

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ткачук Ігор Валерійович

УДК 621.313.84

ДИСЕРТАЦІЯ

Електромеханічна система для перетворення низькопотенціальної механічної
енергії в електричну
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
в галузі знань 14 «Електрична інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело _____ І.В.Ткачук

Науковий керівник Коваленко Михайло Анатолійович, кандидат технічних наук,
доцент.

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Ткачук І. В. Електромеханічна система для перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка в галузі знань 14 «Електрична інженерія». - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Дисертаційне дослідження присвячене дослідженню та вирішенню актуального наукового завдання, що полягає в розробці системи перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну на основі магнітної передачі у складі автономної вітроустановки шляхом математичного та імітаційного моделювання.

В роботі проведено літературно-патентний пошук за темою дисертаційного дослідження. Проведено оцінку існуючих типів механічних передач та на основі цього аналізу вибрано оптимальний варіант магнітної передачі. Найбільш перспективними топологіями магнітних передач є планетарна, планетарна коаксіальна та циклоїдна. У планетарній передачі використовується приблизно 50% більше постійних магнітів, ніж у інших перспективних топологіях. Циклоїдна магнітна передача застосовна практично лише у двоступінчастому виконанні (планетарна передача за схемою $2k-h$), що знижує її щільність моменту до двох раз. Принципова наявність ексцентриситету в циклоїдній магнітній передачі породжує вібрації та некомпенсовані радіальні електромагнітні сили, що зменшують ресурс підшипників. Магнітні передачі коаксіальної планетарної топології можуть бути виконані з мінімальними радіальними електромагнітними силами, а співвісне розташування частин, що обертаються, дозволяє не вдаватися до додаткових пристроїв для зняття моменту з її вихідного валу як у циклоїдній передачі. Її недоліками є наявність пульсацій моменту і складна технологія виготовлення проміжного магнітного колеса (модулятора). Існуючі методики проєктування магнітних передач відносяться до 1970-х років і вимагають значної переробки з урахуванням

останніх досягнень як у галузі матеріалознавства, так і в галузі методів розрахунку магнітних систем. Існуючі сучасні методики моделювання та відомі результати досліджень магнітних передач не дають повного уявлення про складні електромагнітних та механічних процесів при перетворенні енергії та не дозволяють проводити проєктування магнітних передач та достовірно оцінювати їх ефективність. Відомі сучасні дослідження детально не торкаються питань конструктивного виконання магнітних передач для промислового застосування та методики їх експериментальних досліджень.

В роботі розроблено математичну модель та методику розрахунку максимального моменту магнітної передачі та граничних станів магнітної системи в статичному режимі, які дозволяють обґрунтовано вибрати основні розміри магнітопроводів та постійних магнітів. Розроблено математичні моделі та методику аналізу гармонійного складу магнітного поля в немагнітних проміжках магнітної передачі, на підставі яких обґрунтовано вимоги щодо конструктивного виконання елементів магнітної системи, а також математичні моделі, що дозволяють проводити розрахунок магнітної системи з урахуванням крайових ефектів, на підставі якого обґрунтовано вимоги щодо розташування конструктивних елементів магнітних передач щодо їх магнітних систем. Розроблено аналітичну методику та чисельні математичні моделі для визначення основної частоти зубчастого моменту магнітної передачі, а також для розрахунку магнітних втрат у магнітній передачі та отримано кількісні оцінки впливу різних конструктивних рішень на її ефективність.

В результаті виконання дослідження, що базуються на результатах польового та чисельного імітаційного моделювання запропоновано шляхи покращення показників магнітної передачі:

- кожен полюс статора має бути відокремлений від сусіднього полюса електроізоляційною вставкою;
- постійні магніти статора повинні бути поділені на електрично ізольовані сегменти в осьовому напрямку;

- постійні магніти високошвидкісного ротора повинні бути поділені на сегменти як в осьовому, так і в радіальному напрямку;
- сегменти низькошвидкісного ротора повинні бути електрично ізольованими один від одного та мати фаски.

В дисертаційному дослідженні запропоновано підхід до складання динамічної макромоделі магнітної передачі та методику визначення її параметрів на основі даних польового розрахунку. На підставі запропонованої методики проведено моделювання різних режимів магнітної передачі при роботі на навантаження в Matlab/Simulink. Запропоновано спрощену лінеаризовану динамічну модель магнітної передачі, що дозволяє проводити оцінку власних частот коливань та параметрів згасання на початкових етапах проектування.

За результатами моделювання виявлено ряд особливостей магнітної передачі під час роботи у перехідних режимах:

- пульсації швидкості на високошвидкісному роторі більш ніж у передатне відношення разів менше, ніж на низькошвидкісному роторі;
- початкові фази пульсацій швидкості на низько- та високошвидкісному роторах відрізняються, внаслідок чого спостерігається мінливість миттєвого значення передавального відношення у перехідних режимах;
- частоти коливань та коефіцієнти загасання більшою мірою визначаються параметрами низькошвидкісного ротора магнітної передачі.

Ключові слова. Низькопотенціальна механічна енергія, електромеханічна система, перетворення енергії, редуктор, магнітна передача, магнітний редуктор, постійні магніти, відновлювані джерела енергії, вітроелектрична установка, безмультимплікаційна вітроустановка, автономна вітроустановка, вітроелектрична станція, вітротурбіна, альтернативні джерела енергії, регульовальна характеристика.

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. V. Chumack, V. Bazenov, Oks. Tymoshchuk, M. Kovalenko, S. Tsyvinskyi, Ih. Tkachuk. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 6(5 (114), 56–62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246601> (SCOPUS, Q2)
2. Лихогуб, А., Коваленко, М., Ткачук, І., & Гончарук, А. (2021). Параметрична оптимізація торцевого магнітоелектричного генератора із подвійним статором. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, (1 (5), 33–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.1.06>
3. Ткачук, І., & Коваленко, М. (2021). Електромагнітні редуктори в електромеханічних системах. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, (1 (5), 42–46. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.1.08>
4. Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., & Tkachuk, I. (2020). Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5 (103), 30–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193495> (SCOPUS, Q3)
5. Чумак, В., Коваленко, М., Ткачук, І., & Коваленко, І. (2022). Порівняння синхронних генераторів для автономної бензинової установки. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, (2 (8), 32–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06>
6. Kovalenko, M., Chumack, V., Kovalenko, I., Tkachuk, I., & Harford, A. (2023). Evaluation of magnetic gear parameters for autonomous wind installation with changing wind speed. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (2), 32–42. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-2-4>
7. Чумак, В., Коваленко, М., Коваленко, І., & Ткачук, І. (2023). Математичне моделювання гібридного магнітного редуктора для автономної

вітроустановки малої потужності. Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (9), 45–51. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.07>

8. Чумак, В., Коваленко, М., Коваленко, І., & Ткачук, І. (2023). Експериментальне дослідження універсального високошвидкісного колекторного двигуна змінного струму. Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (9), 39–44. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.06>

9. Чумак, В., Коваленко, М., Коваленко, І., Ткачук, І., & Тимошук, О. (2023). Математичне моделювання безконтактного аксіального магнітоелектричного генератора із подвійним статором для електричних комплексів малої потужності. Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (10), 20–25. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.2.04>

10. Чумак В.В., Ткачук І.В., Коваленко М.А. Математичне моделювання лінійного двигуна для сепаратора лому кольорових металів. Статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С.331-336.

11. Чумак В.В., Ткачук І.В., Коваленко М.А., Святненко В.А. Electromagnetic gears in electromechanical systems. Статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С.234-238.

12. Чумак В.В., Ткачук І.В., Коваленко М.А. Розробка математичної моделі магнітного редуктора з використанням Comsol Multiphysics. Статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих

учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 291-296.

SUMMARY

Tkachuk I. V. Electromechanical System for Conversion of Low-Potential Mechanical Energy into Electrical Energy - Qualification scientific work manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics in the field of knowledge 14 "Electrical engineering". - National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2023.

The dissertation study is dedicated to investigating and solving the current scientific problem of developing a system for converting low-potential mechanical energy into electrical energy based on magnetic gears as part of an autonomous wind turbine through mathematical and simulation modeling.

The work includes a literature and patent search on the topic of the dissertation research. An assessment of existing types of mechanical gears was carried out, and based on this analysis, the optimal option of magnetic gears was selected. The most promising topologies of magnetic gears are planetary, coaxial planetary, and cycloidal. In planetary gears, approximately 50% more permanent magnets are used than in other promising topologies. The cycloidal magnetic gears is practically applicable only in a two-stage design (planetary gears according to the 2k-h scheme), which reduces its torque density by two times. The presence of eccentricity in the cycloidal magnetic gears generates vibrations and uncompensated radial electromagnetic forces, reducing the bearing life. Coaxial planetary magnetic gears can be designed with minimal radial electromagnetic forces, and the coaxial arrangement of rotating parts allows avoiding additional devices for torque removal from its output shaft as in the cycloidal gears. Its drawbacks include torque pulsations and complex manufacturing technology of the intermediate magnetic wheel (modulator). Existing design methodologies for magnetic gears date back to the 1970s and require significant reworking in light of the latest developments in both materials science and methods of magnetic system calculation. Existing modern methodologies for modeling and known research results of magnetic gears do not provide a complete understanding of the complex electromagnetic and mechanical processes during

energy conversion and do not allow designing magnetic gears and reliably assessing their efficiency. Known modern studies do not delve into the issues of constructive design of magnetic gears for industrial applications and methodologies for their experimental research.

A mathematical model and calculation method for the maximum torque of a magnetic transmission and the limiting states of the magnetic system in static mode were developed in the work, which allow substantiating the selection of the main dimensions of the magnetic cores and permanent magnets. Mathematical models and a method for analyzing the harmonic composition of the magnetic field in non-magnetic clearances of the magnetic transmission were developed, based on which the requirements for the constructive design of the elements of the magnetic system are substantiated, as well as mathematical models that allow calculating the magnetic system, taking into account edge effects, on the basis of which the requirements for the arrangement of constructive elements of magnetic gears regarding their magnetic systems are substantiated. An analytical methodology and numerical mathematical models for determining the fundamental frequency of the toothed torque of the magnetic transmission, as well as for calculating magnetic losses in the magnetic transmission, were proposed, and quantitative estimates of the influence of various design solutions on its efficiency were obtained.

As a result of the research based on the results of field and numerical simulation modeling, ways to improve the performance of the magnetic transmission are proposed:

- each stator pole should be separated from the adjacent pole by an electrically insulating insert;
- the permanent magnets of the stator should be divided into electrically isolated segments in the axial direction;
- the high-speed rotor permanent magnets should be divided into segments both in the axial and radial directions;
- low-speed rotor segments should be electrically isolated from each other and have chamfers.

In the dissertation research, an approach to the compilation of a dynamic macromodel of a magnetic transmission and a method for determining its parameters based on field calculation data was proposed. Based on the proposed methodology, modeling of various modes of a magnetic transmission during operation on the load in Matlab/Simulink was carried out. A simplified linearized dynamic model of a magnetic transmission was proposed, which allows evaluating natural frequencies of oscillations and damping parameters at the initial stages of design.

Based on the modeling results, a number of features of the magnetic transmission during operation in transient modes were revealed:

- speed pulsations on the high-speed rotor are more than times less than in the transmission ratio, than on the low-speed rotor;
- the initial phases of speed pulsations on the low- and high-speed rotors differ, which leads to variability of the instantaneous value of the transmission ratio in transient modes;
- vibration frequencies and damping coefficients are determined to a greater extent by the parameters of the low-speed rotor of the magnetic transmission.

Keywords. Low-potential mechanical energy, electromechanical system, energy conversion, gearbox, magnetic transmission, magnetic gearbox, permanent magnets, renewable energy sources, wind turbine, direct-drive wind turbine, standalone wind turbine, wind power station, wind turbine generator, alternative energy sources, control characteristic.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕТВОРЕННЯ НИЗЬКОПОТЕНЦІАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	22
1.1 Загальні поняття системи низькопотенційної енергії	22
1.2 Аналоги зубчастих передач на основі систем із постійними магнітами	25
1.3 Коаксіальна планетарна магнітна передача	42
1.4 Експлуатаційні характеристики коаксіальної планетарної магнітної передачі ..	47
1.5 Вибір конструкції-прототипу магнітної передачі	50
1.6 Огляд систем перетворення низькопотенційної механічної енергії вітру в електричну	51
1.6.1 Загальна класифікація вітроелектричних систем	51
1.6.2 Мультиплікаторні та безмультиплікаторні вітроелектроустановки	55
1.7 Мета та завдання дослідження.....	57
Висновки до розділу 1	59
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИК МАГНІТНОЇ ПЕРЕДАЧІ.....	61
2.1 Вибір методу моделювання магнітного поля.....	61
2.2 Параметри магнітної системи досліджуваної магнітної передачі	62
2.3 Особливості чисельної реалізації магнітної передачі у вигляді розрахункової моделі.....	66
2.4 Моделювання електромагнітних процесів магнітної передачі у статичному режимі.....	69
2.5 Аналіз розподілу магнітного поля магнітної передачі в немагнітних проміжках ..	87
Висновки до розділу 2	96
РОЗДІЛ 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОЇ ПЕРЕДАЧІ	98
3.1 Динамічні рівняння магнітної передачі	98
3.2 Розробка чисельної імітаційної математичної моделі в середовищі Matlab/Simulink.....	101
3.3 Методика визначення параметрів імітаційної моделі	103
3.4 Результати моделювання динамічних процесів.....	105

3.5 Методика складання лінеаризованої динамічної моделі	107
3.6 Імітаційне моделювання магнітної передачі для автономної вітроустановки	114
Висновки до розділу 3	132
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗРАЗКА МАГНІТНОЇ ПЕРЕДАЧІ	133
4.1 Загальний опис конструкції експериментального зразка	133
4.2 Методика та результати вимірювання максимального моменту	137
4.3 Методика та результати досліджень в режимі неробочого ходу	138
Висновки до розділу 4	142
ВИСНОВКИ.....	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	146

ВСТУП

Актуальність теми. Питомі масогабаритні показники електричної машини великою мірою залежить від номінальної частоти обертання ротора, що більше частота обертання, то менше габарити електричної машини. Можливість вибору номінальної частоти обертання з широкого діапазону при проектуванні електричної машини дозволяє отримати оптимальні масогабаритні та вартісні показники електроустановки в цілому [1, 2]. Однак номінальна частота обертання найчастіше визначається не так прагненням створити оптимальну електричну машину, скільки вимогами споживача механічної енергії коли це електродвигун або джерелом механічної енергії у випадку електроджерела електричної енергії. Такі області застосування електричних машин як вітроенергетика, автомобілебудування, кораблебудування, нафтовидобуток, деякі напрямки легкої та харчової промисловості та інших характеризуються вкрай низькими швидкостями обертання, на рівні десятків обертів на хвилину. У цих випадках пряме з'єднання валу електричної машини з навантаженням стає економічно не вигідним, а часто й просто неможливим. Наприклад, існуюча тенденція збільшення потужності одиначної установки у вітроенергетиці вимагає відмови від прямого приводу електроджерела електричної енергії вітряної турбіни через зростання масогабаритних показників джерела електричної енергії до значень, що ускладнюють транспортування та монтаж такої електричної машини [3]. Зниження масогабаритних показників електричних машин у подібних випадках можливе лише шляхом значного збільшення їхньої номінальної швидкості обертання, що веде до необхідності використання зубчастих передач як узгоджувальний пристрій між джерела електричної енергії та навантаженням. Ефективність такого підходу зумовлена тим, що номінальний механічний момент зубчастої передачі більш ніж удвічі вищий у порівнянні з сучасною синхронною електричною машиною із збудженням від постійних магнітів [2, 4]. За рахунок цього забезпечуються найкращі масогабаритні показники комплексу високошвидкісної електричної машини – зубчаста передача у порівнянні із системою

прямого приводу. Однак наявність зубчастого зачеплення в механічних трансмісіях призводить до появи низки недоліків, таких як: низька надійність, необхідність мастила та періодичного технічного обслуговування, пожежонебезпечність, високий рівень шуму, а також низька перевантажувальна здатність. Створення нових узгоджувальних пристроїв перетворення механічної енергії, які не мають зазначених недоліків і зберігають переваги зубчастих передач, є актуальним завданням електромеханіки. Одним з таких пристроїв є магнітна передача, в якому момент передається не за рахунок зубчастого зачеплення, а за допомогою силової взаємодії магнітних полів. Це робить можливим безконтактне перетворення швидкості та моменту, а отже і механічної енергії в подальшому в електричну, завдяки чому магнітним передачам не властиві характерні для їх зубчастих аналогів недоліки, зберігаючи при цьому порівняні з ними масогабаритні показники [4].

В енергетичних установках із встановленою потужністю в кілька мегават, наприклад у вітроенергетиці, застосування магнітних передач замість зубчастих може бути спрямоване на досягнення технічних переваг і подолання існуючих у промисловості технологічних труднощів виробництва якісних зубчастих коліс великого діаметра для передач мультимегаватного класу [5, 6]. Складна технологія виробництва зубчастих передач підвищує ризик застосування цих пристроїв [7, 8]. У той самий час виробництво магнітних передач як електромеханічних пристроїв вимагає освоєння передових технологій у механообробці і може бути здійснено на наявній базі з виробництва електричних машин.

Ступінь розробленості теми дослідження. Вперше ідея створення безконтактних магнітних передач виникла на початку XX століття [9]. Однак довгий час вони не привертали увагу інженерів, що пов'язано зі складнощами технічної реалізації та низькими масогабаритними показниками перших магнітних передач. З розвитком технології виробництва електричних машин та появою рідкісноземельних постійних магнітів з високою коерцитивною силою та залишковою магнітною індукцією, наприкінці 60-х років XX століття знову виник інтерес до створення магнітних передач.

Значний внесок у дослідження магнітних передач у електротехніці зробила наукова група під керівництвом Ганзбурга Л. Б [10, 11], результати дослідження якої викладені у працях Рейфі Е. Д. [12] та Вейца В. Л. [13], присвячених питанням теорії проектування синхронних магнітних механізмів, до яких належать і магнітні передачі. Однак, доступні на той час магнітні матеріали та методи аналізу електромагнітних процесів не дозволили створити ефективний пристрій, здатний повною мірою конкурувати із зубчастими передачами за масогабаритними показниками.

Вчені почали активно вивчати магнітні передачі на початку 2000-х років. [14]. Дослідження у цій галузі виконувались науковою групою під керівництвом Аталлаха Каїса з університету Шеффілда. Надалі на їх основі було створено єдине відоме комерційне підприємство Magnomatics LTD, продукцією якої є магнітні передачі та електричні машини на їх основі [15]. Учасники цієї наукової групи вперше показали ефективність застосування магнітних передач і цим привернули увагу до проблем проектування таких пристроїв. Нині з питань розробки магнітних передач працюють кілька закордонних наукових груп [5,8,16]. Найбільш помітні з них: наукова група під керівництвом Пітера Расмуссена з університету м. Ольборга , Роджера Ванга з університету м. Стелленбоса та Ніколаса Франка з університету Техасу [27]. Незважаючи на значну кількість наявних сучасних закордонних публікацій з магнітних передач, здебільшого вони мають описовий характер і не торкаються особливостей фізичних процесів, питань розробки методик проектування таких пристроїв та конструктивних рішень. Основна методична проблема при створенні магнітних передач полягає в необхідності глибокого та точного аналізу складних електромагнітних та механічних процесів, які визначають їхній коефіцієнт корисної дії та техніко-економічну ефективність. Існуючі методики проектування [12] відносяться до 1970-х років і вимагають значної переробки з урахуванням останніх досягнень як у галузі матеріалознавства, так і в галузі методів розрахунку магнітних систем.

В загальному випадку, до систем перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну відносяться будь-які електромеханічні перетворювачі енергії чи

комплекси, в яких енергія первинного рушія природньо має не високий потенціал, а саме: енергія вітру (для вітрів до 4 м/с), енергія коливання хвиль, енергія різниці потенціалів водяного стовпа (струмки, річки з помірною чи сильною течією), ГЕС і т.д.

Активними дослідженнями, присвяченим як системам перетворення механічної енергії в електричну, так і дослідженню магнітних передач, як елемента таких систем займаються вітчизняні і закордонні дослідники такі як: В.В., Гребенніков, П.Ф. Васько, С.О. Кудря, В. М. Головка, О. І. Яковлев, А. П., Голубенко, В.І. Будько, Олейников О.М., Зарицька Є.І., О.В. Остапчук, В.С. Попков та ін. [1,2,5-7,10-13].

Для систем перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну можливо використовувати магнітна передача замість традиційної зубчастої передачі. Дослідженням магнітних передач займалися науковці: Л.М. Паластін, Д.А. Бут, А.А. Афонін, Л. І. Мазуренко, Ю.Н. Кронеберг, Ю.М. Пермінов, В.В. Чумак, Ф. Кеніо, Jasek F.Gieras, Takayuki Mizuno, Kazutoshi Nagayama, Rita Mbayed, та ін., основні результати досліджень яких узагальнено у працях [3-5,7-13,16, 23-26, 35, 44, 51, 52, 61, 64, 74, 87, 110]. Результати аналізу робіт вищезгаданих авторів показав, що на сьогоднішній день актуальним науково-практичним напрямком є використання магнітних передач на базі висококоерцитивних рідкоземельних постійних магнітів для систем перетворення низькопотенційної енергії в електричну. Підвищити надійність та ефективність роботи таких систем можливо за рахунок заміни традиційних зубчастих передач (мультиплікаторів), наприклад у вітроустановках, на магнітні передачі.

Особливо актуальним та привабливим з технічної точки зору та практичної реалізації виглядає використання магнітних передач в системах перетворення механічної енергії вітру в електричну, як найбільш розповсюдженого та доступного джерела механічної потужності. Існуючі технічні рішення передбачають реалізацію вітроустановок з прямим приводом (безмультиплікаторні установки) та із використанням класичних зубчастих передач (мультиплікаторів). Використання установок із прямим приводом призводить до підвищення вартості, зниження надійності, погіршення вагогабаритних показників електроджерела електричної енергії,

з іншого боку мультиплікаторні установки потребують проведення регулярних технічних оглядів, мають меншу надійність та цілий ряд експлуатаційних недоліків.

Актуальність роботи полягає в підвищенні механічної надійності та ефективності перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну за рахунок використання магнітних передач замість класичної зубчастої передачі. Це дозволить знизити експлуатаційні витрати, підвищити надійність роботи, покращити ефективність перетворення, зменшити рівень акустичного шуму такої системи, в аварійних режимах роботи вітроустановки відпадає необхідність у використанні спеціальних технічних рішень, спрямованих на фіксацію ротора вітроустановки. Отже, актуальним науковим завданням, яке має важливе практичне значення, є розробка на основі результатів математичного і фізичного моделювання системи перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну на основі магнітної передачі у складі автономної вітроустановки. Актуальною задачею є аналіз електромагнітного поля та характеристик магнітної передачі методом скінченних елементів для розробки оптимальної конфігурації магнітної передачі та аналізу впливу його геометричних параметрів на ефективність перетворення енергії та розробка числових імітаційних моделей для оцінки його експлуатаційних показників, динамічних процесів, параметрів та характеристик при роботі у складі автономного вітроелектричного комплексу. Вирішенню зазначеної актуальної задачі присвячено дане дисертаційне дослідження.

Розширити можливості для наукового дослідження електромеханічних процесів магнітних передач дає застосування сучасних засобів чисельного моделювання, які представлені програмним пакетом, що реалізує метод скінченних елементів Comsol Multiphysics та пакетом MATLAB-Simulink, що дозволяє реалізувати чисельну імітаційну модель. Застосування даних програмних продуктів, або їх аналогів, дозволяє підвищити точність розрахунків, враховувати конструктивні особливості, тривимірний характер замикання основного магнітного потоку та електромагнітних сил, нелінійність конструктивних матеріалів, проводити імітаційні моделювання будь-яких процесів для оцінки ефективності, підтвердження працездатності і т.ін.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка системи перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну на основі магнітної передачі у складі автономної вітроустановки шляхом математичного та імітаційного моделювання. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. провести літературно-патентний пошук за темою дослідження з подальшим аналізом систем перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну та вибором конструктивного прототипу системи;
2. розробити чисельну польову математичну модель магнітної передачі, проаналізувати його параметри і характеристики та провести дослідження впливу геометричних параметрів з метою отримання мінімальних значень пульсацій передавального електромагнітного моменту;
3. розробити чисельну імітаційну модель магнітної передачі у складі автономної вітроелектричної установки малої потужності для оцінки динамічних процесів та експлуатаційних характеристик магнітної передачі;
4. провести розробку та виготовити експериментальний зразок магнітної передачі, на якому виконати необхідні експериментальні дослідження з метою підтвердження достовірності даних розрахунків, отриманих за розробленими уточненими математичними моделями.

