

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Розроблення шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи АУТПм-21-1

Чугай М.С.  
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами  
(повна назва освітньої програми)

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

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАМ

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

2022 р.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержув недоволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

21.12.2022

Чугай М. С.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАМ \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Автоматизоване управління технологічними процесами \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студенту \_\_\_\_\_ Чугаю Марку Сергійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи  
Затверджена наказом по університету від 07.11.2022 №1463 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.12.2022 р.
3. Вихідні дані до роботи Номінальна потужність – 1,5 кВт, номінальна швидкість обертання ротора – 80 об./хв., номінальна напруга живлення – 220 В.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Аналіз технічного завдання; Вступ; Перспективи застосування шнекових електротепломеханічних перетворювачів у складі багатоцільових мобільних робототехнічних платформ; Проблеми створення суміщених електромеханічних пристроїв з багатофункціональними властивостями; Розрахунок електромагнітних та електромеханічних процесів шнекового електротепломеханічного перетворювача з урахуванням впливу процесів, що протікають у міжмодульній зоні; Розрахунок теплового стану шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи; Охорона праці в лабораторії, де відбувається розрахунок та моделювання шнекового електротепломеханічного перетворювача; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) – 14 сторінок формату А4

---

6. Консультанти розділів роботи

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання, вступ	23.05.22	виконав
2	Перспективи застосування шнекових електротепломеханічних перетворювачів у складі багатоцільових мобільних робототехнічних платформ	12.09.22	виконав
3	Проблеми створення суміщених електромеханічних пристроїв з багатофункціональними властивостями	30.09.22	виконав
4	Розрахунок електромагнітних та електромеханічних процесів шнекового електротепломеханічного перетворювача з урахуванням впливу процесів, що протікають у міжмодульній зоні	31.10.22	виконав
5	Розрахунок теплового стану шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи	21.11.22	виконав
6	Оформлення пояснювальної записки	16.12.22	виконав
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	19.12.22	виконав
8	Подання роботи на рецензію	20.12.22	виконав
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	21.12.22	виконав
10	Подання роботи до ЕК	22.12.22	виконав

Дата видачі завдання 20.05.2022 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Чугай М.С.

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 62 с., 2 табл., 23 рис., 1 дод., 35 джерел.

ШНЕКОВИЙ ПЕРЕТВОРВАЧ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МОБІЛЬНА РОБОТОТЕХНІЧНА ПЛАТФОРМА, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ, ЕКВІВАЛЕНТНА ТЕПЛОВА СХЕМА.

Об'єкт дослідження – електромагнітні, електромеханічні та теплові процеси шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи.

Предмет дослідження – електромагнітне та температурне поле, електромеханічні характеристики шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи.

Методи дослідження – розрахунок просторового розподілу магнітного поля та електромеханічних процесів за результатами рішення польової задачі, кінцево-елементний метод розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних у тривимірній постановці. Розрахунок теплового стану шляхом рішення диференціальних рівнянь нестационарного нагріву за еквівалентною тепловою схемою.

## ABSTRACT

Explanatory note: 62 pp., 2 tabl., 23 figs., 1 app., 35 sources.

SCREW CONVERTER, MATHEMATICAL MODEL, MOBILE ROBOTIC PLATFORM, ELECTROMAGNETIC FIELD, EQUIVALENT THERMAL DIAGRAM.

The object of research is electromagnetic, electromechanical and thermal processes of a screw electrothermomechanical converter for a multipurpose mobile robotics platform.

The subject of research is the electromagnetic and temperature field, electromechanical characteristics of the screw electrothermomechanical converter for a multi-purpose mobile robotics platform.

The purpose of the qualification work is to develop a screw electrothermomechanical converter for a multi-purpose mobile robotics platform.

Research methods – calculation of the spatial distribution of the magnetic field and electromechanical processes based on the results of solving a field problem, a finite element method for solving nonlinear differential equations in partial derivatives in a three-dimensional formulation. Calculation of the thermal state by solving differential equations of non-stationary heating according to the equivalent thermal scheme.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Аналітичний огляд .....	11
1.1 Перспективи застосування шнекових електротепломеханічних перетворювачів у складі багатоцільових мобільних робототехнічних платформ .....	11
1.2 Загальна характеристика шнекового електротепломеханічного перетворювача .....	19
1.3 Висновки до розділу 1 .....	21
2 Проблеми створення суміщених електромеханічних пристроїв з багатофункціональними властивостями .....	23
2.1 Особливості функціонування суміщених електромеханічних пристроїв з багатофункціональними властивостями.....	23
2.2 Проблеми моделювання взаємопов'язаних електромагнітних, механічних і теплових процесів в електромеханічних пристроях з багатофункціональними властивостями.....	29
2.3 Висновки до розділу 2 .....	41
3 Математичне моделювання процесів у шнековому електротепломеханічному перетворювачі.....	42
3.1 Розрахунок розподілу тривимірного магнітного поля у шнековому електротепломеханічному перетворювачі .....	42
3.2 Математичне моделювання теплових процесів у шнековому електротепломеханічному перетворювачі з використанням MATLAB / SIMULINK.....	47
3.3 Охорона праці.....	50
3.4 Висновки до розділу 3 .....	57
Висновки .....	58
Перелік джерел посилання .....	59

Додаток А.....	63
Відомість кваліфікаційної роботи .....	80

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВГ – вищі гармоніки;

ВС – вихрові струми;

ГМ – гальмівний модуль;

ДМ – двигуновий модуль;

ЕТМП – електротепломеханічний перетворювач;

ЕТС – еквівалентна теплова схема;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МКЕ – метод кінцевих елементів;

ММ – математична модель;

МР – масивний ротор;

МРП – мобільна роботизована платформа;

СКЕ – сітка кінцевих елементів.

## ВСТУП

Розробка багатофункціональних систем, які передбачують не тільки функціональне узагальнення, а й інтеграцію електричних і теплових процесів – один з найважливіших напрямків по створенню енергозберігаючих технологій. Нові електромеханічні системи наділені технологічними функціями (нагрів та змішування матеріалу, його подача і дозування), при цьому робочий матеріал є одночасно робочим тілом і охолоджуючим середовищем для електромеханічної системи.

Перспективний клас електротепломеханічних перетворювачів технологічного призначення, що застосовуються для безпосереднього здійснення технологічних процесів, відрізняється посиленою концентрацією функціональних та енергетичних властивостей і практично повним використанням електричної енергії, що надходить з мережі. Загальний ККД ЕТМП технологічного призначення досить високий, що забезпечує ефективну реалізацію принципів енергоресурсозбереження. Суттєвою перевагою технологій на основі ЕТМП технологічного призначення є не тільки високе значення ККД, а й значне зменшення займаної площі, кількості одиниць обладнання та термінів його окупності.

З метою підвищення ефективності та економічності багатоцільової мобільної робототехнічної платформи пропонується обладнати її шнековим перетворювачем. Це стає можливим за рахунок об'єднання електродвигуна, бура (шнека) і нагрівача в одному корпусі. Все це дасть не тільки економію маси та розмірів, а й суттєве підвищення ККД та надійності системи в цілому.

Пропонована мобільна робототехнічна платформа, оснащена шнековим ЕТМП, здатна вирішувати завдання в галузі сільського господарства та екології, галузі ліквідації надзвичайних ситуацій і забезпечення безпеки.

Точний розрахунок розподілу електромагнітного і температурного поля в активній частині електротепломеханічного перетворювача є важливим етапом на шляху до оптимізації його конструкції та прогнозування вихідних характеристик.

Об'єкт дослідження – електромагнітні, електромеханічні та теплові процеси шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи.

Предмет дослідження – електромагнітне та температурне поле, електромеханічні характеристики шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити перспективи застосування шнекових електротепломеханічних перетворювачів у складі багатоцільових мобільних робототехнічних платформ;

- провести розрахунок електромагнітних та електромеханічних процесів шнекового електротепломеханічного перетворювача з урахуванням впливу процесів, що протікають у міжмодульній зоні;

- провести розрахунок теплового стану шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи;

- розглянути питання з охорони праці в лабораторії, де відбувається розрахунок та моделювання шнекового електротепломеханічного перетворювача.

Роботу виконано згідно [1–3]. Результати дослідження опубліковані у [4].

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Перспективи застосування шнекових електротепломеханічних перетворювачів у складі багатоцільових мобільних робототехнічних платформ

Для виконання ряду важливих завдань доцільне використання мобільних роботизованих платформ (МРП), що оснащені буровим інструментом. Це дозволяє розширити можливості роботизованих платформ та підвищити їх ефективність. Найчастіше буровий інструмент МРП застосовується для буріння (свердління) ґрунтів або порід, а також для вилучення (видалення), транспортування та перемішування різних речовин. МРП, що мають у своєму складі бур (шнек) вже показали свою ефективність при проведенні польових робіт (у т.ч. при вивченні властивостей ґрунтів) [5, 6, 7] та робіт на території фермерських господарств [8, 9, 10], в умовах складної чи небезпечної місцевості [11, 12]. МРП зі шнеком також використовуються для подрібнення великої кількості різних матеріалів, а також очищення небезпечних приміщень та резервуарів [13, 14].

Витрати на добрива – одні з найбільших витрат, із якими стикаються фермери, які вирощують просапні культури [6]. Наприклад, лише у США непостійна глибина відбору проб ґрунту та недостатня точність позиціонування спотворюють результати досліджень, що призводить до неоптимального використання добрив. Застосування традиційних методів відбору проб дає різницю як за глибиною, так і за місцем розташування, що призводить до помилки вибірки до 20%. Такий відсоток помилки, помножений на середню вартість добрив на акр та їх кількість на зразок, призводить до середньої втрати прибутку у розмірі 30 дол. на акр.

Інформація про властивості ґрунту може бути одержана з поля за допомогою бортових систем робота, що дозволяє фермерам реагувати на

різкі зміни в режимі реального часу. Мобільний робот для відбору зразків ґрунту є мобільною платформою з всюдихідною підвіскою та бурильним пристроєм для відбору проб [5]. Зразки ґрунту аналізуються для визначення хімічного складу, характеристик та рівнів поживних речовин у ґрунті. Інформаційні технології та система збирання ґрунту дозволяють суттєво підвищити ефективність виробничого процесу.

Технологія SmartCore, являє собою автономного робота, який призначений для точного збирання зразків ґрунту на фермерських полях та передачі зразків безпосередньо фермерам або виробникам [6]. У SmartCore використовуються шасі з бортовим поворотом і пересування полями за допомогою граничних алгоритмів і датчиків лідара, які випромінюють лазерні промені для виявлення об'єктів. Автономний робот збирає зразки за допомогою гідравлічного шнека, який сконструйований таким чином, щоб ґрунт не випадав, що гарантує точність, чистоту та контроль глибини проби.

Таким чином, тестування ґрунту у сучасному сільському господарстві застосовується для оптимізації виробництва, захисту навколишнього середовища від надмірного використання добрив, економії засобів та енергії під час виробництва.

Разом з тим, у ряді європейських фермерських господарств знайшов застосування шнековий робот Butler Gold [8]. У ньому для подачі, розпушення та дозування використовується транспортний шнек, що забезпечує інтелектуальне та безперервне переміщення корму до борту кормового столу (рис. 1.1, а). При цьому корм постійно переміщується, а робот не залишає слідів після себе. Butler Gold виконує до 30 самостійних виїздів щодня, збільшуючи споживання корму тваринами та продуктивність ферми. Деякі моделі роботів-змішувачів кормів (Cormall, Hetwin, Rovibes) мають у своєму складі горизонтальні шнеки (рис. 1.1, б), забезпечені лопатями, які повинні рівномірно розподіляти корм в ємності змішувача і одночасно подрібнювати його, якщо він знаходиться в пакунках або блоках [10].

Крім того, у садових та фермерських господарствах подібні мобільні робототехнічні платформи здатні суттєво прискорювати підготовчі роботи з метою посадки рослинності (у тому числі і саджанців дерев, кущів), встановлення опор різного призначення (стійки для виноградників, стовпчастий фундамент тощо).



а

б

Рисунок 1.1 – Шнековий робот-підгортач Butler Gold (а)  
та фрагмент конструкції робота-змішувача кормів Rovibec (б)

Серед зарубіжних військових розробок набула популярності ударна роботизована платформа «Цитрус» (рис. 1.2), що призначена для виконання поставлених завдань зі знищення живої сили потенційного супротивника у будинках, польових укриттях та спорудах різного типу. Платформа має на озброєнні РШГ-16, РПГ-16, пневматичну установку та бур [15].



Рисунок 1.2 – Ударна роботизована платформа «Цитрус»,  
що має на озброєнні РШГ-16, РПГ-16, пневматичну установку та бур

Мобільні робототехнічні платформи, що використовують бури або шнеки – оптимальне рішення для роботи в умовах складної або небезпечної місцевості. Наприклад, для роботи в місцях поховань відходів та виконання таких завдань, як відбір проб на замінованій території [16] або дослідження механічних властивостей ґрунтів [17].

Прототип польового роботизованого комплексу для відбору проб та геотехнічних вимірювань містить пересувну платформу, шнековий бур та пробовідбірник м'якого ґрунту (рис. 1.3). Шнековий бур використовується, щоб зробити отвір для пробовідбірника, який можна опустити до рихлого матеріалу. Двигун постійного струму рухає шнек діаметром 100 мм.

Цей модифікований комерційний шнек живиться від акумулятора напругою 40 В і має максимальну швидкість 180 об./хв.

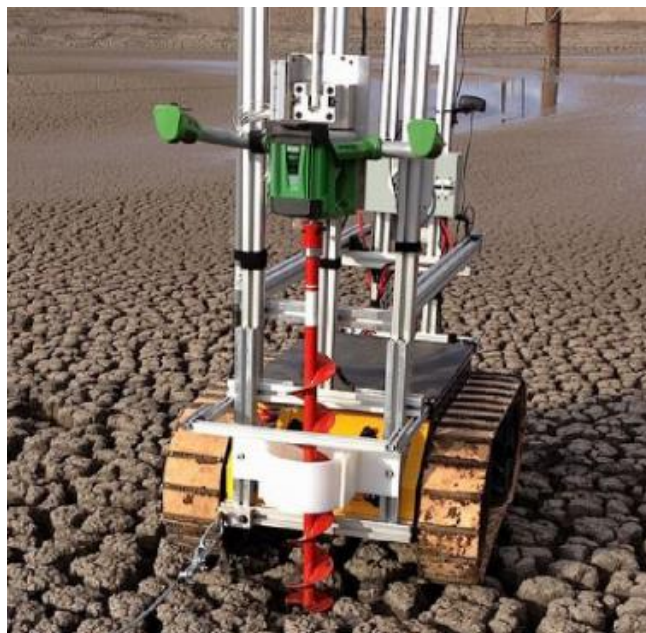


Рисунок 1.3 – Польовий роботизований комплекс для відбору проб та геотехнічних вимірювань

Для подрібнення та очищення великої кількості різних матеріалів знайшли застосування міні-роботи LombriCo [13]. Робот оснащений змінними шнеками різної форми, матеріалу (нержавіюча сталь, сталь Hardox та латунь для застосування у вибухонебезпечному середовищі) та всмоктувальними

шлангами різних розмірів (від 4 до 10 дюймів) залежно від сфери застосування (рис. 1.4). Міні-роботи призначені для роботи в нафтогазовій та каналізаційній системах. Шнек обертається в обох напрямках завдяки гідравлічному двигуну. Шнекова конструкція розроблена для видалення великої кількості матеріалу та збільшення продуктивності процесу очищення.

