

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Автоматизація розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора
електромеханічного перетворювача
(тема)

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

Малишев М.О.
(прізвище, ініціали)

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

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

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

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

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2022 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____

(підпис)

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Малишеву Максиму Олексійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Автоматизація розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача
Затверджена наказом по університету від _____ 07.11.2022 №1463 Ст _____
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 20.12.2022 р.
3. Вихідні дані до роботи _____ Потужність 2 кВт, синхронна частота обертання 3000 об/хв., номінальна напруга живлення 380 В.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____ Аналіз технічного завдання; Вступ; Огляд існуючих технологій виготовлення водовугільного палива; Розробка алгоритму розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача; Аналіз результатів кінцево-елементного розрахунку активного хвильового опору; Дослідження електромеханічного перетворювача з конденсаторами та шестифазною обмоткою; Заходи з безпечної експлуатації електромеханічного перетворювача для технології гідрогенізації вугільного палива; Висновки.

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

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|----|---|--------------------------------|----------|
| 1 | Аналіз технічного завдання, вступ | 23.05.22 | Виконав |
| 2 | Огляд існуючих технологій виготовлення водовугільного палива | 12.09.22 | Виконав |
| 3 | Розробка алгоритму розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача | 30.09.22 | Виконав |
| 4 | Аналіз результатів кінцево-елементного розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача | 31.10.22 | Виконав |
| 5 | Дослідження електромеханічного перетворювача з конденсаторами та шестифазною обмоткою | 21.11.22 | Виконав |
| 6 | Оформлення пояснювальної записки | 08.12.22 | Виконав |
| 7 | Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk | 17.12.22 | Виконав |
| 8 | Подання роботи на рецензію | 18.12.22 | Виконав |
| 9 | Подання роботи на підпис зав. кафедри | 19.12.22 | Виконав |
| 10 | Подання роботи до ЕК | 20.12.22 | Виконав |

Дата видачі завдання 20.05.2022 р.

Студент _____
(підпис)

Малишев М.О.

Керівник роботи _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 64 с., 2 табл., 41 рис., 2 дод., 26 джерел.

АКТИВНИЙ ОПІР, ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК, ПОРОЖНИСТИЙ РОТОР, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

Об'єкт дослідження – електромеханічний перетворювач з порожнистим ротором для технології гідрогенізації вугільного палива.

Предмет дослідження – алгоритм розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка та реалізація алгоритму розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

– проведено огляд існуючих технологій виготовлення водовугільного палива;

– розроблено алгоритм розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача для технології гідрогенізації вугільного палива;

– отримано та проаналізовано результати кінцево-елементного розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача;

– наведено заходи з безпечної експлуатації електромеханічного перетворювача для технології гідрогенізації вугільного палива.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані на міжнародній конференції.

ABSTRACT

Explanatory note: 64 pp., 2 tabl., 41 figs., 2 app., 26 sources.

ACTIVE RESISTANCE, NUMERICAL CALCULATION, HOLLOW ROTOR, ELECTROMECHANICAL CONVERTER, MATHEMATICAL MODEL.

The research object is an electromechanical converter with a hollow rotor for the technology of coal fuel hydrogenation.

The research subject is an algorithm for calculating the active wave resistance of a hollow rotor of the electromechanical converter.

The purpose of the qualification work is the development and implementation of an algorithm for calculating the active wave resistance of the electromechanical converter's hollow rotor.

To achieve the goals set, the following tasks were solved:

- a review of existing technologies for the manufacture of water-coal fuel was carried out;
- an algorithm for calculating the active wave resistance of the electromechanical converter's hollow rotor for the technology of coal fuel hydrogenation has been developed;
- the finite element calculation results of the active wave resistance of the electromechanical converter's hollow rotor are obtained and analysed;
- measures for the safe operation of the electromechanical converter for the technology of coal fuel hydrogenation are given.

The qualification work results were tested at an international conference.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Перелік скорочень | 7 |
| Вступ..... | 8 |
| 1 Огляд існуючих технологій..... | 11 |
| 1.1 Існуючі технології виготовлення водовугільного палива | 11 |
| 1.1.1 Використання млинів для приготування ВВП..... | 14 |
| 1.1.2 Приготування ВВП в гідродударній установці мокрого помелу..... | 18 |
| 1.1.3 Приготування ВВП за допомогою кавітаційних технологій..... | 21 |
| 1.2 Поліфункціональний електромеханічний перетворювач з порожнистим ротором..... | 22 |
| 1.3 Висновки до розділу 1..... | 24 |
| 2 Результати розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача | 24 |
| 2.1 Визначення активного хвильового опору | 24 |
| 2.2 Дослідження перетворювача з порожнистим ротором зі звичайною обмоткою статора | 30 |
| 2.3 Дослідження перетворювача з порожнистим ротором із компенсованою обмоткою | 39 |
| 2.4 Висновки до розділу 2..... | 49 |
| 3 Дослідження електромеханічного перетворювача з конденсаторами та шестифазною обмоткою | 47 |
| 3.1 Моделювання роботи електромеханічного перетворювача..... | 47 |
| 3.2 Порівняння результатів досліджень | 53 |
| 3.3 Заходи з безпечної експлуатації електромеханічного перетворювача для технології гідрогенізації вугільного палива | 55 |
| 3.4 Висновки до розділу 3..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Висновки | 60 |
| Перелік джерел посилання | 61 |
| Додаток А Демонстраційний матеріал..... | 65 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВВП – водовугільне паливо;

ВВС – водовугільна суспензія;

ВС – вихрові струми;

ГУУМП – гідрударна установка мокрого помелу;

ДМП – дезінтегратор мокрого помелу;

ЕМП – електромеханічний перетворювач;

КАД – конденсаторний асинхронний двигун;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МКЕ – метод кінцевих елементів;

ППР – порожнистий перфорований ротор;

РІА – роторно-імпульсний апарат;

СКЕ – сітка кінцевих елементів.

ВСТУП

Наприкінці минулого століття світова енергетична криза, пов'язана зі скінченням ери дешевої нафти, прийняла гострий характер. За оцінками експертів на даний момент вже витрачено близько 87 % світових запасів нафти, 73 % природного газу та 2 % запасів вугілля. Це стосується енергетичних ресурсів, що доступні для сучасних технологій їх видобутку. Одночасно розпочалася інтенсивна розробка технологій, що дозволяють використовувати альтернативні джерела енергії: сонячну енергію, енергію морських припливів, вітру тощо. Однак, незважаючи на значний прогрес в цій області останнім часом, реально за оцінками експертів, найближчі 30–40 років, основним енергетичним ресурсом залишатиметься вугілля.

Серед нових вугільних технологій великий інтерес представляє технологія водовугільного палива (ВВП), яка виникла з появою гідротранспорту вугілля в 50–60 рр. минулого сторіччя. Необхідність спалювання вологого вугільного дріб'язку привела до розробки водовугільних суспензій (ВВС) і методів їх спалювання. Подальше вдосконалення технології поліпшення реологічних характеристик ВВС і його стабільності шляхом використання результатів досліджень в області вуглекімії та розробка присадок привело до створення ВВП.

За фізичними властивостями ВВП близьке до мазуту, що використовується на котельнях, тому воно може бути використано для вироблення тепла і електрики на газомазутних і вугільних ТЕС аналогічно газу і мазуту. ВВП призначене для їх заміни, а також для поліпшення екологічної обстановки в місцях роботи промислових та побутових котелень на вугіллі чи мазуті.

Фізико-хімічні властивості ВВП дозволяють досягти ефективності спалювання палива не нижче 98 %. Завдяки високій ефективності спалювання ВВП собівартість 1 Гкал тепла, отриманого при його спалюванні, на 15–20 %

нижче вартості 1 Гкал тепла, отриманого при спалюванні вихідного вугілля (при шаровому спалюванні).

У сформованих умовах стає очевидним перспективність науково-технічних розробок зі створення нових технологій приготування ВВП. У зв'язку з цим були створені пристрої різних конструкцій, із використанням різних способів приготування ВВП. При проектуванні цих пристроїв були залучені вже існуючі, стандартні вузли й механізми (дробарки лопатні, роторні мішалки, насоси, приводні двигуни). Таким чином, на отримання одного виду продукції спрямовано великі ресурси виробництва. Постає проблема створення такого електромеханічного пристрою, який би дав змогу поєднати вказані операції в одному модулі.

У цій ситуації розумною альтернативою традиційним нагрівальним комплексам є електричні комплекси на базі електромеханічних перетворювачів (ЕМП) технологічного призначення, які передбачають ефективне використання дисипативної складової енергії, структурну, функціональну та теплову інтеграцію. Загальний ККД ЕМП досить високий, що забезпечує ефективну реалізацію принципів енергоресурсозбереження. Створення ЕМП і технологій на їх основі базується на ідеї поєднання в одному електромеханічному пристрої одночасно нагрівальних, транспортуючих, перемішувальних функцій, інтеграції теплової енергії. У ЕМП використовується конструкція порожнистого феромагнітного ротора, який одночасно виконує функції ротора асинхронного двигуна, нагрівача, виконавчого механізму та кавітаційного апарату. При цьому ротор охолоджується сировиною, що переробляється.

Істотними перевагами технологій на основі ЕМП є не тільки високий ККД, але і значне скорочення виробничої площі, кількості одиниць обладнання та терміну його окупності, компактність і мобільність агрегатів, відсутність шкідливих викидів в атмосферу.

Об'єкт дослідження – електромеханічний перетворювач з порожнистим ротором для технології гідрогенізації вугільного палива.

Предмет дослідження – алгоритм розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка та реалізація алгоритму розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести огляд існуючих технологій виготовлення водовугільного палива;
- розробити алгоритм розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача для технології гідрогенізації вугільного палива;
- отримати та проаналізувати результати кінцево-елементного розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача;
- навести заходи з безпечної експлуатації електромеханічного перетворювача для технології гідрогенізації вугільного палива.

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

стандартних дробарках (молоткових, щоківі тощо). Якщо в якості сировини для приготування ВВП використовується вугільний шлам чи вугілля з фракціями штиб, насіннячко, то дана стадія виключається із загальної лінії приготування ВВП.

Помел до фінальної фракції (менше 100...150 мкм) здійснюється вже в присутності води в обладнанні мокрого помелу (друга стадія). Даний етап є ключовим при приготуванні ВВП, оскільки визначає подальші характеристики ВВП (гранулометричний склад, в'язкість, стабільність тощо). Виділяють 3 основних способи помелу: на млинах, гідроударний і кавітаційний.

Третя стадія (гомогенізація) необхідна для додання ВВП гомогенних властивостей. Під стабільністю властивостей ВВП мається на увазі сталість в'язкості, гранулометричного складу та концентрації твердих частинок в процесі зберігання. У ряді випадків на даній стадії до складу ВВП можуть бути внесені додаткові добавки, в тому числі пластифікатори і стабілізатори.

Багатьох недоліків, головний з яких – необхідність використання дорогих добавок, дозволяє уникнути нова технологія приготування водовугільної суспензії на основі кавітаційної обробки.

Кавітація – це процес утворення в краплинній рідині порожнин, заповнених газом, паром або їх сумішшю (так званих кавітаційних бульбашок, або каверн). Кавітаційні бульбашки утворюються в тих місцях, де тиск в рідині стає нижче деякого критичного значення (в реальному рідині приблизно дорівнює тиску насиченої пари цієї рідини при даній температурі). Якщо зниження тиску відбувається внаслідок великих місцевих швидкостей в потоці рухомої краплинної рідини, то кавітація називають гідродинамічної, а якщо внаслідок проходження акустичних хвиль – акустичною.

Кавітаційне ВВП є штучним видом композиційного палива з вугілля та води без участі будь-яких пластифікаторів. В основі процесу його

приготування лежать: кавітаційні подрібнення вугілля у водному середовищі; кавітаційна деструкція молекул вугілля; кавітаційна активація частинок вугілля; кавітаційна гомогенізація тощо, в процесі протікання яких порушується структура вугілля як природної гірської маси. Вугілля розпадається на окремі органічні складові, але вже з активною поверхнею частинок і великою кількістю вільних органічних радикалів.

Вихідна вода також зазнає перетворень, в результаті кавітаційного впливу утворюється чотири головні продукту: атомарний водень Н; гідроксильний радикал-ОН; перекис водню H_2O_2 ; і вода в збудженому стані H_2O^* , хімічна активність яких сприяє утворенню активного дисперсного середовища.

На даний час для кавітаційної обробки ВВП використовується кавітаційний генератор РІА (роторно-імпульсний апарат). РІА призначений для обробки рідин, паст і суспензій. Основна функція РІА – гомогенізація рідини, емульсії або суспензії, що проходять через нього. Вода, що пройшла через РІА, змінює свою структуру в бік підвищення енергетичного рівня, тобто активується (ефект зберігається до 2...3 днів).

1.1.1 Використання млинів для приготування ВВП

Еволюція традиційного обладнання для помелу вугілля простежується послідовно від барабанних до кульових млинів і далі до вібраційних. Перші два види млинів випускаються промисловістю і сьогодні, але сучасна оцінка їх ефективності представляється низькою.

Шляхом дозованої подачі, через конвеєр початкове вугілля подається на дробарку, де проводиться попереднє дроблення. Подрібнений до фракції кілька міліметрів вугілля подається через конвеєри та елеватор для подальшого помелу в млин мокрого помелу. Подача води і перекачування ВВП здійснюється насосами.

Для мокрого помелу найчастіше використовувалися вібрмлини різних конструкцій. В якості тіл, що мелють у вібрмлині використовуються кулі діаметром 20...50 мм. Вибір діаметру куль визначає грансклад ВВП на виході млина.

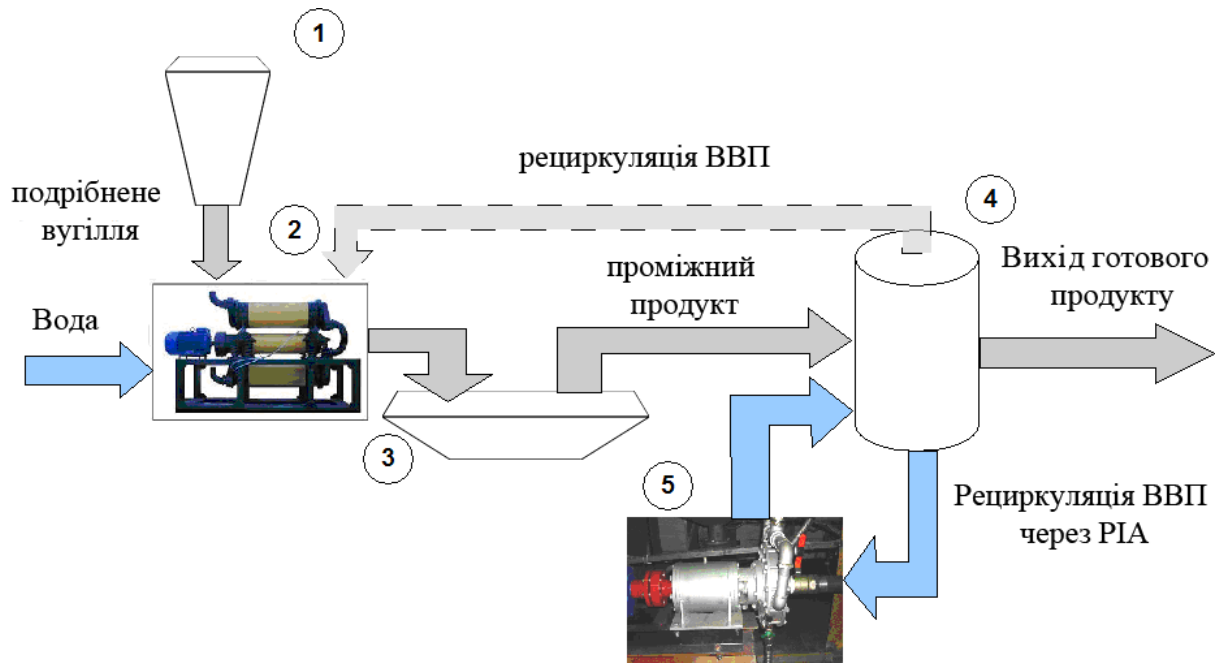
Істотним недоліком даної схеми є нестабільний грансклад водовугільної суспензії на виході з вібрмлина. Це потребує організації закритого циклу приготування суспензії, тобто рециркуляції ВВП з проміжної ємності назад у млин.

У ряді випадків на стадії мокрого помелу до складу ВВП можуть бути включені різні добавки, необхідні для збільшення статичної стабільності ВВП, зниження в'язкості та інше. Все це в сукупності ускладнює технологічний процес і збільшує собівартість ВВП.

ЗАТ Амальтея були проведені експерименти по застосуванню кавітаційної обробки ВВП для надання йому гомогенних властивостей. Були розроблені дві схеми застосування кавітатора РІА в схемі приготування ВВП.

В розглянутому варіанті РІА був використаний як пристрій, що гомогенізує ВВП, накопичене у проміжній ємності. Другою функцією РІА була корекція гранскладу (рис. 1.2).

В результаті такої схеми включення РІА гомогенізує водовугільну суспензію, без помітних нерівномірностей. Подібна гомогенізація збільшує стабільність ВВП до 2...3 тижнів без додавання реагентів-пластифікаторів. Також РІА коригує грансклад суспензії. Механізм корекції носить подвійний характер: з одного боку великі фракції вугілля у ВВП дещо зменшуються, з іншого боку суттєво збільшується вміст дрібної фракції (менше 20...30 мкм). Враховуючи складний механізм корекції гранскладу, багаторазова обробка ВВП в РІА призводить до істотного вмісту частинок вугілля малої фракції. В сукупності це призводить до швидкого розшарування ВВС, яке більше 8...10 разів пройшла рециркуляцію через кавітатор.



- 1 – бункер подрібненого вугілля;
- 2 – вібромлин;
- 3 – приймальний накопичувач для проміжного продукту;
- 4 – проміжна ємність ВВП;
- 5 – РІА.

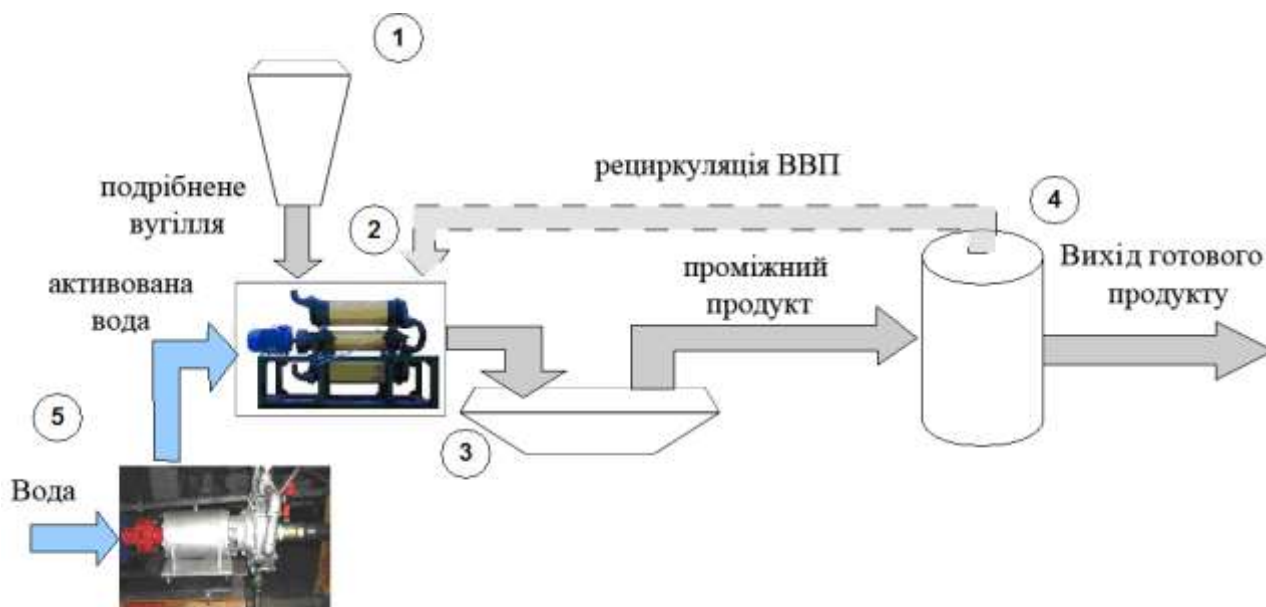
Рисунок 1.2 – Схема включення РІА для гомогенізації ВВП

В літературі зустрічається пропозиція використовувати кавітаційну установку для мокрого помелу вугілля виключно в кавітаторах. ЗАТ Амальтея вдалося підтвердити, що основним механізмом помелу в кавітаторі є механічне подрібнення за рахунок тертя частинок об деталі кавітатора, тобто помел стиранням. Даний спосіб помелу є достатньо енергоємним.