Об'єктом дослідження є електромагнітні та механічні процеси в магнітній передачі для автономної вітроелектричної установки малої потужності.

Предметом дослідження є система перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну на основі магнітної передачі.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використано чисельні методи моделювання стаціонарних та нестаціонарних електромагнітних полів, метод скінченних елементів при моделюванні електромагнітного поля, чисельні методи моделювання фізичних процесів при імітаційному моделюванні для оцінки динамічних режимів роботи, а також методи експериментальних досліджень на лабораторному зразку магнітної передачі.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено чисельну польову математичну модель магнітної передачі, яка на відміну від існуючих враховує процеси перемагнічування сталевих та феромагнітних елементів магнітної передачі, що дозволяє проводити розрахунок магнітної системи з урахуванням повздовжніх кінцевих ефектів, втрат в елементах магнітної системи при різних частотах перемагнічування на підставі яких обґрунтовано рекомендації щодо конструктивного виконання елементів магнітної системи магнітної передачі та мінімального рівня пульсацій електромагнітного моменту.

2. Отримала подальший розвиток математична модель та методика розрахунку максимального електромагнітного моменту та аналізу гармонійного складу магнітного поля в немагнітних проміжках магнітної передачі в статичному режимі, на підставі яких обґрунтовано параметри імітаційної моделі та рекомендації щодо конфігурації елементів магнітопроводу та постійних магнітів магнітної передачі.

3. Вперше розроблено чисельну імітаційну модель системи перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну на основі магнітної передачі у складі автономної вітроелектричної установки малої потужності, обґрунтовано його параметри та проведено оцінку його динамічних процесів, експлуатаційних показників, параметрів та характеристик при роботі у складі автономного вітроелектричного комплексу.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено методику дослідження динамічних параметрів магнітної передачі у складі автономної вітроелектричної установки малої потужності;
- розроблені в результаті виконання дисертаційної роботи чисельні математичні моделі та методики, підтверджені експериментальними дослідженнями, становлять методичну базу для проєктування промислових магнітних передач з оптимальними параметрами;
- розроблено методику експериментального дослідження магнітної передачі у вигляді структурних алгоритмів, а також реалізований в експериментальному зразку

магнітної передачі практичний доробок конструкторсько-технологічних рішень дає основу для подальших розробок;

- наукові та практичні результати дисертаційної роботи передано для використання у навчальному процесі та наукових дослідженнях кафедри електромеханіки факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України "КПІ ім. Ігоря Сікорського", зокрема при підготовці студентів рівня "бакалавр" та "магістр" та при виконанні ініціативної НДР «Перетворення низькопотенційної кінетичної енергії в електричну».

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи отримані автором самостійно. Безпосередньо дисертантом здійснено:

- за результатами літературно-патентного пошуку за темою дисертаційного дослідження проведено аналіз існуючих типів систем перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну та магнітних передач;
- обґрунтовано вибір типу магнітної передачі для роботи у складі автономної вітроелектроустановки малої потужності;
- розроблено чисельні математичні моделі та методики дослідження параметрів та характеристик магнітної передачі шляхом імітаційного моделювання;
- розробка експериментального зразка магнітної передачі;
- участь у проведенні експериментальних досліджень, їх обробці та аналізі.

Співавторами наукових праць є науковий керівник та науковці, спільно з якими проведені дослідження, а саме: Коваленко М.А., Чумак В.В., Тимошук О.Л., Цивінський С.С., Баженов В.А., Пономарьов О.І., Островерхов М.Я.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок.

Постановка мети та завдань проведена разом з науковим керівником. Наукові та практичні результати, які висвітлено у дисертаційній роботі, отримано здобувачем особисто під керівництвом доцента кафедри електромеханіки Національного технічного

університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, кан.тех.наук Коваленка М.А.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота безпосередньо пов'язана із науковою тематикою, яка виконувалась на кафедрі електромеханіки КПІ ім. Ігоря Сікорського. Результати роботи використані при виконанні ініціативної науково-дослідної роботи за темою «Перетворення низькопотенційної кінетичної енергії в електричну» (Державний реєстраційний номер: 0122U201420) та передані до використання у навчальному процесі та наукових дослідженнях кафедри електромеханіки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (м. Київ, 2019, 2020, 2021 р. р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 12 друкованих працях, з них 9 – у наукових фахових виданнях, з них 2 – у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, належать до другого (Q2) та третього (Q3) квартилю, 3 тези доповіді на науково-практичних конференціях із публікацією результатів доповідей.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 159 сторінках машинописного тексту, складається із анотації, вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Обсяг основного тексту дисертації складає 133 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 69 рисунками та 8 таблицями. Список використаних джерел містить 142 найменувань, з них 10 кирилицею та 132 латиницею.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕТВОРЕННЯ НИЗЬКОПОТЕНЦІАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ

1.1 Загальні поняття системи низькопотенційної енергії

Поняття системи перетворення низькопотенційної механічної енергії в електричну описує процес або пристрій, який перетворює механічну енергію з низьким рівнем потенціалу, наприклад, отриману від руху або потоку, у електричну енергію. Низький потенціал механічної енергії вказує на те, що механічна енергія доступна у системі на досить низькому рівні. Це може означати низьку швидкість обертання, низький обертовий момент або невелику силу, яка може бути використана для виконання роботи. Ця система може включати в себе різні компоненти, такі як джерела електричної енергії, турбіни, редуктори та інші механізми, які працюють разом для збору, конвертації та передачі механічної енергії у вигляді електричної енергії. Такі системи використовуються у різних галузях, таких як вітроенергетика, гідроенергетика, та інші відновлювальні джерела енергії, а також в промисловості та транспорті для забезпечення потреб у електроенергії.

Джерелом низькопотенційної механічної енергії можуть бути різноманітні природні або штучні джерела, які надають об'єкту або системі можливість генерувати механічну енергію з низьким рівнем потенціалу. В результаті аналізу різноманітних літературних джерел, можливо виділити деякі основні приклади таких механічних джерел:

1. В вітроенергетиці: вітроенергетичні установки використовують енергію вітру, що виникає внаслідок перепаду тиску, для виробництва механічної енергії. Вітрові турбіни перетворюють кінетичну енергію руху повітря в обертальний рух валу, який потім може бути використаний для генерування електричної енергії за допомогою електроджерела електричної енергії;

2. В гідроенергетиці: гідроенергетичні установки використовують потік води, наприклад, з річок або водосховищ, для обертання турбін, що приводять в рух тихохідні електроджерела електричної енергії;

3. Теплові двигуни: теплові двигуни, такі як парові турбіни або двигуни внутрішнього згоряння, використовують теплову енергію, що виникає від згоряння палива, для створення механічної енергії;

4. Кінетична енергія: кінетична енергія об'єктів, таких як автомобілі, поїзди або рухомі люди, може бути використана для генерації механічної енергії через механічні системи або джерела електричної енергії.

Отже, джерела низькопотенціальної механічної енергії можуть бути різноманітними і залежать від специфіки діяльності та умов, в яких вони застосовуються.

Очевидно, що найбільш розповсюдженим прикладом використання низькопотенціальної механічної енергії є енергія вітру. Вітроджерела електричної енергії є джерелом електричної енергії, що швидко розвивається, на 2015 рік у Європі припадало 44,2% усіх енергетичних установок [1]. Очікується, що потужність вітрових турбін збільшиться з 129 ГВт у 2014 році до 320 ГВт у 2030 році, що потенційно забезпечить 24,4% попиту на електроенергію в ЄС [2]. Для досягнення такого амбітного зростання значна частина ринку вітроенергетики може бути розташована в офшорних умовах, але потреба в офшорних вітроджерелах електричної енергії вимагатиме нових інноваційних технологій, а також збільшення розмірів вітрових турбін. Однак у всіх випадках основною метою є зниження вартості енергії вітроджерела електричної енергії [3].

Електричні машини, включені в серію з механічними передачами, широко використовуються для виробництва економічно ефективних і легких рішень трансмісії, для застосувань, у яких потрібний високий крутний момент на низькій швидкості, наприклад у вітрових турбінах [4]. Компонент передачі передає низькошвидкісний високий крутний момент у вихідний високошвидкісний (HS) з низьким крутним

моментом і, таким чином, дозволяє значно зменшити розмір порівняно з рішеннями з прямим приводом. Механічні передачі часто використовуються для цієї мети, однак вони схильні до невід'ємних проблем, таких як пошкодження в ситуації перевантаження, шум, періодичне змашування та складне технічне обслуговування. Проблеми, пов'язані з надійністю та вартістю з їх несправністю, створили топології трансмісії, які повністю виключають механічні передачі або зменшують їх складність за рахунок зменшення кількості передач.

Крім того, зі збільшенням розміру вітрової турбіни спрощений аналіз масштабування показує, що топології прямого приводу стикаються з дедалі зростаючою проблемою зменшення об'ємної/масової щільності потужності зі збільшенням номінальної потужності, що призведе до надзвичайно великих проектів [6, 7]. Рішення для трансмісії з використанням механічних передач підпадають під подібні закони масштабування, що може призвести до дуже великих механічних передач.

Магнітні передачі (MG) можуть запропонувати привабливу альтернативу механічним передачам і останнім часом викликають підвищений інтерес як з боку промисловості, так і з боку досліджень [8]. Топологія MG, здатна мати високу щільність крутного моменту, була досліджена в [9, 10, 5]. Він демонструє безконтактну передачу крутного моменту, властивий захист від перевантаження, надлишкове змашування зачеплення та знижену механічну вібрацію, тому має потенціал для подолання проблем, пов'язаних з механічними передачами. MG також можна механічно та магнітно інтегрувати з машиною з постійними магнітами (PM), тим самим зменшуючи кількість ступенів механічної передачі або повністю виключаючи передачу [11, 12]. Інтегровані PM-машини MG також здатні демонструвати щільність крутного моменту, більшу, ніж еквівалентні машини з прямим приводом PM з радіальним полем, і, отже, можуть дозволити реалізувати легкі та економічно ефективні рішення для приводу вітрових турбін [7].

1.2 Аналоги зубчастих передач на основі систем із постійними магнітами

Схеми механізмів, що включають зубчасті передачі, були представлені вже в роботах античних авторів [16]. Нині виробництво зубчастих передач має промислові масштаби, а теорія їхнього розрахунку постійно удосконалюється [17]. Однак, незважаючи на незаперечні переваги, які забезпечує використання зубчастих передач в технічних пристроях, вони мають ряд недоліків, таких як високий рівень шуму, низьку надійність, необхідність мастила, а також низьку перевантажувальну здатність [18]. Перелічені недоліки пов'язані з самим принципом дії цих пристроїв, що полягає в перетворенні параметрів руху рахунок зубчастого зачеплення, і тому непереборні в рамках зубчастої передачі. На початку двадцятого століття Чарльзом Армстронгом (США) було подано заявку на патент, в якому описувалося пристрій для безконтактного перетворення обертального руху за допомогою електромагнітної силової взаємодії [9]. Даний пристрій став першою запатентованою магнітною передачею, за основу якого було взято циліндричну зубчасту передачу. Незважаючи на наявні у даного винаходу недоліки, цей принципово новий підхід у створенні пристроїв для перетворення параметрів руху дав початок низці винаходів. Частина цих винаходів стосувалася вдосконалення конструкції Армстронга, тоді як інші винахідники пропонували пристрої абсолютно нових топологій, деяким із яких немає аналогів серед зубчастих передач.

Теоретично розрахунку зубчастих передач прийнято ряд термінів, що містяться в «Передачі зубчасті. Загальні терміни, визначення та позначення» [20]. У цьому стандарті дається визначення термінів зубчаста передача, зубчасте колесо, циліндрична зубчаста передача і т. д. У зв'язку з відсутністю єдиної прийнятої термінології з магнітних передач далі еквівалентні терміни вживаються із заміною визначення "зубчастий" на "магніт" магнітна передача, магнітне колесо, циліндрична магнітна передача і т. д. Така заміна зроблена для відображення природи виникнення зусилля в місці зачеплення. Для деяких понять теорії зубчастих передач, таких як, наприклад, черв'як, черв'ячне колесо, визначення «зубчастий» опускається. У цьому випадку для

магнітних передач визначення «магнітний» додається штучно, наприклад, магнітний черв'як, магнітне колесо черв'ячне, і т. д.

Як основний критерій оцінки магнітних передач обрана щільність моменту, що визначається як відношення максимального електромагнітного моменту магнітної передачі до об'єму її активних частин. У вітчизняній літературі цей параметр відомий також як постійна машинна Ессена [1]. Щільність моменту дозволяє оцінити ефективність магнітної системи до створення силового взаємодії. Як кількісні орієнтири за значеннями щільності моменту можна прийняти наступні пристрої:

- магнітні муфти на постійних магнітах мають густину моменту до $400 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ [21]. Ця щільність моменту є теоретичною верхньою межею для магнітних передач, так як конструкція магнітної системи магнітної муфти забезпечує найкращу магнітну зв'язок частин, що обертаються, і може розглядатися як ідеальна магнітна передача з передатним відношенням рівним одиниці;
- зубчасті планетарні передачі мають максимальну теоретично можливу щільність моменту близько $1000 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$, проте щоб уникнути зрізання зубців у реальних пристроях приймається ряд коефіцієнтів запасу, що знижують щільність моменту в середньому до $150 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ [4, 21] і нижче [23];
- синхронна електрична машина із збудженням від постійних магнітів та природним повітряним охолодженням має щільність моменту близько $10 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ [24, 25].

Циліндрична магнітна передача. Перші спроби створення магнітних передач полягали у використанні відомих топологій зубчастих передач та заміни зубчастого зачеплення силою взаємодії магнітних полів. Так, перша винайдена в 1900 Чарльзом Армстронгом (США) магнітна передача [9] була заснована на циліндричній зубчастій передачі.

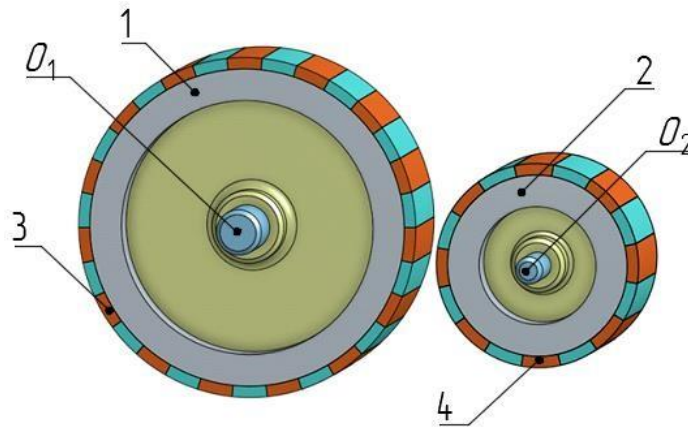


Рисунок 1.1 – Принципова схема циліндричної магнітної передачі:

1, 2 – магнітопроводи; 3, 4 – радіально намагнічені постійні магніти; O1, O2 – осі обертання

Циліндрична магнітна передача (рис. 1.1) складається з низькошвидкісного та високошвидкісного магнітних коліс з осями обертання O1 та O2 відповідно. Магнітні колеса, у свою чергу, являють собою магнітопроводи 1 і 2, на які встановлені радіально намагнічені постійні магніти або електромагніти полярності 3, 4, що чергуються. Передатне відношення циліндричної магнітної передачі визначається як

$$i = \frac{p_n}{p_v} \quad (1.1)$$

де p_n - число пар полюсів на низькошвидкісному магнітному колесі; p_v – число пар полюсів на високошвидкісному магнітному колесі.

Пристрій Армстронга мало електромагнітне збудження однієї з магнітних коліс, яке здійснювалося через щітково-колекторний вузол, що визначало низьку енергетичну ефективність пристрою. До того ж схема реалізації електромагнітного збудження передбачала одночасну роботу всіх котушок збудження, у той час як максимальну роль у силовій взаємодії мають лише котушки, що знаходяться поблизу зони магнітного зачеплення. Недоліки конструкції Армстронга частково подолані Еріком Торденом (США) [26] додаванням спеціального магнітопроводу, що забезпечує розширення зони зачеплення, а також застосуванням постійних магнітів замість електромагнітного

збудження. Подальше розвиток циліндричної топології магнітної передачі пов'язане з винаходами Леона Девона (США) [27], в якому він описує циліндричну магнітну передачу з перпендикулярними осями магнітних коліс, Макс Бермана (Німеччина), що вперше запатентував ремінну циліндричну магнітну передачу [28] рахунок застосування магнітних коліс і магнітного ремня підвищується сила зчеплення з-поміж них проти звичайної механічної ременної передачею.

Для розширення зони взаємодії ефективніше використовувати не зовнішнє, а внутрішнє зачеплення магнітних коліс, що обгрунтовано Федотовим А. І. [29] (СРСР) поряд з ідеєю виконання внутрішнього магнітного колеса з еластичного матеріалу. Існує також можливість збільшення сили взаємодії між зубцями за рахунок поміщення їх у магнітну рідину, що було запропоновано Бансевичусом Р. Ю. (СРСР) [30].

Характерною особливістю магнітної передачі є те, що при перевищенні моментом приводу деякого максимального значення відбувається її прослизання подібно до «зриву» магнітної муфти, що перериває передачу потужності від ведучого магнітного колеса. Це може бути неприпустимим для деяких застосувань, які потребують високої надійності. У зв'язку з цим Гарольд Фаус (США) запропонував пристрій [31], який являє собою гібрид циліндричної магнітної та зубчастої передач, відмінною особливістю якого є конструкція з тангенціально намагніченими постійними магнітами, що забезпечувала з одного боку кращі порівняно з варіантом Армстронга [9] силові характеристики, а з іншого боку, що дозволяє при перевищенні електромагнітним моментом свого максимального значення передавати частину зусилля за рахунок механічного зачеплення.

Заміна зубчастого зачеплення магнітним відкриває широкі можливості регулювання передатного відношення циліндричних магнітних передач за допомогою зміни чисел пар полюсів на магнітних колесах. Так Хіман Хурвітз (США) вперше запатентував багатоступінчасту циліндричну магнітну передачу [32] з незалежним електромагнітним збудженням для кожного ступеня. Щаблі з'єднані між собою паралельно таким чином, що передатне відношення пристрою може регулюватися

шляхом активації того чи іншого ступеня. Інше технічне рішення було запропоновано Джонатаном Ключеном (Голландія) [33], в якому пропонується використовувати складене магнітне колесо, яке являє собою кілька з'єднаних по торцях елементарних магнітних коліс однакового діаметра, але з різними числами пар полюсів. Регулювання передавального відношення здійснюється за допомогою осевого переміщення одного з магнітних коліс магнітної передачі. Схожий спосіб регулювання передавального відношення пропонувався Сідні Ренд (США) [34]. Однак зміна числа пар полюсів на одному з магнітних коліс здійснюється шляхом зміни схеми з'єднання котушок збудження за допомогою їхньої комутації електронними ключами. Ще один принцип регулювання передавального відношення, але для циліндричної магнітної передачі з перпендикулярними осями, було запропоновано Кіясбейлі А. Ш. [35]. У цьому пристрої одне з магнітних коліс виконано у вигляді диска з концентричними магнітними доріжками з різним числом пар полюсів, а регулювання передавального відношення здійснюється за допомогою переміщення іншого магнітного колеса між доріжками.

За рахунок відсутності механічного зв'язку між магнітними колесами стає можливим передавати рух у герметичні обсяги. Конструктивні особливості такого пристрою описані Максом Хетзелом (Швейцарія) [36].

Магнітна передача має малу в порівнянні з зубчастими передачами торсійну жорсткість, являючи собою пружний елемент, що негативно позначається на динамічних характеристиках. Для збільшення торсійної жорсткості магнітної передачі Ганзбург Л. Б. було запропоновано технічне рішення, згідно з яким циліндрична магнітна передача складається з двох ступенів, які зміщені один щодо одного на певний кут.

Аналіз публікацій показав такі досягнуті питомі параметри магнітних передач. Для реактивної циліндричної магнітної передачі з внутрішнім зачепленням і електромагнітним збудженням, представленої в [14], з діаметром зовнішнього магнітного колеса 227 мм, довжиною аксіальної 220 мм щільність моменту склала 0,5 кН·м/м³. У [37] наведені дані випробувань циліндричної магнітної передачі з

передатним відношенням рівним трьом, з постійними магнітами зі сплаву самарій-кобальт. Експериментально отримано максимальний електромагнітний момент, що дорівнює $5,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при щільності моменту $1,5 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$. [38] здійснено моделювання циліндричної магнітної передачі за допомогою методу кінцевих елементів. Магнітна передача складається з двох кілець радіусом 200 мм і аксіальною довжиною 60 мм , виконаних з магнітом'якого матеріалу, із встановленими на їх поверхні постійними магнітами зі сплаву неодим-залізо-бор. Передатне число дорівнює одиниці. Максимальний електромагнітний момент становив 32 Нм , що дає щільність моменту $2 \text{ кНм}/\text{м}^3$. [39] проведено моделювання циліндричної магнітної передачі з перпендикулярними осями і одиничним передавальним числом. Магнітні колеса являють собою усічені конуси з радіусами основ $22,4 \text{ мм}$ та $43,6 \text{ мм}$ та аксіальною довжиною $21,2 \text{ мм}$. Порушення здійснювалося за допомогою постійних магнітів зі сплаву неодим-залізо-бор з енергетичним добутком $2,5 \text{ Дж}/\text{м}^3$. Експериментально виміряний момент становив $60 \text{ Н}\cdot\text{м}$, що відповідає максимальній щільності моменту $4,6 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$. У дисертації [22] проведено аналітичний розрахунок циліндричної магнітної передачі та оптимізація її розмірів з метою максимізації густини моменту. Порушення здійснювалося від постійних магнітів зі сплаву неодим-залізо-бор. В результаті максимальна щільність моменту оптимальних геометричних співвідношень склала $34,6 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$.

Основною особливістю циліндричної магнітної передачі, яку відзначають багато авторів, є те, що в кожний момент часу у створенні електромагнітного моменту бере участь лише пара полюсів магнітних коліс, що знаходиться в області зачеплення або хоча б у безпосередній близькості від неї. Інші полюси магнітних коліс у силовій взаємодії не беруть участь, що призводить до вкрай неефективного використання магнітних матеріалів та низької щільності моменту. Ступінь неефективності зростає зі збільшенням передавального відношення рахунок збільшення різниці діаметрів магнітних коліс. Вирішенням цієї проблеми є використання внутрішнього зачеплення. Однак максимальна ефективність використання магнітних матеріалів у цьому випадку

досягається лише при близьких діаметрах магнітних коліс, що значно знижує передатне відношення пристрою. Кількісні оцінки ефектів від багатьох запатентованих та описаних вище конструктивних технічних рішень у науково-технічних статтях не представлено.

Черв'ячна магнітна передача Черв'якові зубчасті передачі характеризуються можливістю отримання передатного відношення до кількох сотень в одному ступені [40]. Ціною за цю можливість є низький ККД та невисока надійність, які визначаються високим коефіцієнтом тертя між черв'яком та черв'ячним колесом. Заміна зубчастого зачеплення на магнітне дозволило б подолати ці недоліки, зберігаючи при цьому переваги цієї кінематичної схеми.

