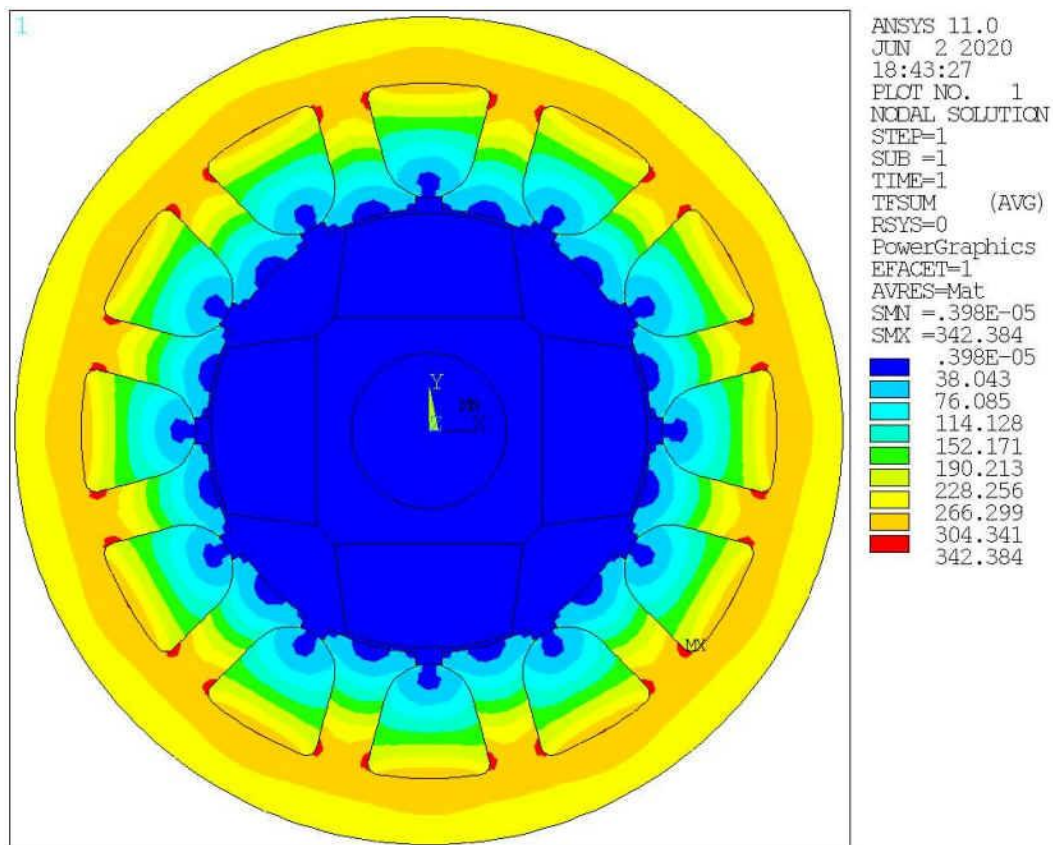


Рисунок 4.9 – Розподіл модуля вектора теплового потоку (Дж/с)

Отримані значення температури двигуна в режимі максимального навантаження $139\text{ }^{\circ}\text{C}$ – менше максимально допустимих значень (знаходяться в діапазоні режимів В-F). Дані результати дозволяють зробити висновок, що в процесі дослідженого тривалого циклу роботи змодельованого двигуна MITRON типу IPM недопустимого перегріву не відбувається.

4.2.2. Вентильний реактивний електродвигун

Вентильний реактивний електродвигун (switched reluctance motor, SRM) – безколекторна синхронна машина, на обмотки статора якого подаються імпульси напруги керованої частоти, що створюють обертове магнітне поле. Момент, що обертає виникає за рахунок прагнення ротора до положення, при якому магнітний потік статора проходить по осі ротора, виготовленого з магнітом'якого матеріалу, з найменшим магнітним опором [1].



Рисунок 4.10 – Конструкція вентиального реактивний електродвигуна

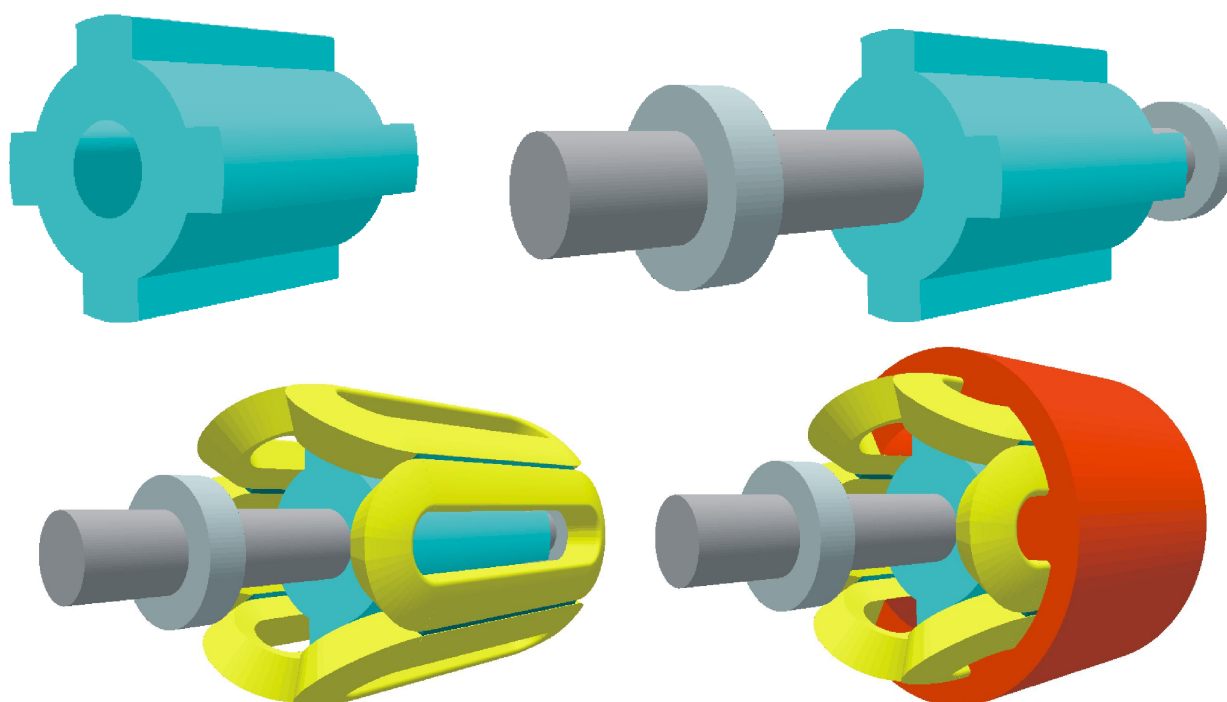
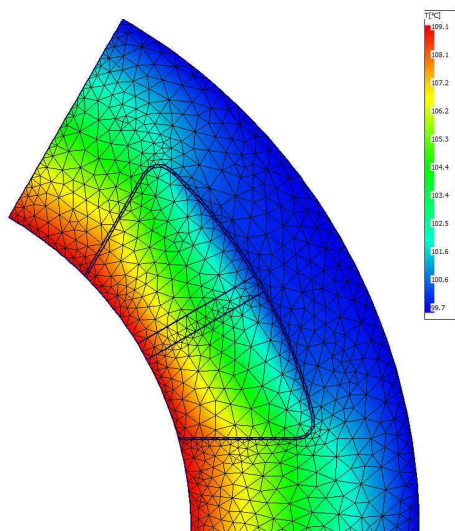
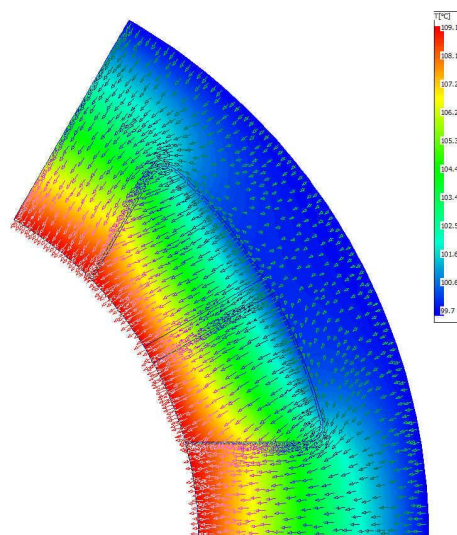


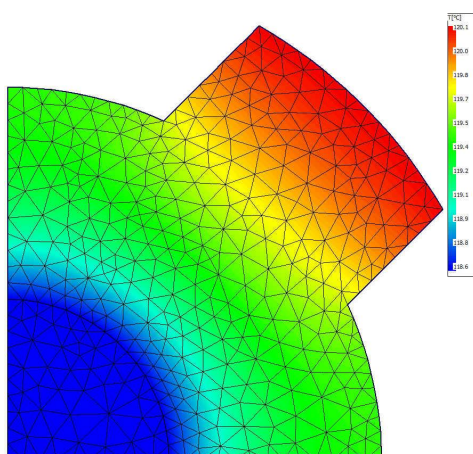
Рисунок 4.11 – Моделювання конструкції вентиального двигуна, аркуш 1



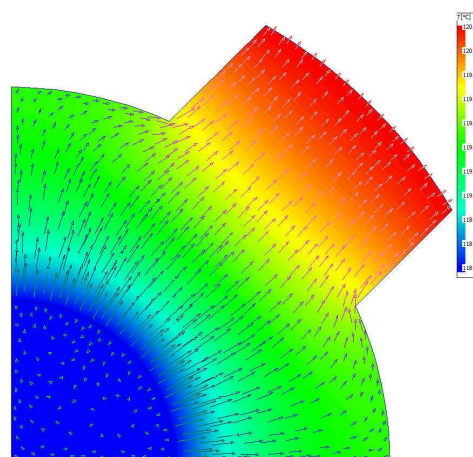
Сіткове представлення розподілу температурного поля в статорі



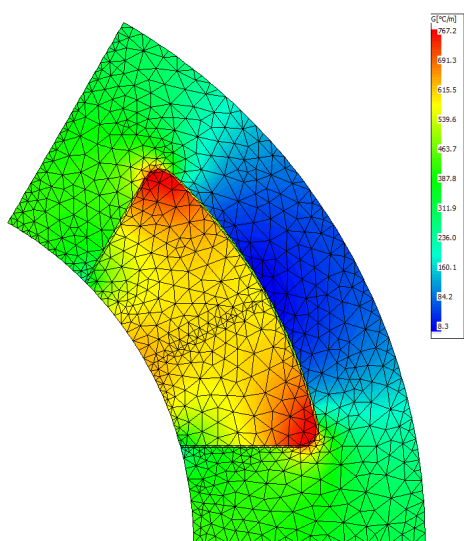
Векторне представлення розподілу температурного поля в статорі



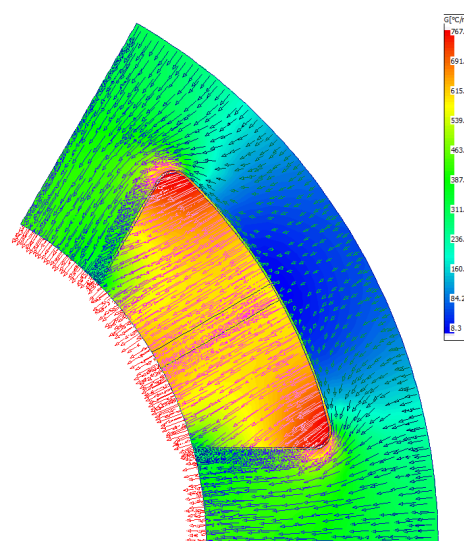
Сіткове представлення розподілу температурного поля в роторі



Векторне представлення розподілу температурного поля в роторі



Сіткове представлення розподілу температурного поля в мідній обмотці



Векторне представлення розподілу температурного поля в мідній обмотці

Рисунок 4.15 – Розподіл температурного поля вентильного двигуна

Подальше рішення теплової задачі зводиться до розгляду теплової схеми заміщення, де використовується аналогія із законом Ома для електричного кола. Термічні опори одержуються із простих геометричних фігур, на які можна розбити весь аналізований об'єм електричного двигуна. Аналіз теплової мережі схожий на електричну мережу і дозволяє отримати:

- термічний опір, по аналогії з електричним опором;
- джерела живлення, а не джерела струму (втрати);
- теплові ємності, а не електричні конденсатори;
- вузлові температури, а не напруги;
- потік потужності через опори, а не струм.

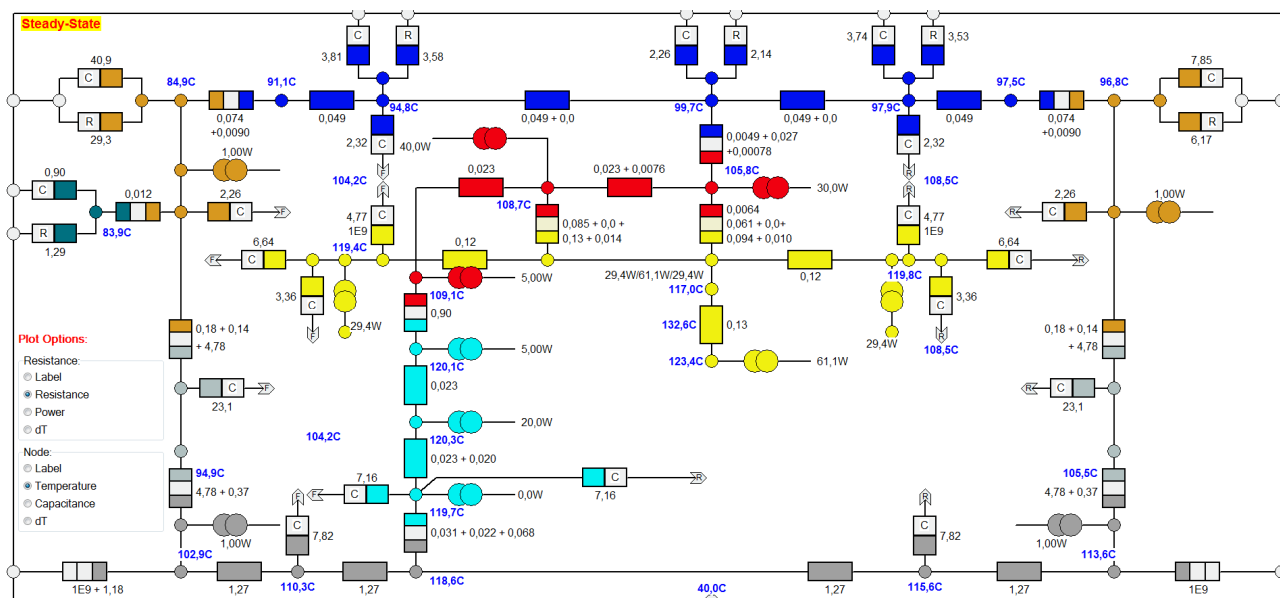


Рисунок 4.16 – Теплова схема заміщення вентиляторного двигуна: термічний опір

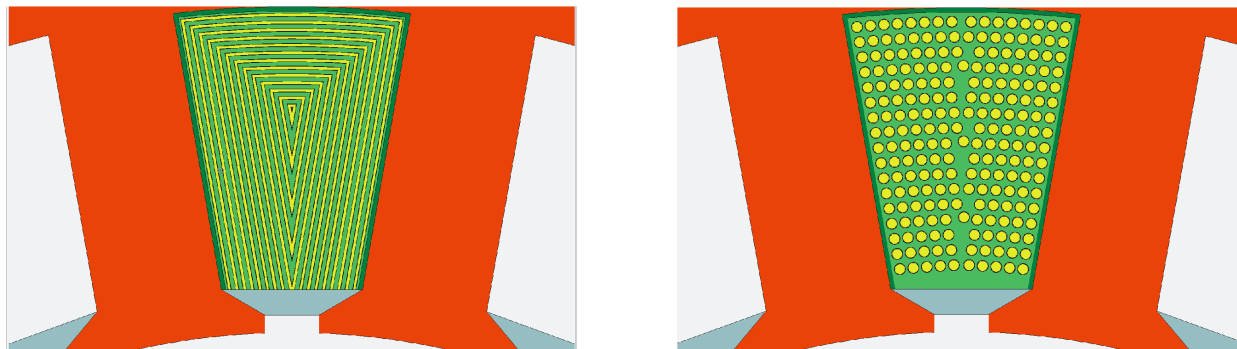


Рисунок 4.17 – Конфігурація обмотки

4.2.3. Синхронний двигун з поверхневим встановленням постійних магнітів (SPM).