Однак схема використання кавітаторів для прямого приготування ВВП має ряд конструктивних і експлуатаційних труднощів: необхідність

контролю кількості рециркуляції, контроль за зносом матеріалів, необхідність реалізації замкнутого (закритого) циклу приготування ВВП.

Враховуючи недоліки попереднього варіанту, ЗАТ Амальтея була досліджена схема застосування РІА в якості активатора води (рис. 1.3).



- 1 – бункер подрібненого вугілля;
- 2 – вібромлин;
- 3 – приймальний накопичувач для проміжного продукту;
- 4 – проміжна ємність ВВП;
- 5 – РІА.

Рисунок 1.3 – Схема включення РІА в якості активатора води

Проходження води через кавітатор (РІА) призводить до її активації, тобто порушення молекул води. Проведені експерименти показали, що активована вода, використана для приготування ВВП дозволила позбавитися від застосування реагентів пластифікаторів і домогтися стабільності ВУТ на протязі не менше 3...4 тижнів. Крім того, вода, що пройшла кавітаційну

обробку, надає ВВП сметаноподібну консистенцію і дозволяє отримати гомогенне паливо.

Основним недоліком використання млинів для приготування ВВП є високі енерговитрати на приготування ВВП, які становлять не менше 55 кВт·год/т, а також складний технологічний процес, що збільшує собівартість ВВП.

1.1.2 Приготування ВВП в гідродарній установці мокрого помелу

ЗАТ Амальтея-Сервіс розробила оригінальну технологію приготування водовугільного палива на основі гідродарної установки мокрого помелу (ГУУМП) [1]. Агрегатом помелу в ГУУМП є дезінтегратор мокрого помелу (ДМП). ДМП оснащений дозаторами вугілля і води безперервної дії, розчинонасосом видачі продукту помелу і пристроєм вентиляції приймального бункера.

Гідродарний вузол мокрого помелу призначений для приготування водовугільного палива з вугілля широкого спектру марок. ГУУМП є закінченою технологічною одиницею у загальній лінії приготування ВВП і включає в себе:

- бункер дробленого (вихідного) вугілля;
- живильник дробленого вугілля;
- вузол подачі води;
- активатор води РІА;
- агрегат помелу;
- насос для видачі готового продукту (ВВП).

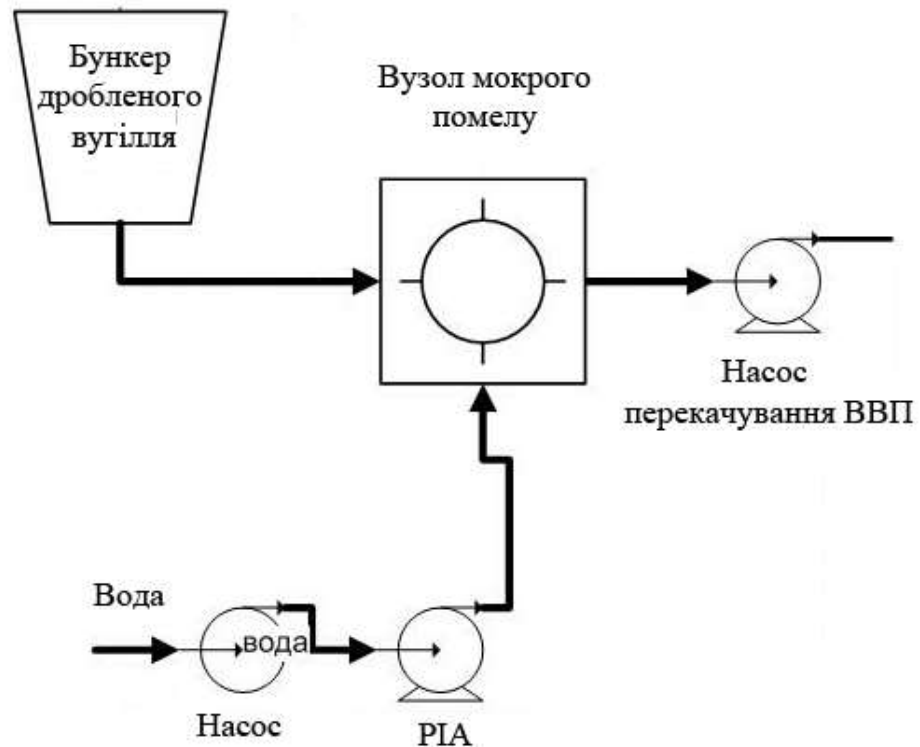


Рисунок 1.4 – Структурна схема ГУУМП

При механічному диспергуванні тверді тіла можуть піддаватися дії як стискаючих сил з двох сторін (статичне роздавлювання - стирання), так і з однієї сторони (вільний удар). Основні види мінеральної сировини, в тому числі і вугілля, є крихкими матеріалами, їх міцність на стиск, зазвичай в 6-12 разів перевершує міцність на розтяг або згин. Тому з точки зору раціонального використання підведеної енергії, для руйнування таких матеріалів доцільніше використовувати швидкий удар, а не повільне стиснення. У той же час кульові, вібраційні млини, кавітатори з їх ефектом внутрішньої сепарації реалізують саме помел стиранням, що супроводжується великою витратою енергії, нагріванням, високим абразивним зносом тіл, що мелють.

Для подрібнення мінеральної сировини в дезінтеграторі мокрого помелу використовується вільний удар. Частинки вугілля, стикаючись з ударними елементами кошиків-роторів отримують потужні різноспрямовані удари, інтенсивність яких збільшується в міру просування матеріалу до

виходу камери помелу. Вода в реалізованому способі подрібнення є не тільки провідником кінетичної енергії удару, доставляючи його в дрібні тріщини частинок вугілля, але також знижує міцність твердого тіла, полегшуючи його руйнування.

Таким чином, ГУУМП дозволяє отримувати водовугільну суспензію, необхідного гранулометричного складу з мінімальним вмістом дуже дрібних частинок і повною відсутністю великих зерен, у відкритому циклі помелу без використання сепараторів.

Одночасно з мокрим помелом в ГУУМП здійснюється гомогенізація суспензії. РІА встановлений до обладнання другій стадії (ГУУМП – мокрий помел). Дана схема виключає знос РІА абразивними частинками вугілля, а сам РІА працює в штатному режимі: активація води. Практичний досвід застосування такого включення РІА в схему приготування (запатентовано) показав, що отримане ВВП є більш пластичним і більш стабільним, навіть без застосування добавок.

Якщо в силу яких-небудь причин потрібне внесення добавок у воду (відходів ПММ або мазуту, пластифікатори/стабілізатори і тощо), то РІА забезпечить їх ретельне рівномірне перемішування і гомогенізацію отриманої емульсії, без ускладнення технологічної схеми приготування ВВП.

ГУУМП дозволяє отримати водовугільне паливо, стабільне протягом не менш 3...5 діб без застосування добавок-пластифікаторів, що істотно спрощує технологію приготування ВВП. Дана стабільність цілком достатня для більшості застосувань ВВП. При необхідності тривалого зберігання ВВП (наприклад, для транспортування), можливо, застосування пластифікаторів. Також, підтримання стабільності ВВП можливо шляхом періодичної рециркуляції в ємностях зберігання ВВП.

1.1.3 Приготування ВВП за допомогою кавітаційних технологій

Наші надії на перспективність водовугільного палива ґрунтуються на новій технології приготування цього палива, а саме – кавітаційній, що характеризується високим рівнем місцевого динамічного компресійного і температурного впливу на оброблюваний матеріал (до 2000 °С і 25000 атм.).

В основі процесу його приготування лежать: кавітаційне подрібнення вугілля у водному середовищі; кавітаційна деструкція молекул вугілля; кавітаційна активація частинок вугілля; кавітаційна гомогенізація; гідрокрекінг і т.п., в процесі протікання яких порушується структура вугілля як природної гірської маси. Вугілля розпадається на окремі органічні складові, але вже з активною поверхнею частинок і великою кількістю вільних органічних радикалів.

Отримане таким чином водовугільне паливо стабільно протягом багатьох місяців без застосування будь-яких присадок. Важливою особливістю такого водовугільного палива є відсутність в його складі будь-яких емульгаторів і пластифікаторів.

Ще однією важливою перевагою кавітаційного водовугільного палива, є відновлення всіх реологічних властивостей, після висихання, простою заливкою водою без розмелювання або перемішування.

Технологічний процес приготування характеризується низькими питомими енерговитратами, низькими показниками зносу металу з робочих органів кавітаторів при традиційних схемах помелу вугілля, простий в експлуатації, обслуговуванні та ремонті.

Нижче представлена принципова схема установки для приготування кавітаційного водовугільного палива (рис. 1.5).

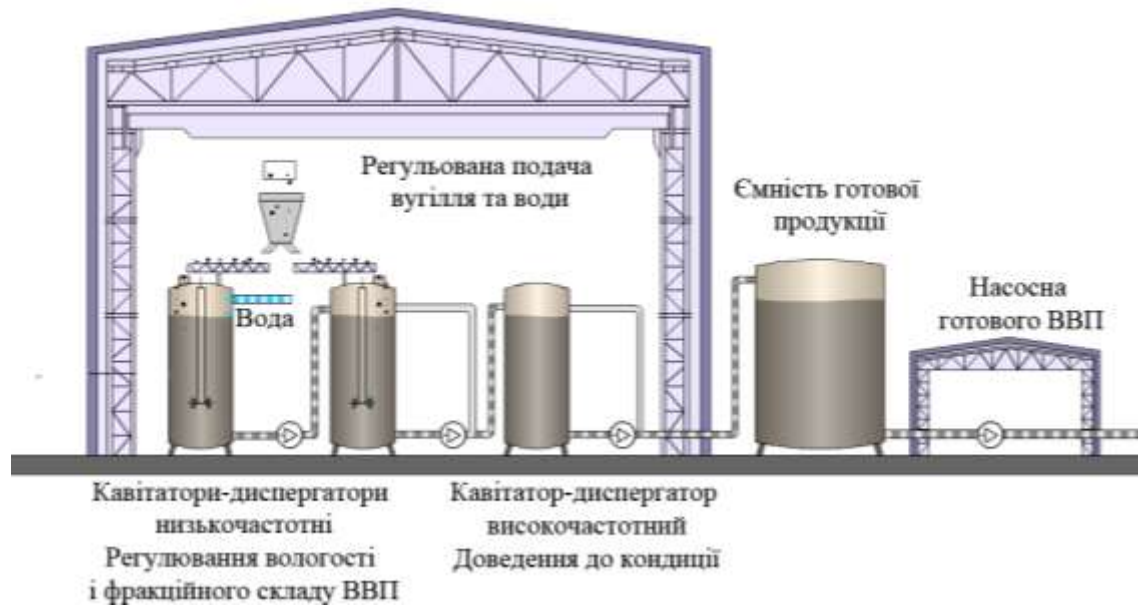


Рисунок 1.5 – Схема установки приготування кавітаційного водовугільного палива

Технічною задачею є створення простого ефективного та енергоекономного способу приготування кавітаційного водовугільного палива, що володіє стабільними властивостями, високим ступенем вигорання вуглецю, екологічною чистотою, низькою собівартістю, без застосування будь-яких стабілізаторів, пластифікаторів і тощо.

Поставлене завдання досягається тим, що в заявленому способі кавітаційне водовугільне паливо отримують в послідовному безперервному процесі, що включає подрібнення доставленого зі складу сухого вугілля в молоткової дробарці до фракції 0–10 мм, перемішування твердої паливної складової фракції 0...10 мм в змішувачі з водою, що пройшла кавітаційну обробку, та переміщення суміші в кавітаційний диспергатор крупного помелу.

Після кавітаційної обробки в диспергаторі крупного помелу отримана суспензія направляється в змішувач, а потім в диспергатор тонкого помелу. З кавітаційного диспергатора тонкого помелу водовугільна суспензія направляється в ще один диспергатор тонкого помелу, а по завершенні

обробки направляється в зумпф, з якого насосом перекачується в накопичувальну ємність для зберігання і транспортування.

1.2 Поліфункціональний електромеханічний перетворювач з порожнистим ротором

У розглянутих випадках для надання ВВП стабільних властивостей використовуються кавітаційні процеси, які в більшості випадків технологічно здійснюються за допомогою роторно-імпульсного апарату, який складається з робочого механізму – кавітаційної камери, та приводного механізму – електродвигуна (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Роторно-імпульсний апарат

Наявність окремого привода призводить до зниження ККД установки. Також такий спосіб кавітаційної обробки ВВП не дає можливості здійснювати додатковий вплив на суспензію – електромагнітний і тепловий, в наслідок яких відбувається зниження динамічної в'язкості водовугільної суспензії та покращення її характеристик.

Переміщення водовугільної суспензії по технологічному ланцюгу здійснюється за допомогою електронасосів, які в свою чергу ускладнюють технологію приготування.

Агрегат гідрогенізації вугільного палива являє собою електромеханічний перетворювач з порожнистим перфорованим ротором (ППР), який відноситься до нового класу електромеханічних пристроїв. Це поєднана технічна система з поліфункціональними властивостями, що об'єднує в собі електромеханічну, механічну, теплову і гідравлічну системи. В перетворювачі з ППР практично вся вхідна електрична енергія перетворюється в корисну вихідну енергію, оскільки крім механічної вихідної енергії, яка використовується для створення кавітаційних процесів, вся дисипативна складова енергії формує другу корисну частину – теплову енергію, що витрачається на нагрів робочої суспензії. ЕМП з ППР дає можливість комплексного впливу на ВВП і дозволяє скоротити кількість обладнання в технологічному ланцюгу приготування ВВП.

Додатково є можливість розглядати агрегат гідрогенізації вугільного палива як устаткування для мокрого помелу вугілля до фракції 70–150 мкм.

1.3 Висновки до розділу 1

ВВП призначене для заміни газу і мазуту, а також для поліпшення екологічної обстановки в місцях роботи промислових та побутових котелень на вугіллі чи мазуті.

У розглянутих випадках для надання ВВП стабільних властивостей використовуються кавітаційні процеси, які в більшості випадків технологічно здійснюються за допомогою роторно-імпульсного апарату, який складається з робочого механізму – кавітаційної камери, та приводного механізму – електродвигуна. Наявність окремого привода призводить до зниження ККД установки. Також такий спосіб кавітаційної обробки ВВП не дає можливості здійснювати додатковий вплив на суспензію – електромагнітний і тепловий.

Розумною альтернативою традиційним нагрівальним комплексам є електричні комплекси на базі електромеханічних перетворювачів технологічного призначення, які передбачають ефективне використання дисипативної складової енергії, структурну, функціональну та теплову інтеграцію.

2 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ АКТИВНОГО ХВИЛЬОВОГО ОПОРУ ПОРОЖНИСТОГО РОТОРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1 Визначення активного хвильового опору

Кінцеві розміри активної частини перетворювача з порожнистим ротором в аксіальному напрямку обумовлюють нерівномірність розподілу щільності вихрових струмів і збільшення активного опору ротора. Визначення активного хвильового опору ротора з урахуванням кінцевої довжини і особливостей геометрії являє собою складну задачу, вирішення якої можливе за допомогою чисельних методів у тривимірній постановці.

Активний хвильовий опір різних конструктивних варіантів феромагнітних роторів визначався шляхом проведення додаткових постпроцесорних розрахунків тривимірної моделі з використанням функції Subdomain Integration, що дозволяє аналізувати отримані результати по інтегральним величинам. Приклад реалізації постпроцесорного розрахунку активного хвильового опору ППР (П-20-5-7) при частоті 10 Гц ($s = 0,2$) показаний на рис. 2.1. Значення опору для різних значень ковзання отримані за результатами рішення рівнянь квазістаціонарного електромагнітного поля, виходячи з величини потужності резистивних втрат Q_r і квадрата повного струму ротора I_Σ

$$r_{xв} = \frac{Q_r}{I_\Sigma^2} = \frac{\int_V \left(\frac{J_\Sigma^2}{\gamma} \right) dV}{\left(\int_V J_\Sigma dV / l_a \right)^2}, \quad (2.1)$$

де J_Σ – повна щільність вихрових струмів ротора;

l_a – активна довжина ротора.

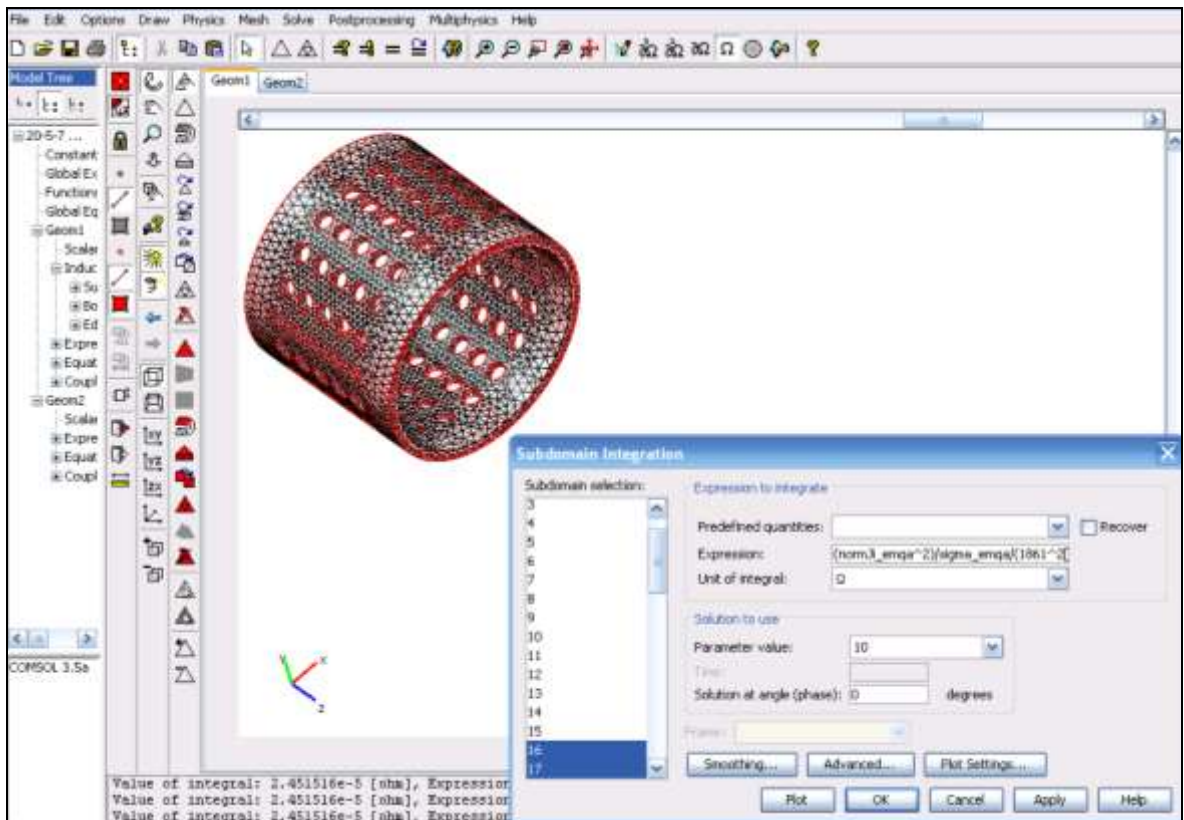


Рисунок 2.1 – Визначення активного хвильового опору
ППР за допомогою функції Subdomain Integration

Результати розрахунку залежності $r_{xв} = f(s)$ для суцільного ротора показали добре узгодження з раніше встановленими залежностями. По міру розгону перетворювача із суцільним феромагнітним ротором, частота змінного магнітного потоку в роторі зменшується, а товщина шару, в якому протікають вихрові струми, збільшується. При цьому величина активного опору зменшується практично пропорційно \sqrt{s} . На рис. 2.2 представлена залежність активного хвильового опору суцільного феромагнітного ротора від ковзання.

