

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.313.33:621.318.122

ПОГОДЖЕНО

Директор ІНІЕАТЕ

Каплун В.В.

(підпис) (ПІБ)

“ ” 2023 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри електротехніки,  
електромеханіки та електротехнологій

Окушко О.В.

(підпис) (ПІБ)

“ ” 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: Дослідження електромагнітних і теплових характеристик двошнекового  
електромеханічного гідролізера при переробці пухо-пір'яної сировини

Спеціальність (4) «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма – Магістр

(назва)

Магістерська програма – Науково-технічні засади електромеханічного перетворення  
енергії

(назва)

Орієнтація освітньої програми – Освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Керівник магістерської роботи

Д-р техн. наук, проф.

(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Заблодський М.М.

Виконав

Колодюк А.С.

(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ - 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИГОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електротехніки,  
електромеханіки та електротехнологій

канд. техн. наук, доц. Окушко О.В.  
2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Колодюк Андрій Сергійович

Спеціальність

ТМ – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма

Магістр

Магістерська програма

Науково-технічні засади електромеханічного перетворення енергії

Орієнтація освітньої програми

Освітньо-наукова

Тема магістерської роботи

Дослідження електромагнітних і теплових характеристик двошнекового електромеханічного гідролізера при переробці пуху-пір'яної сировини

затверджена наказом ректора НУБіП України від " " 20 р. №

Термін подання завершеної роботи на кафедру \_\_\_\_\_

Вихідні дані до магістерської роботи: конструктивно-технологічна схема двошнекового електромеханічного гідролізера; моделювання в програмному середовищі Comsol Multiphysics; експериментальний зразок пінекового електромеханічного перетворювача.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз принципів формування електромагнітних і теплових характеристик двошнекового електромеханічного гідролізера;
2. Теоретичне обґрунтування ефекту появи вищих гармонік в електротепломеханічному перетворювачі при нелінійній зміні температури навантажувально-охолоджуючого середовища;
3. Математичне моделювання і аналіз електромагнітних і теплових характеристик двошнекового електромеханічного гідролізера;
5. Експериментальне дослідження динаміки і гармонійного складу струмів електротепломеханічного перетворювача технологічного призначення.

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

Дата видачі завдання " " 2022р.

Керівник магістерської роботи

Заблудський М.М.

Завдання прийняв до виконання

Колодюк А.С.

## РЕФЕРАТ

**Структура та обсяг роботи:** робота вміщує вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел (що налічує 34 позиції). Повний обсяг роботи складає 80 сторінок.

**Актуальність теми.** В зв'язку з тим, що в останні роки зросли вимоги до якості білкового кормового борошна з пуху-пір'яної сировини, нагальною проблемою є розробка більш ефективного способу переробки, який здатний формувати додаткові фізичні впливи на кератинову сировину і забезпечувати регульований процес та, відповідно, створення електротехнологічних комплексів з поліфункціональними властивостями. Тому дослідження електромагнітних і теплових процесів агрегату для гідролізої переробки побічних продуктів птахівництва для підвищення енергоефективності переробки в промислових масштабах є актуальною науково-прикладною задачею.

**Мета дослідження** – підвищення енергоефективності двошнекового електромеханічного гідролізера при переробці пуху-пір'яної сировини шляхом удосконалення методології проектування.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні і теплові процеси двошнекового електромеханічного гідролізера.

**Предмет дослідження** – електромагнітні і теплові характеристики двошнекового електромеханічного гідролізера з урахуванням спектру вищих гармонік.

Для досягнення мети та здійснення завдань було використано такі **методи**:

- теоретичні – аналіз, синтез, узагальнення, систематизація, порівняння для розкриття сутності та визначення базових понять досліджуваної проблеми, структурування, моделювання для розробки моделі;
- емпіричні – спостереження, порівняння, вимірювання, розрахунок, метод проб і помилок;
- кількісної обробки даних – визначення середніх значень, розрахунок заданих параметрів.

**Організація та експериментальна база дослідження.**

Теоретичні дослідження електромагнітних, теплових процесів і характеристик базуються на фундаментальних положеннях теорії електромагнітних пристроїв, теорії коливань, теорії автоматизованого управління, термодинаміки нерівноважних процесів. Польові методи розрахунків, віртуальна модель і параметричний аналіз виконуються в програмному продукті Comsol Multiphysics. Для верифікації чисельних розв'язків, перевірки теоретичних положень, нових технічних рішень виготовлені та досліджені макетні зразки.

**Теоретичне значення дослідження:** обґрунтування ефекту появи вищих гармонік в електротепломеханічному перетворювачі при нелінійній зміні температури навантажувально-охолоджуючого середовища.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АГРЕГАТІВ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПЕРО-ПУХОВОЇ СИРОВИНИ.....	10
1.1 Огляд способів виготовлення кормової білкової добавки з відходів сировини тваринного походження .....	10
1.2 Методи дослідження електромагнітних і теплових характеристик шнекових електромеханічних перетворювачів.....	15
РОЗДІЛ 2 ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОШНЕКОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА .....	18
2.1. Особливості конструкції двошнекового електромеханічного гідролізера.....	18
2.2 Принцип саморегуляції при розділенні на складові корисної потужності.....	20
2.3 Принципи безредукторного забезпечення малої частоти обертання і кратного посилення обертаючого моменту.....	26
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТУ ПОЯВИ ВИЩИХ ГАРМОНІК В ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПРИ НЕЛІНІЙНІЙ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ НА ВАНТАЖУВАЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА.....	31
РОЗДІЛ 4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОШНЕКОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА .....	39
4.1 Моделювання електромагнітних процесів електромеханічного гідролізера .....	43
4.2 Моделювання електромеханічних процесів в шнековому електромеханічному гідролізері.....	54
4.3 Моделювання теплових процесів в шнековому електромеханічному гідролізері .....	57
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ І ГАРМОНІЙНОГО СКЛАДУ СТРУМІВ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ .....	62
5.1 Методика проведення експериментальних досліджень.....	62
5.2 Результати експериментальних досліджень динаміки струмів окремих модулів і загального струму електромеханічного перетворювача.....	64

5.3 Результати експериментальних досліджень гармонійного складу струмів електротепломеханічного перетворювача при нелінійних змінах навантажувально-охолоджуючого середовища..... 70

ВИСНОВКИ..... 73

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 75

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ВСТУП

НУВБІП України

В останні роки інтенсивного темпу розвитку набула галузь промислового

птахівництва, зокрема вирощування та переробка курчат-бройлерів. Пухо-пір'яні відходи забруднені мікробною біомасою та вимагають тривалого періоду часу для розкладання природним шляхом, що ускладнює процес утилізації.

НУВБІП України

Зростаюча екологічна проблема викликає інтерес до потенційного використання відновлювальних ресурсів. Пухо-пір'яні відходи на 91% складаються з білку

кератину і потенційно можуть бути використані для виготовлення цінних матеріалів. Кератин являється одним з найбільш поширених структурних білків,

НУВБІП України

а в організмі тварин поруч з колагеном він являється найбільш важливим біополімером. Кератини володіють високою міцністю та щільністю і не розчиняються в полярних та неполярних розчинниках. Існує декілька способів

видобутку кератину з біомаси відходів включаючи кислотний гідроліз, лужний

НУВБІП України

гідроліз, ферментативний гідроліз, гідроліз іонною рідиною і лужно-ферментативний гідроліз. Аналіз існуючого досвіду дозволяє зробити висновок, що жорсткі режими хімічних способів обробки приводять до втрати незамінних

амінокислот, рацемізації амінокислот білкових гідролізатів, утворенню циклопептидів і зниження біологічної цінності кінцевих продуктів.

НУВБІП України

Найбільшого поширення отримав метод гідротермічного гідролізу. Кератин еластичний, здатний розтягуватись при обробці гарячим паром і стискатись під час висушування, що пояснює процес переходу кератину до

шарової структури. Гідротермічний режим переробки курячого пір'я у вакуум-

НУВБІП України

горизонтальних котлах малоефективний, так як не забезпечує повного гідролізу кераатинових дисульфідних зв'язків в молекулах пір'яного білку. Технологія виготовлення кормових добавок з побічних продуктів птахівництва з

використанням екструдерів і двошнекових систем, де процес тонкого

НУВБІП України

подрібнення та водний гідроліз кератину суміщені і проходять в тонкому шарі, забезпечує перетравність отриманої білкової кормової добавки з пухо-пір'яної сировини на рівні 80%. Однак цей спосіб двоступінчастого нагріву і наступного

гідролізу володіє декількома недоліками: низька енергоефективність технологічного процесу за відсутності використання дисипативної складової енергії електроприводу; наявність в зоні гідролізу сировини з різною вологістю, від чого залежить ступінь нагріву і глибина гідролізу; неповне руйнування кератинових дисульфідних зв'язків в молекулах пір'яного білку; низький ступінь регулювання процесу.

В зв'язку з тим, що в останні роки зросли вимоги до якості білкового кормового борошна з пухо-пір'яної сировини, нагальною проблемою є розробка більш ефективного способу переробки, який здатний формувати додаткові фізичні впливи на кератинову сировину і забезпечувати регульований процес та, відповідно, створення електротехнологічних комплексів з поліфункціональними властивостями. На сьогодні відсутні дослідження по обґрунтуванню структури електротехнологічного комплексу із застосуванням двошнекового електромеханічного гідролізера за умов використання дисипативної енергії.

Тому дослідження електромагнітних, електромеханічних, теплових та вібраційних процесів агрегату для гідролізної переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля для підвищення енергоефективності переробки в промислових масштабах є актуальною науково-прикладною задачею.

#### **Зміст поставлених завдань:**

1. Всебічне вивчення патентно-кон'юктурної та прикладної бази

закордонного і вітчизняного досвіду з енергоощадних технологій та обладнання для переробки пухо-пір'яної сировини;

2. Аналіз принципів формування електромагнітних і теплових характеристик двошнекового електромеханічного гідролізера;

3. Теоретичне обґрунтування ефекту появи вищих гармонік в електротепломеханічному перетворювачі при нелінійній зміні температури навантажувально-охолоджуючого середовища;

4. Математичне моделювання і аналіз електромагнітних і теплових характеристик двошнекового електромеханічного гідролізера;



5. Експериментальне дослідження динаміки і гармонійного складу струмів електрогепломеханічного перетворювача технологічного призначення.

**Мета дослідження** – підвищення енергоефективності двошнекового електромеханічного гідролізера при переробці пухо-пір'яної сировини шляхом удосконалення методології проектування.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні і теплові процеси двошнекового електромеханічного гідролізера.

**Предмет дослідження** – електромагнітні і теплові характеристики двошнекового електромеханічного гідролізера з урахуванням спектру вищих гармонік.

**Методи дослідження** – теоретичні та експериментальні дослідження, що базуються на фундаментальних положеннях теорій електричних машин, термодинаміки нерівновагих процесів.

Основні положення кваліфікаційної магістерської роботи доповідались на 76-й науково-практичній конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», м.Київ, НУБіП України [34].

## РОЗДІЛ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АГРЕГАТІВ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПЕРО-ПУХОВОЇ СИРОВИНИ

### 1.1 Огляд способів виготовлення кормової білкової добавки з відходів сировини тваринного походження

Як правило відходи птахівництва вивозять на звалища або спалюють. Лише незначна частина пухо-пір'яних відходів піддається переробці. Пір'яне борошно, як продукт переробки пухо-пір'яних відходів – цінна сировина у медичній, фармацевтичній, косметичній та біотехнологічній промисловості [1, 2]. Продукти цих галузей являються інноваційними, однак використовують пір'яне борошно у незначній кількості або мають вузький спектр практичного застосування [3], що в основному пов'язано зі складністю переробки пір'я. Пір'я являється різновидом білкового матеріалу і на 90 % складається з кератину.

Кератин – це структурний білок, що виділяється своєю стійкістю до впливу різного роду фізичних та хімічних факторів [4].

Аналіз досліджень [5] дозволяє зробити висновок, що жорсткі режими хімічних способів обробки призводять до втрати важливих амінокислот, рацемізації амінокислот білкових гідролізатів, утворення циклопептидів і зниження біологічної цінності кінцевого продукту.

Одним з найефективніших методів переробки пухо-пір'яних відходів в промислових масштабах являється метод гідротермічного гідролізу. Переробку відходів забою птиці на кормові цілі проводять у вакуум-горизонтальних котлах різної конструкції, які, в основному, використовувались для утилізації відходів пташиного походження на санітарно-ветеринарних заводах, рис. 1.1.

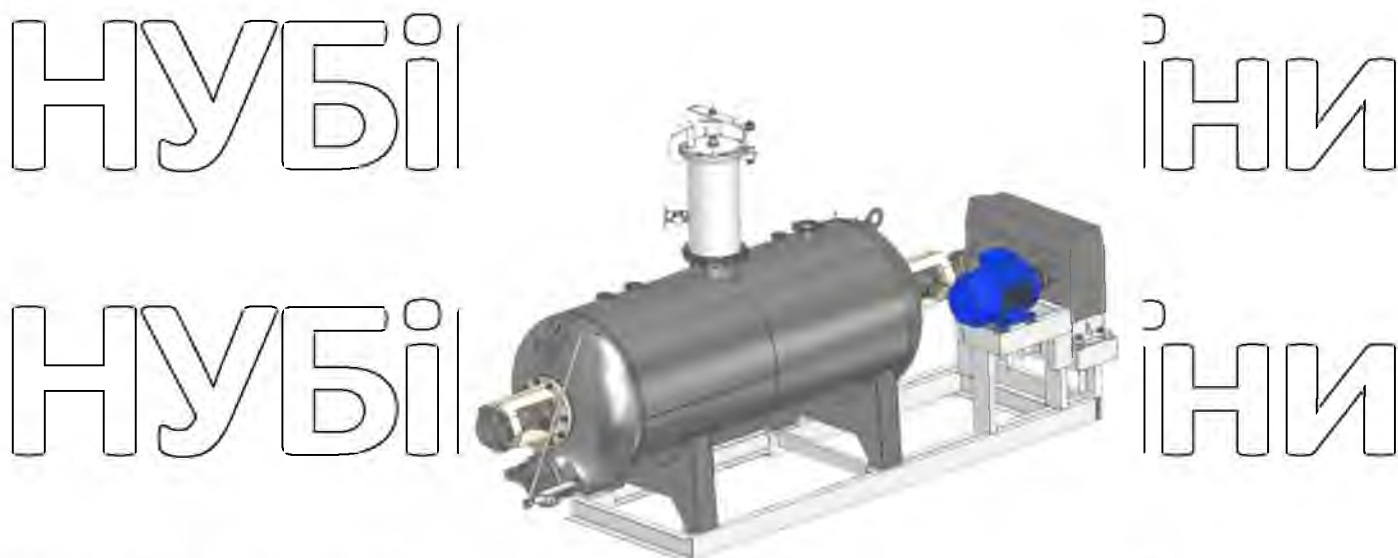


Рис. 1.1. Вакуум-горизонтальний котел

Все частіше гідротермічний гідроліз побічних продуктів птахівництва виконують в шнекових перетворювальних пристроях. Використання шнекового перетворювача приваблює універсальністю в переробці різного роду матеріалів не зважаючи на темп технологічного процесу [6-8].

Серед існуючих відома удосконалена технологія переробки пухо-пір'яних відходів, що включає нагрів, подрібнення, стерилізацію, гідроліз і сушку [9].

Обладнання складається з чотирьох секцій: Всі чотири секції виконані у вигляді каналів, що мають форму, утворену двома або більше пересіченими паралельними циліндрами, в яких обертаються шнеки, забезпеченими обігрівальними сорочками з циркуляцією теплоносія.

Установка високотемпературного гідролізу пухо-пір'яної сировини у тонкому шарі представлена на рис. 1.2 і має такі складові:

1. Завантажувальний бункер з шнеками, що обертається в протилежних напрямках і здійснюють попереднє подрібнення і нагрівання.

НУБІП України





Рис. 1.2. Установка високотемпературного гідролізу пухо-пір'яної сировини у тонкому шарі

1. Секція подальшого нагріву, ущільнення до отримання надійної пробки і подрібнення пера. В зоні максимального підтискання на валі встановлюються шнеки з зворотним напрямком вихода, а температура пера в цьому місці повинна знаходитися в межах 60-120 °С.

2. Секція подрібнення пера, подальше нагрівання.

3. Секція високотемпературного гідролізу пухо-пір'яної сировини у тонкому шарі 30 мм. В кінці 4-ї секції розташований клапан-пристрій, що дозволяє вивести із зони високого тиску і температури перероблене перо в приймальну ємність з атмосферним тиском. Це пристрій являє собою об'ємний насос і перешкоджає об'ємному скипанню рідини в каналі і зниженню температури.

Основними недоліками способу є відсутність регулювання параметрів і продуктивності процесу гідролізу при зміні властивостей сировини, низька енергоефективність через наявність чотирьох окремих секцій і електроприводів з різними характеристиками, втрата якості одержуваного продукту внаслідок нерівномірності температурного поля в зонах прогріву сировини та її окислення під час зростання продуктивності завантаження у 8-10 разів у порівнянні з продуктивністю шнеків.

Відомий спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової і кератиновмісної сировини, який здійснюється, за допомогою шнекової установки, рис.1.3 [10]

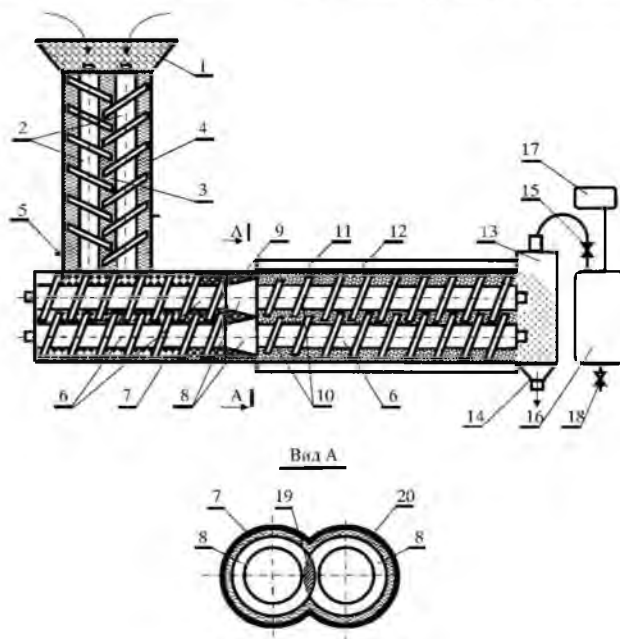


Рис. 1.3 Шнекова установка для здійснення способу виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової і кератиновмісної сировини

Волога перо-пухова кератиновмісна маса після відділення надлишку води, необхідної для транспортування пера з забійного цеху, подається в завантажувальний отвір 1. Сировина подається в канал, утворений двома поздовжньо з'єднаними паралельними циліндрами з розміщеними в них шнеками 2. Вода, що знаходиться в масі, віджимається шнеками і видаляється з корпусу 4 шнеків 2 за допомогою відвідних патрубків 5 вологи. Віджата до вологості 35-45 % сировина надходить у робочу зону шнеків 6, де здійснюється подальше ущільнення сировини до утворення сировинного ущільнення, так званої холодної прески між корпусом 7 шнеків 6 і конусами 3. При переході сировини в другу робочу частину шнеків 6, зменшена в діаметрі частина витків 10 шнеків 6 починає розпушувати ущільнену конусами 8 сировину, що пройшла через прохідний переріз 20 між корпусом 7 і конусами 8. Зовні корпусу 7 другої частини шнеків 6, де відбувається нагрівання та гідроліз сировини, вмонтовано обігриваючий пристрій 11, в порожнині якого циркулює теплоносій і який

швидко, протягом декількох секунд нагріває розпушену сировину 12 до температури 180-260 °С. Наступні витки шнеків 6, у міру нагрівання, продовжують розпушувати, рівномірно розподіляють цю об'ємну порожнини корпусу шнеків сировину. Під впливом температури, тиску та механічного впливу, сировина переходить у стан дрібно подрібненої маси, схожої на тісто з включеннями окремих волокон. Крім того, шнеки виконують транспортну функцію - перемішують перо-пухову кератиновмісну масу (сировину) всередині каналу, при заданих параметрах - температурі 180-260 °С, тиск від 1,0 МПа до 5,0 МПа. У завантажувальному шнеку обертання шнеків виконане в протилежні сторони для кращого захоплення сировини. На виході шнеків 6 змонтовано технологічну терметичну ємність 13, що приймає вихідний з порожнини корпусу шнеків оброблений продукт, в якій сировину, після закривання механізму 14 розвантаження продукту піддають вакуумним імпульсам, шляхом швидкого з'єднання за допомогою швидкодіючого клапана 15 з ресивером 16, в якому попередньо створили вакуум. Вакуумні імпульси впливають не тільки на сировину, що знаходиться в ємності 13, але і на частину сировини, що знаходиться в порожнині корпусу 7 шнеків 6 в безпосередній близькості до ємності 13. При цьому та частина сировини, яка знаходиться в безпосередній близькості до ємності 13, піддається більш глибоким вакуумним імпульсам від надлишкового позитивного тиску до вакуумного впливу та більш ефективного впливу на оброблювану сировину. При періодичному наповненні сировиною технологічної герметичної ємності 13 здійснюють вакуумний вплив на сировину і видаляють надлишки вологи, приводячи вологість готової продукції до необхідної 8-12 %. При цьому в структурі сировини відбувається вибухове закипання та руйнування сировини на дрібні частки. Після процесу обробки отримують розсипчасту подрібнену фракцію (борошно), яку можна використовувати як білкову добавку для годування птиці та інших видів тварин без додаткового підсушування.

Суттєвими недоліками аналогу є відсутність регулювання параметрів і продуктивності процесу гідролізу при зміні властивостей сировини, низька

енергоефективність через невикористання дисипативної складової електромеханічної частини установки, що суттєво знижує її ККД, обумовлює значні габарити та високу енергозатратність, втрата якості одержуваного продукту внаслідок окислення сировини, нерівномірності температурного поля в зонах її прогріву та відсутності гарантій безумовного існування в сировині води тільки в стані рідини.

## 1.2 Методи дослідження електромагнітних і теплових характеристик шнекових електромеханічних перетворювачів

Публікації [11-17] всесторонньо розглядають шнекові електромеханічні перетворювачі, однак внаслідок особливості конструкції, основну увагу приділено робочим елементам – шнекам і не достатньо розглянуто процеси, що виникають в різного роду приводах.

Серед існуючих публікацій відомо багато робіт присвячених дослідженню теплових процесів, що виникають в шнекових перетворювальних пристроях. Визначено, що ефект теплопередачі у двошнековому перетворювачі кращий, а ніж в одношнековому. Визначено фундаментальні фізичні явища та взаємодії між фізичним переміщенням та хімічними реакціями в сировині переробки.

Надано рекомендації з проектування шнекових перетворювачів. В роботі недостатньо уваги надано дослідженню впливу геометрії лопатей шнеку на продуктивність виходу та якість переробки сировини. Математичне моделювання процесів гідродинаміки, теплообміну і хімічних реакцій частинок

в двошнековому перетворювачі виконано в роботі [18]. В публікації для

побудови математичної моделі використано метод дискретних елементів.

Визначено, що на процес переробки біомаси в двошнековому механізмі суттєво впливає на параметр теплоти реакції в кінетичній моделі. До недоліків

запропонованої моделі можна віднести складність використання, що пов'язано з

необхідністю ретельного калібрування параметру теплоти реакції для

вдосконалення кінетичної моделі. В роботі [19] виявлено неефективність шнекового перетворювача у ділянці початкового змішування, що призводить до



нерівномірної передачі тепла в неоптимальних умовах. Побудовано математичну модель, що усуває вказані неефективності, і, відповідно, збільшує початковий середній коефіцієнт тепловіддачі в порівнянні з початковою конструкцією шнекового перетворювача.

У нелінійних системах, а електрична машина - система нелінійна, достатньо мати дві гармоніки, щоби з'явилися спектри гармонік комбінаційних частот. Вплив комбінаційних частот при нелінійних спотвореннях на характеристики машин вивчено недостатньо, оскільки визначальний вплив мають гармоніки магніторушійної сили та вищі зубцеві гармоніки в повітряному зазорі. Вищі гармоніки, що залежать від часу, можуть досягти повітряного зазору через теплові похідні від областей, що оточують провідні частини ЕМ. У випадку нелінійних змін температури в середовищі індукційної машини виникають більш високі залежні від часу гармоніки, і форма магнітного поля стає деформованою.

Найвищі значення вищих амплітуд гармоніків виникають при теплових ударах [20]. Експериментально поява таких гармонік зареєстрована, але теоретичне обґрунтування спектра гармонік ще недостатньо розвинене.