Різновидів синхронних двигунів з поверхневим встановленням постійних магнітів є велика кількість. Серед них особливу цікавість представляють безщіткові синхронні машини з постійними магнітами (brushless permanent magnet motor, BPM), виготовлені за технологією SPM (surface permanent magnet).



Рисунок 4.18 – Конструкція синхронного двигуна BPM з SPM ротором

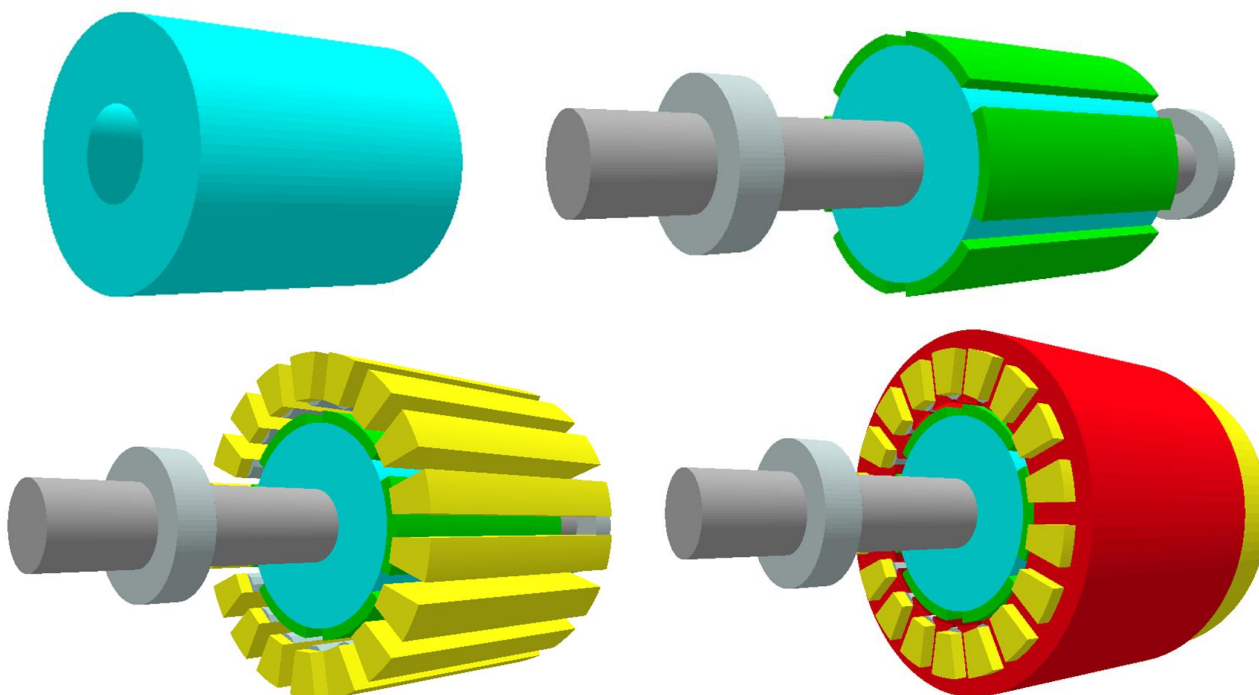


Рисунок 4.19 – Моделювання конструкції синхронного двигуна BPM, аркуш 1

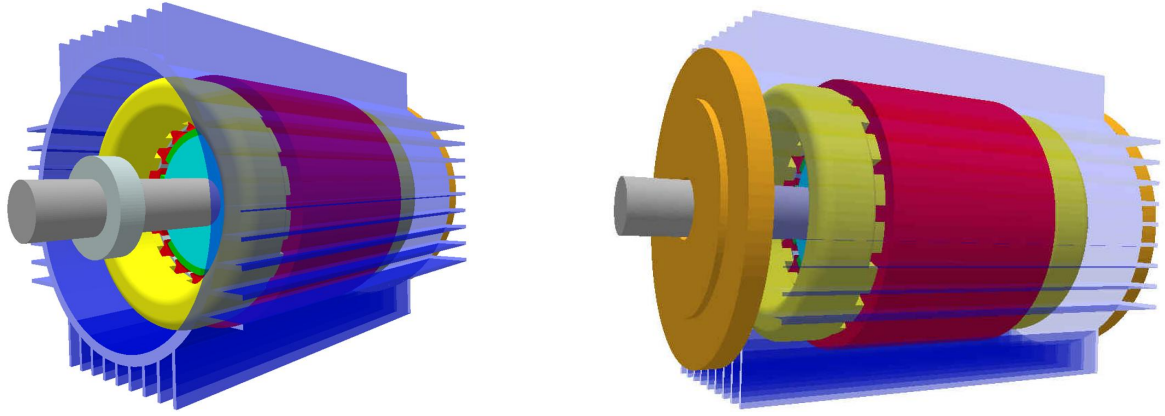


Рисунок 4.20 – Моделювання конструкції синхронного двигуна ВРМ, аркуш 2

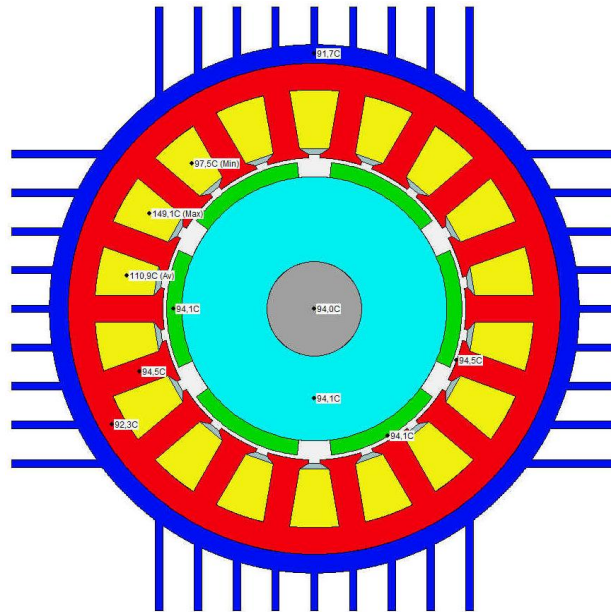


Рисунок 4.21 – Радіальна модель теплообміну синхронного двигуна ВРМ

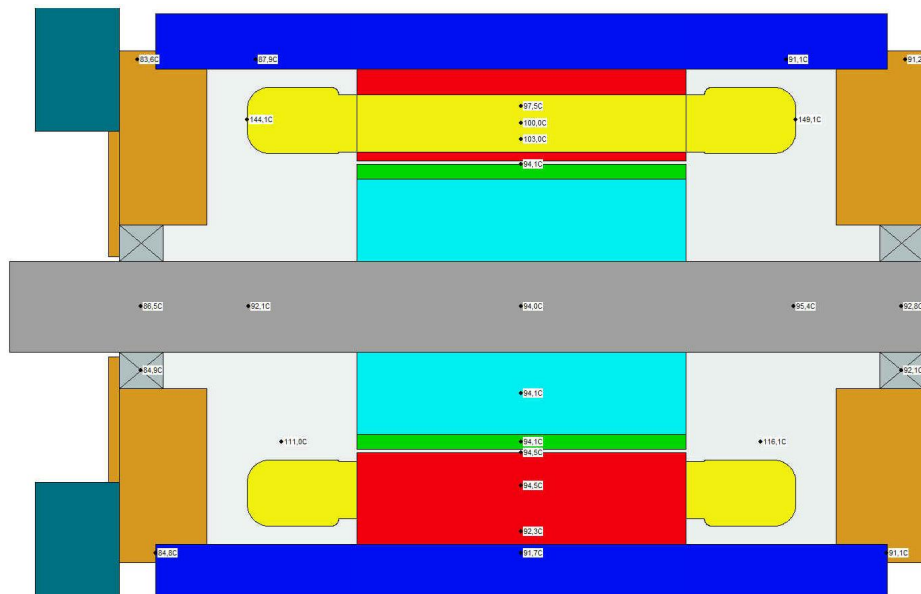
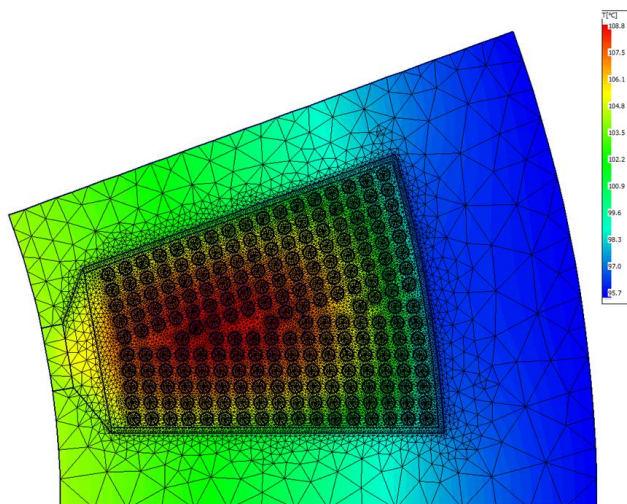
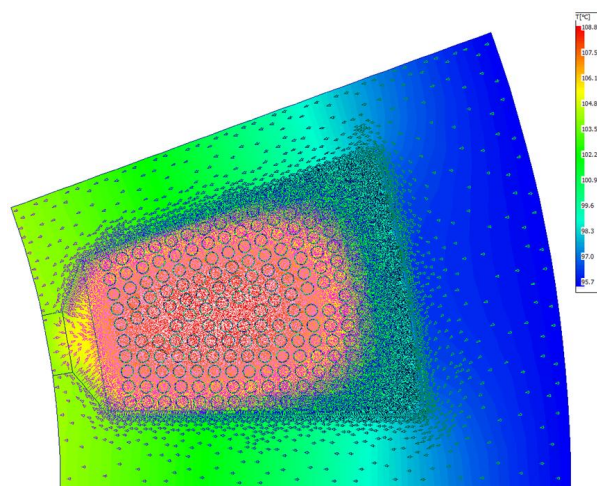


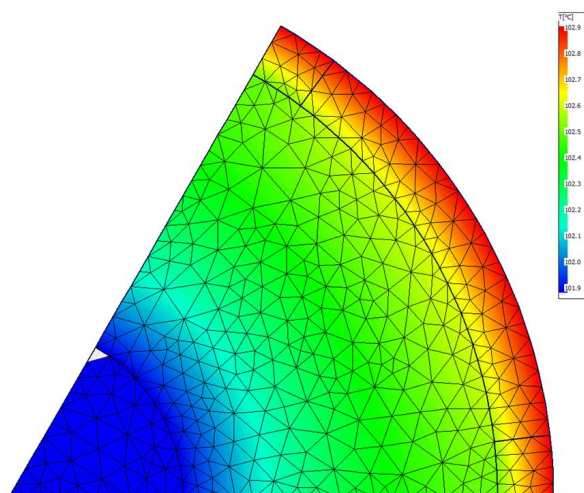
Рисунок 4.22 – Аксіальна модель теплообміну синхронного двигуна ВРМ



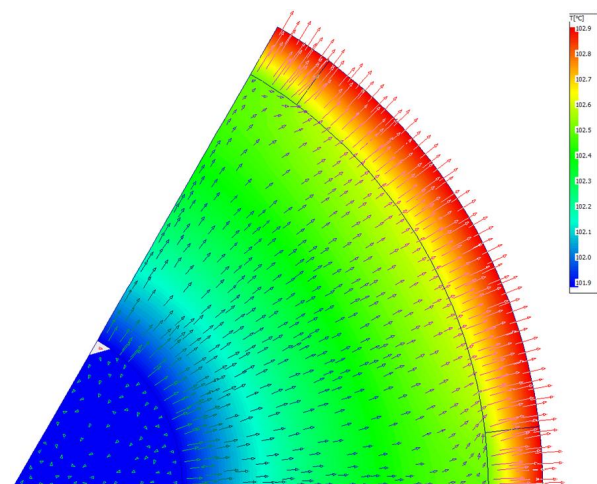
Сіткове представлення розподілу температурного поля в статорі та мідній обмотці



Векторне представлення розподілу температурного поля в статорі та мідній обмотці



Сіткове представлення розподілу температурного поля в роторі



Векторне представлення розподілу температурного поля в роторі

Рисунок 4.23 – Розподіл температурного поля синхронного двигуна ВРМ

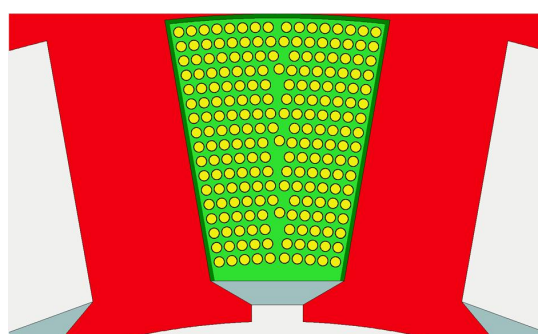
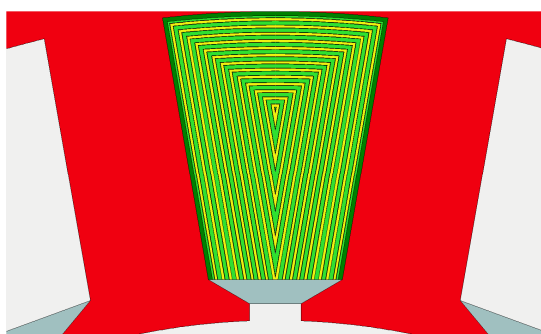