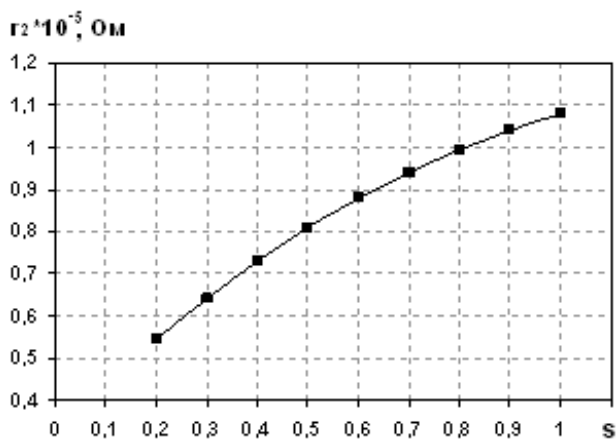


Рисунок 2.2 – Залежність $r_{xв} = f(s)$ для суцільного феромагнітного ротора

Залежності $r_{xв} = f(s)$ для порожнистих феромагнітних роторів з різною товщиною стінки представлені на рис. 2.3. З отриманих результатів випливає, що при товщині стінки циліндра 10 мм активний хвильовий опір ротора на ділянці $s = 1 \dots 0,7$ незначно перевищує опір суцільного ротора. При подальшому збільшенні швидкості опір порожнистого ротора знижується менш інтенсивно, що пов'язано з неможливістю подальшого збільшення струмопровідного шару. У результаті, залежність $r_{xв} = f(s)$ набуває майже лінійний характер. Зі зменшенням товщини стінки ротора відповідна залежність $r_{xв} = f(s)$ проходить вище і стає більш пологою. Так, активний хвильовий опір порожнистого ротора з товщиною стінки 3,5 мм, мало залежить від ковзання i , при $s = 1$ в 1,75 рази перевищує активний опір суцільного ротора. У цьому випадку, товщина шару в якому протікають вихрові струми, дорівнює товщині стінки циліндра практично у всьому діапазоні зміни ковзання. При пуску частота вихрових струмів в роторі становить 50 Гц, а глибина проникнення струму в тіло ротора – 2...3 мм, що на перший погляд повинно обумовлювати рівність значень $r_{с}$ для порожнистого та суцільного роторів при $s = 1$. Однак опір ротора різко збільшується при малих торцевих поверхнях, що особливо помітно в роторі без дна.

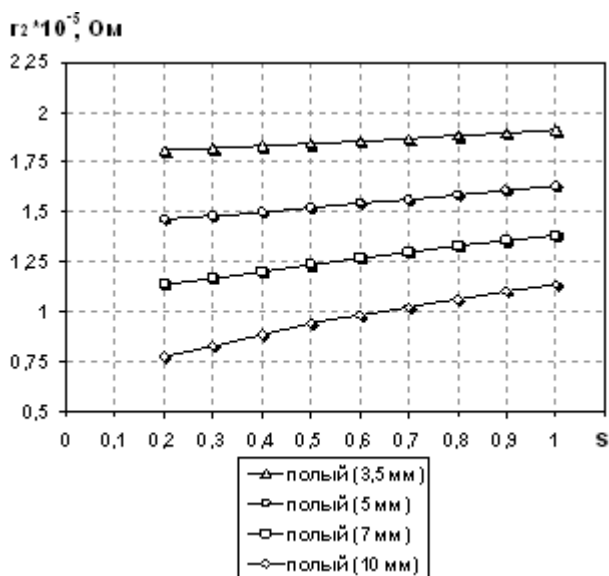


Рисунок 2.3 – Залежності $r_{xв} = f(s)$ для порожнистих феромагнітних роторів

На рис. 2.4 представлені залежності $r_{xв} = f(s)$ для ППР з товщиною стінки 3,5 мм. Введення перфорацій ротора призводить до переміщення залежності $r_{xв} = f(s)$ паралельно вгору. При цьому основний вплив на величину активного опору спричиняє коефіцієнт перфорації ротора $k_{перф}$ – відношення сумарної площі перфорацій до площі зовнішньої поверхні аналогічного гладкого ротора. З рис. 2.4 видно, що залежності $r_{xв} = f(s)$ для роторів з прямими рядами, однаковим діаметром отворів, але різною кількістю рядів і числом отворів в ряду, проходять паралельно одна інший. При цьому значення $k_{перф}$ практично рівні (0,035 і 0,037), а різниця в порівнянні з опором гладкого ротора становить $\approx 3...4\%$. На цьому ж рисунку представлена залежність $r_e = f(s)$ для ротора, що має скіс рядів отворів $\alpha = 30^\circ$ і $k_{перф} = 0,063$. У даному випадку перевищення опору в порівнянні з гладким ротором становить $\approx 7...9\%$.

На рис. 2.5 представлені залежності $r_{xв} = f(s)$ для ротора з прямими рядами і ротора з шаховим розташуванням отворів, що мають підвищений $k_{перф}$ – 0,192 і 0,157 відповідно.

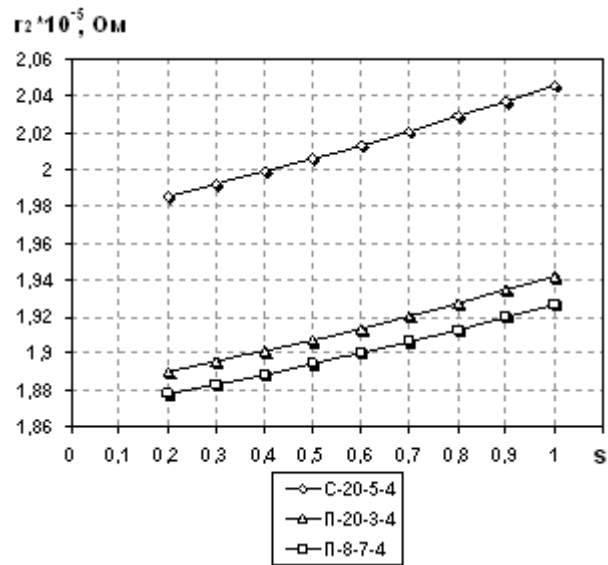


Рисунок 2.4 – Залежності $r_{xв} = f(s)$
для різних варіантів ППР

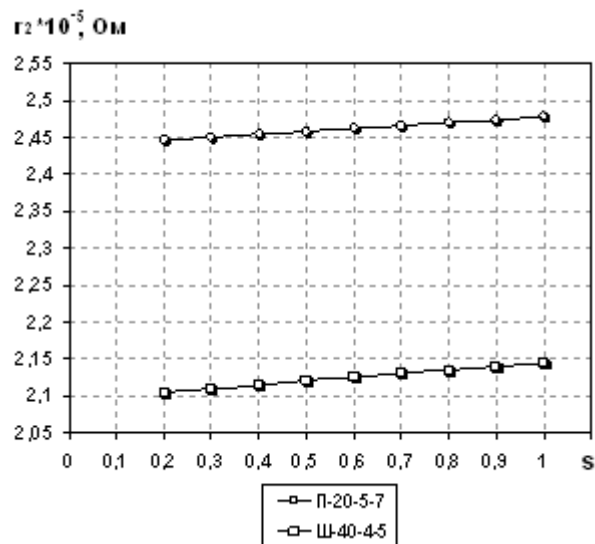


Рисунок 2.5 – Залежності $r_{xв} = f(s)$
для ППР з підвищеним $k_{перф}$

Покладаючись на аналіз отриманих залежностей, для розрахунку активного хвильового опору ППР може бути рекомендований наступний вираз

$$r_{xвп} = r_{xвг} \cdot (1 - k_{перф})^{-1}, \quad (2.2)$$

де $r_{xвг}$ – активний хвильовий опір порожнистого гладкого ротора;

$k_{перф}$ – коефіцієнт перфорації ротора.

Активний опір порожнистого феромагнітного ротора (гладкого без перфорацій) з достатньою точністю визначається за відомим виразом. Формула (2.2) дає задовільні результати (розбіжність з отриманими залежностями до 4 %) для різних типів схем перфорації з рівномірним розташуванням отворів в діапазоні зміни $k_{перф} = 0,02...0,4$. Безпосередній вплив типу схеми перфорації ротора на активний опір ротора проявляється при явно нерівномірному розташуванні отворів і ускладнює використання формули (2.2). Наприклад, виконання отворів діаметром 5 мм двома щільними кільцевими рядами (по 32 отвори) на відстані 10 мм від країв порожнистого циліндра призводить до зниження співвідношення J_z/J_Σ до значення 0,58. Залежність $r_{xв} = f(s)$ для даного конструктивного варіанту ППР представлена на рис. 2.6.

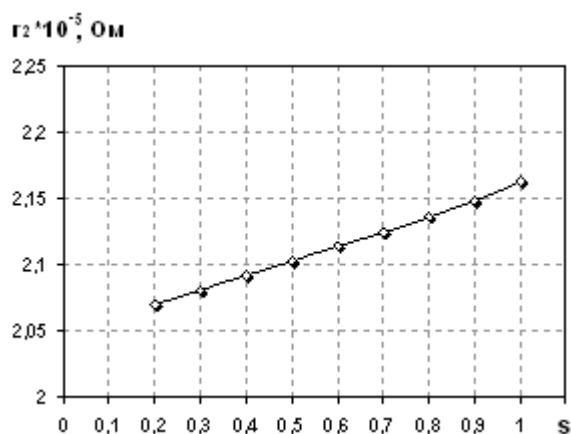


Рисунок 2.6 – Залежність $r_{xв} = f(s)$ для випадку розташування отворів в крайових зонах ротора

Збільшення активного опору в порівнянні з порожнистим гладким ротором склало 15 %, а в порівнянні з ППР, який має такий же коефіцієнт перфорації (С-20-5-4) – 6 %.

2.2 Дослідження перетворювача з порожнистим ротором зі звичайною обмоткою статора

Програма ANSOFT Maxwell вирішує задачі електромагнітного поля, використовуючи рівняння Максвелла в кінцевій області простору з відповідними граничними умовами і, коли це необхідно, з визначеними користувачем початковими умовами, щоб отримати рішення з необхідною точністю. Щоб отримати набір рівнянь алгебри, які будуть вирішені, геометрія автоматично розбивається на тетраедри. У кожному тетраедрі змінні величини поля для обчислюваної області визначаються многочленами другого порядку. Таким чином, в областях з різкою просторовою зміною поля, щільність сітки має бути збільшена для достатньої точності рішення.

Модель виконана і розрахована в програмі ANSOFT Maxwell v.14. Зовнішній вигляд моделі перетворювача з порожнистим ротором зі звичайною обмоткою статора показаний на рисунку 2.7.

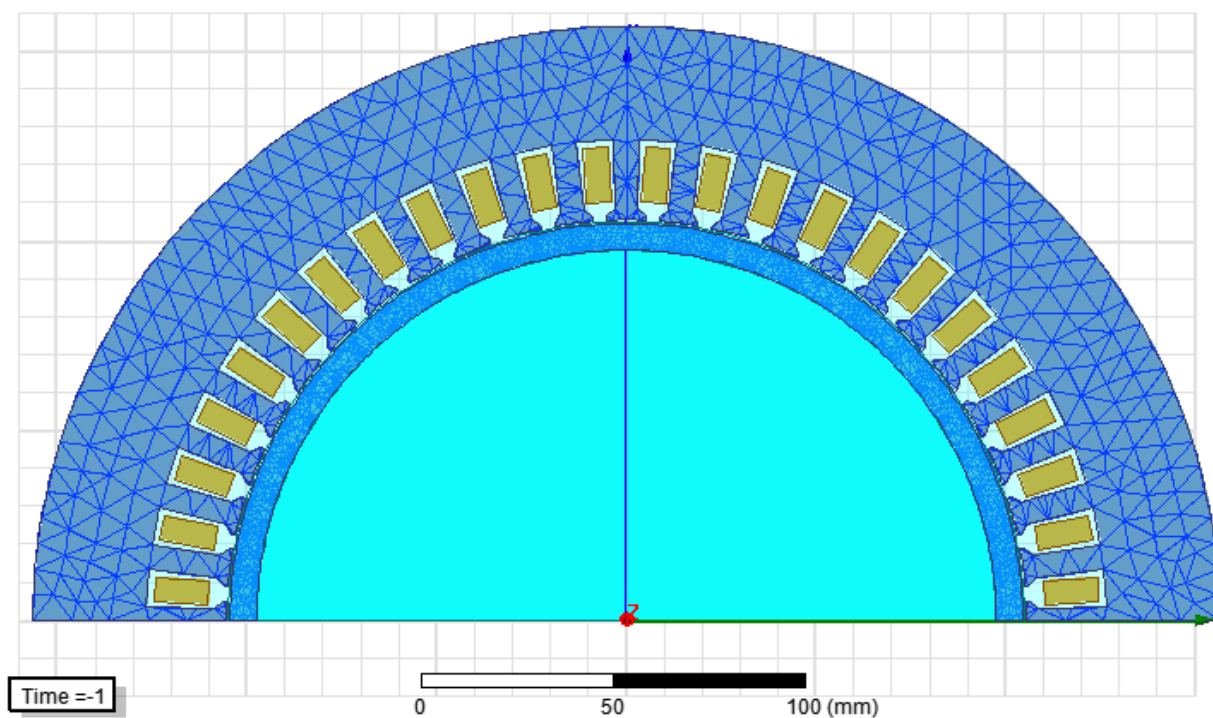


Рисунок 2.7 – Двовимірна розрахункова модель перетворювача з порожнистим ротором зі звичайною обмоткою статора

У моделі враховані нелінійні властивості сталі шляхом додавання в проект нових матеріалів: для пакету статора – електротехнічна сталь марки 2212, для ротора – сталь марки Ст3. Для введених матеріалів були задані криві намагнічування і залежність питомих втрат від величини магнітної індукції при частоті 50 Гц.

Сталь 2212 позначена як шихтована (параметр laminated), сталь Ст3 – суцільна (параметр solid).

Для урахування індукованих струмів матеріал феромагнітного ротора був включений у блок обробки ефекту вихрових струмів (параметр Eddy Effects).

У даній задачі на ротор була накладена сітка з урахуванням глибини проникнення електромагнітного поля 7 мм (по товщині стінки ротора) і обмеження по кількості елементів в 1000 шт. Сітка ротора має 4 шари. На інші частини моделі була накладена звичайна сітка з обмеженням по максимальній довжини грані тетраедра в 8 мм (рис. 2.8).

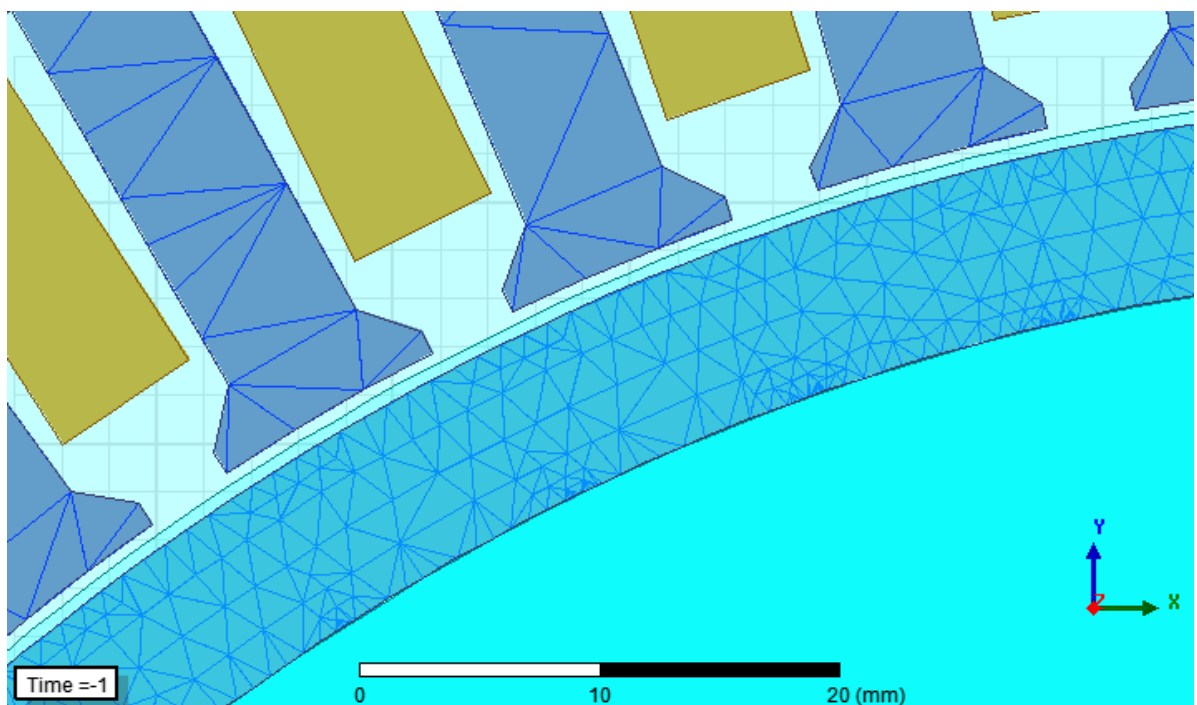


Рисунок 2.8 – Збільшена картина СКЕ моделі

Обмотка статора була розбита на фази. У переріз кожної фази подавалася напруга:

$$\begin{aligned} U_A &= U_m \sin(2\pi f_1 \cdot \text{time}), \\ U_B &= U_m \sin(2\pi f_1 \cdot \text{time} - 2\pi/3), \\ U_C &= U_m \sin(2\pi f_1 \cdot \text{time} - 4\pi/3), \end{aligned} \quad (2.3)$$

де U_m – амплітуда напруги у фазі статора; f_1 – частота живлячої напруги; time – системна змінна часу.

Розміщення фази А у пазах статора зображено на рис. 2.9.