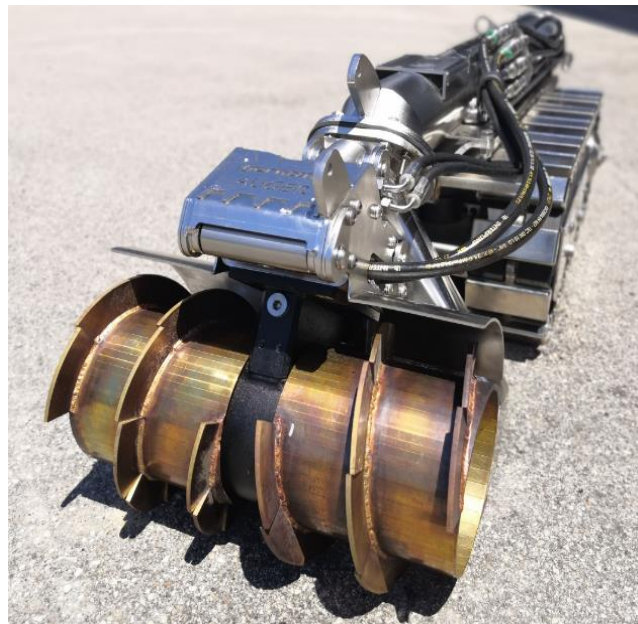


Рисунок 1.4 – Шнековий міні-робот Lombico для подрібнення та очищення великої кількості різних матеріалів

Модифікація міні-робота Lombico S EX-0 призначена для проведення безпечних робіт у вибухонебезпечних зонах (ATEX) і застосовується для очищення приміщень та резервуарів з дуже жорстким та в'язкими середовищами [14]. Цей робот може бути оснащений декількома пристроями для повного видалення речовин будь-якого виду та консистенції: в'язкого, маслянистого, рідкого або твердого. Зазвичай, видалення густого та в'язкого осаду проводилося шляхом розташування від 12 до 18 осіб усередині резервуара, де вони використовували водяні піки та лопати, щоб видалити речовину та промити резервуар. Передня частина Lombico оснащена шнеком для збору густого осаду і його відкачування назад у вакуумну вантажівку або

сміттєві баки. Завдяки роботі, достатньо всього трьох робочих, щоб керувати процесом зовні резервуара, далеко від небезпечного середовища (рис. 1.5.).

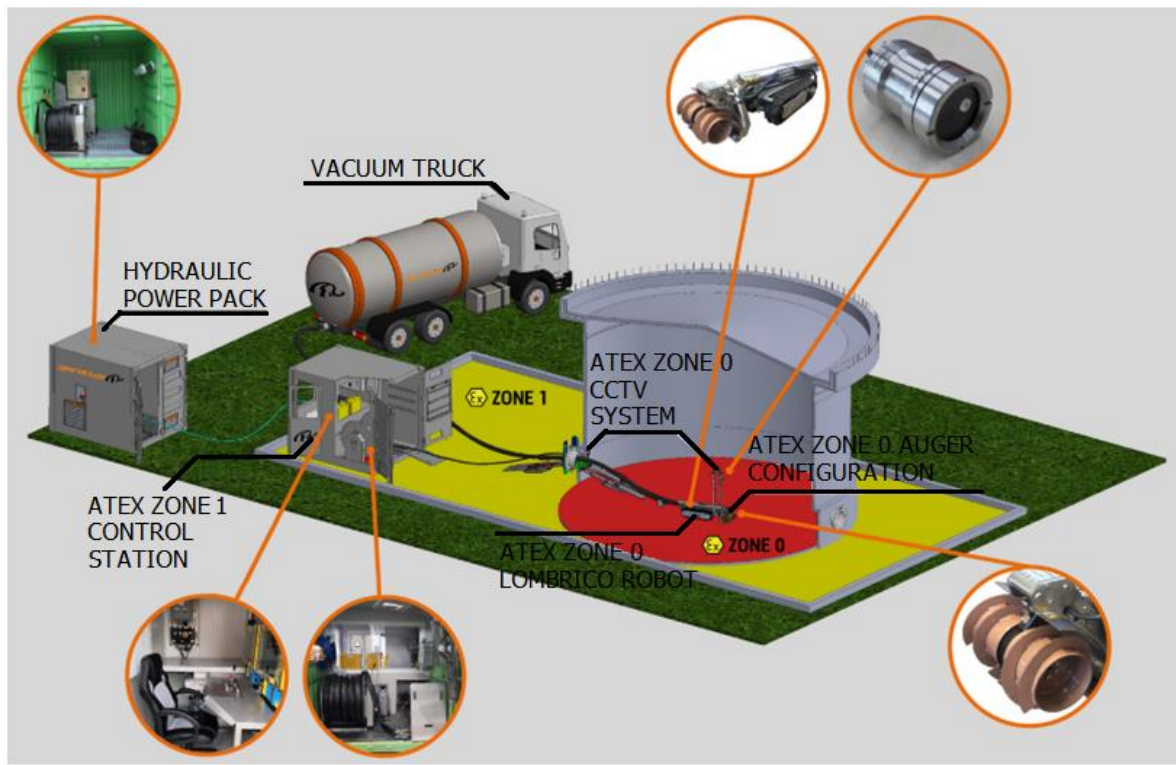


Рисунок 1.5 – Система очищення із застосуванням шнекового міні-робота Lombrico S EX-0

На сьогоднішній день існує необхідність розробки ефективного методу обробки місячного реголіту «місячного ґрунту» для підтримки здійснення майбутніх місій на Місяці. В роботі [18] NASA представило розробку системи нагріву місячного реголіту з використанням мікрохвиль. Вона заснована на створенні великого градієнту температури, що утворюється, коли зразок місячного реголіту під впливом мікрохвильового випромінювання швидко випромінює тепло зі своєї поверхні по мірі плавлення ядра. До складу концептуальної моделі системи 3D-друку входить натискний шнек та електродвигун (рис. 1.6). Як тільки розплавлений реголіт починає витікати з резервуара, його можна помістити в будь-яку форму для створення бажаної структури, шар за шаром. Цей підхід знаходить застосування у промисловості, де необхідно плавити різні тверді матеріали.

Також цю технологію можна використовувати для створення на поверхні твердого шару, який може стати початком дорожнього покриття.

Один із способів практично реалізувати цю систему тривимірного друку на поверхні Місяця – це прикріпити її до платформи роботизованої мобільної системи All-Terrain Hex-Limbed Extra-Terrestrial Explorer (ATHLETE) [19]. ATHLETE можна використовувати як інструмент точного позиціонування для 3D-друку великомасштабних структур на поверхнях Місяця або Марса.

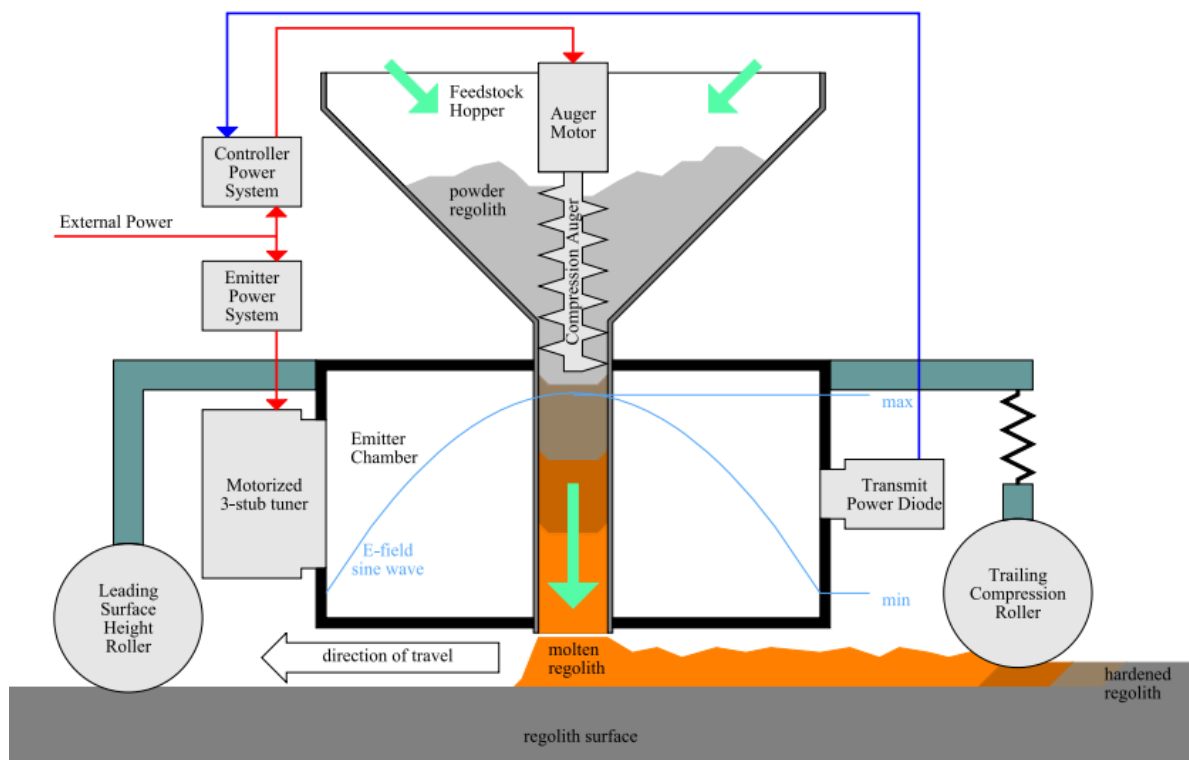


Рисунок 1.6 – Концепт 3D-друку великомасштабних структур  
(Microwave printer concept)

Моніторинг стану навколишнього середовища на віддалених та великих територіях – важлива соціальна проблема (наприклад, радіологічний моніторинг в аварійних ситуаціях або моніторинг наявності важких металів) [12]. Існує безліч пневматичних бурових інструментів для роботи на нестійкому ґрунті, зокрема на затоплених ділянках. Як альтернатива пневматичним приводам розроблені і бурові пристрої, що використовують

гідравлічний привід [20, 21]. З метою зниження опору ґрунту при бурінні іноді використовується вібрація. Незважаючи на важливість спроб розробки інструментів для відбору проб ґрунту, використання гідравлічних та пневматичних приводів значно обмежує їх застосування для роботизованих платформ середнього розміру.

В роботі [22] пропонується робот, що використовується для регулярного посіву насіння. Насамперед він спрямований на те, щоб зробити роботу фермерів простішою та ефективнішою. Цей робот може ефективно працювати на будь-якому ґрунті. Робот пересувається за допомогою двигунів, закріплених на колесах, що в свою чергу працюють від акумуляторів (рис. 1.7). Ультразвуковий датчик спрямовує робота через перешкоди, а інфрачервоний датчик допомагає сіяти насіння через рівні проміжки часу. Робот використовує шнек для підготовки отворів у ґрунті, в які висівають насіння.

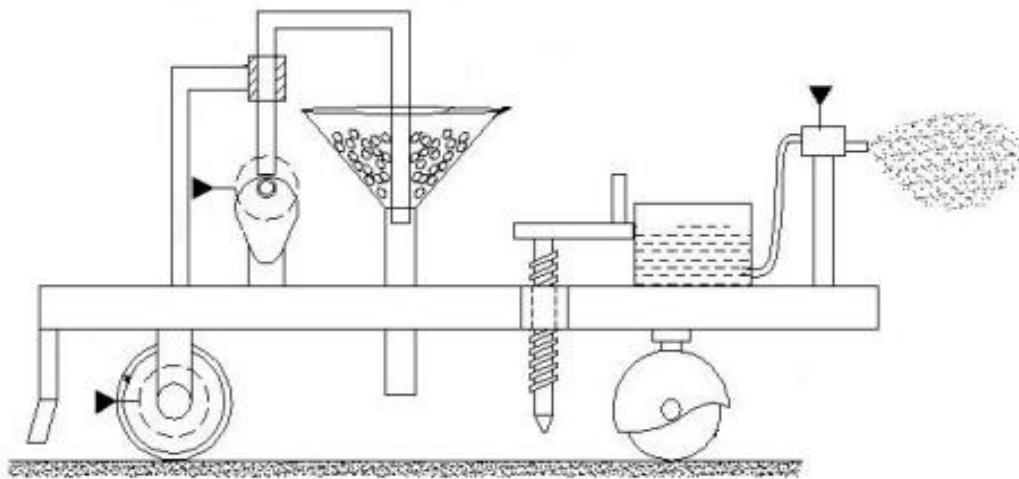


Рисунок 1.7 – Робот для посіву насіння

Пропонувалися також бурові пристрої з електроприводом для відбору проб ґрунту [23, 24]. Проте в них використовуються лінійні приводи для проникнення в ґрунт без обертального руху, що важливо для зниження опору ґрунту під час буріння. Хоча ряд інших пристроїв дозволяють забезпечити

обертальний рух, однак вони не можуть запобігти обертанню ґрунту при бурінні. Це ускладнює оцінку вертикального розподілу матеріалу у пробі.

## 1.2 Загальна характеристика шнекового електротепломеханічного перетворювача

Для підвищення ефективності, економічності та універсальності пристроїв, які забезпечують операції буріння, транспортування, перемішування, пресування та нагрівання зазначених речовин, важливе значення має їх використання як ланок технологічного ланцюга. В якості альтернативи перерахованим вище підходам пропонується багатоцільова мобільна роботизована платформа [25, 26], оснащена шнековим електротепломеханічним перетворювачем. Пропонований перетворювач використовує зовнішній ротор-шнек для обертального руху (зниження опору ґрунту) та внутрішній нерухомий вал для відбору проби без обертання ґрунту (рис. 1.8). При цьому ротор-шнек одночасно виконує функції ротора асинхронного двигуна, нагрівального елемента, виконавчого механізму і захисного корпусу. У шнековому ЕТМП використовується принцип саморегулювання при перетворенні енергії, згідно з яким розподіл на корисні потоки теплової та механічної енергії здійснюється відповідно до величини поточного ковзання, яке залежить від співвідношення електромагнітних моментів двигунового та гальмівного модулів ЕТМП.

Коли обмотка статора двигунового модуля підключена до джерела напруги, створюється магнітне поле, що обертається, під дією якого в прилеглий зоні зовнішнього феромагнітного ротора індукуються вихрові струми. У результаті формується асинхронний електромагнітний момент. Головним режимом вважається протилежний напрямок обертання полів, у якому гальмівний модуль працює при ковзанні  $S_r > 1$ , тобто у режимі електромагнітного гальмування.

При використанні такої модифікації МРП для видалення та очищення приміщень (резервуарів) від густих і в'язких речовин не потрібне додаткове обладнання для їх розігріву, оскільки нагрівання та зниження в'язкості речовини відбудеться за рахунок власних теплових втрат ротора-шнека та статора.