В опублікованій літературі обмежена кількість даних про вплив температури та тиску на магнітні властивості сталі, наприклад, у випадку занурювальних двигунів, що використовуються в нафтових свердловинах, або глибоководних маслорозливних двигунів [2, 22]. Важко визначити магнітні властивості листів електротехнічної сталі в середовищі, де є зв'язок температури та тиску, використовуючи відомі дані та моделі гістерезису. Тому, щоб підвищити точність проектних розрахунків ЕМ, необхідно знати магнітні властивості сталі за тих же умов. Такий аналіз здійснено в [23] і встановлено, що відносна проникність при низькій щільності потоку збільшується з підвищенням температури, а при вищій щільності потоку зменшується. В той же час коли напруга стиску перевищує 50 МПа, вплив напруги стиску на відносну проникність і втрати заліза зменшується. Експериментально визначено відносну проникність і втрати заліза листової електротехнічної сталі в умовах від 30 °С до 200 °С і від 0,1 МПа до 140 МПа.



Окремі дослідження стосуються вимірювання магнітних властивостей сталі та інших м'яких магнітних, електропровідних матеріалів при високих температурах до температури Кюрі і трохи вище. Вимірювання показують, що поляризація насичення незначно зменшується до  $500^{\circ}\text{C}$ , а потім падає до нуля при температурі вище  $700^{\circ}\text{C}$ . В роботах [24, 25] експериментально та чисельно досліджені магнітні властивості магнітних матеріалів, збуджуваних синусоїдальною та широтно-імпульсною модуляцією на вході інвертора за високих температур навколишнього середовища використовуючи модель відтворення зі схемою Кауера.

Особливістю розглянутих методів і результатів досліджень електромеханічних перетворювачів є стаціонарні температурні умови оточуючого охолоджувального середовища. Але для широкого класу поліфункціональних електромеханічних перетворювачів технологічного призначення актуальними стають дослідження при нелінійних змінах навантажувально-охолоджуючого середовища.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 2 ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТІПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОШНЕКОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА

### 2.1. Особливості конструкції двошнекового електромеханічного гідролізера

Конструктивно-технологічна схема двошнекового електромеханічного гідролізера для виробництва кормового білкового борошна представлена на рис.2.1. Ця розробка виконана на кафедрі електротехніки, електромеханіки та електротехнологій НУБіП України [26 , 27].

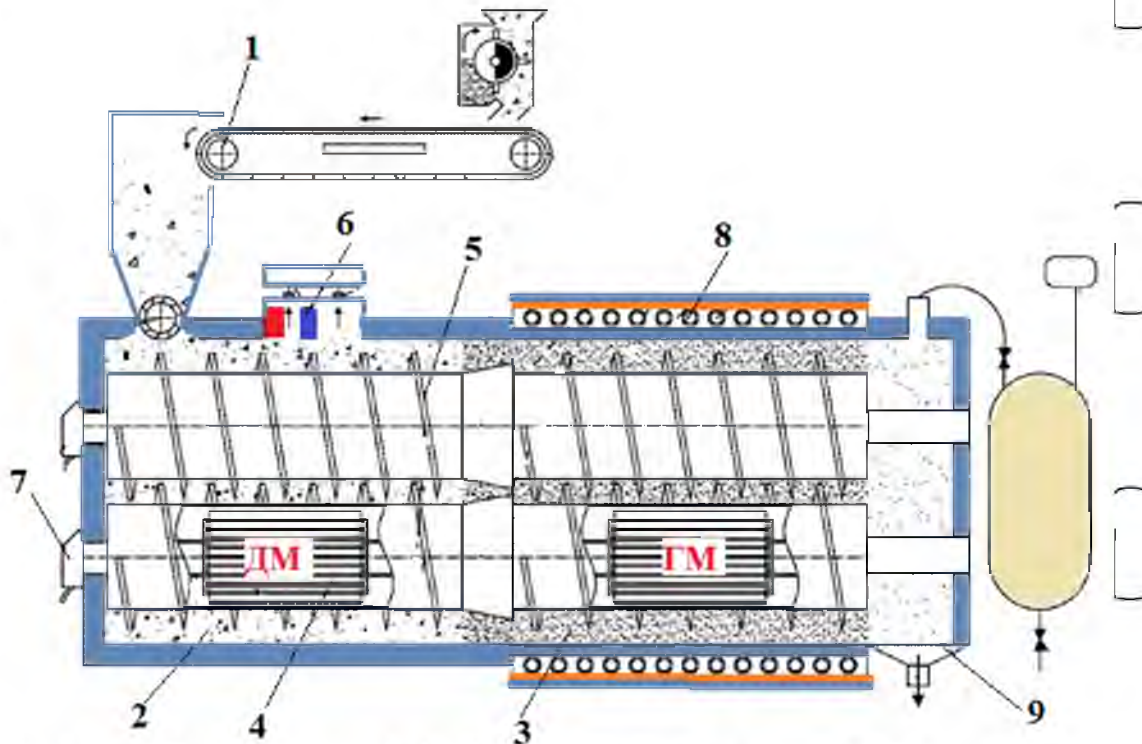


Рис.2.1. Конструктивно-технологічна схема двошнекового електромеханічного гідролізера

Основні вузли і пристрої двошнекового електромеханічного гідролізера такі: 1 – завантажувальний пристрій з магнітним і електродинамічними сепараторами; 2, 3 – ущільнювачі і реакційна робочі зони; 4 – циліндричні індуктори обертового

магнітного поля; 5 – ротор-шнек; 6 – камера магнітної деаерації сировини; 7 – коробки підключення кабелів електроживлення; 8 – індукційний обігрівальний пристрій з теплоізоляцією і електромагнітним екраном; 9 – вакуумно-імпульсний пристрій вивантаження продукту.

Перо-пухова сировина з вихідною вологістю 60-80 % подається в навантажувальний пристрій шнекової установки, в якому піддається впливу електромагнітних полів для видалення металевих часток і за допомогою стрічкового вакуум-фільтра здійснюється видалення водоповітряної компоненти з сировини до рівня залишкової вологи (35-45 %). В першій робочій зоні шнеків створюється сировинне ущільнення (пробки) за рахунок зменшення прохідного перетину шнекової установки і забезпечення тиску від 1 МПа до 20 МПа. Одночасно з ущільненням здійснюють нагрів до температури 60°C, вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією 0,025Т і магнітну деаерацію сировини. Далі сировина подається в реакційну робочу зону шнеків, де її розпушують зменшеною в діаметрі частиною витків шнеків, переміщують і подрібнюють при температурі 180-260°C до отримання подрібненої маси. Одночасно в цій зоні установки здійснюють вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50Гц з індукцією 0,065Т і чотирьохстороннє підведення теплової енергії до шару пухо-пр'яної сировини. Вакуумний вплив через кожні 10-60 с здійснюють для отримання продукту з вологістю 8-12%.

Механічна енергія обертання ротора – шнека створюється за рахунок взаємодії обертового магнітного поля та вихрових струмів в феромагнітному масиві ротора-шнека. Робоче навантажувально-охолоджуюче середовище перебуває в безпосередньому контакті з ротором – шнеком. В залежності від режиму навантаження кінематичну схему механічної частини шнекових агрегатів можна представити в таких видах:

- одномасової системи на неробочому ході (рис.2.2, а);

- двомасової системи, що працює зі змінною жорсткістю  $C_{12}$  і змінним моментом інерції  $J_2$  в'язкої маси в режимі поступового заповнення шнека (рис. 2.2, б);

- двомасової системи з постійними  $C_{12}$  і  $J_2$  при основному режимі роботи (рис. 2.2, c);

- двомасової системи з постійними  $C_{12}$  і  $J_2$  у режимі звільнення шнека (рис. 2.2, d);

Коефіцієнт жорсткості  $C_{12}$  містить дві складові, пов'язані зі співвідношенням навантаження пружному зв'язку й деформацією по обертовому й поступальному переміщеннях.

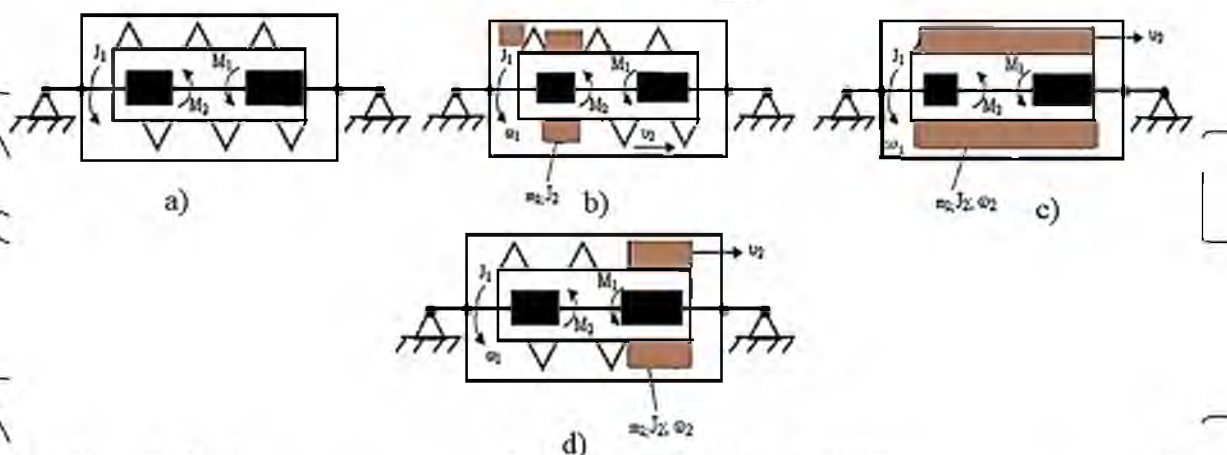


Рис. 2.2. Кінематичні схеми шнекових агрегатів

## 2.2 Принцип саморегуляції при розділенні на складові корисної потужності

Даний принцип визначає механізм шайового розподілу електромагнітної потужності електромеханічного гідролізера на два корисні потоки вихідної

потужності: потік механічної потужності і потік теплової потужності. Оскільки

електромагнітні і теплові процеси, що відбуваються в обох шнеках ідентичні,

надалі будемо розглядати лише один шнек. Більш того, можливим є промислове виконання одношнекового електромеханічного гідролізера.

Розглянемо два характерні стани електромеханічного гідролізера:

А – нерухомий стан масивного ротора ( $S = 1$ ), відповідний штучному режиму стійки під струмом згідно до вимоги технологічного процесу;



Б – стан прискорення обертання ротора ( $\frac{dn}{dt} > 0$ ), відповідне переходу матеріалу в рідку фазу і подальшої стабілізації в'язкості.

Вологий матеріал, що переробляється, виступає в двох якостях: механічне навантаження для ротора електромеханічного гідролізера, що створюється силами в'язкого тертя матеріалу; охолоджувальне середовище, омиваюче ротор-шпек, що відбирає від нього теплову енергію. При цьому може здійснюватися фазовий перехід матеріалу в рідкий, і навіть газоподібний стан.

Стану А відповідає нерухомий ротор, коли електромагнітна енергія рухового  $P_{ED}$  і гальмуючого модулів  $P_{ET}$  повністю перетворюється в тепло, що виділяється в роторі.

Крім того, проходження струму по статорним обмоткам супроводжується джоульовими втратами  $P_{M1D}$  і  $P_{M1T}$ . Ці процеси можуть бути відображені наступними виразами:

$$P_{ED} = m_1 \cdot E_{1D} \cdot \cos \psi_{2D} \cdot \frac{1}{tc} \int_0^{tc} (I'_{2D})^2 dt, \quad (2.1)$$

$$P_{ET} = m_1 \cdot E_{1T} \cdot \cos \psi_{2T} \cdot \frac{1}{tc} \int_0^{tc} (I'_{2T})^2 dt, \quad (2.2)$$

$$P_{M1D} = m_1 \cdot \frac{1}{tc} \int_0^{tc} (I_{1D})^2 \cdot R_{1D}(t) dt, \quad (2.3)$$

$$P_{M1T} = m_1 \cdot \frac{1}{tc} \int_0^{tc} (I_{1T})^2 \cdot R_{1T}(t) dt, \quad (2.4)$$

де  $E_{1D}$ ,  $E_{1T}$ ,  $I_{1D}$ ,  $I_{1T}$ ,  $I'_{2D}$ ,  $I'_{2T}$ ,  $R_{1D}$ ,  $R_{1T}$  – ЕРС взаємоіндукції, первинні і

приведені вторинні струми, активні опори статорних обмоток відповідно рухового (ДМ) і гальмуючого (ГМ) модулів:

$t_c$  – час стоянки під струмом.

Знаходження струмів і активних опорів в підінтегральних виразах указує на температурний дрейф цих величин протягом часу  $t_c$ . Сумарна теплова енергія  $W_{\text{ТД}} = t_c (P_{\text{ЕД}} + P_{\text{ЕГ}} + P_{\text{МІД}} + P_{\text{МІГ}})$  визначається з умови  $t_c \leq t_{\text{пр}}$ , коли за період

стоянки під струмом температура статорних обмоток не досягає граничного по класу нагрівостійкості ізоляції значення, але матеріал в міжлопатковій зоні, примикає до ротора, вже переходить в рідку фазу. Озокеритове заповнення лобових частин статорних обмоток електромеханічного гідролізера при цьому також переходить в рідкий стан і передає тепло кінцевим частинам ротора.

Природно, що тепловий стан обмоток повинен контролюватися автоматичною системою, при необхідності, знижуючу величину або перериваючу подачу напруги живлення на якийсь час, достатній для охолодження обмотки до безпечної температури за рахунок віддачі тепла матеріалу.

Стан Б настає в мить, коли в'язкість матеріалу, що переробляється, знижується настільки, що створований їм гальмівний момент  $M_c$  стає менше сумарного електромагнітного моменту обох модулів електромеханічного гідролізера. При цьому електромагнітна енергія  $W_{\text{ЕД}}$  в зазорі ДМ перетворюється в два інших вида енергії: механічну  $W_{\text{мех.д}}$  і теплову  $W_{\text{ТД}}$ .

Введемо параметри при  $S = 1$ ,  $I_2'' = I_{1H} = 1$ , узяті з досліду короткого замикання при номінальному струмі статора :

$$R_2'(1) = \frac{K_A K_L a_R}{Z_B} \sqrt{0,5 \mu_2(\Phi) \rho_2 \cdot \omega_1},$$

$$X_2'(1) = \frac{a_X}{a_R} R_2'(1), \quad (2.5)$$

де  $Z_B^D = U_{1H} / I_{1H}$  – базисний імпеданс статора ДМ;

$$K_{\Delta}^D = \frac{2m_1(W_{\Delta} \cdot K_{\text{обл}})^2 \cdot \ell_{\Delta}}{P_{\Delta} \cdot \tau_{\Delta}} - \text{коefficient приведення питомих параметрів}$$
 до системи повних опорів статора;

$$K_{\Delta}^D = 1 + \frac{2 \tau_{\Delta}}{\pi \ell_{\Delta}^{2,75}} - \text{коefficient кінцевої довжини ділянки ротора, відповідного}$$
 ДМ:
 
$$a_R = 1,4 \div 1,6; a_x = 0,6 a_R - \text{коefficientи, що враховують зміну магнітної}$$
 проникності і гістерезис;

$\mu_2(1)$  – магнітна проникність, визначувана по основній кривій намагнічування матеріалу ротора при співвідношенні поверхневої тангенціальної напруженості магнітного поля на поверхні ротора і амплітуди номінального лінійного навантаження статора  $\frac{H_{2xo}}{A_{1H}} = 1$ .

Значення параметрів головного ланцюга, наприклад, T-подібної схеми заміщення, залежних від ковзання, знаходимо по формулах:

$$\frac{R_{2SD}''}{s} = \frac{R_2'(1) \cdot C_1^2}{\sqrt{s I_{2D}''}}, \quad (2.6)$$

$$\frac{X_{2D}'}{s} = 0,6 \frac{R_{2SD}''}{s}, \quad (2.7)$$
 де  $C_1 \cong 1 + \frac{X_1}{X_m}$ .

Тоді пайовий розподіл вихідної енергії в стані Б характеризується двома складовими:

$$W_2^B = W_{2П} + W_{2\text{мех.}} = m_1 \cdot R_2'(1) \cdot C_1^2 \cdot (t_6 - t_c)^{0,25} \cdot \left[ \int_{t_c}^{t_6} \{I_2''(t)\}^2 dt \right]^{0,75} \times$$

$$s_D = \frac{1}{\sqrt{H}} \int_{t_c}^{t_g} \{M_{ЭМП}(t) - M_C(t)\} dt + \frac{1}{\sqrt{H}} \int_{t_c}^{t_g} \{M_{ЭМП}(t) - M_C(t)\} dt, \quad (2.8)$$

де  $(t_g - t_c)$  – період часу від моменту руху ротора ПЕМП до сталого значення швидкості.

Закон зміни ковзання в період  $(t_g - t_c)$ :

$$s_D = \frac{1}{H} \int_{t_c}^{t_g} \{M_{ЭМП}(t) - M_C(t)\} dt, \quad (2.9)$$

де  $H$  – інерційна постійна ротора ПЕМП;

$M_{ЭМП} = M_{ЭМД} \pm M_{ЭМТ}$  – результуючий електромагнітний момент ДМ і ГМ.

Знак «+» – відповідає згідному обертанню ДМ і ГМ.

У виразі (2.8) для стану Б повинне бути узятє середнє значення питомого опору ротора

$$\rho_2 = \frac{1}{t_B - t_C} \int_{t_c}^{t_g} \rho_2(t) dt, \quad (2.10)$$

Аналогічні вирази можуть бути отримані і для ГМ з тією лише різницею, що значення ковзання необхідно визначати відповідно до виразу

$$s_T = \frac{p_T}{p_D} (1 - s_D) \pm 1, \quad (2.11)$$

де  $p_D, p_T$  – число пар полюсів відповідно ДМ і ГМ.

Знак «+» відповідає зустрічному, а «-» – згідному обертанню магнітних полів ДМ і ГМ.

Крім того, вихідна енергія ГМ може формуватися по трьом варіантам:



а) при зустрічному обертанні магнітних полів ГМ отримує електричну енергію з мережі і механічну від ДМ. В результаті вся отримана енергія повністю дисипатує в тепло.

б) при згідному обертанні магнітних полів і  $r_T = r_D$ ,  $M_D > M_T$  електромагнітна енергія в зазорі ГМ перетвориться в теплову і механічну енергію ротора,

в) при згідному обертанні магнітних полів і  $r_T > r_D$ ,  $M_D \gg M_T + M_C$  ГМ працює в генераторному режимі з рекуперацією електричної енергії в мережу і частковим виділенням тепла в роторі.

При нерухомому роторі (стан А) відведення тепла і передача його в периферійні об'єми матеріалу здійснюється за допомогою теплопровідності відповідно до закону Фур'є

$$q_\lambda = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2.12)$$

де  $q_\lambda$  – питомий тепловий потік;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

Обертання ротора (стан Б) створює переважні умови для вимушеного конвективного теплообміну не тільки між ротором і прикордонною областю матеріалу, але і в периферійних об'ємах матеріалів відповідно до закону Ньютона

$$q_\alpha = \alpha \cdot \Delta T, \quad (2.13)$$

де  $\alpha = \frac{1}{t_B - t_C} \int_{t_C}^{t_B} \alpha(t) dt$  – середній коефіцієнт тепловіддачі при конвективному теплообміні протягом періоду розгону ротора.

Паралельно йде процес зміни агрегатного стану шарів матеріалу, і всі нові шари залучаються до конвективного теплообміну.

В стані Б виділяється менша кількість теплової енергії, чим в стані А  $W_{III}^A > W_{III}^B$ . Проте, за рахунок посилення швидкості передачі теплової енергії теплові потоки обох станів для матеріалів практично однакові.

*Тривалість роботи електромеханічного гідролізера в режимі короткого замикання достатня для отримання і передачі через теплообмінну систему електромеханічного гідролізера такої кількості теплової енергії, яка здатна здійснити фазовий перехід в матеріалі і не перевищує часу настання граничного перевищення температури електричної ізоляції електромеханічного гідролізера.*

*Пайовий розподіл електромагнітної потужності на два потоки корисної потужності здійснюється по поточному ковзання, яке виходячи із співвідношення електромагнітних моментів рухового і гальмівного модулів встановлюється на рівні, що забезпечує необхідну для одного технологічного режиму корисну механічну і теплову потужність.*

### 2.3 Принципи безредукторного забезпечення малої частоти обертання і кратного посилення обертаючого моменту

Умови розміщення ротора-шнека електромеханічного гідролізера в технологічному середовищі матеріалу, що переробляється, такі, що він завжди матиме нерівність питомих активних опорів і комплексної магнітної проникності в окремих елементах масиву. Вказана нерівність породжує в роторі асиметричні струми, які за відомим правилом можуть бути розкладені на дві симетричні системи, що становлять, з позитивним (пряма МРС) і негативним (зворотна МРС) порядками проходження фаз. Для провідного модуля частоти обертання – прямий і зворотною МРС щодо ротора відповідно будуть такими:

$$(n_c - n_p); \quad -(n_c - n_p) = -s_1 n_c; \quad (14)$$

у просторі

$$n_{npl} = n_p + (n_c - n_p) = n_c;$$

$$n_{обр1} = n_p - (n_c - n_p) = -n_c + 2n_p = n_c(1 - s_1) \quad (15)$$

де  $n_c$  – синхронна частота обертання;

$$n_{пр1}, n_{обр1} – \text{частоти обертання відповідно прямої і зворотної МРС у просторі};$$

$s_1$  – ковзання провідного модуля.

Пряма МРС провідного модуля обертається з синхронною частотою обертання у напрямі обертання ротора і, будучи, таким чином, нерухомою відносно МРС статора, створює результуючий магнітний потік і обертаючий момент як при симетрії ротора-шнека.

Потік від зворотної МРС обертається щодо статора з частотою  $n_c = (1 - 2s_1)$  і генерує в ньому ЕРС частоти  $f_{обр1} = f_1(1 - 2s_1)$ .

Для веденого (гальмуючого) модуля частоти обертання прямої і зворотної щодо ротора відповідно рівні:

$$-(n_c + n_p); \quad (n_c + n_p); \quad (16)$$

$$n_{пр2} = n_p - n_p = -n_c;$$

(17)

$$n_{обр2} = 2n_p + n_c = n_c(2s_2 - 1) = n_c(3 - 2s_1)$$

де співвідношення ковзань провідного і веденого модулів відповідає виразу  $s_2 = 2 - s_1$ .

Пряма МРС веденого модуля обертається з синхронною частотою протилежно обертанню ротора і нерухома відносно МРС статора, створює результуючий потік і гальмівний момент електромеханічного гідролізера, як при

симетрії частини масивного ротора на відповідній довжині статора веденого модуля.

Потік від зворотної МРС обертається щодо статора веденого модуля з частотою  $n_c(3 - 2s_1)$  і генерує в ньому ЕРС частоти  $f_{обр2} = f_1(3 - 2s_1)$ .

ЕРС в статорах створюють в обмотках струми частоти  $f_{обр1}$  і  $f_{обр2}$ , які замикаються через обмотки джерел і приймачів енергії в дану мережу.

Зворотні МРС двох ділянок ротора і МРС відповідних статорів утворюють результуючі потоки, що обертаються щодо статорів з частотами  $n_{обр1}$  і  $n_{обр2}$ , і які взаємодіють із струмами статорів відповідних частот, дають додаткові, так звані, зворотні моменти.

Зворотний момент  $M_{об1}$ , як слідує з (15), міняє свій знак залежно від частоти обертання. Поки частота обертання ротора менше  $0,5 n_c$ , маємо негативну частоту обертання  $n_{обр1}$ . Отже, зворотний потік обертається щодо статора в напрямі, зворотному обертанню ротора. Взаємодіючи із струмами статора провідного модуля тієї ж частоти, він створює руйнівний момент.

При частоті обертання ротора  $n_r = 0,5 n_c$  матимемо  $n_{обр1} = 0$ , тобто зворотне поле провідного модуля нерухоме в просторі і в статорі ЕРС не індукується.

Частоти обертання ротора  $n_p > 0,5 n_c$  в шнековому електромеханічному гідролізері, як правило, не досягаються, оскільки включається в роботу ведений (гальмуючий) модуль і частота обертання ротора прагне до робочої номінальної частоти обертання 5-50 об/хв.

У момент включення веденого модуля його пусковий момент діє як ударний гальмівний момент, що викликає процес гальмування ротора шнека. При цьому зворотний момент  $M_{об}$ , як слідує з (17), не міняє знаку при змінах частоти обертання ротора. Згідно (17) зворотний потік  $\Phi_{обр2}$  має позитивну частоту обертання, співпадаючу з напрямом обертання ротора. Взаємодіючи із струмами статора веденого модуля тієї ж частоти  $f_{обр2} = f_1(3 - 2s_1)$ , він створює гальмівний момент.