Рисунок 4.24 – Конфігурація обмотки

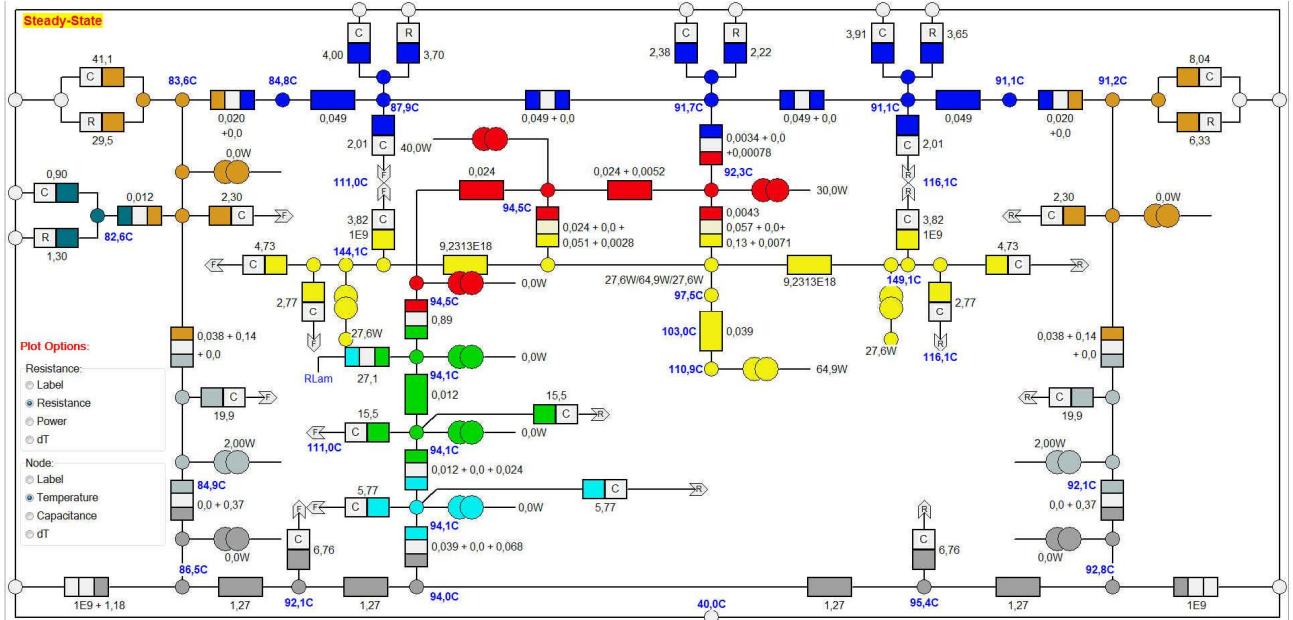


Рисунок 4.25 – Теплова схема заміщення синхронного двигуна ВРМ:
термічний опір

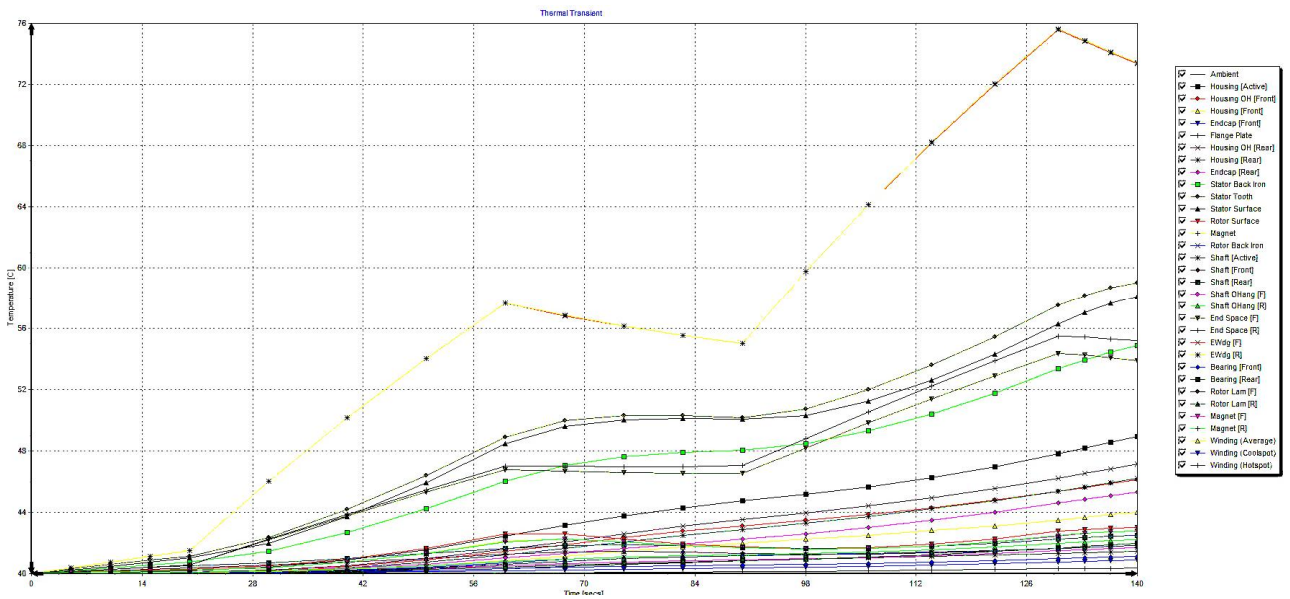


Рисунок 4.26 – Графік температурної залежності всіх елементів синхронного
двигуна ВРМ в повторно-короткочасному режимі роботи

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. В розділі розглянуті конструктивні особливості реальних синхронних двигунів на постійних магнітах: з поверхневим встановленням постійних магнітів (SPM), із вбудованими магнітами (IPM) та вентильних двигунів.

2. Для кожного типу представлених двигунів здійснено моделювання конструкції та обмоток, розподілу модуля вектора градієнта температури, розподілу модуля вектора теплового градієнта у вигляді векторів, розподілу модуля вектора теплового потоку, побудована радіальна та аксіальна модель теплообміну, сформоване сіткове та векторне представлення розподілу температурного поля в роторі, статорі та мідній обмотці.

3. За аналогією з аналізом електричних схем, побудовані теплові схеми заміщення синхронних двигунів на постійних магнітах відносно термічного опору.

4. Серед одержуваних результатів можливе також графічне представлення температурної залежності всіх конструктивних елементів синхронного двигуна тривалому або в повторно-короткочасному режимах роботи. Взагалі кажучи, може бути змодельований буд-який із відомих режимів роботи електричних машин – S1-S10.

5. Розроблена методика оцінки теплових полів з високою точністю може бути інтерпольована на електричні машини всіх типів і конструкцій, забезпечуючи аналіз температури компонентів двигуна в усталеному і перехідному режимах роботи.

6. Детальна інформація про теплообмін в електричних машинах дозволяє інженерам-розробникам обрати необхідний тип охолодження, здійснити його оптимізацію та значно підвищити вихідну потужність.

ВИСНОВКИ

1. В роботі проведений аналітичний огляд та аналіз науково-технічної та патентної інформації стосовно основної тематики дослідження, причому акцент здійснено на синхронні двигуни із збудженням на постійних магнітах. Приведено оригінальні класифікації електродвигунів та зокрема безконтактних електричних машин. Вказано на місце досліджуваних синхронних електродвигунів із збудженням на постійних магнітах та їх підвиди в загальній системі класифікації.

2. В роботі показано, що електромагнітне і теплове поля являються взаємкореляційними функціями. Здійснено симбіоз методик електромагнітних і теплових розрахунків, інтегрувавши їх в загальній математичній моделі, яка формує єдину картину загальних процесів, що протікають в електродвигунах.

3. Створено динамічну теплову модель електродвигуна, в якій враховано, що у тепловому відношенні це складний, неоднорідний за матеріалом об'єкт, який має розосереджені внутрішні джерела тепла, інтенсивність яких залежить від матеріалу кожної складової, режиму роботи, тепловіддачі, тощо. На основі створеної моделі здійснено аналіз двох найбільш важких режимів роботи: тривалого режимі S1 та повторно-короткочасного S3. Доказано, що дана методика може бути поширена на змішані режими S4-S10.

4. У роботі набув удосконалення метод середніх втрат, який дозволяє оцінювати середню температуру перегріву, не вдаючись до побудови діаграм теплових процесів. Даний метод було поширено також на тепловий аналіз електродвигуна методом еквівалентного струму та еквівалентного моменту. Причому, метод еквівалентного моменту можна з легкістю застосовувати як для перевірки синхронних, так і асинхронних двигунів, а також для двигунів незалежного збудження при роботі з номінальним потоком.

5. Здійснено аналіз та вибір методу моделювання, серед яких найбільш придатними методами для загального моделювання процесів магнітних і теплових полів, а також обліку нелінійності феромагнітних властивостей є чисельні методи. Чисельне рішення рівнянь поля за допомогою програмно-апаратних засобів та спеціальних програм, оснований, наприклад, на методах скінченних різниць

(MCP) або скінченних елементів (MCE) та інших, дозволяє практично без будь-яких спрощень і припущень з високою точністю розрахувати розподіл поля в будь-якому електромеханічному пристрої.

6. Побудовано спрощену узагальнену модель та схему теплообміну електричного двигуна, на основі якої проведено моделювання у середовищі MatLab&Simulink. В результаті одержано моделі для визначення поля температури міді та сталі з відповідними підсистемами теплових втрат. Процеси нагрівання і охолодження в двигуні в цьому випадку описуються системою диференціальних рівнянь другого порядку.

7. В роботі здійснено 3D моделювання реальних синхронних двигунів на постійних магнітах: з поверхневим встановленням постійних магнітів (SPM), із вбудованими магнітами (IPM) та вентильних двигунів. Для кожного типу представлених двигунів здійснено моделювання конструкції та обмоток, розподілу модуля вектора градієнта температури, розподілу модуля вектора теплового градієнта у вигляді векторів, розподілу модуля вектора теплового потоку, побудована радіальна та аксіальна модель теплообміну, сформоване сіткове та векторне представлення розподілу температурного поля в роторі, статорі та мідній обмотці. За аналогією з аналізом електричних схем, побудовані теплові схеми заміщення синхронних двигунів на постійних магнітах відносно термічного опору.

8. Математичне моделювання синхронних двигунів на постійних магнітах, направлене на вивчення теплових процесів виявило універсальність даної методики для всіх інших всіх типів і конструкцій електричних машин, забезпечуючи аналіз температури компонентів двигуна в будь-яких режимах його роботи.

9. Детальна інформація про теплообмін в електричних машинах дозволяє інженерам-розробникам обрати необхідний тип охолодження, здійснити його оптимізацію та значно підвищити енергетичну ефективність та вихідну потужність.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Копылов И. П. Электрические машины. – М.: Высш. шк., 2000. – 607 с.
2. Анненков А. Н. Анализ теплового поля на постоянных магнитах с применением обратных связей по температурам/ А. Н. Анненков, С. С. Акимов // Журнал “Энергия-XXI век”. – Воронеж: 2013, – №1 (84), – С. 35-39.
3. Акимов С. С. Создание уточненной методики теплового расчета бесконтактного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов: автореф. дис. – М.: 2017. – 20 с.
4. Беспалов В. Я. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя / В. Я. Беспалов, Ю. А. Мощинский, В. И. Цуканов // Электричество, 2003. – №4. – С. 20-26.
5. Документація Simulink: URL: <https://docs.exponenta.ru/simulink/index.html>. (дата звернення: 7.05.2020).
6. Система конечноэлементных расчётов FEMLAB 3.x. Документация. URL: http://matlab.exponenta.ru/femlab/book6/2_1_4.php (дата звернення: 9.09.2020).
7. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание, 2007. – 288 стр.
8. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. Питер. 2002. – 528 с., ил.
9. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.
10. Герман-Галкин С. Г. Линейные электрические цепи. Лабораторные работы. – СПб.: КОРОНА принт, 2002. – 320 с., ил.
11. Чарльз Генри. Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB / Г. Э. Чарльз, Д. Э. Пенни // 3-е издание. Киев.: Диалектика-Вильямс, 2007. – 126 с.

12. Ansys Motor-CAD: URL: <https://www.motor-design.com/motor-cad/> (дата звернення: 16.06.2020).
13. Черных И. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ИД Питер, 2007, – 288 с.
14. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая Линия – Телеком, 2007. – 288 стр.
15. Гандер В. Решение задач в научных вычислениях с применением Maple и MATLAB / В. Гандер, И. Гржебичек // – М.: Вассамедина, 2005. – 520 с.
16. Поршнева С. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 256 с.
17. Красников Г. Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics / Г. Е. Красников, О. В. Нагорнов, Н. В. Старостин // – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.
18. Pryor R. W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. Jones & Bartlett Publishers, Inc., 2011, – 872 p.
19. Бирюлин Г. В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB. Методическое пособие. СПб.: ГУИТМО, 2006. – 234 с.



1

Хмельницький національний університет
Кафедра телекомунікацій, медійних
та інтелектуальних технологій

Власюк Максим Юрійович

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННИХ
ДВИГУНІВ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ**

Науковий керівник – к.т.н., доцент, Стецюк В. І.

Хмельницький, 2020 р.

ДОДАТОК А
(обов'язковий)
СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ



МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

2

Підвищення ефективності синхронних двигунів на постійних магнітах шляхом мінімізації теплових втрат

НАУКОВІ ЗАДАЧІ

- 1) провести класифікацію електричних машин, зокрема безконтактних електродвигунів;
- 2) здійснити аналіз методів моделювання процесів електромагнітних і теплових полів та визначити рівень їх взаємодіяції; на основі обраних методів створити динамічну теплову модель синхронного електродвигуна та провести її дослідження в різних режимах роботи;
- 3) провести імітаційне моделювання теплових режимів синхронного електродвигуна із визначенням температурних полів та рівня втрат в основних конструктивних складових;
- 4) перевірити результати досліджень та моделювання для реальних конструкцій найбільш поширених типів синхронних електродвигунів із збудженням від постійних магнітів.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ: теплові процеси електричних машин

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ: електричні машини, зокрема синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів



НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3

Удосконалено методику розрахунку теплових полів електричних машин.

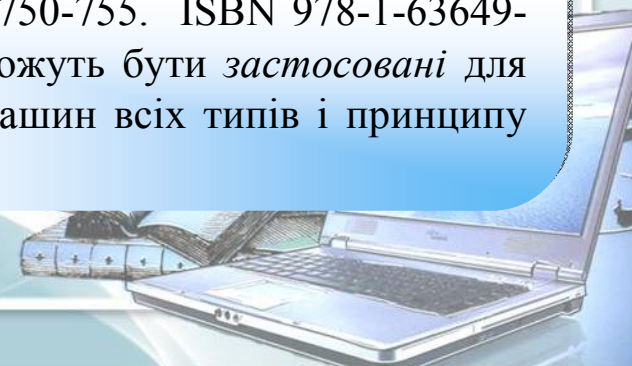
Розроблено оригінальну методику розрахунку теплових втрат для конкретних моделей синхронних двигунів – з поверхневим встановленням постійних магнітів (SPM), із вбудованими магнітами (IPM) та вентильних двигунів.