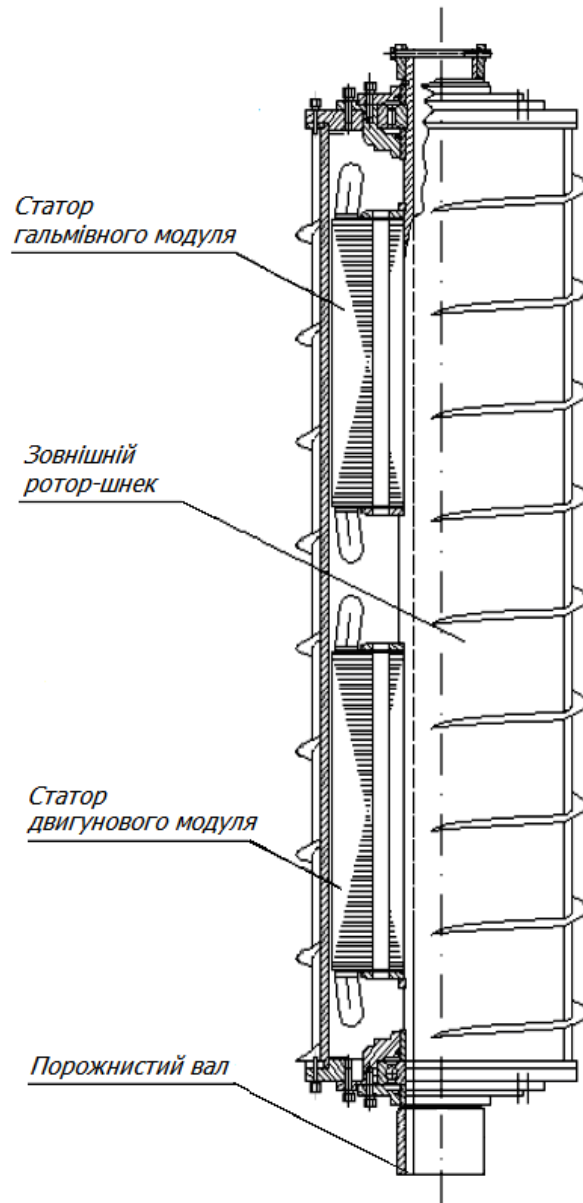


Рисунок 1.8 – Конструктивна схема шнекового ЕТМП

Водночас, автоматизована подача корму, його підігрів та перемішування дозволяють знизити витрати на годування, підвищити активність тварин, а також кількість та якість надою [10].

Технологія 3D-друку великомасштабних структур може бути вдосконалена шляхом поєднання електродвигуна та шнека в одному корпусі. Це дасть не тільки економію маси та розмірів (важливу для космічних місій), а й суттєве підвищення ККД та надійності системи за рахунок функціональної інтеграції та повного використання дисипативної складової енергії. Необхідність у додаткових джерелах тепла зникне, а ротор-шнек повністю занурений у реголіт здатний передавати йому максимум теплової та механічної енергії (рис. 1.6).

Пропонована МРП, оснащена шнековим ЕТМП, здатна вирішувати завдання в галузі сільського господарства та екології, галузі ліквідації надзвичайних ситуацій та забезпечення безпеки.

У разі обмеження енергоспоживання необхідно розумно вибирати робочі параметри, щоб знизити опір навантаження та кількість енергії, що споживається. З метою розробки оптимальної конструкції шнекового пристрою, а також стратегії управління його рухом важливо детально вивчити взаємодію між шнековим інструментом і матеріалом. Унікальність ситуації із шнековим електротепломеханічним перетворювачем полягає в тому, що робоче середовище має розглядатися як об'єкт (окремий клас) системи зі своїми параметрами та функціями.

Точний розрахунок розподілу електромагнітного поля в активній частині електротепломеханічного перетворювача є важливим етапом на шляху до оптимізації його конструкції та прогнозування вихідних характеристик.

### 1.3 Висновки до розділу 1

Для виконання ряду важливих завдань доцільне використання мобільних роботизованих платформ, що оснащені буровим інструментом. Це дозволяє розширити можливості роботизованих платформ та підвищити їх ефективність. Найчастіше буровий інструмент МРП застосовується для

буріння (свердління) ґрунтів або порід, а також для вилучення (видалення), транспортування та перемішування різних речовин.

З метою підвищення ефективності та економічності багатоцільової мобільної робототехнічної платформи пропонується обладнати її шнековим перетворювачем. Це стає можливим за рахунок об'єднання електродвигуна, бура (шнека) і нагрівача в одному корпусі. Все це дасть не тільки економію маси та розмірів, а й суттєве підвищення ККД та надійності системи в цілому. Пропонована мобільна робототехнічна платформа, оснащена шнековим ЕТМП, здатна вирішувати завдання в галузі сільського господарства та екології, галузі ліквідації надзвичайних ситуацій і забезпечення безпеки.

Точний розрахунок розподілу електромагнітного і температурного поля в активній частині шнекового електротепломеханічного перетворювача є важливим етапом на шляху до оптимізації його конструкції та прогнозування вихідних характеристик.

## 2 ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ СУМІЩЕНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ З БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

### 2.1 Особливості функціонування суміщених електромеханічних пристроїв з багатофункціональними властивостями

Розробка електроприводів із суміщеними з ротором елементами виконавчого механізму, особливості їх розрахунку і задачі оптимального проектування диктують необхідність детального вивчення характеру розподілу електромагнітного поля в масивному робочому циліндрі ротора різної конструкції з урахуванням реальних геометричних співвідношень і режиму роботи [27, 28].

При необмежених розмірах провідного масиву плоска електромагнітна хвиля затухає згідно із законом  $A = A_m \cdot e^{-z/\Delta}$ , де  $A$  і  $A_m$  – поточне і максимальне значення складової поля;  $z$  – координата поширення електромагнітної хвилі;  $\Delta = \sqrt{2 \rho / \omega \mu_a s}$  – еквівалентна глибина проникнення поля. При  $z = \Delta$   $A = 0,37 A_m$  [27]. Для реальних конструкцій роторів – масивних, порожнистих і інших, а також реальних режимів роботи асинхронних двигунів – характер поля інший. Якщо масивний циліндр оточений з двох сторін повітрям і його хвильовий опір великий, то складові поля у циліндрі зазнають багатократні віддзеркалення від його поверхонь і поступово затухають. При цьому магнітна складова відбивається з протилежним знаком, а електрична – без зміни знаку. Зростання напруженості електричного поля в масивному циліндрі приводить до збільшення щільності струму і активної потужності, зростання напруженості магнітного поля – до зниження реактивної потужності, що передається до ротору. Наявність відбитої хвилі електромагнітного поля викликає в

порожньому роторі значне збільшення реактивної потужності і зменшення коефіцієнта потужності двигуна в цілому.

Встановлено [29], що втрати енергії в обмотці статора двигуна із звичайним короткозамкненим ротором приблизно у п'ять разів більше, ніж у двигуні з масивним ротором.

Раніше ми показали, яким чином формується ККД електроприводу за наявності комутаційної апаратури, механічних передач і редуктора. Аналіз показує, що в середньому ККД системи електроприводу складає 0,72...0,85, а втрати у механічній передачі від двигуна до виконавчого механізму рівні 7...10%. Це пояснює одну з основних тенденцій розвитку електроприводу, яка полягає в максимально можливому усуненні проміжних механічних передач, а в межі – в об'єднанні електродвигуна і робочого органу в одному корпусі. Для великої кількості практично важливих випадків це може бути досягнуто застосуванням безредукторних приводів з номінальною частотою обертання не вище 30...100 об./хв. Саме цим пояснюється використання тихохідних електродвигунів в металургії – галузі, яка традиційно є однією з найбільш передових в плані використання сучасних систем електроприводу.

На перший погляд безперечно твердження про те, що енергозберігаючі двигуни придуть на зміну двигунам загальнопромислового виконання, в нинішніх умовах вимагає критичного аналізу. У середньому ККД і коефіцієнт потужності енергозберігаючих (енергоєфективних) двигунів на 3...5% вищий, ніж у двигунів загальнопромислового виконання. Енергозберігаючі двигуни мають на 30...35% більше сталі, на 20...25% – міді і на 10...15% – алюмінію. З урахуванням досконаліших і коштовніших технологій, які використовуються при виробництві енергозберігаючих двигунів, їх вартість як мінімум на 40...50% вище за вартість звичайних електричних машин. Розрахунки показують, що при тарифах на електроенергію, що діють на Україні, і реальних термінах служби електричних машин потужністю декілька кіловат, які не перевищують 2 років, використання енергозберігаючих двигунів не окупиться протягом

періоду їх експлуатації. Необхідна якість апаратури захисту двигунів в цих країнах, що робить можливою експлуатацію електродвигунів при вищих коефіцієнтах завантаження. Для технологічних процесів переробки сировини, де використовуються шнекові механізми, встановлено, що залежність ККД шнека відносно потужності, що витрачається на транспортування матеріалу практично повторює формою залежність  $\eta = f(P_2)$  для асинхронного двигуна. ЕТМП використовує теплову енергію джоулевих втрат і, природно, характеризується додатковим тепловим ККД. Разом з тим, будь-який пристрій, що веде перетворення енергії, характеризується термодинамічною ефективністю, в загальному випадку не співпадаючою за умовами настання максимуму з ККД по активній потужності.

Принципи і методологія створення ЕТМП повинні бути зорієнтовані на те, щоб умови настання максимумів термодинамічного ККД, ККД по активній потужності і теплового ККД були максимально зближені.

Вдосконаленню методів проектування багатofункціональних пристроїв або електричних машин, суміщених з виконавчими механізмами, присвячені роботи [30, 31], розробки фірми MITSUBISHI ELECTRIC.

Проте принципи і методологія створення ЕТМП, в яких перетворення енергії ведеться одночасно по трьом каналам і де робоче навантажувально-охолоджуюче середовище розглядається як елемент системи, в даний час не розроблені. Надзвичайно важливим в зв'язку з цим з'явилася пропозиція проф. Копилова І.П. представляти в загальному вигляді електричну машину з внутрішнім опором  $Z_{вн}$  (рис. 2.1) як шестиполіусник з двома електричними виводами, що характеризуються напругою  $U$  і частотою  $f$ , двома механічними виводами з моментом на валу  $M$  і частотою обертання  $n$ , двома тепловими виводами, що характеризуються кількістю теплоти  $Q$  і температурою  $T$ , що виділяється в машині.

При проектуванні електричних машин традиційного виконання прагнуть підвищити ККД шляхом зменшення потоків теплової енергії. Для ЕТМП ККД визначає ефективність перетворення електричної енергії в

теплову і механічну з урахуванням теплового ККД. Необхідно додати, що в модулях ЕТМП може відбуватися перетворення електричної і механічної енергії, що поступає, в теплову.

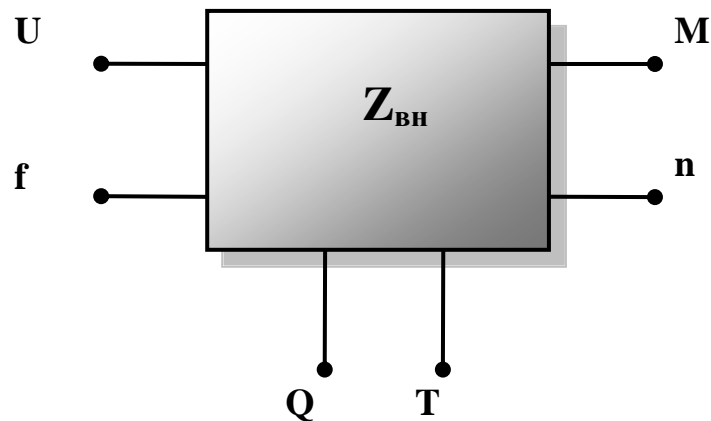


Рисунок 2.1 – Представлення електромеханічного перетворювача у вигляді багатополюсника

При дослідженні причин виникнення вищих гармонік (ВГ) було висловлено припущення про те, що вони можуть "прийти" в повітряний зазор з теплового виводу (див. рис. 2.1). При нелінійній зміні температури середовища, що оточує електричну машину, в повітряному зазорі з'являються вищі гармоніки і магнітне поле спотворюється. Найбільші амплітуди вищих гармонік мають місце при теплових ударах. Спектри гармонік, що з'являються в повітряному зазорі з боку теплового виводу, ще недостатньо досліджені. У загальному випадку часові гармоніки можуть з'явитися в повітряному зазорі при одночасній дії нелінійних збурень на три "входи" в електричну машину, тобто з боку електричних, механічних і теплових виводів.

Теплофізичні і електромагнітні властивості елементів електромеханічної системи можуть бути функціями координат і часу. В даному випадку ми розглядаємо параметричні і просторово неоднорідні середовища. Опис зводиться до нелінійних гіперболічних рівнянь і виникнення нових ефектів, зокрема, до ефекту збудження ВГ.

Згідно сучасним уявленням, додаткові втрати в асинхронних машинах виникають в основному в роторі, а їх причиною служать поля ВГ і струми, що вони спричиняють. Сукупність ВГ полів статора, що діють на ротор, визначається зосередженням провідників обмотки статора в пазах і зубчатістю статора. У першому випадку виникають гармонійні поля, які особливо істотні при роботі двигуна під навантаженням. Обумовлені дією цих полів втрати відносяться до категорії навантажень. Додаткові втрати, викликані відкриттям пазів статора, відносяться до категорії втрат при холостому ході. Оцінка впливу на втрати в масивному роторі магнітної проникності  $\mu_p$  і питомого електричного опору матеріалу ротора, а також величини повітряного зазору  $\delta$  проводиться на основі еквівалентної схеми, складеної з урахуванням контурів вищих гармонік (рис. 2.2).

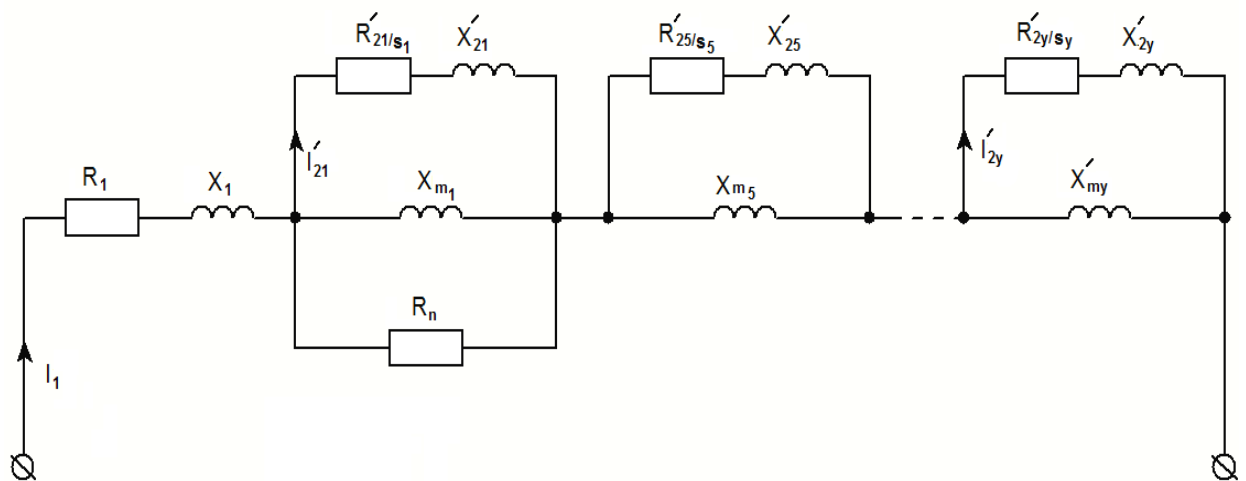


Рисунок 2.2 – Схема заміщення асинхронного двигуна з урахуванням контурів вищих гармонік

Основу еквівалентної схеми складають індуктивності області намагнічування  $X_{mv}$  для основної і вищих гармонік поля статора, кожна з яких шунтується гілкою з еквівалентними опорами масивного ротора для відповідної гармоніки. Опори  $R_n$ , підключені паралельно  $X_{m1}$  враховують поверхневі втрати, обумовлені зубчатістю статора (втрати холостого ходу).