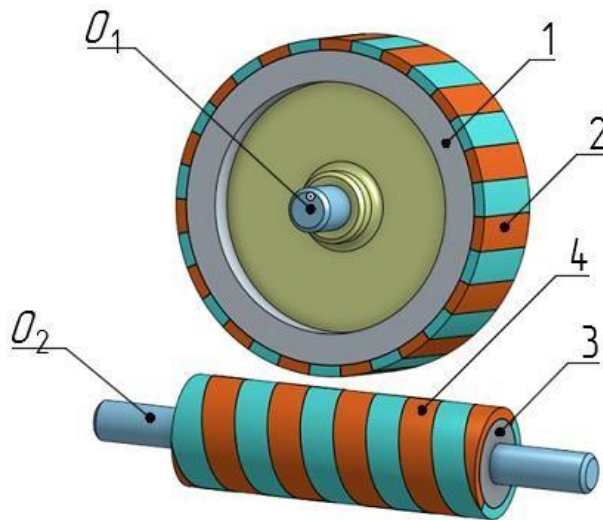


Рисунок 1.2 – Принципова схема черв'ячної магнітної передачі:

1, 2 – магнітопровід та радіально намагнічені ПМ магнітного черв'ячного колеса;
3, 4 – магнітопровід та радіально намагнічені ПМ магнітного черв'яка; O_1 , O_2 – осі обертання

Черв'ячна магнітна передача (рис. 1.2) складається з магнітного черв'ячного колеса з віссю O_1 та магнітного черв'яка з віссю O_2 . Магнітне черв'ячне колесо складається з циліндричного магнітопроводу 1 з встановленими на його поверхні радіально

намагніченими постійними магнітами. Для коректної роботи пристрою крок спіралі магнітного черв'яка повинен дорівнювати полюсному поділу магнітного черв'ячного колеса. При виконанні цього співвідношення передатне відношення магнітної черв'ячної передачі визначається через число пар полюсів на черв'ячному колесі

$$i = \frac{1}{p_n} \quad (1.2)$$

де p_n - число пар полюсів на низькошвидкісному магнітному колесі (черв'ячному магнітному колесі).

Початок розвитку цієї топології магнітної передачі дав Джулес Лekoш (Великобританія) [41]. У своєму винаході автор пропонує варіант створення такого черв'ячного редуктора, в якому зусилля або його частина передається не за рахунок механічного контакту, а за рахунок електромагнітної сили. Для реалізації цієї ідеї пропонується виконати модифікацію зубчастого черв'ячного редуктора, а саме розмістити співвісно з черв'яком котушку збудження так, щоб витки черв'яка стали намагнічені. Одна половина зубця черв'ячного колеса виготовляється з магнітного матеріалу, а інша з немагнітного, внаслідок чого в місці зачеплення діють дві протилежно спрямовані сили – механічна сила взаємодії між черв'яком та черв'ячним колесом та магнітна сила. Внаслідок цього зменшується сила тертя між черв'яком та немагнітною частиною зубця черв'ячного колеса. Для заданого навантаження можливо підібрати такий струм у котушці збудження, при якому всі зусилля передаватимуться за рахунок електромагнітної сили, роблячи таку черв'ячну передачу повністю безконтактною. Прагнучи збільшити максимальний електромагнітний момент пристрою, Хуг Столлер (США) запропонував використовувати постійні магніти в магнітному черв'ячному колесі спільно з електромагнітним збудженням самого черв'яка. Надалі Харольдом Фаусом (США) у [31] було запропоновано конструкція, у якій постійні магніти містилися у магнітному черв'ячному колесі, а й у магнітному черв'яку, що значно збільшило як переданий момент, і ККД пристрою. У магнітної передачі збільшення площі взаємодії магнітного черв'яка та черв'ячного колеса веде до

збільшення максимального електромагнітного моменту та не надає значного впливу на ККД. З цієї причини Кощєєвим Л. Г. [43] і Свічник Д. В. [44] була запропонована конструкція черв'ячної передачі, в якій магнітне черв'ячне колесо виконано таким чином, що охоплює магнітний черв'як, збільшуючи тим самим електромагнітну силу у вигляді збільшення площі поверхні взаємодії. Крім того, Кощєєва Л. Г. запропоновано спосіб розміщення котушки збудження на магнітному черв'ячному колесі [43].

В [45] проведено аналітичний розрахунок, а також експериментальні дослідження черв'ячної магнітної передачі з передавальним відношенням 33. Магнітне черв'ячне колесо виконано охоплюючим магнітний черв'як, а для збудження використовувалися постійні магніти зі сплаву самарій-кобальт з залишковою магнітною індукцією 0. колеса 364 мм, діаметр магнітного хробака 145 мм, а його довжина хробака 150 мм. При цьому експериментально було отримано максимальний електромагнітний момент 11,5 Нм, що відповідає щільності моменту близько 1,1 кНм/м³.

Топологія черв'ячної магнітної передачі, як і циліндричної магнітної передачі, характеризується низьким ступенем використання постійних магнітів. Для отримання високої щільності моменту в черв'ячній магнітній передачі необхідно використовувати постійні магніти як на черв'ячному магнітному колесі, так і на магнітному черв'яку. При цьому спіральна структура з постійних магнітів представляє технологічну складність при виготовленні, проте є досвід створення спіральних структур із сучасних рідкісноземельних постійних магнітів для магнітних передач за типом гвинт-гайка, що перетворюють лінійний рух на обертальний [46, 47].

Планетарна магнітна передача Зубчасті планетарні передачі мають один з найвищих ККД і щільність моменту серед інших зубчастих передач. Це досягається за рахунок того, що зачеплення здійснюється відразу в кількох точках, а не в одній як у циліндричних та черв'ячних передачах [40].

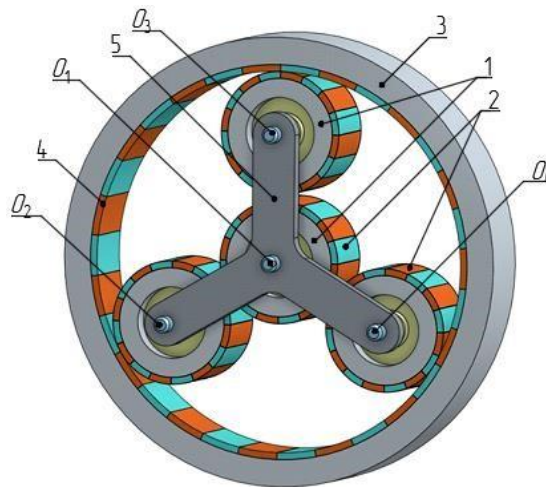


Рисунок 1.3 – Принципова схема планетарної магнітної передачі:

1, 2 – магнітопровід та радіально намагнічені ПМ магнітних сателітів та магнітної планетарна шестерні; 3, 4 – магнітопровід та радіально намагнічені ПМ магнітною коронної шестерні; 5 – водило; O1 – O4 – осі обертання

До складу планетарної магнітної передачі (рис 1.3) входять сонячна магнітна шестерня, магнітні сателіти та коронна магнітна шестерня, які можуть обертатися навколо загальної осі O1. Магнітні сателіти додатково можуть обертатися щодо власних осей O2 – O4. Магнітна сонячна шестерня і магнітні сателіти являють собою циліндричний магнітопровід 1 з встановленими на його поверхні радіально намагніченими постійними магнітами 2 полярності, що чергується. Магнітна коронна шестерня складається з циліндричного магнітопроводу 3 та постійних магнітів на його внутрішній поверхні 4. Сателіти з'єднані між собою водилом 5. Співвідношення швидкостей обертання магнітних коліс визначається формулою Вілліса [48]

$$p_n n_k - (p_k + p_{пл}) n_{вод} + p_{пл} n_{пл} = 0 \quad (1.3)$$

де p_k – число пар полюсів на коронній магнітній шестірні; $p_{пл}$ - число пар полюсів на планетарній магнітній шестірні; n_k - частота обертання коронної магнітної шестерні; $n_{пл}$ - частота обертання планетарної магнітної шестерні; $n_{вод}$ - частота обертання водила.

Для надійного зачеплення та ефективної роботи полюсні поділки всіх роторів повинні дорівнювати один одному. З геометричних міркувань випливає, що кількість пар полюсів кожному з сателітів визначається як

$$p_{\text{сат}} = \frac{p_{\text{к}} - p_{\text{пл}}}{2} \quad (1.4)$$

Наприклад, при заблокованому водилі передатне відношення дорівнюватиме

$$i = -\frac{p_{\text{к}}}{p_{\text{с}}} \quad (1.5)$$

Ефективна технічна реалізація магнітної передачі, виконаної з даної топології, тривалий час зустрічала складнощі до того моменту, коли стали доступні високоенергетичні постійні магніти. Це було з труднощами у створенні електромагнітного збудження, оскільки у передачі присутні відразу кілька частин, що обертаються. Багато в чому з цієї причини вперше замінити зубчасте зачеплення силою електромагнітної взаємодії в планетарній передачі було запропоновано лише 1990 Вільямом Мебі (США) [49]. Запатентований ним пристрій є повним аналогом класичного одноступінчастого планетарної зубчастої передачі з тією лише відмінністю, що зубці замінені на радіально постійні намагнічені магніти. Дещо пізніше Осетров В. Г. і Семаков К. Н. [50] запропонували конструкцію багатоступінчастої планетарної магнітної передачі, в якій число ступенів вибирається виходячи з передавального відношення та необхідного значення загального ККД.

Однією з небагатьох робіт, у яких проведено детальне дослідження планетарної магнітної передачі, є [51]. У ній проведено 3D моделювання пристрою з передатним відношенням рівним трьом за допомогою методу кінцевих елементів та виконані його експериментальні дослідження. За результатами дослідження густина моменту склала 97,3 кН·м/м³. [52] проведено 3D моделювання планетарної магнітної передачі з збудженням від постійних магнітів з осьовою намагніченістю. Зовнішній діаметр пристрою 100 мм, а аксіальна довжина 25 мм, при цьому максимальний електромагнітний момент становив 0,13 Нм, що відповідає щільності моменту близько 0,7 кНм/м³.

Завдяки наявності внутрішнього магнітного зачеплення в декількох точках, планетарна магнітна передача може значно перевершувати циліндричну та черв'ячну магнітні передачі за густиною моменту. Однак вона має три частини, що обертаються, і містить великий обсяг постійних магнітів, що визначає її високу вартість і технологічну складність виготовлення.

Хвильова магнітна передача. Згідно з дослідженням, проведеним у [22], хвильові зубчасті передачі мають найбільшу щільність моменту до $302 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ серед інших зубчастих передач, а також мають високі передатні відношення аж до 120 в одному ступені. У 2006 р. А. Каїсом [53]

представлений патент на магнітну передачу хвилі. Основними відмінними рисами від попередніх винаходів автор називає велику густину моменту і можливість досягати великих передатних відносин без зменшення густини моменту. Принципова схема хвильової магнітної передачі наведена на малюнку 4.

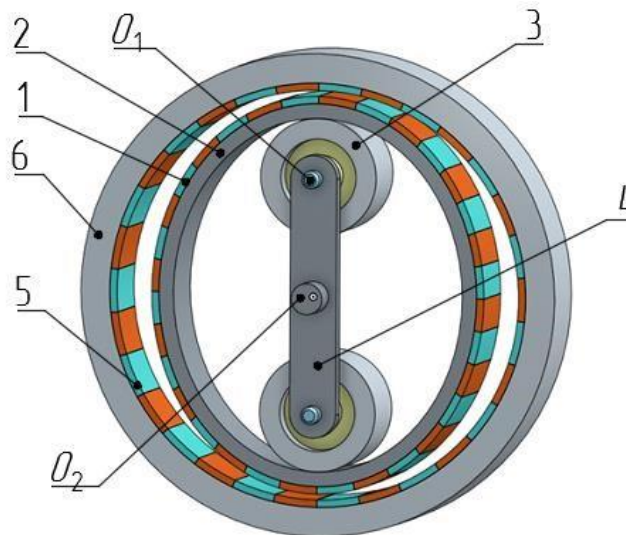


Рисунок 1.4 – Принципова схема хвильової магнітної передачі:

1, 5 – Радіально намагнічені ПМ низькошвидкісного ротора та статора; 2 – гнучке тіло; 3 – ролики; 4 – водило; O_1 , O_2 – осі обертання

Хвильова магнітна передача складається з високошвидкісного ротора, низькошвидкісного ротора, а також статора. Низькошвидкісний ротор у свою чергу

складається з постійних радіально намагнічених магнітів 1, закріплених на гнучкому тілі 2, і має можливість обертатися щодо осі статора O2. Високошвидкісний ротор являє собою два ролики 3, закріплених на водилі 4. Ролики 3 мають свою власну вісь обертання O1, а також можуть обертатися щодо осі симетрії статора O2 і, таким чином, можуть обкатуватися всередині гнучкого тіла 2, створюючи просторову гармоніку магнітного поля (хвилю), необхідну передачі моменту між роторами системи. Тому високошвидкісний ротор також називається хвильовим джерелом електричної енергії. На статорі пристрою розташовані радіально намагнічені постійні магніти 5, закріплені на внутрішній поверхні магнітопроводу 6. Важливою деталлю є те, що гнучке тіло 2 у вільному стані має форму кільця, внутрішній радіус якого трохи менше радіуса кола, що описується високошвидкісним ротором при його обертанні. При внесенні високошвидкісного ротора всередину низькошвидкісного останній деформується, приймаючи форму еліпса, як це показано на малюнку 4.

Числа пар полюсів на статорі і низькошвидкісному роторі відрізняються на певне значення, що дорівнює кількості хвиль, створюваних високошвидкісним ротором, яке в свою чергу дорівнює кількості роликів. При повороті високошвидкісного ротора на повний оберт зачеплення постійних магнітів низькошвидкісного ротора і статора рухається синхронно з ним. Якщо числа пар полюсів на статорі та низькошвидкісному роторі рівні, то останній не отримає жодного обертального переміщення щодо статора. Якщо числа пар полюсів на низькошвидкісному роторі і статорі відрізняються, один повний оборот високошвидкісного ротора призведе до повороту низькошвидкісного ротора щодо статора і своєї осі обертання O2 на число полюсних поділів, що відповідає різниці чисел пар полюсів на статорі і низькошвидкісному роторі. Для стабільної роботи пристрою необхідно виконання наступного співвідношення [53]

$$p_c = p_n + N_v \quad (1.6)$$

де p_c - число пар полюсів на статорі; p_n - число пар полюсів на низькошвидкісному роторі; N_v - число роликів на високошвидкісному роторі (кількість хвиль).

Передатне відношення магнітної хвильової передачі визначається як

$$i = \frac{p_H}{N_B} \quad (1.7)$$

Основним елементом, що викликає складності при реалізації хвильової магнітної передачі, є гнучке тіло низькошвидкісного ротора, яке повинно одночасно мати велику механічну міцність і високі магнітні характеристики. Крім того, складним технічним завданням є реалізація методу зняття моменту з цього елемента. Остання задача має рішення, яке успішно застосовується при виробництві зубчастих хвильових передач, тоді як перша обставина практично унеможливорює виробництво магнітної передачі такого типу. У зв'язку з цим практична реалізація хвильової магнітної передачі можлива тільки для окремого випадку при числі хвиль N_B рівній одиниці [53]. У зарубіжній літературі такий пристрій також відомий як магнітна циклоїдна передача [54], а у вітчизняній літературі зустрічається назва магнітної передачі з ротором, що котиться [2, 12].

Циклоїдна магнітна передача. Циклоїдна магнітна передача представлена малюнку 5 і зовні нагадує циліндричну магнітну передачу з внутрішнім зачепленням. Відмінність полягає в тому, що високошвидкісний ротор може обертатися не тільки щодо своєї власної осі O_1 , але і щодо осі зовнішнього магнітного колеса O_2 . Зовнішнє магнітне колесо є нерухомим і є статором, усередині якого обкатується ротор. Статор має вісь O_2 і складається з кільцевого магнітопроводу 1 і встановлених на його внутрішній поверхні радіально намагнічених постійних магнітів 2. Ротор циклоїдної магнітної передачі являє собою кільце з магнітом'якого матеріалу 3 з радіально постійними намагніченими магнітами 4 на його зовнішній поверхні.

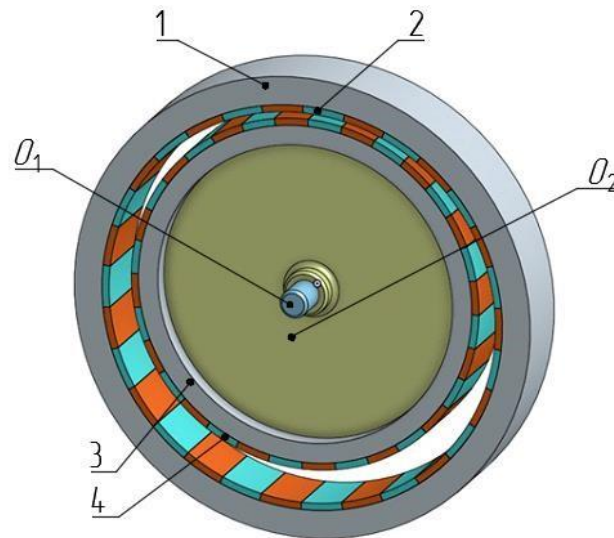


Рисунок 1.5 – Принципова схема циклоїдної магнітної передачі:

1, 2 – магнітопровід та радіально намагнічені ПМ статора; 3, 4 – магнітопровід і радіально намагнічені ПМ ротора; O_1 , O_2 – осі обертання

Завдяки такому виконанню стає можливим використовувати звичайний циліндричний негнучкий ротор, розташований з ексцентриситетом до осі статора, що необхідно для створення хвилі. Обертання ротора щодо своєї осі O_1 низькошвидкісне, яке обертання навколо осі статора O_2 є високошвидкісним.

Основний недолік такої топології полягає в тому, що ротор, крім обертання щодо своєї осі, обертається навколо осі статора, що ускладнює зняття моменту і вимагає використання конструктивних елементів для перетворення складного обертального руху на простої відносно однієї осі. Такі конструктивні елементи здебільшого засновані на використанні сили тертя, що знижує ККД та надійність циклоїдної магнітної передачі [22]. Крім того, ексцентрично встановлений ротор викликає вібрації механічного походження, а також наявність некомпенсованих радіальних електромагнітних сил.

Для вирішення проблеми з конвертацією складного обертального руху ротора [53] пропонується використовувати двоступінчасту конструкцію магнітної передачі. Перший ступінь являє собою звичайну циклоїдну магнітну передачу, яка показана на малюнку 5. Другий щабель конструктивно аналогічна першому ступені з тією

відмінністю, що її статор може вільно обертатися щодо своєї осі. Магнітні передачі першого та другого ступенів жорстко з'єднані механічно по роторах. Рух ротора першого ступеня можна розділити на дві складові - навколо власної осі (низькошвидкісний рух) та навколо осі статора (високошвидкісний рух). Ці два рухи без зміни передаються на ротор другого ступеня. Якщо передавальні відносини магнітних передач першого і другого ступенів рівні, то відповідно до формули Вілліса [54] швидкість розблокованого статора другого ступеня дорівнюватиме швидкості заблокованого статора першого ступеня, тобто дорівнює нулю, оскільки магнітні передачі обох ступенів повністю ідентичні. Для передачі потужності необхідно мати різні передавальні відносини щаблів. Так у наведеному авторами винаходу [53] прикладі передавальне відношення магнітної передачі першого ступеня дорівнює двадцяти, другого ступеня двадцяти двом, даючи загальне передатне відношення 440.

Необхідно відзначити, що ідея створення двоступінчастої циклоїдної магнітної передачі А. Каїса [53] була на кілька десятиліть раніше запропонована вітчизняним вченим Ганзубром Л. Б. [10] в 1969 р, який називає свій винахід двоступеневою планетарною магнітною передачею за схемою -h із двома внутрішніми зачепленнями. Топологія цієї передачі принципово повторює топологію двоступінчастої циклоїдної магнітної передачі, з тією різницею, що А. Каїс прийшов до цієї топології, відштовхуючись у своїх міркуваннях від хвильової передачі, а Ганзбург Л. Б від планетарної передачі. У конструкції Ганзбурга Л. Б. використовується електромагнітне збудження, а також пускова короткозамкнута обмотка. Пізніше цей винахід було вдосконалено Яковлєвим Ст А. (СРСР) [56] шляхом застосування постійних магнітів як на провідному, так і на веденому магнітному колесах, що дозволило збільшити щільність моменту пристрою.

Однією з перших робіт, присвячених дослідженню хвильової передачі, є стаття [57], в якій автори виконали 2D розрахунок магнітного поля методом кінцевих елементів та показали, що хвильова магнітна передача при використанні високоенергетичних постійних магнітів може мати густину моменту $110 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ при передатному

відношенні 15 [57] та $150 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ при передатному відношенні 18 [58]. Проте, автори визнають принципові складнощі реалізації такого пристрою, пов'язані з виготовленням гнучкого ротора. [58] тією ж науковою групою досліджено експериментальний зразок двоступінчастої циклоїдної передачі з передавальним відношенням 360. Щільність моменту склала близько $75 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$. Авторами відзначається важливий факт, що при переході від одноступінчастої до двоступінчастої циклоїдної магнітної передачі щільність моменту зменшується майже вдвічі. У [54] було проведено розрахунок циклоїдної одноступінчастої магнітної передачі, за результатами якого щільність моменту становила $183 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$. [58, 59] наведені результати експериментальних досліджень циклоїдної магнітної передачі, в якій ротор встановлений в статор без зазору, тобто ротор котиться по внутрішній поверхні статора з прямим механічним контактом. Максимальний момент збільшується рахунок сил тертя і збільшеної через відсутність повітряного зазору магнітної сили. Таким чином, вирішується проблема із виникненням некомпенсованих радіальних магнітних сил, що діють на підшипники. У конструкції також передбачено колесо балансування для зменшення механічних вібрацій.

Даних, що дозволяють розрахувати щільність моменту, [58, 59] не виявлено.

[11] наведена конструкція двоступінчастої планетарної магнітної передачі, виконаної за схемою $2k-h$ з електромагнітним збудженням потужністю 80 Вт, частотою обертання швидкохідного валу 3000 об/хв, передавальним відношенням 76, зовнішнім діаметром 106 мм і аксіальною довжиною. Щільність моменту склала $32,7 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$, що є добрим результатом, особливо з огляду на наявність електромагнітного збудження без використання сучасних високоенергетичних рідкоземельних постійних магнітів. Така схема реалізації магнітної передачі відзначається автором найперспективнішою серед інших топологій. Однак слід зазначити, що ця магнітна передача мала повітряний зазор 0,3 мм, в той час як затребуваний на практиці зазор для таких пристроїв близько 1 мм.

1.3 Коаксіальна планетарна магнітна передача

Коаксіальна планетарна магнітна передача немає аналогів серед зубчастих передач. У вітчизняній літературі такі пристрої одержали назву крокових магнітних передач [10, 11]. За своїм принципом дії коаксіальна планетарна магнітна передача ближча до електричної машини з електромагнітною редукцією, ніж до зубчастої передачі. Принципова схема коаксіальної планетарної магнітної передачі наведена на рис.1.6. До її складу входить зовнішнє магнітне колесо, що складається з кільцевого магнітопроводу 1 і встановлених на його внутрішній поверхні радіально намагнічених постійних магнітів 2. Внутрішнє магнітне колесо являє собою кільцевий магніто на його зовнішній поверхні. Між зовнішнім та внутрішнім магнітними колесами знаходиться проміжне магнітне колесо, що складається з сегментів 5, виконаних з магнітом'якого матеріалу і розділених між собою немагнітними проміжками. Зазвичай зовнішнє магнітне колесо заблоковане і являє собою статор, у той час як внутрішнє та проміжне магнітні колеса є високошвидкісною та низькошвидкісною роторами відповідно.