Обертаючий момент шнекового електромеханічного гідролізера є сумою діючих прямих і зворотних моментів відповідно провідного і веденого модулів:

# НУБІП УКРАЇНИ

$$M = M_{np1} + M_{np2} + M_{обр1} + M_{обр2} \quad (18)$$

На рис.2.3 показані розрахункові характеристики моментів шнекового електромеханічного гідролізера при асиметрії опорів активних зон ротора шнека.

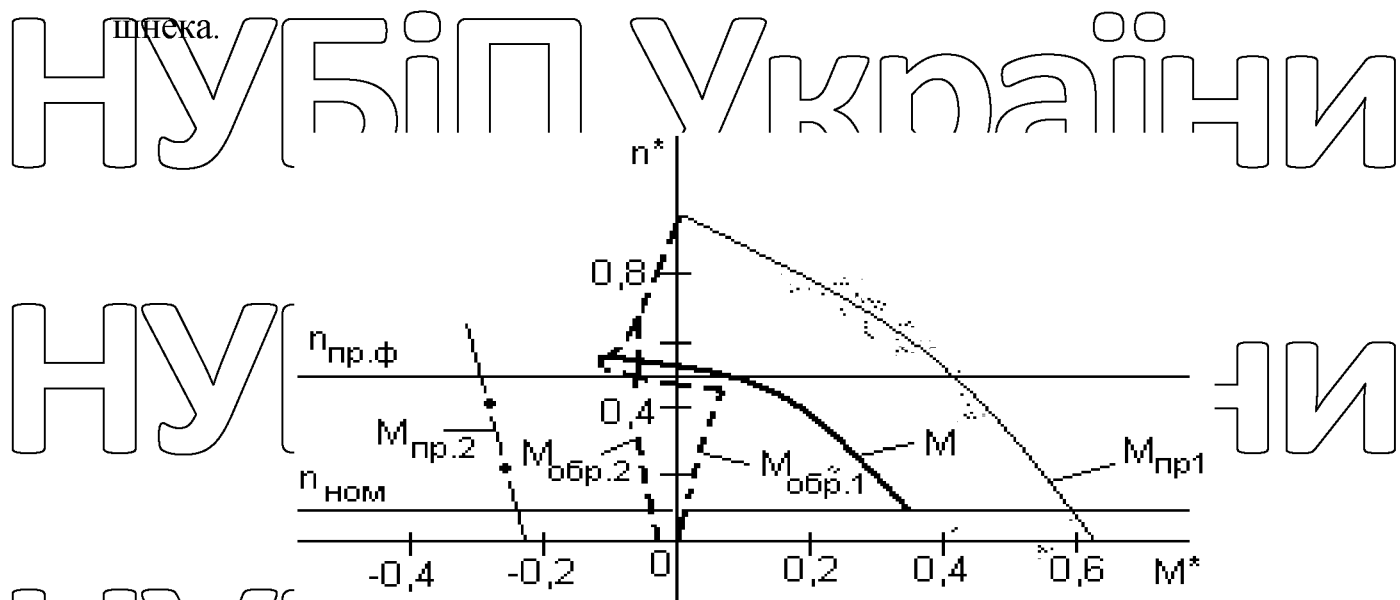


Рис.2.3. Характеристики моментів шнекового електромеханічного гідролізера при асиметрії опорів активних зон масивного ротора

Необхідно відзначити два рівні частоти обертання ротора:  $n_{пр.ф}$  гранична частота обертання для форсованого режиму,  $n_{ном}$  — номінальна частота обертання. Відносні значення досліджуваних величин визначаються по виразах:  $n^* = n/n_c$ ;  $M^* = M/M_{кр.}$

Зворотний момент  $M_{обр1}$  хоча і є позитивним при частотах обертання  $n \leq n_{пр.ф}$ , але приводить до збільшення пологості механічної характеристики і, як наслідок, до посилення нестійкості роботи електромеханічного гідролізера при навантаженні. Крім того, очевидно, що тривалості затримки включення гальмівного модуля необхідно вибирати з умови досягнення необхідного результуючого моменту електромеханічного гідролізера, що обертає, який перевищує днічий момент опору матеріалу, що транспортується.

# НУБІП УКРАЇНИ

Електро механічний гідролізер, до складу якого входять як мінімум два (умовно рухового і гальмівного) електромагнітні модулі, що складаються із статорів і активних зон загального ротора-шнека II, короткочасно, періодично або постійно працюють в одному з режимів:

а) узгоджений напрям відповідно прямих і зворотних МРС обертаючих синхронних магнітних полів модулів, що створюють при взаємодії з вихровими струмами ротора-шнека, який обертається в згідному з прямими МРС поля напрямі, сумарний електромагнітний момент, кратно збільшений по відношенню до номінального (форсований режим);

б) протилежний напрям відповідно прямих і зворотних МРС синхронних обертаючихся синхронних магнітних полів модулів, що створюють при взаємодії з вихровими струмами ротора-шнека різні частоти, визначуваних співвідношенням ковзань ДМ і ГМ, електромагнітні моменти протилежних напрямів, які формують при навантаженні електро механічного гідролізера частоту обертання з 10... 20-кратним зниженням по відношенню до синхронної без застосування механічного редуктора.

У результаті реалізується альтернативний спосіб безредукторного отримання низьких частот обертання електро механічного гідролізера.

Необхідність в кратному збільшенні результуючого обертаючого моменту шнекового електро механічного гідролізера може виникнути в двох випадках:

- важкий пуск в умовах застиглої маси матеріалу,
- форсований режим по моменту при заштибовці шнека в період руху.

При цьому гальмівний модуль електро механічного гідролізера або повністю відключається від мережі, або включається згідно по обертанню з руховим модулем на якийсь час не більше 0,2 с.

## РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТУ ПОЯВИ ВІЩИХ ГАРМОНІК В ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПРИ НЕЛІНІЙНІЙ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУРИ НАВАНТАЖУВАЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА

Електромеханічний перетворювач можна представляти як шестиполосник (рис.3.1) з електричним контуром, що характеризується напругою  $U$  та частотою  $f$ , механічним контуром, що визначається моментом  $M$  та механічною частотою обертання  $n$ , а також тепловим контуром, що характеризується кількістю тепла  $Q$  і температурою  $T$ .

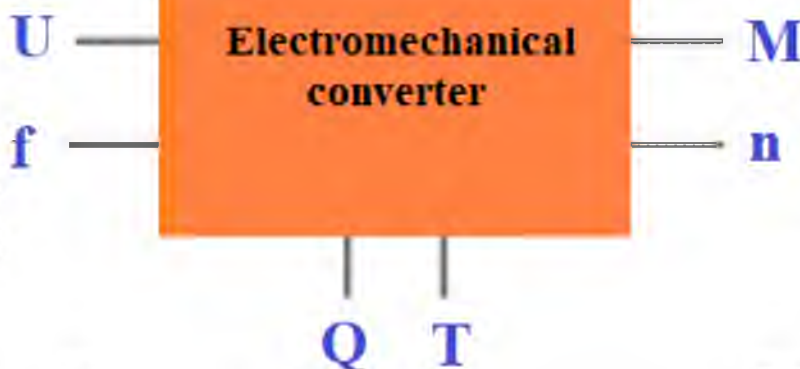


Рис.3.1 Електромеханічний перетворювач у вигляді шестиполосника

Якщо розглядати електромеханічний гідролізер як шестиполосник, то потрапляння тимчасових гармонік у повітряний зазор можливе з боку джерела живлення. Електромеханічний гідролізер у загальному випадку містить два більше нерухомих статора із зубцевою зоною і трифазною обмоткою, що живляться від напівпровідникових перетворювачів, напруга на виході яких характеризується певним ступенем несинусоїдальності та містить парні і непарні гармоніки. Реальний напівпровідниковий перетворювач це несиметрична система, яка живиться від несиметричної системи ЕРС. Таким чином, спектр



гармонік, властивих симетричній системі, доповнюється неканонічними гармоніками, у тому числі низькочастотними (субгармоніками). Гармоніки, пов'язані з роботою тиристорів, проникають на всю глибину ротора-шнека, викликаючи додатковий нагрів. При несинусоїдній напрузі живлення вищі гармоніки напруги викликають додаткові втрати, що характеризуються потужністю спотворення

$$P_{BK}^{(N)}(t) = u \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \sum_{h=0}^{\infty} I_{nk}^2(t)},$$

де  $I_{nk}$  – поточні діючі значення  $n$ -х гармонік струму в фазі « $k$ »  $z$ -го модуля.

При обертанні області зовнішньої поверхні ротора-шнека періодично потрапляють у різні температурні зони вверху і внизу від осі вала (рис.2.1). Аналогічна картина спостерігається і в робочих зонах двошнекового електромеханічного гідролізера в шарах сировини, які розташовані відповідно між роторами-шнеками та стінками ущільнюючої і реакційної робочої зони, а також між поверхнями шнеків. Оскільки частота обертання ротора при певній продуктивності шнека практично постійна, то ми спостерігаємо процес періодичної зміни температури середовища, що омиває зовнішню поверхню феромагнітного ротора.

У першому наближенні можна прийняти, що приріст температури середовища  $\Delta T_{en}$  змінюється у часі періодично, у нашому випадку синусоїдально. Для визначення приросту температури поверхні феромагнітного ротора беремо за основу таке диференціальне рівняння:

$$R_r C_r \frac{d(\Delta T_r)}{dt} + \Delta T_r = \Delta T_{en,m} \sin(\omega_r t) \quad (3.1)$$

де  $R_r$  – теплова постійна часу розрахункової зони ротора;  $\Delta T_{en,m}$  – приріст амплітуди температури середовища;  $\Delta T_r$  – приріст температури ротора;  $\omega_r$  – циклічна швидкість зміни температури середовища, що дорівнює кутовій швидкості ротора.

Теплова постійна часу феромагнітного ротора:



$$R_r = \frac{m_r \cdot c_r}{2 \cdot G_{TCR}} \quad (3.2)$$

де  $m_r, c_r$  – відповідно маса та питома теплоємність матеріалу ротора;  $G_{TCR}$  – загальна теплопровідність ротора.

Теплопровідність  $G_{TCR}$  розраховується для випадку циліндричної однорідної стінки з внутрішніми джерелами теплової енергії та відведенням теплоти через зовнішню стінку [28]:

$$G_{TCR} = \frac{4\pi\lambda \cdot l_r}{\frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.3)$$

де  $l_r$  - довжина ротора-шнека;  $r_1, r_2$  – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси порожнистого циліндричного ротора;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу ротора.

Виходя з конструктивного виконання ротора-шнека приймаємо, що глибина проникнення електромагнітної хвилі в ротор  $\Delta_{ew}$  у режимі робочих ковзань приблизно дорівнює товщині стінки ротора ( $r_2 - r_1$ ).

У випадку, коли  $(r_2 - r_1) > \Delta_{ew}$  необхідно вводити у розрахунки експоненціальну функцію розподілу тепловиділення  $q_{vo} e^{-\beta x / (r_2 - r_1)}$ , де  $q_{vo}$  -

питомі тепловиділення в тонкому шарі при  $x_0 \approx R_1$ ;  $\beta$  - коефіцієнт нерівномірності розподілу втрат по товщині ротора.

Оскільки наявність гвинтових допагок (ребер) ротора значно інтенсифікує тепловіддачу між внутрішньою поверхнею ротора і навколишнім середовищем, для розрахунку теплопровідності  $G_{TCR}$  користуємося такою формулою

$$G_{TCR} = \frac{1}{\alpha_1 + \frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \frac{2\pi \cdot r_2 \cdot l_r}{\alpha_2 [1 + A_{os} (k_{os} - 1)]}} \quad (3.4)$$

де  $\alpha_1$  - коефіцієнт тепловіддачі на неоребреній поверхні стінки ротора;  $\alpha_2$  - коефіцієнт тепловіддачі з боку оребреної поверхні ротора. При цьому прийнято рівність коефіцієнтів тепловіддачі з гладкою  $\alpha_s$  поверхні та поверхні ребра  $\alpha_r$ ;  $A_{os}$  - коефіцієнт ефективності оребрення;  $k_{os}$  - коефіцієнт оребрення поверхні ротора, що дорівнює співвідношенню сумарної площі оребреної поверхні до площі гладкої поверхні ротора.

Рівняння (3.1) буде мати рішення у вигляді двох складових: аперіодичної і синусоїдальної (вимушеної).

Вимушена складова  $\Delta T'_r$  може бути представлена у вигляді:

$$\Delta T'_r = \Delta T_{en.m} e^{j\omega_r t} \quad (3.5)$$

Використовуючи символічний метод операцій з комплексними числами ,

Представимо диференціальне рівняння (3.1) з використанням символічного методу операцій у вигляді:

$$R_r \cdot \frac{d(\Delta T_{rm} e^{j\omega_r t})}{dt} + \Delta T_{r.m} e^{j\omega_r t} = \Delta T_{en.m} e^{j\omega_r t} \quad (3.6)$$

де  $\Delta T_{rm}$  - збільшення амплітуди температури ротора - шнека.

Визначимо значення приросту амплітуди температури масивного ротора шляхом знаходження похідної у виразі(3.6):

$$\Delta T_{rm} = \frac{\Delta T_{en.m}}{1 + j\omega_r R_r} \quad (3.7)$$

Знаходимо кут  $\varphi_r$  фазового зсуву між приростами температур ротора-  
шнека  $\Delta T_r$  і оточуючого його середовища  $\Delta T_{en}$ :

$$\varphi_r = \arctg(-\omega_r R_r), \quad (3.8)$$

де знак «-» вказує на те, що приріст  $\Delta T_r$  відстає по фазі від приросту  $\Delta T_{en}$ .

Сформоване стаціонарне рішення по вимушеній складовій

диференціального рівняння (3.1) можна представити у вигляді:

$$\Delta T'_r = \frac{\Delta T_{en,m}}{\sqrt{1 + \omega_r^2 R_r^2}} \sin(\omega_r t - \varphi_r). \quad (3.9)$$

Для пошуку аперіодичної (вільної) складової прирівнюємо нулю праву  
частину рівняння (3.1)

$$R_r \cdot \frac{d(\Delta T_r)}{dt} + \Delta T_r = 0. \quad (3.10)$$

Визначасмо для диференціального рівняння (3.10) характеристичне  
рівняння

$$R_r \cdot Z + 1 = 0, \quad (3.11)$$

Приймаємо, що  $Z = \frac{d(\Delta T_r)}{dt}$ . При цьому  $Z = -1/R_r$ .

Частиний розв'язок диференціального рівняння представляє експоненціальну  
функцію виду:

$$\Delta T_r'' = A e^{-t/R_r}, \quad (3.12)$$

де  $A$  – коефіцієнт, отриманий з початкових умов.

Отже, повний розв'язок рівняння (3.1) з урахуванням (3.9) та (3.12) можна представити у такому вигляді:

$$\Delta T_r = \frac{\Delta T_{ст.м}}{\sqrt{1 + \omega_r^2 R_r^2}} \sin(\omega_r t - \varphi_r) + A e^{-t/R_r} \quad (3.13)$$

Для визначення коефіцієнту  $A$  рівняння (3.13) приймаємо такі початкові умови: при  $t = 0$ ,  $\Delta T_r = 0$

$$A = \frac{\Delta T_{ст.м}}{\sqrt{1 + \omega_r^2 R_r^2}} \sin \varphi_r \quad (3.14)$$

Остаточно вираз для миттєвих значень  $\Delta T_r$  температури масивного ротора-шнека при синусоїдальній у часі зміні температури середовища  $\Delta T_{ст}$  може бути представлений у вигляді:

$$\Delta T_r = \frac{\Delta T_{ст.м}}{\sqrt{1 + \omega_r^2 R_r^2}} [\sin(\omega_r t - \varphi_r) + e^{-t/R_r} \cdot \sin \varphi_r] \quad (3.15)$$

На рис.3.2 представлені окремі графічні зображення залежностей зміни температури ротора шнекового електромеханічного перетворювача у часі при синусоїдальних коливаннях температури середовища.

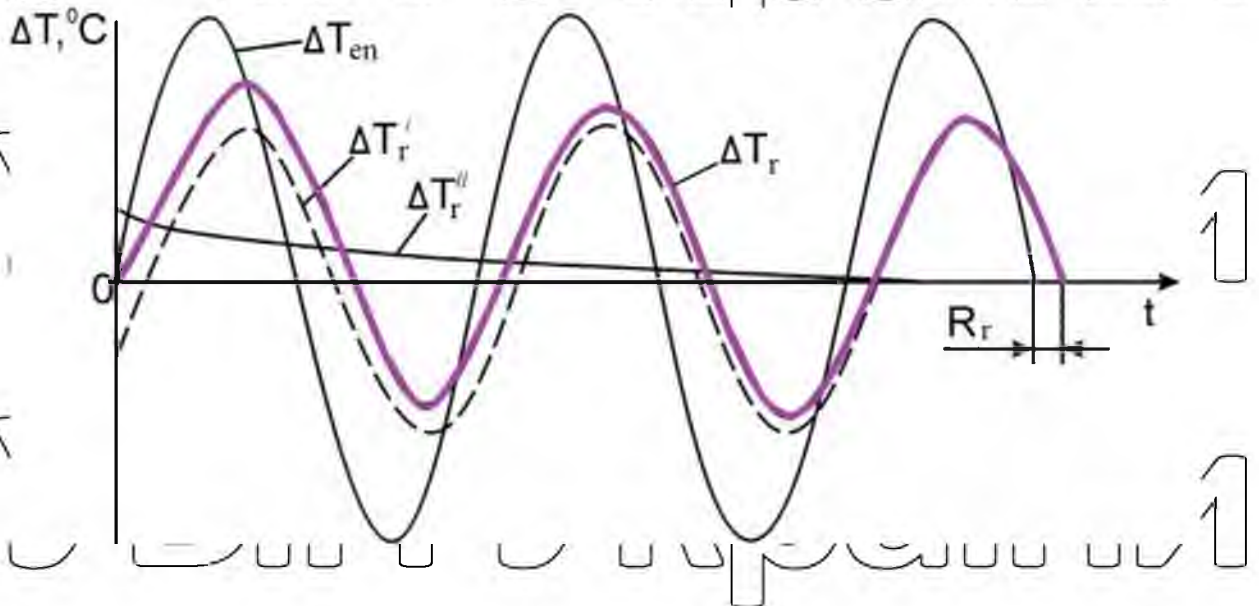


Рис. 3.2 Зміна температури ротора шнекового електромеханічного перетворювача у часі при синусоїдальних коливаннях температури середовища

Як видно зі співвідношення (3.15) і рис.3.2, спостерігається перехідний процес у початковий період часу з подальшим встановленням синусоїдальної зміни температури ротора, що, в свою чергу, викликає пульсації питомого активного опору  $\rho$  і магнітної проникності  $\mu$  матеріалу ротора. Вплив температури на характер електромагнітних процесів прослідковується на прикладі проникнення хвилі електромагнітного поля в масивне електропровідне тіло [29]. Закон проникнення індукованого струму вглиб ротора при гармонійно змінному в часі магнітному полі приблизно можна виразити наступним виразом:

$$J(y) = J_m e^{-ky}, \quad (3.16)$$

де  $k = \sqrt{\omega \mu / 2\rho}$ ;  $\omega$  - кутова частота зміни поля;  $\mu$  - магнітна проникність;  $\rho$  - питомий опір.

Зворотна величина  $\Delta = 1/k$  називається умовною глибиною проникнення змінного струму в ротор і дорівнює відстані від поверхні провідника, на якому значення струму зменшується в  $e$  разів. Питомий опір ротора лінійно залежить від температури по відомому закону

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (3.17)$$

де  $\rho_0$  - питомий опір при температурі  $T_0$ .

Залежність магнітної проникності сталі від температури має більш складний характер і визначається за емпіричними залежностями. Для конструкційних вуглецевих сталей значення  $\mu$  в діапазоні сильних полів ( $H = 2 \cdot 10^{-3} - 12 \cdot 10^{-3}$

A/m) мають незначні коливання при нагріванні до температури 400°C, а далі починають зменшуватись, досягаючи одиниці при температурі точки Кюрі, що збігається з даними [30]. За інших рівних умов із збільшенням температури  $T$  ротора збільшується і глибина проникнення його струмів

$$\Delta = \sqrt{2\rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]/\omega\mu} \quad (3.18)$$
 НУБІП України

Перехідні процеси, що виникають у разі коливань температури ротора при змінах температур оточуючого середовища, супроводжуються появою гармонік струмів і магніторухійної сили ротора/

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОШНЕКОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА

Зважаючи на складну конфігурацію активної зони модулів шнекового електромеханічного гідролізера, нелінійності фізичних властивостей матеріалів рішення сформульованою ММ можливо тільки чисельними методами. Застосування МКЕ для вирішення рівнянь поля передбачає розбиття (дискретизацію) розрахункової області, в межах якої виконується польовий аналіз, на елементарні підобласті малої площі – кінцеві елементи (КЕ). В межах кожного КЕ шукана польова функція апроксимується поліномом  $n$ -ої ступеня. Найбільшого поширення набули трикутні КЕ першого порядку – симплекс-елементи. Симплекс-елемент має форму трикутника, усередині якого векторний потенціал  $A$  лінійно залежить від просторових координат. Наприклад, в декартових координатах  $x$  і  $y$  поліном апроксимації має вигляд  $A(x, y) = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y$ , де  $a_1, a_2, a_3$  – невідомі коефіцієнти, визначувані після вирішення відповідної системи рівнянь алгебри. Сукупність взаємозв'язаних КЕ утворює сітку кінцевих елементів (СКЕ). Чим дрібніше СКЕ, тим точніше чисельне рішення. Як показали чисельні експерименти, при використанні трикутних елементів першого порядку необхідна точність рішення задачі практично завжди досягається за рахунок зміни густини побудови елементів.

Диференціальні рівняння в приватних похідних редукуються до системи алгебраїчних рівнянь (САР), щодо шуканих значень векторного магнітного потенціалу і температури у вузлах СКЕ. В результаті такої редукції формується єдина матриця САР і єдиний шуканий вектор змінних  $\{A_1, \dots, A_N, T_1, \dots, T_N\}$ , де  $N$  - число вузлів СКЕ. Таким чином, кількість вирішуваних рівнянь дорівнює подвоєній кількості вузлів СКЕ. Сучасні пакети програм, що забезпечують реалізацію МКЕ, дозволяють вирішувати системи близько декілька сот тисяч

рівнянь, чим забезпечується висока достовірність отримуваних результатів по аналізу особливостей розподілу поля.

Рівняння електромагнітного поля і рівняння теплового поля мають ідентичну форму математичного запису диференціальних операторів в лівих частинах (при  $\nu = 0$ ). Це дає можливість використовувати для їх вирішення

ідентичні чисельні процедури. Проте при вказаній аналогії в описах теплових і електромагнітних полів існує важлива відмінність в кількісних характеристиках цих двох видів полів, обумовлене відмінністю чисельних значень коефіцієнтів

теплофізичних і електромагнітних параметрів фізичних середовищ. Наприклад,

значення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  для використовуваних в шнековому електромеханічному гідролізері матеріалів лежить в межах від  $0,25 \text{ Вт / м} \cdot \text{град}$  (для пазової ізоляції обмоток) до  $385 \text{ Вт / м} \cdot \text{град}$  (для міді-провідників), тоді як

еквівалентна їй величина  $1/\mu$  в рівняннях електромагнітного поля змінюється

від  $700 \text{ м/Гн}$  (для ненасичених сталей) до  $8 \cdot 10^5 \text{ м/Гн}$  (для діелектриків).

Аналогічно, добуток теплоємності та щільності матеріалу  $\rho c$  змінюється від значення  $1,1 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3 \cdot \text{град}$  (для пазової ізоляції) до значення  $3,42 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3 \cdot \text{град}$  (для міді), а еквівалентна цьому добутку величина електропровідності  $\gamma$

лежить в межах значень від  $10,5 \cdot 10^6 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$  (для сталі) до  $57,2 \cdot 10^6 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$  (для міді).

З вказаної відмінності чисельних значень коефіцієнтів в рівняннях електромагнітного поля і теплового поля слідує дві важливі відмінності в

поведінці вирішень цих рівнянь. По-перше, швидкість дифузії теплового поля в

суцільне середовище значно менша, ніж швидкість дифузії електромагнітного поля в провідне середовище. В результаті теплова інерція для елементів конструкції електромеханічного гідролізера істотно вища за електромагнітну

інерцію. Так, розрахункова величина постійною часу нагріву елементів реальних

конструкцій електромеханічного гідролізера вимірюється від декількох секунд

до декількох сотень секунд, притому, що час встановлення електромагнітного процесу зазвичай складає доли секунди (вимірюється в діапазоні мілісекунди).



По-друге, просторовий градієнт зміни польової функції значно більше для електромагнітного поля. Це веде до істотної відмінності глибини проникнення полів в середовища. Змінне електромагнітне поле частоти 50 Гц проникає в електропровідне середовище на глибину від доль мм до десятка мм, а глибина проникнення теплового поля обчислюється сотнями мм.