Автори [29] звертають увагу на те, що опір гілок схеми заміщення для ВГ значно менший, ніж для першої гармоніки, тому зміна параметрів  $\nu$ -го контуру може вплинути лише на перерозподіл струмів між гілкою ротора і гілкою намагнічування цього контуру, але не на загальний струм двигуна. Проте зміна параметрів контуру першої гармоніки, звичайно, змінює повний струм.

Параметри ротора і втрати в двигуні  $\nu$ -ої гармоніки характеризуються параметром  $\alpha_\nu$ , величина якого пропорційна  $\sqrt{\mu_p \cdot \rho}$ , а також ковзанням, відповідним даній гармоніці  $S_\nu = 1 + \nu(1 - S_1)$ . У двигунах з масивним ротором традиційного виконання параметр  $\alpha_\nu$  прагнуть вибирати можливо меншим для зменшення втрат ковзання від поля першої гармоніки. Відомі, наприклад, методи порошкової металургії, що дозволяють набути будь-якого значення магнітної проникності матеріалу за рахунок змішування феро- і не феромагнітних металевих порошоків. Масивний ротор, виконаний з суміші феромагнітного порошку ПЖРВ-2-200 з добавкою 20% (за об'ємом) мідного порошку ПМС-2, має питому електропровідність  $14 \cdot 10^6$  (Ом·м)<sup>-1</sup>, початкову магнітну проникність  $162 \mu_0$ , максимальну –  $345 \mu_0$ . Для втрат від полів ВГ МРС обмотки статора такої однозначної залежності від параметра  $\alpha_\nu$  не має. Зміна  $\alpha_\nu$  приводить до перерозподілу струмів в гілках  $\nu$ -го контуру схеми заміщення при незмінному повному струмі  $I_1$ . Очевидно, що при великому значенні  $\alpha_\nu$  струм ротору  $\nu$ -ої гармоніки  $I'_{2\nu}$  прагнучиме до нуля. При малому значенні  $\alpha_\nu$ , навпаки, весь струм  $I_1$  проходить по гілці ротора. У обох цих крайніх випадках втрати в роторі від полів  $\nu$ -ої гармоніки прагнуть до нуля. Існує максимум втрат в роторі від полів вищих гармонік при певному значенні  $\alpha_\nu$ . Втрати в роторі, залежні від зубчатості статора (втрати холостого ходу) монотонно зростають при зменшенні  $\sqrt{\mu_p \cdot \rho}$ . Зміною повітряного зазору, зокрема обумовленою нагрівом ротора, можна в деяких межах перерозподіляти втрати з ротора на статор і навпаки.

Раніше ми відзначали, що в ЕТМП представлені дві компоненти корисної потужності: механічна і теплова. Крім того, доцільна концентрація останньої саме на масивному роторі.

Таким чином, особливості конструкції і функціональна спрямованість ЕТМП ставлять завдання регуляції теплової енергії, що виділяється, і отримання необхідних механічних характеристик в широкому діапазоні зміни ковзання (зокрема при великих ковзаннях  $s > 1$ ) з урахуванням ВГ, що створюють прямі і зворотні магнітні поля. Цілком не вивчено питання виникнення ВГ при раптових змінах умов охолодження масивного ротору.

Для електричних машин з поєднанням ротору і виконавчого механізму, що виконують до того ж функції гріючого елемента, тобто наявністю теплової компоненти в корисній потужності, потрібні нові підходи і нова методологія проектування, в основі якої повинні бути структурна, функціональна і тепла інтеграція, а також інший спосіб оцінки енергетичної ефективності.

2.2 Проблеми моделювання взаємопов'язаних електромагнітних, механічних і теплових процесів в електромеханічних пристроях з багатофункціональними властивостями

ЕТМП порівняно з традиційними конструкціями асинхронних машин з масивним ротором має ряд істотних відмінностей:

- масивним ротором є тонкостінний циліндр, товщина якого порівнянна з глибиною проникнення електромагнітної хвилі;
- масивний ротор не має вихідного кінця валу, виконує одночасно функції виконавчого механізму, захисного корпусу і знаходиться безпосередньо у контакті з робочим навантажувально-охолоджуючим середовищем;

– робоча температура масивного ротора може досягати  $350 - 400^{\circ}\text{C}$ , що визначає достатньо широкий діапазон температурних змін електромагнітних параметрів;

– для отримання низьких частот обертання момент масивного ротора, формується як мінімум двома модулями, один з яких може працювати в гальмівному режимі протиключення і в двигуновому режимі. Отже, уздовж ротора ми спостерігаємо чергування активних зон з різною глибиною проникнення електромагнітної хвилі.

Разом з тим, відомі математичні моделі процесів, що відбуваються в масивнороторних машинах, не дають результатів, повністю співпадаючих з експериментальними даними. Великі розбіжності спостерігаються при оцінках перехідних процесів і механічних характеристик машин.

Таким чином, створення ЕТМП – це комплекс завдань, що вміщає як невирішені раніше, так і якісно нові завдання, викликані особливостями конструкції і функціональними властивостями ЕТМП.

Моделювання електромагнітних, механічних і теплових процесів в керованих асинхронних машинах ускладнюється саме нелінійністю електромагнітних параметрів. Для дослідження електромагнітних процесів в електричних машинах початковими є для сталих режимів комплексні рівняння, а для перехідних режимів – диференціальні рівняння електромагнітної рівноваги, записані в реальних фазових координатах. Аналітичне вирішення таких рівнянь в загальному вигляді не представляється можливим у зв'язку з наявністю в них нелінійних і періодичних коефіцієнтів.

Математичні моделі (ММ) на базі диференціальних рівнянь мають значні переваги над схемами заміщення і векторними діаграмами та мають глибший фізичний сенс, а також адекватно відображають процеси електромеханічного перетворення енергії. Як бачимо, класифікація схем моделювання ЕТМП достатньо проста. Значно ширше класифікація методів, які застосовуються для вирішення рівнянь ММ. Серед методів, які

найчастіше застосовуються при дослідженнях і розрахунках перехідних процесів та електромагнітного поля, можна вказати наступне:

- кінцево-різницевий метод сіток;
- моделі на основі схем заміщення з розподіленими і зосередженими параметрами;
- метод аналогового моделювання багат шарових структур;
- методи чисельного вирішення коло-польових моделей (метод поінтервальної апроксимації, метод розділення змінних поточкозчеплення, метод періодизації зовнішньої дії);
- методи ортотронного моделювання;
- сіткова гармонійна модель (диференціальний і гармонійний метод);
- метод розповсюдження плоских електромагнітних хвиль;
- чисельний аналіз поля і параметрів масивного ротора.

Швидко прогресуючий розвиток ПЕОМ значно розширив можливості вирішення систем диференціальних рівнянь і дослідження перехідних процесів в електричних машинах. При цьому з'явилася можливість вирішення завдань великої складності і отримання високої точності. Отримують свій розвиток і чисельні методи вирішення систем диференціальних рівнянь. Можливість ефективного вирішення прикладних завдань, заснованих на розрахунках електромагнітних полів, дає робота в середовищі програми FEMM. Програми даного роду можуть в корені змінити підходи до електромагнітних розрахунків електричних машин. Численні аналітичні і наближені методики розрахунку електромагнітних параметрів електричних машин можуть бути замінені єдиною розрахунковою методикою на основі чисельного вирішення польових завдань в середовищі FEMM.

Аналітичні методи відрізняються сумісністю і явним видом отриманих рішень, що, безумовно, є їх великою перевагою. Разом з тим, при використанні цих методів для вирішення рівнянь електромагнітного і теплового поля в багатовимірному нелінійному середовищі, яким є масивний

ферромагнітний ротор, вносяться істотні допущення, що, у ряді випадків, впливає на достовірність отриманих результатів.

Застосування чисельних методів значно розширює можливості дослідження процесів в масивному роторі ЕТМП, дозволяє врахувати нелінійність середовища шляхом завдання відомій залежності  $B = f(H)$ , теплового дрейфу електромагнітних параметрів і таким чином підвищити точність розрахунків.

Історія розвитку електромеханічних перетворювачів свідчить про наявність двох крайніх підходів в теорії: на базі теорії поля і теорії ланцюгів. Теорія поля розвивається на основі рівнянь Максвела, а теорія ланцюгів – на основі рівнянь Кірхгофа. Третій підхід, який формується в даний час, – це комбінований підхід, що поєднує методи теорії поля і теорії ланцюгів. Очевидно, що для розгляду і аналізу динамічних режимів в ПЕМА повинні бути сформований четвертий підхід, розширюючий коло-польовий підхід приєднанням теорії теплових полів. Причому область розгляду процесів не обмежується тільки активною частиною ЕТМП.

Особливістю сучасних досліджень і розробок машин змінного струму є зростання вимог до них по розширенню функціональних можливостей і забезпеченню необхідних режимів роботи. Оскільки асинхронні двигуни традиційних конструкцій цим вимогам не задовольняють, то були запропоновані нові конструкційні рішення, для яких питання теорії розроблені недостатньо повно. Для усестороннього опису властивостей і зв'язків ЕТМП необхідно використовувати закони електродинаміки, термодинаміки, гідродинаміки, механіки та інших наук.

Аналізу асинхронних машин з масивним ферромагнітним ротором, яким власне і є ЕТМП, присвячено достатньо багато робіт. Всі вони описують електромагнітні процеси у ферромагнітному роторному масиві і отримання вхідного (хвильового) еквівалентного опору масивного ротора.

Аналіз електромагнітного поля в гладкому ферромагнітному роторі електричної машини при постійному значенні магнітної проникності

$\mu = \text{const}$  проводився багатьма вітчизняними і зарубіжними авторами в різній постановці (з використанням як прямокутних, так і циліндрових систем координат), при різних допущеннях. Відомо, що результати такого аналізу в прямокутній координатній системі приводять до того, що основні польові характеристики – напруженість електричного поля уздовж ротора  $E_z$  і тангенціальна напруженість магнітного поля  $H_x$  мають ідентичний закон зміни по координаті  $Y$  (углиб масиву) з комплексним коефіцієнтом розповсюдження хвилі. Приблизно такі ж дані дає аналіз при  $\mu = \text{const}$  в циліндровій системі координат, але з деякими відхиленнями від вказаного закону в області низьких частот (при  $s < 0,5\%$ ), коли глибина проникнення хвилі  $\delta \geq 0,2\Delta$ , де  $s$  – товщина циліндра ротора.

Порівняння цих результатів з даними випробувань, які приводилася в різних роботах, показали, що аналіз поля гладкого масивного феромагнітного ротора за умови  $\mu = \text{const}$  не дає точного уявлення про закон зміни  $E_z$  і  $H_x$  по глибині масиву, завищує величину модуля  $H_x$  (при заданій  $E_z$ ) на поверхні масивного ротора, спотворює фазу  $H_x$ .

Строгіший облік зміни магнітної проникності можливий при рішенні польової задачі методами кінцевих елементів. Приклад рішення такої задачі приведений в [32], де залежності параметрів, насичення, що враховують, і гістерезис, знаходяться в результаті рішення польової задачі для плоскої електромагнітної хвилі в масивному феромагнетіку із змінною магнітною проникністю. Рішення чисельним методом дозволяє визначити залежність середнього хвильового опору ротора від ковзання і напруги.

Необхідно відзначити і такий факт. Еквівалентні опори масивного ротора можуть бути знайдені і без вирішення рівнянь Максвелла. Наприклад, В.М. Куцевалов успішно застосував метод комплексних магнітних опорів, який в деяких випадках більш наочний.

Створення фізичних і математичних моделей з урахуванням того, що одночасно відбуваються взаємозв'язані електромагнітні, теплові, механічні,

гідроаеродинамічні, вібраційні та інші процеси, вельми складне з багатьох причин. Тому прийняття допущень, ідеалізація схемно-конструктивних особливостей, їх обґрунтування і оцінка погрішностей, що вносяться ними, є одним з основних етапів побудови об'єкту дослідження, який ми збираємося описувати математично.

Розглянемо ті з них, які вимагають певного акценту про прийняття або неприйняття у зв'язку з адаптацією до створюваних коло-польових моделей ЕТМП.

Прийнятним можна рахувати допущення про те, що електромагнітні параметри реальних і еквівалентних обмоток приймаються зосередженими. Проте можливе розбиття, наприклад, масивного ротора на декілька зон, в яких через різний тепловий стан набувають різних значень питомий активний опір і, можливо, відносна магнітна проникність. Це необхідно для детального аналізу виникнення вищих гармонійних полів.

Допущення про неврахування механічних напруженостей і впливу температури на геометричні розміри слідує в ЕТМП використовувати вибірково і при необхідності враховувати за допомогою коефіцієнтів теплового розширення.

Допущення про нехтування процесами і втратами в сталі для масивнороторних машин є неприпустимим. Необхідність у прийнятті допущень про те, що магнітний ланцюг ненасичений, магнітна проникність заліза дорівнює нескінченності, лінії магнітного потоку радіальні в даний час відпала.

Доцільно відмовитися від допущення про завдання струму в обмотці статора у вигляді тонкого шару на розточці і синусоїдального лінійного навантаження, що біжить по розточці. При використанні методу кінцевих елементів можливо задавати реальний струмовий шар в пазах статора.

Вплив зміни температури на зміну електромагнітних параметрів може бути врахований при поєднанні досліджень електромагнітних і теплових

процесів. Оскільки температура ротора може досягати 350 °С, моделювання при двох рівнях температур (20°С і 115°С) вже буде недостатнім.

Значення магнітних індукцій в повітряному зазорі та на ділянках магнітного ланцюга статора в будь-яких режимах буде менше значень при ідеальному холостому ході. Тому при збільшенні навантаження і зниженні частоти обертання ротора насичення ділянок магнітного ланцюга статора зменшується. Але проведення навіть меншого значення магнітного потоку взаємоіндукції через зменшений по висоті поверхневий шар в роторі приводить до його насичення і збільшення струму намагнічування в порівнянні із струмом при ідеальному холостому ході. Поверхневий шар в роторі ЕТМП може зменшуватися за рахунок переведення одного з модулів в режим противключення, при якому  $s > 1$ .