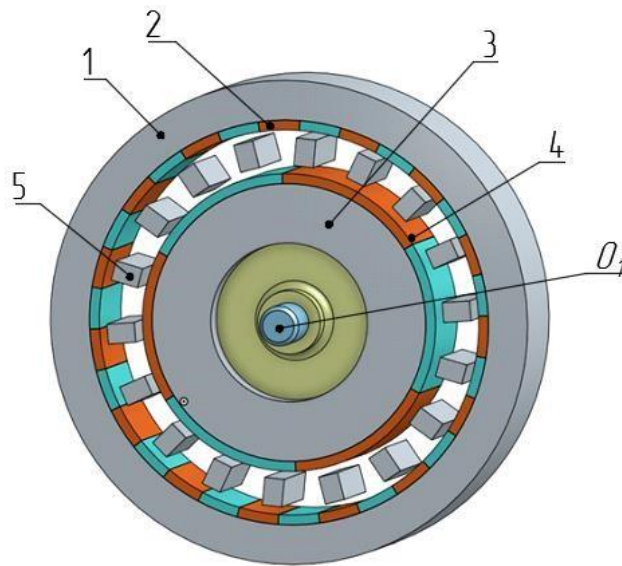


Рисунок 1.6 – Принципова схема коаксіальної планетарної магнітної передачі:

1, 2 – магнітопровід та радіально намагнічені ПМ статора; 3, 4 – магнітопровід та радіально намагнічені ПМ високошвидкісного ротора; 5 - сегменти з магнітом'якого матеріалу низькошвидкісного ротора; O1 – вісь обертання роторів

Головний процес, що лежить в основі принципу дії планетарної коаксіальної магнітної передачі, полягає в явищі модуляції магнітного поля в повітряних зазорах, за допомогою якої відбувається взаємодія між собою елементів магнітної системи. Без проміжного магнітного колеса магнітні системи зовнішнього і внутрішнього магнітних коліс створюють магнітні поля з різними числами пар полюсів і стабільна передача потужності між ними неможлива. При встановленні між зовнішнім та внутрішнім магнітними колесами проміжного магнітного колеса (модулятора), магнітне поле, створюване зовнішнім магнітним колесом, змінить свій гармонійний склад, внаслідок наявності в модуляторі сегментів з магнітом'якого матеріалу. Число сегментів у модуляторі вибирається таким чином, що в гармонійному складі цього магнітного поля з'явиться просторова гармоніка з числом пар полюсів внутрішнього магнітного колеса. Аналогічно, магнітне поле, яке збуджується внутрішнім магнітним колесом, модулюватиметься з утворенням просторових гармонік з кількістю пар полюсів

зовнішнього магнітного колеса. Отже, створюються умови для стійкої взаємодії роторів за взаємно нерухомими просторовими гармоніками магнітного поля [61].

Якщо проміжне магнітне колесо (модулятор) є нерухомим, то зовнішнє та внутрішнє магнітні колеса стануть низькошвидкісним та високошвидкісним відповідно. За принципом дії така магнітна передача є синхронним механізмом [12], і відношення частот обертання магнітних коліс дорівнює зворотному відношенню чисел пар полюсів на них і в загальному випадку визначається формулою [62]

$$\frac{p_{\text{зов}}}{p_{\text{вн}}} n_{\text{зов}} - \left(\frac{p_{\text{зов}}}{p_{\text{вн}}} + 1 \right) n_{\text{пр}} + n_{\text{вн}} = 0 \quad (1.9)$$

де $p_{\text{зов}}$ - число пар полюсів зовнішнього магнітного колеса; $p_{\text{вн}}$ - число пар полюсів внутрішнього магнітного колеса; $n_{\text{зов}}$ - частота обертання зовнішнього магнітного колеса, об / хв; $n_{\text{пр}}$ - частота обертання проміжного магнітного колеса, об/хв; $n_{\text{вн}}$ - частота обертання внутрішнього магнітного колеса, об/хв.

Крім того, для ефективної роботи необхідно, щоб число сегментів у проміжному магнітному колесі було рівне

$$N_c = p_{\text{вн}} + p_{\text{зов}} \quad (1.10)$$

Помноживши ліву та праву частини виразу (8) на $p_{\text{вн}}$ маємо

$$p_{\text{зов}} n_{\text{зов}} - (p_{\text{вн}} n_{\text{вн}}) n_{\text{пр}} + n_{\text{вн}} p_{\text{зов}} = 0 \quad (1.11)$$

З виразу (10) зокрема випливає, що при зовнішньому заблокованому магнітному колесі напрямки обертання внутрішнього магнітного колеса і проміжного магнітного колеса збігаються. Вираз (1.10) аналогічно виразу для співвідношення швидкостей планетарної магнітної передачі. Між планетарною магнітною передачею і планетарною коаксіальною магнітною передачею має місце аналогія, згідно з якою, зовнішнє магнітне колесо відповідає коронній магнітній шестірні, проміжне магнітне колесо відповідає водилу, а внутрішнє магнітне колесо відповідає сонячній магнітній шестерні. Однак усі елементи коаксіальної планетарної магнітної передачі мають загальну вісь обертання, у зв'язку з чим він і отримав таке відмінне визначення як коаксіальний. Необхідно також

відзначити, що можливий випадок, коли коаксіальна планетарна магнітна передача замість співвідношення (1.10) задовольняє співвідношенню

$$N_c = p_{\text{зов}} + p_{\text{вн}} \quad (1.12)$$

У цьому випадку при заблокованому зовнішньому магнітному колесі решта двох магнітних колес буде обертатися в протилежних напрямках, тобто вираз (1.9) для швидкостей елементів магнітної системи набуде вигляду

$$p_{\text{зов}}n_{\text{зов}} - (p_{\text{зов}} + p_{\text{вн}})n_{\text{пр}} - n_{\text{вн}}p_{\text{зов}} = 0 \quad (1.13)$$

Автором ідеї такої топології магнітної передачі є Альфонс Ньюланд (США) [63]. Магнітна передача Ньюланда має реактивний принцип дії та електромагнітне збудження. Дещо пізніше Ніколом Лейнгом (Німеччина) [64] було запропоновано використовувати збудження від постійних магнітів. Сегменти з магнітом'якого матеріалу проміжного магнітного колеса в цих винаходах розподілені нерівномірно таким чином, що всі сегменти розділені на групи, зміщені один щодо одного на половину полюсного поділу, що принципово забезпечувало роботу пристрою як магнітної передачі, але не давало максимальну ефективність. Льюїс Чабб (США) у своєму патенті на редукторний електродвигун [65], крім самого двигуна, запропонував удосконалення магнітної передачі Ньюланда, яке полягало у можливості використання постійних магнітів на внутрішньому магнітному колесі, а також у більш правильному, рівномірному по всій довжині кола, розміщенні сегментів проміжного. магнітного колеса. Автор називає свій винахід двигуном Верньє на ім'я французького математика П'єра Верньє - винахідника шкали верньєра відому також як ноніус, що використовується для вимірювання малих величин, наприклад, штангенциркулем [66]. Це відображає суть його винаходу, в основі якого лежить створення різниці між числом зубців зовнішнього магнітного колеса і проміжного магнітного колеса, аналогічно основній шкалі та ноніусу на штангенциркулі. Слід зазначити, що саме Льюїсом Чаббом було виведено вираз (1.9). Завдяки можливості створювати подібні пристрої з великим передатним числом, основним призначенням такої конструкції було використання її як привод годинника, що отримує живлення від джерела промислової частоти. У патенті як

приклад наведено пристрій, що поєднує в собі двигун Верньє і магнітну передачу з передавальним відношенням 3600, що давало можливість підключати секундну стрілку годин безпосередньо до низькошвидкісного ротора пристрою, який при частоті живлення 60 Гц обертався з частотою 1 об/хв. Слід зазначити, що це принцип дії стосовно електричних машин був запатентований трохи раніше 1929 р. Оскаром Диком [67]. Проте ідея використання цього принципу для магнітної передачі належить саме Чаббу [65]. Глен Ріс [68] (США) запатентував варіант реактивної конструкції коаксіальної планетарної магнітної передачі з аксіальним потоком збудження як від постійних магнітів, так і від електромагніту. Наступним етапом розвитку коаксіальної планетарної топології став винахід Томаса Мартіна (США) [62], в якому він вперше запропонував конструкцію з постійними магнітами як на зовнішньому магнітному колесі, так і на внутрішньому магнітному колесі, яка і до сьогодні вважається однією з найефективніших. Перші вітчизняні патенти на конструкцію коаксіальної планетарної магнітної передачі з'явилися 1968 їх автори Бансевичус Р. Ю. [69] і Борисов Л. А. [70].

Коаксіальна магнітна передача може бути виконана з регульованим передавальним відношенням. Так, наприклад, Ханс Шлаєппі (Швейцарія) [71] описує спосіб регулювання передавального відношення за допомогою спеціально спроектованих котушок збудження. Дещо пізніше Газбургом Л. Б. [72] була запатентована конструкція планетарної коаксіальної магнітної передачі, в якій передбачена можливість ступінчастого регулювання передавального відношення за рахунок аксіального переміщення елементів магнітної системи. А. Каїсом (Великобританія) для регулювання передавального відношення було запропоновано вкладати в пази статора трифазну обмотку, що живиться змінним струмом від джерела з частотою, що регулюється. Пізніше модифікація цієї ідеї була запатентована Афанасьєвим А. Ю. та Чихняєвим В. А. [73].

Класична конструкція, запропонована Томасом Мартіном (США) [62], має можливості до вдосконалення та збільшення щільності моменту. Так, Абрамцевим Є. П. [74] була запропонована конструкція з використанням діамагнітних матеріалів з метою

покращення функції модуляції магнітного потоку, а також конструкція магнітної системи, виконана таким чином, що в силовій взаємодії бере участь не тільки радіальна поверхня елементів магнітної системи, а й їх торцева частина.

Івашов Є. Н. [75] запропонував використовувати постійні магніти на всіх трьох магнітних колесах. Яковлев В. А. [76] запатентував реактивну коаксіальну планетарну магнітну передачу, виконана двоступінчастою і запропонував варіант конструкції, при якому ступені концентричні один одному, а їх з'єднання є паралельним, що збільшує максимальний переданий момент без збільшення передавального відношення. Також Яковлевим була запатентована конструкція, в якій щаблі з'єднані послідовно, що призводить до значного збільшення передавального відношення пристрою [77].

1.4 Експлуатаційні характеристики коаксіальної планетарної магнітної передачі

Інтерес провідних світових вчених до глибшого вивчення магнітних передач викликала стаття [14], опублікована 2001 р. групою англійських вчених. У статті автори вперше показали теоретичну можливість отримання щільності моменту в коаксіальній планетарної магнітної передачі понад $100 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$. Така щільність моменту в десять разів перевищує щільність моменту сучасних синхронних електричних машин з природним повітряним охолодженням та збудженням від постійних магнітів, що відкриває широкі перспективи використання магнітних передач в електромеханічних системах. Дещо пізніше цій групі авторів вдалося експериментально підтвердити отримані розрахункові дані [80], створивши і успішно випробувавши експериментальний зразок з передатним відношенням 5,75 і щільністю моменту $72,7 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$. Найменше значення щільності моменту пов'язане з наявністю не врахованих у [14] крайових ефектів.

У роботі датських дослідників [21] експериментально отримана щільність моменту за активними матеріалами $54,5 \text{ кНм}/\text{м}^3$, причому щільність моменту для

конструкції в цілому склала 15 кНм/м^3 , що автори пов'язують насамперед з технологічними складнощами виготовлення прототипу.

У 2012 р. американськими вченими [81] було представлено роботу, в якій автори запропонували більш економічну, порівняно зі своїми попередниками, схему реалізації магнітної передачі, основною особливістю якої є використання більш дешевих, порівняно з рідкісноземельними, феритових постійних магнітів, напрямок намагніченості яких тангенціальний. Незважаючи на застосування слабших магнітів, за допомогою оптимізації конструкції вдалося досягти щільності моменту $65,5 \text{ кНм/м}^3$.

У роботі [82] наведено результати оптимізації параметрів магнітної системи за критерієм максимуму густини моменту. За основу було взято лінеаризовану аналітичну 2D модель. Цільова функція містила в собі сім змінних: відношення числа пар полюсів на зовнішньому і внутрішньому роторах (аркуш дискретних значень), відношення тангенціального розміру полюсного наконечника модулятора до полюсного поділу модулятора, відношення радіального розміру полюсного наконечника модулятора до полюсного поділу модулятора товщина внутрішніх магнітів, зовнішній повітряний зазор, внутрішній повітряний зазор. За результатами оптимізації вдалося досягти густини моменту $157 \text{ кН} \cdot \text{м/м}^3$.

[83] наведена конструкція магнітної передачі, що має щільність моменту $239 \text{ кН} \cdot \text{м/м}^3$, що було підтверджено не тільки теоретичними розрахунками, але й випробуваннями експериментального зразка. Дана щільність моменту є максимальною з досягнутих магнітних передачах такої топології і забезпечена використанням зустрічно намагнічених постійних магнітів з залишковою магнітною індукцією $1,25 \text{ Т}$ і малого повітряного зазору в $0,5 \text{ мм}$ при зовнішньому діаметрі статора 228 мм .

До особливостей топології коаксіальної планетарної магнітної передачі ставляться пульсації моменту, що пов'язані з важливим наявністю зубчастої структури (модулятора). Однак існують технічні рішення щодо зниження їх амплітуди за допомогою аксіального поділу одного з роторів на дві частини з наступним кутовим

зміщенням цих частин один щодо одного, що дозволяє знизити пульсації моменту більш ніж утричі [84, 85].

Існує залежність між передатним відношенням та процентною складовою пульсацій у вихідному моменті пристрою. [86] показано, що амплітуда пульсацій пропорційна найменшому загальному кратному від чисел пар полюсів на внутрішньому і зовнішньому магнітних колесах. Чим більше найменше загальне кратне, тим вища частота пульсацій і менше їх амплітуда. У зв'язку з цим переважні дробові передавальні відносини.

Деякі автори також зазначають, що при заданій частоті обертання максимальні втрати на індуковані струми мають місце на холостому ході, а збільшення моменту навантаження призводить до зменшення магнітних втрат [87].

Завдяки коаксіальній структурі, дана топологія магнітної передачі підпорядковується деяким загальним закономірностям, характерним для електричних машин, серед яких збільшення ефективності зі збільшенням діаметра за збереження повітряного зазору незмінним [4].

Найбільш уразливим з механічного погляду елементом конструкції є проміжне магнітне колесо (модулятор) [88, 89]. Для його підсилення додають перемички між сегментами. Найменший вплив на максимальний момент мають перемички, максимально наближені в радіальному напрямку до внутрішнього (з малим числом пар полюсів) магнітного колеса [90]. В одній із моделей таке розташування перемичок при їх товщині 0,3 мм призвело до зменшення максимального моменту на 2%. Подібна конструкція модулятора зменшує кількість вищих гармонік поля в повітряному зазорі, що значно зменшує втрати на індуковані струми в постійних магнітах [91]. Втрати в постійних магнітах можуть досягати до 70% від загальних втрат, у зв'язку з чим рекомендується вживати заходів щодо їх зменшення [92].

Значне посилення конструкції також можливе за зміни класичної топології, зокрема, при зміні місцями зовнішнього магнітного колеса і проміжного магнітного колеса за збереження високих значень щільності моменту [93].

При роботі магнітної передачі виникають механічні коливання, які пов'язані не тільки з пульсаціями моменту (реактивним моментом), але і з некомпенсованими радіальними зусиллями [94]. Для мінімізації радіальних магнітних сил, які впливають підшипники, рекомендується виконувати конструкцію з азимутальною симетрією [95]. Форма сегментів модулятора та розміри постійних магнітів значно впливають на максимальний момент і є предметом оптимізації [96 – 98].

Збільшення щільності моменту до 25% і зменшення пульсацій моменту можна досягти за допомогою застосування структур Хальбаха [99, 100] або тангенційно зустрічно постійних намагнічених магнітів [101].

Кільцева структура коаксіальної планетарної магнітної передачі та співвісне розташування її частин, що обертаються, відкривають широкі можливості по інтеграції її з низькошвидкісною електричною машиною. Внаслідок чого виходить компактний моментний двигун, що не вимагає примусового охолодження, із щільністю моменту до 120 кН·м/м³ [102] та ККД понад 96% при 100 об/хв.

1.5 Вибір конструкції-прототипу магнітної передачі

За результатами огляду науково-технічних статей та патентної інформації для подальшого дослідження обрано коаксіальну планетарну магнітну передачу, оскільки у порівнянні з іншими перспективними топологіями, вона має велику щільність моменту, вимагає відносно невеликого обсягу постійних магнітів і має малі радіальні зусилля. Існуючі методики та відомі результати досліджень не дають повного уявлення про складні електромагнітні та механічні процеси при перетворенні енергії та не дозволяють достовірно оцінювати ефективність таких магнітних передач. Тому дана робота націлена на подальший розвиток теорії коаксіальних планетарних магнітних передач та створення більш інформативної методичної бази для успішного проєктування, яка дозволить прискорити та розширити їх впровадження у промисловість. Для досягнення

поставленої мети виконано цикл розрахунково-теоретичних та експериментальних досліджень.

1.6 Огляд систем перетворення низькопотенційної механічної енергії вітру в електричну

1.6.1 Загальна класифікація вітроелектричних систем

Використання енергії вітру для виробництва електроенергії найчастіше здійснюється за допомогою вітрових електростанцій (ВЕС). Основним структурним елементом ВЕС є вітровий агрегат, який включає в себе ротор вітроустановки, механічний мультиплікатор та електроджерела електричної енергії. Ротор вітроустановки, під дією вітру, створює обертовий момент на валу джерела електричної енергії. Для забезпечення відповідності обертальної швидкості вітроколеса і частоти мережі використовується механічний мультиплікатор. Крім того, ВЕС комплектуються системою керування роботою вітрового агрегату та джерела електричної енергії. Існують два основних типи ВЕС - з вертикальною (рис. 1.7) і горизонтальною віссю обертання (рис. 1.8).



а) з ротором Савоніуса; б) з ротором Масгрува; в) з ротором Дар'є; г) з гелікоїдним ротором

Рисунок 1.7 - ВЕУ з вертикальною віссю обертання



а) однолопатева; б) дволопатева; в) трилопатева; г) багатолопатева

Рисунок 1.8 - ВЕУ з горизонтальною віссю обертання

Ротор ВЕУ з вертикальною віссю обертається навколо осі, перпендикулярній напрямку повітряного потоку. Переваги ВЕУ з вертикальною віссю обертання:

- відсутність системи орієнтації за напрямом вітру, оскільки ефективність роботи ВЕУ з вертикальною віссю визначається лише швидкістю вітру і не залежить від його орієнтації;

- вісь обертання ротора джерела електричної енергії співпадає з віссю обертання вітроколеса, тому джерело електричної енергії і передачу розміщують внизу ВЕУ;

- менше навантаження на опору ВЕУ.

Незважаючи на переваги, ВЕУ з вертикальною віссю обертання не отримали широкого поширення через те, що ВЕУ з горизонтальною віссю обертання мають вищий коефіцієнт корисної дії і менші витрати. Згідно з геометрією вітроколеса, ВЕУ з горизонтальною віссю обертання поділяються на одно-, дво-, три- і багатолопатеві. Зазвичай багатолопатеві агрегати працюють з низькою швидкістю обертання, що призводить до великого обертового моменту, тому їх використовують як приводи для насосів та інших виконавчих пристроїв. Однолопатеві та трилопатеві ротори мають високу швидкість обертання, тому їх зазвичай під'єднують до електроджерела електричної енергії. Трилопатеві вітроколеса використовуються найчастіше. Однак їх

основним недоліком була висока початкова швидкість вітру (4-6 м/с), але в сучасних ВЕУ це значення знижено до (2-3 м/с). За функціональним призначенням вузли ВЕУ поділяються на механічні, аеромеханічні і електричні.

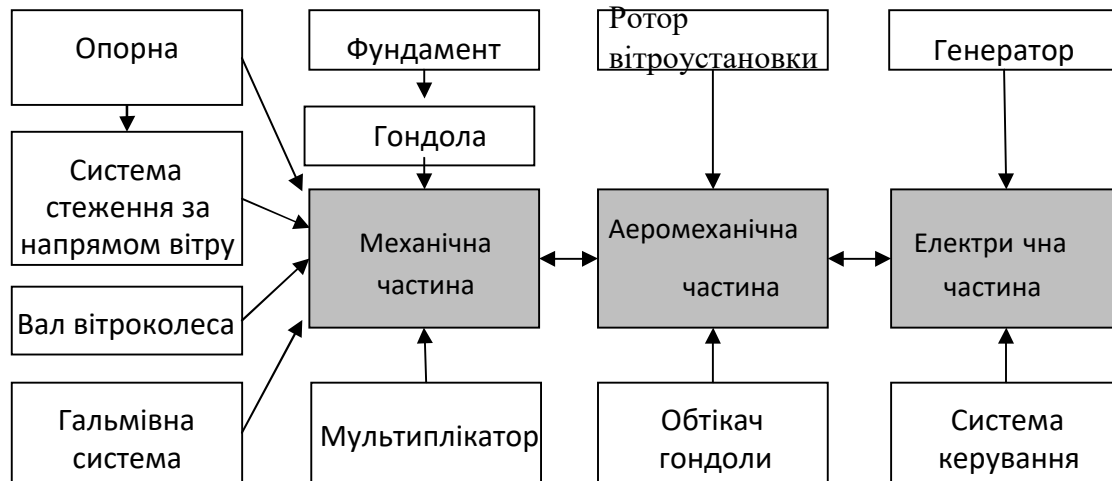


Рисунок 1.9 - Структурна схема ВЕУ

Всі виконавчі пристрої ВЕУ з горизонтальною віссю обертання розміщено у верхній частині опорної башти – гондолі, яку закріплюють на фундаменті, рис. 1.10. Взаємне розміщення агрегатів в гондолі показано на рис. 1.11. Нижче наведено конструкцію, опис і технічні особливості основних складових частин ВЕУ.

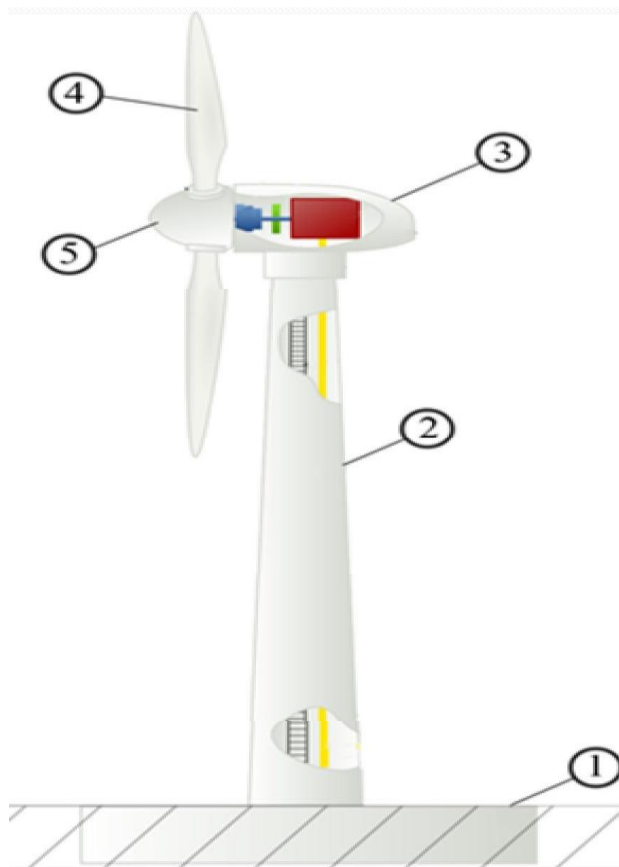


Рисунок 1.10 - Зовнішній вид ВЕУ

- 1) фундамент; 2) башта; 3) гондола; 4) ротор вітроустановки; 5) обтікач гондоли

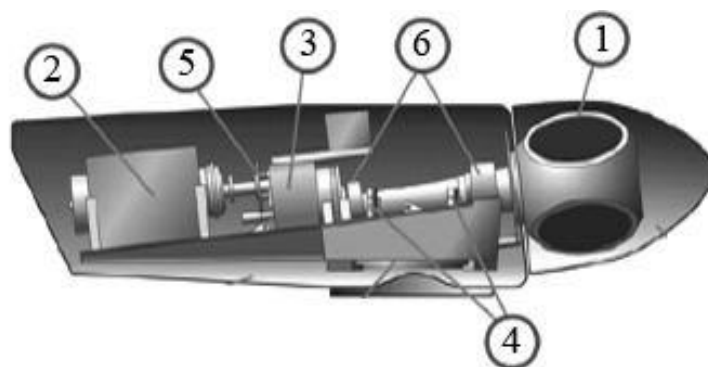


Рисунок 1.11 - Взаємне розміщення агрегатів у гондолі

- 1) маточина вітроколеса; 2) джерела електричної енергії ; 3) мультиплікатор;
4) система стеження; 5) гальмо; 6) вал вітроколеса

Функція ротору вітроустановки полягає в перетворенні кінетичної енергії потоку повітря на механічну енергію та концентрації її на валу. Ротор вітроустановки складається з втулки та лопатей, які прикріплені до неї. У потужних вітроенергетичних установках лопаті можуть мати додатковий механізм приводу, що регулює кут профілю крила в залежності від швидкості вітру. Більшість сучасних вітроенергетичних установок використовують трилопатеві вітроколеса, оскільки вони мають менші аеродинамічні втрати: менше на 10% порівняно з дволопатевиими і на 4% порівняно з однолопатевиими. Сучасні вітроенергетичні установки потужністю кілька мегаватт зазвичай мають лопаті розміром від 40 до 60 метрів. Розмір лопатей обмежений максимальною лінійною швидкістю їх кінців, яка не повинна перевищувати швидкість звуку. В останні роки спостерігається тенденція до збільшення діаметра вітроколеса і потужності встановлених вітроенергетичних установок, що призводить до зменшення витрат на їх будівництво і зниження вартості отриманої електроенергії.