Розроблено оригінальну динамічну теплову модель синхронного електродвигуна та проведено її дослідження в тривалому та повторно-короткочасному режимах роботи.

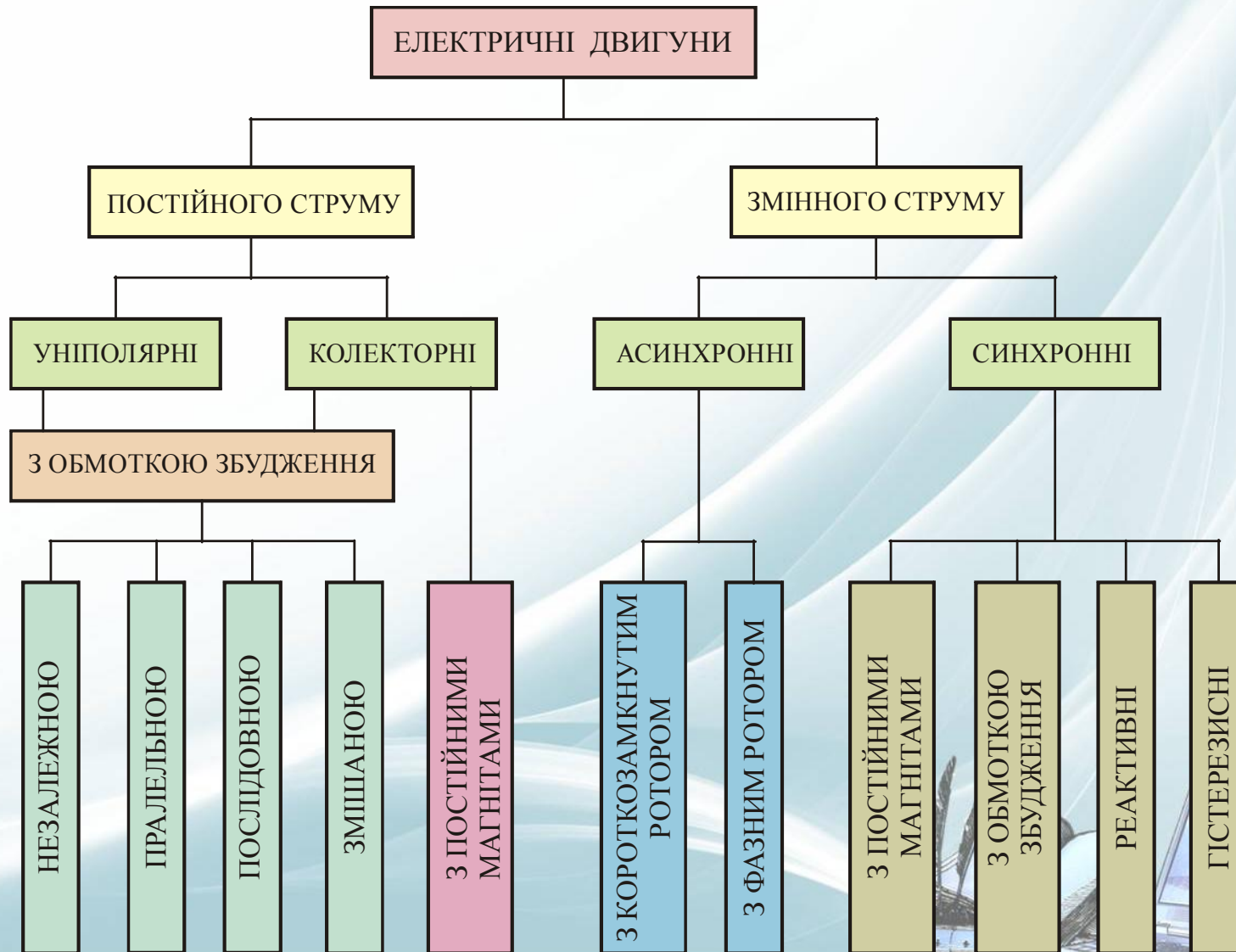
За аналогією з аналізом електричних схем, побудовані теплові схеми заміщення синхронних двигунів на постійних магнітах відносно термічного опору.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.

Робота пройшла апробацію на міжнародній конференції Ванкувер, Канада: Стецюк В. І. Моделювання температурних режимів електричних машин в середовищі MATLAB/FEMLAB / В. І. Стецюк, М. Ю. Власюк // X Міжнародна науково-практична конференція “TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MODERN SCIENTIFIC THOUGHT”, Ванкувер, Канада 23-26 листопада 2020. – С. 750-755. ISBN 978-1-63649-921-5. DOI: 10.46299/ISG.2020.II.X. Одержані результати можуть бути застосовані для проектування, виготовлення та експлуатації електричних машин всіх типів і принципу дії.

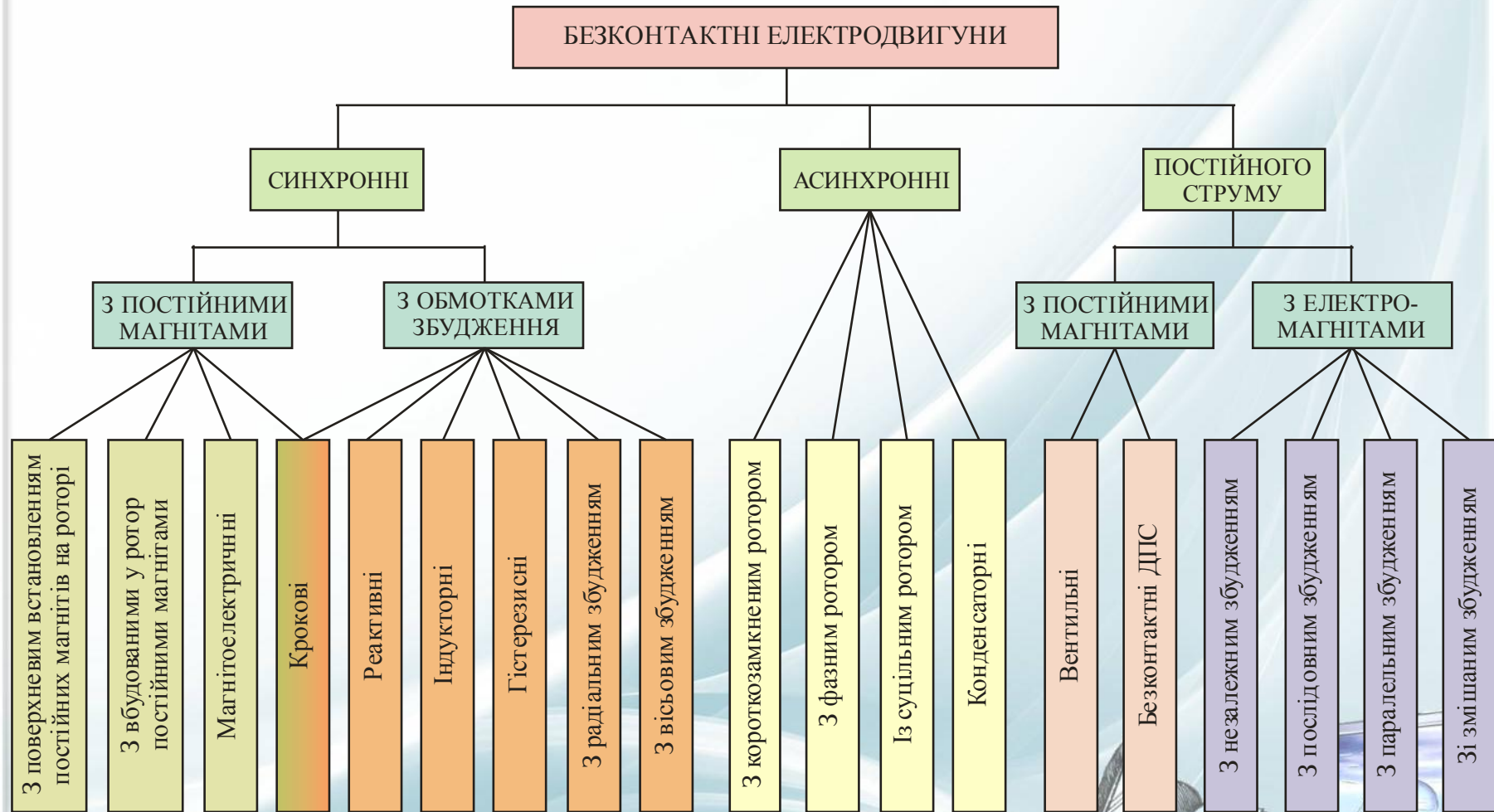


КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН



КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

5



ЗАГАЛЬНА ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

6.1

Сумарну величину теплових втрат в вузлах синхронного двигуна на постійних магнітах можна оцінити через тепловий потік. І ця величина теплового потоку від будь-якого існуючого фізичного тіла являється універсальним показником якості, який вказує на енергетику і здатність пристрою чи вузла відпрацювати необхідний ресурс. Фактичні значення температури у вузлах електродвигуна і їх відносна різниця з відповідними гранично допустимими значеннями є показником оптимальності спроектованого пристрою. При цьому повинно виконуватися наступне критеріальне співвідношення:

$$\frac{T_{i\max} - T_i}{T_{i\max}} \leq 1 - C_0 \quad (5.1)$$

$T_{i\max}$ – гранично допустиме значення температури вузла (області) двигуна;

T_i – значення температури відповідного вузла;

C_0 – рекомендований запас, обумовлений певним інженерним досвідом побудови електричних машин.

Закон збереження енергії:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (5.2)$$

де dQ_1 – кількість теплоти, що потрапляє із ззовні в елементарний об'єм через теплопровідність системи за час $d\tau$,

dQ_2 – кількість теплоти, що буде виділятися в елементарному об'ємі dV за час $d\tau$ через вплив внутрішніх джерел;

dQ – зміна внутрішньої енергії за певний проміжок часу $d\tau$, в елементарному об'ємі dV .



ЗАГАЛЬНА ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

6.2

Кількість теплоти dQ , що надходить у систему об'ємом dV за рахунок теплопровідності:

$$dQ_1 = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz d\tau \tag{5.3}$$

Зміна внутрішньої енергії dQ :

$$dQ = C_V \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau d\vartheta = c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau d\vartheta \tag{5.4}$$

де C_V – теплоємність одиниці об'єму, [Дж/(м³·К)];
 c_V – теплоємність одиниці маси, [Дж/(кг·К)];
 ρ – щільність речовини, [кг·м³].

Повна потужність теплових втрат: $P = -\sigma_t \frac{S \Delta t}{l_n} \tag{5.5}$

де S – площа перетину паралелепіпеда, Δt – різниця температур, l_n – лінійні розміри об'єкта охолодження.

Щільність теплового потоку через плоску стінку:

$$q = -\sigma_t \frac{dt}{dx} = \frac{\sigma_t (t_1 - t_2)}{l} = \frac{t_1 - t_2}{R_t}, \tag{5.6}$$

$$R_t = \frac{l}{\sigma_t}.$$

де R_t – термічний опір плоскої стінки.

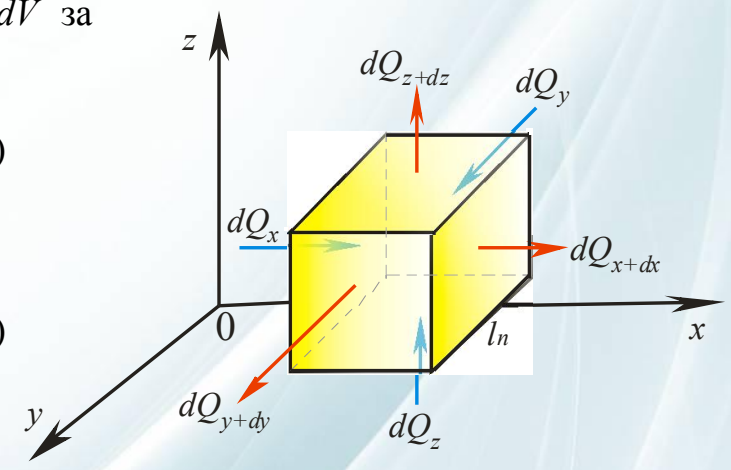


Рисунок 5.1 – Об'ємний розподіл теплових потоків



ДИНАМІЧНА ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

7

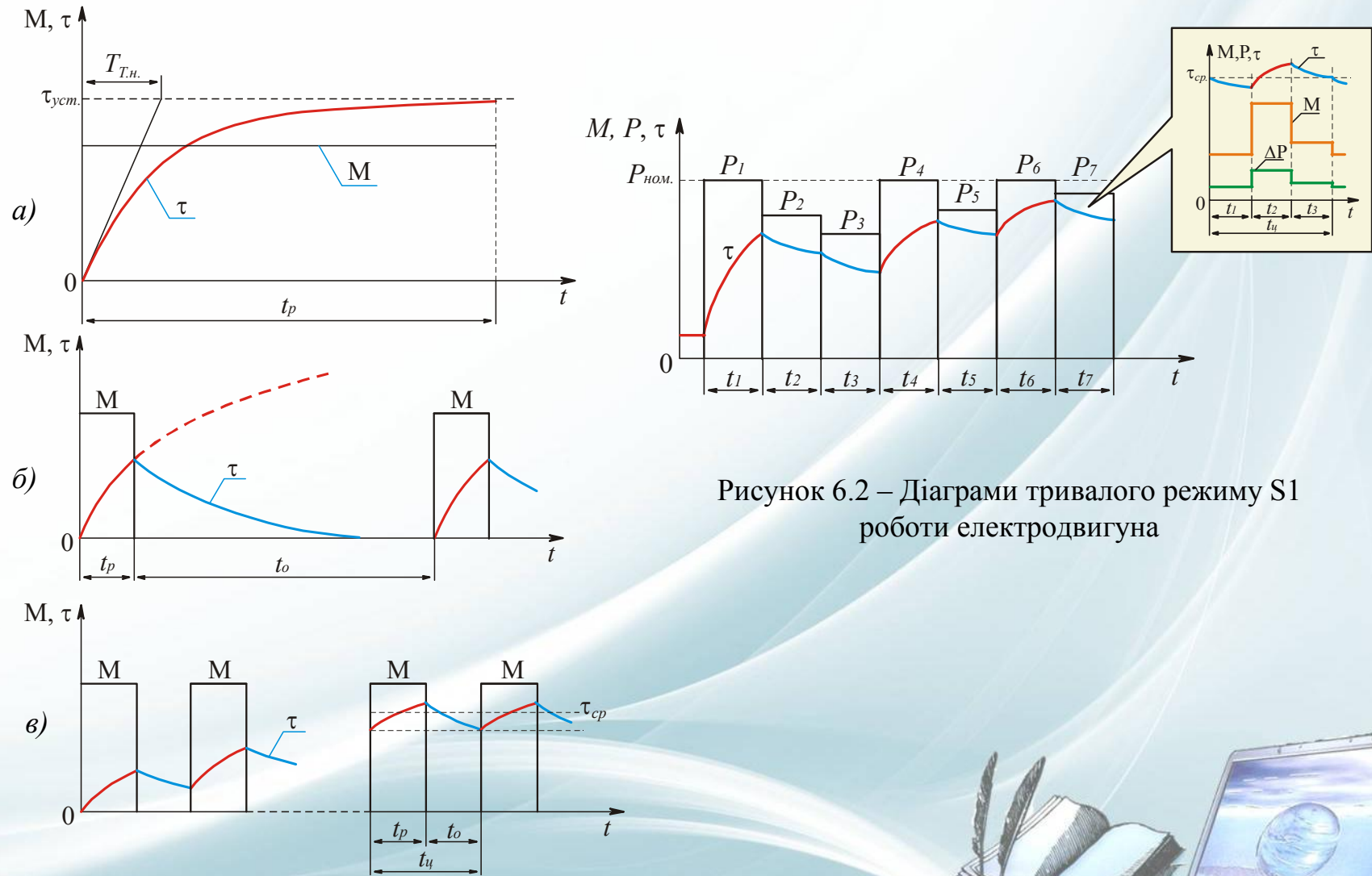


Рисунок 6.2 – Діаграми тривалого режиму S1 роботи електродвигуна

Рисунок 6.1 – Діаграми тривалого S1 (а), короткочасного S2 (б) і повторно-короткочасного S3 (в) режимів роботи електродвигуна



УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМІНУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

8

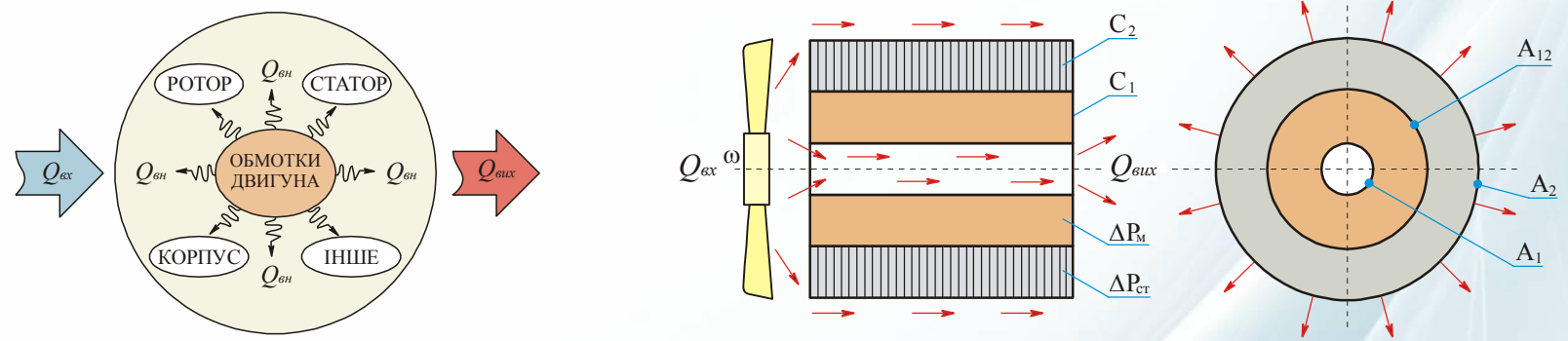


Рисунок 7.1 – Узагальнена модель теплообміну електричного двигуна:

$Q_{вх}$ – вхідний тепловий потік; $Q_{вих}$ – вихідний тепловий потік; $Q_{вн}$ – внутрішній тепловий потік; C_1 – теплоємність обмотки статора; C_2 – теплоємність зовнішнього корпусу; ΔP_M – потужність теплових втрат у міді; $\Delta P_{ст}$ – потужність теплових втрат у сталі; A_1 – коефіцієнт тепловіддачі від міді статора у зовнішнє середовище; A_2 – коефіцієнт тепловіддачі від сталі у зовнішнє середовище; A_{12} – коефіцієнт тепловіддачі між міддю і сталлю

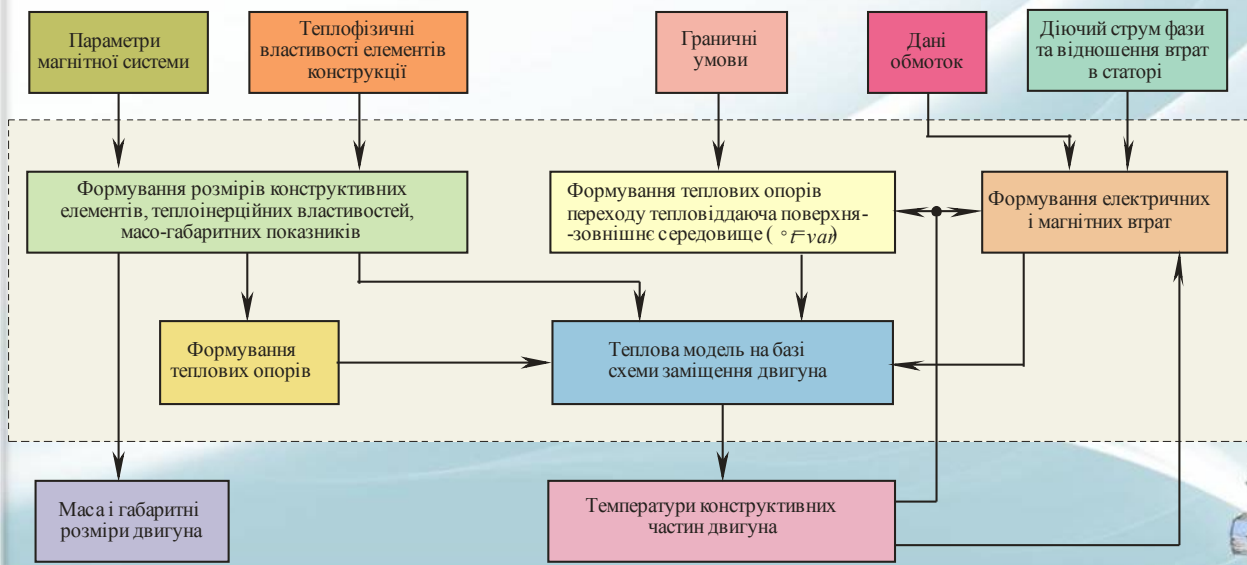


Рисунок 7.2 – Структурна схема узагальненої теплової моделі.



ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

9

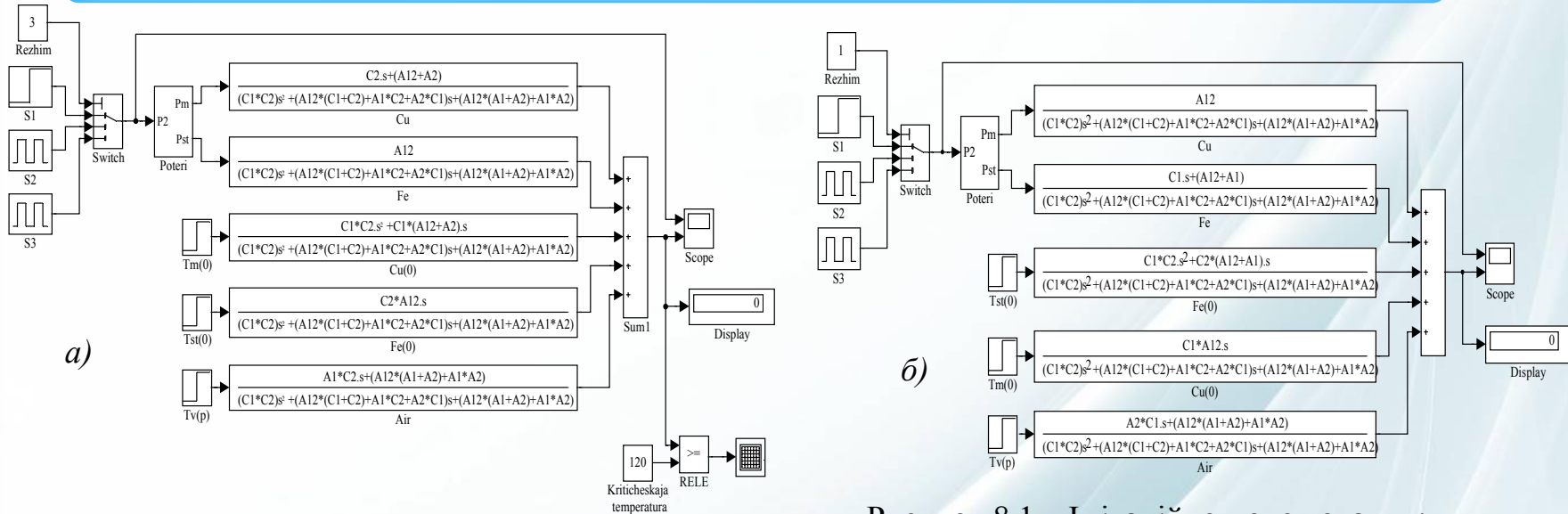
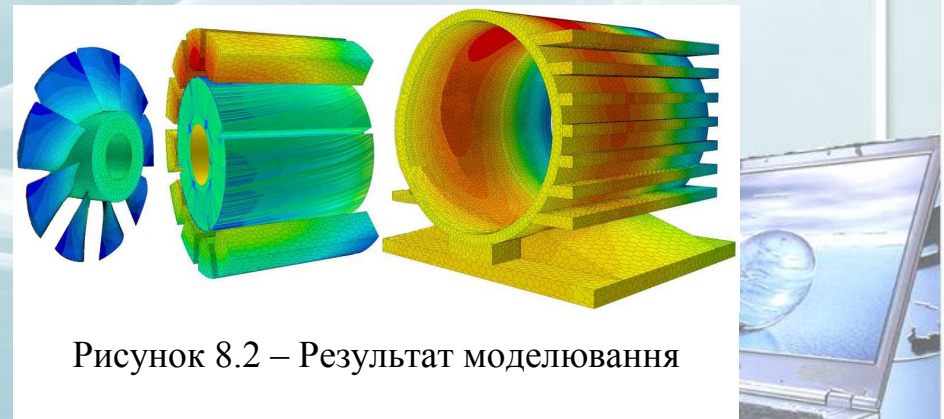
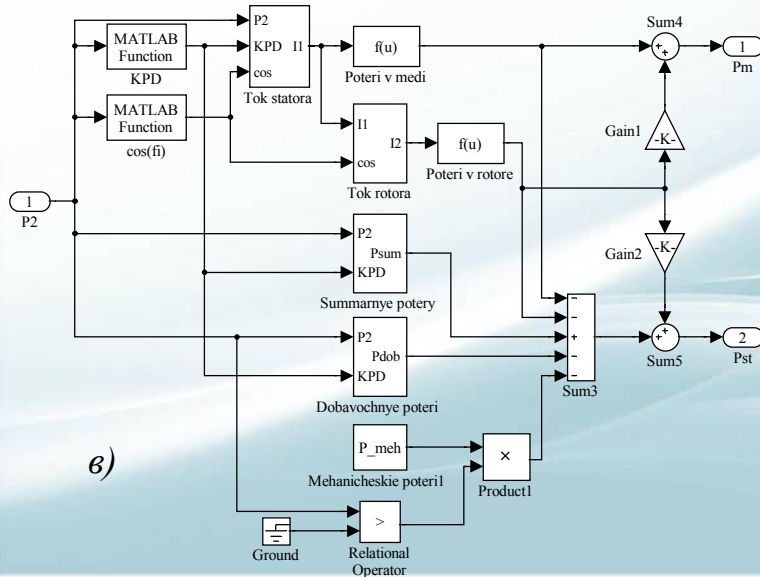


Рисунок 8.1 – Імітаційне моделювання:
 а) схема моделі для визначення поля температури міді;
 б) схема моделі визначення поля температури сталі;
 в) розгорнута схема підсистеми теплових втрат.



ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ НА ПРИКЛАДАХ РЕАЛЬНИХ ДВИГУНІВ

10.1



Рисунок 9.1 – Фото реального синхронного двигуна MITRON типу IPM

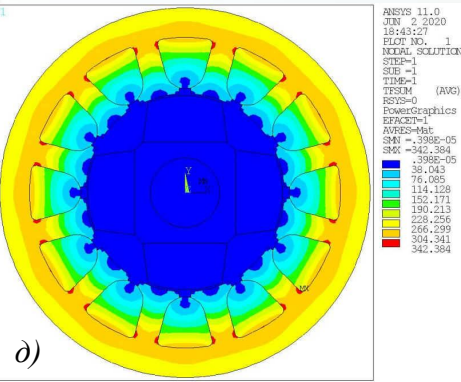
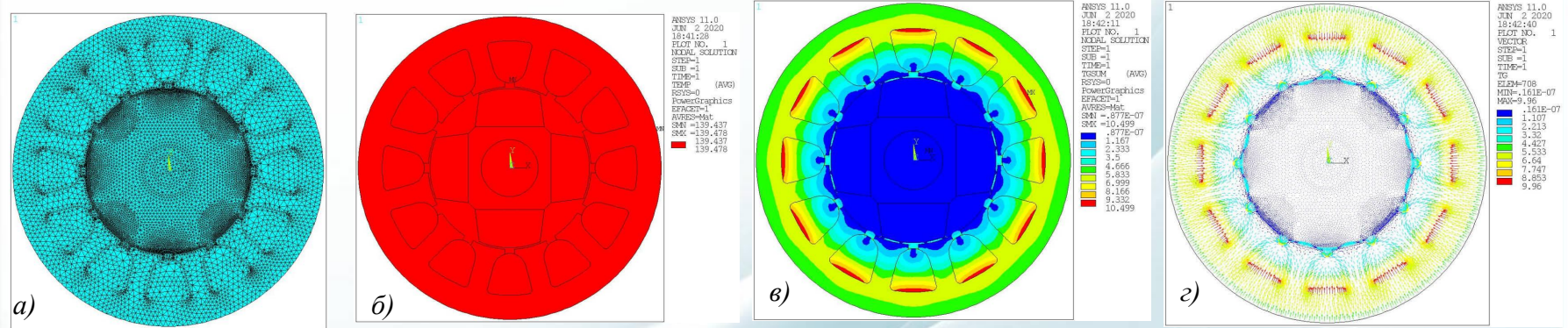
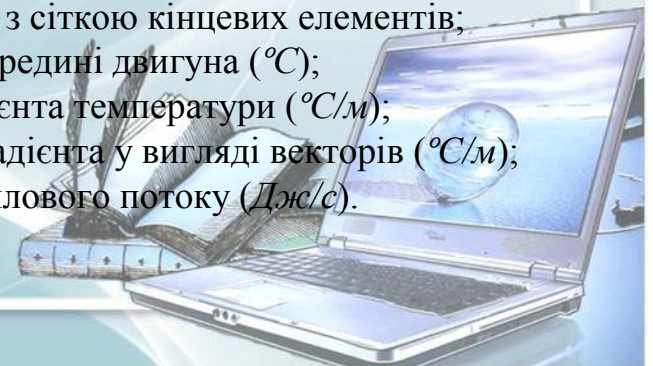


Рисунок 9.2 – Результати моделювання СДПМ типу IPM
 а) геометрія активної частини СДПМ з сіткою кінцевих елементів;
 б) значення температури всередині двигуна (°C);
 в) розподіл модуля вектора градієнта температури (°C/m);
 г) розподіл модуля вектора теплового градієнта у вигляді векторів (°C/m);
 д) розподіл модуля вектора теплового потоку (Дж/с).



ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ НА ПРИКЛАДАХ РЕАЛЬНИХ ДВИГУНІВ

10.2

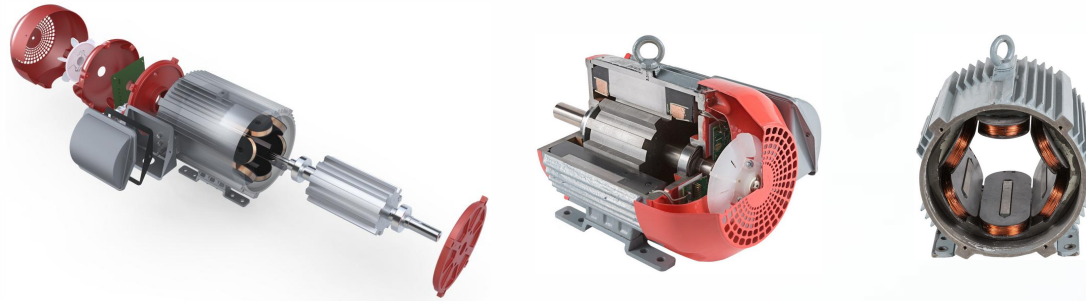


Рисунок 9.3 – Конструкція вентильного реактивного електродвигуна

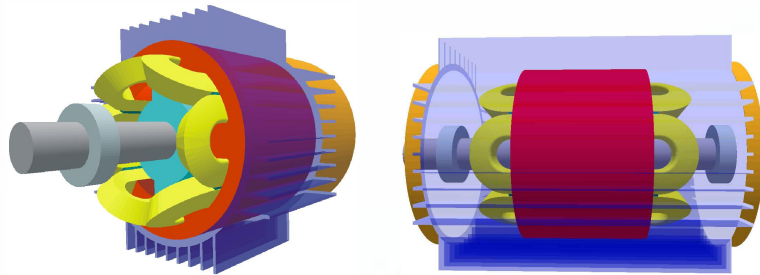


Рисунок 9.4 – Моделювання конструкції вентильного двигуна

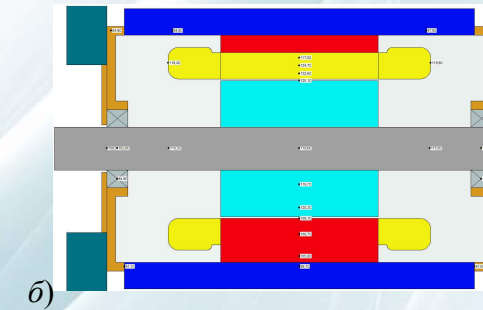
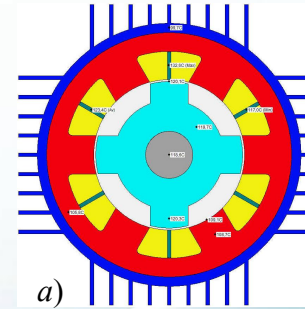


Рисунок 9.5 – Радіальна (а) та аксіальна (б) моделі теплообміну вентильного двигуна

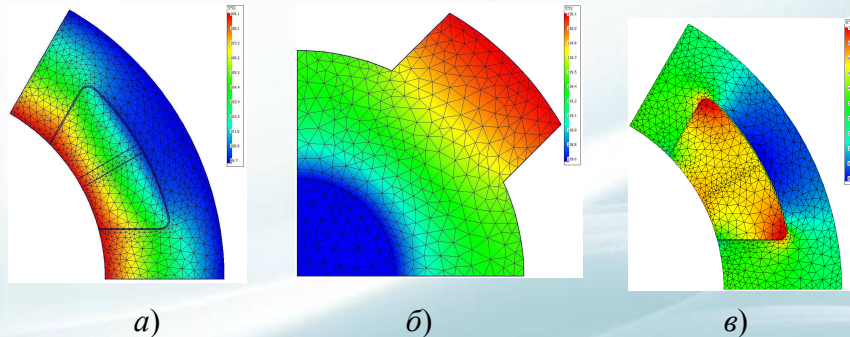


Рисунок 9.6 – Сіткове представлення розподілу температурного поля : а) в статорі; б) в роторі; в) в мідній обмотці

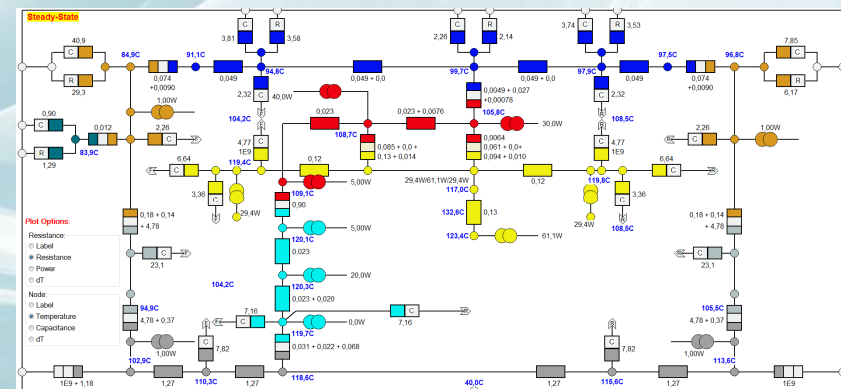


Рисунок 9.7 – Теплова схема заміщення вентильного двигуна: термічний опір

ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ НА ПРИКЛАДАХ РЕАЛЬНИХ ДВИГУНІВ

10.3



Рисунок 9.8 – Конструкція вентильного реактивного електродвигуна

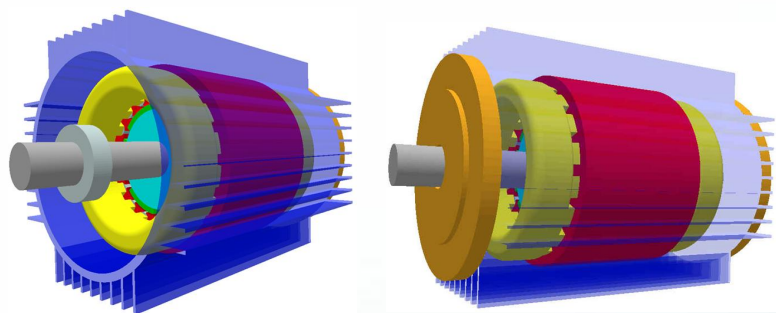


Рисунок 9.9 – Моделювання конструкції вентильного двигуна

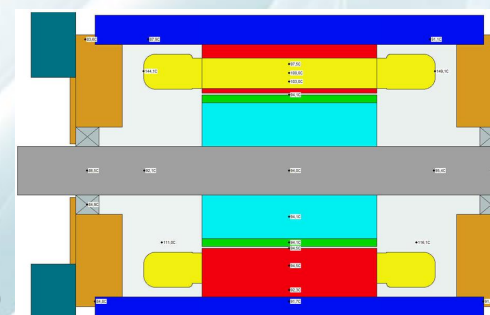
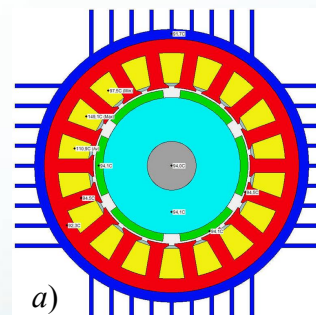
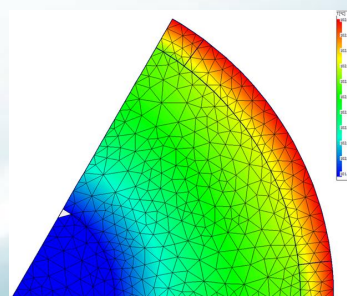
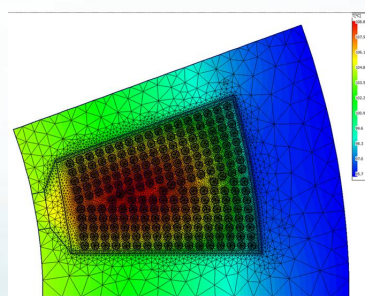


Рисунок 9.10 – Радіальна (а) та аксіальна (б) моделі теплообміну вентильного двигуна



а)

б)

Рисунок 9.11 – Сіткове представлення розподілу температурного поля : а) в статорі та мідній обмотці; б) в роторі

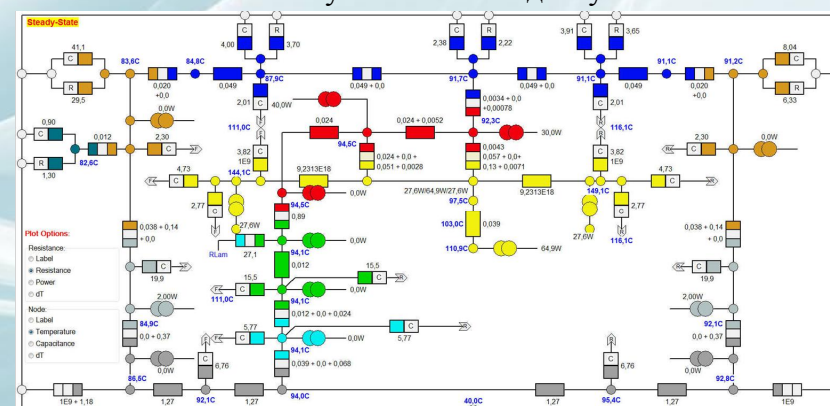


Рисунок 9.12 – Теплова схема заміщення вентильного двигуна: термічний опір

ВИСНОВКИ

11

1. В роботі проведений аналітичний огляд та аналіз науково-технічної та патентної інформації стосовно основної тематики дослідження, причому акцент здійснено на синхронні двигуни із збудженням на постійних магнітах. Приведено оригінальні класифікації електродвигунів та зокрема безконтактних електричних машин. Вказано на місце досліджуваних синхронних електродвигунів із збудженням на постійних магнітах та їх підвиди в загальній системі класифікації.

2. В роботі показано, що електромагнітне і теплове поля являються взаємокореляційними функціями. Здійснено симбіоз методик електромагнітних і теплових розрахунків, інтегрувавши їх в загальній математичній моделі, яка формує єдину картину загальних процесів, що протікають в електродвигунах.

3. Створено динамічну теплову модель електродвигуна, в якій враховано, що у тепловому відношенні це складний, неоднорідний за матеріалом об'єкт, який має розосереджені внутрішні джерела тепла, інтенсивність яких залежить від матеріалу кожної складової, режиму роботи, тепловіддачі, тощо. На основі створеної моделі здійснено аналіз двох найбільш важких режимів роботи: тривалого режимі S1 та повторно-короткочасного S3. Доказано, що дана методика може бути поширена на змішані режими S4-S10.

4. У роботі набув удосконалення метод середніх втрат, який дозволяє оцінювати середню температуру перегріву, не вдаючись до побудови діаграм теплових процесів. Даний метод було поширено також на тепловий аналіз електродвигуна методом еквівалентного струму та еквівалентного моменту. Причому, метод еквівалентного моменту можна з легкістю застосовувати як для перевірки синхронних, так і асинхронних двигунів, а також для двигунів незалежного збудження при роботі з номінальним потоком.

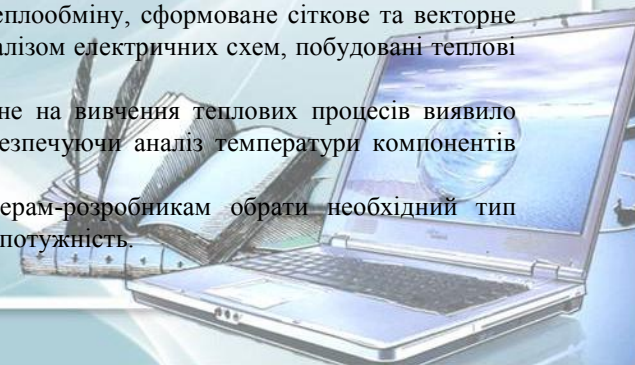
5. Здійснено аналіз та вибір методу моделювання, серед яких найбільш придатними методами для загального моделювання процесів магнітних і теплових полів, а також обліку нелінійності феромагнітних властивостей є чисельні методи. Чисельне рішення рівнянь поля за допомогою програмно-апаратних засобів та спеціальних програм, оснований, наприклад, на методах скінченних різниць (MCP) або скінченних елементів (MCE) та інших, дозволяє практично без будь-яких спрощень і припущень з високою точністю розрахувати розподіл поля в будь-якому електромеханічному пристрої.

6. Побудовано спрощену узагальнену модель та схему теплообміну електричного двигуна, на основі якої проведено моделювання у середовищі MatLab&Simulink. В результаті одержано моделі для визначення поля температури міді та сталі з відповідними підсистемами теплових втрат. Процеси нагрівання і охолодження в двигуні в цьому випадку описуються системою диференціальних рівнянь другого порядку.

7. В роботі здійснено 3D моделювання реальних синхронних двигунів на постійних магнітах: з поверхневим встановленням постійних магнітів (SPM), із вбудованими магнітами (IPM) та вентильних двигунів. Для кожного типу представлених двигунів здійснено моделювання конструкції та обмоток, розподілу модуля вектора градієнта температури, розподілу модуля вектора теплового градієнта у вигляді векторів, розподілу модуля вектора теплового потоку, побудована радіальна та аксіальна модель теплообміну, сформоване сіткове та векторне представлення розподілу температурного поля в роторі, статорі та мідній обмотці. За аналогією з аналізом електричних схем, побудовані теплові схеми заміщення синхронних двигунів на постійних магнітах відносно термічного опору.

8. Математичне моделювання синхронних двигунів на постійних магнітах, направлене на вивчення теплових процесів виявило універсальність даної методики для всіх інших всіх типів і конструкцій електричних машин, забезпечуючи аналіз температури компонентів двигуна в будь-яких режимах його роботи.

9. Детальна інформація про теплообмін в електричних машинах дозволяє інженерам-розробникам обрати необхідний тип охолодження, здійснити його оптимізацію та значно підвищити енергетичну ефективність та вихідну потужність.



International Science Group

ISG-KONF.COM

**TRENDS IN THE
DEVELOPMENT OF
MODERN SCIENTIFIC
THOUGHT**

X

**SCIENTIFIC AND PRACTICAL
CONFERENCE**

23-26 November

Vancouver, Canada

DOI 10.46299/ISG.2020.II.X

ISBN 978-1-63649-921-5

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MODERN SCIENTIFIC THOUGHT

Abstracts of X International Scientific and Practical Conference

Vancouver, Canada
November 23-26, 2020

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

UDC 01.1

The X th International scientific and practical conference «Trends in the development of modern scientific thought» November 23-26, 2020 Vancouver, Canada. 789 p.