Як вже наголошувалося, придумано багато нових теорій, схем заміщення і інших рішень, а завдання визначення електромагнітних параметрів до цих пір залишаються невирішеними. Дуже важливим є врахування ряду положень, отриманих в результаті численних експериментальних робіт:

- питомий активний опір масивного феромагнітного ротора на змінному струмі залежить від магнітної проникності; максимальне його значення досягається при максимальній магнітній проникності і воно у декілька разів більше, ніж при постійному струмі. При збільшенні напруги, що підводиться, воно зменшується;

- відношення індуктивного опору до активного для феромагнітного ротора є нелінійною залежністю від електромагнітних навантажень;

- глибина проникнення електромагнітної хвилі в масивний феромагнітний ротор при короткому замиканні двигуна досягає десятків міліметрів. Раніше вважалося, що вона складає 1–2 мм на частоті  $f = 50$  Гц змінного струму.

В даний час відомо дуже мало робіт, в яких зроблена спроба розгляду варіанту коло-польової моделі, де компоненту поля представлено одночасно

електромагнітним і тепловим полем. Причому в [33] розглядається характерна для ЕТМП область достатньо високих температур (до 400 °С).

В цілому публікації багатьох зарубіжних авторів присвячені розвитку теорії і вдосконаленню конструкцій ЕТМП з гладким масивним ротором і зайвий раз підкреслюють поширеність таких пристроїв і коло розглянутих нами проблем.

Рівняння перенесення теплової і електромагнітної енергії мають дивно однакову математичну форму, що створює єдину основу для опису і дослідження теплових і електромагнітних полів, не дивлячись на те, що є і істотні відмінності в описі скалярних теплових полів і векторних електромагнітних. Відмінність також виявляється і в різноманітності матеріальних теплових і електромагнітних характеристик неоднорідного середовища, постановці деяких крайових умов для теплових і електромагнітних полів і навіть в самих рівняннях, що належать до параболічного типу для теплових полів і до гіперболічного типу для електромагнітних. Узагальнення основних законів теплоперенесення з урахуванням кінцевої швидкості розповсюдження тепла, проведене в останніх дослідженнях, усуває останню відмінність, оскільки рівняння теплоперенесення в цьому випадку також виявляються гіперболічними і у багатьох відношеннях схожими з рівняннями електромагнітного поля.

Закон збереження для будь-якої субстанції  $\gamma$  матерії (маси, енергії і так далі) в диференціальній формі має один і той же вигляд

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \text{div} j_i = I_\gamma, \quad (2.1)$$

де  $j_i$  – потік субстанції  $j$  через одиницю поверхні в одиницю часу;

$I_\gamma$  – щільність джерел (стоків) субстанції  $\gamma$ .

Якщо відомі  $j_i$  і  $I_\gamma$ , то вираз (2.1) дає рівняння для визначення локального розподілу у просторі та часі.

Матеріальні характеристики неоднорідних середовищ апроксимуються поліномами або простими періодичними і квазіперіодичними функціями. Багато реальних характеристик неоднорідних середовищ з достатнім ступенем точності можуть бути апроксимовані рядом Тейлора або поліномами кінцевого ступеня, а періодично змінні характеристики – рядами Фур'є.

Для замкнутих термодинамічних систем при різних рухах і перетвореннях матерії завжди виконуються закони збереження маси, імпульсу, енергії, які з урахуванням реальних властивостей середовища і принципу зростання ентропії дають замкнуту систему рівнянь для феноменологічного опису процесів перенесення. Ці закони можуть бути сформульовані в інтегральній формі для даної системи в цілому або в диференціальній формі для відповідних локальних макроскопічних характеристик даних процесів. При цьому всі закони збереження в диференціальній формі мають дивно загальну дивергентну форму.

У нерівноважній термодинаміці поблизу рівноважного стану постулюється лінійний зв'язок між потоками і термодинамічними силами, визначений співвідношенням:

$$j_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} \cdot X_k, \quad (2.2)$$

де  $j_i$  – потоки;

$X_k$  – термодинамічні сили.

У цьому наближенні (лінійний зв'язок) виконується принцип симетрії коефіцієнтів  $L_{ik} = L_{ki}$ . Зазвичай вказані співвідношення встановлюються експериментальним шляхом.

Для значної групи електроприводів перехідні режими двигунів є нормальними робочими режимами. У ряді випадків доцільно управляти і епізодичними перехідними режимами, такими як пуск, реверс, гальмування. Необхідність управління такими режимами є причиною появи спеціальних

вимог до двигунів, внаслідок чого їх проектування повинне проводитися з урахуванням отримання заданих динамічних показників. Саме до такої групи електромеханічних пристроїв може бути віднесений ЕТМП.

Методи моделювання і проектування двигунів на ПЕОМ, широко розроблені для серійних машин, безпосередньо не можуть бути використані для проектування двигунів із заданими динамічними показниками. Для таких двигунів не встановлена кількість типорозмірів, не проведені дослідження за визначенням варійованих і неварійованих величин, не обумовлені обмеження (лімітери) і критерії оптимізації, не визначені умови і можливості ув'язки методик їх розрахунку з існуючими методиками розрахунку. Тому найбільш зручним є аналітичний метод дослідження із застосуванням ПЕОМ на розрахунковій стадії. Такий підхід до рішення задачі припускає:

- отримання аналітичних залежностей між енергетичними характеристиками і параметрами машини в динамічних режимах;
- отримання аналітичних залежностей, що пов'язують масогабаритні показники з параметрами;
- вибір і математична формалізація критерію оптимізації та обмежень;
- складання алгоритму проектування на основі загальної системи рівнянь і розрахунків на ПЕОМ.

Визначення аналітичної залежності параметрів енергії від електромагнітних і механічних параметрів асинхронного двигуна в динамічних режимах засноване на вирішенні рівнянь Парка-Горєва. Для вирішення цих рівнянь використовується метод динамічного синтезу. Як динамічні змінні можуть бути вибрані: кутова частота обертання ротора  $\omega_p$ ; модуль потокозчеплення обмотки ротора  $\psi_p$ . При використанні ортогональної системи координат, пов'язаної з вектором потокозчеплення ротора, отримуємо вирішення рівнянь Парка-Горєва у відносних одиницях.

Отримані залежності дозволяють визначити закони зміни напруги і струмів в перехідному режимі при різних законах зміни динамічних змінних,

провести аналіз впливу параметрів машини на показники перехідного режиму і вибрати такі діапазони зміни параметрів і їх співвідношень, які задовольняють заданій якості перехідного режиму, отримати функцію зміни втрат (тепловиділень) при довільно заданих циклограмах  $\omega_p$ ,  $\psi_p$ ,  $M_c$  (момент опору). Отримані системи рівнянь встановлюють взаємозв'язок динамічних і масогабаритних показників. Далі необхідно їх доповнити відповідними аналітичними залежностями, які формалізують обмеження і критерій оптимізації. Обмеження, пов'язане з нагрівом обмоток, є одним з основних. Математична формалізація прийнятого обмеження по нагріву представляється у вигляді нерівності, в лівій частині якого присутнє апроксимоване співвідношення сумарних втрат і еквівалентної поверхні охолодження для базових моделей двигуна. У правій частині нерівності присутнє співвідношення еквівалентних втрат в перехідному режимі при довільно заданих циклограмах  $\omega_p$ ,  $\psi_p$ ,  $M_c$  і еквівалентній поверхні охолодження.

Слід зазначити, що вибір такого обмеження по нагріву приводить до спрощеної (для ЕТМП недостатньою) оцінки теплових властивостей двигуна.

Як критерій оптимізації в [34] прийнята маса двигуна. Для ЕТМП технологічного призначення маса грає не першорядну роль в плані оптимізації, оскільки необхідна поверхня охолодження формується на ранній стадії проектування по заданому технологічному режиму, а вся дисипативна енергія є корисною. Найбільш важливим для ЕТМП критерієм оптимізації, очевидно, повинен бути загальний ККД, що включає тепловий ККД.

Об'єднання всіх згаданих залежностей дає можливість отримати систему, що представляє повну математичну модель проектного двигуна. Синтез двигуна із заданими динамічними показниками зводиться до вирішення цієї системи із застосуванням чисельних методів.

Дана нова сукупність конструктивних елементів при зв'язках, що ускладнилися, і додаткових видах використовуваної енергії є складною системою, дослідження якої доцільно проводити з системних позицій.

Системне представлення досліджуваних ЕТМП дозволить розробити його структурно-функціональну схему, на якому взаємозв'язку між окремими елементами системи доповнені взаємозв'язками між математичними моделями, що описують функціонування як системи в цілому, так і її окремих модулів:  $MM1 \dots MMN$ .

Сукупність тих, що одночасно взаємодіють в часі і просторі приватних моделей  $MM1 \dots MMN$  повинна описувати функціонування систем на основі ПЕМА як транспортуючих, нагрівальних, сушильних, перемішуючих пристроїв і є інтегральною моделлю їх робочих процесів. Виконане системне представлення дозволить:

- розділити системи на основі ЕТМП на раціональне число підсистем і модулів з метою коректного опису їх функціонування;
- встановити необхідну кількість приватних і інтегральних математичних моделей, відповідних модулів, що коректно описують функціонування, підсистем і систем в цілому;
- розкрити прямі і непрямі взаємозв'язки між приватними і між приватними та інтегральною математичними моделями.

Таким чином, створення фізичних і математичних моделей ЕТМП, що відображають процеси зміни електромагнітних, теплових, механічних, гідроаеродинамічних і вібраційних характеристик, що відбуваються в динамічних режимах, при врахуванні нелінійності і періодичності електромагнітних параметрів представляє актуальне завдання.

Достовірне визначення параметрів і характеристик ЕТМП в різних режимах роботи залежить від точності математичних моделей, що приймаються для дослідження, та повноти вхідної інформації, яка відображає фізичні властивості двигунів. Це обумовлює необхідність розробки нових математичних моделей ЕТМП, що мають менше різного роду допущень і

спрощень, та повною мірою враховують геометричні характеристики і фізичні властивості матеріалів.

### 2.3 Висновки до розділу 2

Принципи і методологія створення ЕТМП, в яких перетворення енергії ведеться одночасно по трьом каналам і де робоче навантажувально-охолоджуюче середовище розглядається як елемент системи, на даний час не розроблені. Для електричних машин з поєднанням ротору і виконавчого механізму, що виконують до того ж функції гріючого елемента, тобто наявністю теплової компоненти в корисній потужності, потрібні нові підходи і нова методологія проектування, в основі якої повинні бути структурна, функціональна і тепла інтеграція, а також інший спосіб оцінки енергетичної ефективності.

Застосування чисельних методів значно розширює можливості дослідження процесів в масивному роторі ЕТМП, дозволяє врахувати нелінійність середовища шляхом завдання відомій залежності  $B = f(H)$ , теплового дрейфу електромагнітних параметрів і таким чином підвищити точність розрахунків.

### 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ШНЕКОВОМУ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

#### 3.1 Розрахунок розподілу тривимірного магнітного поля у шнековому електротепломеханічному перетворювачі

Задача вирішувалася у програмі Ansys Maxwell. Обмотка статора створена з використанням графічної бібліотеки Maxwell і в моделюванні враховувалася як активна зона обмотки, так і її лобові частини. Для скорочення часу моделювання була взята 1/8 частина машини по діаметральній симетрії, і 1/2 – по аксіальній (рис. 3.1). Крім того, два модуля ЕТМП працюють на загальний електричний вал – зовнішній тонкостінний масивний ротор, що ще більше ускладнює завдання моделювання. Основна складність полягала у подачі сигналів збудження на обмотки таким чином, щоб вони сприймалися програмою як незалежні об'єкти з роздільним живленням.

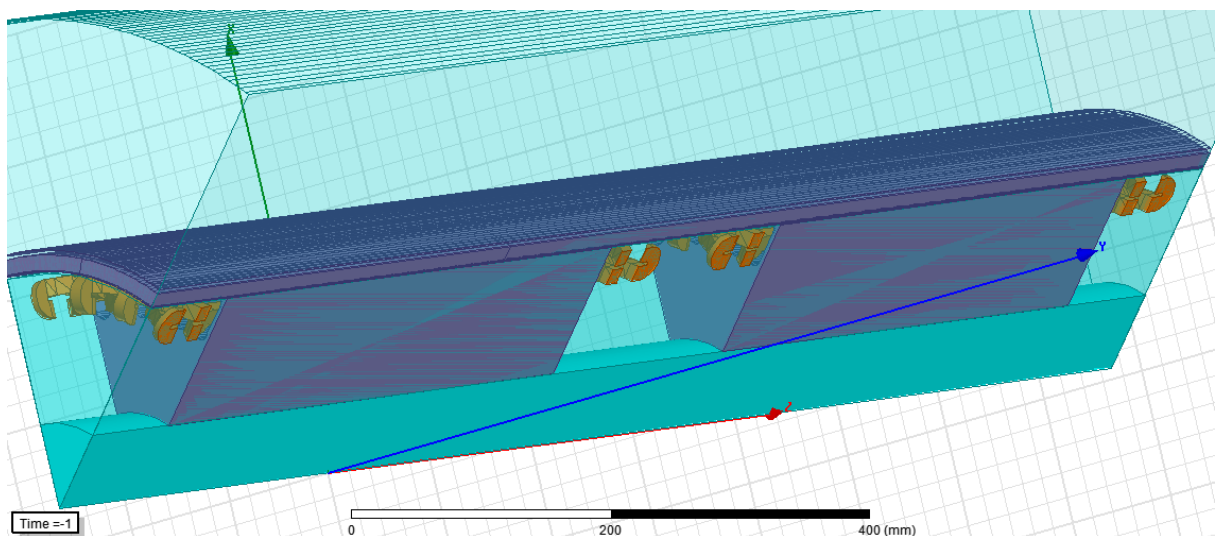


Рисунок 3.1 – Тривимірна модель двомодульного ЕТМП

Для вирішення поставленого завдання на фази кожного модуля було подано живлення від зовнішньої схеми, створеної в Circuit Editor (рис. 3.2).

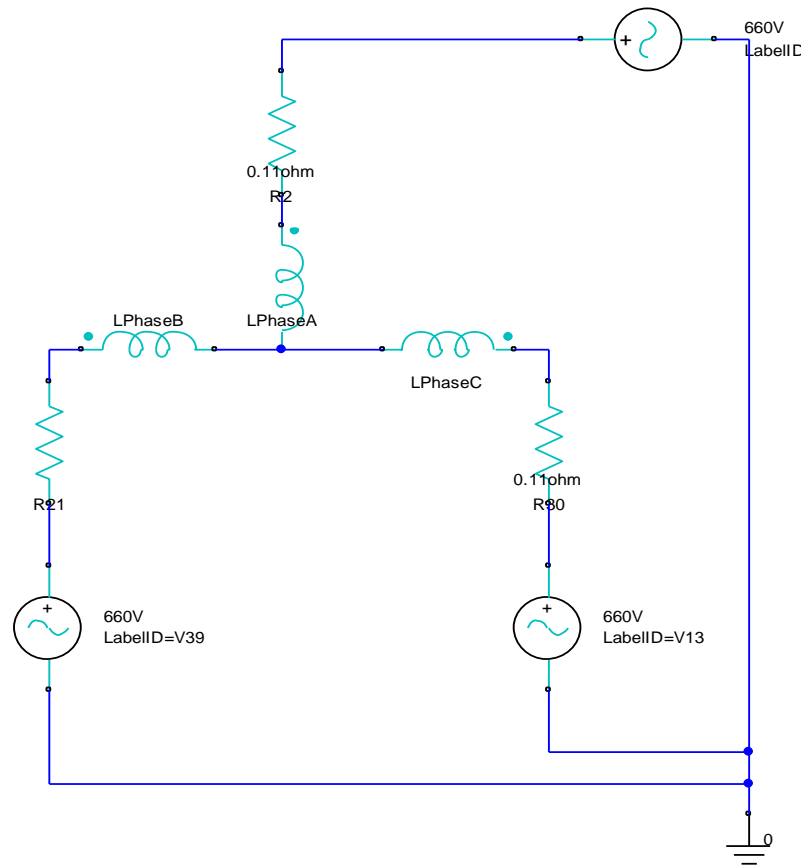


Рисунок 3.2 – Схема живлення модуля ЕТМП для тривимірної моделі

Картина розподілу магнітної індукції показана на рис. 3.3.