1.6.2 Мультиплікаторні та безмультиплікаторні вітроелектроустановки

За типом трансмісії ВЕУ можна умовно поділити на: мультиплікаторні ВЕУ; безмультиплікаторні (прямопривідні) ВЕУ.

У мультиплікаторних ВЕУ крутний момент, що розвивається ротором, через мультиплікатор передається на вал високошвидкісного. електроджерела електричної енергії, що виробляє генерацію електроенергії. Мультиплікатором є механічний пристрій, що передає обертаючий момент. При цьому як мультиплікатор можуть виступати: зубчастий мультиплікатор; пасова передача; гідравлічна передача.

Зубчата передача. Використання зубчастої передачі у системі трансмісії ВЕУ є найпоширенішим технічним рішенням. Зубчасті передачі відрізняються надійністю та мають високий ресурс експлуатації.

Зазвичай вони застосовуються при особливо складних режимах роботи для передачі та перетворення великих потужностей. Основним робочим елементом у

зубчастої передачі є зубчасті шестерні, які взаємодіють між собою, передають, перетворюючи, крутний момент. Зубчасті шестерні бувають циліндричної (осі вхідного та вихідного валу цієї передачі паралельні) або конічній (осі вхідного та вихідного валу цієї передачі перпендикулярні). За формою зубів можуть бути прямозубі, косозубі та шевронні. Передача крутного моменту в зубчастих передачах може здійснюватися у кілька шаблів. Розміщуються зубчасті передачі у закритому корпусі. Змащування їх здійснюється рідкими машинними оліями, що розпорошується з картера у вигляді масляного туману у внутрішній порожнині корпусу передачі самими шестернями чи спеціальними бризковиками. Охолодження олії у ВЕУ малої потужності (від 10 до 100 кВт) здійснюється за рахунок теплового відведення через стінки корпусу передачі. У ВЕУ середньої потужності (від 100 до 500 кВт) зубчасті передачі комплектуються радіаторами, що забезпечують примусове охолодження олії.

Пасова передача - це передача механічної енергії за допомоги гнучкого елемента (ременя) за рахунок сил тертя чи сил зачеплення (зубчасті ремені). Основними робочими елементами у ременній передачі є ведучий, ведений шків і ремінь, що з'єднує їх і передає крутний момент. Пасова передача має високу плавність роботи, що згладжує невеликі пульсації від ротора ВЕУ, безшумна, має відносно невисоку вартість і невибаглива в обслуговуванні (відсутні гідравлічні системи мастила, винятком опорних вузлів, витратним матеріалом є ремінь, який вимагає заміни не частіше ніж 1 раз на 3 – 5 років). Незважаючи на ці її переваги, вона не знайшла широкого поширення у ВЕУ через низькі передаточні величини на один щабель ($1:6 - 1:12$, не більше) та їх великих габаритів.

Гідравлічна передача. У ВЕУ з гідравлічною системою трансмісії, механічна енергія, що розвивається ротором ВЕУ, підводиться безпосередньо до гідронасосу і перетворюється ним на енергію рухомого потоку рідини в системі гідравліки. Далі ця енергія за допомогою гідродвигуна перетворюється на механічну енергію приводу, яка перетворюється електроджерелом електричної енергії в електричну енергію. Подібного роду ВЕУ здатні працювати зі змінним числом оборотів, при цьому, внаслідок відсутності геометричного замикання при передачі зусилля між ротором і джерела

електричної енергії, постійна кількість обертів джерела електричної енергії, необхідна для утворення мережі або подачі напруги в мережу, абсолютно не залежить від числа оборотів ротора. Тому джерела електричної енергії можна безпосередньо з'єднати з мережею чи споживачами. Гідравлічна система головного приводу може виконувати регулювання обертів обертання ротора ВЕУ його гальмуванням. При цьому головний гідростатичний привід використовується як робоче гальмо, і працює в цьому режимі без підвищеного зносу, на відміну від механічної гальмівної системи. Тому необхідність використання систем управління кутом установки лопатей у ВЕУ з такого роду трансмісією виключається.

Безмультиплікаторні (прямопривідні) ВЕУ. У прямопривідних ВЕУ механічна енергія, що розвивається ротором ВЕУ надходить безпосередньо на вал електроджерела електричної енергії. Ця схема стала можливою за рахунок використання низькошвидкісних синхронних електроджерел електричної енергії на постійних магнітах.

1.7 Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка системи перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну на основі магнітної передачі у складі автономної вітроустановки шляхом математичного та імітаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести літературно-патентний пошук за темою дослідження з подальшим аналізом систем перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну та вибором конструктивного прототипу системи;

2. Розробити чисельну польову математичну модель магнітної передачі, проаналізувати його параметри і характеристики та провести дослідження впливу геометричних параметрів з метою отримання мінімальних значень пульсацій передавального електромагнітного моменту;

3. Розробити чисельну імітаційну модель магнітної передачі у складі автономної вітроелектричної установки малої потужності для оцінки динамічних процесів та експлуатаційних характеристик магнітної передачі;

4. Провести розробку та виготовити експериментальний зразок магнітної передачі, на якому виконати необхідні експериментальні дослідження з метою підтвердження достовірності даних розрахунків, отриманих за розробленими уточненими математичними моделями.

Висновки до розділу 1

Використання сучасних джерел магнітного поля, раціональне проектування магнітної системи за допомогою сучасних засобів комп'ютерного моделювання (методи кінцевих елементів, методи граничних елементів) дозволяють отримати конструкції магнітних передавальних механізмів з високими масогабаритними показниками, порівнянними з показниками механічних передач. При цьому магнітні передачі володіють такими перевагами, як безконтактність, малі шуми, збільшений ресурс роботи, можливість передачі моменту в герметичні середовища та через перешкоди. Однак дискретність зони робочого проміжку викликає пульсації переданого моменту і сприяє появі явища «залипання» зубців ротора щодо зубців статора. Дані явища погіршують енергетичні, пускові і експлуатаційні характеристики магнітних передавальних пристроїв.

Можливими шляхами покращення даних характеристик є профілізація і скіс зубців, а також раціональний вибір довжини робочого проміжку. Представляють інтерес конструкції електричних двигунів з вбудованими магнітними редукторами, що виключають необхідність використання механічного редуктора і забезпечують компактну конструкцію приводу. Подібні механізми і пристрої становлять інтерес для таких областей, як вітроенергетика, екологічно чистий і гібридний автотранспорт, компресорна техніка.

Найбільш перспективними топологіями магнітних передач є планетарна, планетарна коаксіальна та циклоїдна. У планетарній передачі використовується приблизно на 50% більше постійних магнітів, ніж у інших перспективних топологіях. Циклоїдна магнітна передача застосовується практично лише у двоступінчастому виконанні, що знижує щільність її моменту до двох раз. Принципова наявність ексцентриситету в циклоїдній магнітній передачі породжує вібрації та некомпенсовані радіальні електромагнітні сили, що зменшують ресурс підшипників.

Магнітні передачі коаксіальної планетарної топології можуть бути виконані з мінімальними радіальними електромагнітними силами, а співвісне розташування обертових частин дозволяє не вдаватися до додаткових пристроїв для зняття моменту з її вихідного валу як у циклоїдної передачі. Її недоліками є наявність пульсацій моменту і складна технологія виготовлення проміжного магнітного колеса (модулятора).

Існуючі методики проєктування магнітних передач відносяться до 1970-х років і вимагають значної переробки з урахуванням останніх досягнень як у галузі матеріалознавства, так і в галузі методів розрахунку магнітних систем.

Існуючі сучасні методики моделювання та відомі результати досліджень магнітних передач не дають повного уявлення про складні електромагнітних та механічних процесів при перетворенні енергії та не дозволяють проводити проєктування магнітних передач та достовірно оцінювати їх ефективність.

Відомі сучасні дослідження детально не торкаються питань конструктивного виконання магнітних передач для промислового застосування та методики їх експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИК МАГНІТНОЇ ПЕРЕДАЧІ

2.1 Вибір методу моделювання магнітного поля

При проектуванні коаксіальних планетарних магнітних передач зазвичай склалися два важливі підходи до розрахунку властивостей магнітного поля – аналітичний і чисельний. Історично першим з них з'явився аналітичний метод розрахунку у двовірному наближенні [103], застосування якого передбачало прийняття низки припущень. Основні з них – це лінійність магнітних властивостей матеріалів, еквіпотенційність поверхонь зубцевих елементів, нехтуванням до кінцевих ефектів і дотичної складової магнітного поля в повітряних зазорах.

Основним недоліком сучасних аналітичних методів є низька точність розрахунку, обумовлена принциповою неможливістю точного обліку нелінійності властивостей магнітних матеріалів, що може призводити до виникнення похибки у визначенні амплітуди робочої гармоніки магнітного поля до 40% [104], змушуючи проектувати магнітну таким чином, щоб елементи залишалися на лінійній ділянці основної кривої намагнічування [82]. Для досягнення максимальної густини моменту в коаксіальній планетарній магнітній передачі необхідно, щоб окремі сегменти модулятора знаходилися в насиченому стані, в результаті чого цей недолік принципово не дозволяє спроектувати максимально ефективний пристрій.

До переваг аналітичних методів розрахунку можна віднести значно менший у порівнянні з чисельними методами час розрахунку [104].

Другий підхід до розрахунку магнітного поля базується на чисельному розв'язанні диференціальних рівнянь Максвелла і дозволяє вводити мінімальну кількість припущень і цим отримувати результат з високим ступенем точності. Найбільш поширеними методами розв'язання цих диференціальних рівнянь є метод кінцевих

елементів та метод просторових інтегральних рівнянь [105]. Розрахунок магнітних передач за допомогою чисельних методів із постановкою завдання у тривимірному наближенні дозволяє отримати точність при розрахунку електромагнітного моменту до 5% [83, 106], а також дає можливість більш точно враховувати магнітні втрати.

У дисертації використано чисельне математичне моделювання за методом кінцевих елементів, реалізованим у рамках програмного забезпечення COMSOL Multiphysics [107]. Основною перевагою даного програмного забезпечення в порівнянні з аналогами є можливість пов'язаного моделювання кількох фізичних підсистем, наприклад, магнітної та механічної.

2.2 Параметри магнітної системи досліджуваної магнітної передачі

Моделювання проводилося для варіанта магнітної системи магнітної передачі, виконаної за коаксіальною планетарною топологією (рис. 1.6), званої далі магнітна передача. Основні розміри магнітної системи наведено на рис. 2.1.

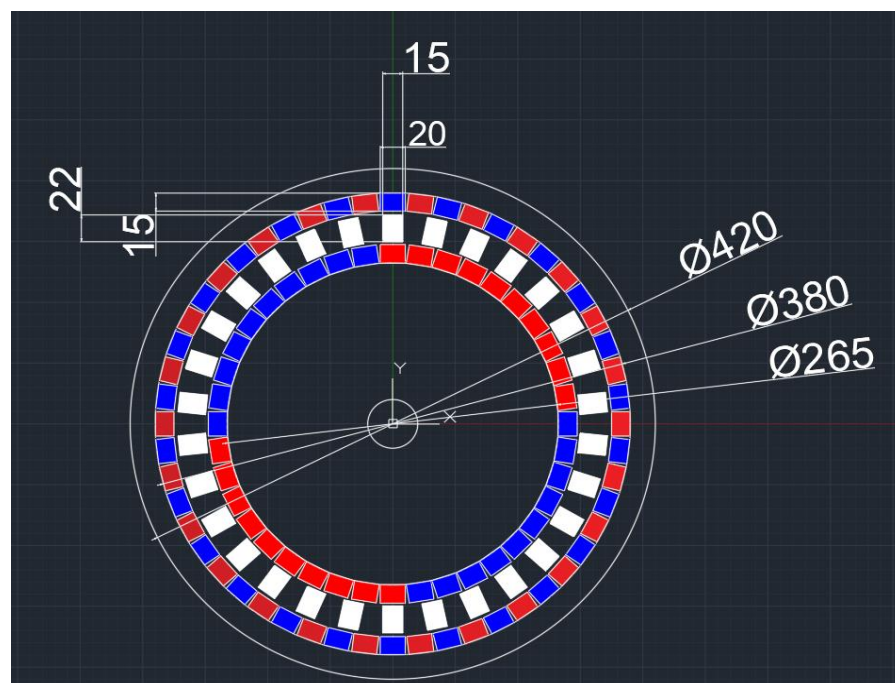


Рисунок 2.1 - Основні розміри магнітної системи досліджуваного варіанта магнітної передачі

Зовнішнє магнітне колесо прийнято нерухомим і надалі називається статором. Внутрішнє та проміжне магнітні колеса складають високошвидкісний та низькошвидкісний ротори відповідно. Відповідно до співвідношення швидкостей для коаксіальної планетарної магнітної передачі передатне відношення визначається як

$$i = \frac{p_c + p_v}{p_n} \quad (2.1)$$

де p_c - Число пар полюсів на статорі;

p_v – число пар полюсів на високошвидкісному роторі або, зважаючи на вираз (2.1)

$$i = \frac{N_c}{p_v} \quad (2.2)$$

Передатне відношення позитивне, що свідчить про спрямоване обертання роторів магнітної передачі.

Конструкція магнітної передачі, що досліджується в даній роботі, наведена на рис.

2.2

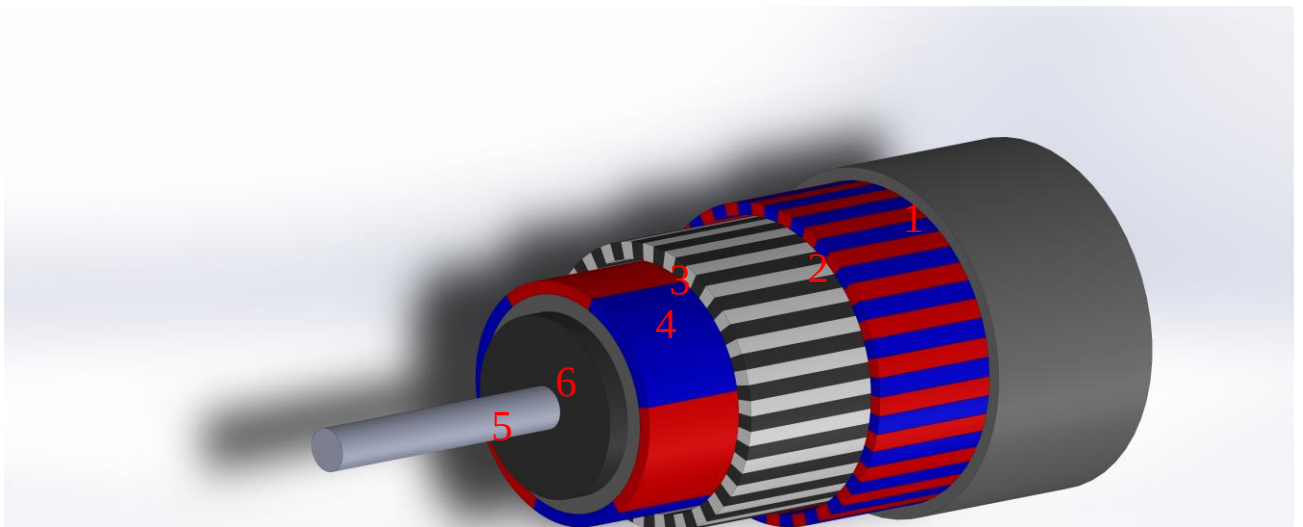


Рисунок 2.2 - Конструкція досліджуваної передачі

На рис. 2.2 позначено: 1 – зовнішній ротор; 2 – постійні магніти зовнішнього ротора; 3 – заливка феромагнітних елементів немагнітопровідним композитом; 4 – пази модулятора, призначені для розташування феромагнітних елементів модулятора; 5 – внутрішній ротор; 6 – постійні магніти внутрішнього ротора; 7 – феромагнітні елементи модулятора магнітного потоку

За прототип використано варіант магнітної передачі з 26 парою полюсів на статорі, трьома парами полюсів на високошвидкісному роторі та 29 сегментами низькошвидкісного ротора. Таким чином, згідно (2.1) передатне відношення становило 8,667. Основні параметри магнітної системи моделі наведені в табл. 2.1. Постійні магніти виконані секторальними з однорідною намагніченістю в радіальному напрямку зі сплаву неодим-залізо-бір марки N38UH з залишковою магнітною індукцією 1,26 Т при 20°C [108]. Крива розмагнічування постійних магнітів наведена на рис. 2.3. Ярмо магнітопроводу статора виконано з холоднокатаної ізотропної електротехнічної сталі марки 2411 [109, 110] (рис. 2.4, 2.5), ярмо магнітопроводу високошвидкісного ротора - з електротехнічної сталі марки 21850. Сегменти низькошвидкісного ротора виконані з композитного магнітом'якого матеріалу на базі Somaloy [112], крива намагнічування якого представлена на рис. 2.6. Вал високошвидкісного ротора виконаний з конструкційної сталі марки 2.5 (рис. 2.6). Петля магнітного гістерезису для Somaloy представлена на рис. 2.6.

Таблиця 2.1 - Основні параметри магнітної системи

Число пар полюсів високошвидкісного ротора	3
Число сегментів модулятора	29
Число пар полюсів низькошвидкісного ротора	26
Аксіальна довжина, мм	80
Залишкова магнітна індукція ПМ, Тл	1,26 (N38UH)
Передавальне відношення	8,667
Матеріал магнітопроводу статора	Сталь 2411
Матеріал магнітопроводу низькошвидкісного ротора	Samoloy
Матеріал магнітопроводу високошвидкісного ротора	Сталь 21850

Електропровідність постійних магнітів, МСм/м	0,56
Електропровідність Somaloy, МСм/м	0,14

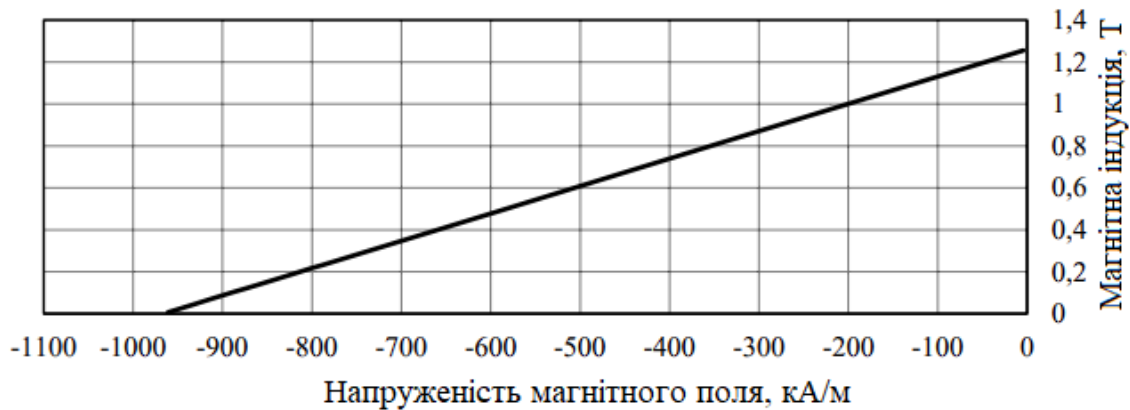


Рисунок 2.3 – Пряма розмагнічування постійного магніту N38UH при 20°



Рисунок 2.4 – Основні криві намагнічування сталей марок 2411 та 21850



Рисунок 2.5 – Петля магнітного гістерезису для сталі 2411

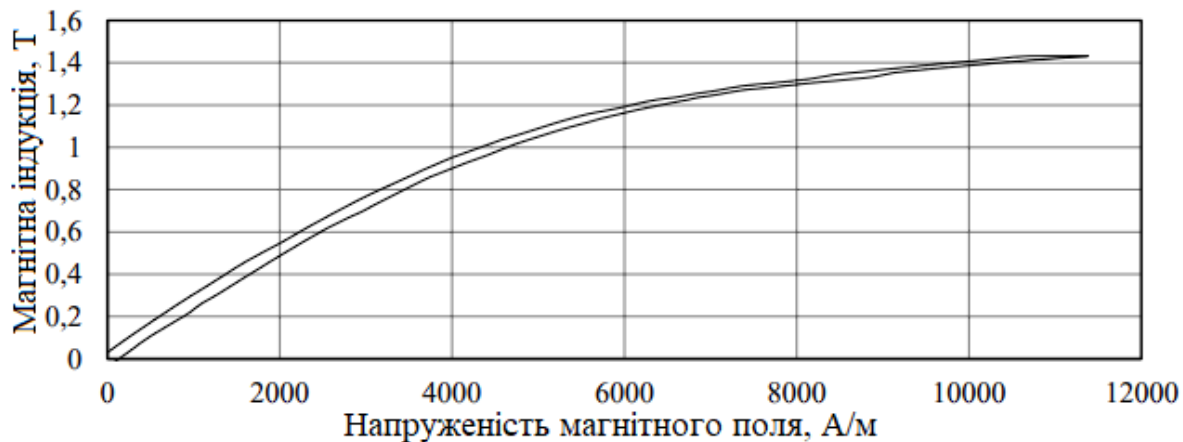


Рисунок 2.6 – Основні криві намагнічування Somaaloy та сталі 45

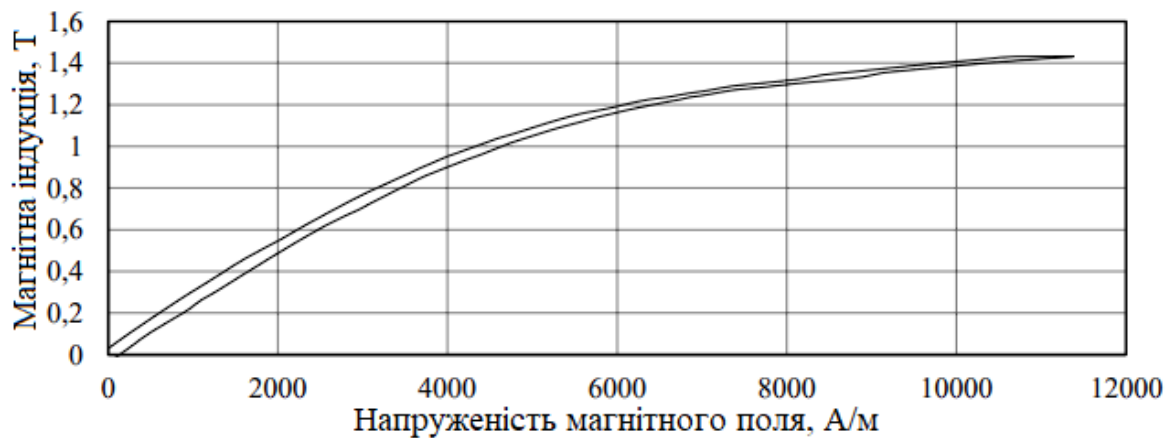


Рисунок 2.7 – Петля магнітного гістерезису для Somaaloy

2.3 Особливості чисельної реалізації магнітної передачі у вигляді розрахункової моделі

Геометрія двовимірної моделі магнітної передачі, виконана у програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics, наведено на рис. 2.8.