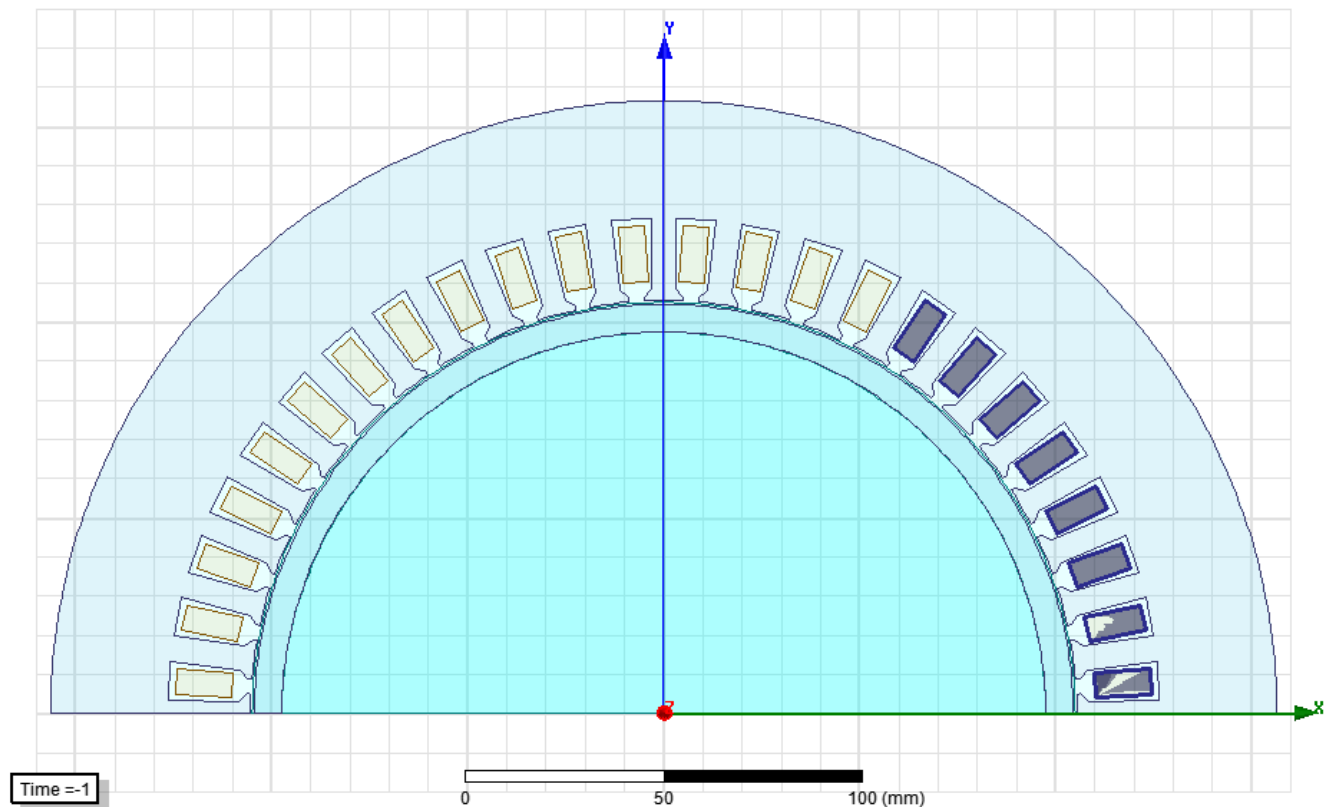


Рисунок 2.9 – Фаза А обмотки статора

Активний опір і індуктивність фази були заздалегідь визначені в модулі RMxpert (Rotation Machine Expert), провідники фази були вказані як розподілені з вказівкою числа паралельних гілок.

Модель розраховувалася з урахуванням механічних перехідних процесів. У блоці механіки (Motion Setup) задавався момент інерції ротора, гальмівний момент, характер навантаження – початкова швидкість вентилятора, нульової.

При заданому моменті інерції Maxwell на кожній ітерації розраховує рівняння руху:

$$J_m \cdot \frac{d^2\varphi_m(t)}{dt^2} + k_D(t) \cdot \frac{d\varphi_m(t)}{dt} = T_\Psi(t) + T_m(t), \quad (2.4)$$

де J_m – момент інерції, кг·м²; φ_m - кутова позиція ротора в рад; $d\varphi_m(t)/dt$ – кутова швидкість, рад/с; $d^2\varphi_m(t)/dt^2$ – кутове прискорення, рад/с²; k_D – коефіцієнт демпфування, Нм·с/рад; T_Ψ – електромагнітний момент, Нм; T_m – додатковий момент, Нм; t – поточний час, с.

Розрахунок виконувався для 1/2 частини моделі. Отримувані чисельні результати і графічні залежності враховувалися програмою автоматично коефіцієнтом симетрії в постпроцесінгу.

У програмі Maxwell для сіткової моделі методом кінцевих елементів (МКЕ) рівняння Пуассона (2.5) замінюється енергетичним функціоналом (2.6):

$$\nabla^2 A = -\mu J, \quad (2.5)$$

де A – векторний магнітний потенціал; J – щільність струму джерела; μ – відносна магнітна проникність середовища.

$$F(A) = \frac{1}{2} \int \left(\frac{\nabla A \cdot \nabla A}{\mu} + A \cdot J \right) dV. \quad (2.6)$$

Цей функціонал $F(A)$ мінімізується у відповідність зі значенням A в кожному вузлі кожного трикутника сітки.

Для усіх елементів сітки моделі вирішується матриця (2.7) методом виключення гауса для розріджених матриць.

$$[S][A] = [J], \quad (2.7)$$

де S – площа моделі, покрита сіткою.

Спільне електромеханічне завдання (2.8) вирішується в категорії моделі перехідного процесу Transient.

$$\nabla \times \upsilon \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V + \nabla \times H_c + \sigma v \times \nabla \times A, \quad (2.8)$$

де σ – електрична провідність; H_c – напруженість магнітного поля; υ – швидкість.

Розрахунки кожного етапу часу завершуються при мінімізації сумарної локальної помилки в кожному трикутнику сітки моделі.

Розрахунок втрат в сталі базується на наступному виразі:

$$p = K_h B_{\max}^2 f + K_c (B_{\max} f)^2 + K_e (B_{\max} f)^{1.5}, \quad (2.9)$$

де K_h – коефіцієнт гістерезису; K_c – коефіцієнт обліку вихрових струмів; K_e – коефіцієнт обліку вихрового перемагнічування; B_{\max} – амплітудне значення магнітної індукції; f – частота.

Для визначення активного опору феромагнітного масиву (рис. 2.10) був використаний калькулятор поля. Втрати в суцільному феромагнітному матеріалі визначаються як інтеграл квадрата щільності струму в шуканому об'ємі.

Активний опір суцільного масиву знаходиться як відношення розсіюваної потужності (2.1) до квадрата модуля діючого значення скалярної величини повного струму J_z уздовж осі моделі Z , що проходить через переріз ротора S .

Залежність електромагнітного моменту при включенні перетворювача на обертання зі швидкістю 2000 об/хв, та струми у статорній обмотці показані відповідно на рис. 2.11 та рис. 2.12.

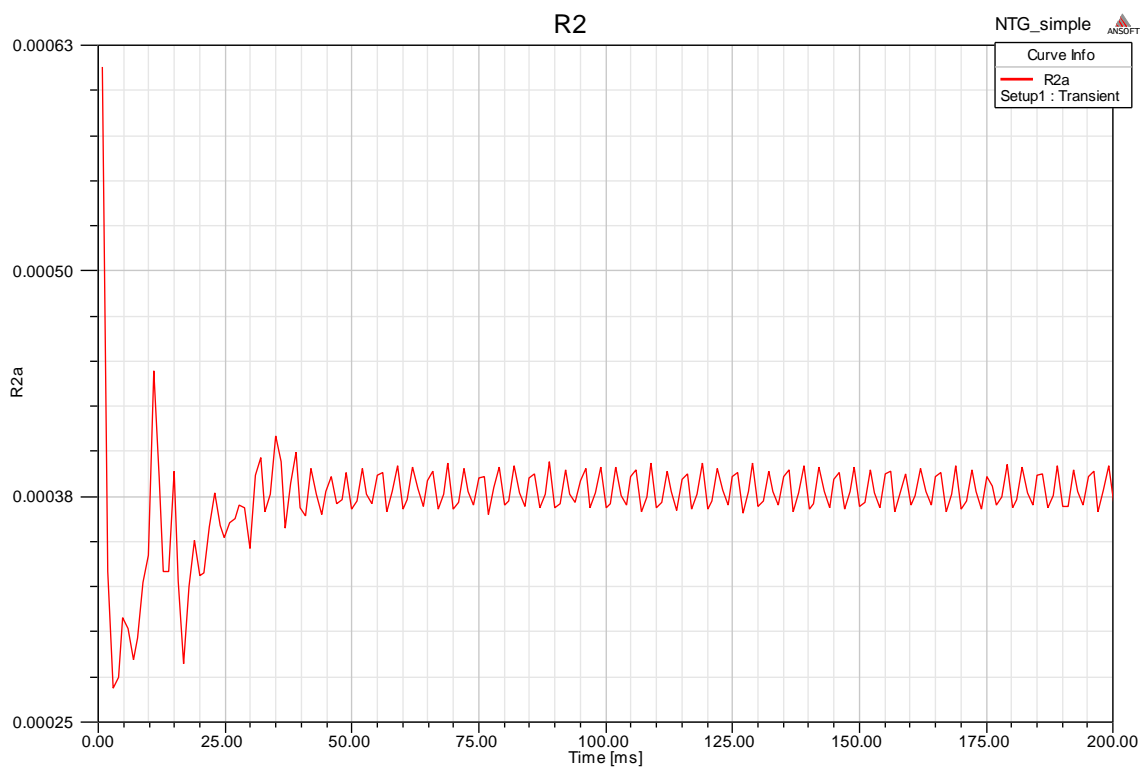


Рисунок 2.10 – Залежність опору масивного ротора від часу

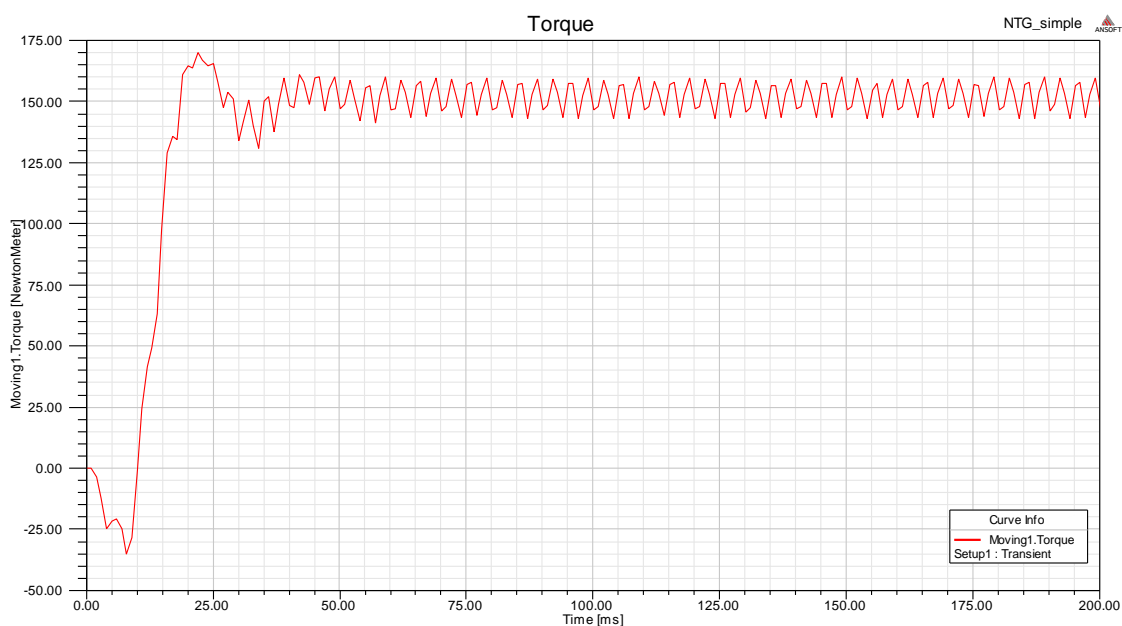


Рисунок 2.11 – Моментна характеристика

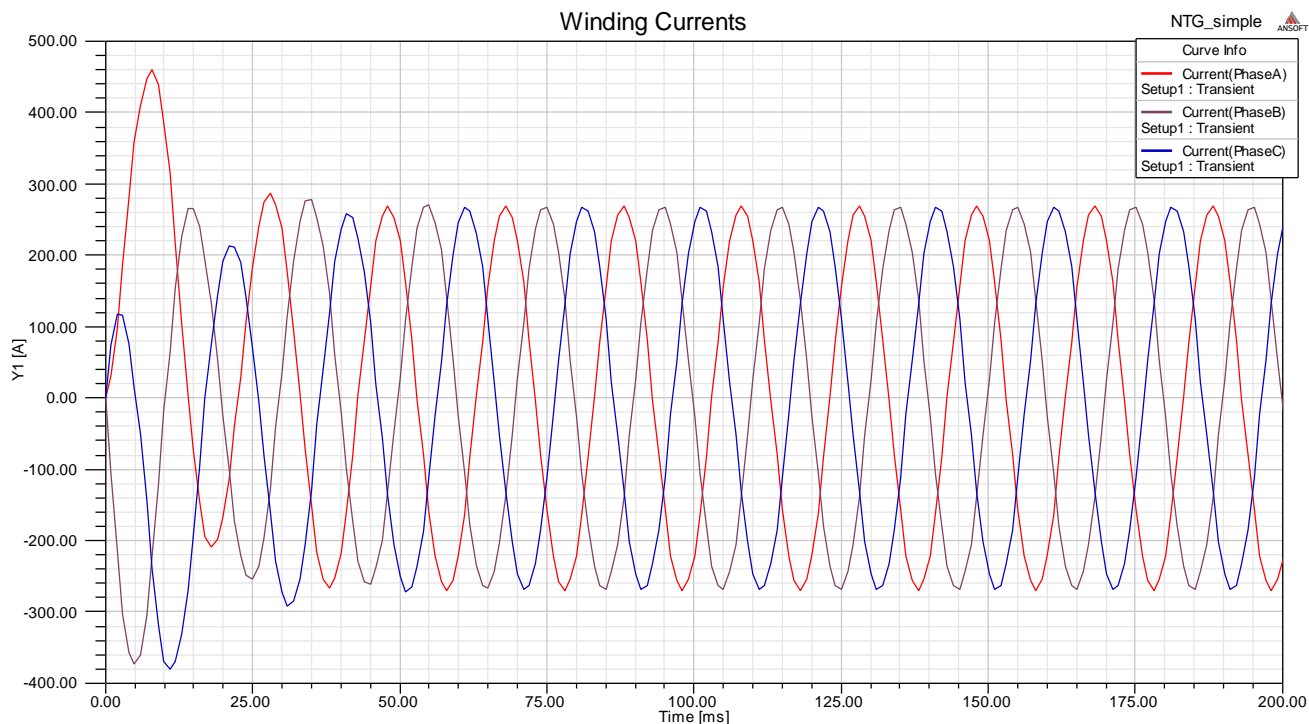


Рисунок 2.12 – Залежності струмів фаз статора від часу

Для визначення коефіцієнту потужності був проведений аналіз кривих зміни напруги та струму фази А обмотки статора (рисунок 2.13). Було визначено, що коефіцієнт потужності складає 0,59. Таке низьке значення коефіцієнту потужності є характерним для машин з масивними роторами. Тому доцільним є збільшення коефіцієнту потужності запропонованим методом, що буде докладно розглянуто у подальших розділах.

Також були визначені характеристики перетворювача із звичайною трифазною обмоткою під час розгону від нульової швидкості до сталої. Розрахований момент інерції ротора, який був заданий у параметрах модулю динаміки Maxwell становить $0,020937 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

На рис. 2.14 зображена крива електромагнітного моменту під час розгону, на рисунку 2.15 – швидкості від часу. Зміна струмів фаз обмотки статора під час розгону зображена на рисунку 2.16.