Вказані відмінності вимагають адекватного обліку при чисельній реалізації сумісного аналізу зв'язкових електромагнітного і теплового полів. Так, мінімальний розмір розрахункового тимчасового кроку і мінімальний розмір кінцевих елементів в СКЕ необхідно приймати виходячи з умов досягнення необхідної точності вирішення електромагнітного поля, хоча вибрані розміри будуть надмірно малими для досягнення такої ж точності аналізу теплового поля. При цьому доцільно формувати істотно неоднорідну СКЕ, підвищуючи щільність побудови КЕ на ділянках з великим градієнтом зміни польових функцій і вибираючи кінцеві елементи достатньо великих розмірів на ділянках з відносно рівномірним розподілом поля. Оптимізація структури СКЕ досягається чисельними експериментами шляхом встановлення компромісу між точністю моделювання і тимчасовими витратами на виконання розрахунків.

На рис. 4.1 представлений варіант СКЕ, отриманий в результаті компромісу між відміченими вище обставинами і який забезпечує необхідну точність моделювання як електромагнітних, так і теплових полів. На рис. 4.2 представлений фрагмент СКЕ в області повітряного зазору і зубцевої зони статора.

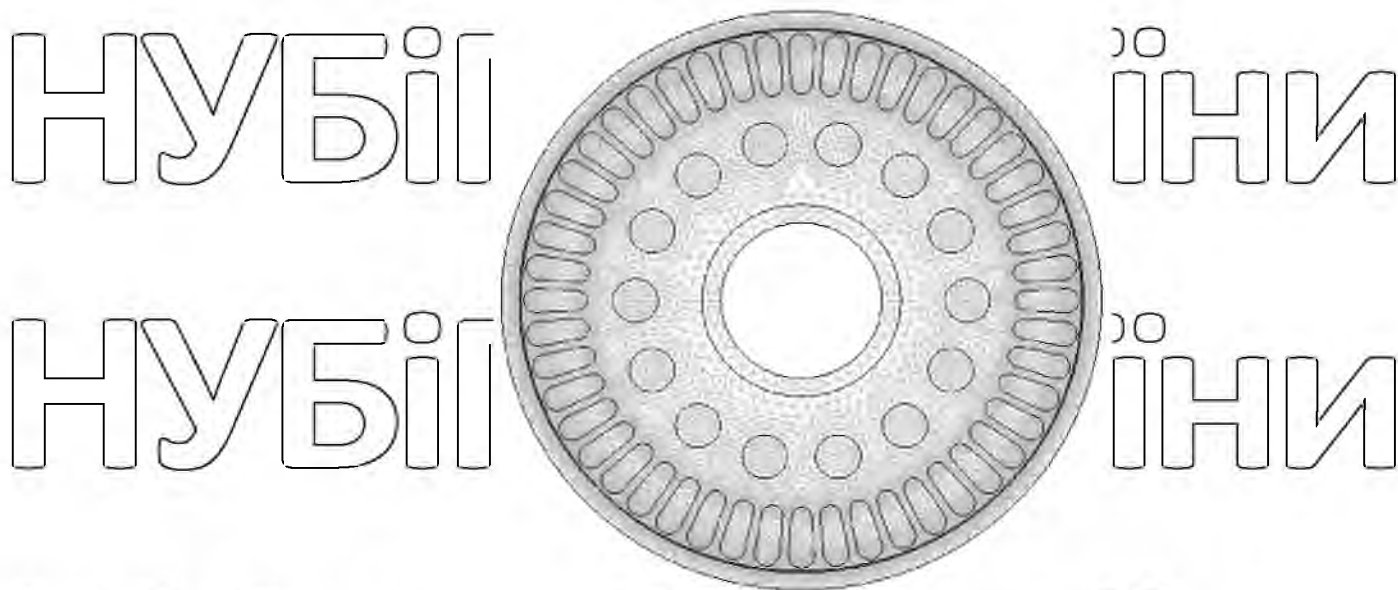


Рис. 4.1 Сітка кінцевих елементів в розрахунковій області

Відзначимо деякі особливості застосування чисельних методів для вирішення завдання аналізу поля в шнековому електромеханічному гідролізері:

а) оскільки ротор шнекового електромеханічного гідролізера має гладку внутрішню поверхню, конфігурація розрахункової області при русі ротора не міняється і, отже, деформації або перестроювання СКЕ не вимагається. При цьому вплив відносного руху електропровідного ротора і обмотки статора на електромагнітне поле шнекового електромеханічного гідролізера враховується конвективною складовою  $\gamma(\vec{v} \times \text{rot} \vec{A})$  в рівнянні електромагнітного поля.

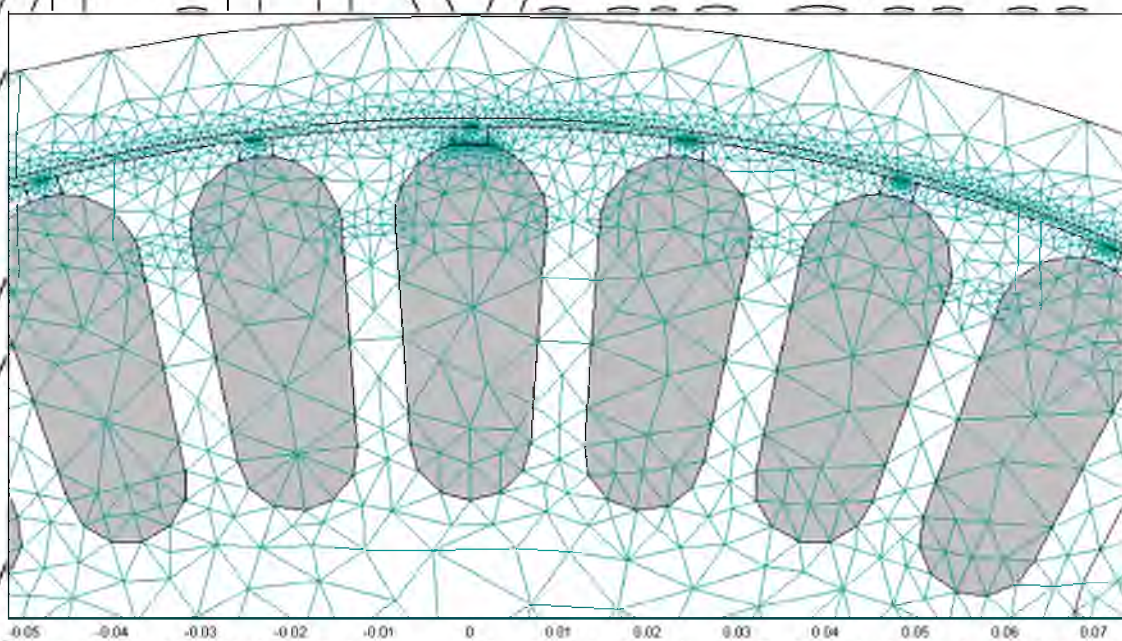


Рис. 4.2. Фрагмент СКЕ в області повітряного зазору і зубцевої зони статора

б) важливою особливістю застосування МКЕ є необхідність ітераційного вирішення системи рівнянь алгебри щодо магнітної проникності  $\mu$ . Збіжність вирішення такої системи у ряді випадків може зустрічати серйозні утруднення, оскільки в межах розрахункової області шнекового електромеханічного гідролізера одночасно можуть знаходитися як насичені, так і розмагнічені ділянки магнітопровода, магнітна проникність яких відрізняється в сотні разів.

в) для вирішення рівнянь електромагнітного поля задаються криві намагнічення всіх феромагнітних матеріалів, присутніх в розрахунковій області електромеханічного гідролізера. Для даних завдань цілком достатня точність апроксимації експериментальних кривих намагнічення забезпечується кусочно-лінійною апроксимацією табличний заданих функцій. Оптимальна кількість крапок (вузлів апроксимації), що задаються, знаходиться в межах 10 – 20. Цей метод апроксимації застосований в даній роботі.

#### 4.1 Моделювання електромагнітних процесів електромеханічного гідролізера

В зв'язку з необхідною точністю, особливістю конструкції і затрат часу на проектування, моделювання виконано в програмному середовищі Comsol Multiphysics. Зважаючи на ідентичність електромагнітних, електромеханічних, теплових і вібраційних процесів, які відбуваються в електромагнітних системах окремих шнеків, моделювання здійснено для одного з них. Аналіз електромагнітного поля проводиться на основі системи рівнянь Максвелла [31, 32]:

$$\nabla \times H = J \quad (4.1)$$

де  $H$  – вектор напруженості магнітного поля, А/м;  $J$  – вектор щільності струму, А/м<sup>2</sup> [32].

$$B = \nabla \times A \quad (4.2)$$

де  $B$  – вектор щільності магнітного поля, Т;  $A$  – векторний магнітний потенціал, Вб/м [32].

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} \quad (4.3)$$

де  $E$  – вектор напруженості електричного поля, В/м [32].

$$J = \sigma E \quad (4.4)$$

де  $\sigma$  – електропровідність, См.

Формулювання скалярного потенціалу виконано згідно рівняння [32]:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.5)$$

На зовнішній межі з магнітним скалярним потенціалом, нормальна складова щільності магнітного потоку прирівнюється до нуля [32]:

$$n \cdot B = 0 \quad (4.6)$$

Намагніченість феромагнітного ротора задана як В-Н крива і визначається з рівняння [32]:

$$B = \int_0^H \frac{H}{|H|} dH \quad (4.7)$$

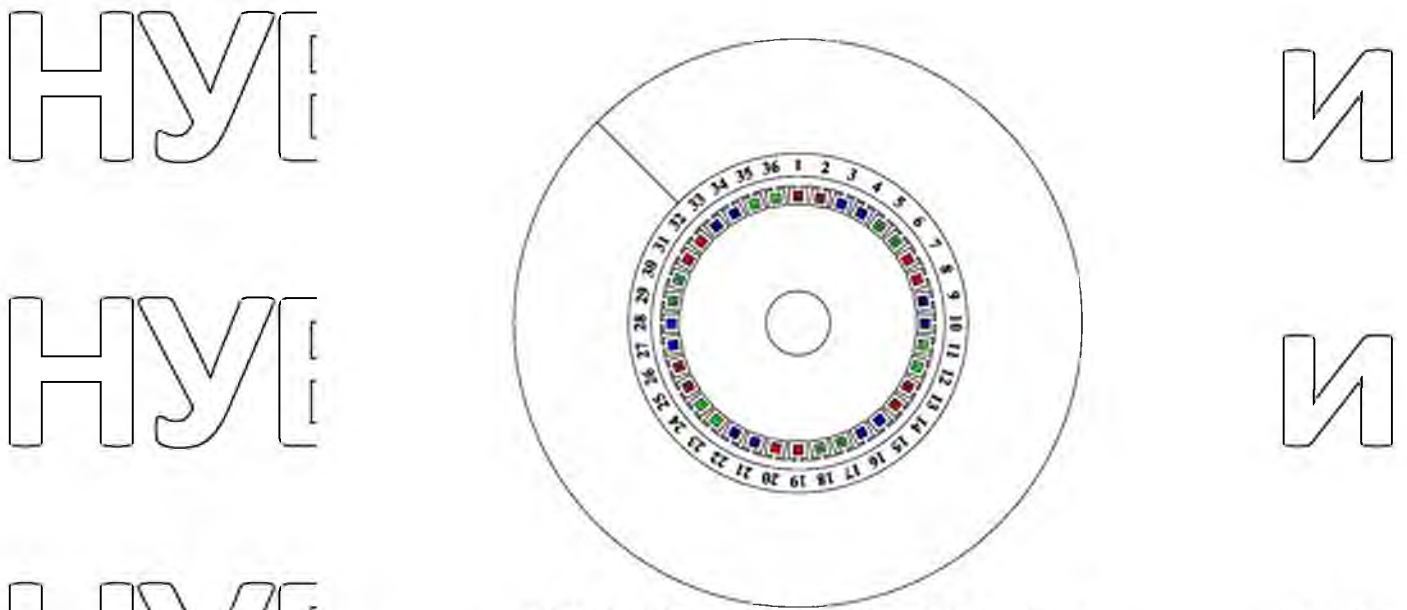
В якості джерела струму в моделі використовуються багатовиткові обмотки статора ( рис. 4.3). Обмотки забезпечують зовнішню щільність струму в напрямку провідників згідно рівняння [32]:

$$j_e = \frac{NI_{coil}}{A} e_{coil} \quad (4.8)$$

де  $N$  – кількість витків в обмотці;  $A$  – загальний переріз, площа домену обмотки, м<sup>2</sup>;  $I_{coil}$  – струм, А;  $e_{coil}$  – векторна змінна, для візуалізації напрямку витків в обмотці [32].

Моделювання здійснено для геометрії електромеханічного гідролізера, представленої на рис. 4.4. Кінцево-елементну сітку моделі було створено в програмному середовищі Comsol Multiphysics як сітку під контролем програмної фізики. Особливу увагу було приділено повітряному проміжку на межі розподілу частини статора та ротора електромеханічного пристрою [32]. Статистика сітки наведена в табл. 3.1





*AAbbCCaaBBccAAbbCCaaBBccAAbbCCaaBBcc*

Рис. 4.3. Схема обмотки статора

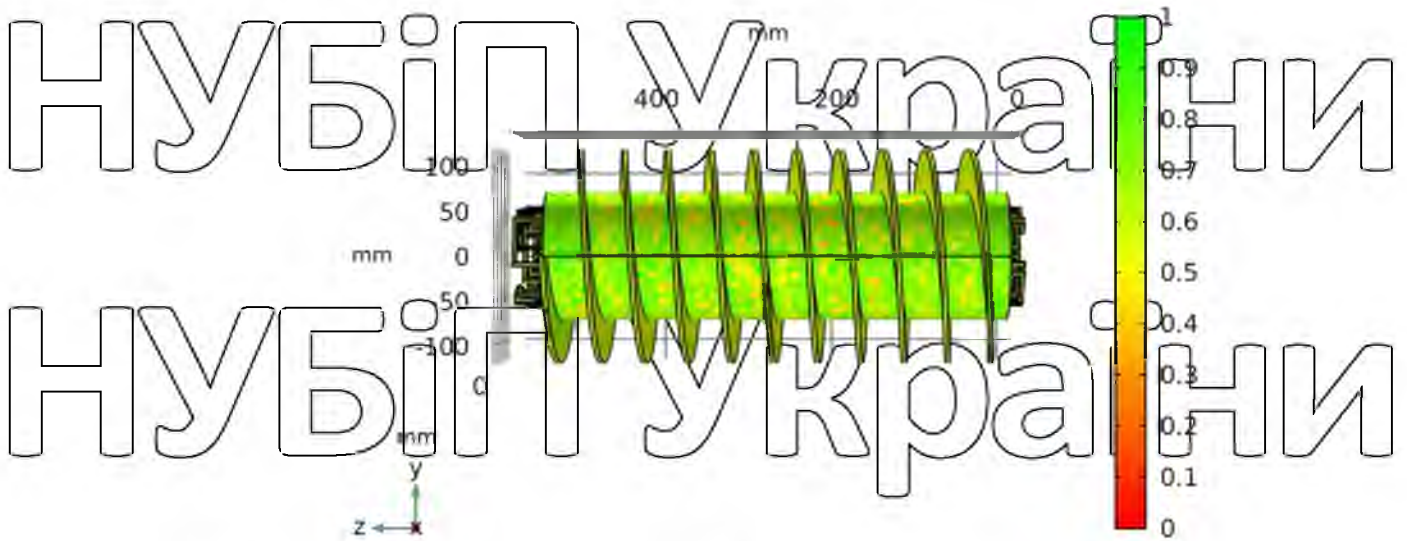


Рис. 4.4. Кінцево-елементна сітка феромагнітного ротора двошнекового електромагнітного гідролізера

Таблиця 4.1. Кінцево-елементна сітка феромагнітного ротора двошнекового електромагнітного гідролізера

Параметри сітки	Значення
Mesh vertices	241325
Tetrahedra	144451

Triangles	277074
Edge elements	49887
Vertex elements	2759
Number of elements	1444151
Minimum element quality	0,0307
Average element quality	0,613
Element volume ratio	2,027E-6
Mesh volume	1,251E8 mm <sup>3</sup>

Моделювання було здійснено для моделі з параметрами, які наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Параметри одного статора феромагнітного ротора двошнєкового електромеханічного гідролізера

Обрані параметри	
Струм обмотки статора	10,5 А
Час моделювання	Діапазон(0, 0.1, 1) с
Частота	50 Гц

Матеріалами моделі були обрані: Soft iron (without losses) в якості матеріалу статорів, Iron в якості матеріалу нерухомого валу, Copper в якості матеріалу обмотки статорів. Матеріали були обрані з бібліотеки матеріалів програмного середовища. В якості матеріалу для феромагнітного ротора було обрано сталь Ст.3, крива намагнічування сталі Ст.3 представлена на рис. 4.5 [32].

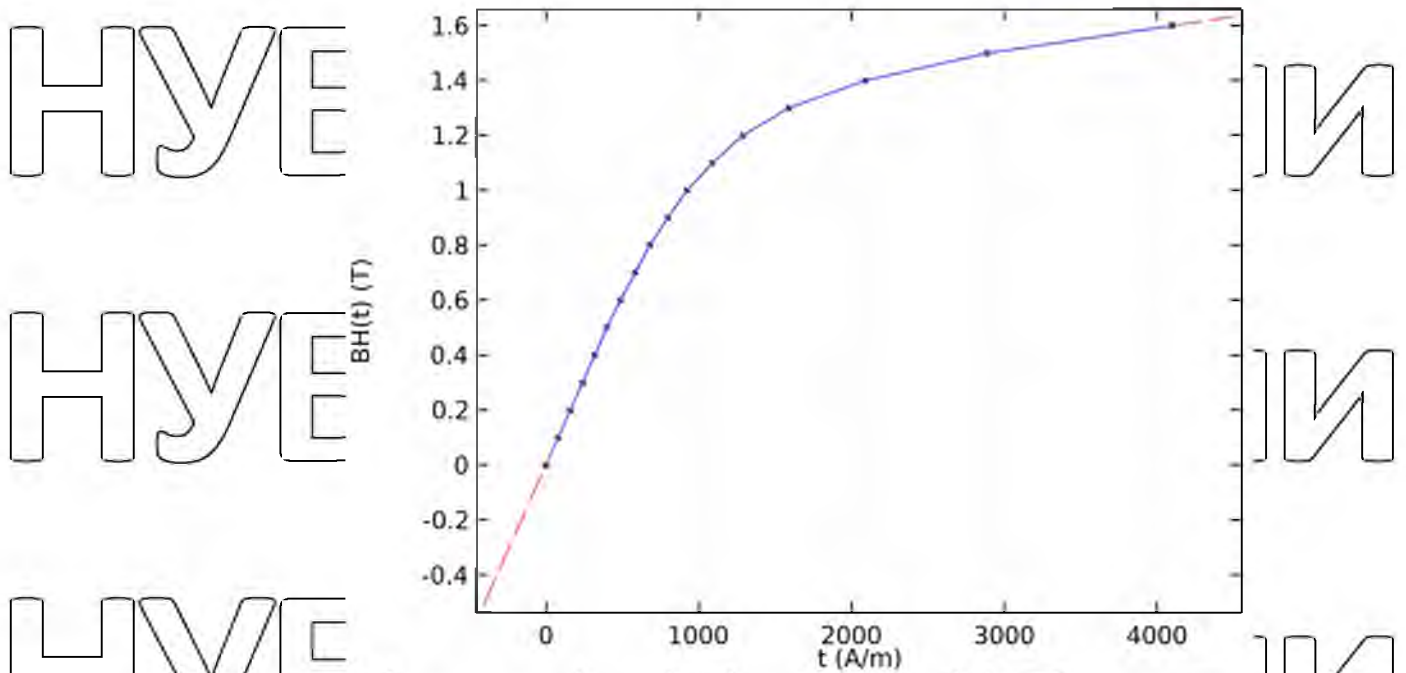


Рис. 4.5. В-Н крива намагнічування сталі Ст 3

Аналіз електромагнітного поля проводиться на основі системи рівнянь Максвелла. Розподіл магнітної індукції на поверхні феромагнітного ротора представлений на рис. 4.6, 4.7. Помітно, що дискретне розташування статорів по осевій лінії гідролізера утворює стабільні зони з циклічним рівнем інтенсивності магнітного поля. В межах довжини пакета статора середній рівень магнітної індукції на циліндричній поверхні ротора становить 0,5 Т, а в проміжках між статорами – 0,15 Т. По колу циліндричної поверхні ротора утворені 6 широких зон з рівнем магнітної індукції 0,6 Т і 6 вузьких зон з рівнем 0,1 Т, які чергуються одна з одною [62].



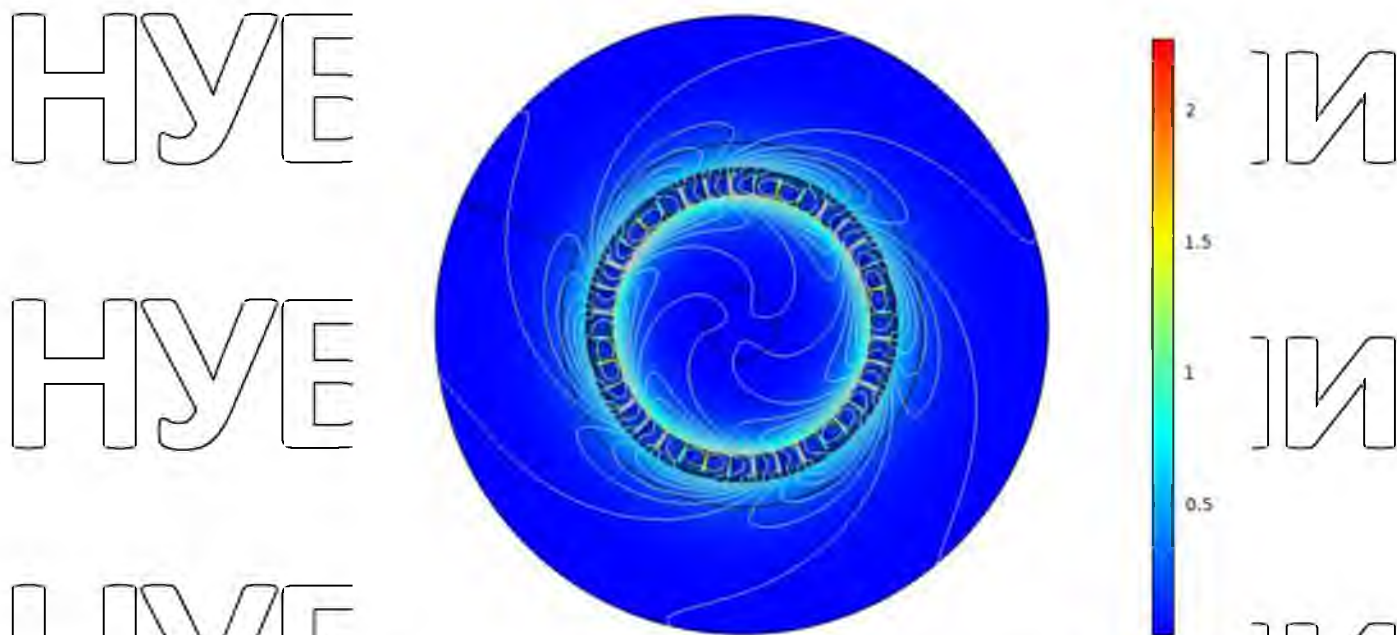


Рис. 4.6. Зображення розподілу магнітної індукції для поперечного січення геометрії гідролізера, Т

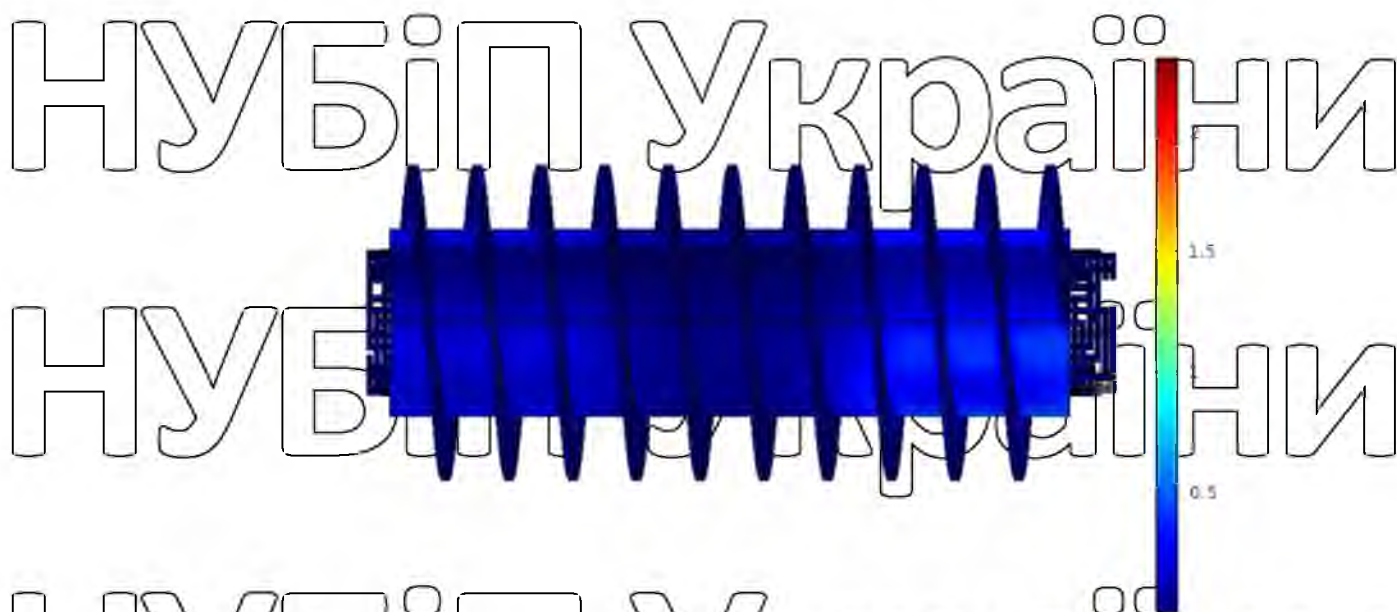


Рис. 4.7. Тривимірне зображення розподілу магнітної індукції на поверхні феромагнітного ротора, Т

На рис. 4.8, 4.9 представлені криві магнітної індукції, які побудовані для тривимірної моделі феромагнітного ротора у напрямку циліндричної навіски за діаметру валу циліндра 144 мм. Діапазони 0-1100 мм та 2500-4000 мм для кривої

побудовані на поверхні ротора та 0-2000 мм, 4500-7000 мм – для кривої побудованій безпосередньо по верхній грані навивки за діаметру навивки 244 мм і відповідають шляху безпосередньо над статорами. Екстремуми на графіках у напрямку навивки шнеку відповідають зонам ді шести полюсів і відповідної модуляції зубцевими гармоніками [32].