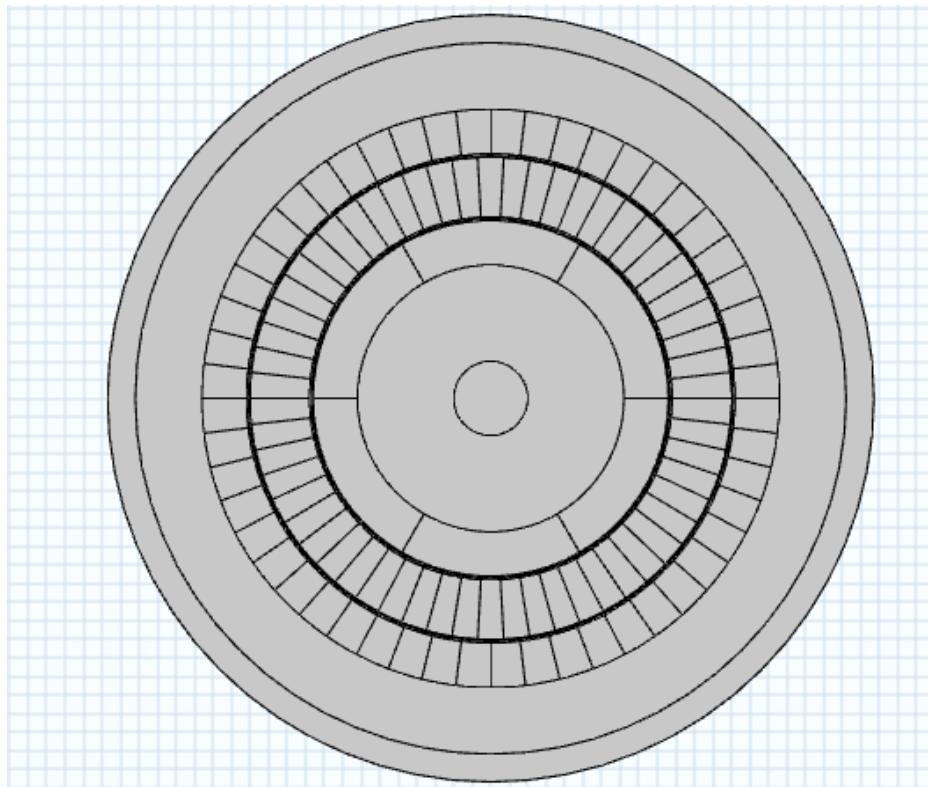


Рисунок 2.8 – Геометрія магнітної передачі в COMSOL Multiphysics

При побудові сітки розрахункової області використаний вбудований в програмне забезпечення генератор сіток. За основний елемент при побудові сітки вибрано трикутник. Оскільки точність розрахунку електромагнітного поля залежить від похибок апроксимації шуканої функції, то для обґрунтування звичайно-елементної моделі потрібні дослідження необхідної частоти розбиття елементів магнітної системи.

Як показує досвід з найменшим кроком, слід розбивати області, якими проходить інтегрування при розрахунку електромагнітного моменту, а також елементи з різкою зміною магнітного поля. З цієї точки зору визначальним елементом магнітної системи є низькошвидкісний ротор, оскільки саме в ньому відбувається модуляція магнітного поля з утворенням великої кількості просторових гармонік і, отже, розподіл магнітного поля в цій області має неоднорідний характер. На першому етапі моделювання було проведено оцінку оптимальної кількості елементів сітки, що укладається на гранях сегментів модулятора, що забезпечує точне рішення. За базові прийняті грані, наближені

до повітряних проміжків. Число елементів сітки на цих гранях було змінною, що варіюється. Число елементів сітки на інших гранях сегментів визначалося автоматично з пропорції, за якою число елементів на базовій грані та число елементів на перпендикулярній їй грані відносяться один до одного так само, як їх розміри з округленням до найближчого цілого значення. Залежність розрахованого електромагнітного моменту, що діє на низькошвидкісний ротор, від числа елементів сітки на базовій грані наведено на рис. 2.10.

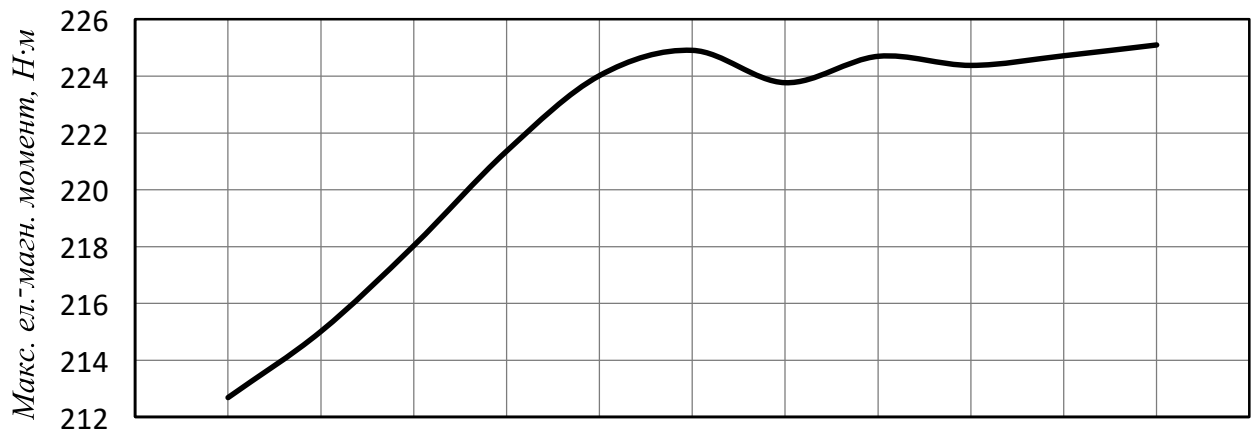


Рисунок 2.9 – Залежність максимального моменту низькошвидкісного ротора від кількості елементів сітки на базовій грані

Погіршення параметрів сітки призводить до значного заниження розрахункового електромагнітного моменту. У разі збільшення кількості елементів сітки спостерігається стабілізація рішення. Велика кількість елементів сітки значною мірою збільшує час розрахунку, у зв'язку з чим для варіанта магнітної системи, що розглядається оптимальним числом елементів сітки на базовій грані прийнято 11, так як подальше збільшення частоти дискретизації не призводить до значного збільшення точності розрахунку електромагнітного моменту. Частина магнітної системи з оптимальною розрахунковою сіткою представлена на рис. 2.10.

Загальна кількість елементів сітки скінченних елементів у розрахунковій області розробленої двовимірної моделі становить 296840 трикутних елементів, 880 вершинних елементів, 62661 крайових елементів. Загальний вигляд фрагменту сітки скінченних

елементів розробленої моделі магнітної передачі показано на рис. 2.10.

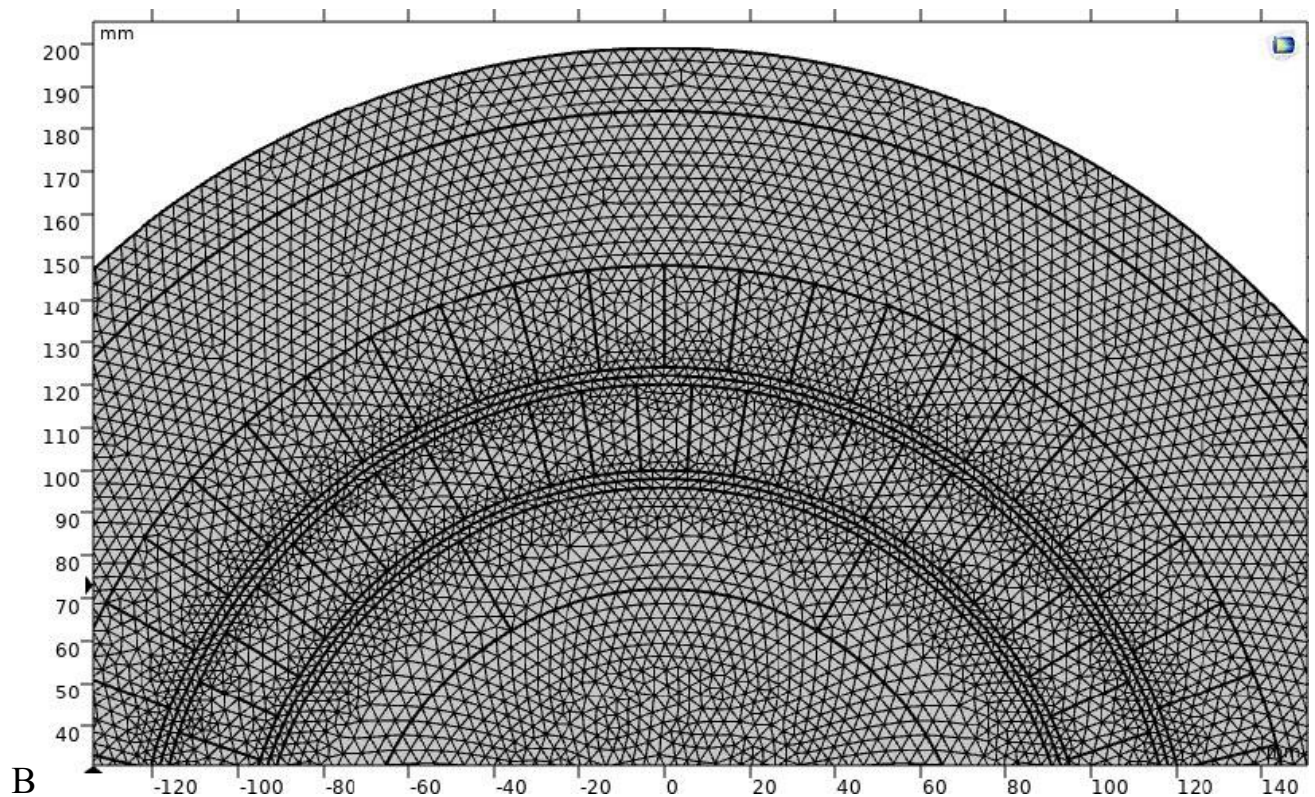


Рисунок 2.10 - Сітка скінченних елементів фрагмента розрахункової області досліджуваної магнітної передачі

2.4 Моделювання електромагнітних процесів магнітної передачі у статичному режимі

Моделювання статичних характеристик магнітної передачі переважно проводилося у двовимірному наближенні. Статична тривимірна постановка задачі використовується лише для врахування кінцевих ефектів.

Розрахунок статичного магнітного поля в двовимірному наближенні проводився з урахуванням таких припущень:

1. не враховувалися поперечні кінцеві ефекти;
2. властивості постійних магнітів визначалися залишковою магнітною індукцією та кутом нахилу лінеаризованої кривої розмагнічування;

3. розрахункова область обмежена немагнітним колом, у будь-якій точці якої вектор магнітної індукції прийнятий дотичним.

Розрахункові рівняння та граничні умови формувалися щодо векторного магнітного потенціалу та відомих джерел магнітного поля

$$\nabla^2 A = \mu_0 \times M, \quad (2.3)$$

$$n \times (A_1 - A_2) = 0, \quad (2.4)$$

$$n \times ([\mu_0^{-1} \nabla \times A_1 - M_1] - [\mu_0^{-1} \nabla \times A_2 - M_2]) = 0, \quad (2.5)$$

$$n \times A_{3B} = 0, \quad (2.6)$$

де M – вектор намагніченості, $\frac{A}{m}$;

A – векторний магнітний потенціал, $\frac{B\phi}{m}$;

A_1, A_2 – векторні магнітні потенціали на межі суміжних областей 1 та 2, $\frac{B\phi}{m}$;

A_{3B} – векторний магнітний потенціал на зовнішній межі розрахункової області, $\frac{B\phi}{m}$;

n – вектор нормалі.

При розрахунку тривимірного статичного магнітного поля приймався той же набір припущень, що і при постановці завдання у двовимірному наближенні за винятком першого і з модифікацією останнього, згідно з яким розрахункова область обмежена не колом, а циліндричною немагнітною поверхнею, в кожній точці якої вектор магнітної індукції обнуляється. При постановці статичної тривимірної задачі розрахункові рівняння та граничні умови формувалися щодо скалярного магнітного потенціалу та відомих джерел магнітного поля

$$\nabla^2 V_m = \nabla \cdot M, \quad (2.7)$$

$$n \cdot (\nabla V_{m1} - \nabla V_{m2}) = 0, \quad (2.8)$$

$$n \times ([M_1 - \nabla V_{m1}] - [M_2 - \nabla V_{m2}]) = 0, \quad (2.9)$$

$$n \cdot \nabla V_{m3B} = 0, \quad (2.10)$$

$$n \times \nabla V_{m3B} = 0, \quad (2.11)$$

де V_m – скалярний магнітний потенціал, A ;

V_{m1}, V_{m2} – скалярні магнітні потенціали на межі суміжних областей 1 та 2, А;

$V_{m\text{зв}}$ – скалярний магнітний потенціал на зовнішній межі розрахункової області, А.

Розрахунок електромагнітного моменту проводився через тензор натягу Максвелла [113]. Вектор густини сили визначається за формулою

$$f = \mu_0((nH)H - 0,5nH^2), \quad (2.12)$$

де H – вектор напруженості магнітного поля, $\frac{A}{m}$.

В залежності від застосовуваного потенційного формулювання

$$H = -\nabla V_m, \quad (2.13)$$

або

$$H = \mu_0^{-1} \nabla \times A - M, \quad (2.14)$$

Електромагнітний момент, що діє на ротори магнітної передачі

$$T = \int_{S_c} (r - r_0) \times f dS, \quad (2.15)$$

де S_c - довільна замкнута поверхня, що обмежує елемент, який проводиться розрахунок електромагнітного моменту.

На рис. 2.11 наведено розподіл магнітної індукції (фонове зафарбування) та векторного магнітного потенціалу (ізолінії) в розрахунковій області досліджуваної магнітної передачі при швидкості обертання низькошвидкісного ротора 200 об/хв та високошвидкісного 1733 об/хв.

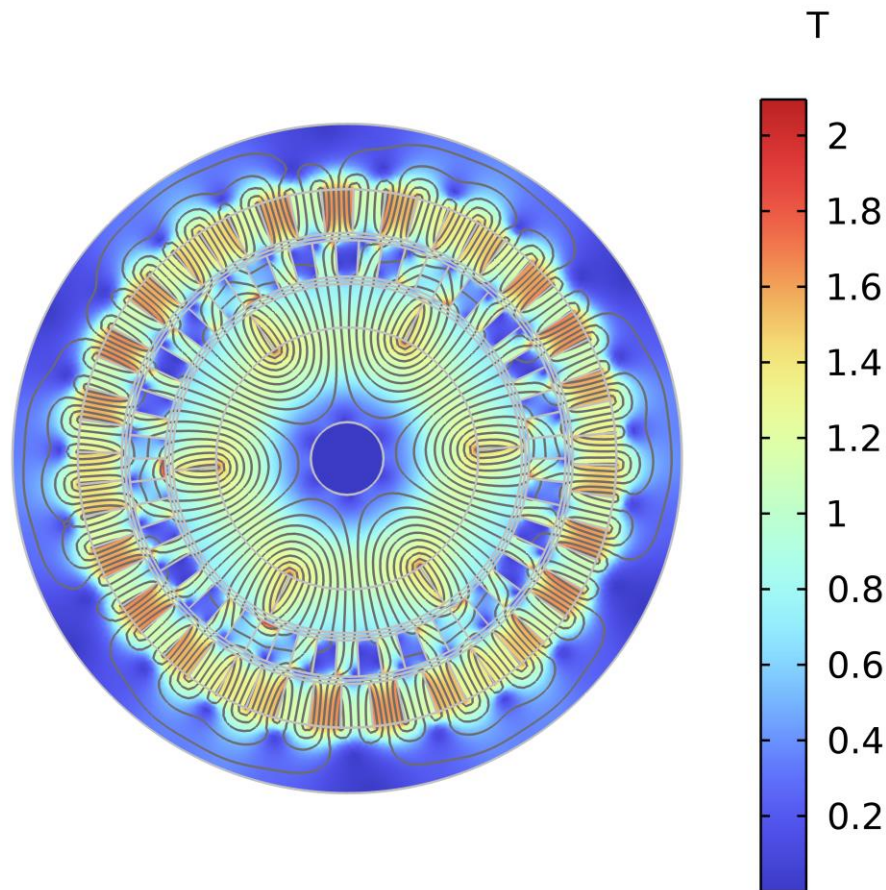


Рисунок 2.11 – Розподуль модуля магнітної індукції в розрахунковій області магнітної передачі

Середнє значення магнітної індукції в ярмі низькошвидкісного ротора складає 0,26 Тл. В ярмі високошвидкісного ротора 0,86 Тл. В сталевих сегментах магнітного модулятора 0,35 Тл. Можна зробити висновок, що магнітна система є ненасиченою на даній швидкості обертання і дозволяє реалізовувати більш високі швидкості обертання.

На рис. 2.12 показано розподіл магнітної індукції, магнітного потоку в розрахунковій області досліджуваної магнітної передачі.

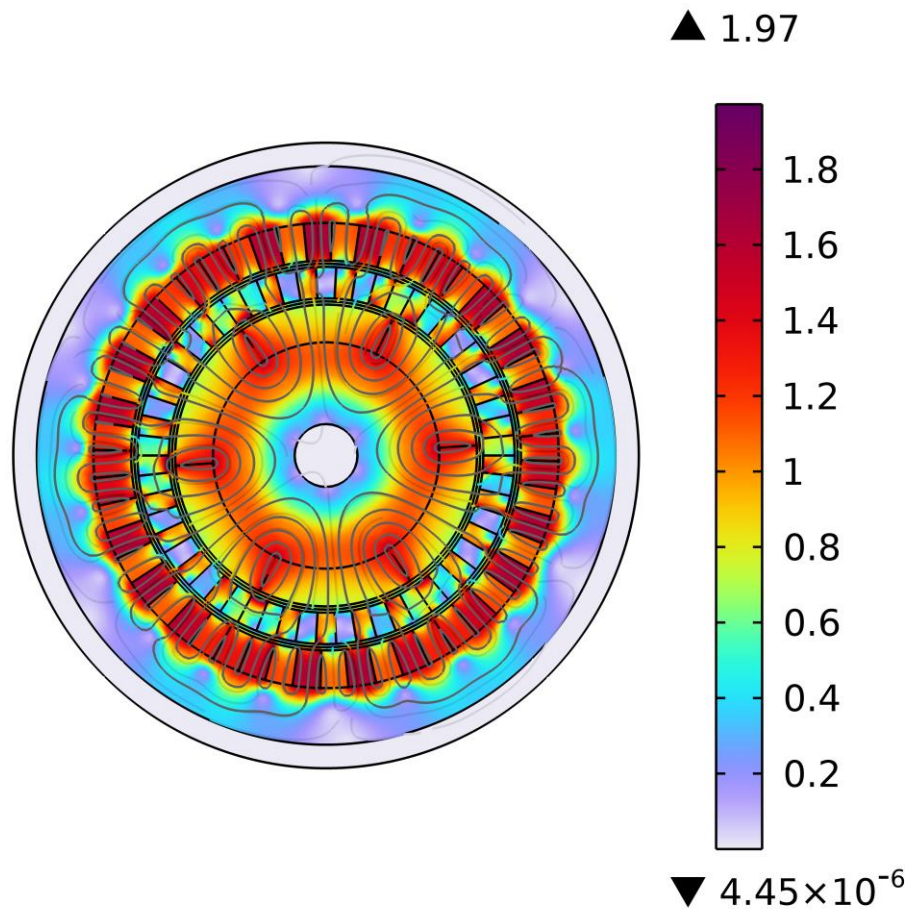


Рисунок 2.12 – Розподіл магнітної індукції та магнітного потоку в розрахунковій області досліджуваної магнітної передачі

З рис. 2.12 видно шляхи замикання магнітного потоку в елементах магнітної системи магнітної передачі, намагніченість окремих ділянок магнітної передачі та полюсність високо та низькошвидкісного роторів.

Розподіл магнітної індукції $\mathbf{B}$ та векторного магнітного потенціалу $\mathbf{A}$ в розрахунковій області досліджуваної магнітної передачі показано на рис. 2.11.

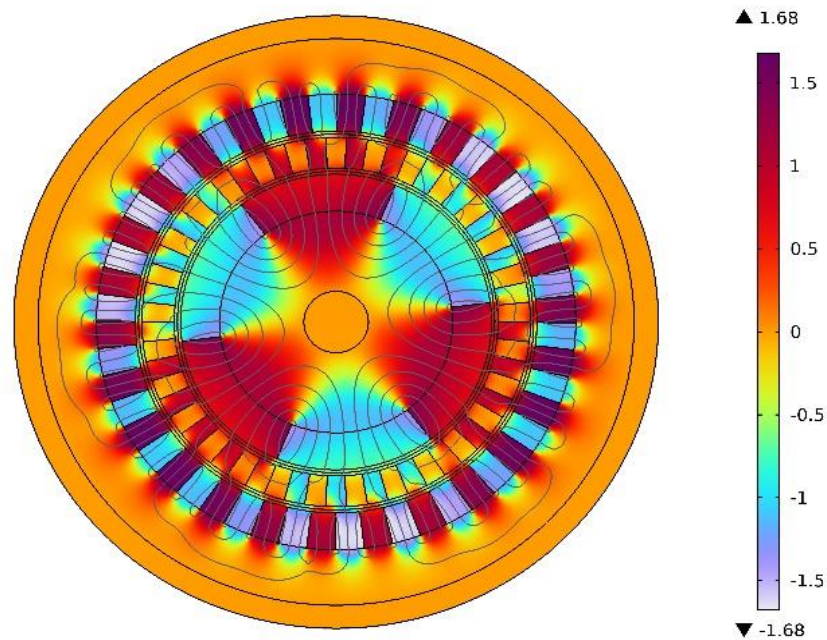


Рисунок 2.13 – Розподіл магнітної індукції та векторного магнітного потенціалу досліджуваної магнітної передачі

По рис. 2.13 видно, що магнітна система не є насиченою, в той же час середнє значення магнітної індукції в конструктивних елементах магнітної передачі не перевищує допустимі значення для вибраних матеріалів та марки сталі. А саме: в ярмі високошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,91 Тл, в ярмі низькошвидкісного ротора середнє значення магнітної індукції становить 0,47 Тл, в феромагнітних осердях модулятора магнітного потоку середнє значення магнітної індукції становить 0,94 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між високошвидкісним ротором та модулятором становить 0,75 Тл, середнє значення індукції в повітряному проміжку, що межує між низькошвидкісним ротором та модулятором становить 0,63 Тл.

Залежність електромагнітного моменту внутрішнього та зовнішнього роторів магнітної передачі при постійній швидкості обертання внутрішнього та зовнішнього роторів від часу показано на рис. 2.14.