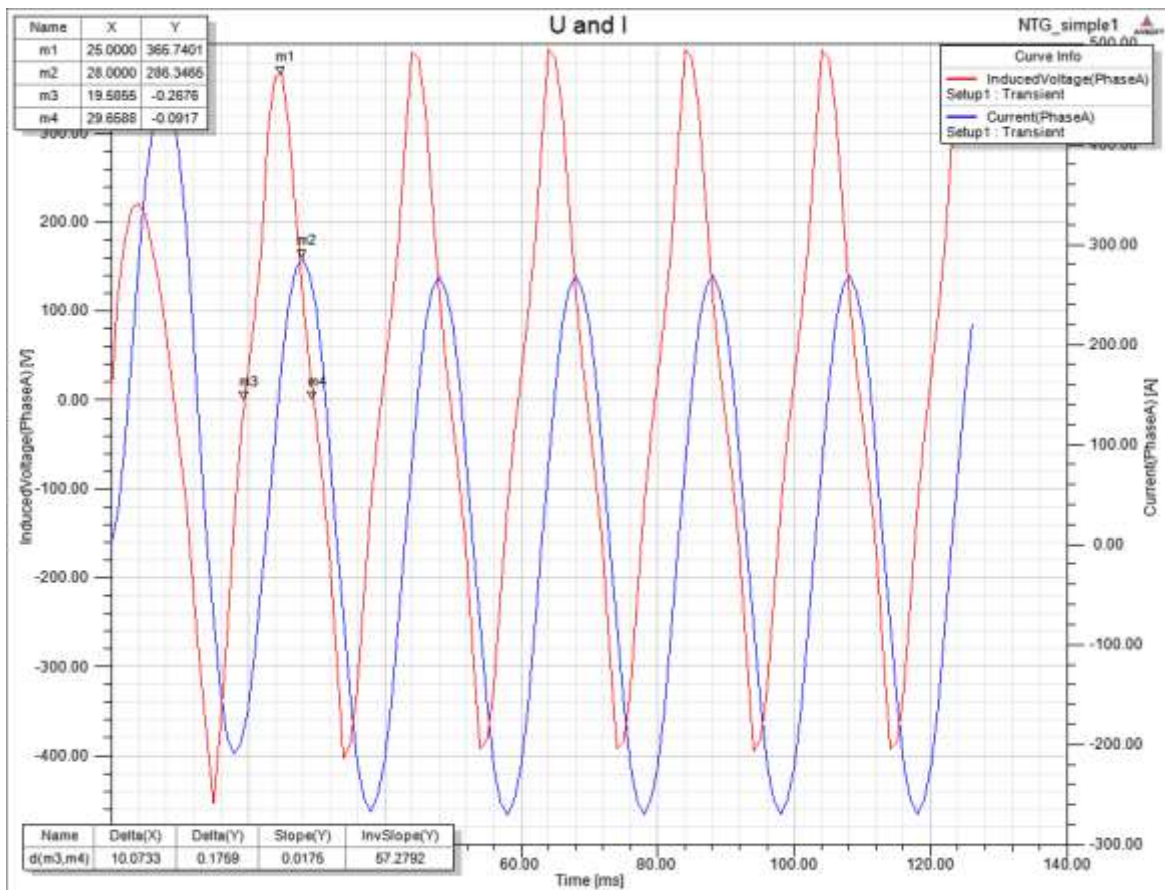


Рисунок 2.13 – До визначення коефіцієнту потужності

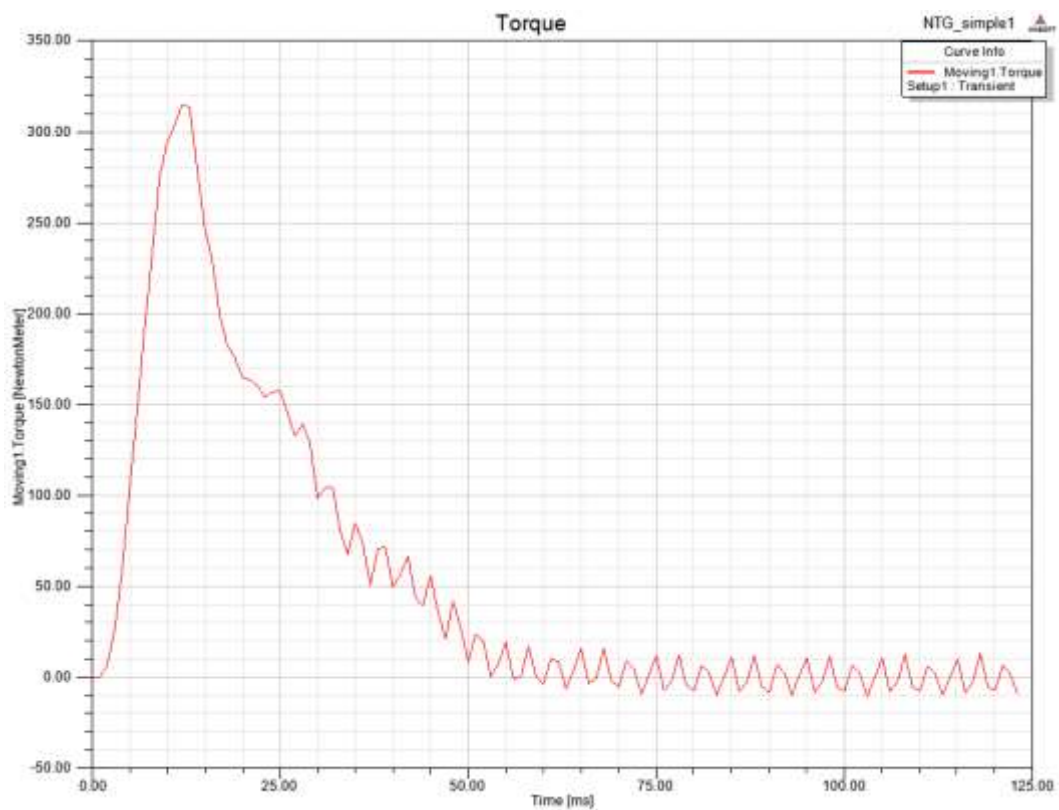


Рисунок 2.14 – Залежність електромагнітного моменту під час розгону

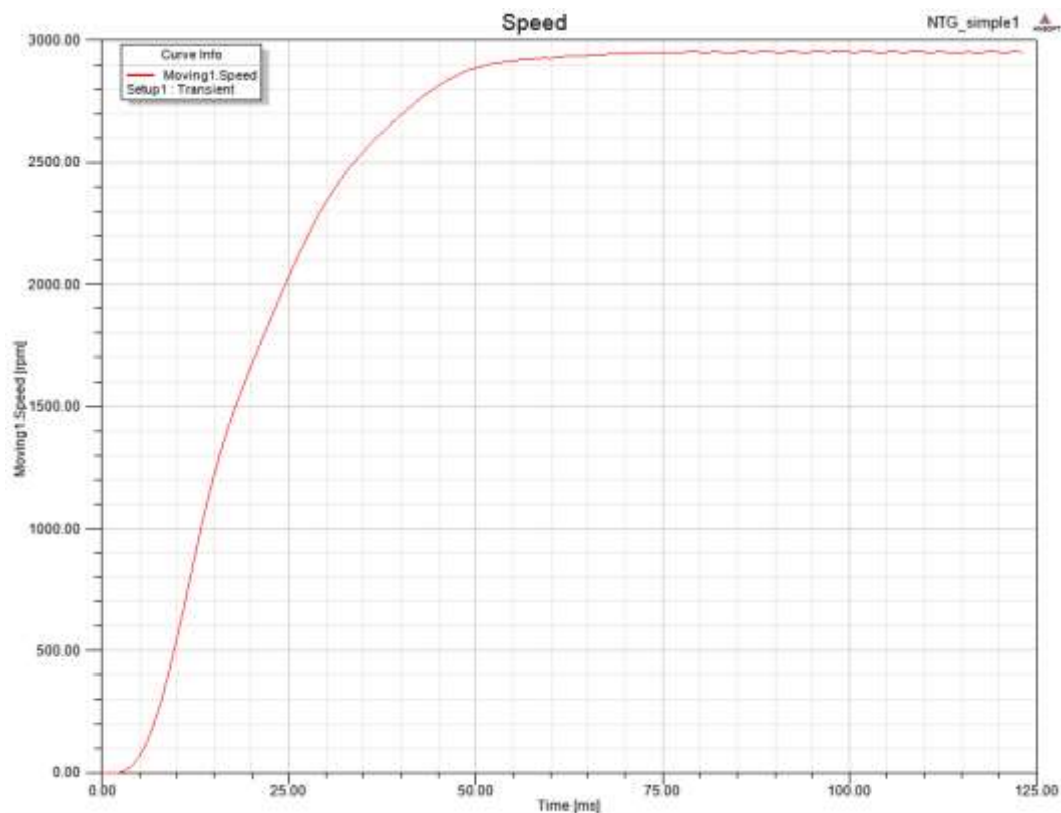


Рисунок 2.15 – Зміна швидкості обертання ротора під час розгону

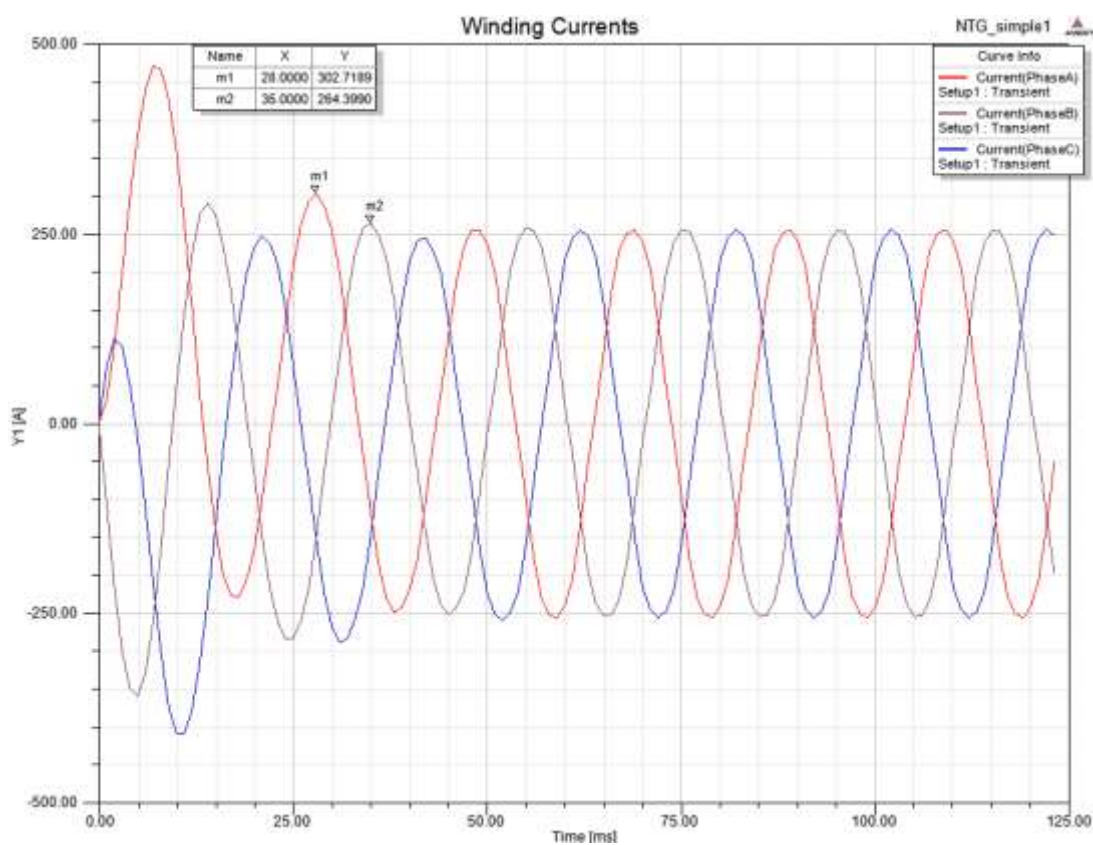


Рисунок 2.16 – Зміна струмів фаз обмотки статора під час розгону

2.3 Дослідження перетворювача з порожнистим ротором із компенсованою обмоткою

Для покращення коефіцієнту потужності перетворювача, який без використання спеціальних заходів складає досить низьке значення (0,59), було застосовано схему КАД.

У програмі Maxwell розрахункова зона пакету статора була розбита на звичайну (рис. 2.17, а) та конденсаторну (рис. 2.17, б). Порядок слідування звичайної обмотки та з конденсатором встановлений у напрямку, протилежному напрямку обертання поля статора.

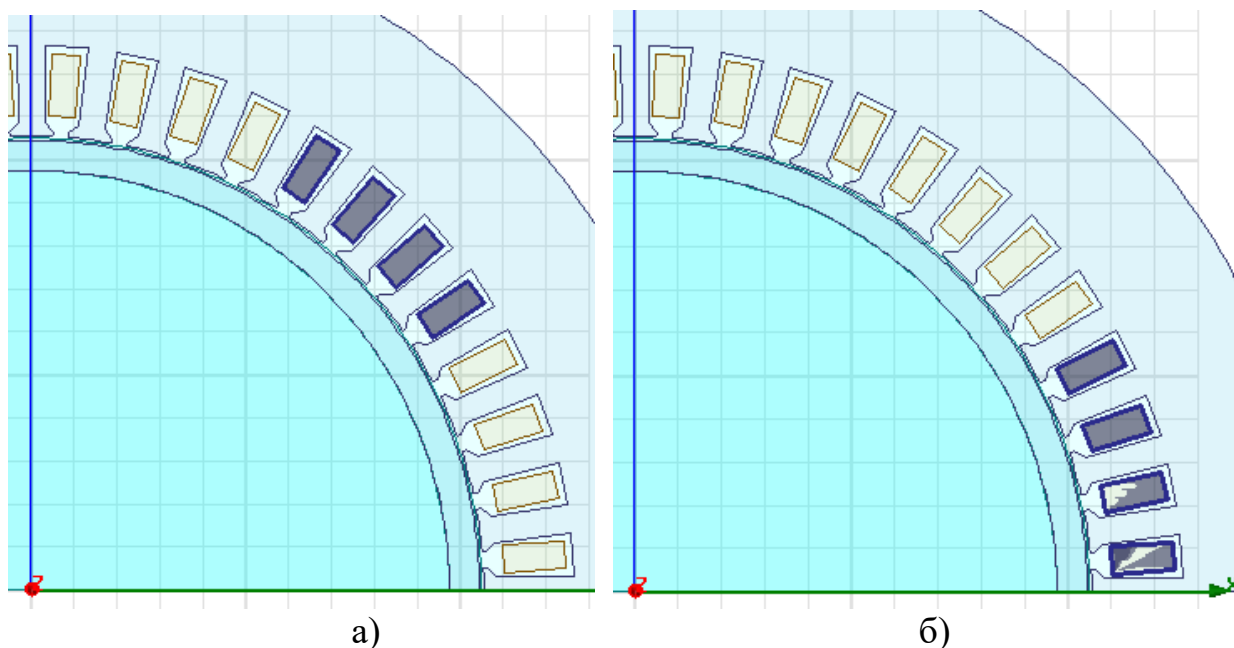


Рисунок 2.17 – Розташування фази А обмотки з конденсаторами у пазах статора

Таким чином, проти руху годинникової стрілки йдуть: Ак, А, Ск, С, Вк, В (Ак, Вк та Ск – це частини відповідної фази з конденсаторами). На відміну від збудження обмотки статора звичайної обмотки прямим завданням величини зміни напруги у фазах, в даному випадку статорна обмотка збуджувалась від

зовнішньої схеми. Схема обмотки, створена у Maxwell Circuit Editor, зображена на рис. 2.18.

Кут фазового зсуву δ між струмами в робочій і компенсованій напівфазах можна отримати різним за рахунок вибору співвідношення індуктивності напівфази обмотки статора і ємності конденсатора.

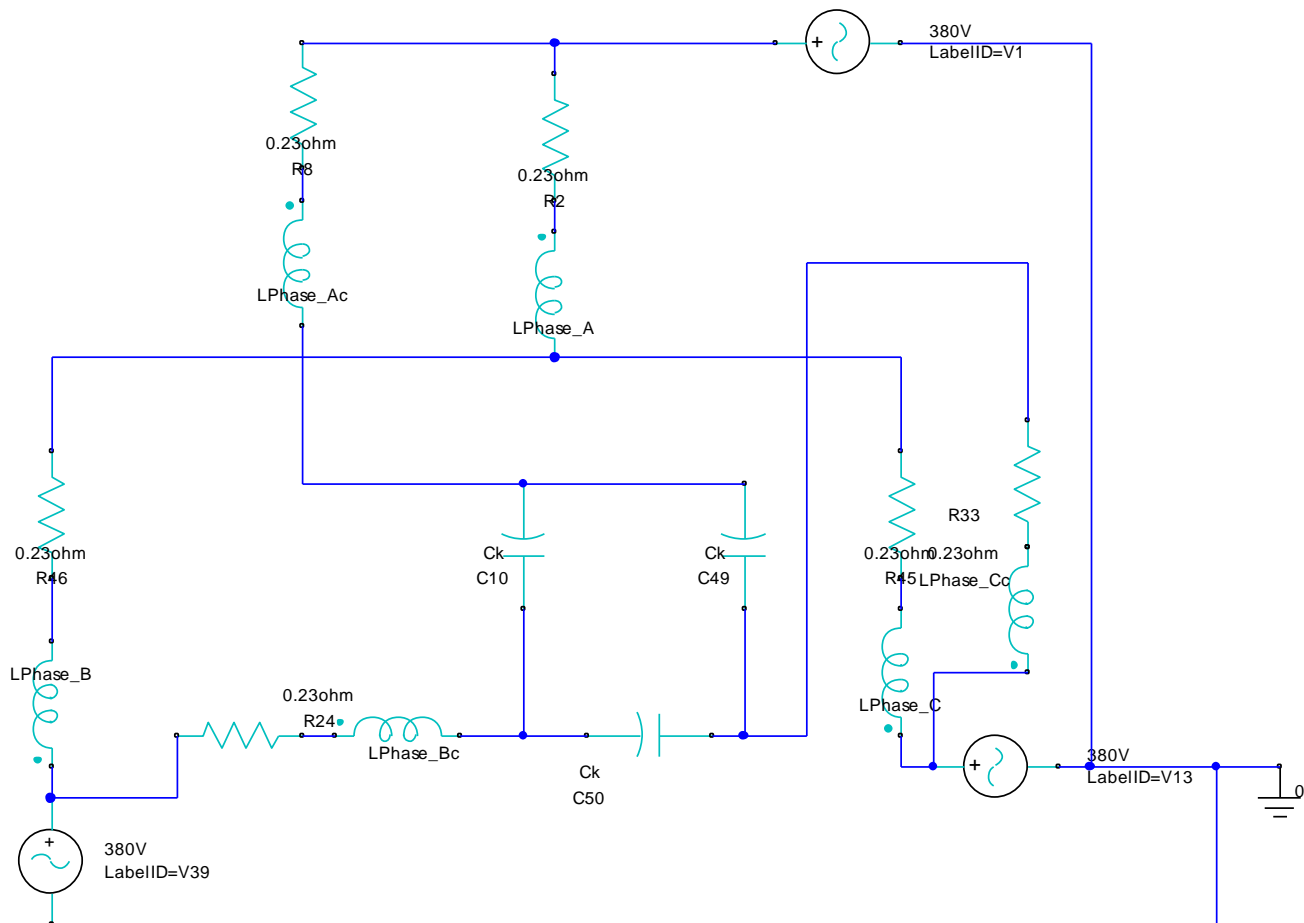


Рисунок 2.18 – Схема живлення перетворювача з конденсаторами.

Для досліджуваного ЕМП обираються такі параметри, щоб виконувалася умова оптимальної компенсації

$$\alpha + \delta = 0, \quad (2.10)$$

де α – кут зсуву у просторі вісі однієї фазної зони до вісі іншої фазної зони.

За умови виконання рівності (2.10) струм намагнічування є мінімальним. Для виконання зазначеної умови виберемо таку величину ємності

конденсатора, щоби кут фазового зсуву між струмами напівфаз дорівнював $\delta = 30^\circ$. Як було визначено, мінімум втрат потужності у обмотці статора буде при компенсації реактивної потужності і струму на рівні $I_k \approx 0.8I_p$.

При цій умові виконується шунтування напівфази ємністю з використанням конденсаторів $C = 8 \div 10$ мкФ на фазу на кожен 1 кВт потужності перетворювача. Для цього було розраховано і прийнято ємність конденсаторів 250 мкФ.

Залежність електромагнітного моменту при включенні перетворювача на обертання зі швидкістю 2000 об/хв., та струми у статорній обмотці показані відповідно на рис. 2.19 та рис. 2.20.

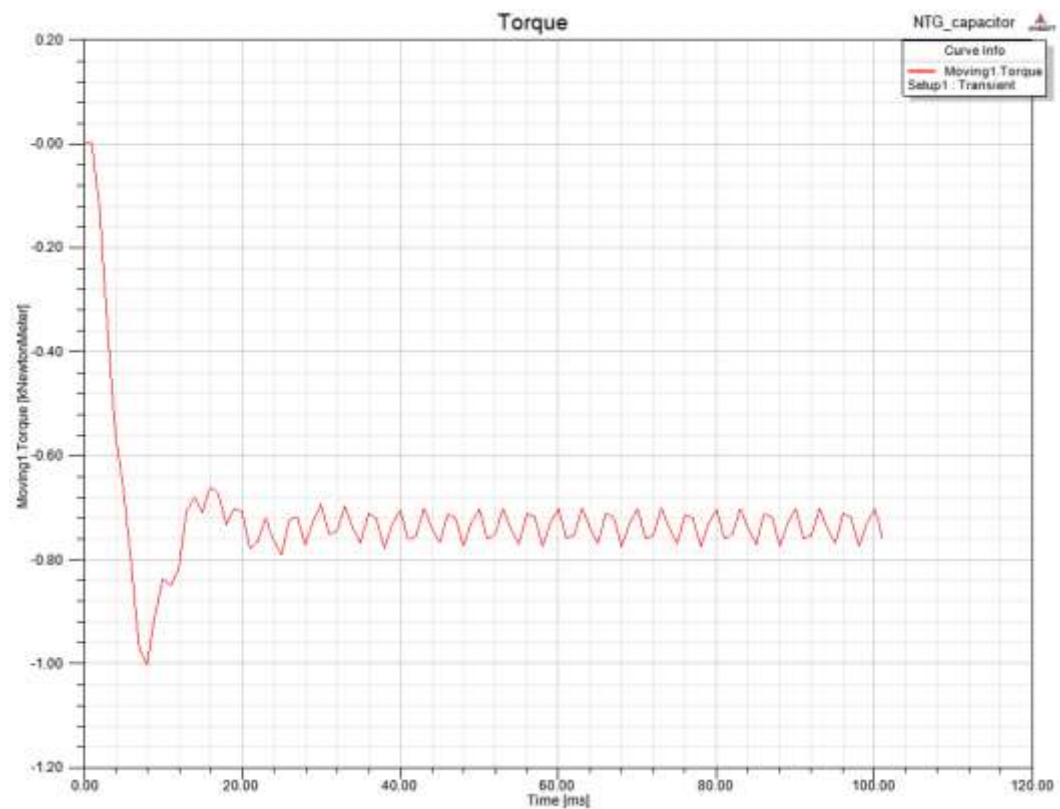


Рисунок 2.19 – Моментна характеристика

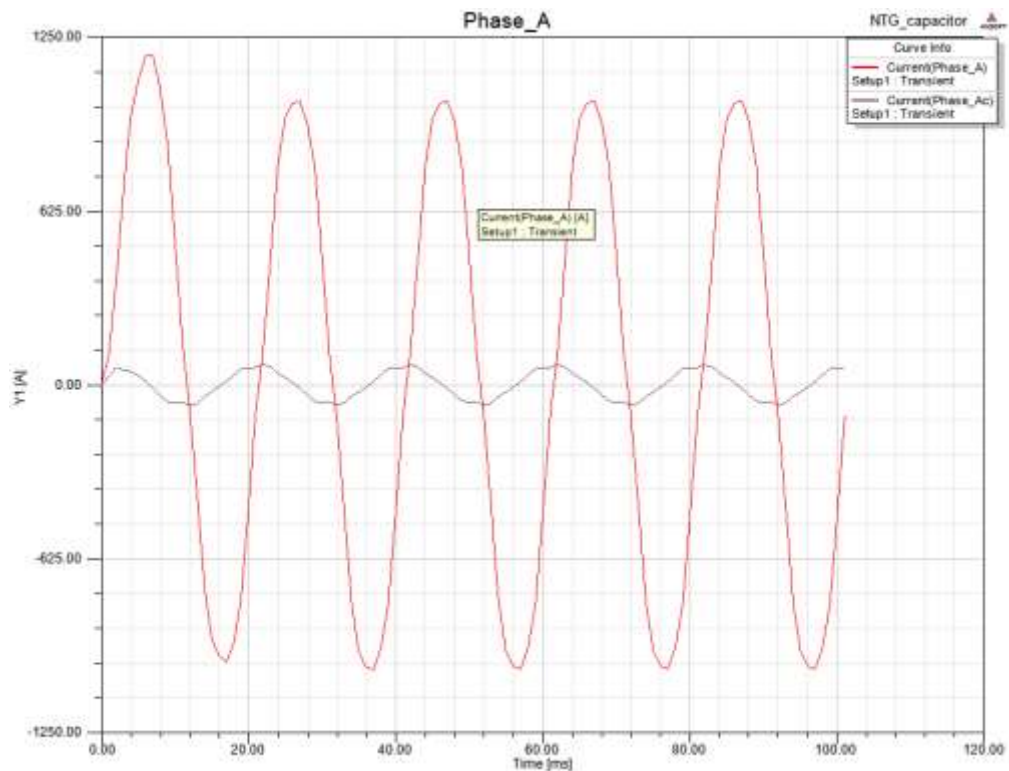


Рисунок 2.20 – Залежності струмів фази статора від часу

Для визначення коефіцієнту потужності був проведений аналіз кривих зміни напруги та струму фази А робочої обмотки статора (рис. 2.21) та компенсованої (рис. 2.12). Коефіцієнт потужності для робочої обмотки складає 0,31, для компенсованої він дорівнює – 0,81. Загальний коефіцієнт потужності перетворювача, який визначається алгебраїчною сумою коефіцієнтів потужності робочої та компенсованої обмоток, складає 1,12. Як бачимо, коефіцієнт потужності значно збільшився у порівнянні із перетворювачем без використання конденсаторів. Більш того, спостерігається перекомпенсація, яка є дуже корисною для мережі живлення.