Графічне представлення розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера представлено на рис.4.10. Для кількісної оцінки, середні та максимальні значення магнітної індукції в повітряному проміжку феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера наведено в табл 4.3 [32].

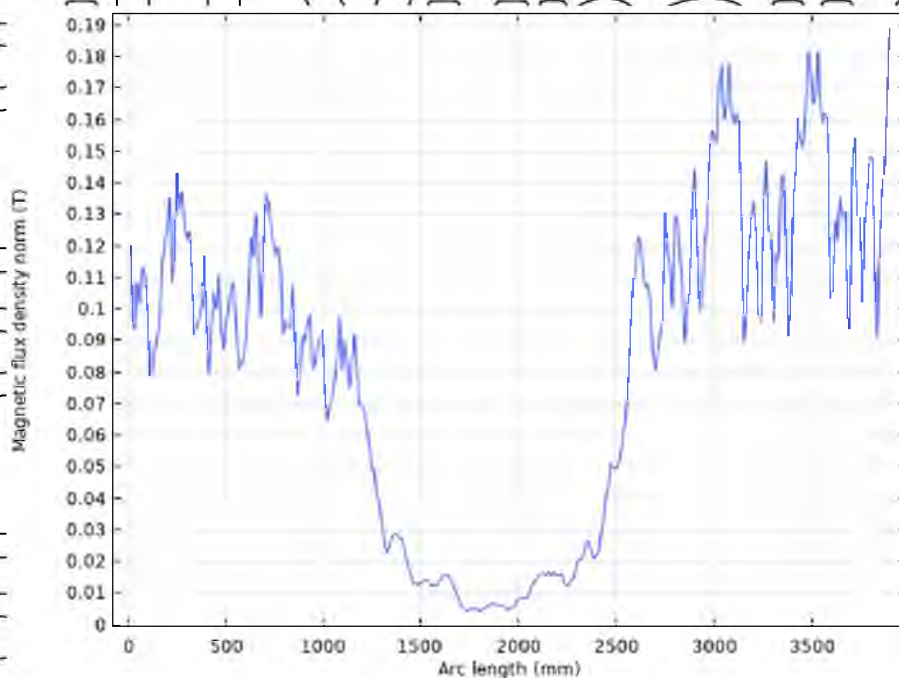


Рис. 4.8. Графік розподілу магнітної індукції на поверхні ротора, T



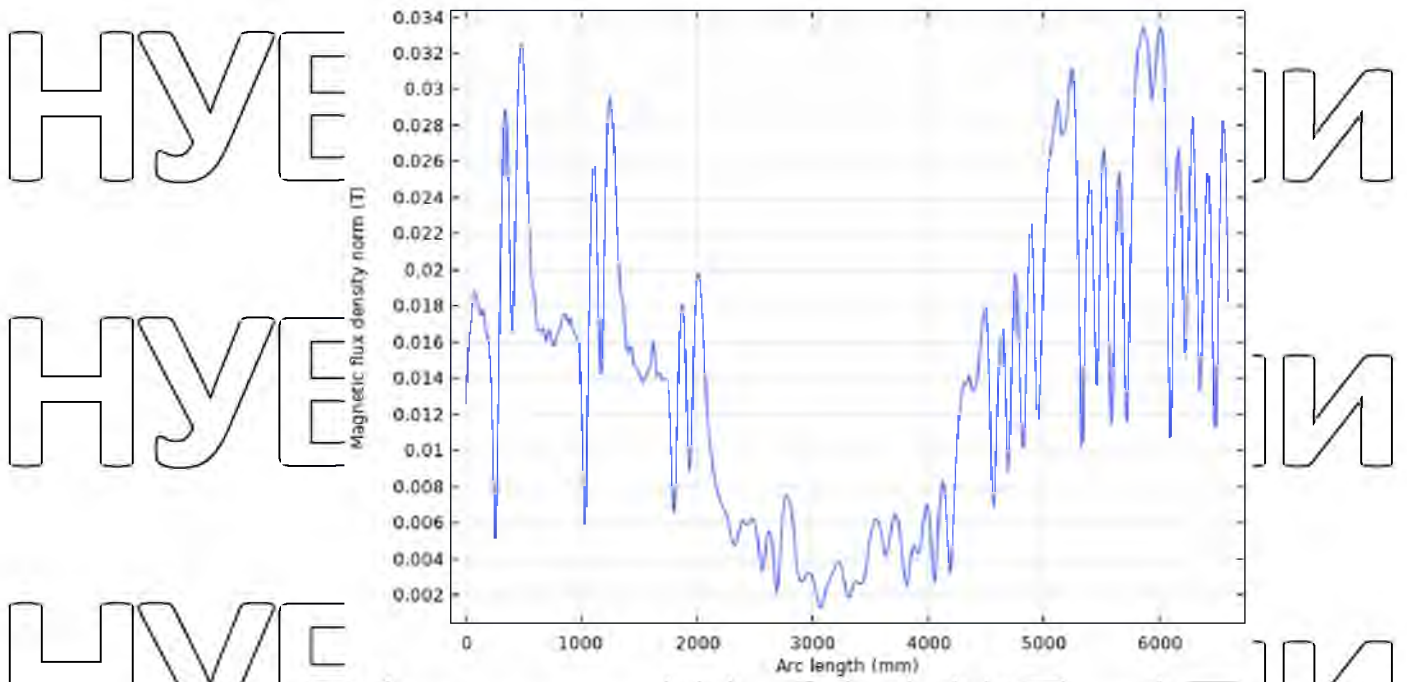


Рис. 4.9. Графік розподілу магнітної індукції по верхній грані лопаток ротора, Т

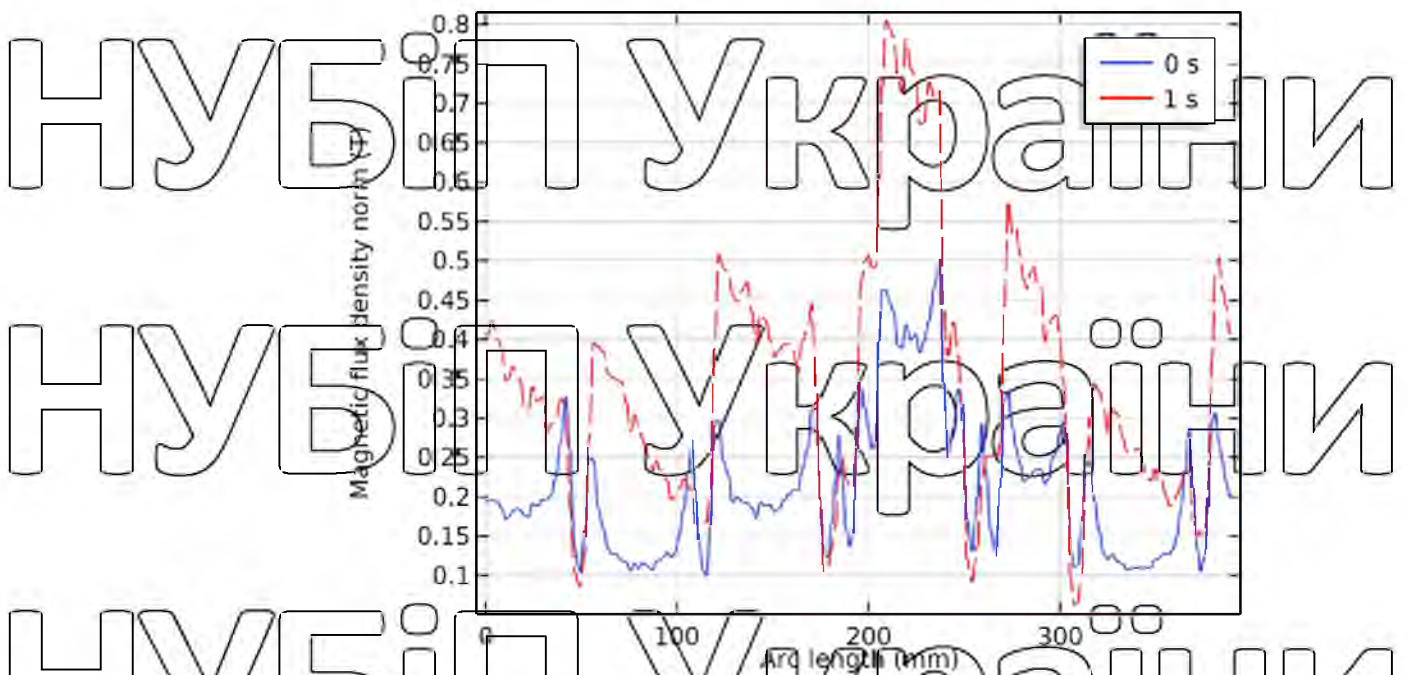


Рис. 4.10. Графічне представлення магнітної індукції в повітряному проміжку електромеханічного гідролізера, Т

Таблиця 4.3. Середні та максимальні значення магнітної індукції в повітряному проміжку електромеханічного гідролізера

Час, с	Середнє значення, Т	Максимальне значення, Т
0	0,216174	0,46575
0,1	0,347887	0,794864
0,2	0,348252	0,796307
0,3	0,348275	0,796473
0,4	0,348284	0,796515
0,5	0,348277	0,796508
0,6	0,348277	0,796515
0,7	0,348278	0,79652
0,8	0,348277	0,79652
0,9	0,348285	0,796534
T	0,348285	0,796536

Розподіл щільності струму та магнітного векторного потенціалу представлені на рис. 4.11, 4.12. Векторний магнітний потенціал надає прямий вплив на хвильові функції електронів. Векторний потенціал супроводжує електричні струми, в том числі вихрові, і поширюється на значні відстані від області їх локалізації, зменшуючись з відстанню  $r$  як  $r^{-1}$ , на відміну від магнітної індукції, що зменшується як  $r^{-2}$ . Оскільки магнітне поле зосереджено всередині феромагнітних зон статора, ротора і гвинтової навівки, то зовні ж від них існує лише безроторний векторний потенціал. В областях руху вологої кератинової сировини векторний потенціал діє як електродинамічний імпульс і впливає через зсув фази хвильових функцій, що проявляється в колективних взаємодіях атомів, іонів і молекул [32].

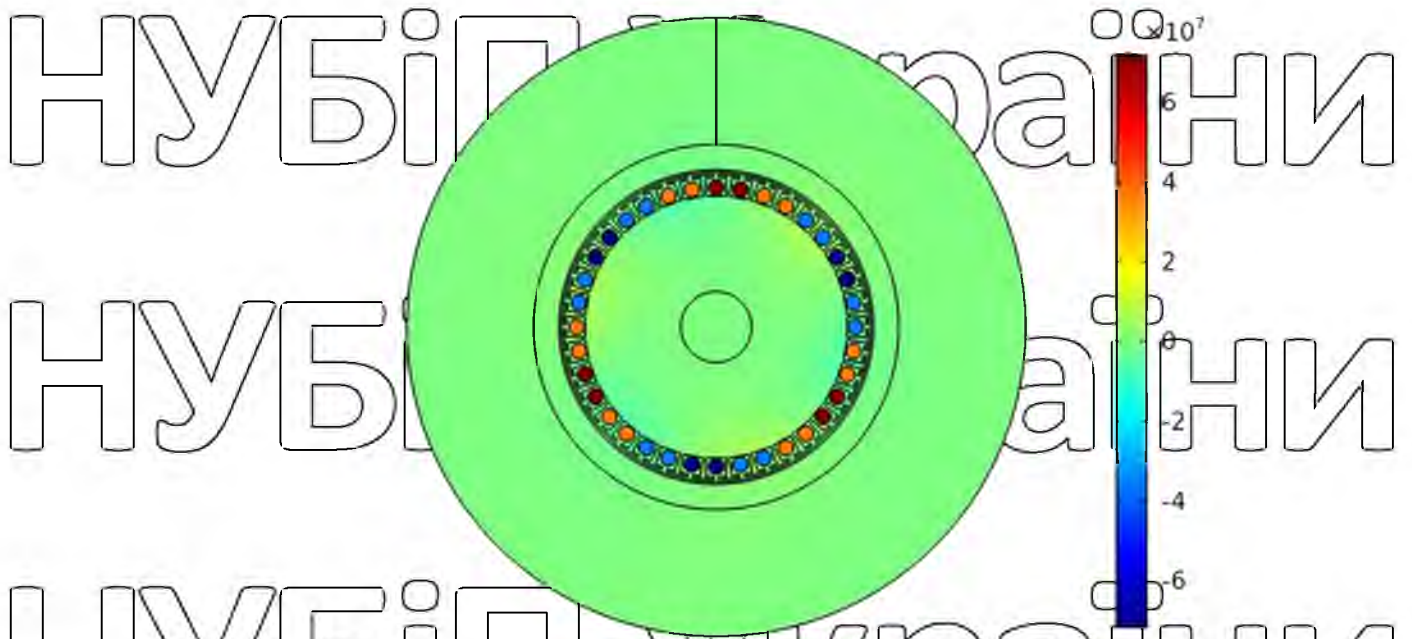


Рис. 4.11. Зображення щільності струму для поперечного січення геометрії,  $A/m^2$

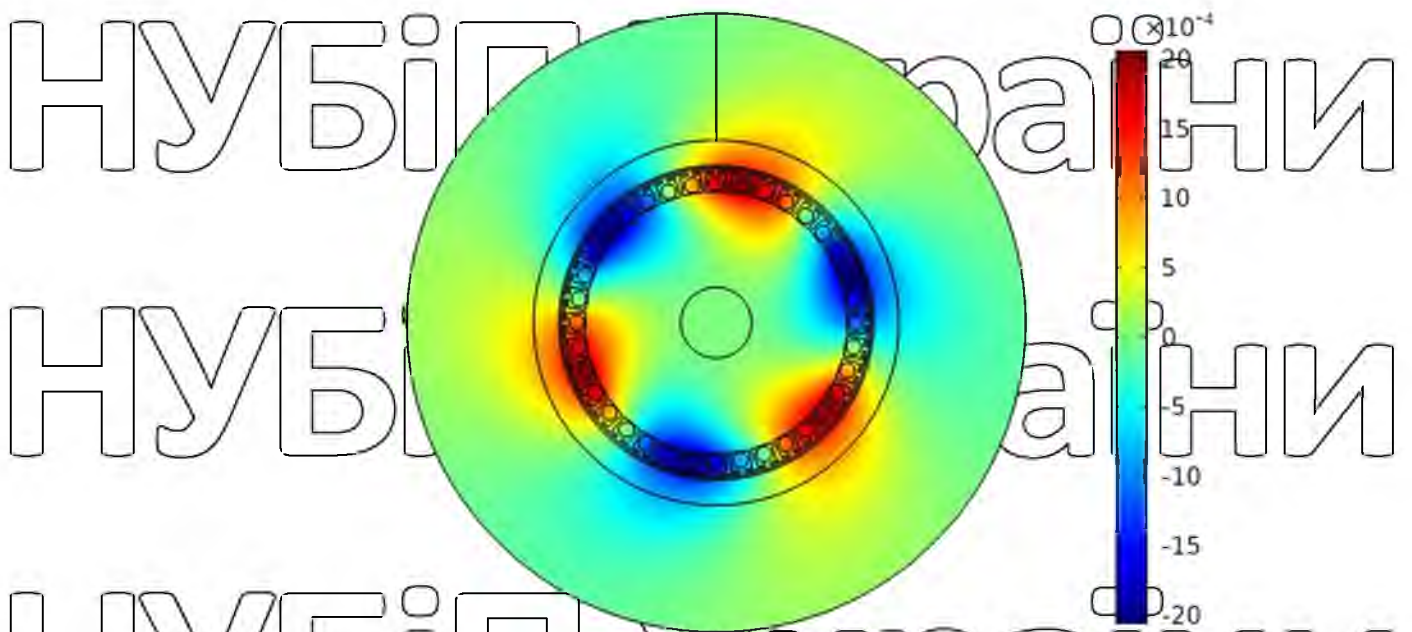


Рис. 4.12. Зображення магнітного векторного потенціалу для поперечного січення геометрії,  $Вб/м$

НУБІП України



Графіки щільності струму представлені на рис. 4.13, 4.14

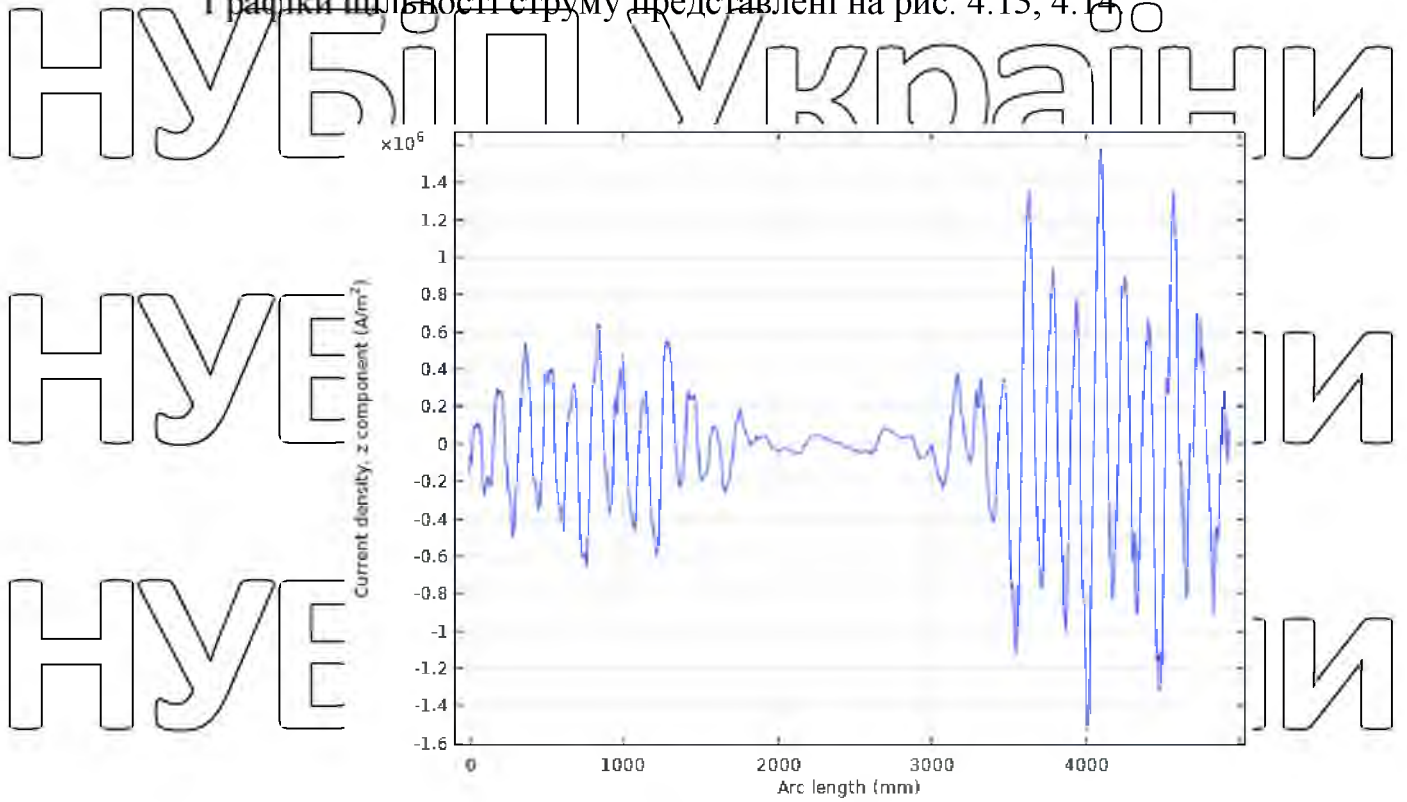


Рис. 4.13. Графік щільності струму побудований на поверхні феромагнітного ротора, А/м<sup>2</sup>

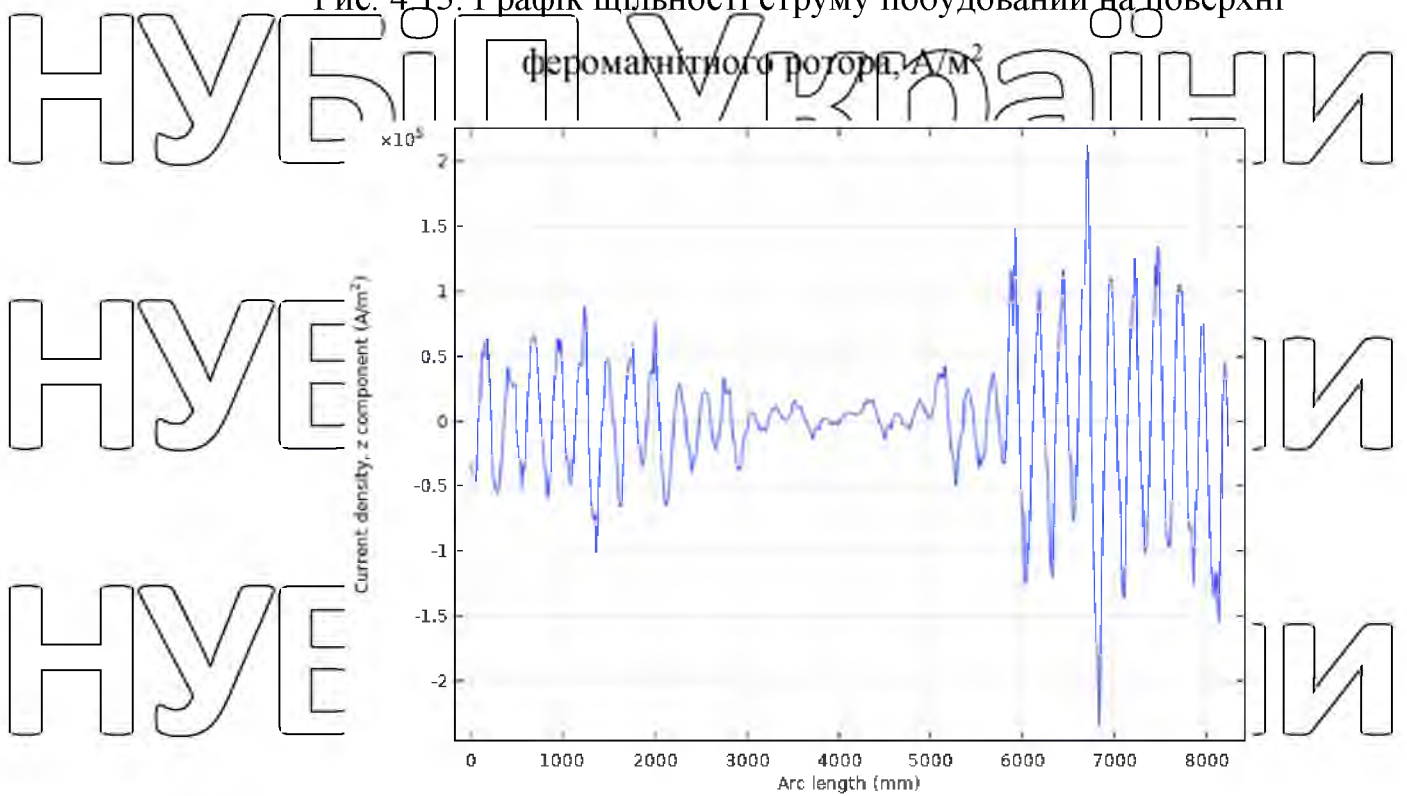


Рис. 4.14. Графік щільності струму побудований на верхній грані шнекової навівки феромагнітного ротора, А/м<sup>2</sup>

З рисунків помітно, що максимальне значення щільності струму на поверхні феромагнітного ротора становить  $1,5 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, мінімальне  $0,1 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, для верхньої грані шнекової навівки феромагнітного ротора ці значення становлять  $2,1 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup> та  $0,6 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup> відповідно. Ці значення відмінні на кінцевих ділянках ротора, де переважає поперечна складова вихрових струмів, а також для ділянок входу магнітного поля в феромагнітний ротор, де вихрові струми мають переважно аксіальний напрямок [33].