ISBN - 978-1-63649-921-5

DOI - 10.46299/ISG.2020.II.X

EDITORIAL BOARD

<u>Pluzhnik Elena</u>	Professor of the Department of Criminal Law and Criminology Odessa State University of Internal Affairs Candidate of Law, Associate Professor
<u>Liubchych Anna</u>	Scientific and Research Institute of Providing Legal Framework for the Innovative Development National Academy of Law Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, Scientific secretary of Institute Department of Accounting and Auditing Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko, Ukraine
<u>Liudmyla Polyvana</u>	Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of Mathematical Disciplines , Informatics and Modeling. <i>Podolsk State Agrarian Technical University</i>
<u>Mushenyk Iryna</u>	Dnipropetrovsk State University of Internal Affairs Dnipro, Ukraine
<u>Oleksandra Kovalevska</u>	Доцент кафедри криміналістики та психології Одеського державного університету внутрішніх справ.
<u>Prudka Liudmyla</u>	
<u>Slabkyi Hennadii</u>	Доктор медичних наук, завідувач кафедри наук про здоров'я Ужгородського національного університету
<u>Marchenko Dmytro</u>	Ph.D. in Machine Friction and Wear (Tribology), Associate Professor of Department of Tractors and Agricultural Machines, Maintenance and Servicing, Lecturer, Deputy dean on academic affairs of Engineering and Energy Faculty of Mykolayiv National Agrarian University (MNAU), Mykolayiv, Ukraine
<u>Harchenko Roman</u>	Candidate of Technical Sciences, specialty 05.22.20 - operation and repair of vehicles.

191.	Назаров В.С., Мулеса О.Ю. ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГІВ ПРОДАЖ Е-COMMERCE СТРУКТУРИ ЗА ДОПОМОГОЮСИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	731
192.	Потапенко М.В., Шаршонь В.Л. ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	734
193.	Сергієнко С.П., Крижанівський В.Г., Борисевич Є.С. ОЦІНКА ПОТЕНЦІЙНОЇ ЗАГРОЗИ ЗНІМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПАСИВНИМ РАДІОЗАКЛАДНИМ ПРИСТРОЄМ У ПОЛІ РАДІОШУМОВИХ ЗАВАД З ПЕРЕДАЧОЮ ПО НИЗЬКОЧАСТОТНИХ	737
194.	Скіпочка С.І., Паламарчук Т.А., Прохорець Л.В. МЕТАНОНОСНІСТЬ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА З УРАХУВАННЯМ ВНЕСКУ АДСОРБОВАНОЇ КОМПОНЕНТИ МЕТАНУ	742
195.	Сташевський М.В. СИСТЕМА «РОЗУМНИЙ БУДИНОК» НА БАЗІ ВУЗЬКОСМУГОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ NB-IOT	745
196.	Стецюк В. І., Власюк М. Ю. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/FEMLAB	750
197.	Чорний А.А., Шабала Є.Є. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ПРИДУШЕННЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ВІД ВИТОКУ КОНФІДЕНЦІЙЦНОЇ ІНФОРМАЦІЇ	756
TOURISM		
198.	Гуцал Л.А., Яворська К.В., Коваль О.В. ОРГАНІЗАЦІЯ ПІШОЇ РОЗВАЖАЛЬНО- ПІЗНАВАЛЬНОЇ ЕКСКУРСІЇ ДЛЯ АКТИВНОЇ МОЛОДІ ПО МОНАСТІРСЬКОМУ ОСТРОВУ В М. ДНІПРО	759
199.	Матуз О.В., Мисько В.З. ПОДІЄВИЙ ТУРИЗМ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕФЕКТИВНОГО РОЗВИТКУ ТУРИСТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ КАМ'ЯНЕЦЬ-ПОДІЛЬСЬКОГО РАЙОНУ	763

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/FEMLAB

Стецюк В. І.

к.т.н., доцент

Власюк М. Ю.

магістрант

Хмельницький національний університет

Номенклатура електричних машин надзвичайно широка (рис. 1). Електродвигуни розрізняються за:

- 1) створюваним обертальним моментом:
 - гістерезисні;
 - магнітоелектричні.
- 2) будовою кріплення:
 - з горизонтальним розташуванням вала;
 - з вертикальним розташуванням вала.
- 3) захистом від дій зовнішнього середовища:
 - захищені;
 - закриті;
 - вибухонепроникні.
- 4) типом струму:
 - постійний струм;
 - змінний струм;
 - універсальні двигуни (працюють на постійному / змінному струмі).
- 5) наявністю колектора:
 - колекторні;
 - безколекторні;
- 6) принципом роботи:
 - синхронні;
 - асинхронний.
- 7) способом збудження:
 - зі збудженням від постійних магнітів;
 - з паралельним збудженням;
 - з послідовним збудженням;
 - з послідовно-паралельним.

Двигуни змінного струму в свою чергу розрізняють на:

- однофазні;
- двофазні;
- трифазні.

Детальна класифікація електродвигунів представлена на рис. 1.

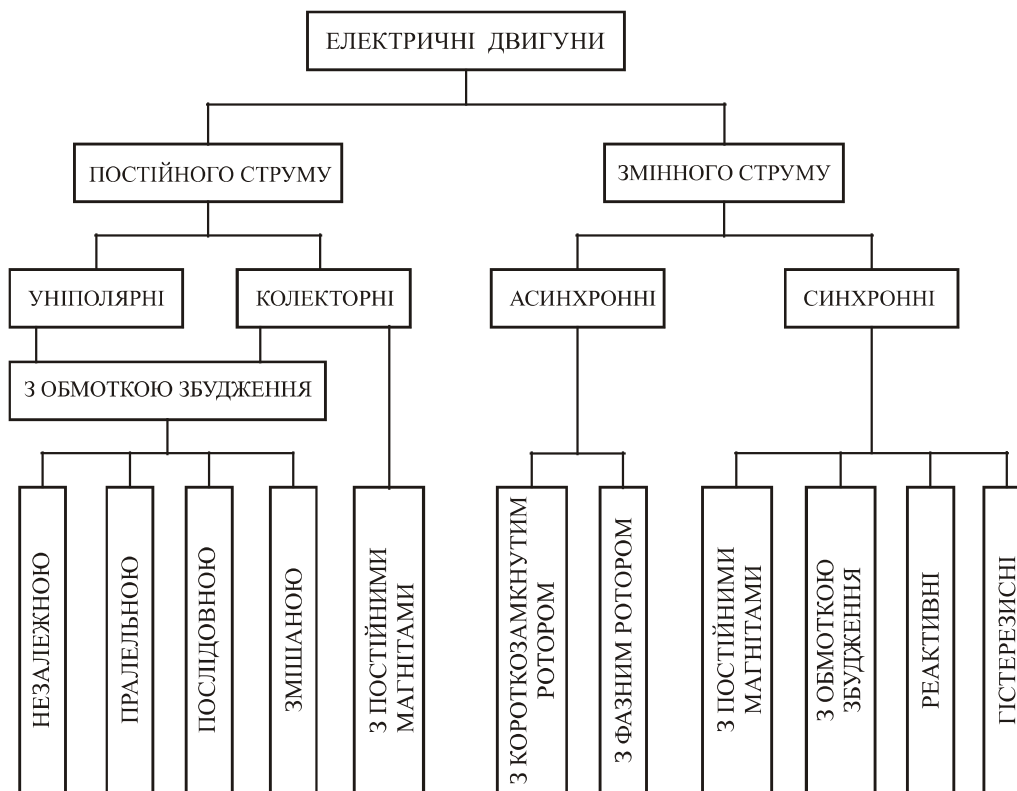


Рисунок 1.1 – Загальна класифікація електродвигунів

Найбільш перспективними являються безконтактні двигуни, а точніше їх різновид – синхронні двигуни на постійних магнітах (рис. 2).

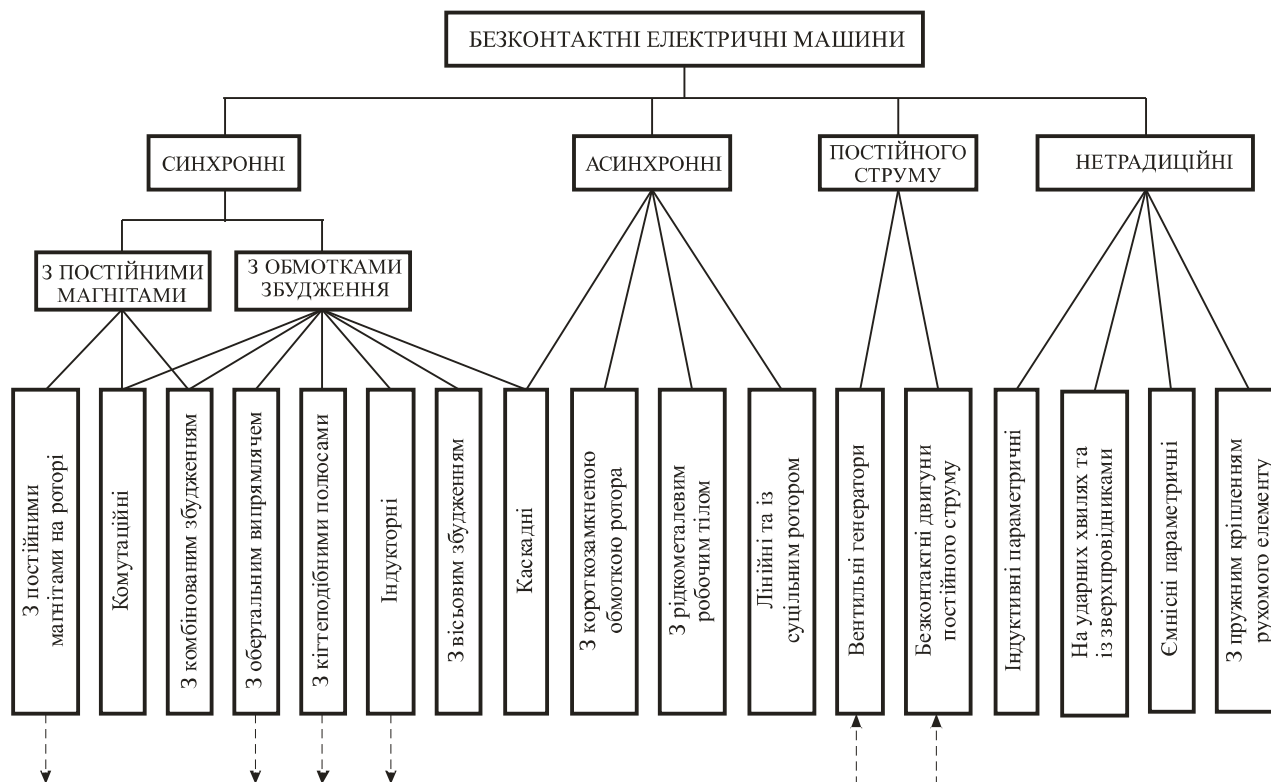


Рисунок 2 – Класифікація безконтактних електричних машин

Велике різномаяття електричних машин, все більше поширення їх в технологічних процесах і побуті вимагають постійного вдосконалення існуючих конструкцій та розробки нових типів електродвигунів. Зростання чисельності електродвигунів, їх номенклатури і типів призводить до зростання ступіню використання активних матеріалів: електротехнічної сталі та обмотувальної міді, збільшення концентрації енергії магнітного поля, що досягається збільшенням щільності струму в обмотках і індукції в магнітному осерді. Все це призводить до збільшення втрат енергії, а значить і проблем відведення тепла.

Загальна модель теплообміну електродвигуна (рис. 3) характеризує ступінь проблематики моделювання теплових процесів. Адаже з одного боку ми маємо складну замкнену систему перерозподілу тепла між елементами двигуна (в основному від мідних обмоток до всіх інших складових). З іншого ж боку присутній процес тепловіддачі корпусу (виконаного як правило спеціально ребристим для збільшення площі) із навколишнім середовищем. Крім того, більшість двигунів, окрім пасивної системи теплообміну мають власну систему активного охолодження у вигляді вентилятора (інколи двох) жорстко посаджених на вал. І в цьому випадку тепловіддача залежить від швидкості обертання вала, а отже і вентилятора та може відрізнятись більше, ніж у 2 рази.

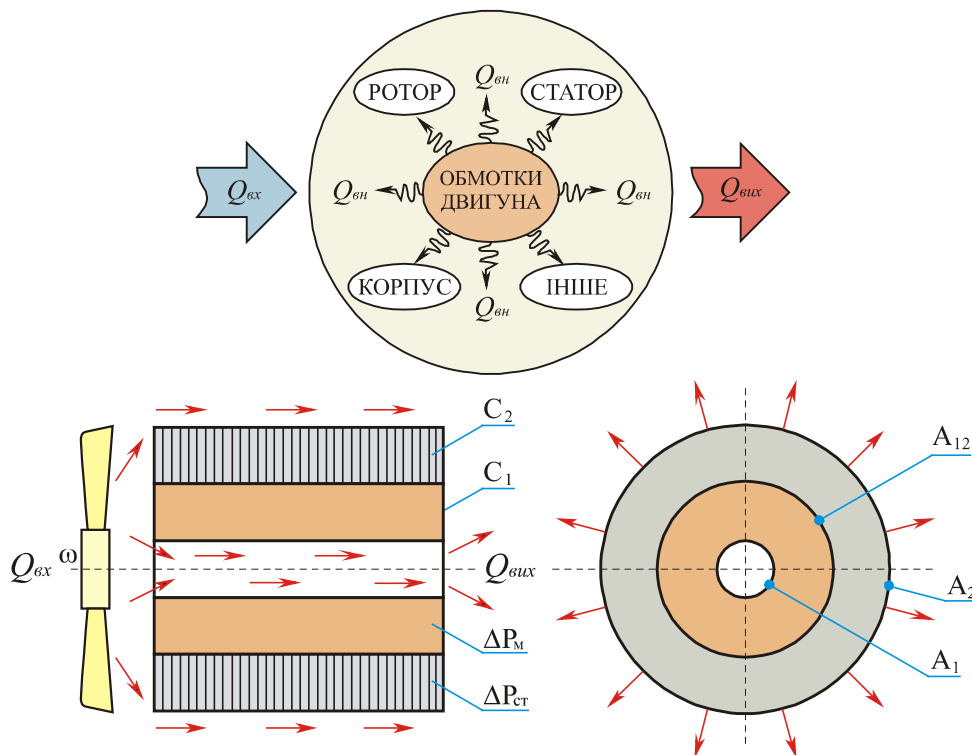


Рисунок 3 – Спрощена загальна модель теплообміну електричного двигуна:

$Q_{вх}$ – вхідний тепловий потік; $Q_{вих}$ – вихідний тепловий потік;

$Q_{вн}$ – внутрішній тепловий потік; C_1 – теплоємність обмотки статора; C_2 – теплоємність зовнішнього корпусу; ΔP_M – потужність теплових втрат у міді; $\Delta P_{ст}$ – потужність теплових втрат у сталі; A_1 – коефіцієнт тепловіддачі від міді статора у зовнішнє середовище; A_2 – коефіцієнт тепловіддачі від сталі у зовнішнє середовище; A_{12} – коефіцієнт тепловіддачі між міддю і сталлю

Найбільш придатними методами для моделювання процесів магнітних і теплових полів, а також обліку нелінійності феромагнітних властивостей є чисельні методи, основані наприклад на методах скінченних елементів. Є дость прості програми з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, освоєння яких не вимагає великих витант часу: ELCUT, QuickField, FEMME. Є й більш серйозні професійні програми із великими можливостями, наприклад, ANSYS, Flux 2D&3D, Ansys Motor-CAD, Matlab&Simulink [1, 2], Femlab [3, 4].