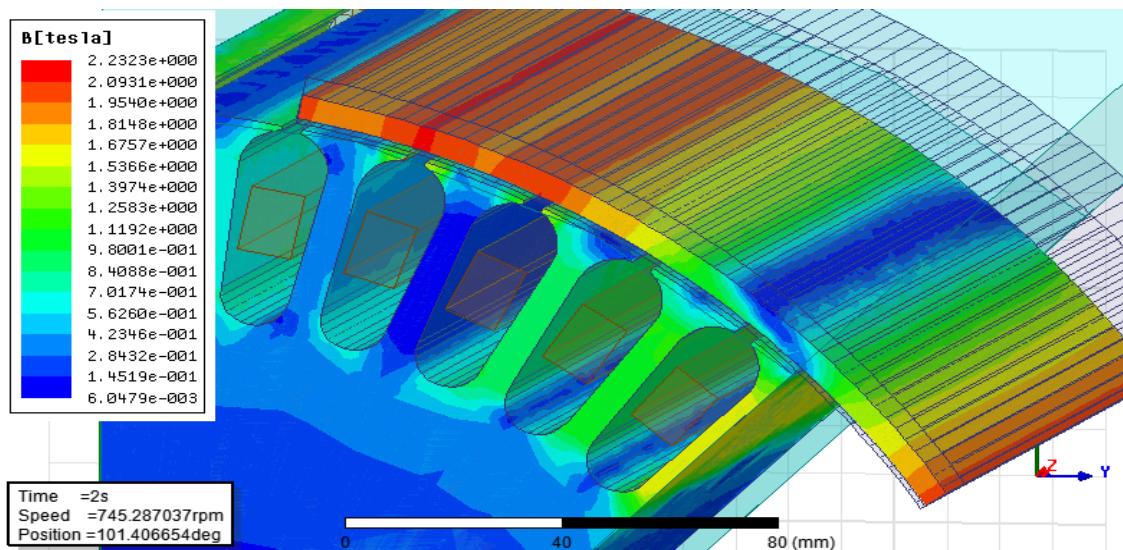


Рисунок 3.3 – Розподіл магнітної індукції в магнітопроводі статора і МР ЕТМП

Зміну частоти обертання ДМ ЕТМП при пуску без навантаження представлено на рис. 3.4. Як видно, ротор виходить на синхронну швидкість і продовжує обертатися без помітних коливань близько точки динамічної рівноваги.

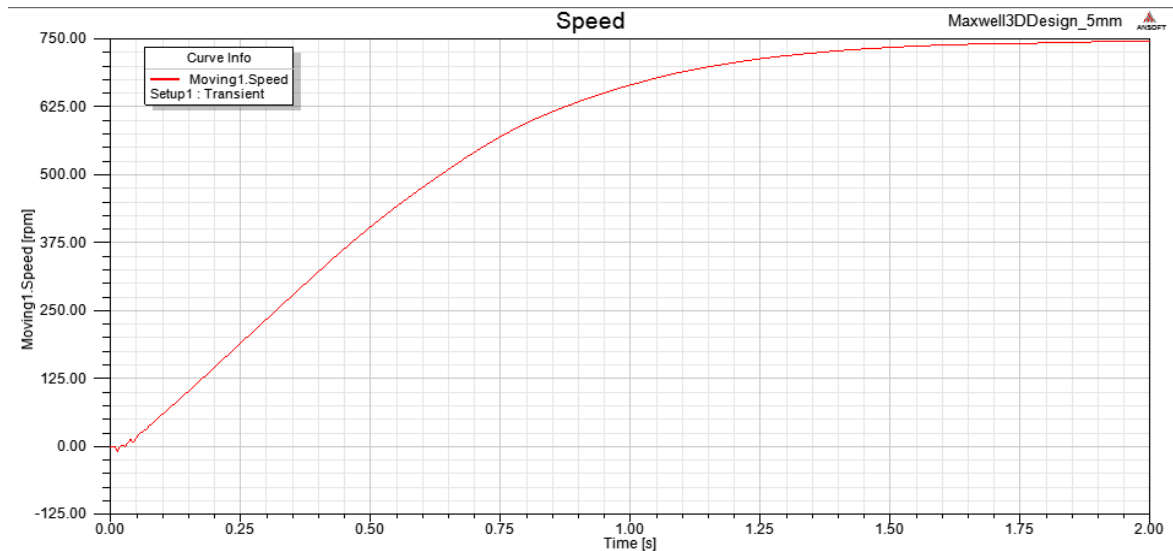


Рисунок 3.4 – Зміна частоти обертання ДМ ЕТМП при пуску без навантаження

Струмові характеристики приведені на рис. 3.5, моментна характеристика – на рис. 3.6.

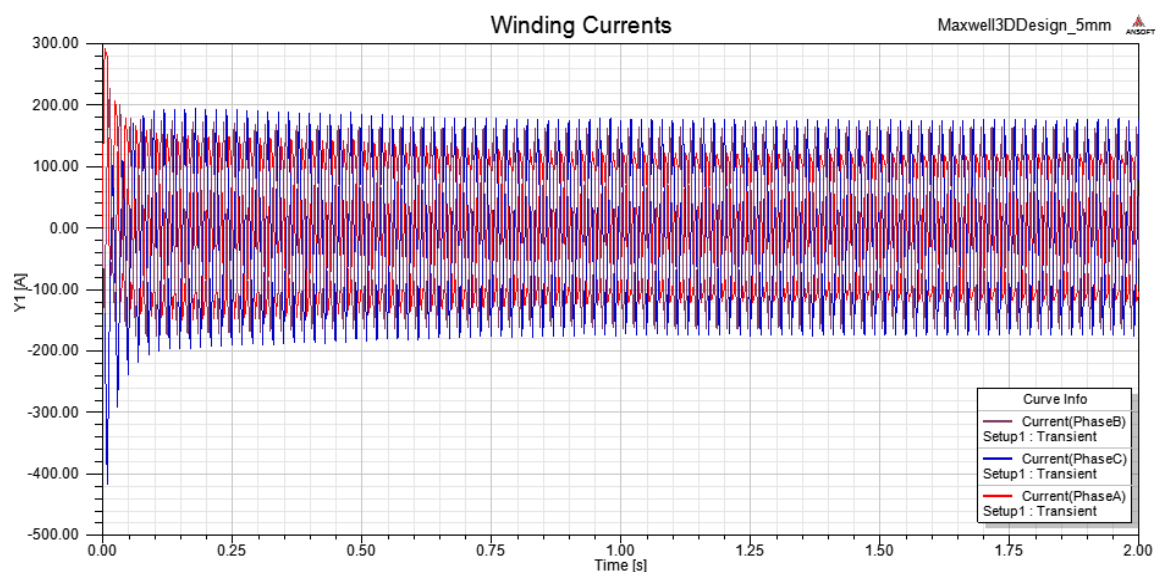


Рисунок 3.5 – Залежності струмів обмотки статора ДМ ЕТМП при пуску

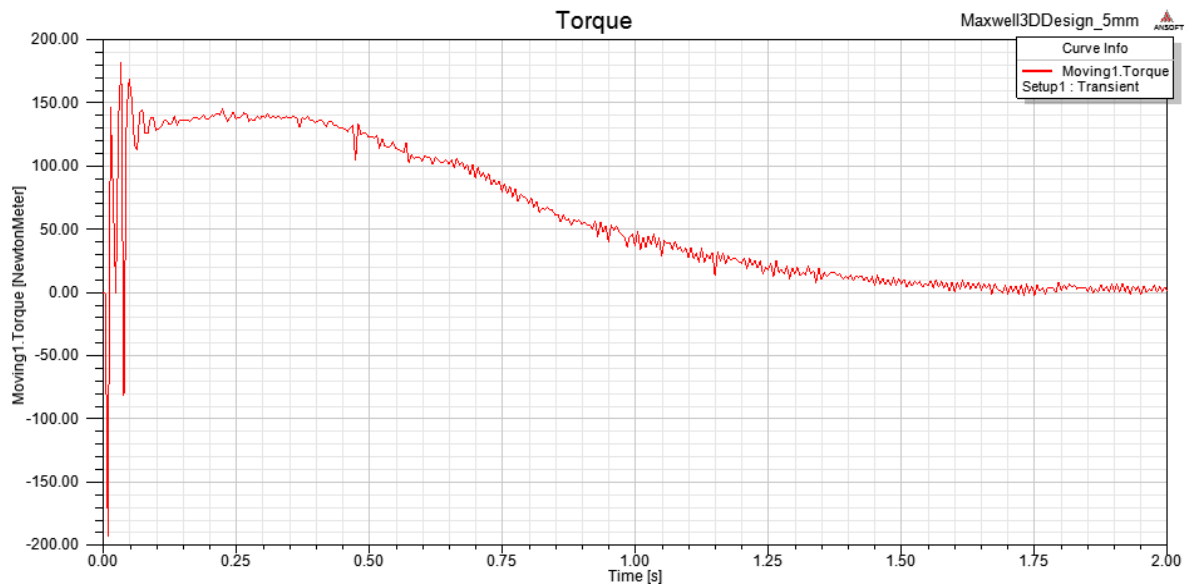


Рисунок 3.6 – Характеристика обертового моменту ДМ ЕТМП

Картина розподілу напруженості електромагнітного поля показана на рис. 3.7.

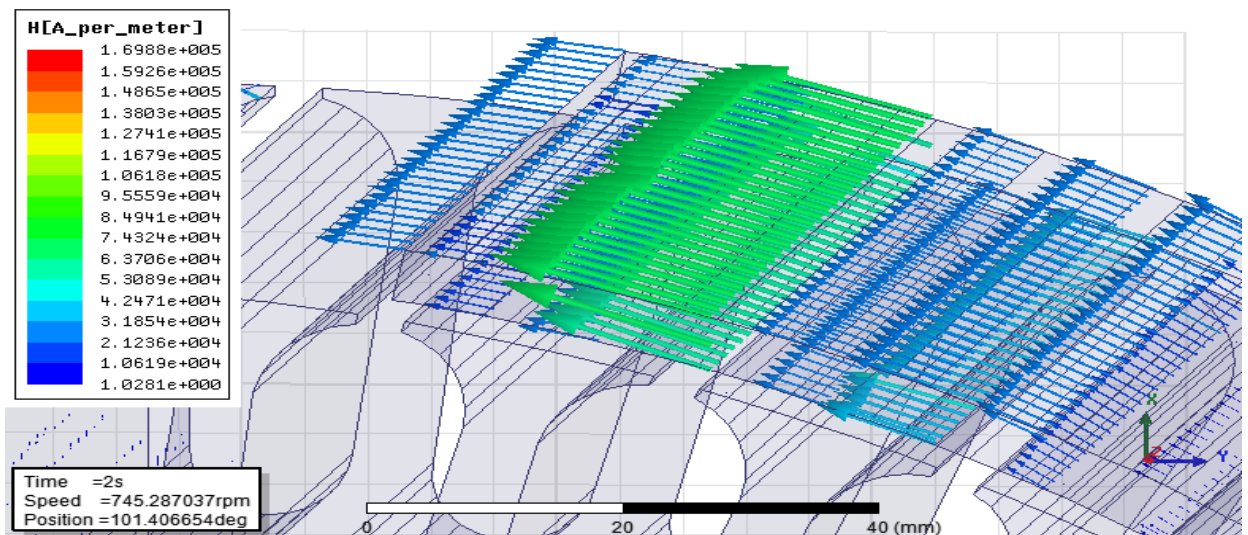


Рисунок 3.7 – Напруженість електромагнітного поля в роторі ДМ

Отримані результати розрахунків підтверджуються порівнянням з діаграмою розподілу втрат у ЕТМП, отриманих в ході експериментальних досліджень (рис. 3.8).

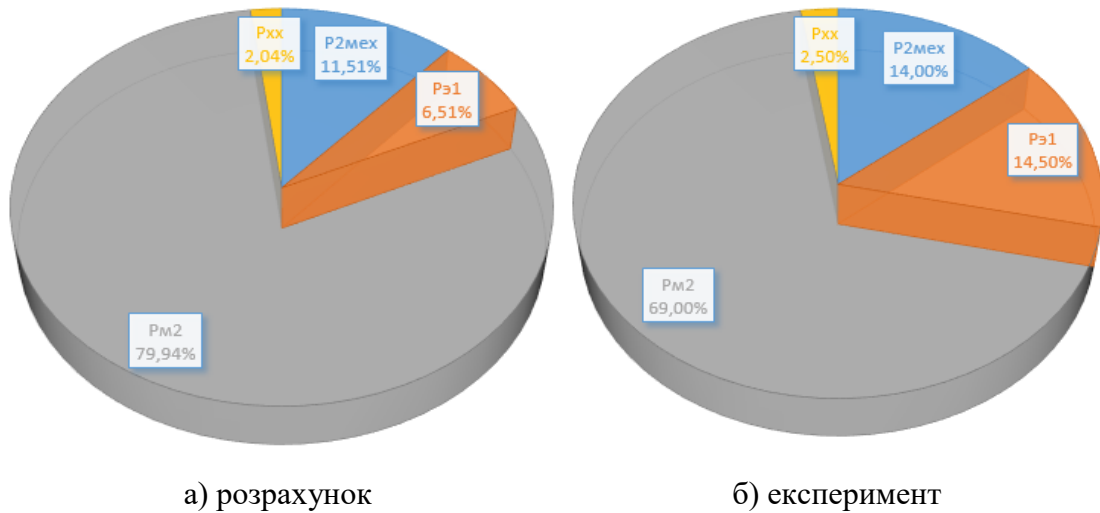


Рисунок 3.8 – Діаграми розподілу втрат ЕТМП при швидкості 110 об/хв.

На діаграмі (див. рис. 3.8) розрахункові значення втрат у роторі ЕТМП і втрати в обмотці статора відрізняються від результатів експериментальних досліджень. Така розбіжність пояснюється тим, що значення втрат у роторі в ході експерименту визначалося непрямим шляхом за різницею температури феромагнітного масиву до і після експерименту. У результаті, процентне співвідношення втрат перерозподіляється. Як результат, зменшення, в порівнянні з розрахунком, значення втрат в роторі дало збільшення відсоткової ваги втрат в обмотці статора. Розбіжність між вимірюваними та розрахованими значеннями за абсолютним значенням не перевищує 18%. Слід зазначити, що отримані результати для тривимірної моделі мають невелику розбіжність із результатами, отриманими у двомірній постановці, але незначно відрізняються за своїми чисельним значенням. Тим часом, тривимірна модель дозволяє отримати доступ до тих параметрів, які недоступні при двомірній моделі. Зокрема, це стосується визначення результуючого моменту при роботі двох зустрічно включених модулів. Завдання спільного рішення в одному 3D-просторі ДМ і ГМ займає вдвічі більший проміжок часу, ніж для одного модуля, але дозволяє виконати фактичне моделювання двомодульної системи у максимальному наближенні до реального прототипу.