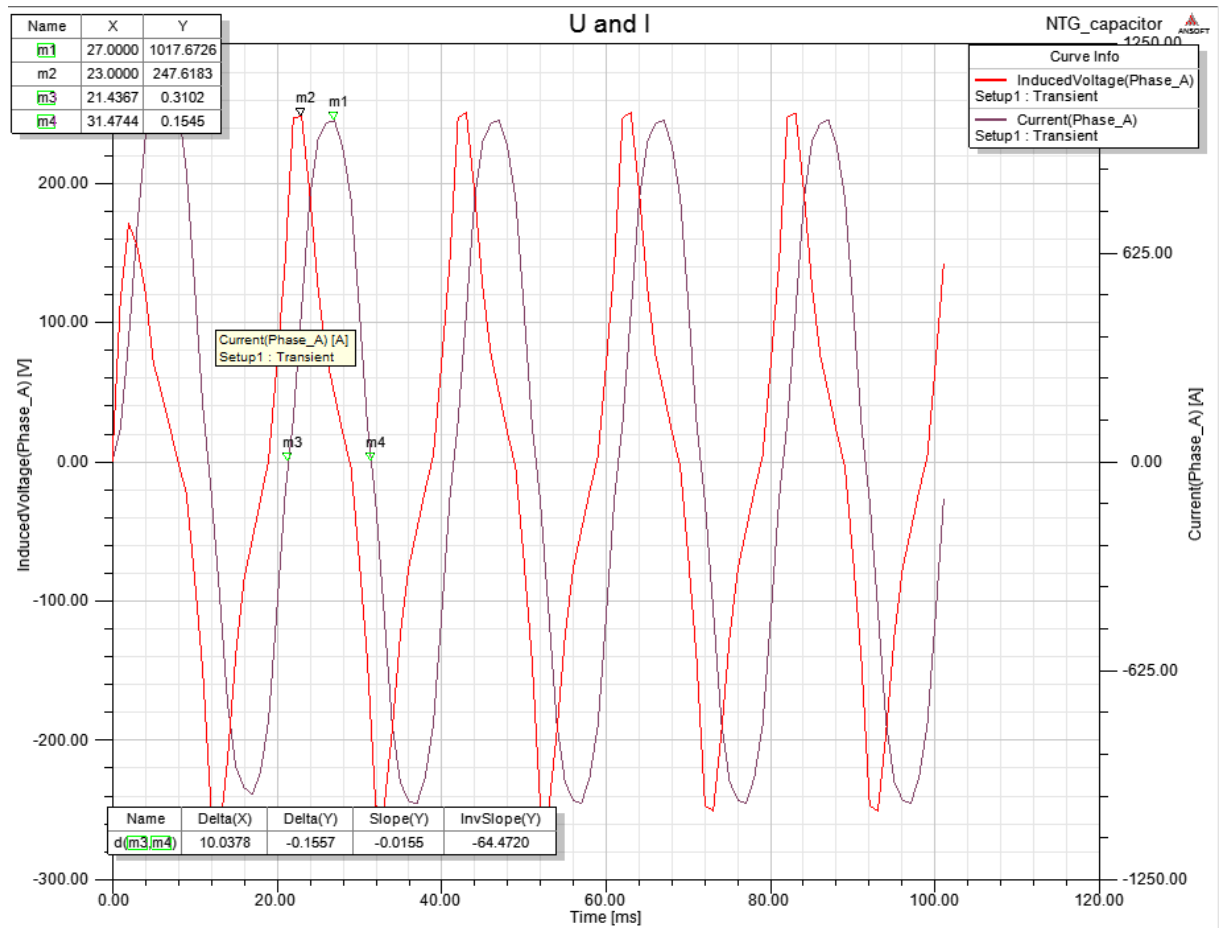


Рисунок 2.21 – До визначення коефіцієнту потужності робочої обмотки

Були визначені характеристики перетворювача із звичайною трифазною обмоткою під час розгону від нульової швидкості до сталої. На рис. 2.23 зображена крива електромагнітного моменту під час розгону, на рис. 2.24 – швидкості від часу. Зміна струмів фаз обмотки статора під час розгону зображена на рис. 2.25.

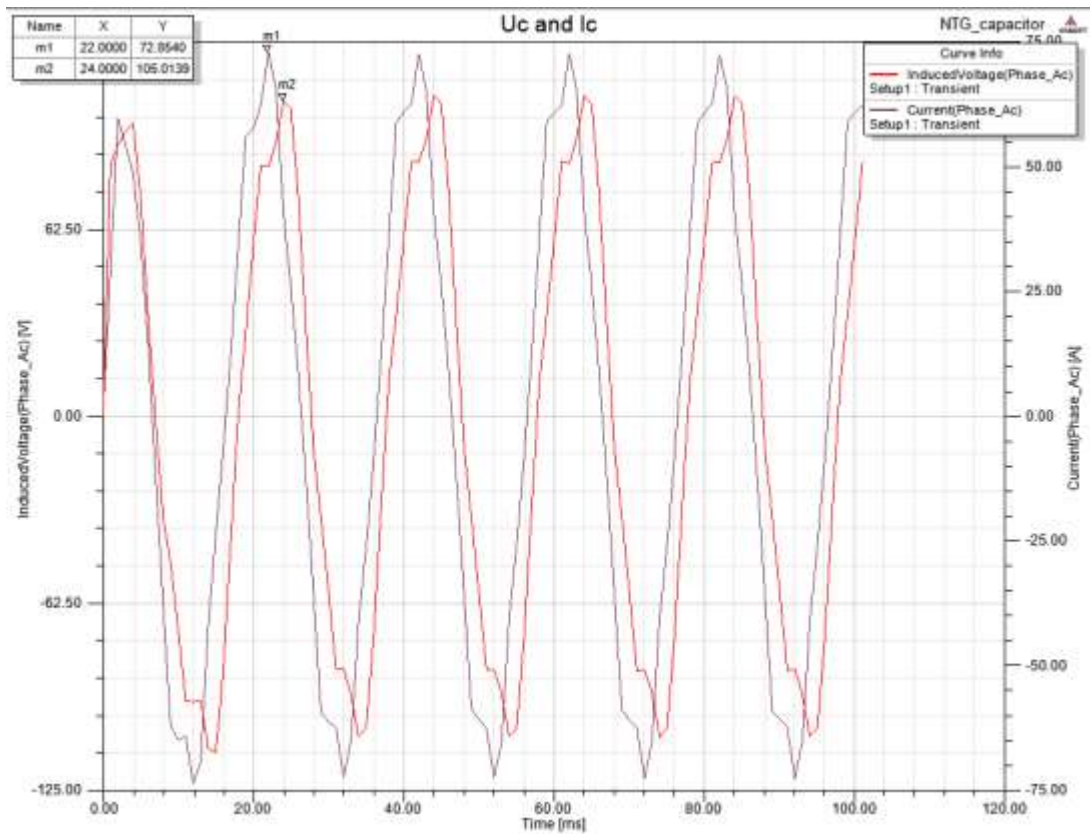


Рисунок 2.22 – До визначення коефіцієнту потужності
компенсованої обмотки

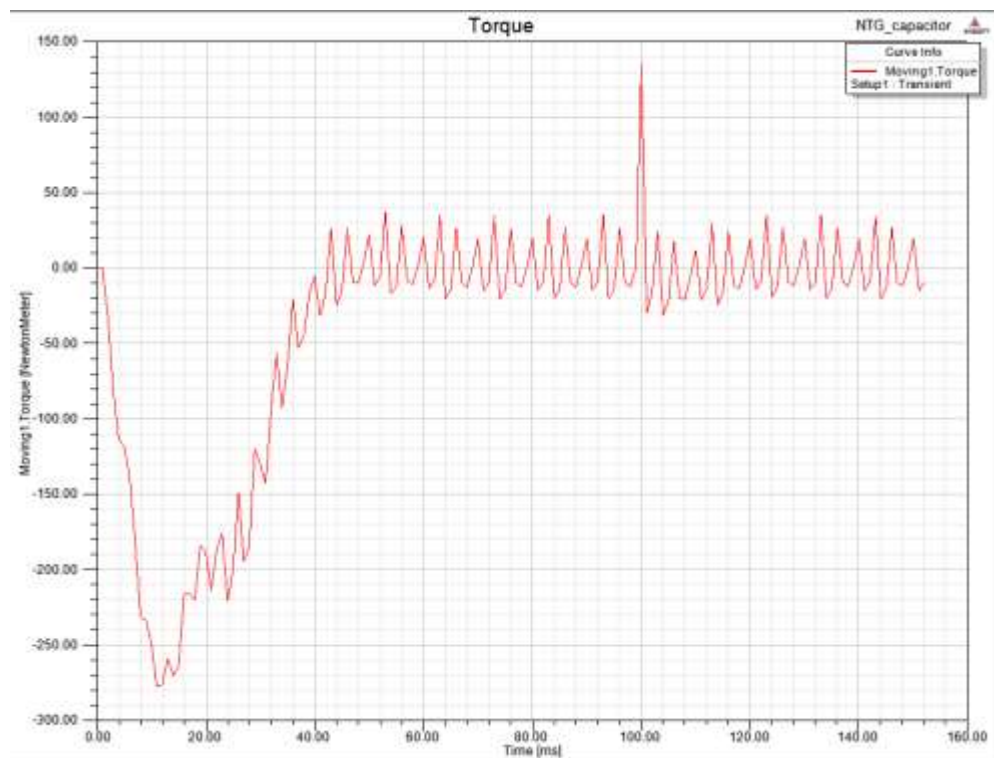


Рисунок 2.23 – Залежність електромагнітного моменту під час розгону

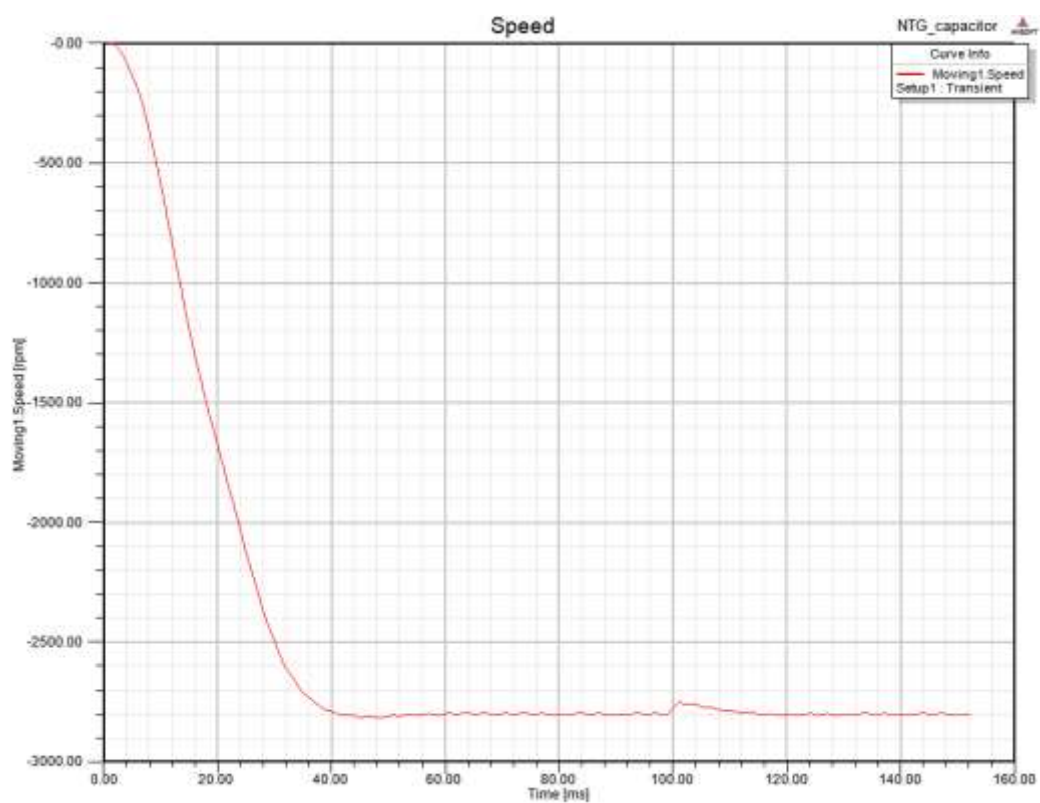


Рисунок 2.24 – Зміна швидкості обертання ротора під час розгону

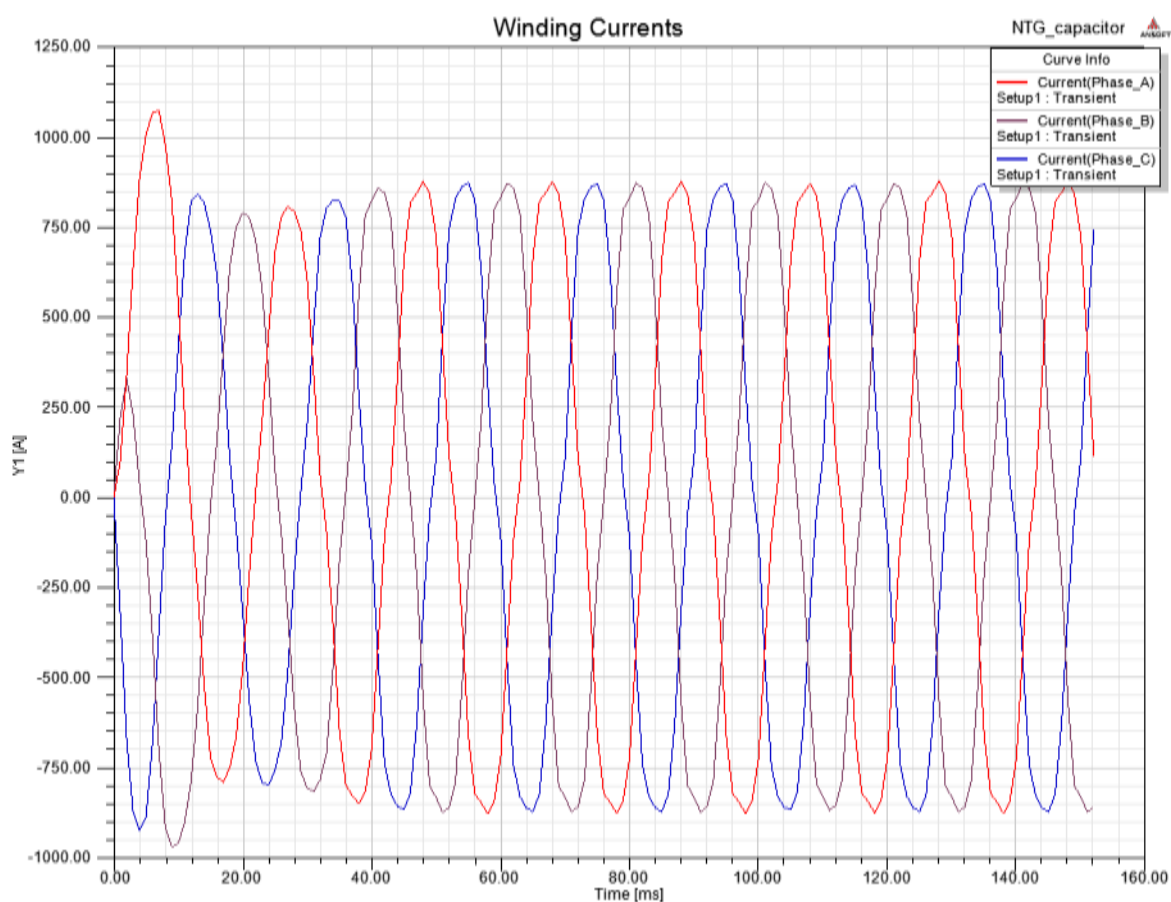


Рисунок 2.25 – Зміна струмів фаз обмотки статора під час розгону

При наявності конденсаторів у схемі живлення, струми спотворюються. Для визначення величини спотворення кривих струмів було виконано гармонійний аналіз у програмі MatLab шляхом розкладання кривої струму у ряд Фур'є. Результат виконання гармонійного аналізу показаний на рис. 2.26.

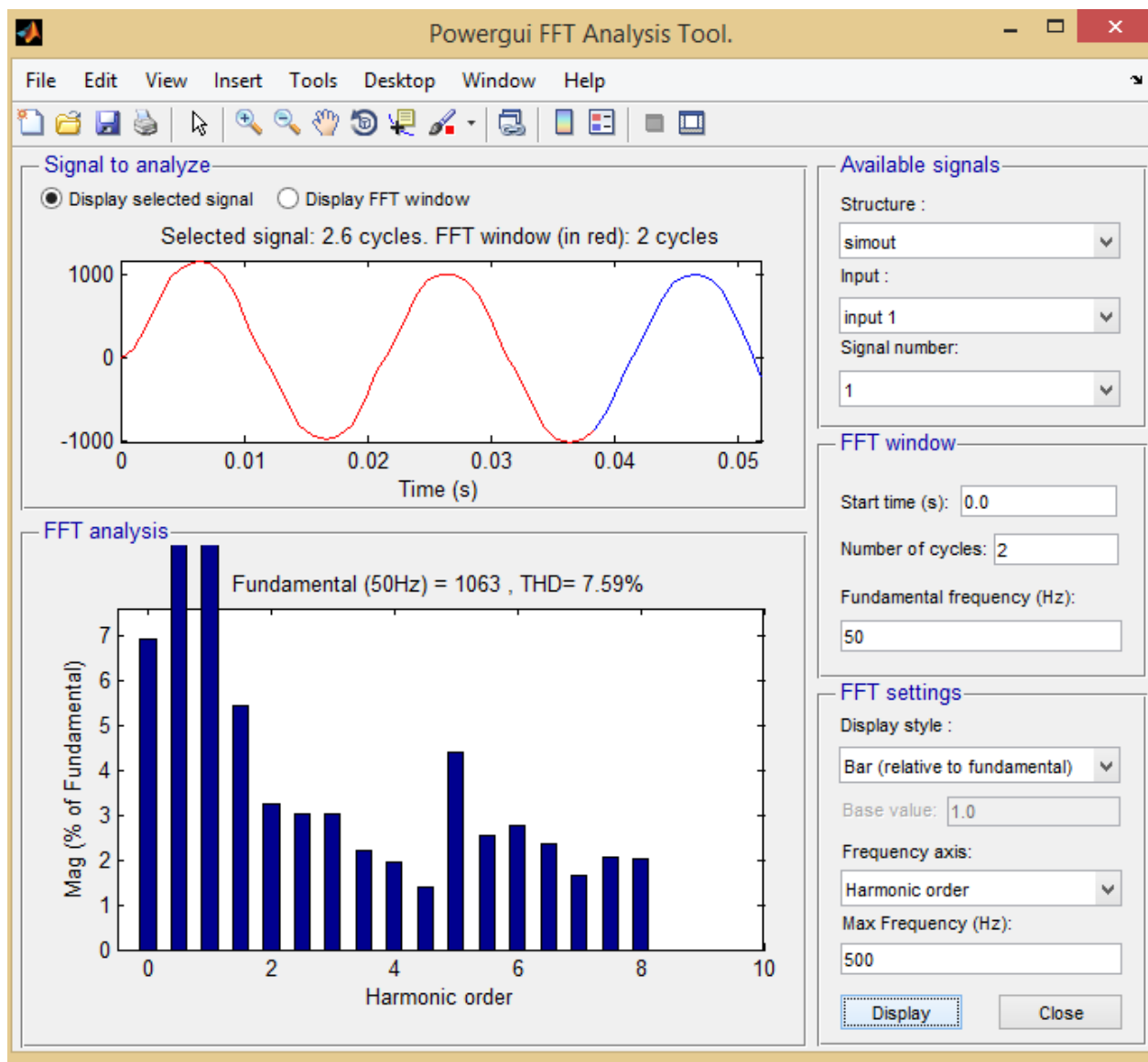


Рисунок 2.26 – Гармонійний аналіз струму фази компенсованої обмотки

2.4 Висновки до розділу 2

Активний хвильовий опір різних конструктивних варіантів феромагнітних роторів визначався шляхом проведення додаткових постпроцесорних розрахунків тривимірної моделі. Результати розрахунку залежності $r_{xв} = f(s)$ для суцільного ротора показали добре узгодження з раніше встановленими залежностями. Встановлено, що величина активного опору ротора зменшується пропорційно значенню \sqrt{s} . При товщині стінки циліндра 10 мм активний хвильовий опір ротора на ділянці значень $s = 1...0,7$ незначно перевищує опір суцільного ротора. При подальшому збільшенні швидкості опір порожнистого ротора знижується менш інтенсивно, що пов'язано з неможливістю подальшого збільшення струмопровідного шару. Зі зменшенням товщини стінки ротора відповідна залежність $r_{xв} = f(s)$ проходить вище і стає більш пологою. Так, активний хвильовий опір порожнистого ротора з товщиною стінки 3,5 мм, мало залежить від ковзання i , при $s = 1$ в 1,75 рази перевищує активний опір суцільного ротора. У цьому випадку, товщина шару в якому протікають вихрові струми, дорівнює товщині стінки циліндра практично у всьому діапазоні зміни ковзання. Опір ротора різко збільшується при малих торцевих поверхнях, що особливо помітно в роторі без дна.