#### 4.2 Моделювання електромеханічних процесів в шнековому електромеханічному гідролізері

Електромеханічні характеристики робочого елемента двошнекового електромеханічного гідролізера – феромагнітного ротора, що запропонований даним дисертаційним дослідженням досліджуються шляхом побудови математичної моделі згідно методу скінченних елементів, доповнюючи рівняння електромагнітної задачі (рівняння 4.1-4.8).

Електромагнітний момент обчислюється шляхом об'ємного інтегрування електромагнітного тензора напруженості Максвелла [32]:

$$F = \int_{\partial\Omega} n T dS \quad (4.9)$$

де  $F$  – сила як граничний інтеграл тензора напруженості,  $H$ ;  $T$  – тензор електромагнітного поля;  $n$  – вектор нормалі до площини  $S$  [32].

$$\tau = \int_{\partial\Omega} (r - r_0) \times (n T) dS \quad (4.10)$$

де  $\tau$  – обертовий момент, Н·м;  $r_0$  – точка на осі обертання [32].

$$\tau_{ax} = \frac{r_{ax}}{r_{ax}} \cdot \tau \quad (4.11)$$

де  $\tau_{ax}$  – обертовий момент відповідно до осі, Н·м;  $r_{ax}$  – точка на осі [32].

Тензор напруженості Максвелла використовується для оцінки сил нормальної та тангенціальної складової тензору напруженості за наступними рівняннями [32]:



$$\sigma_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \quad (4.12)$$

де  $\sigma_r$  – нормальна складова електромагнітного зусилля, Н/м<sup>2</sup>;  $B_n$  – нормальна складова щільності магнітного потоку, Т;  $B_t$  – тангенціальна складова щільності магнітного потоку, Т [32].

$$\sigma_t = \frac{1}{\mu_0} (B_n E_t) \quad (4.13)$$

де  $\sigma_t$  – тангенціальна складова електромагнітного зусилля, Н/м<sup>2</sup> [62].

Електромагнітний момент оцінений шляхом об'ємного інтегрування електромагнітного тензору напруженості, зображено на рис. 4.15, 4.16. Графічне представлення електромагнітного тензору напруженості виконано шляхом побудови кривої на поперечному сеченні феромагнітного ротора в аксіальному напрямку [32].

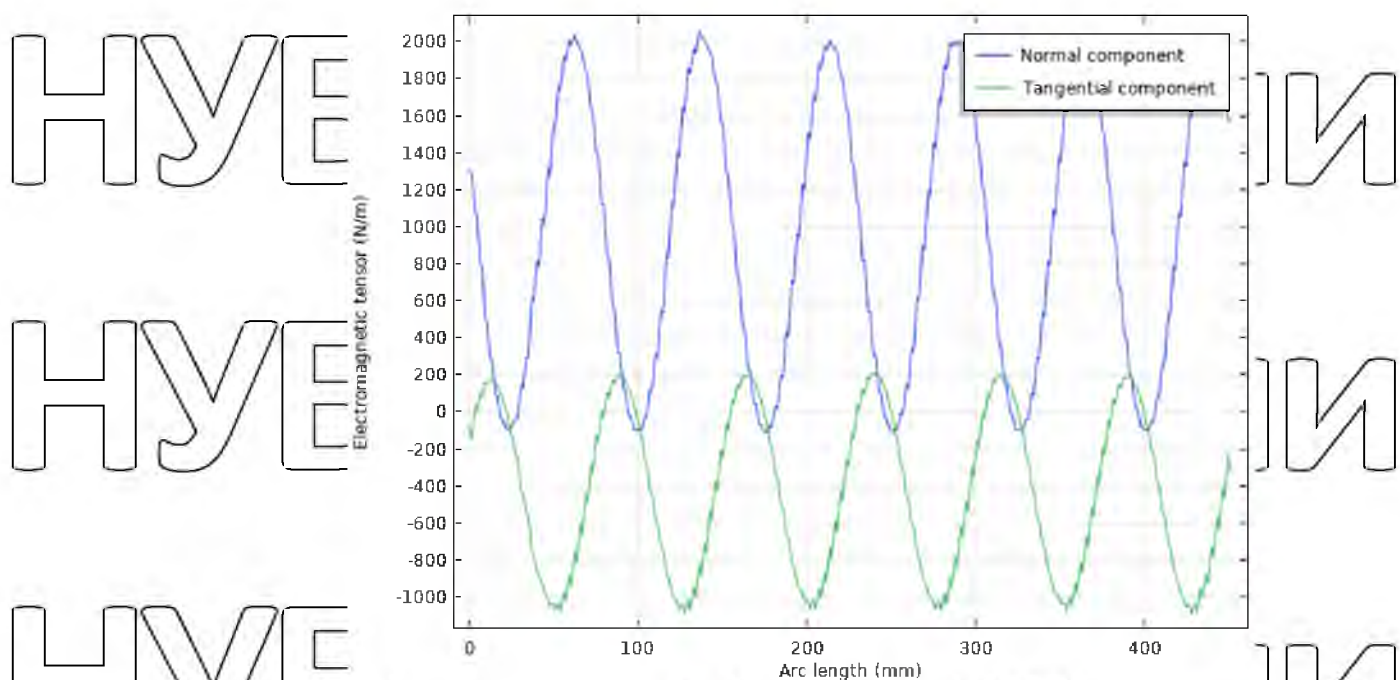


Рис. 4.15. Електромагнітний тензор напруженості на поверхні феромагнітного ротора, Н/м

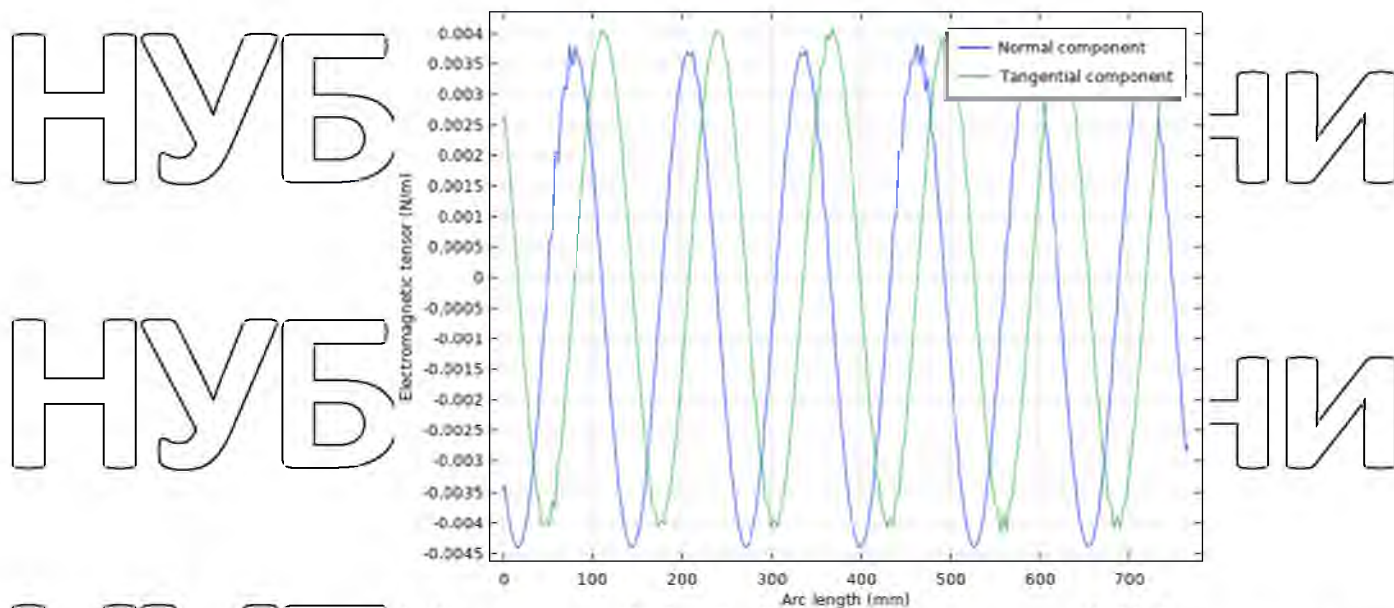


Рис. 4.16. Електромагнітний тензор напруженості на верхній грані лопаток ротора, Н/м

Графічна залежність обертового моменту від кутової швидкості феромагнітного ротора зображено на рис. 4.17. Графік побудований шляхом параметричного аналізу за умови однакового напрямку обертового магнітного поля статорів і має характерну для двигунів з масивним ротором залежність обертового моменту від кутової швидкості ротора-шнека [32]. На рис. 4.18 зображено залежність електромагнітного моменту як функції від часу.

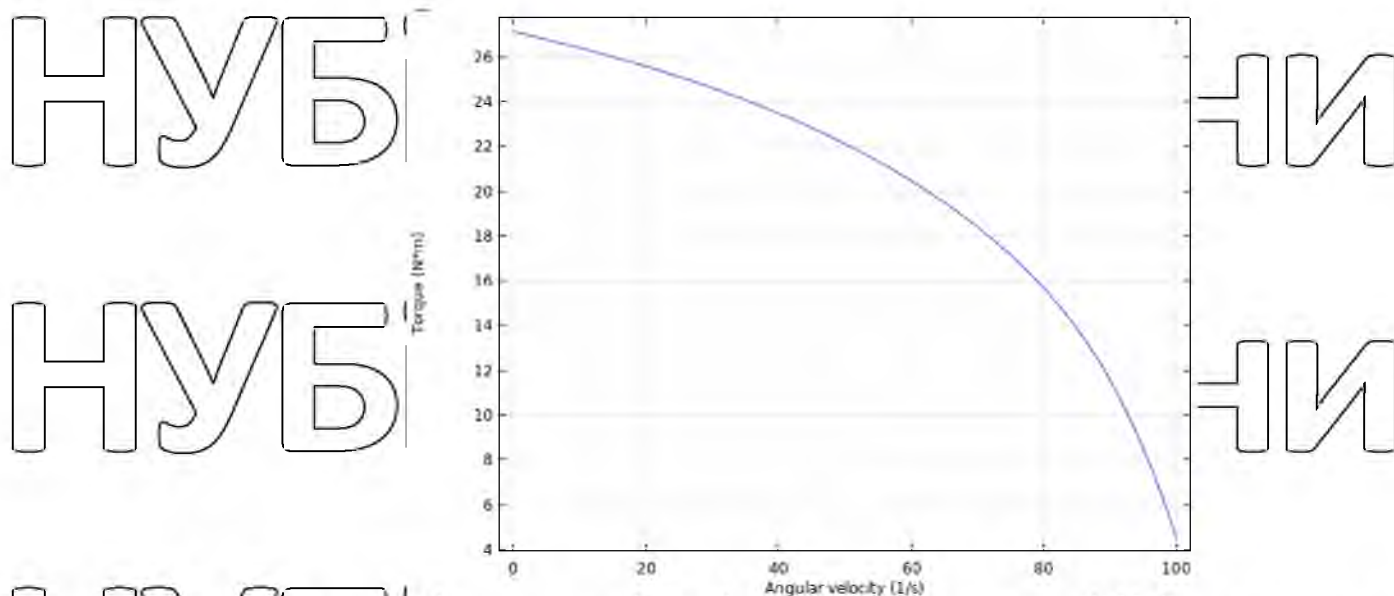


Рис. 4.17. Графік залежності електромагнітного моменту від кутової швидкості феромагнітного ротора, Н·м



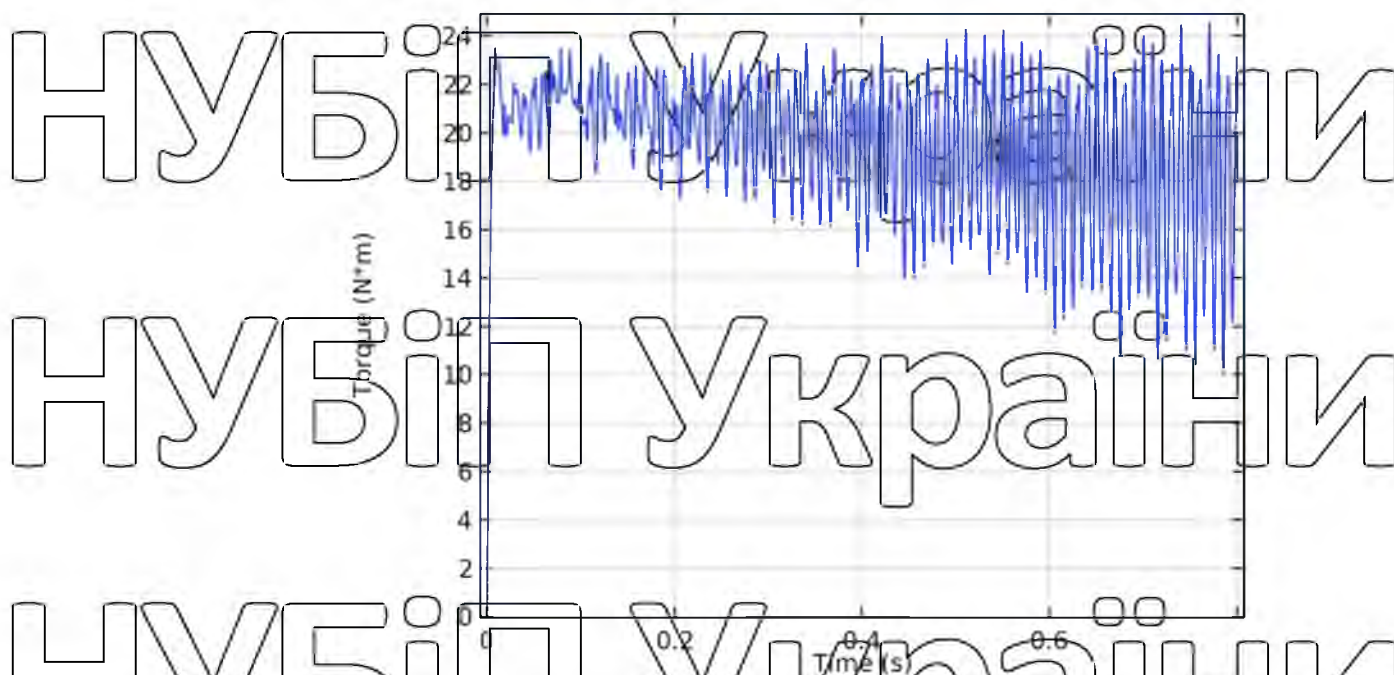


Рис. 4.18. Графік електромагнітного моменту як функції від часу, для феромагнітного ротора з шнековою навивкою, Н·м

За результатами математичного моделювання встановлено, що за малих значень кутової швидкості підтримується задовільне значення електромагнітного моменту, що забезпечує можливість підтримання ефективного технологічного процесу за прийнятої геометрії та параметрів електромагнітної системи двошнекового електромеханічного гідролізера [32].

### 4.3 Моделювання теплових процесів в шнековому електромеханічному гідролізері

Диференціальне рівняння теплового поля в часткових похідних щодо температури  $T$  має наступний вигляд:

$$\lambda \Delta T - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -Q \quad (4.14)$$

де  $\lambda, c, \rho$  - відповідно теплопровідність, теплосмність і щільність матеріалу;  $Q$  - питомі теплові втрати

У кожній точці ротора питомі втрати розраховуються по виразу:

НУБІП України

$$Q = J_z^2 / \gamma(T) \quad (4.15)$$

де електропровідність заліза ротора в кожній його крапці залежить від температури  $T$

НУБІП України

У декартових координатах для двовимірної картини поля рівняння (4.14) переписується в наступному вигляді:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q. \quad (4.16)$$

НУБІП України

Взаємозв'язок рівнянь електромагнітного і теплового полів виявляється у взаємному впливі температури, електропровідності, щільності вихрових струмів

і питомих теплових втрат, яка відображається у виразах (3.16, 4.14, 4.15). Для

рівняння (4.16) задаються граничні і початкові умови. Вибір граничних умов

обумовлений особливостями режимів роботи. Для досліджень виберемо

найбільш сприятливі умови для процесу генерації вищих гармонік – режим

поступового заповнення шнека, а також для порівняння – режим одномасової

системи на неробочому ході. У цьому випадку при побудові ММ

припускаємо, що основна теплопередача теплової енергії від ротора на

верхній його частині здійснюється шляхом конвективного теплообміну між

нагрітою поверхнею і потоком повітря (область  $G_2$ , рис.3) Такий теплообмін

відбувається відповідно до закону Ньютона–Ріхмана, а на відповідній межі

здається гранична умова третього роду:

НУБІП України

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{G_1, G_2} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T - T_0) \quad (4.17)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі;  $T_0$  - температура повітря, що охолоджує.

НУБІП України

Гранична умова (4.17) задається також на внутрішній поверхні нерухомого порожнистого валу і на поверхнях аксіальних вентиляційних каналів, виконаних

в сердечнику статора. Теплообмін на нижній частині поверхні ротора яка стикається з сипким матеріалом, що транспортується, має складну фізичну природу. З фізичної точки зору найбільш адекватним є припущення про передачу джоульових втрат, що виділилися в нижній половині ротора сипкому матеріалу у вигляді теплового потоку через поверхню ротора. Цьому припущенню відповідає гранична умова другого роду, яка задає середню величину теплового потоку на межі розрахункової області:

$$q|_{G_i} = \frac{1}{R_{2n}} \int_{S'} Q ds = \frac{1}{R_{2n}} \int_{S'} [J_z^2 / (\gamma) T] ds, \quad (4.18)$$

де  $R_{2n}$  - зовнішній радіус ротора,  $S'$  - область інтеграції.

Умова (4.18) також обумовлює взаємозв'язок електромагнітного і теплового завдань.

На рис.4.19 представлений розподіл температури в поперечному перетині електричного шинкового агрегата для подрібнення і піролізу біомаси рослинних відходів при частоті обертання ротора 10 об/хв в режимі поступового заповнення шнека за умови, що нижня частина ротора занурена в сипкий матеріал. В цій зоні відбуваються ендотермічні реакції і інтенсивна теплопередача від ротора до сировини. Верхня частина ротора знаходиться в умовах контакту з повітрям, теплопровідність якого при температурах вище 250°C становить 0,025 Вт/м·К, що на порядок менше теплопровідності сировини, яка обробляється. З представлених результатів виходить, що різниця температур нижньої і верхньої частин ротора може досягати значення 60–80°C. Температура обмотки статора не досягає гранично допустимих значень для електричної ізоляції.

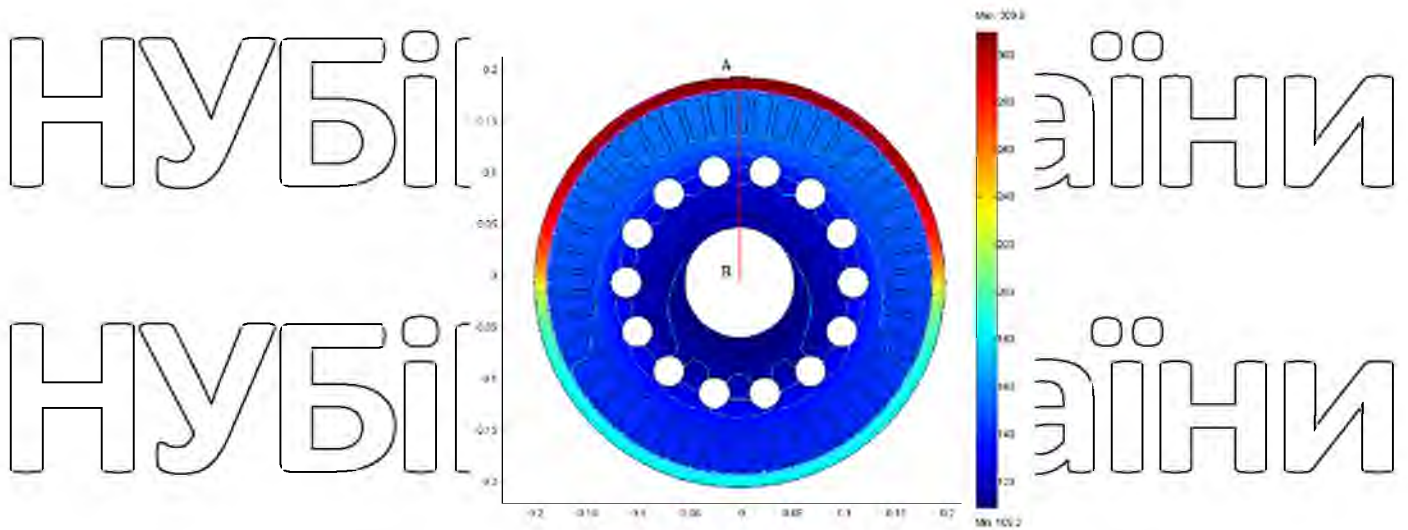


Рис. 4.19. Розподіл температури в поперечному перетині електричного шнекового агрегату при частоті обертання ротора 10 об/хв в режимі поступового заповнення шнека

На рис. 4.20 приведено розподіл температурного поля електромагнітних частин двошнекового електромеханічного гідролізера.

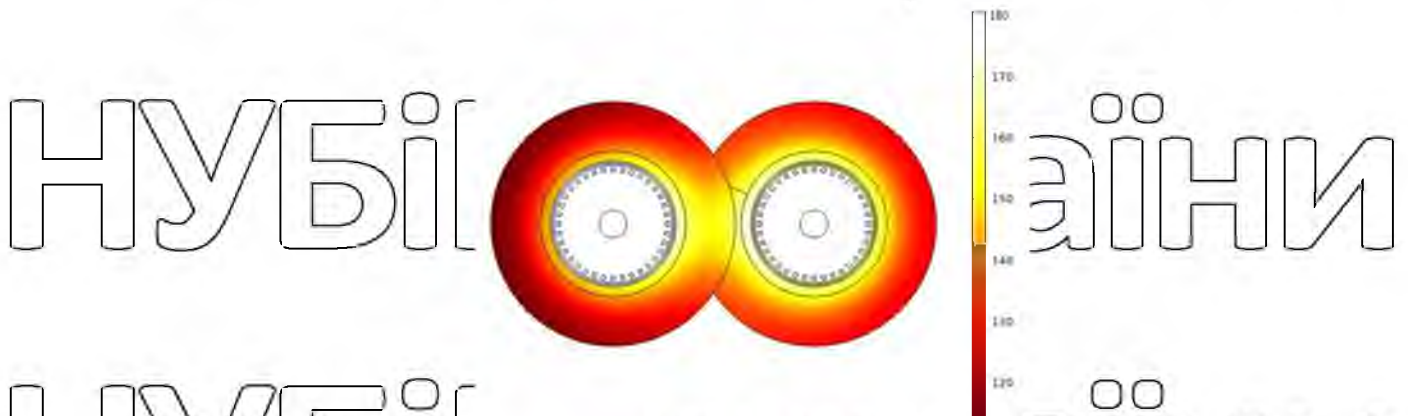


Рис. 4.20. Нагрів електромагнітних частин двошнекового електромеханічного гідролізера

В робочих зонах двошнекового електромеханічного гідролізера, які розташовані між рогорами-шнеками спостерігається значна (до 60°C) різниця



температур роторів в порівнянні з зонами, розташованими між щелеком і стінкою реакційної камери.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



## РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ І ГАРМОНІЙНОГО СКЛАДУ СТРУМІВ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

### 5.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Динаміка процесів в електромеханічному перетворювачі, безумовно, формується взаємним впливом ДМ і ТМ через загальний масивний ротор – вал.

Як інтегральна характеристика, що відбиває перехідні процеси, може бути прийнятий струм окремих модулів і загальний струм електромеханічного перетворювача.

Визначення миттєвих значень і гармонічного складу струму та напруги було здійснено на експериментальному зразку електричного шнекового агрегата для подрібнення і піролізу біомаси рослинних відходів. Конструктивні особливості електромагнітної системи шнекових електромеханічних перетворювачів, які застосовані в двошнековому електромеханічному гідролізері та електричному шнековому агрегаті для подрібнення і піролізу біомаси рослинних відходів, ідентичні.