Отримані результати можуть бути використані при оптимізації конструкції ЕТМП, проведення фізичного моделювання машини до її практичного виготовлення, підвищення якості розрахункових методик.

### 3.2 Математичне моделювання теплових процесів у шнековому електротепломеханічному перетворювачі з використанням MATLAB / SIMULINK

Створення ЕТМП із заданими властивостями вимагає глибокого аналізу теплообмінних процесів. При заданих значеннях вихідних температур охолоджуючого середовища, отриманих у результаті електромагнітних розрахунків значень параметрів, потужності тепловиділень і геометричних розмірів активних частин ЕТМП складається еквівалентна теплова схема (ЕТС). Рішення системи рівнянь теплопровідності, що відповідає даній ЕТС дає значення середніх температур (або перевищень температур) для всіх основних елементів, з яких складається ЕТМП. При цьому ведеться оцінка відповідності температури нагріву ізоляції обмотки статора допустимій температурі для обраного класу нагрівостійкості. При побудові ЕТС шнекового ЕТМП прийняті такі припущення:

- передача тепла у аксіальному напрямку між суміжними модулями відсутня;
- середні значення температури масивного ротора у його верхній і нижній половинах однакові. Уточнення теплового розрахунку для встановлення величини вищих гармонік, що виникають через температурні пульсації у роторі, виконується за окремою методикою;
- питомі потужності тепловиділень у відповідних елементах усіх модулів однакові;
- теплоємність сипучого матеріалу постійна, теплота фазового переходу пароутворення води, що міститься у матеріалі не враховується.

Зазначені припущення дозволяють розглядати ЕТС кожного модуля як самостійну схему заміщення. З огляду на ту обставину, що для кожного сипучого матеріалу з урахуванням його реологічних властивостей існує рекомендований коефіцієнт заповнення шнека, ми можемо отримати симетричну або асиметричну щодо осі порожнього валу схему ЕТС. Для оцінки теплового стану машини була складена еквівалентна теплова схема (рис. 3.9), успадкована від закритого заглибного асинхронного двигуна, що обдувається (відповідна частина схеми виділена пунктиром).

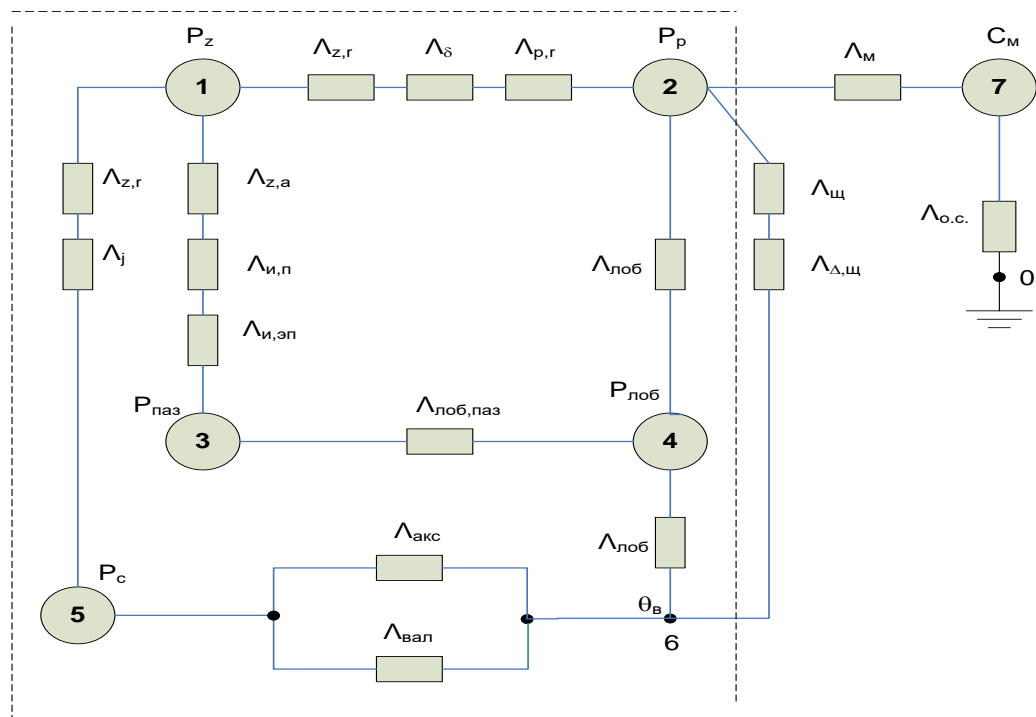


Рисунок 3.9 – Еквівалентна теплова схема ЕТМП

На схемі позначено:  $P_z$  – втрати в зубцях;  $P_p$  – втрати в роторі;  $P_{паз}$  – втрати у пазовій частині;  $P_{лоб}$  – втрати в лобовій частині;  $P_c$  – втрати в осерді статора;  $C_m$  – теплоємність матеріалу, що нагрівається;  $\Lambda_{zr}$ ,  $\Lambda_{za}$  – відповідно теплові провідності зубців у радіальному і аксіальному напрямку;  $\Lambda_{pr}$  – теплова провідність ротора у радіальному напрямку;  $\Lambda_\delta$  – теплова провідність повітряного зазору;  $\Lambda_{ип}$  – теплова провідність пазової ізоляції;  $\Lambda_{и.еп}$  – теплова провідність еквівалентної ізоляції паза;  $\Lambda_{лоб}$  – теплова провідність лобової частини;  $\Lambda_{лоб, паз}$  – теплова провідність між пазовою і лобовою частинами;  $\Lambda_j$

– теплова провідність ярма статора;  $\Lambda_{\text{акс}}$  – теплова провідність аксіальних вентиляційних каналів;  $\Lambda_{\text{вал}}$  – теплова провідність вала;  $\Lambda_{\text{щ}}$  – теплова провідність підшипникового щита;  $\Lambda_{\Delta\text{щ}}$  – теплова провідність від підшипникового щита до внутрішнього повітря;  $\Lambda_{\text{м}}$  – теплова провідність матеріалу;  $\Lambda_{\text{о.с.}}$  – теплова провідність від матеріалу до навколишнього середовища;  $\Theta_{\text{п}}$  – температура охолоджуючого повітря системи примусової вентиляції.

Після спрощення схеми за рекомендаціями [35] (рис. 3.10) був виконаний розв’язок задачі нестационарного нагріву в пакеті Matlab / Simulink.

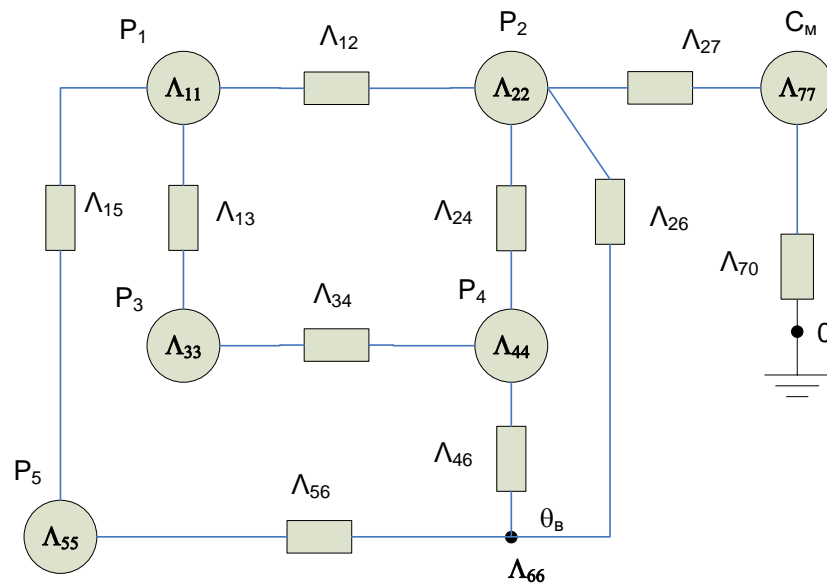


Рисунок 3.10 – Спрощена еквівалентна теплова схема ЕТМП

Приклад реалізації першого рядка системи диференціальних рівнянь у Simulink показаний на рис. 3.11. Результати теплового розрахунку наведені на рис. 3.12. Отримані результати моделювання мають хорошу збіжність із вимірами температур, отриманими експериментально. За час моделювання, який наближається до 1 год., температури вузлів ЕТМП, що встановилися, виявилися близькими до температур, вимірюваних в експериментальному зразку шнекового ЕТМП.

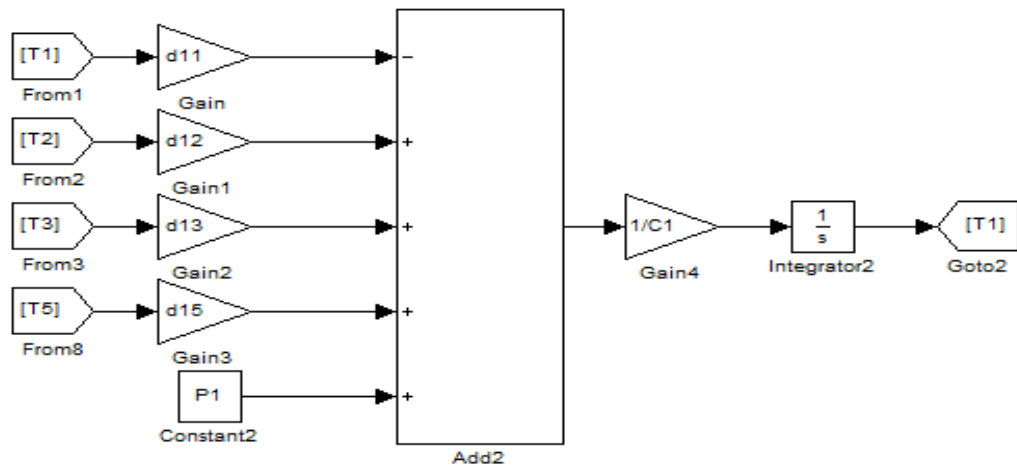


Рисунок 3.11 – Модель для першого рядка матриці у Simulink

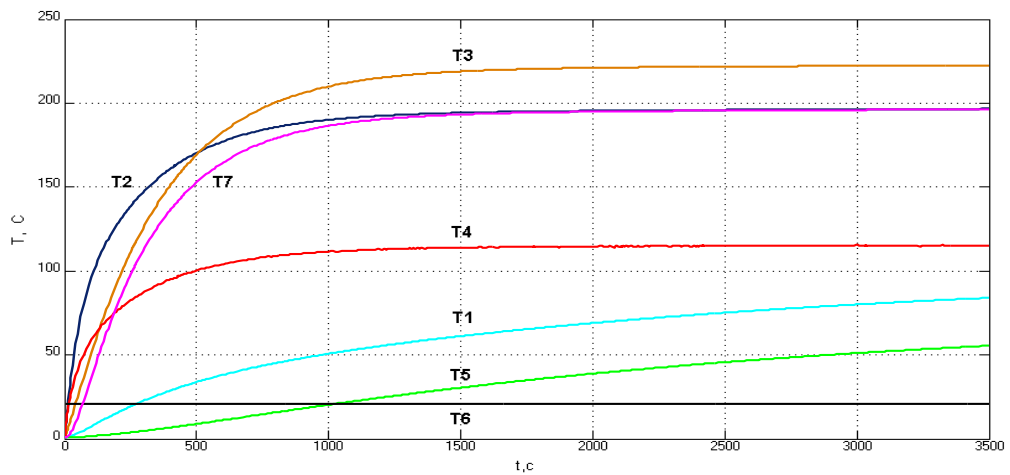


Рисунок 3.12 – Результати моделювання теплового стану ЕТМП

Рішення диференціальних рівнянь нестационарного нагріву електричних машин в пакеті Matlab / Simulink відрізняється простотою реалізації і може бути використано у проектуванні електромеханічних перетворювачів енергії.

### 3.3 Охорона праці

#### 3.3.1 Характеристика приміщення і робочого місця

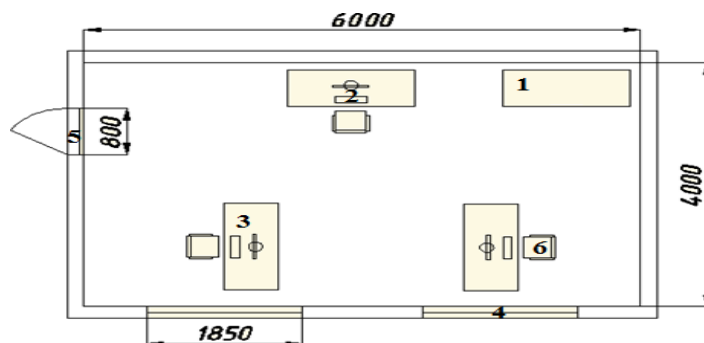
Аналіз умов праці проводиться відповідно до умов приміщення лабораторії в якій відбувається розрахунок та моделювання розроблюваного пристрою.

Оскільки дана робота має суто теоретичний характер і виконувалась із застосуванням засобів обчислювальної техніки, то в даному розділі визначені основні потенційно небезпечні та шкідливі фактори для обчислювальних машин відповідно до вимог ДсанПіН та організаційних заходів з безпеки та гігієни праці і виробничої санітарії, а також визначені основні заходи з безпеки у надзвичайних ситуаціях (БНС).

Приміщення, в якому відбувалися дослідження, знаходиться на другому поверсі будівлі. Загальна площа становить 24 м<sup>2</sup>, висота – 2,8 м. Кількість працюючих у лабораторії – 3 людини.

План дослідницької лабораторії, в якій проводилися роботи, показаний на рис. 3.13.

В лабораторному приміщенні розташовано три робочі місця з персональними комп'ютерами. Напряга джерела живлення у приміщенні – від 220 В до 380 В. У лабораторії розміщено 3 письмових стола, одна шафа для зберігання документів. За безпекою ураження електричним струмом лабораторія належить до приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом працюючих.



- 1 – шафа для зберігання документів; 2 – комп'ютери; 3 – стіл;  
4 – вікно; 5 – двері; 6 – стілець

Рисунок 3.13 – Схема приміщення

Геометричні параметри приміщення вказані у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Геометричні параметри приміщення

Параметри	Позначення	Значення
Глибина, м	A	6,0
Ширина, м	B	4,0
Висота, м	H	2,8
Площа, м <sup>2</sup>	S	24,0
Об'єм, м <sup>3</sup>	V	67,2

### 3.3.2 Виробнича санітарія у приміщенні лабораторії

Всі 3 робочі місця обладнані спеціальними комп'ютерними столами зі стільницями для клавіатури та поворотними стільцями.

Кожне робоче місце обладнане персональним комп'ютером потужністю близько 450 Вт та додатковим периферійним обладнанням та підключене до локальної мережі.