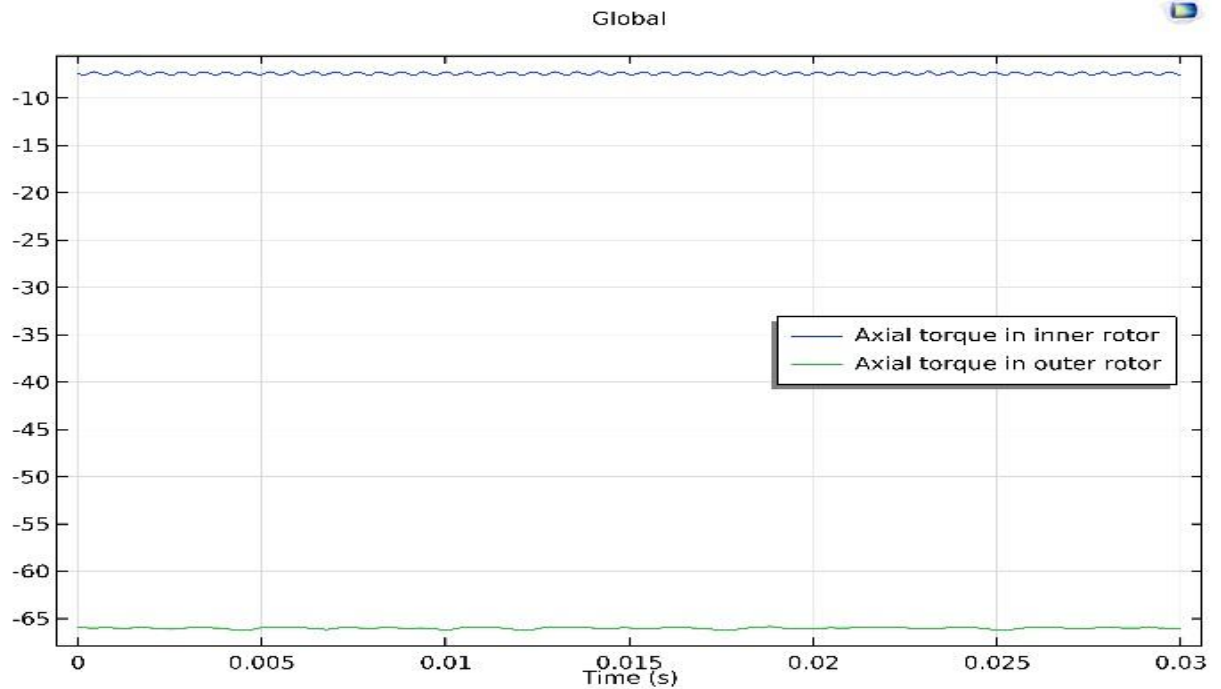


Рисунок 2.14 - Залежність електромагнітного моменту внутрішнього та зовнішнього роторів від часу

З рис. 2.14 видно, що середнє значення електромагнітного моменту зовнішнього (високошвидкісного) ротора становить $\approx 7,4$ Н·м, тоді як величина електромагнітного моменту для зовнішнього ротора становить ≈ 66 Н·м. відношення моментів зовнішнього та внутрішнього роторів становить 8,67, що корелюється із передавальним відношенням досліджуваної магнітної передачі (табл. 2.1).

Пульсації електромагнітного моменту є одним із експлуатаційних недоліків, що виникають при роботі магнітної передачі, оскільки вони призводять до підвищення рівня шуму та вібрацій, негативно впливають на ресурс підшипників, знижують експлуатаційну надійність, а при роботі на генератор є джерелом спотворення форми кривої вихідної ЕРС. Джерелом пульсацій електромагнітного моменту є взаємодія постійних магнітів ротора із феромагнітними елементами магнітного модулятора:

$$k_p = \frac{2 \cdot p_1 \cdot n}{N_s} \quad (2.16)$$

де: p_1 – кількість пар полюсів високошвидкісного ротора магнітної передачі; p – кількість феромагнітних елементів модулятора магнітного потоку; N_s – найменше спільне кратне між кількістю полюсів високошвидкісного ротора та кількістю феромагнітних елементів модулятора магнітного потоку.

Дослідження впливу конфігурації та конструктивних параметрів магнітної передачі на величину пульсацій електромагнітного моменту є актуальним науково-практичним завданням. На величину пульсацій впливають наступні параметри: конфігурація та кількість постійних магнітів на роторі, конфігурація та кількість феромагнітних модуляторів, величина повітряного проміжку.

Оцінка величини електромагнітного моменту визначається за виразом (2.15), величина пульсацій моменту визначається шляхом розкладу $M_{em}(t)$ в ряд Фур'є і аналізом відповідної гармоніки. Очевидно, що основні пульсації моменту прямопропорційні швидкості обертання внутрішнього ротору та кількості елементів феромагнітного модулятора.

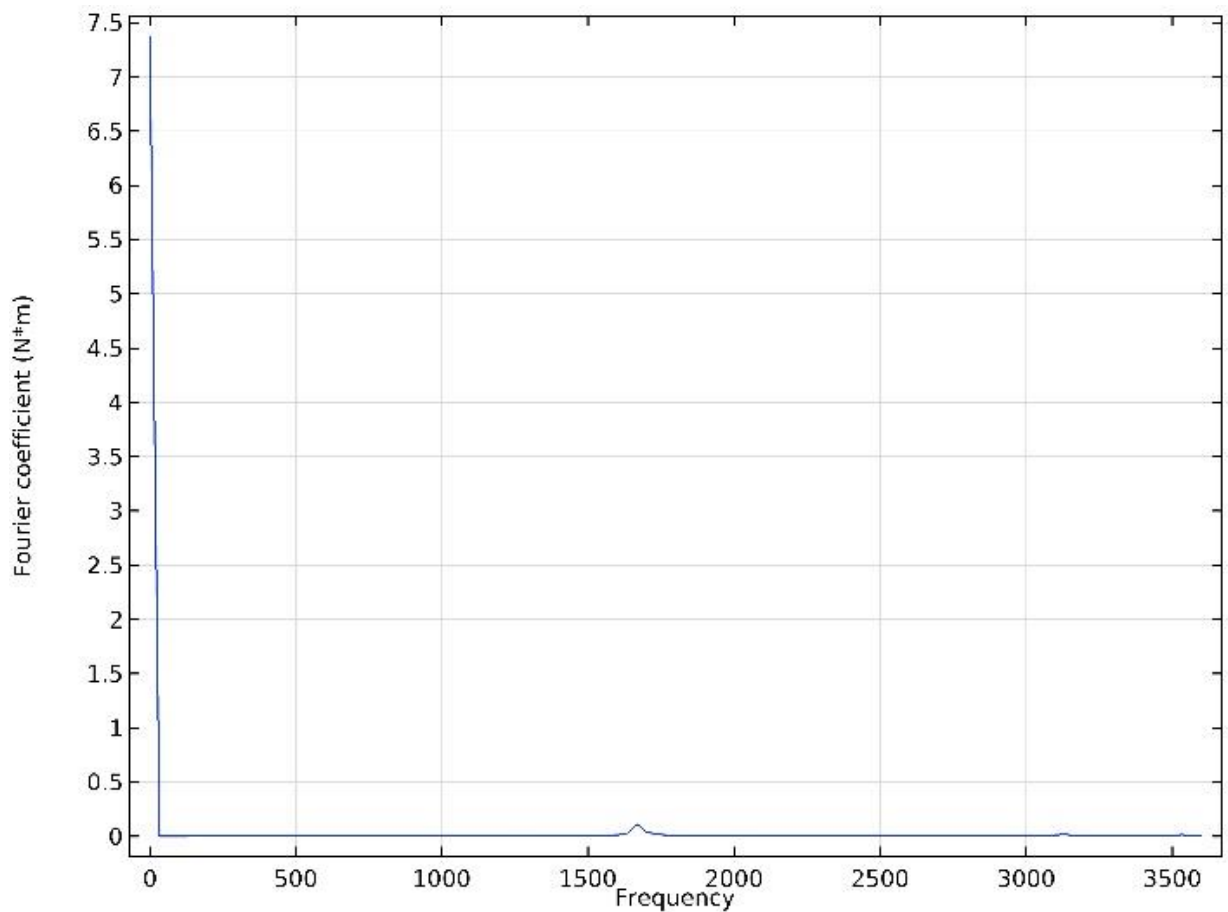


Рисунок 2.15 - Розклад кривої електромагнітного моменту в спектр

Нульова частота відповідає середньому значенню електромагнітного моменту для високошвидкісного ротора і становить $\approx 7,4$ Н·м, величина гармоніки на частоті 1675 Гц становить 0,113 Н·м і прямопропорційна добутку швидкості обертання внутрішнього ротора на кількість елементів модулятора магнітного потоку.

В даному дослідженні змінювалась висота постійних магнітів при незмінній конфігурації сталевих елементів магнітного модулятора та при зміні ширини магнітних вставок феромагнітного модулятора в діапазоні 50%; 100%; 200% від базової (табл.1) величини з метою дослідження пульсацій електромагнітного моменту та його середнього значення.

Результати розрахунку величини електромагнітного моменту для внутрішнього ротора магнітної передачі показано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку моменту на внутрішньому роторі від значення ширини феромагнітної вставки при зміні товщини магнітів

50%	0,75	1,24	2,7	4,5	5,1	5,75
100%	1,3	3,54	5,7	7,4	7,92	8,5
200%	1,11	2,93	4,8	6,142	6,78	8,04
$b_{\text{маг}}, \text{ мм}$	5	10	15	22	30	40

На рис. 2.16 показано залежність електромагнітного моменту в залежності від висоти постійних магнітів та при зміні ширини феромагнітних вставок магнітного модулятора.

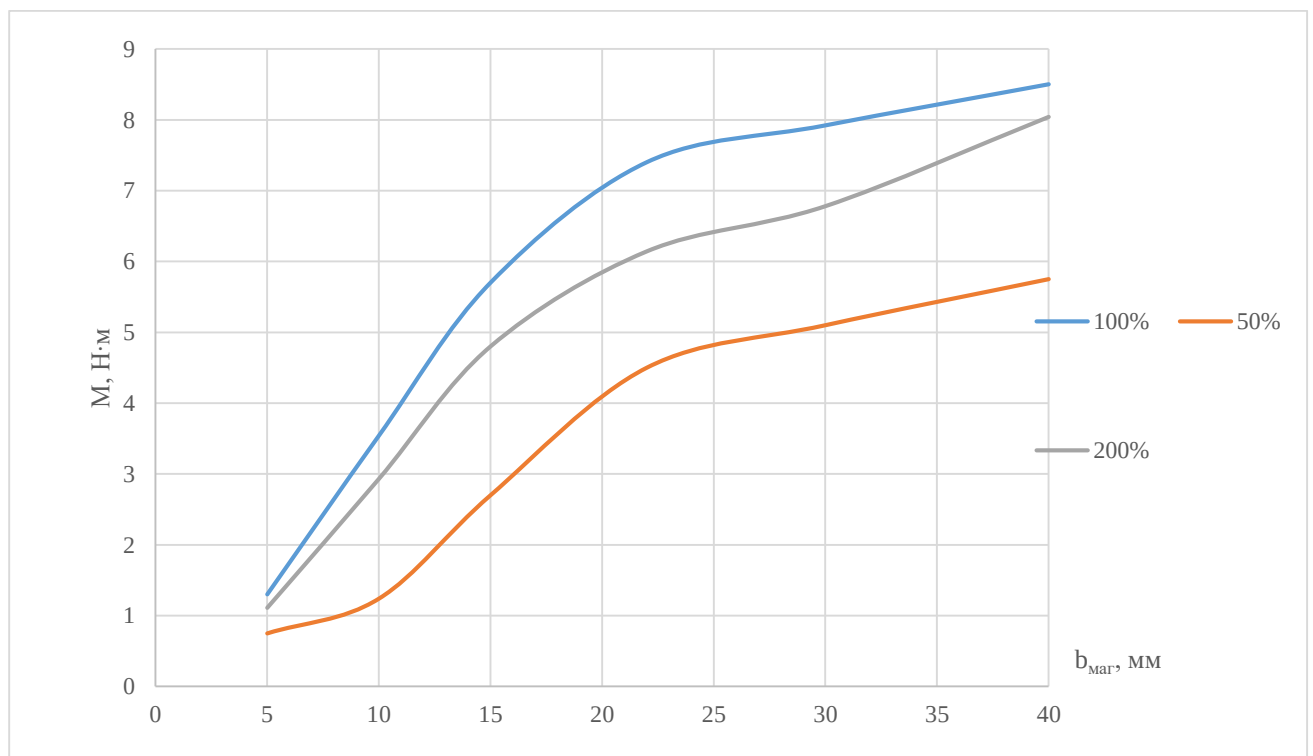


Рисунок 2.16 - Залежність моменту внутрішнього ротора від ширини феромагнітної вставки при зміні висоти магнітів

Криві на рис. 2.14 відповідають зміні ширини феромагнітних вставок магнітного модулятора відносно базової ширини (що вказана у табл. 2.1) на 50%; 100% та 200%.

По результатам, отриманим з рис. 2.16 можна зробити висновок, що при зменшенні висоти постійних магнітів величина електромагнітного моменту зменшується, що пояснюється зменшенням енергії постійних магнітів, а отже і електромагнітного зусилля. Водночас, при збільшенні висоти постійного магніту очікуване значення електромагнітного моменту повинно збільшуватись, однак, відносна магнітна проникність матеріалу постійних магнітів складає $\mu_{\text{mag}} \approx 1,05$ і збільшення висоти постійних магнітів призводить до збільшення еквівалентного повітряного проміжку, збільшення МРС магнітного кола, зменшення рівня магнітної індукції. Тому по рис. 2.16 видно, що зі збільшенням висоти постійних магнітів величина електромагнітного моменту збільшується $\approx 10-15\%$.

При зменшенні ширини феромагнітних вставок їх кількість залишалася незмінною. Це також призводить до зменшення величини електромагнітного моменту, що пояснюється їх насиченням і відповідно до збільшення величини еквівалентного повітряного проміжку. При збільшенні ширини феромагнітних вставок зменшується відстань між ними (оскільки радіус залишається незмінним) частина магнітного потоку починає шпунтуватись між сусідніми феромагнітними вставками і це також призводить до зменшення величини електромагнітного моменту.

Тому можливо зробити висновок, що існує оптимальна ширина феромагнітних вставок і оптимальна висота постійних магнітів при постійній величині повітряного проміжку та загальних геометричних розмірах. Це знижує величину електромагнітного шуму та вібрацій, збільшує ресурс підшипників та зменшує втрати, що виникають в електропровідних елементах магнітної передачі (феромагнітних елементах модулятора, електротехнічні сталі).

Зміна конфігурації постійних магнітів та ширини феромагнітних елементів магнітного модулятора також впливає на величину пульсацій електромагнітного моменту. На рис. 2.17 показано залежність електромагнітного моменту для високошвидкісного ротора від часу при ширині постійних магнітів $b_{\text{mag}} = 22$ мм, кількості феромагнітних елементів 29.

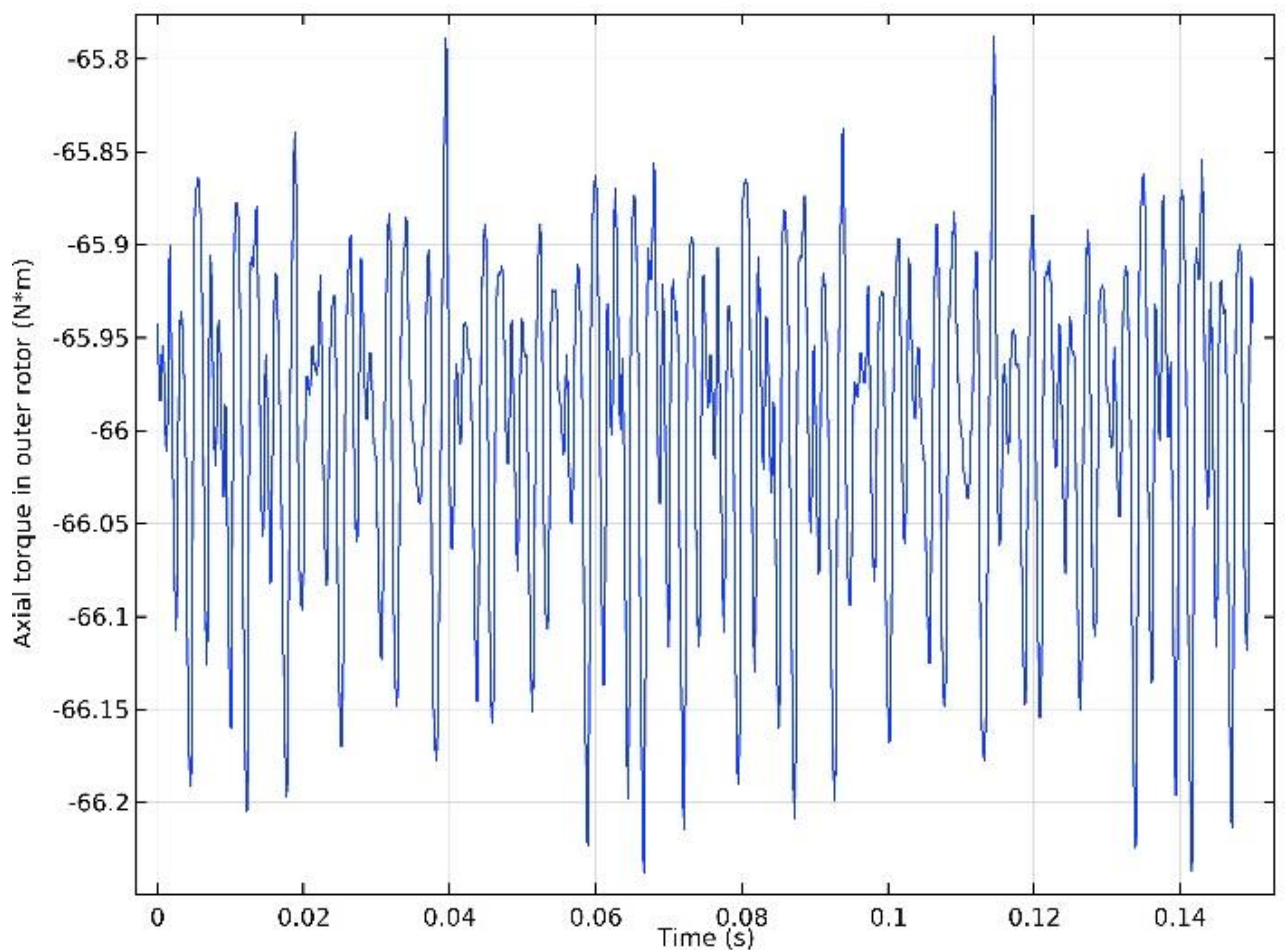


Рисунок 2.17 - Залежність моменту внутрішнього ротора від часу

Пульсації, що показані на рис. 2.17, обумовлені дискретністю магнітного модулятора при взаємодії із постійними магнітами внутрішнього ротора. В табл. 2.3 показано залежність коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту, що відповідає частоті пульсацій моменту від феромагнітних вставок модулятора та постійних магнітів при постійній швидкості обертання роторів магнітної передачі.

Таблиця 2.3 – коефіцієнт пульсацій електромагнітного моменту

50%	16,533	12,419	6,4814	4,3777	4,176	4,33
100%	3,6153	1,8361	1,3859	1,5270	1,477	2,517
200%	0,9909	0,5802	0,4375	0,390	0,398	0,398
b_{маг},мм	5	10	15	22	30	40

На рис. 2.19 показано характер зміни коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту в залежності від висоти постійних магнітів та при зміні ширини феромагнітних вставок магнітного модулятора.

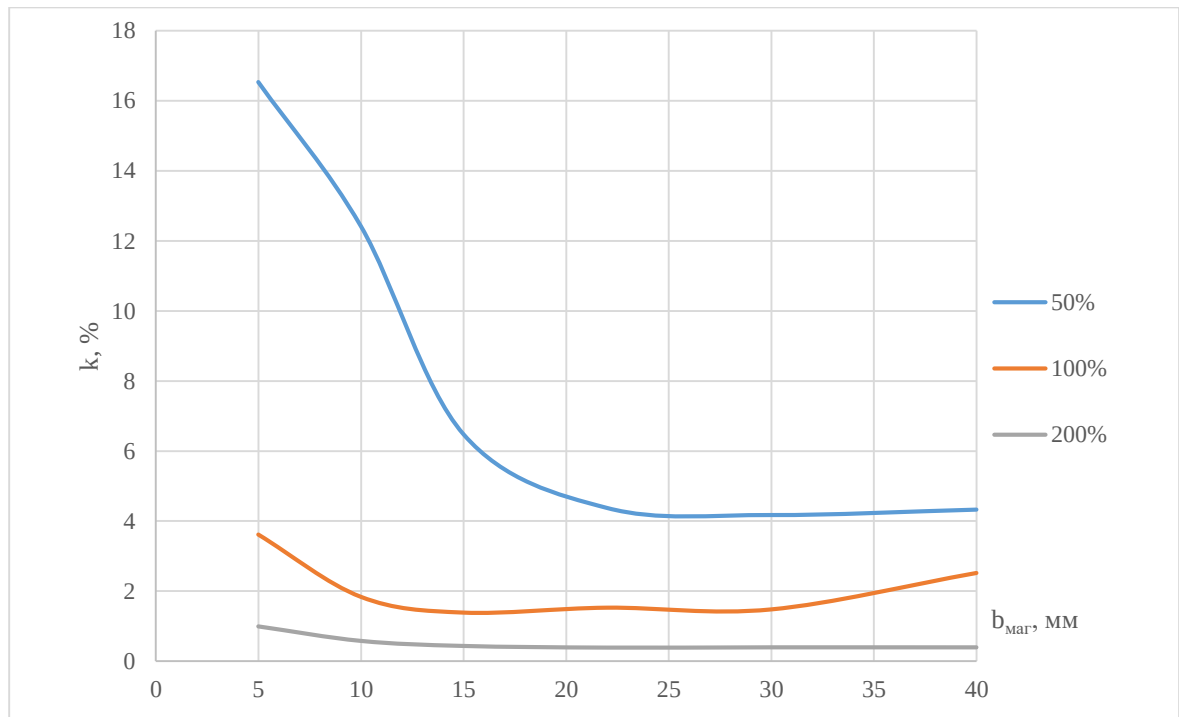


Рисунок 2.18 - Залежність коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту

Криві на рис. 2.21 відповідають зміні ширини феромагнітних вставок магнітного модулятора відносно базової ширини на 50%; 100% та 200%.

Очевидно, що найменша величина пульсацій електромагнітного моменту спостерігається при збільшенні ширини феромагнітних модуляторів. Це пояснюється зменшенням зубчастості внутрішньої розточки магнітного модулятора і відповідно зменшенням пульсацій моменту. Це є одним із ефективних методів для боротьби із радіальними кінцевими ефектами, що притаманні даному класу ЕМП. Однак, зі збільшенням ширини феромагнітних вставок зменшується величина електромагнітного моменту (рис. 2.16) відносно базової ширини феромагнітних елементів магнітного модулятора.

Одночасно, зі збільшенням висоти постійних магнітів спостерігається тенденція до зменшення пульсацій електромагнітного моменту. Це пояснюється збільшенням величини еквівалентного повітряного проміжку (за рахунок збільшення висоти постійних магнітів) і відповідним ростом МРС для «зубцевих» гармонік магнітного модулятора. Подальше збільшення висоти постійних магнітів (понад 35 мм) призводить до збільшення пульсацій моменту, оскільки зростає індукція в повітряному проміжку за рахунок збільшення об'єму та енергії постійних магнітів.

При ширині феромагнітних вставок модулятора 50% від базової та зменшенні висоти постійних магнітів, очевидно величина пульсацій електромагнітного моменту є найбільшою і досягає $\approx 16\%$ від величини середнього (діючого) моменту. Оскільки зі зменшенням висоти постійних магнітів відбувається зменшення величини повітряного проміжку, зменшення МРС магнітного кола, з одночасним збільшенням впливу дискретності феромагнітного модулятора (рис. 2.17).

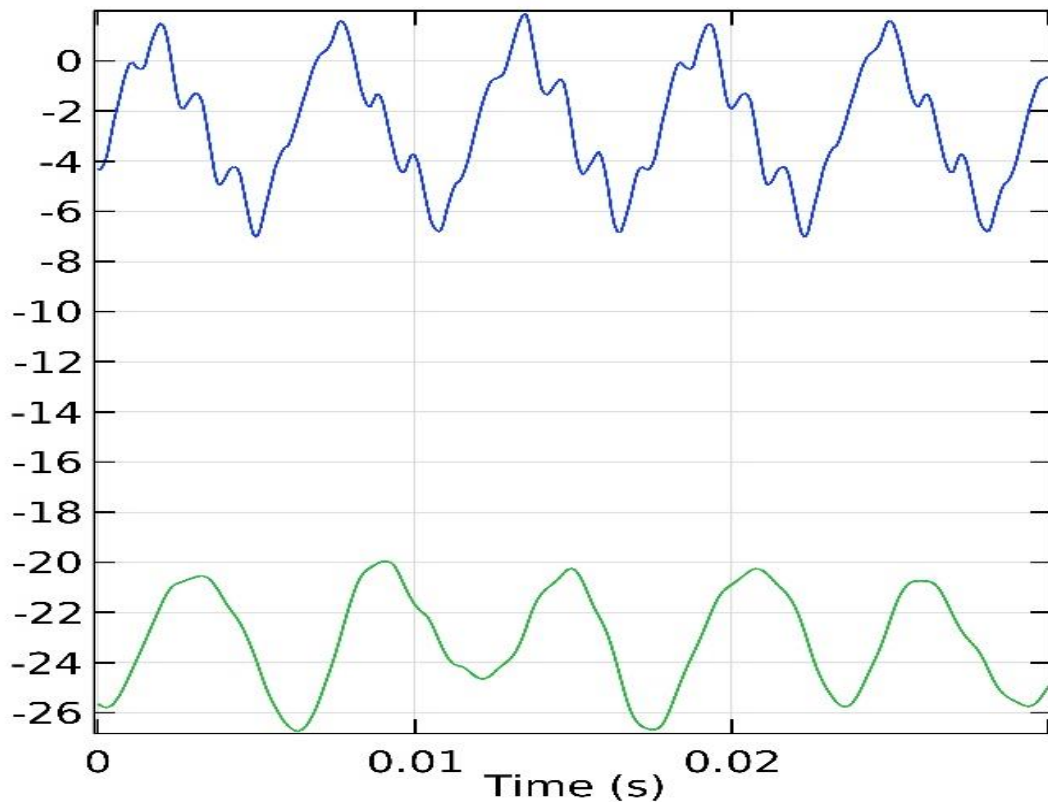


Рисунок 2.19 - Залежність моменту внутрішнього та зовнішнього ротора від часу при $b_{\text{mag}}=5$ мм

Верхня крива (рисунок 2.19) відповідає електромагнітному моменту внутрішнього (високошвидкісного) ротора, а нижня крива – моменту зовнішнього (низькошвидкісного) ротора при мінімальній висоті постійних магнітів $b_{\text{mag}}=5$ мм та мінімальній ширині феромагнітної вставки 6 мм.