На рис.5.1 представлена робоча камера електричного шнекового агрегата, а на рис.5.2 – схема підключення вимірювальних приладів.

Під час емпіричних досліджень використовувались вимірювальні прилади: цифровий USB-осциллограф Hantek 6254BC чотириканальний; Tenmars TM-191 Magnetic Field Meter, призначений для вимірювання електромагнітних полів наднизької частоти від 30 Гц до 300 Гц; Tenmars TM-190 Multi Field EMF Meter – пристрій для вимірювання високочастотних електромагнітних полів в діапазоні частот від 50 МГц до 3,5 ГГц і низькочастотних електричних і магнітних полів у частоті 50-60 Гц; інфрачервоний, оптичний пірометр BENETECH GM533A, діапазон вимірювання -50-530 °С, показник візування 12:1, коефіцієнт теплового випромінювання 0,1-1, спектр 5-14 мкм.



Рис. 5.1 Робоча камера електричного шнекового агрегата для подрібнення і пролізу біомаси рослинних відходів (верхня частина корпусу знята)

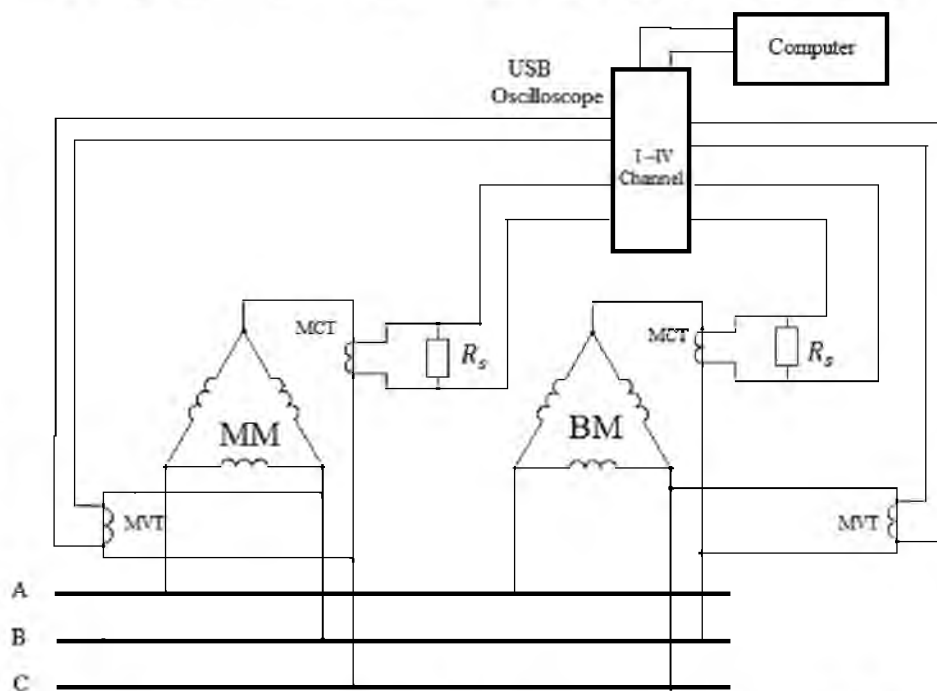


Рис. 5.2. Схема підключення вимірювальних приладів. MM, BM – статорні обмотки відповідно двигунового і гальмуючого модулів; MVT, MST – вимірювальні трансформатори напруги і струму

#### *Вимірювання частоти обертання*

Особливості конструкції не дозволяють застосовувати традиційні методи дослідження за допомогою тахометра, тому що конструкція електромеханічного

перетворювача герметична і не має вихідного кінця валу. Було використано датчик руху шнека, розташування якого показано на рис. 5.3

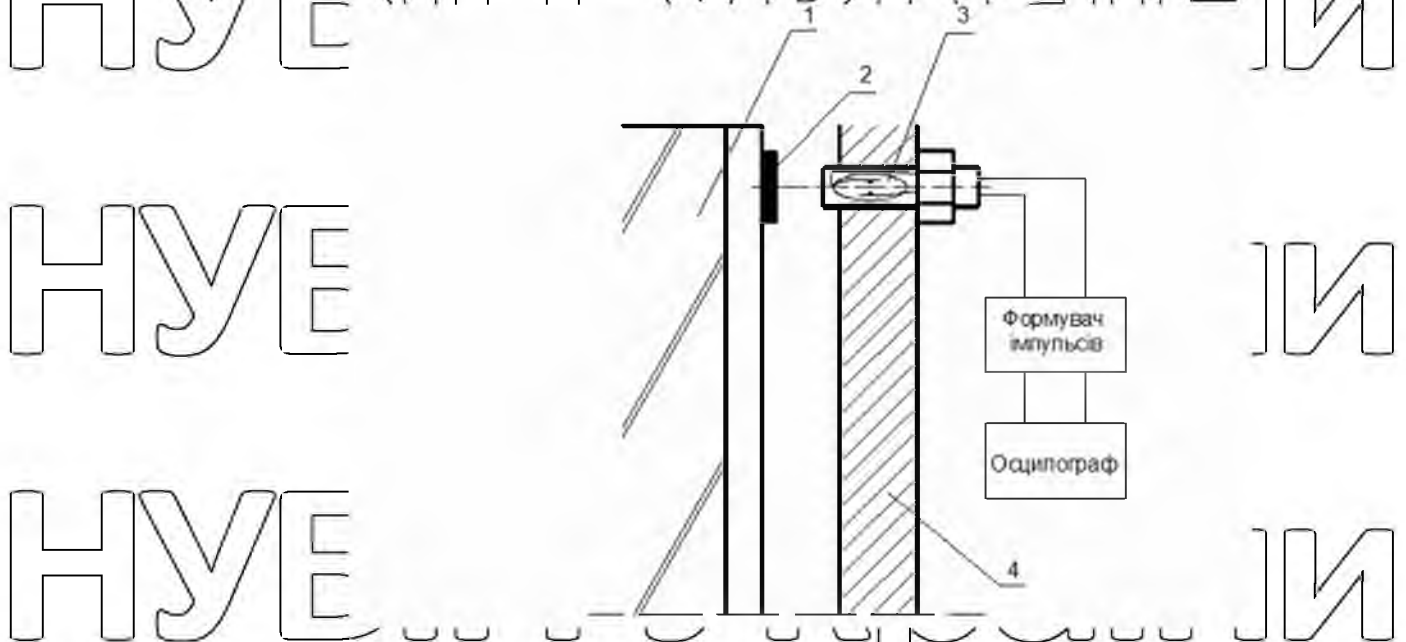


Рис. 5.3. Схема розташування датчика руху шнека: 1 – ротор; 2 – постійний магніт; 3 – герконовий датчик; 4 – корпус блока

Система імпульсного управління реверсом форсуванням електромеханічного перетворювача технологічного призначення, формує процес форсованого пуску в три етапи:

- одночасне, згідне (по обертового моменту) включення ДМ і ТМ з

подальшим розгоном ротора до певної швидкості;

- реверсування ТМ і переклад його в режим противключення;

- одночасна робота двох модулів з низькою частотою обертання ротора вихід на сталий режим.

## 5.2 Результати експериментальних досліджень динаміки струмів окремих модулів і загального струму електромеханічного перетворювача

На рис. 5.4 представлені осцилограми загального струму ЕТМП для двох варіантів пуску на холостому ході при різних початкових швидкостях обертання.

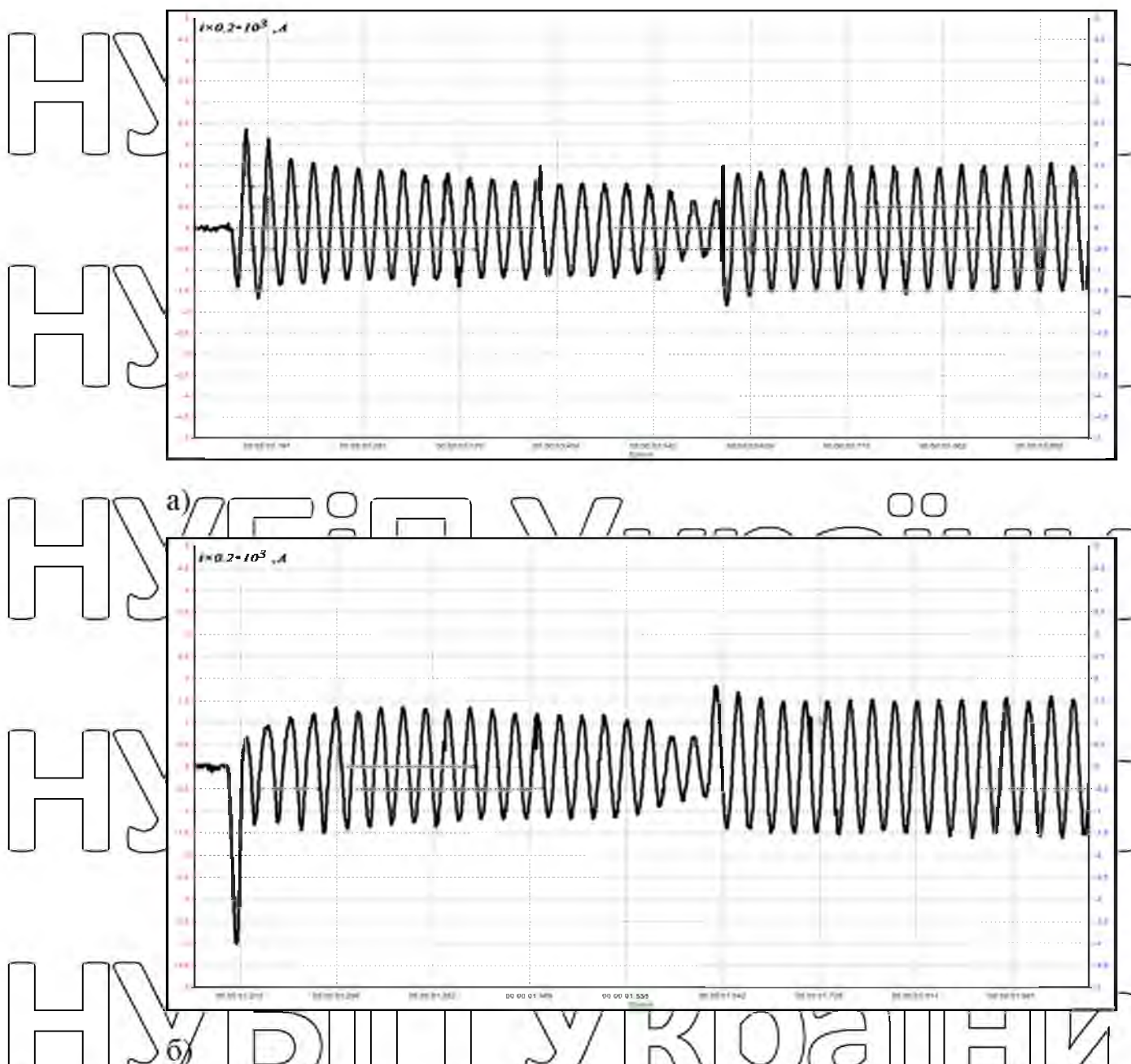


Рис.5.4. Осцилограми пуску електротепломеханічного перетворювача енергії при різних початкових швидкостях обертання а)  $\omega_{p0} = 0$ ; б)  $\omega_{p0} = 25$  рад/с.

На осцилограмах кожному із зазначених вище етапів пуску відповідає своя часовий пояс і характер зміни струму. Повна аналогія спостерігається лише щодо другого етапу (процес реверсу ТМ). Характерно, що процес відключення ТМ на цьому етапі не супроводжується кидком струму - зменшується лише амплітуда загального струму, оскільки напруга живлення надходить тільки на ДМ. Основна відмінність в характері перехідного процесу спостерігається на першому етапі (односпрямовані електромагнітні моменти ДМ і ТМ). При пуску



електротепломеханічного перетворювача зі стану спокою ми спостерігаємо типовий для асинхронних машин перехідний процес: початковий вишок (ударний струм) і аперіодический процес зниження амплітуди струму практично до квазіустановившегося значення. Тривалість процесу, що визначається малою електромагнітної постійної, становить не більше 0,4 с. Повторний пуск електротепломеханічного перетворювача при роторі з не загаслим магнітним полем супроводжується великим в 1,7 рази ударним струмом і зовсім іншим характером перехідного процесу: амплітуда струму протягом 0,08 с наростає, а потім зменшується з такою ж закономірністю, як в осцилограмме а).

Третій етап в осцилограмах різиться невеликим перевищенням амплітуд струму в осцилограмме б).

На рис. 5.5 показана осцилограма загального споживаного струму і початкові сигнали датчика руху ротора при пуску електротепломеханічного перетворювача. Кутова швидкість ротора в межах одного (першого) оберту ротора становить 24,8 рад/с, при цьому електромагнітний процес практично затримує в межах цього оберту.

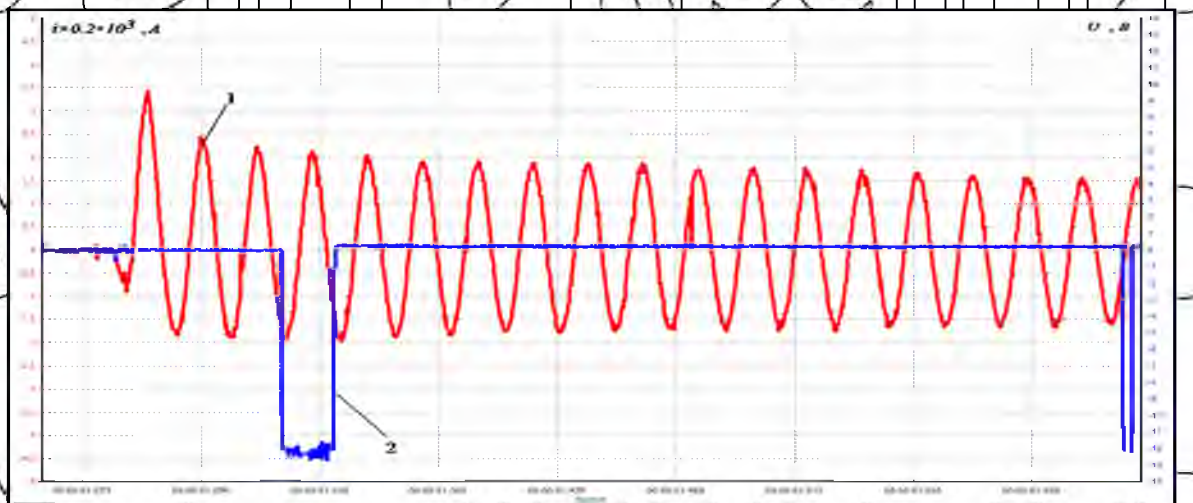


Рис 5.5 Осцилограма пуску електротепломеханічного перетворювача: 1 - крива загального струму; 2 - імпульси датчика руху

Як бачимо, обертання ротора і наявність незагаслого поля в момент пуску електротепломеханічного перетворювача формує помітну величину протидії ЕРС в обмотці статора і знижує значення споживаного струму. Необхідно

враховувати ще одну закономірність: перша полухвиля електромагнітного моменту при пуску асинхронного двигуна з обертовим ротором (на швидкості більше половини синхронної) має негативний знак, що є причиною ударного значення струму, деякого уповільнення ротора, що супроводжується збільшенням амплітуди струму.

Ковзання, при якому працює ТМ на третьому ділянці пуску становить  $(2 - s_D)$ , де  $s_D$  - ковзання ДМ. Оскільки частота обертання ротора при запуску з обертовим ротором до моменту настання третього етапу значно більше, ніж в разі пуску з нерухомим ротором, то значення струму ТМ і гальмівного моменту їм створюваного прохи вище. В результаті результуючий момент при фактично закінчився електромагнітному перехідному процесі визначається тільки електромеханічними і тепловими процесами:

$$M_{pi} = M_{Di} + M_{Ti} = \left[ (i'_{2D})^2 \cdot \frac{R'_{2D}}{s_D} - (i'_{2T})^2 \cdot \frac{R'_{2T}}{(2 - s_D)} \right] \cdot \frac{m \cdot p}{\omega_{pi}}$$

де  $i'_{2D}$ ,  $i'_{2T}$ ,  $R'_{2D}$ ,  $R'_{2T}$ ,  $R'_{2D}$ ,  $\omega_p$  - поточні значення наведеного струму і активного опору ротора відповідно ДМ і ТМ, а також значення кутової швидкості ротора;

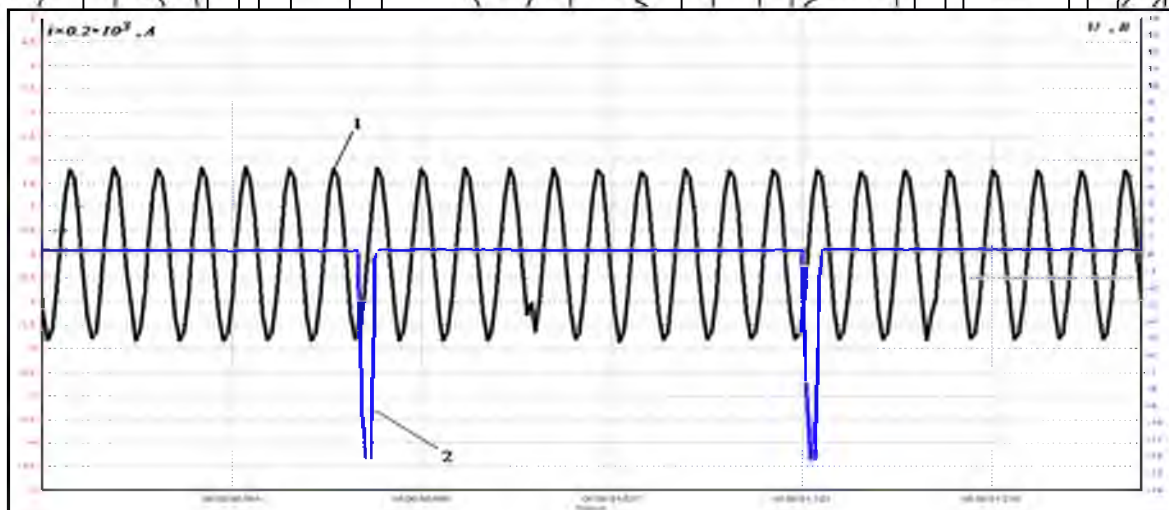
$M_{Di}$ ,  $M_{Ti}$  - поточні значення електромагнітних моментів ДМ і ГМ;

$m$ ,  $p$  - відповідно число фаз і число пар полюсів в модулях електротепломеханічного перетворювача. У загальному випадку ДМ і ГМ можуть мати різні значення  $m$  і  $p$ .

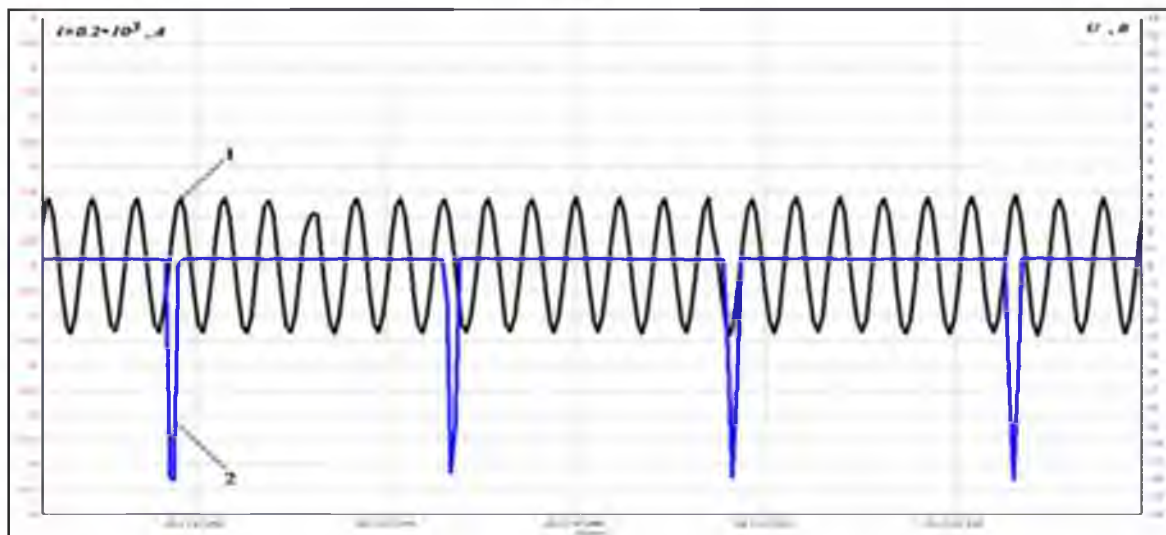
Перехідний процес зміни струму формується не тільки електромагнітними і електромеханічними процесами, що відбуваються в електротепломеханічного перетворювача в період пуску або впливу різкозмінних навантажень, але і температурними впливами на статор і масив ротора. Необхідно відзначити, що діапазон зміни температури ротора може становити  $(20 \dots 350)^\circ\text{C}$ , що істотно змінює величини електромагнітних параметрів електротепломеханічного перетворювача.

На рис.5.6 і рис.5.7 показані фрагменти осцилограм струмів і частоти обертання (імпульс з амплітудою 12 В відповідає одному обороту ротора),

знятих в період часу безпосередньо після пуску і після закінчення приблизно 12 хв роботи електротепломеханічного перетворювача на холостому ході.



а)



б)

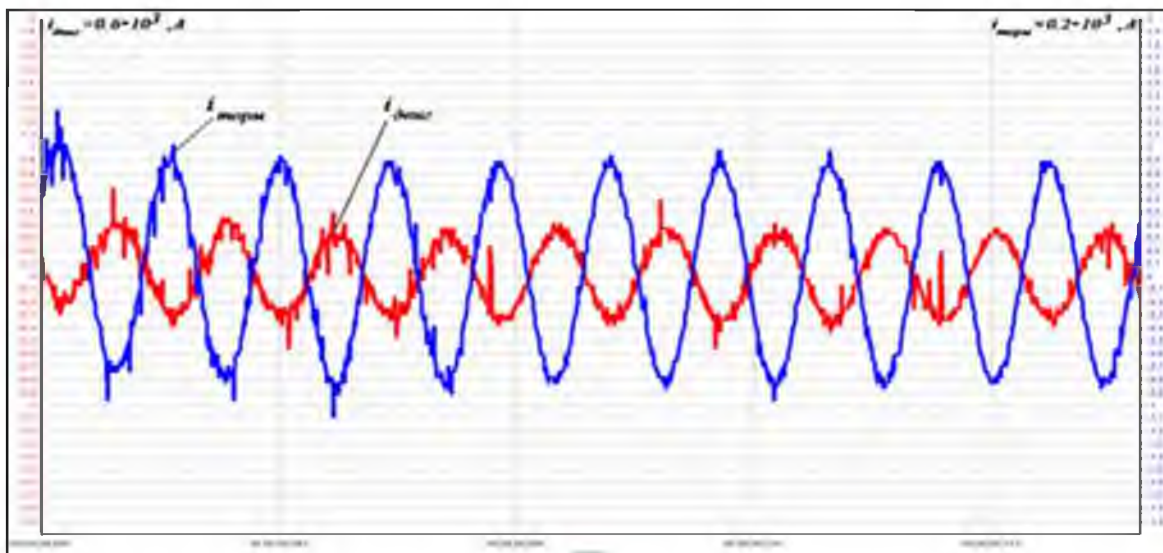
1 - крива струму; 2 - імпульс датчика руху.

Рис. 5.6. Осцилограми зміни загального струму і швидкості обертання а) в початковий момент після пуску, б) після закінчення 12 хв.