Основний вплив на величину активного опору спричиняє коефіцієнт перфорації ротора $k_{перф}$. Залежності $r_{xв} = f(s)$ для роторів з прямими рядами, однаковим діаметром отворів, але різною кількістю рядів і числом отворів в ряду, проходять паралельно одна інший.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З КОНДЕНСАТОРАМИ ТА ШЕСТИФАЗНОЮ ОБМОТКОЮ

3.1 Моделювання роботи електромеханічного перетворювача

У якості альтернативного підходу була розглянута можливість живлення електромеханічного перетворювача при наявності шестифазної обмотки з послідовно увімкненими до однієї з напівфаз конденсаторами при підключенні до звичайної трифазної мережі живлення. Принципова схема такої обмотки зображена на рис. 3.1.

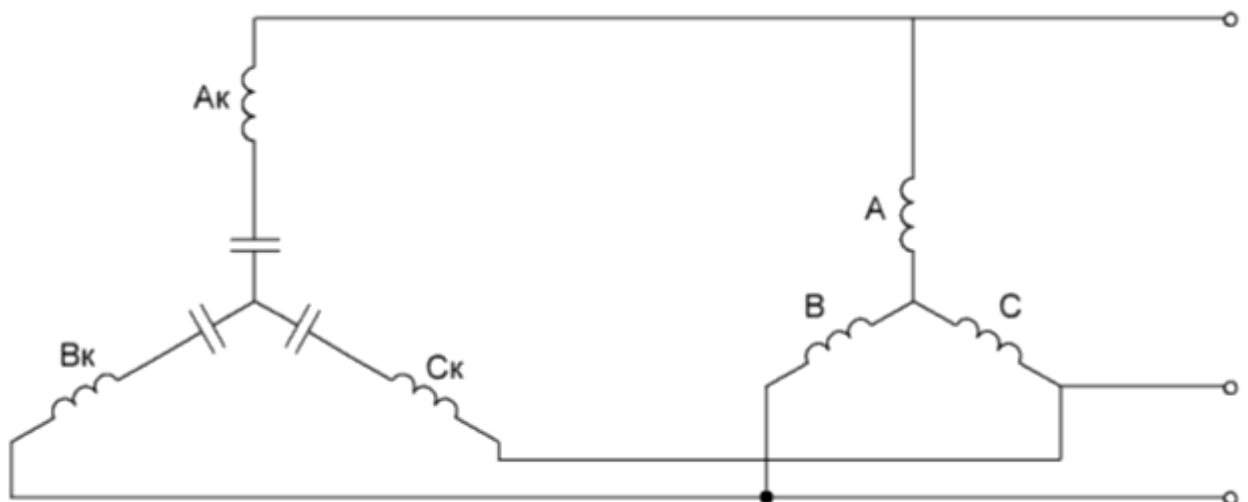


Рисунок 3.1 – Шестифазна обмотка ЕМП з послідовною компенсацією

Розташування робочої та компенсованої фаз по пазах статора не змінюється, як і не змінюється ємність конденсаторів, яка також складає 250 мкФ. Схема живлення для принципової схеми, представленої на рис. 3.1, зображена на рис. 3.2.

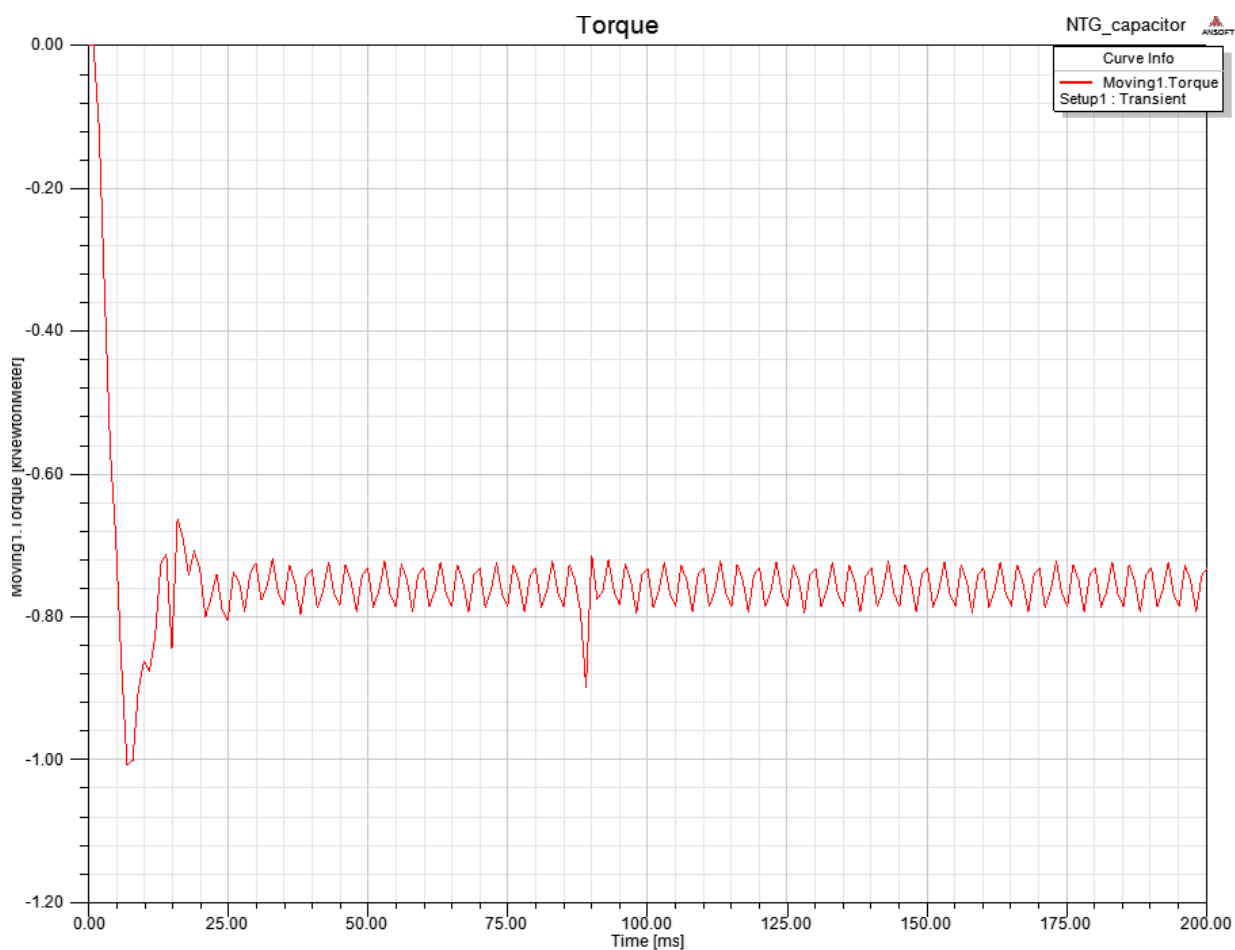


Рисунок 3.3 – Моментна характеристика ЕМП з шестифазною обмоткою

Для визначення коефіцієнту потужності був проведений аналіз кривих зміни напруги та струму фази А робочої обмотки статора (рис. 3.5) та компенсованої (рис. 3.6). Коефіцієнт потужності для робочої обмотки складає 0,69, для компенсованої він дорівнює 0. Загальний коефіцієнт потужності ЕМП, який визначається алгебраїчною сумою коефіцієнтів потужності робочої та компенсованої обмоток, складає 0,69. Як бачимо, коефіцієнт потужності незначно збільшився у порівнянні із ЕМП без використання конденсаторів. Окремо були проведені розрахунки при інших значеннях ємності, які дали кращий результат (розглянуто нижче).

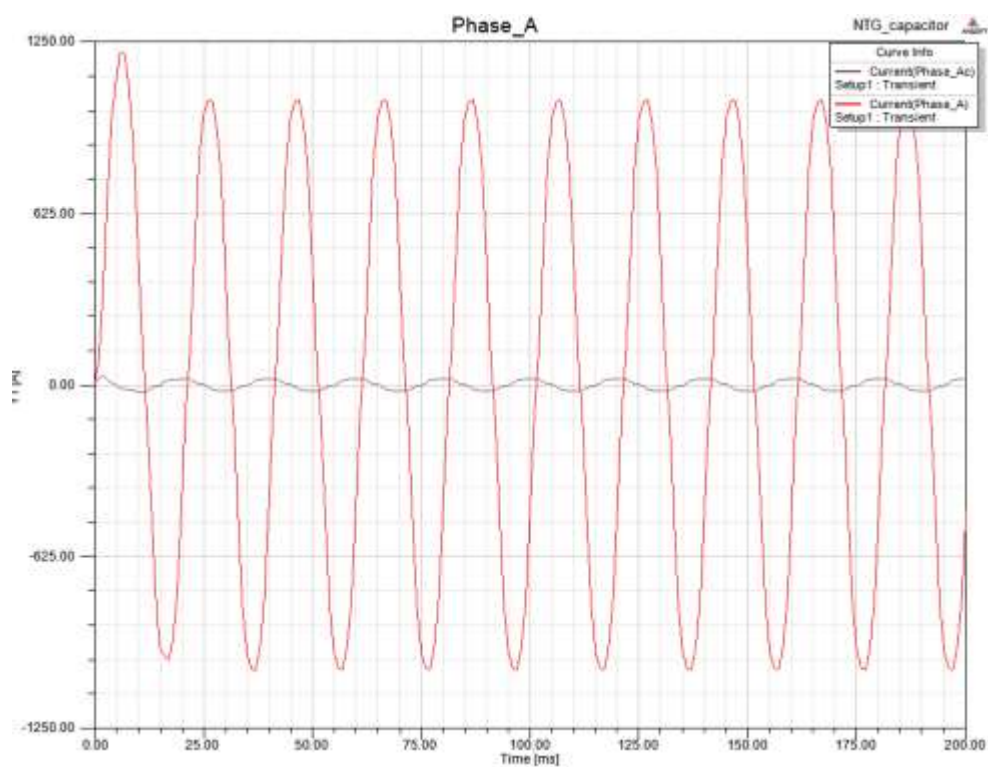


Рисунок 3.4 – Залежності струмів фази статора від часу

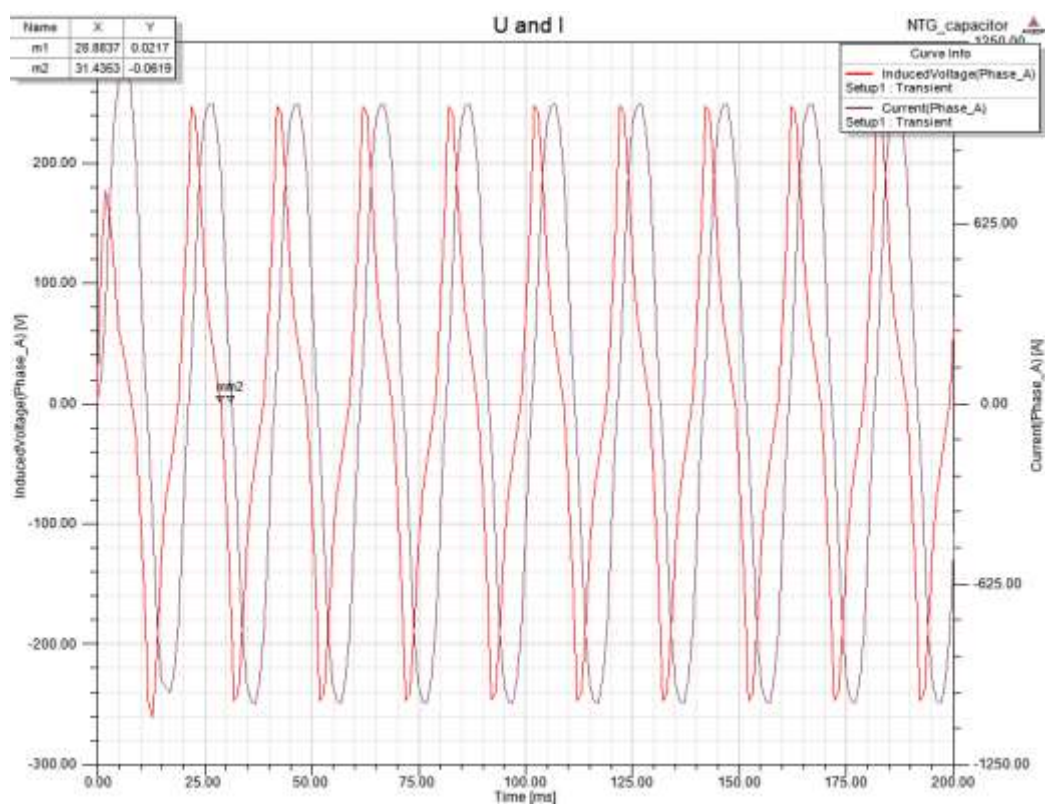


Рисунок 3.5 – До визначення коефіцієнту потужності ЕМП робочої обмотки

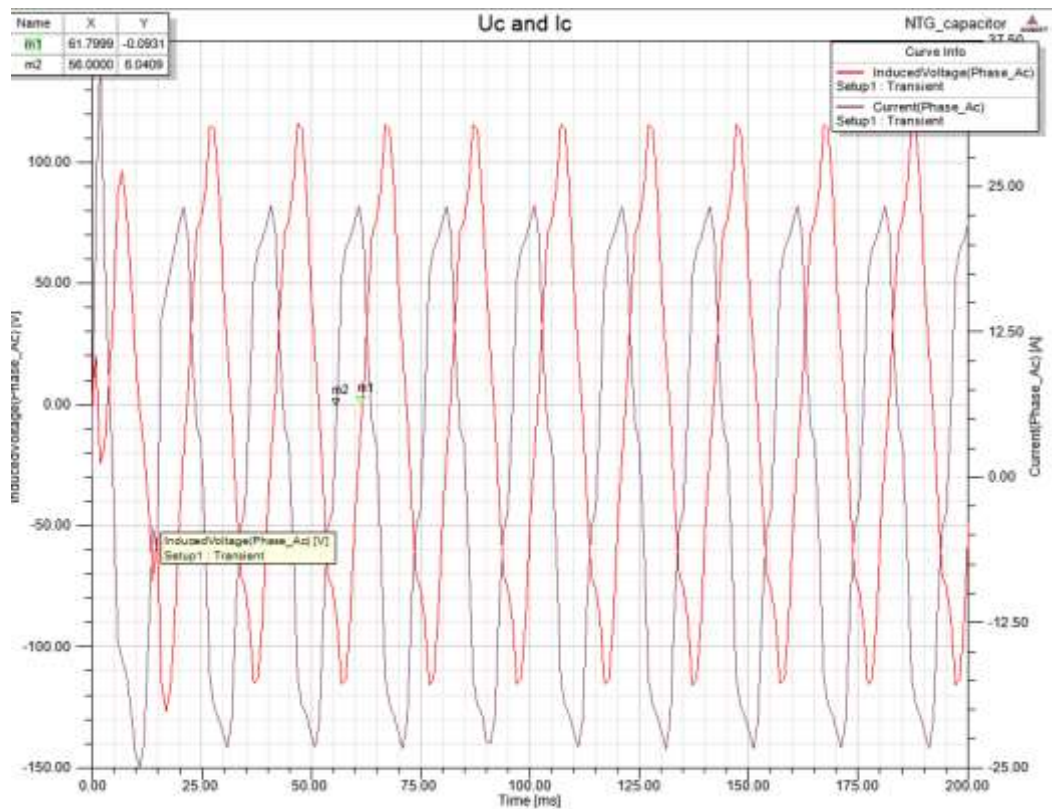


Рисунок 3.6 – До визначення коефіцієнту потужності ЕМП
компенсованої обмотки

Були визначені характеристики ЕМП із звичайною трифазною обмоткою під час розгону від нульової швидкості до сталої. На рис. 3.7 зображена крива електромагнітного моменту під час розгону, на рис. 3.8 – швидкості від часу. Зміна струмів фаз обмотки статора під час розгону зображена на рис. 3.9.