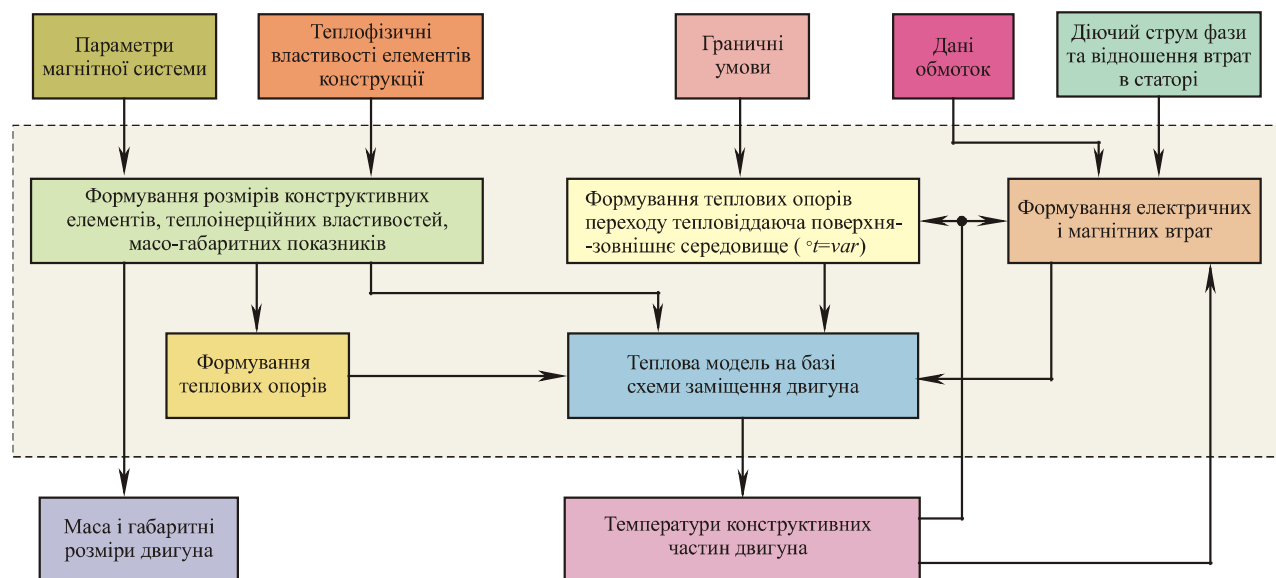


Рисунок 4 – Структурна схема узагальненої теплової моделі

Модель, розглянута вище, основана на лінійній стаціонарній версії рівняння теплопровідності відносно температури T . У термінології системи FEMLAB змінна, відносно якої вирішується PDE, називається залежною змінною, а просторові координати і час – незалежні змінні. Стаціонарне диференціальне рівняння теплопровідності має вигляд:

$$-\text{div}(k \cdot \text{grad}T) = Q, \quad (1)$$

де Q – об'ємна щільність потужності теплових джерел, Вт/м³;

k – коефіцієнт теплопровідності речовини, Вт·м⁻¹·К⁻¹.

Якщо просторові координати вимірювати в міліметрах, то Q і k потрібно виражати у Вт/мм³ і Вт·м⁻¹·К⁻¹ відповідно. Згідно вище сказаному, рівняння (1) необхідно доповнити граничними умовами першого роду (граничними умовами Діріхле):

$$T = T_0, \quad (2)$$

де T_0 – розподіл температури на границі розрахункової області (наприклад, $T_0=273$ K). У GUI-додатку FEMLAB в прикладному режимі теплопередачі підтримується також і інший тип граничних умов:

$$\mathbf{n}(k \cdot \text{grad}T) = q_0 + h_0 \cdot (T_{inf} - T) + h_i \cdot (T_{amb}^4 - T^4), \quad (3)$$

де \mathbf{n} – вектор одиничної нормалі до границі розрахункової області;

q_0 – фіксована (незалежна) складова щільності потоку теплової потужності через граничну поверхню;

h_0 – коефіцієнт кондуктивного або конвективного теплообміну розрахункової області з навколишнім середовищем;

h_i – коефіцієнт теплообміну випромінюванням з навколишнім середовищем;

T_{inf}, T_{amb} – значення температури навколишнього середовища, які при моделюванні

зазвичай приймаються рівними.

Вираз (2) називається граничною умовою другого роду (граничною умовою Неймана). Граничні умови першого і другого роду досить повно описують взаємодію розрахункової області з навколишнім середовищем. Рівняння всіх прикладних режимів роботи GUI-додатки FEMLAB є частковим випадком узагальненого PDE, підтримуваного системою FEMLAB.

Узагальнене стаціонарне скалярне PDE має вигляд:

$$-\nabla(\mathbf{c} \cdot \nabla u + \boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{u} - \gamma) + a \cdot u + \boldsymbol{\beta} \cdot \nabla u = f \quad (4)$$

де u – шукана скалярна величина;

c – задане скалярне або тензорне (другої валентності) поле, зазвичай характеризує одне з матеріальних властивостей речовини;

α – задане векторне поле (зазвичай характеризує конвективні властивості);

γ – задане векторне поле, яке виконує роль джерела скалярного поля u (в електростатичній завдачі це вектор залишкової поляризованості речовини);

a – задане скалярний поле (в просторово-частотних PDE виконує роль динамічного коефіцієнта);

β – задане векторне поле (зазвичай це векторний коефіцієнт конвекції);

f – скалярне джерело шуканого поля u .

Якщо порівняти (3) з (1), то можна помітити, що в стаціонарній задачі теплопровідності немає сенсу задавати коефіцієнти α , β , γ і a , так як вони рівні нулю. Їх немає навіть в діалоговому вікні введення коефіцієнтів PDE, однак якщо включений режим PDE / View as PDE Coefficients, то вони з'являються у відповідному діалоговому вікні. Коефіцієнтам c і f в (3) відповідають k і Q в (1). Коефіцієнт k в прикладному режимі теплопровідності також може здаватися в тензорній формі, якщо речовина має анізотропні теплопровідні властивості.

Узагальнена гранична умова Діріхле має вигляд:

$$\mathbf{h} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{r} \quad (5)$$

Узагальнена гранична умова Неймана має вигляд:

$$\vec{n}(\mathbf{c} \cdot \nabla u + \boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{u} - \gamma) + q \cdot u = g - h^T \mu \quad (6)$$

(4), (5) і (6) – коефіцієнтна форма узагальненого PDE і граничних умов. В системі FEMLAB підтримується також загальна форма PDE і граничних умов. Коефіцієнтну форму найзручніше застосовувати при вирішенні лінійних або несуттєво-нелінійних крайових задач. Для задання істотно-нелінійних PDE або граничних умов зручніше застосовувати загальну форму.

У прикладному режимі теплопередачі в (6) $q=0$, $\alpha=\gamma=0$, g представляють собою праву частину (3). Якщо ж працювати з моделлю в недостатньо

загальному прикладному режимі, то можна переключитися в режим редагування коефіцієнтів або граничних умов узагальненого PDE. Це буває корисно при мультифізичному моделюванні, якщо потрібно представити не передбачені прикладним режимом зв'язки між модельованими полями.

Результуюча модель електродвигуна, представленого на рис. 3 у середовищі Matlab/Femlab має вигляд:

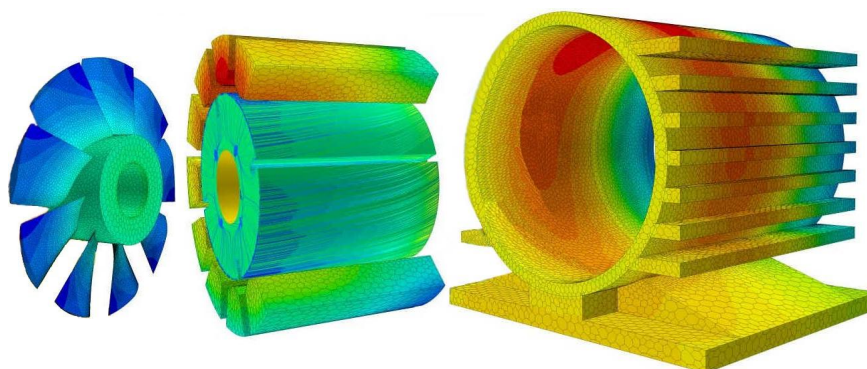


Рисунок 5 – Результуюча теплова модель двигуна у середовищі Matlab/Femlab

Здійснено аналіз та вибір методу моделювання, серед яких найбільш придатними методами для моделювання процесів магнітних і теплових полів, а також обліку нелінійності феромагнітних властивостей є чисельні методи. Чисельне рішення рівнянь поля за допомогою програмно-апаратних засобів та спеціальних програм, основаних, наприклад, на методах скінченних різниць (МСР) або скінченних елементів (МСЕ) та інших, дозволяє практично без будь-яких спрощень і припущень з високою точністю розрахувати розподіл поля в будь-якому електромеханічному пристрої. Побудовано спрощену узагальну модель та схему теплообміну електричного двигуна, на основі якої проведено моделювання у середовищі MatLab&Femlab. Одержані результати дозволяють здійснювати тепловий аналіз електричних машин, який характеризує енергоефективність системи та є показником її оптимального проектування.

Список літератури

1. Чарльз Г. Э. Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB / Г. Э. Чарльз, Э. П. Дэвид // 3-е издание. – Киев.: Диалектика-Вильямс, 2007 – с.
2. Красников Г. Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics / Г. Е. Красников, О. В. Нагорнов, Н. В. Старостин // – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.
3. Pryor R. W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. – Jones & Bartlett Publishers, Inc., 2011. – 872 p.
4. Бирюлин Г. В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB. Методическое пособие. СПб.: СПбГУИТМО, 2006.

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 1.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибок в документах: 8%

ID: 81559 Название: Моделювання та дослідження синхронних двигунів на постійних магнітах Добавлено в БД: 2020-11-29 Авторы: Власюк Максим Юрійович Руководители: Стецюк Віктор Іванович Консультанты: Оponentы:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	90704	1415	2430 (3%)	42 (3%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы



Имя пользователя:
Kafedra TMIT KhNU

ID проверки:
100536852

Дата проверки:
04.12.2020 17:07:39 EET

Тип проверки:
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:
04.12.2020 17:15:56 EET

ID пользователя:
100005657

Название файла: Власюк_Трм-19-1

Количество страниц: 95 Количество слов: 14955 Количество символов: 113656 Размер файла: 5.21 MB ID файла: 1005661149

1097 слов помечены как "исключенные" и не учитываются в подсчете слов

5.72% Совпадения

Наибольшее совпадение: 1.57% с Интернет-источником (<http://uk.x-pdf.ru/5radiotekhnika/288961-12-f-kolpakov-pidche...>)

5.6% Источники из Интернета 164 Страница 97

0.21% Источники из Библиотеки 1 Страница 98

0.34% Цитат

Цитаты 1 Страница 99

Не найдено ни одной ссылки

0% Исключений

Нет исключенных источников

Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 63

на дипломну роботу магістра групи ТРМ-19-1

Власюка Максима Юрійовича

Тема

**«МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННИХ
ДВИГУНІВ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ»**

Робота присвячена підвищенню ефективності синхронних двигунів на постійних магнітах шляхом мінімізації теплових втрат. Розглядаються проблема теплового аналізу електричних машин, яка представляє значний науковий та практичний інтерес.

Актуальність теми обумовлена надзвичайно широким спектром застосувань електричних машин та зростаючими вимогами до їх розробки, виготовлення та експлуатації.

В магістерській роботі ставиться та виконується рад задач, серед яких:

- 1) провести класифікацію електричних машин, зокрема безконтактних електродвигунів;
- 2) здійснити аналіз методів моделювання процесів електромагнітних і теплових полів та визначити рівень їх взаємодії; на основі обраних методів створити динамічну теплову модель синхронного електродвигуна та провести її дослідження в різних режимах роботи;
- 3) провести імітаційне моделювання теплових режимів синхронного електродвигуна із визначенням температурних полів та рівня втрат в основних конструктивних складових;
- 4) перевірити результати досліджень та моделювання для реальних конструкцій найбільш поширених типів синхронних електродвигунів із збудженням від постійних магнітів.

За змістом робота є докладною та містить достатньо посилань на літературу. Викладення матеріалу є послідовним та логічно правильним.

Наведені у роботі формули, припущення та висновки мають достатнє обґрунтування та детальне пояснення. Мова викладення роботи є технічно грамотною, зрозумілою та не перенасиченою спеціальними термінами.

З точки зору оформлення магістерська робота представлена пояснювальною запискою, що складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Оформлення пояснювальної записки знаходиться на належному рівні.

Серед позитивних сторін магістерської роботи слід відмітити наступне:

- детально розроблений математичний апарат теплообміну в конструкціях електричних двигунів;
- наявність досліджень впливу різноманітних матеріалів конструкції на процеси тепловіддачі;
- оригінальні методи моделювання з використанням параметрів реальних існуючих електричних машин різного типу.

До недоліків слід віднести відсутність в роботі моделювання магнітних полів наряду із тепловими.

Наприкінці необхідно відзначити, що дана робота Власюка М. Ю. «Моделювання та дослідження синхронних двигунів на постійних магнітах» повністю відповідає вимогам до робіт магістерського освітнього рівня, заслуговує на оцінку “добре”, а її автор – на присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Рецензент



д.т.н., професор Мартинюк В. В.

“ 7 ” грудня 2020 р.

Завідувачу кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ) Підченко С.К.
здобувача вищої освіти студента 2 курсу, гр. ТРМ-19-1
Власюка Максима Юрійовича

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіантах. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

30.11.2020 р.



Власюк М. Ю.

РІШЕННЯ КАФЕДРИ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів / ідентичності / схожості:

Назва: “Моделювання та дослідження синхронних двигунів на постійних магнітах”

Автор: Власюк Максим Юрійович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к. т. н., доц. Стецюк Віктор Іванович

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не являються плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	Відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягненні. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інакше:	

Підтвердження: запозичення у розмірі 5,72%, виявлені в роботі відповідають тексту стандартних бланків, решта запозичень є випадковими і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.

5.12.2020 р.

Науковий керівник роботи



Стецюк В. І.

Зав. Каф. ТМІТ



Підченко С. К.