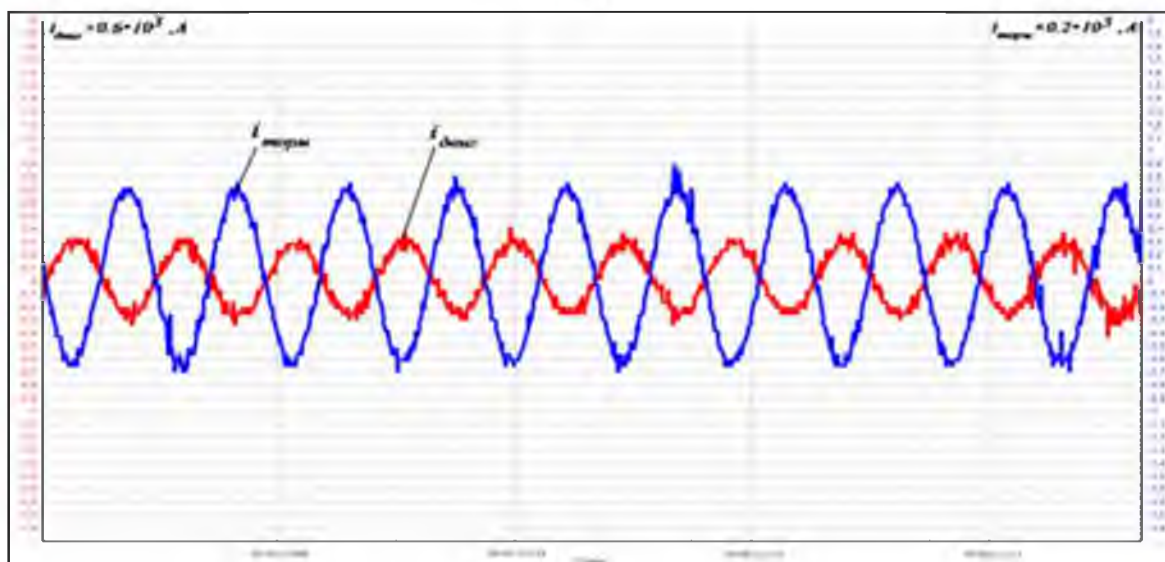
НУБІП України

НУБІП України





а)



б)

$i_{\text{ГМ}}$  – крива струму ГМ;  $i_{\text{ДМ}}$  – крива струму ДМ.

Рис. 5.7. Осцилограми зміни струмів окремих модулів

а) в початковий момент після пуску; б) після закінчення 13 хв.

Порівняльний аналіз зміни величини за цей проміжок часу дав наступні результати:

- зміна частоти обертання (збільшення) в 1,5 рази;
- зміна амплітуди струму ТМ (зниження) в 1,07 рази;
- зміна амплітуди струму ДМ (зниження) в 1,25 рази;
- зміна амплітуди загального струму ЕТМІ (зниження) в 1,34 рази.

### 5.3 Результати експериментальних досліджень гармонійного складу струмів електротепломеханічного перетворювача при нелінійних змінах навантажувально-охолоджуючого середовища

На рис. 5.8 – 5.11 представлені спектрограми напруги живлення і споживаного струму електротепломеханічного перетворювача.

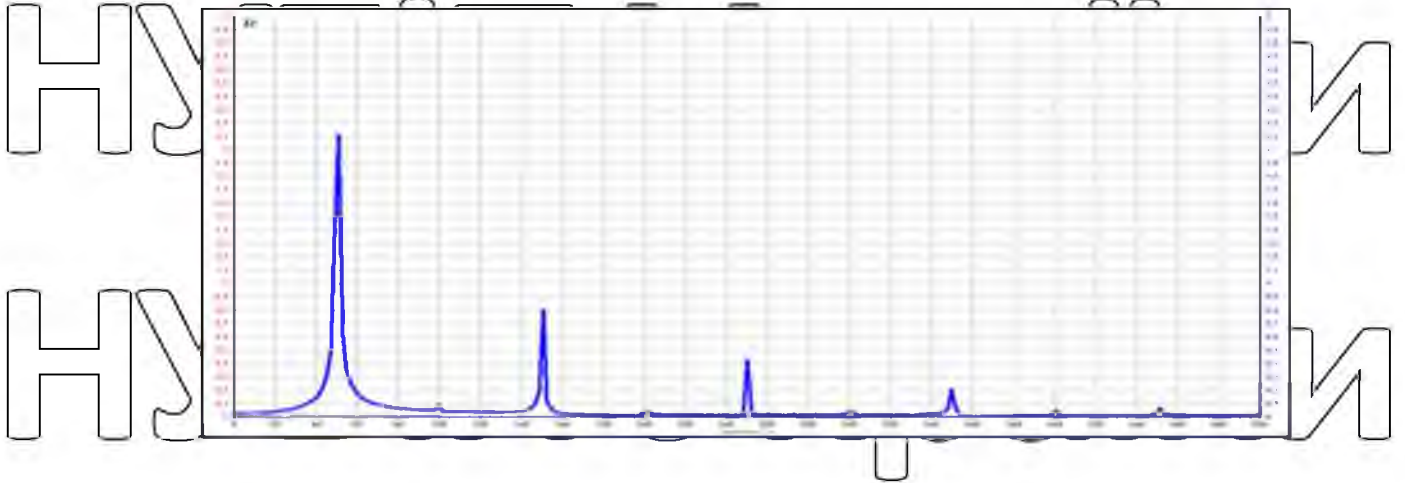


Рис. 5.8. Спектрограма напруги живлення електротепломеханічного перетворювача.

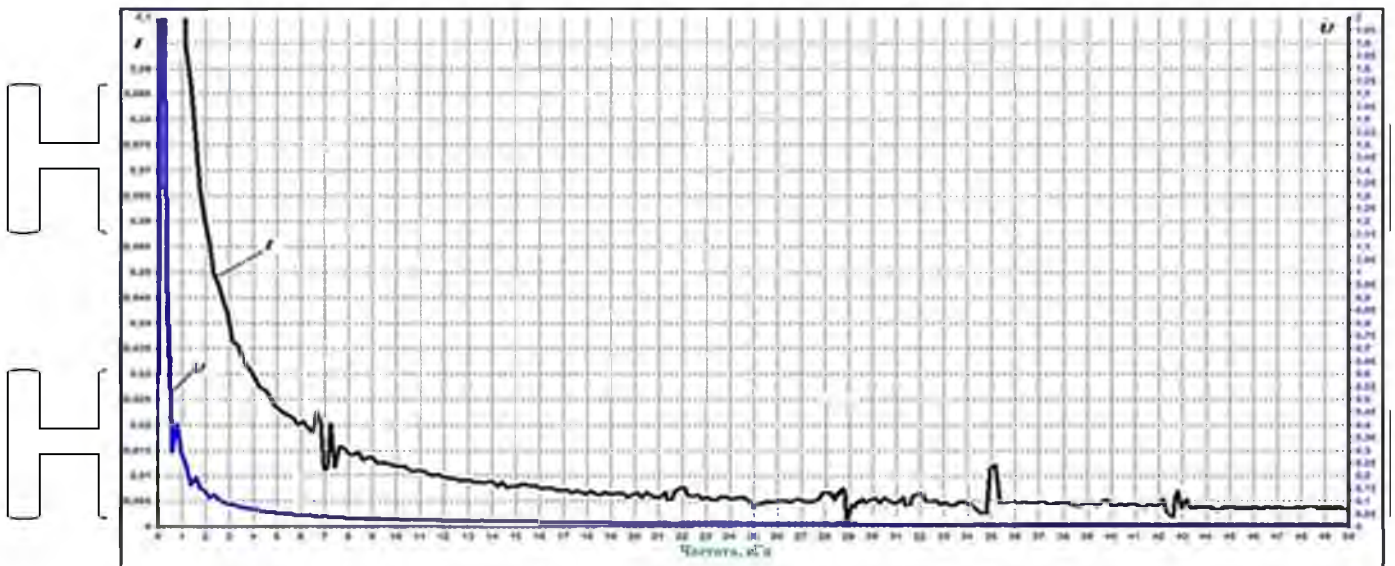


Рис. 5.9. Гармонічний склад струму та напруги в діапазоні до 50 кГц в режимі неробочого ходу цинка



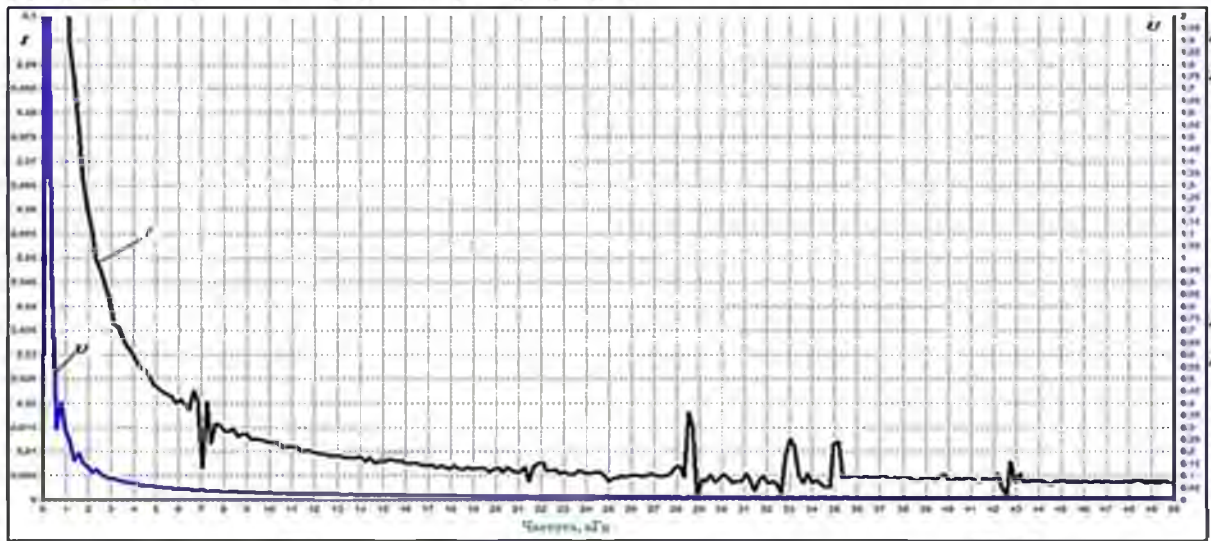


Рис.5.10. Гармонічний склад струму та напруги в діапазоні до 50 кГц для режиму поступового заповнення шнека

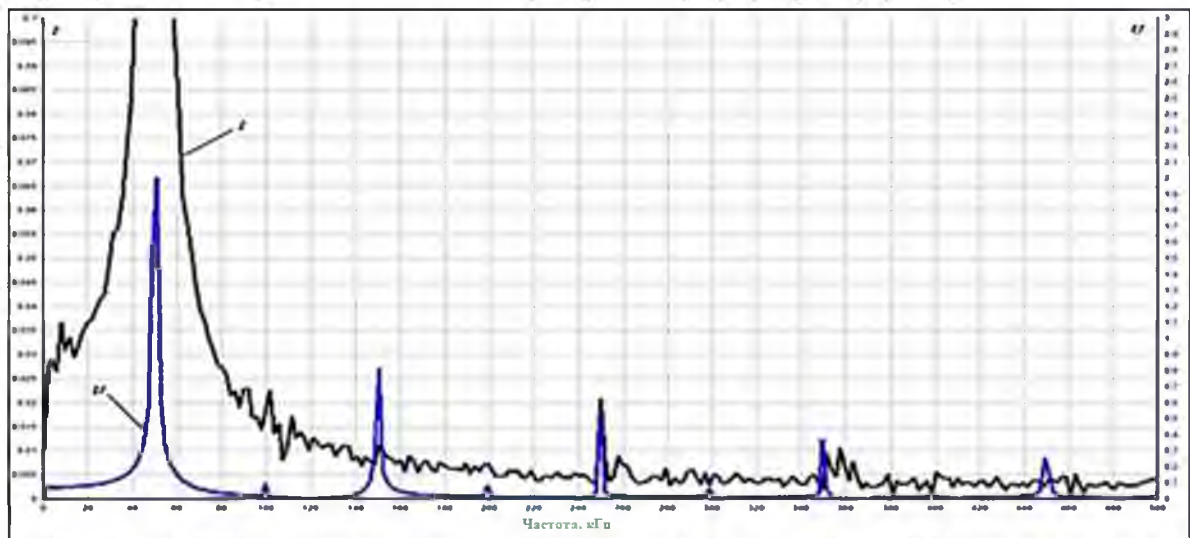


Рис.5.11. Гармонічний склад струму та напруги в діапазоні до 500 Гц для режиму поступового заповнення шнека

З порівняння спектрограм рис. 5.8 і рис.5.11 видно, що підключення електротепломеханічного перетворювача до мережі супроводжується посиленням амплітуди непарних гармонік напруги, крім першої та третьої, і тим більшою мірою, чим вище порядок гармоніки. Наприклад, посилення дев'ятої гармоніки напруги при включенні електротепломеханічного перетворювача досягає чотирикратного значення.

Аналізуючи спектрограми струмів (рис.5.9-5.11) можна відзначити, що вищі гармоніки в діапазоні частот (0 ... 500 Гц) менш виражені, ніж у спектрограмах напруги, проте все ж більш яскраво проявилися на частотах 101 Гц; 105 Гц; 145 Гц; 245 Гц; 375 Гц. У діапазоні від 0 до 50 кГц в спектрограмах струмів проявляються гармоніки наступних частот: 1 кГц; 7 кГц; 15 кГц; 17 кГц; 28,5 кГц; 33 кГц; 35 кГц; 43 кГц. Порівнюючи спектрограми струмів на рис.10 і рис.11 можна відмітити різницю в амплітудах і присутності певних гармонік для режиму неробочого ходу шнека та режиму поступового заповнення шнека. Особливо це проявляється на частотах 7 кГц; 28,5 кГц; 33 кГц; 35 кГц, що підтверджує наявність ефекту генерування вищих гармонік при зміні температури середовища, що оточує ротор-шнек.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ВИСНОВКИ

1. Суттєвими недоліками існуючих способів і конструкцій переробки кератинової сировини є відсутність регулювання параметрів і продуктивності процесу гідролізу при зміні властивостей сировини, низька енергоефективність через невикористання дисипативної складової електромеханічної частини установки, що суттєво знижує її ККД, обумовлює значні габарити та високу енергозатратність, втрата якості одержуваного продукту внаслідок окислення сировини.
2. Виконано аналіз принципів формування електромагнітних і теплових характеристик електромеханічних перетворювачів для застосування в двошнековому електромеханічному гідролізері. За основу прийняті принципи саморегуляції при розділенні на складові корисної потужності та принципи безредукторного забезпечення малої частоти обертання і кратного посилення обертаючого моменту.
3. Визначені розрахункові моделі основних вузлів конструктивно-технологічної схеми двошнекового електромеханічного гідролізера для аналізу взаємодії електромеханічної системи і сировини, що переробляється.
4. Теоретично обґрунтовано ефект появи вищих гармонік в електротепломеханічному перетворювачі при нелінійній зміні температури навантажувально-охолоджуючого середовища. Встановлено, що спостерігається перехідний процес у початковий період часу з подальшим встановленням синусоїдальної зміни температури ротора, яке, в свою чергу, викликає пульсації питомого активного опору і магнітної проникності матеріалу ротора. Вплив температури на характер електромагнітних процесів прослідковується на прикладі проникнення хвилі електромагнітного поля в масивне електропровідне тіло.
5. Виконано математичне моделювання і аналіз електромагнітних і теплових характеристик двошнекового електромеханічного гідролізера.



встановлено, що за малих значень кутової швидкості підтримується задовільне значення електромагнітного моменту, що забезпечує можливість підтримання ефективного технологічного процесу за прийнятої геометрії та параметрів електромагнітної системи двошнекового електромеханічного гідролізера. В робочих зонах двошнекового електромеханічного гідролізера, які розташовані між роторами-шнеками спостерігається значна (до 60°C) різниця температур роторів в порівнянні з зонами, розташованими між шнеком і стінкою реакційної камери.

6. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що відключення електротепломеханічного перетворювача до мережі супроводжується посиленням амплітуди негармонічних гармонік напруги, крім першої та третьої, і тим більшою мірою, чим вище порядок гармоніки.

Наприклад, посилення дев'ятої гармоніки напруги при включенні електротепломеханічного перетворювача досягає чотирикратного значення.

7. Аналізуючи спектрограми струмів можна відзначити, що вищі гармоніки в діапазоні частот (0 ... 500 Гц) менш виражені, ніж у спектрограмах напруги, проте все ж більш яскраво проявилися на частотах 101 Гц; 105 Гц; 145 Гц; 245 Гц; 375 Гц. У діапазоні від 0 до 50 кГц в спектрограмах струмів проявляються гармоніки наступних частот: 1 кГц; 7 кГц; 15 кГц; 17 кГц; 28,5 кГц; 33 кГц; 35 кГц; 43 кГц.

НУБІП України

НУБІП України

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. T. Luo, S. Hao, X. Chen, J. Wang, Q. Yang, Y. Wang, Y. Weng, H. Wei, J. Zhou, B. Wang, "Development and assessment of keratine nanoparticles for use as a hemostatic agent", *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, Vol. 63, pp. 352-358, 2016.

doi:10.1016/j.msec.2016.03.007

2. M. Arshad, M. A. Khosa, T. Siddique, A. Ullah, "Modified biopolymers as sorbents for the removal of naphthenic acids from oil sands process affected water (OSPW)", *Chemosphere*, Vol. 163, pp. 334-341, 2016.

doi:10.1016/j.chemosphere.2016.08.015

3. A. Nurdawati, B. Nakhshinev, I. Nuran Zaini, N. Saidov, F. Takahashi, K. Yoshikawa, "Characterization of potential liquid fertilizers obtained by hydrothermal treatment of chicken feathers", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 37(1), pp. 375-382, 2018. doi:10.1002/ep.12688

4. B. Wang, W. Yang, J. McKittrick, M. A. Meyers, "Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration", *Progress in Materials Science*, Vol. 76, pp. 229-318, 2016.

doi:10.1016/j.pmatsci.2015.06.001

5. S. Sharma, A. Kumar, "Keratin as a Protein Biopolymer: Extraction from Waste Biomass and Applications", Springer, 2019. doi:10.1007/978-3-030-02901-2

6. M. M. Mazlan, R. A. Talib, N. F. Mail, F. S. Taip, N. L. Chin, R. Sulaiman, R. Shukri, M. Z. Mohd Nor, "Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss", *International Journal of Food Properties*, Vol. 22, pp. 54-70, 2019. doi:10.1080/10942912.2019.1568458

7. P. Singha, K. Muthukumarappan, "Effects of processing conditions on the system parameters during single screw extrusion of blend containing apple pomace", *The Journal of Food Process Engineering*, Vol. 40(4), pp. 1-11, 2016.

doi:10.1111/jfpe.12513

8. C. Feng, Z. Li, Z. Wang, B. Wang, Z. Wang, "Optimizing torque rheometry parameters for assessing the rheological characteristics and extrusion processability of

wood plastic composites”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 32(1), pp. 123–140, 2019. doi:10.1177/0892705717744828

9. J. Vanoverschelde, V. Vanoverschelde, “Method for preparing digestible feather or hair meal”, European Patent Office Patent EP3262952A1, Jan. 3, 2018

10. Спосіб виготовлення кормової білкової добавки з відходів сировини тваринного походження та пристрій для здійснення способу. Патент 61868, A23K1/10, A23J1/10, A23N17/00, B29C47/38, заявник і патентовласник ТОВ “ТЕХНОЦЕНТР ТЕХАГРО-РЕСУРС”. - № 2003065404, заявл. 10.06.2003, опубл. 17.11.2003, Бюл. №11.]

11. X. Shi, F. Ronsse, J. Roegiers, J. G. Pieters, “3D Eulerian-Eulerian modeling of a screw reactor for biomass thermochemical conversion. Part 1: Solids flow dynamics and back-mixing”, *Renewable Energy*, Vol. 143, pp. 1465-1476, 2019. doi:10.1016/j.renene.2019.05.098

12. S. Jalalifar, R. Abbassi, V. Garaniya, F. Salehi, S. Papari, K. Hawboldt, V. Strezov, “CFD analysis of fast pyrolysis process in a pilot-scale auger reactor”, *Fuel*, Vol. 273, 2020. doi:10.1016/j.fuel.2020.117782

13. V. Bulgakov, I. Sevostianov, G. Kaletnik, I. Babyn, S. Ivanovs, I. Holovach, Y. Ihnatiev, “Theoretical Studies of the Vibration Process of the Dryer for Waste of Food”, *Rural Sustainability Research*, Vol. 44, pp. 32-45, 2020. doi:10.2478/plua-2020-0015

14. T. Tupolskikh, N. Gucheva, O. Kirishiev, “Simulation of the process of movement of bulk material in a vibrating conveyor-mixer”, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 224, 2018. doi:10.1051/mateconf/201822405021

15. A. N. Yatsunov, A. V. Chernyakov, V. S. Koval, A. P. Shevchenko, A. V. Evchenko, M. A. Begunov, “The effect of particle motion on mixing intensity in a vibrating mixer”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, Vol. 659, 2021. doi:10.1088/1755-1315/659/1/012042

16. V. Ivanov, J. Trojanowska, J. Machado, O. Liaposhchenko, J. Zajac, J. Trojanowska, M. Edl, D. Perakovic, “Advances in Design, Simulation and Manufacturing II”, *2nd International Conference on Design, Simulation,*

*Manufacturing: The Innovation Exchange*, DSMIE-2019, June 11-14, 2019, Lutsk, Ukraine, 2019. doi:10.1007/978-3-030-22365-6

17. G. Fülöp, A. Domokos, D. Galata, E. Szabó, M. Gyürkés, B. Szabó, A. Farkas, L. Madarász, B. Démuth, T. Lendér, T. Nagy, D. Kovács-Kiss, F. Van der Gucht, G. Marosi, Z.K. Nagy, “Integrated twin-screw wet granulation, continuous vibrational fluid drying and milling. A fully continuous powder to granule line”, *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 594, 2021. doi:10.1016/j.ijpharm.2020.120126

18. F. Qi, M. M. Wright, “A DEM modeling of biomass fast pyrolysis in a double auger reactor”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 150(2), 2020. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119308

19. A. Funke, R. Grandl, M. Ernst, N. Dahmen, “Modelling and improvement of heat transfer coefficient in auger type reactors for fast pyrolysis application”, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Vol. 130, pp. 67–75, 2018. doi:10.1016/j.ccep.2018.05.023

20. Bjelić, S.; Marković, N.; Jakšić, U. The simplified procedure for calculation of influence of thermal losses on decrease of technical endurance of electric equipment. // 3. Conference on Industrial Energy and Environmental Protection IIEEP'11, Book of abstracts page. 28, (2011), 21-25. <http://www.drustvo-termicara.com/resources/files/9981fff6.pdf>

21. Zhang, S. B., Zheng, X. W., Feng, L. L., Wang, Y. F., & Liu, Z. F. (2016). The design and experimental research of cooling structure in deep well submersible motor. *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, 19(3), 837-848.

22. Zou, J., Qi, W., Xu, Y., Xu, F., Li, Y., & Li, J. (2012). Design of deep sea oil-filled brushless DC motors considering the high pressure effect. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(11), 4220-4223.

23. Xiao, L., Yu, G., Zou, J., Xu, Y., & Liang, W. (2019). Experimental analysis of magnetic properties of electrical steel sheets under temperature and pressure

coupling environment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 475, 282–289

24. Boehm A, Hahn I (2014) Measurement of magnetic properties of steel at high temperatures. In: 40th Annu Conf Ind Electron Soc (IECON), IEEE, pp 715–721 <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7048579>

25. Yao, A., Odawara, S., & Fujisaki, K. (2018). Iron loss and hysteretic properties under PWM inverter excitation at high ambient temperatures. *IEEE Journal of Industry Applications*, 7(4), 298–304

26. Патент України на винахід № 125774. МПК А23К 10/26 (2016.01). Спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини. / Заблодський М.М., Марченко О. А., Ковальчук С. І., Радько І.П. Національний університет біоресурсів і природокористування України заявл. 05.11.2020 р., опубл. 01.06.2022, бюл. № 22.

27. Патент України на корисну модель №147388. Електрична шнекова установка для виготовлення протеїнової кормової добавки з пухо-перової сировини/ Заблодський М. М.; Марченко О.А.;Ковальчук С.І;Радько І.П. Опубл. 05.05.2021, бюл. № 18/2021.

28. Subramanian, R. S. (2014). Conduction in the Cylindrical Geometry. Online). ([web2.clarkson.edu](http://web2.clarkson.edu)).

29. Turovsky J. *Technical Electrodynamics*. - M.: Energy, 1974. - 488 p..

30. Kuvaldin A. B. *Induction heating of steel*. - Energoatomizdat, 1988. - 200p.

31. AC/DC Module User's Guide, COMSOL Inc., Burlington, MA, USA, 2018

32. N. Zablodsky, R. Chuenko, V. Gritsyuk, S. Kovalchuk, O. Romanenko, “The Numerical Analysis of Electromechanical Characteristics of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyzer”, 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, 2021. doi:10.1109/acit52158.2021.9548392

33. S. Kovalchuk, N. Zablodskiy, A. Zhylytsov, R. Chuenko, V. Gritsyuk, “The numerical analysis of thermal processes in a twin-screw electromechanical



hydrolyser for poultry by-products processing”, Electrotechnis and Computer Systems, Vol. 34(110), pp. 96-103. doi:10.15276/eltacs.34.110.2021.10

34. Колодязь А.С. Заблудський М.М. Дослідження електромагнітних і теплових характеристик двошнекового електромеханічного гідролізера при переробці пухо-пір'яної сировини // Тези доповідей 76-а науково-практичної конференції студентів «Енергозабезпечення електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», НУБІП України, м.Київ, 37. 20 квітня 2023 р.-С.24

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України