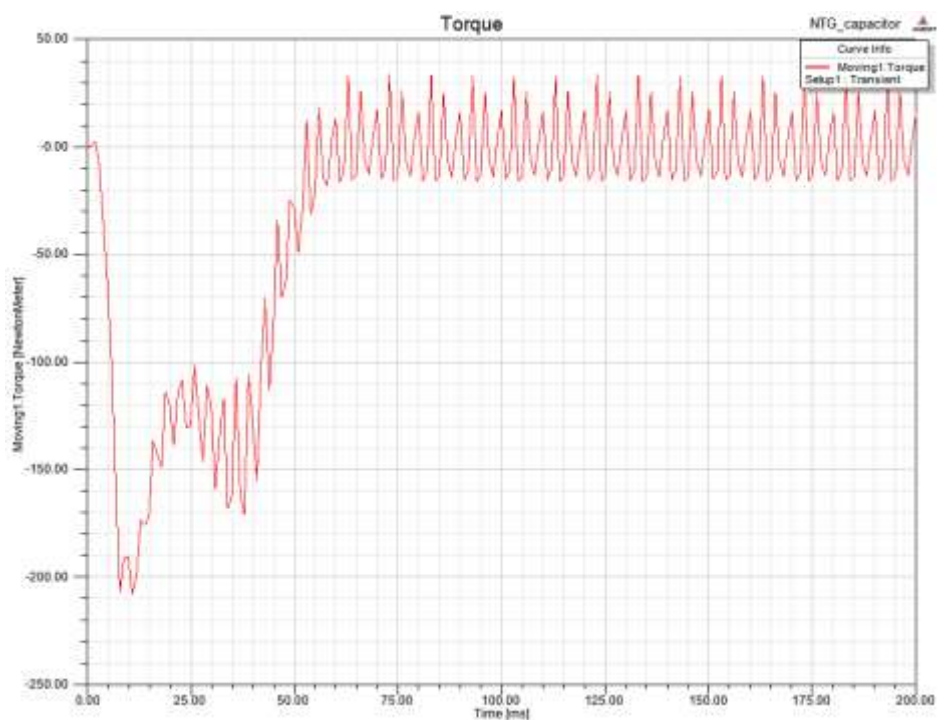


Рисунок 3.7 – Залежність електромагнітного моменту під час розгону

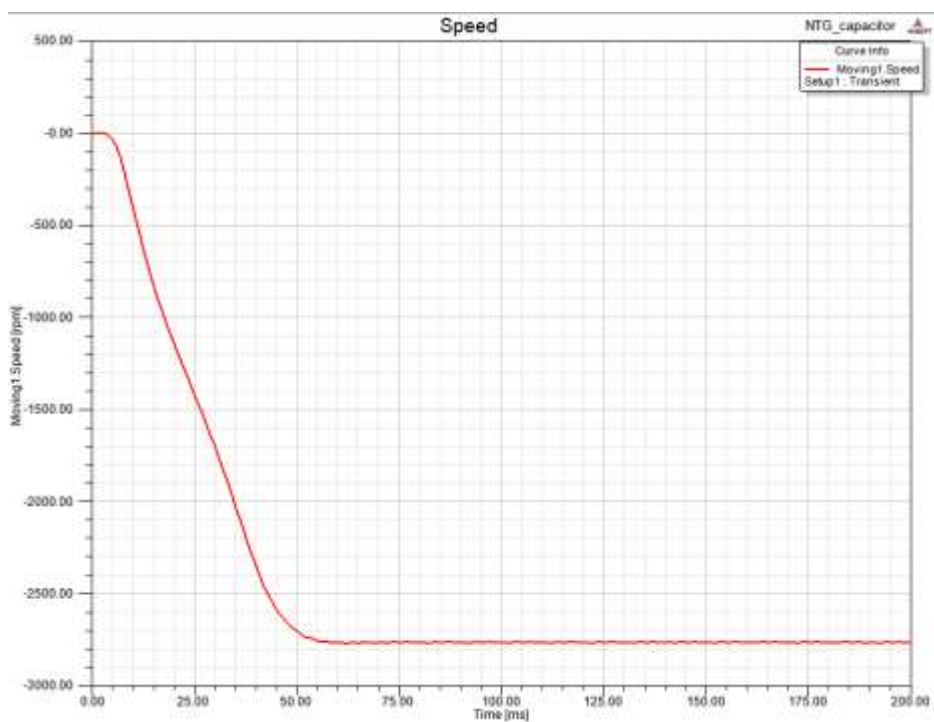


Рисунок 3.8 – Зміна швидкості обертання ротора під час розгону

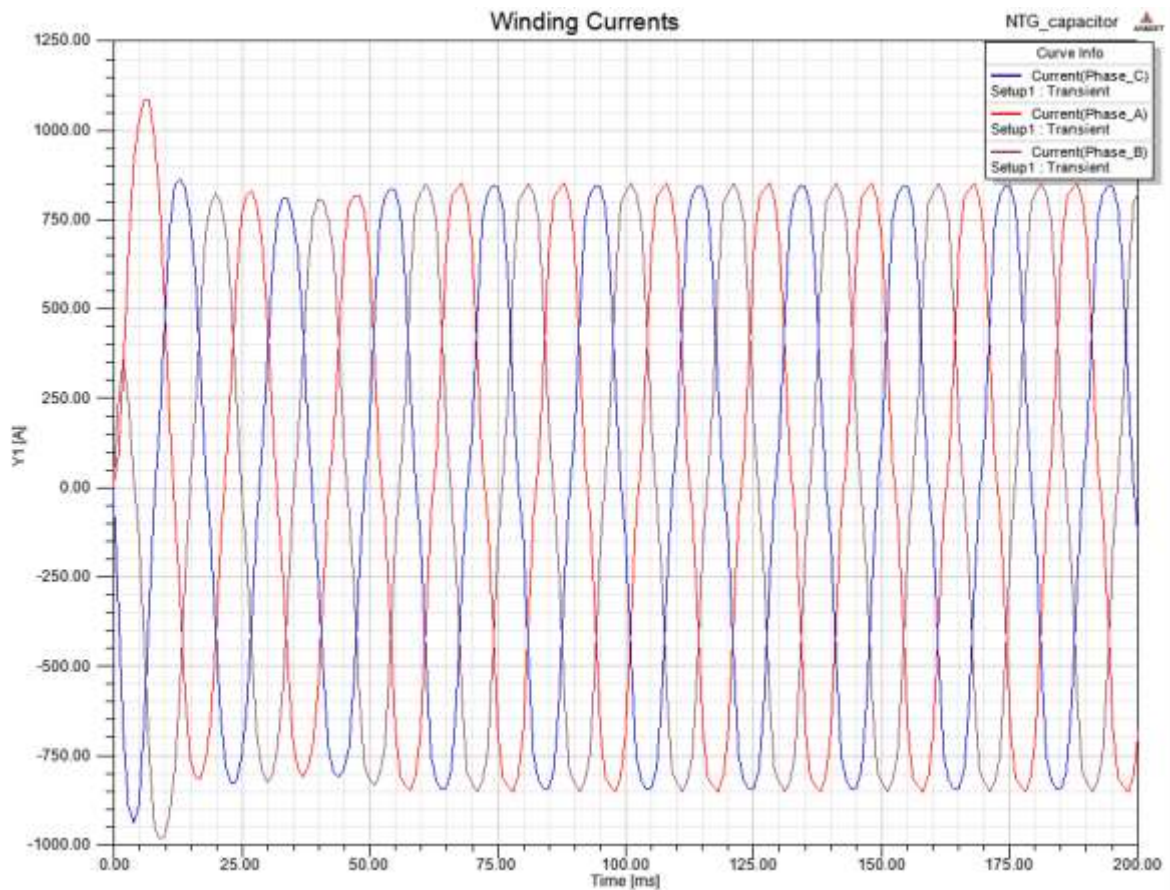


Рисунок 3.9 – Зміна струмів фаз обмотки статора під час розгону

3.2 Порівняння результатів досліджень

За результатами досліджень було виконано моделювання та чисельний розрахунок ЕМП із звичайною трьохфазною обмоткою, з компенсованою обмоткою та з шестифазною компенсованою обмоткою. Порівняльні результати досліджень наведені у табл. 3.1 та табл. 3.2.

Таблиця 3.1 – Результати досліджень ЕМП

| Найменування | I_n , А | I_{\max} , А | I_d , А | M_n , Нм | M_c , Нм |
|---|-----------|----------------|-----------|------------|------------|
| Звичайна обмотка 2000 об/хв | 460 | 265 | 187 | 170 | 155 |
| Звичайна обмотка, розгон | 450 | 260 | 183 | 320 | 10 |
| Конденсатор 250 мкФ, 2000 об/хв | 1180 | 1000 | 700 | 1000 | 730 |
| Конденсатор 250 мкФ розгон | 1015 | 770 | 544 | 280 | 10 |
| 6-ф обмотка, конденсатор 250 мкФ, 2000 об/хв | 1200 | 1000 | 700 | 1000 | 760 |
| 6-ф обмотка, конденсатор 250 мкФ розгон | 1100 | 850 | 600 | 210 | 15 |
| 6-ф обмотка, конденсатор 3000 мкФ, 2000 об/хв | 1200 | 1040 | 730 | 1100 | 850 |
| 6-ф обмотка, конденсатор 3000 мкФ розгон | 1100 | 950 | 670 | 200 | 15 |

Таблиця 3.2 – Результати досліджень ЕМП

| Найменування | t_p , мс | Φ_1 , град | Φ_k , град | $\cos\Phi_{\text{сум}}$ |
|---|------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| Звичайна обмотка 2000 об/хв | 40 | 54 | - | 0.59 |
| Звичайна обмотка, розгон | 60 | 54 | - | 0.59 |
| Конденсатор 250 мкФ, 2000 об/хв | 20 | 72 | -36 | 1.12 |
| Конденсатор 250 мкФ розгон | 40 | 90 | 26 | 0.90 |
| 6-ф обмотка, конденсатор 250 мкФ, 2000 об/хв | 20 | 46 | -90 | 0.69 |
| 6-ф обмотка, конденсатор 250 мкФ розгон | 60 | 90 | -108 | -0.31 |
| 6-ф обмотка, конденсатор 3000 мкФ, 2000 об/хв | 20 | 72 | -108 | 0 |
| 6-ф обмотка, конденсатор 3000 мкФ розгон | 60 | 75 | -36 | 1.07 |

У табл. 3.1 та табл. 3.2 прийняті наступні умовні позначення:

I_p – пусковий струм, $I_{\text{макс}}$ – максимальний струм, I_d – діюче значення струму, M_p – пусковий момент, M_c – сталі значення моменту, t_p – час розгону до сталого режиму обертання, Φ_1 – фазовий зсув робочої обмотки, Φ_k – фазовий зсув компенсованої обмотки, $\cos\Phi_{\text{сум}}$ – результуюче значення коефіцієнта потужності.

Як видно з результатів досліджень, застосування конденсаторів у схемі живлення ЕМП з масивним феромагнітним ротором призводить до значного підвищення коефіцієнту потужності. Окрім того, майже у 3 – 4 рази збільшується електромагнітний момент. Разом з цим, суттєво зростають струму в обмотці та спотворюється форма струмів обмотки, що призводить до виникнення паразитних гармонійних складових.

Слід підкреслити, що у випадках недотримання умов оптимальної компенсації спостерігається різке спотворення магнітного поля у повітряному проміжку, форми струмів в обмотці статора та зниження коефіцієнту потужності.

Просторовий зсув компенсаційної обмотки відносно основної обмотки статора змінює фазу її ЕРС, величину і фазу напруги і струму ємності, що у свою чергу змінює фазу додаткової ЕРС в роторі, надаючи вплив на вигляд механічної характеристики аж до вилучення негативного ступеня її нахилу. Компенсаційна обмотка, як і робоча стає енергонесучою за активною енергією з передаванням її у ротор.

Теоретичні дослідження і розрахунки на базі математичної моделі ЕМП, лабораторні експерименти підтвердили правильність викладених принципів внутрішньої компенсації реактивної потужності в асинхронних двигунах з масивним ротором, до яких відноситься ЕМП. Результати досліджень вказують на практичну доцільність застосування ємнісної компенсації для підвищення ефективності ЕМП.

Таким чином, модернізація ЕМП за технологією КАД при умовах оптимальної компенсації, сприяє зниженню додаткових втрат потужності та підвищенню енергетичних показників та значному підвищенні коефіцієнту потужності.

3.3 Заходи з безпечної експлуатації електромеханічного перетворювача для технології гідрогенізації вугільного палива

3.3.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Під час роботи на виробництві на людину можуть впливати один, або низка небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Безпека того чи іншого технологічного процесу може бути визначена за їх кількістю і за ступенем небезпеки кожного зокрема. Безпека праці на виробництві визначається ступенем безпеки окремих технологічних процесів.

Залежно від часу дії та інтенсивності виробничі чинники можуть бути небезпечними або шкідливими. У разі миттєвої дії чинник стає небезпечним, а при тривалому впливі він є шкідливим.

Небезпечним називають виробничий чинник, дія якого на організм працюючого у відповідних умовах може призводити до травм або іншого раптового, різкого погіршення стану здоров'я.

Шкідливим називається виробничий чинник, дія якого на організм працюючого може призводити у певних умовах до захворювання чи зниження рівня працездатності.

Електромеханічний перетворювач може експлуатуватися у вибухонебезпечних приміщеннях, в яких за умов технологічного процесу можуть утворюватися вибухонебезпечні суміші.

По категорії виробництв по вибухопожежонебезпеці, виробництво, у якому буде використовуватися агрегат, відноситься до категорії А (вибухопожежонебезпечне виробництво).

Клас вибухонебезпечності зони, де можливе розміщення агрегату, В-І.

Розряд точності зорових робіт V-B. Характеризується періодичним спостереженням за станом устаткування і комунікацій при постійному перебуванні людей у приміщенні. При цьому розряді робіт освітленість контрасту об'єкта розрізнення з фоном і від характеристик фону не залежить. Система освітлення загальна, однак застосовуються також переносні освітлювачі.

Рівень звуку, який випромінює агрегат при роботі становить 90 дБ (А). Рівень шуму, який випромінює агрегат, не перевищує допустимих норм.

3.3.2 Заходи по безпечній техніці і безпеці праці

Вибухонебезпечність електромеханічного перетворювача забезпечується спеціальними засобами, що виключають можливість вибуху внаслідок його несправності.

Вибухобезпечність забезпечується надійним захистом вибухонебезпечного навколишнього середовища від можливого проникнення назовні з оболонки статора і коробки виводів полум'я вибуху при аварійних ситуаціях усередині оболонок.

Ущільнення коробки виводів здійснюється за допомогою гумових прокладок, які необхідні для захисту від проникнення у середину коробки млу і вологи, що викликає струми витоку, місцеві дуги або іскріння на неізольованих контактних затисках.

Для забезпечення надійності агрегату необхідно виконувати планово-запобіжний ремонт. При виконанні перевірок і оглядів електроустаткування необхідно виміряти опір ізоляції обмоток мегомметром.

Для зниження механічного шуму застосовуються деталі з не шумливих матеріалів, вібропоглинаючі прокладки й еластичні муфти. Зниження аеродинамічного шуму здійснюється за допомогою приєднаних або вбудованих глушителів.

Для попередження поширення вібрації на робочі місця проводяться технічні заходи, що полягають у пристрої спеціальних фундаментів або амортизаторів.

Для запобігання нещасних випадків проводиться інструктаж з охорони праці та пожежній безпеці, а також перевіряється рівень знань обслуговуючого персоналу та робітників.

Безпека ремонтних робіт забезпечується відключенням агрегату від джерел, які могли б привести його в дію.

При зупинці на ремонт на пускових пристроях обов'язкове вивішування плаката "Не включати, працюють люди!"

Обладнання в ремонт готується силами виробничого персоналу цеху: начальник зміни і механік цеху передають підготоване обладнання за актами керівникові ремонтних робіт (при аварії плюс аварійний акт). Відремонтоване обладнання також приймається за актом (або записом у журналі).

3.3.3 Охорона навколишнього середовища

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

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

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

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

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

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

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

- вилучення шкідливих речовин в технологічних процесах, заміна шкідливих речовин менш шкідливими;
- удосконалення технологічних процесів та устаткування (застосовування замкнених технологічних циклів, неперервних технологічних процесів, мокрих способів переробки пиломатеріалів тощо);
- автоматизація і дистанційне управління технологічними процесами та обладнанням, що включає безпосередній контакт працюючих з шкідливими речовинами;

- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок місцевої вентиляції;
- поливання водою, з різними активними добавками, автодоріг;
- дотримання встановленого технологічного режиму і поліпшення виробничих процесів;
- зволоження або покриття поверхонь, що порохатяться (автодоріг, складів і тощо);
- створення санітарно-захисних зон і дотримання санітарного режиму (впорядкування, озеленення) на території підприємства і поблизу нього;
- здійснення комплексу організаційно-технічних заходів щодо охорони навколишнього середовища.

3.4 Висновки до розділу 3

За результатами досліджень було виконано моделювання та чисельний розрахунок ЕМП із звичайною трьохфазною обмоткою, з компенсованою обмоткою та з шестифазною компенсованою обмоткою. Застосування конденсаторів у схемі живлення ЕМП з масивним феромагнітним ротором призводить до значного підвищення коефіцієнту потужності. Окрім того, майже у 3 – 4 рази збільшується електромагнітний момент. Разом з цим, суттєво зростають струму в обмотці та спотворюється форма струмів обмотки, що призводить до виникнення паразитних гармонійних складових.

У випадках недотримання умов оптимальної компенсації спостерігається різке спотворення магнітного поля у повітряному проміжку, форми струмів в обмотці статора та зниження коефіцієнту потужності.

Результати досліджень вказують на практичну доцільність застосування ємнісної компенсації для підвищення ефективності ЕМП.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано огляд існуючих технологій виготовлення водовугільного палива. Розроблено алгоритм розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача для технології гідрогенізації вугільного палива. Отримано та проаналізовано результати кінцево-елементного розрахунку активного хвильового опору порожнистого ротора електромеханічного перетворювача. Наведено заходи з безпечної експлуатації електромеханічного перетворювача для технології гідрогенізації вугільного палива.

Отримані залежності активного хвильового опору від ковзання для порожнистих перфорованих роторів електромеханічного перетворювача дозволять коректно прогнозувати вихідні характеристики електромеханічних перетворювачів. Запропоновано вираз для визначення активного хвильового опору порожнистого перфорованого ротора.

Розглянута 3D модель може бути використана для проектування складної геометрії ротора з прогнозованими фізичними властивостями та електромеханічними характеристиками перетворювача.

За результатами виконання кваліфікаційної роботи було вирішено всі поставлені завдання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: / упоряд. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2018. 320 с.

3. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипченко, О. М. Цимбал. Харків : ХНУРЕ, 2021. 50 с.

4. Грицюк В., Цуркіна О., Малишев М. Визначення впливу нагріву ротора на механічну характеристику асинхронного двигуна з порожнистим ротором // VI Міжнародна конференція Виробництво & Мехатронні системи (M&MS), Харків, Україна, – 2022, С. 34-35.

5. M. Garibaldi, et al., “Free-Form Design of Electrical Machine Rotor Cores for Production Using Additive Manufacturing,” J. Mech. Des., vol. 141, no. 7, pp. 1-13, 2019.

6. S. Urbanek et al., “Additive Manufacturing of a Soft Magnetic Rotor Active Part and Shaft for a Permanent Magnet Synchronous Machine,” 2018 IEEE Transp. Electr. Conf. Expo, pp. 668–674, 2018.

7. M. Zablodskiy, A. Zhiltsov, I. Kondratenko, and V. Gritsyuk, “Conception of efficiency of heat electromechanical complex as hybrid system,”

Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 IEEE First Ukraine Conference, 2017, pp. 399–404.

8. M. Zablodskiy et al. “Analysis of 3D eddy current distribution in a hollow rotor of an electromechanical converter,” 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 561-564, 2020.

9. Gritsyuk V., Nevliudov I., Zablodskiy M., Demska N. Numerical Calculation of the Electromagnetic Torque of an Induction Motor with a Hollow Rotor // XVII-th International Conference Perspective technologies and methods in MEMS design, Polyana, Ukraine, 12-16 May 2021, pp. 124-129.

10. Олейніков І. Електровибухова сушка / Олейніков І., Яковлєв М. // Харчова промисловість. 2018. – № 12. – С. 48-49.

11. Szczygieł, M. Rotary-linear induction motor based on the standard 3-phase squirrel cage induction motor-constructional and technological features. URL: http://www.ejournals.eu/sj/index.php/Cz/article/viewFile/5531/pdf_247 (дата звернення 08.12.22).

12. Ставінський, А.А. Цільові функції порівняльного аналізу енергетичної ефективності електромагнітних систем асинхронних двигунів із внутрішніми та зовнішніми роторами. URL: <http://eie.khpi.edu.ua/article/view/38305> (дата звернення 09.12.22).

13. Zablodskiy N. Polyfunctional electromechanical energy transformers for technological purposes. URL: <http://link.springer.com/article/10.3103/S1068371216030123> (дата звернення 10.12.22).

14. A. Zhiltsow, A. Bereziuk, S. Głowacki / The development of technically energy-efficient electrical complex for drying bulk materials based on induction type heat generator // Skróty referatów i posterów prezentowanych na zorganizowanej z okazji Jubileuszu 40-lecia Wydziału Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie, Konferencji Naukowej pt. „Inżynieria produkcji rolniczej i leśnej”. Warszawa 8-9 czerwca 2017 roku. – 79-80 p.

15. 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.

16. 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.

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.

18. O. Lyashuk, M. Sokil, Yu. Vovk, A. Tson, A. Gupka, O. Marunych, “Torsional oscillations of an auger multifunctional conveyor’s screw working body with consideration of the dynamics of a processed medium continuous flow”, *Ukrainian food journal*, Vol. 7(3), pp. 499-510, 2018.

19. Дзюндзюк Б. В. Охорона праці. Збірник задач: навч. посібник/ Б. В. Дзюндзюк. – Харків: ХНУРЕ, 2006. – 236 с.