Порівняння фактичних і нормативних характеристик робочого місця відповідно до ДСанПіН 3.3. 2-007-98 у таблиці 3.2.

Відповідно до Державних санітарних правил та норм роботи з візуальними дисплейними терміналами ЕОМ (ДСанПіН 3.3. 2-007-98):

- площа приміщення має бути не менш 6 м<sup>2</sup> на людину;
- об'єм приміщення має бути не менше 20 м<sup>3</sup> на людину.

Таким чином, оскільки в приміщенні працюють 3 людини, то:

$$S' = 24,0 / 3 = 8,0 \text{ м}^2/\text{чол.}, \quad (3.1)$$

$$V' = 67,2 / 3 = 22,4 \text{ м}^3/\text{чол.} \quad (3.2)$$

Отже, нормативи розмірів та забезпечення працюючих робочою площею в лабораторії дотримано.

Таблиця 3.2 – Порівняння фактичних і нормативних характеристик робочого місця

Параметри	Норматив, мм	Фактичне, мм
Висота простору для ніг	від 600	700
Висота робочої поверхні	від 680 до 800	700
Висота сидіння над рівнем підлоги	від 400 до 500	від 400 до 500
Висота спинки стільця	300 ± 20	400
Відстань від екрану до очей	від 600 до 700	750
Глибина простору для ніг	від 650	800
Глибина робочої поверхні	від 800 до 1000	900
Глибина сидіння	400	500
Ширина простору для ніг	500	600

Робота в лабораторії проводиться сидячи і не вимагає фізичної напруги. Тому вона відноситься до категорії Ia (легкі фізичні роботи, енерговитрати до 120 ккал/год.). З метою забезпечення комфортних умов для працівників та відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 в лабораторії встановлені такі метеорологічні параметри:

а) для холодного періоду:

- температура повітря від 22 °С до 24 °С;
- вологість повітря від 40 % до 60 %;
- швидкість руху повітря  $\leq 0,1$ ;

б) для теплого періоду року:

- температура повітря від 23 °С до 25 °С;
- вологість повітря від 40 % до 60 %;
- швидкість руху повітря  $\leq 0,1$  м/с.

Нормалізація мікрокліматичних умов здійснюється за рахунок раціонального планування приміщення і оптимального розміщення в ньому

обладнання, а також приладів регулювання тепловиділення, холодовиділення і вологовиділення.

### 3.3.3 Пожежна безпека

В приміщенні, що розглядається, до пожежі можуть призвести:

- меблі, що містять деталі з дерева, пластику та синтетичних тканин (столи, стільці, шафи);
- ПЕОМ, монітори, клавіатури та ін. пристрої, корпуси яких зроблені з пластмас;
- папір, штори, лінолеум тощо.

Відповідно до норм визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою (НАПББ.03.002:2007) подібне приміщення відноситься з точки зору пожежної безпеки до категорії В, оскільки в ньому знаходяться горючі, тверді, волокнисті речовини та матеріали.

За правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПУЕ) дане приміщення відноситься до зони П–Па, тобто де є тверді горючі речовини чи матеріали.

Приміщення має бути оснащено системою пожежної сигналізації та вогнегасниками; за Правилами пожежної безпеки України (ППБУ-95) рекомендовано встановити три вогнегасники ОУ-2 на площу робочого приміщення 24,0 м<sup>2</sup>.

План евакуації з приміщення знаходиться біля дверей. Двері на шляху евакуації відчиняються в напрямку виходу з приміщення. При наявності людей у приміщенні двері евакуаційних виходів можуть замикатись лише на внутрішні запори, котрі легко відмикаються; встановлені протипожежні перешкоди.

### 3.3.4 Охорона навколишнього середовища

Серед багатьох проблем охорони навколишнього середовища особливе місце займають – проблема охорони атмосферного повітря, яке, з одного боку, є природним ресурсом у всіх технологічних операціях по переробці мінеральної сировини, з іншого – середовищем, в яке викидаються відходи технологічних процесів виробництва.

Основними чинниками, що визначають цю проблему є споживання повітря для здійснення технологічних процесів в багатьох видах виробництва, забруднення повітря викидами технологічних процесів, а також надходження забруднюючих речовин в повітря з поверхні суші і води.

Забруднюючі речовини, що знаходяться в атмосферному повітрі потрапляють в організм людини, головним чином, через органи дихання і негативно впливають на всі його органи.

Законом України «Про охорону атмосферного повітря» передбачено державний облік шкідливих дій підприємств на атмосферне повітря. При цьому ведеться державний облік об'єктів, що роблять шкідливий вплив на атмосферне повітря, видів і кількості шкідливих речовин, що викидаються в атмосферу. Основна робота по первинному обліку виконується самим підприємством і перевіряється органами місцевого самоврядування. Найважливішою мірою захисту атмосферного повітря є встановлення гранично допустимих викидів (ГДВ) забруднюючих речовин для кожного окремого підприємства, яке виплачує податки за забруднення атмосфери. Ці заходи держави спонукають підприємства проводити заходи до зниження викидів в атмосферу.

При розробці комплексу організаційно-технічних заходів щодо охорони повітряного басейну від забруднень на виробництві, перш за все надають увагу вдосконаленню технології первинної обробки, транспортування і складування матеріалів, а також використуванню різних пиловловлювачів для очищення вентиляційних викидів; вдосконаленню технології очищення диму котельних за допомогою пристроїв для уловлювання шкідливих газів, пило- і золовловлювачів.

Для запобігання дії пилу на організм робітників на робочому місці необхідно одягати спецодяг, респіратори, захисні окуляри. Для індивідуального захисту робочого персоналу від пилу передбачається користуватися респіраторами і іншими простими захисними засобами дихальних шляхів людини.

На підприємствах України застосовуються загальні заходи та засоби попередження забруднення повітряного середовища:

- вилучення шкідливих речовин в технологічних процесах, заміна шкідливих речовин менш шкідливими;
- удосконалення технологічних процесів та устаткування (застосування замкнутих технологічних циклів, неперервних технологічних процесів, мокрих способів переробки пиломатеріалів тощо);
- автоматизація і дистанційне управління технологічними процесами та обладнанням, що включає безпосередній контакт працюючих з шкідливими речовинами;
- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок місцевої вентиляції;
- поливання водою, з різними активними добавками, автодоріг;
- дотримання встановленого технологічного режиму і поліпшення виробничих процесів;
- зволоження або покриття поверхонь, що порожатся (автодоріг, складів і т.д.);
- створення санітарно-захисних зон і дотримання санітарного режиму (впорядкування, озеленення) на території підприємства і поблизу нього;
- здійснення комплексу організаційно-технічних заходів щодо охорони навколишнього середовища.

### 3.4 Висновки до розділу 3

Отримані результати для тривимірної моделі мають невелику розбіжність із результатами, отриманими у двомірній постановці. Проте, тривимірна модель дозволяє отримати доступ до таких параметрів, які недоступні для двомірної моделі. Зокрема, це стосується визначення результуючого моменту при роботі двох зустрічно включених модулів перетворювача.

Завдання спільного рішення в одному 3D-просторі для двигунового та гальмівного модулів займає вдвічі більший проміжок часу, ніж для одного модуля, але дозволяє виконати фактичне моделювання двомодульної системи у максимальному наближенні до реального прототипу.

Розв'язання задачі нестационарного нагріву було виконано в пакеті Matlab / Simulink. За час моделювання, який наближається до 1 год., температури вузлів ЕТМП, що встановилися, виявилися близькими до температур, вимірюваних в експериментальному зразку шнекового ЕТМП. Рішення диференціальних рівнянь нестационарного нагріву електричних машин в пакеті Matlab / Simulink відрізняється простотою реалізації і може бути використано у проектуванні електромеханічних перетворювачів енергії.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі визначено перспективи застосування шнекових електротепломеханічних перетворювачів у складі багатоцільових мобільних робототехнічних платформ. Проведено розрахунок електромагнітних та електромеханічних процесів шнекового електротепломеханічного перетворювача з урахуванням впливу процесів, що протікають у міжмодульній зоні. Проведено розрахунок теплового стану шнекового електротепломеханічного перетворювача для багатоцільової мобільної робототехнічної платформи. Розглянуто питання з охорони праці в лабораторії, де відбувається розрахунок та моделювання шнекового електротепломеханічного перетворювача.

Отримані результати для тривимірної моделі мають невелику розбіжність із результатами, отриманими у двомірній постановці. Проте, тривимірна модель дозволяє отримати доступ до таких параметрів, які недоступні для двомірної моделі. Зокрема, це стосується визначення результуючого моменту при роботі двох зустрічно включених модулів перетворювача. Завдання спільного рішення в одному 3D-просторі для двигунового та гальмівного модулів займає вдвічі більший проміжок часу, ніж для одного модуля, але дозволяє виконати фактичне моделювання двомодульної системи у максимальному наближенні до реального прототипу.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції ЕТМП, проведення фізичного моделювання машини до її практичного виготовлення, підвищення якості розрахункових методик.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані в ході проведення VI Міжнародної наукової конференції «Виробництво & Мехатронні Системи».

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. [Чинний від 2015–06–22]. Вид. офіц. Київ, 2017. 29 с. (Інформація та документація).
2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: / упоряд. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2018. 320 с.
3. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків : ХНУРЕ, 2021. 50 с.
4. Побудова тривимірної кінцево-елементної моделі автоматизованого комплексу індукційного нагріву металевих деталей. Виробництво & Мехатронні системи : матеріали VI Міжнародної конференції / Грицюк В., Чугай М., Нерсесян Д. Харків 2022. С. 31–33.
5. A. Lukowska, P. Tomaszuk, K. Dzierzek and L. Magnuszewski, "Soil sampling mobile platform for Agriculture 4.0," 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), May 2019.
6. Autonomous robots collect soil samples, potentially reduce fertilizer use. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.morningagclips.com/autonomous-robots-collect-soil-samples-potentially-reduce-fertilizer-use/>

7. Deusdado P. et al. Sediment sampling in estuarine mudflats with an aerial-ground robotic team // *Sensors*. – 2016. – V. 16. – №. 9. – P. 1461.
8. Feed pusher Butler Gold PRO. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://wasserbauer.at/en/products/butler-gold>
9. Rover feeding robot. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://rovibecagrisolutions.com/en/produit/feeding\\_robot\\_autonomous\\_rover](https://rovibecagrisolutions.com/en/produit/feeding_robot_autonomous_rover)
10. "Automatic and frequency-programmable systems for feeding tmr: state of the art and available technologies," In XVIIth World Congress of the International Commission of Agriculture and Biosystems Engineering- "Sustainable Biosystems through Engineering" / C. Bisaglia, F. Nydegger, A. Grothmann, J.C.A.M. Pompe. pp10-10, 2010
11. "Design and field experimentation of a robotic system for tailings characterization," *Journal of Unmanned Vehicle Systems* / N. A. Olmedo, M. G. Lipsett / Vol. 4(3), pp. 169-192, 2016.
12. "Projected needs for robot-assisted chemical, biological, radiological, or nuclear (CBRN) incidents," In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* / R.R. Murphy, I. J. Pesche, C. Arnett, D. Martin / College Station, TX, USA, pp. 1-4, Nov. 2012.
13. Auger configurator. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.gerotto.it/en/mini-robot-excavators/auger-configurator>
14. Tank cleaning system. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.gerotto.it/en/mini-robot-excavators/tank-cleaner>
15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cont.ws/@contemplator/712173>
16. "Design and kinematic modeling of a screw-propelled mobile robot to perform remote explosive scent tracing filter sampling in forest during humanitarian demining," *Advances in Cooperative Robotics* / J. H. Lugo, M. Zoppi, R. Molfino / pp. 699-715, 2017.

17. "Humanitarian demining: reality and the challenge of technology—the state of the arts," *International Journal of Advanced Robotic Systems* / M. K. Habib / Vol. 4(2), p. 19, 2007.
18. "3D microwave print head approach for processing lunar and mars regolith," In *Lunar and planetary science conference Issue 1777* / M. Barmatz, D. Steinfeld, M. Anderson, D. Winterhalter / p. 1137-1138, Mar., 2014.
19. "Autonomous additive construction on mars," *ASCE Earth and Space* / S. Wilkinson, J. Musil, J. Dierckx, I. Gallou, X. De Kestelier, 2016.
20. *Extended Soil Sampling Head* / N.A. Wright, H.L. Wright / US patent 5, 950, 741, Sept. – 1999.
21. *Soil Sampling Device* / R.J. Naber, G.G. Naber / US patent 6, 360, 829, Oct. 2002.
22. *Sensor Based AGROBOT for Sowing Seeds. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* / Praseena, S., Sanjena, S., Thejaswini, S. M., & Selvi, M. S. 2019
23. *Vehicle Mounted Soil Sampler* / R. Marker / US patent 8, 573, 074, Nov. 2013.
24. *A Core Sampling Apparatus* / A. Bacchelli, G. Catone / EP Patent App. EP20, 100, 196, 252, Oct. 2011.
25. *The Prospects for Applying Auger Heat-Electromechanical Converters as Part of Multipurpose Mobile Robotic Platforms* / Nevliudov I., Tsymbal O., Gritsyuk V., Mospan D. // *Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021 International Conference on.* – IEEE, 2021.
26. Оцінка вихрових струмів і втрат потужності у роторі шнекового електротепломеханічного перетворювача для адитивного виробництва / Грицюк В.Ю., Невлюдов І.Ш., Заблодський М.М., Субраманиан П. // *Журнал "Техніка та енергетика"*, Київ, Т. 13, № 2, 2022.
27. *Асинхронные электродвигатели с двухслойным ротором и их применение* / В.С. Могильников, А.М. Олейников, А.Н. Стрельников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 203 с.

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

29. Теория, технология и режимы работы асинхронных двигателей с двухслойным ротором / В.С. Могильников, А.М. Олейников. – Севастополь: СИЯЭиП, 1999. – 244 с.

30. Лаугис Ю.Я. Особенности расчета двухцелевого линейного электропривода / Ю.Я. Лаугис, Т.В. Лехшла, Р.А. Тээмеше // Тр. Таллиннского политехн. ин-та. – 1979. – № 476. – С. 27-34.

31. Вербовой А.П. Концепция создания асинхронных двигателей для электроприводов турбомеханизмов / А.П. Вербовой, П.Ф. Вербовой, И.И. Краштан // Техн. электродинаміка, спец. вип. "Проблеми сучасної електротехніки", ч. 9. – 2002. – С. 15-22.

32. Calculation of solenoid ferromagnetic rotor parameters / S. Kostrauskas, P. Greblskas, Z. Zemezonse // Jnt. Symp. Electromagnete Fields Elec. Eng., to'dz, Sept. 20-22, 1989: ISEF – 89. – to'dz, 1989. – С. 211-213.

33. Математическое моделирование двухмерных электромагнитных и тепловых полей в роторе турбогенератора / М.Г. Пантеля, Н.Г. Шульженко // Електротехніка і електромеханіка, 2004. – № 3. – С. 84-86.

34. Проектирование асинхронных двигателей с заданными динамическими показателями / А.Е. Загорский, К.М. Галустян // Электротехника, 1979. – № 3. – С. 47-49.

35. Беляев Н.М., Рядно А.А. Математические методы теплопроводности. – К.: Вища шк., 1993. – 415 с.