Крім того, при зменшенні висоти постійних магнітів відбувається зменшення діючого значення електромагнітного моменту з одночасною появою у спектрі моменту гармонік, дія яких починає проявлятися при суттєвому зменшенні еквівалентного повітряного проміжку. Розклад кривої розподілу моменту для внутрішнього ротора (рис. 2.19) показано на рис. 2.20.

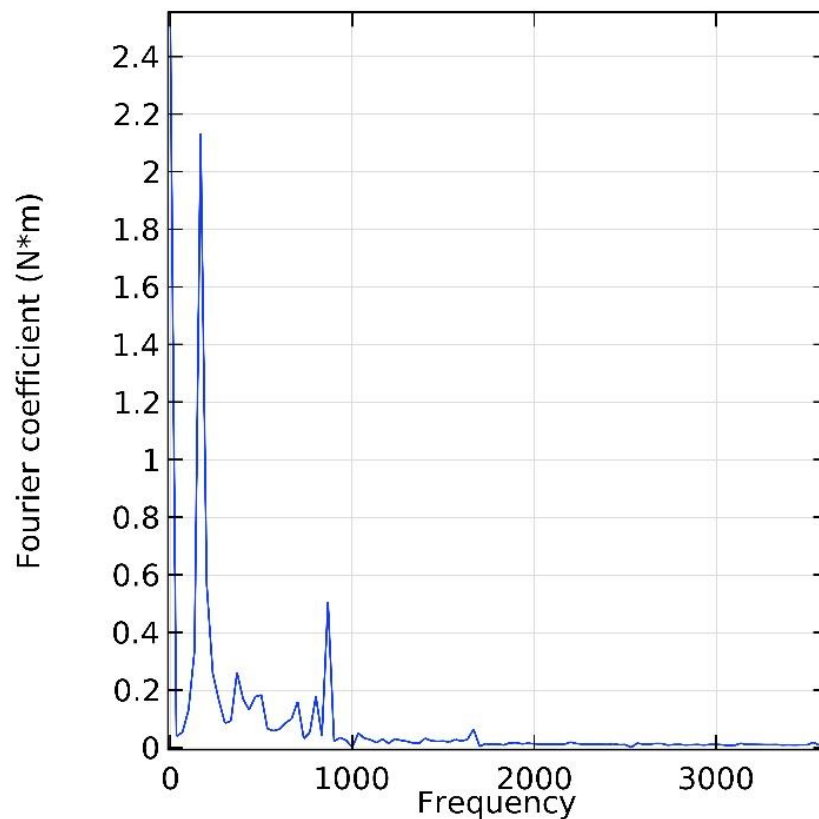


Рисунок 2.20 Розклад кривої розподілу моменту для внутрішнього ротора в ряд Фур'є

По рис. 2.20 видно, що при зменшенні величини повітряного проміжку починають проявлятися інші гармоніки електромагнітного моменту, що не мають прояву при збільшенні повітряного проміжку в тому числі еквівалентного.

З цього можливо зробити висновок, що в залежності від конфігурації магнітної системи магнітної передачі існує оптимальна конфігурація постійних магнітів та феромагнітних вставок при яких вищі гармоніки проявляються мінімально.

Магнітним передачам притаманні суттєві величини сил електромагнітного притягіння, а також пульсацій електромагнітного моменту. З цією метою, при проектуванні магнітних передач обирають більше значення повітряного проміжку між внутрішнім та зовнішнім ротором і нерухомим магнітним модулятором в порівнянні із класичними електричними машинами. В досліджуваному прототипі магнітної передачі обрано номінальну величину повітряного проміжку $\delta=4\text{мм}$. В роботі проведено дослідження залежності електромагнітного моменту внутрішнього та зовнішнього роторів від величини повітряного проміжку та проаналізовано вплив величини проміжку на коефіцієнт пульсацій. На рис. 2.21 показано залежність отриманих величин моменту від величини повітряного проміжку.

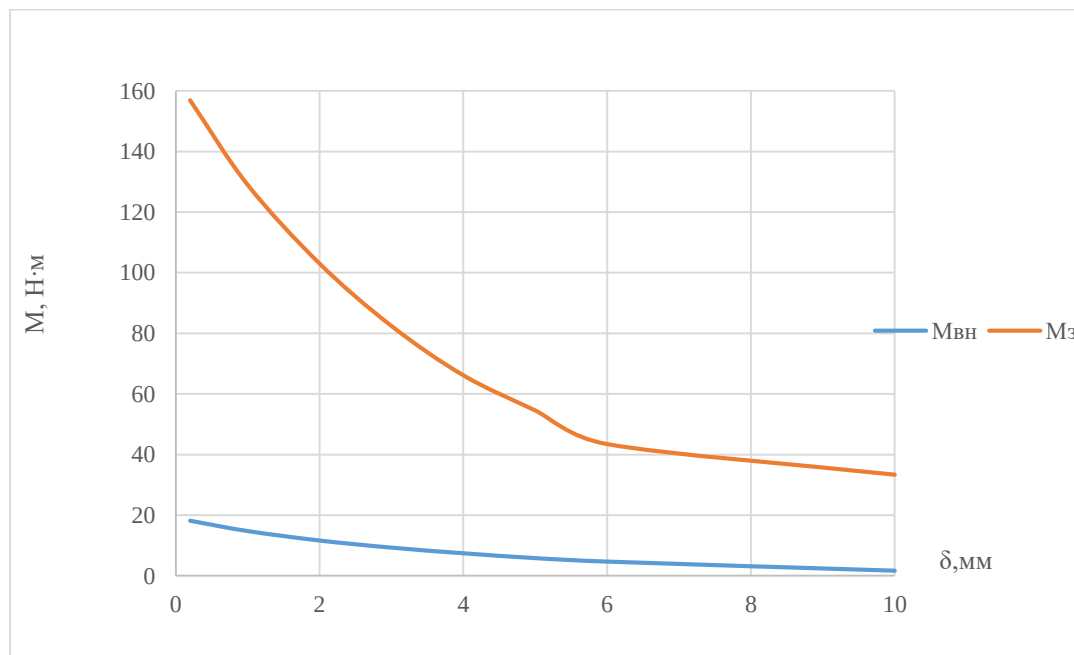


Рисунок 2.21 - Залежність моменту від повітряного проміжку

Очевидно, що при зменшенні величини повітряного проміжку падає опір магнітному потоку, зростає МРС магнітного кола, що призводить до підвищення електромагнітного моменту. Зменшення повітряного проміжку в 2 рази призводить до підвищення моменту $\approx 55\%$, в той же час збільшення повітряного проміжку на 2 мм призводить до зменшення моменту на $\approx 35\%$. Розподіл електромагнітного моменту для внутрішнього та зовнішнього роторів досліджуваної передачі при $\delta=3$ мм, показано на рис. 2.22.

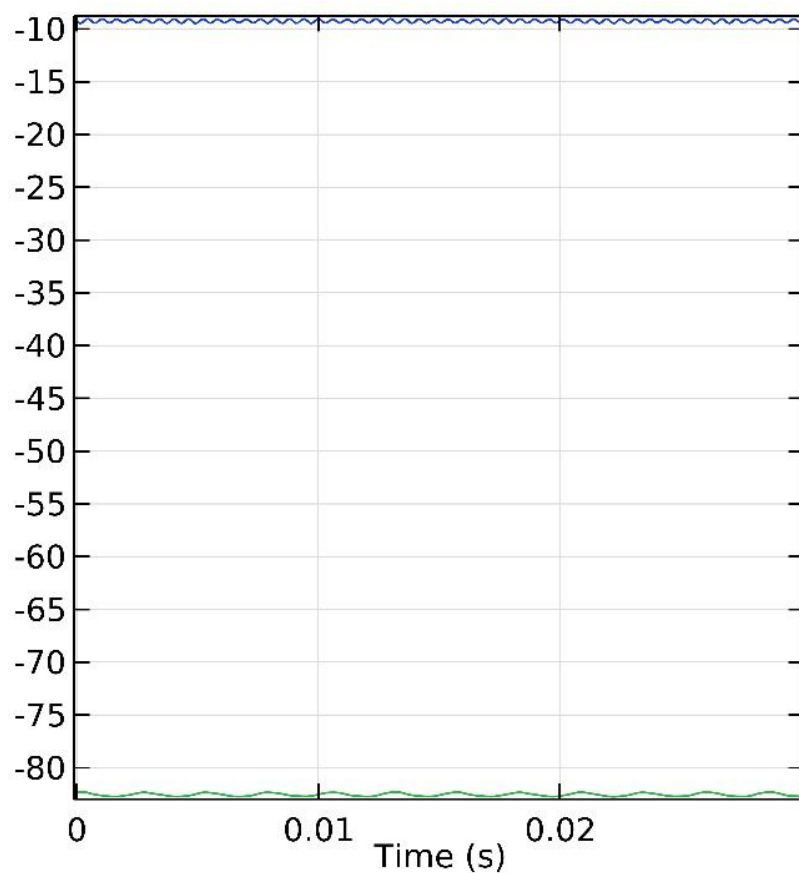


Рисунок 2.22 - Залежність моменту від повітряного проміжку

Іншим критерієм, що змінюється при зміні повітряного проміжку є величина пульсацій моменту. Залежність обертової гармоніки, кратної кількості сталевих елементів магнітного модулятора та швидкості обертання ротора, при зміні величини повітряного проміжку показано на рис. 2.23.

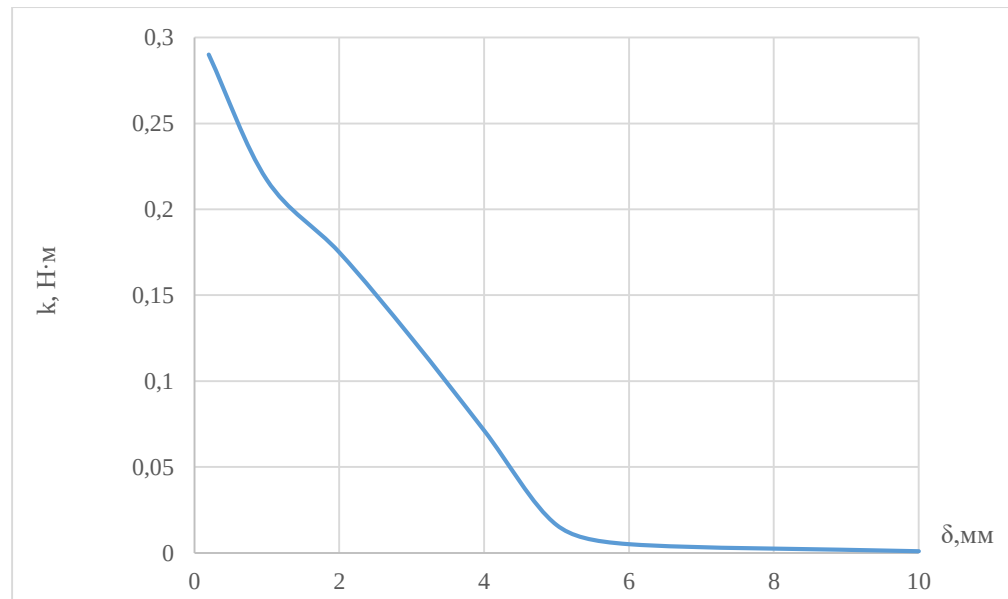


Рисунок 2.23 - Залежність коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту при $\delta = \text{var}$

По рис. 2.23 видно, що чим менша величина повітряного проміжку, тим більша величина пульсацій електромагнітного моменту. Однак, подальше збільшення величини повітряного проміжку (>5 мм) вже не призводить до суттєвого зменшення пульсацій моменту, але одночасно з цим зменшується величина корисного електромагнітного моменту.

В роботі розроблено двовимірну польову математичну модель магнітної передачі, що дозволяє оцінити величину електромагнітного моменту та пульсації при зміні параметрів, таких як висота постійних магнітів, ширина феромагнітних вставок модулятора магнітного потоку та величини повітряного проміжку.

Отримано оптимальну конфігурацію постійних магнітів та феромагнітних елементів модулятора для досягнення максимальної ефективності та зниження пульсацій електромагнітного моменту. При зменшенні висоти постійних магнітів в 2,2 рази величина моменту зменшується в ≈ 2 рази, при цьому пульсації електромагнітного моменту збільшуються на 30 %. Зменшення повітряного проміжку в 2 рази призводить

до підвищення моменту $\approx 55\%$, в той же час збільшення повітряного проміжку на 2 мм призводить до зменшення моменту на $\approx 35\%$.

Результати досліджень дають практичні рекомендації для проєктування магнітних передач з метою підвищення ефективності, надійності та зниження пульсацій електромагнітного моменту.

Виявлено, що існує оптимальна величина повітряного проміжку, при якій знижуються пульсації електромагнітного моменту, а прояв вищих гармонік пульсацій електромагнітного моменту є мінімальним.

Отримані результати дозволяють вдосконалити конструкцію магнітних передач, забезпечити оптимальні параметри та покращити їх функціональні характеристики, що може позитивно позначитись на розвитку вітроелектричних систем.

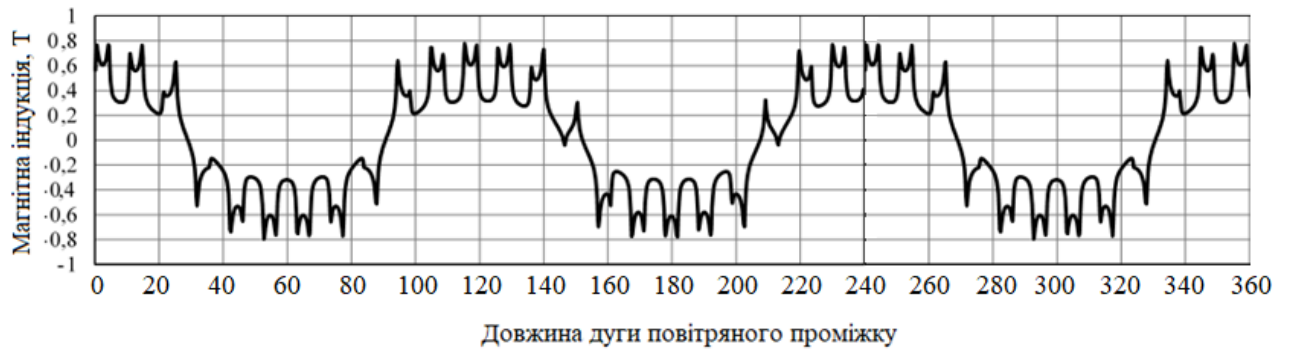
2.5 Аналіз розподілу магнітного поля магнітної передачі в немагнітних проміжках

Низькошвидкісний ротор магнітної передачі, що у загальному випадку називається модулятором, виконує функцію виділення з магнітного поля робочої гармоніки, що бере участь у створенні активного моменту. Це перетворення не є ідеальним, у зв'язку з чим утворюються просторові гармоніки магнітного поля, що рухаються асинхронно щодо елементів магнітної системи, викликаючи в них магнітні втрати. Знання частот перемагнічування елементів магнітної системи дозволяє обґрунтувати конструктивні рішення, які необхідно ухвалити для боротьби з магнітними втратами. Результати розрахунків радіальної складової вектора магнітної індукції у кожному з немагнітних проміжків наведені на рисунках 2.24, 2.25.

Якщо видалити з магнітної передачі статор, його магнітна система знаходиться в магнітному полі, що є результатом взаємодії високошвидкісного і низькошвидкісного роторів. Гармонічний склад цього поля представлений малюнку 2.24 (б), з якого видно, що основна просторова гармоніка магнітного поля має дві пари полюсів, що дорівнює

числу пар полюсів високошвидкісного ротора. Ця гармоніка замикається через магнітопровід нерухомого статора. Частота перемагнічування цією гармонікою елементів магнітної системи статора

$$f_c = \frac{p_B \cdot n_B}{60} = \frac{N_c \cdot n_H}{60}. \quad (2.17)$$



б

Рисунок 2.24 – Радіальна складова вектора магнітної індукції у зовнішньому немагнітному зазорі за відсутності в магнітній системі ПМ статора: а – просторовий розподіл; б – гармонійний склад

Гармоніка з 29 парою полюсів зчепляється з нерухомою системою постійних магнітів статора і є нерухомою щодо нього. Ця робоча гармоніка, що створює активний електромагнітний момент [117 – 119].

Якщо виділити з магнітної передачі високошвидкісний ротор, його магнітна система обертається в магнітному полі, що є результатом взаємодії магнітних систем

статора і низькошвидкісного ротора. Гармонічний склад цього поля зображений малюнку 2.25 (б), з якого видно, що основна гармоніка має три пари полюсів, що відповідає числу пар полюсів високошвидкісного ротора. Ця гармоніка є робочою і нерухомою щодо високошвидкісного ротора і тому створює магнітні втрати у ньому. Основною асинхронною щодо високошвидкісного ротора є гармоніка з 23 парою полюсів, що виникає внаслідок проникнення у внутрішній немагнітний проміжок немодульованого поля магнітної системи статора. Ця гармоніка нерухома у просторі і перемагнічує високошвидкісний ротор із частотою

$$f_{\text{в}} = \frac{p_{\text{с}} \cdot n_{\text{в}}}{60}. \quad (2.18)$$

Магнітна система низькошвидкісного ротора звернена до обох немагнітних проміжків. З боку зовнішнього проміжку низькошвидкісний ротор обертається на полі статора з 23 парою полюсів. Частота перемагнічування може бути визначена як

$$f_{\text{н}} = \frac{p_{\text{с}} \cdot n_{\text{н}}}{60}. \quad (2.19)$$

З боку внутрішнього проміжку низькошвидкісний ротор обертається в магнітному полі, що має широкий частотний спектр, основна гармоніка якого має дві пари полюсів і обертається відносно низькошвидкісного ротора з частотою $(n_{\text{в}} - n_{\text{н}})$. Частота перемагнічування низькошвидкісного ротора цією гармонікою

$$f_{\text{н}} = \frac{p_{\text{в}} \cdot (n_{\text{в}} - n_{\text{н}})}{60} = \frac{p_{\text{с}} \cdot n_{\text{н}}}{60}. \quad (2.20)$$

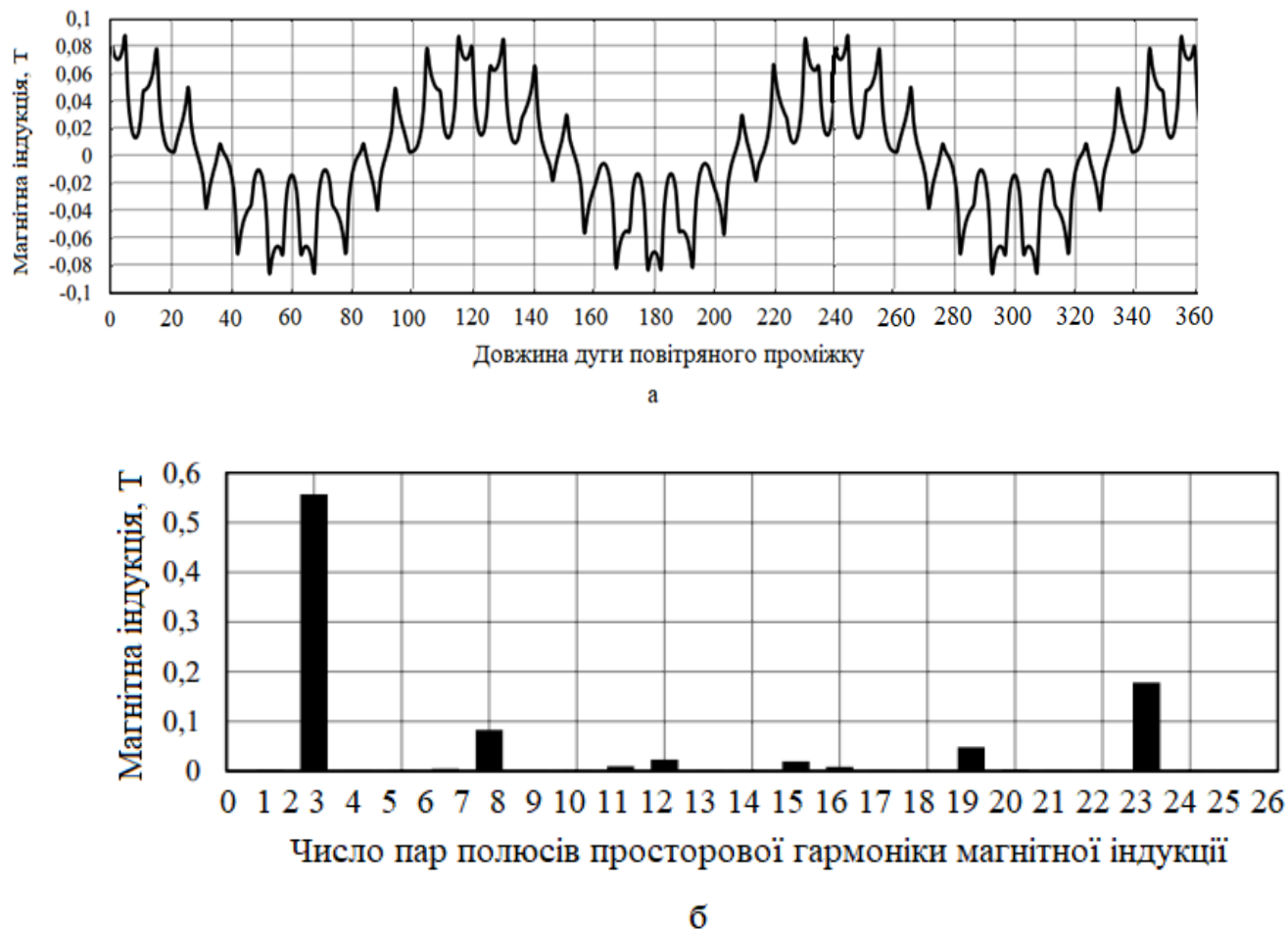


Рисунок 2.25 – Радіальна складова вектора магнітної індукції в зовнішньому немагнітному зазорі за відсутності в магнітній системі ПМ статора: а – просторовий розподіл; б – гармонійний склад

Для даної магнітної передачі при частоті обертання високошвидкісного ротора 3000 об/хв частоти перемагнічування рівні для статора - 16 Гц, для високошвидкісного ротора - 140 Гц і для низькошвидкісного ротора - 15,75 Гц. Найбільша частота перемагнічування спостерігається у магнітній системі високошвидкісного ротора. Однак амплітуда цієї гармоніки магнітного поля мала (0,28 Т рис. 2.27) порівняно з амплітудою гармоніки частотою 16 Гц в статорі (0,56 Т рис. 2.26). Відомо, що втрати на індуквані струми пропорційні магнітної індукції та другого ступеня частоти

перемагнічування. Для статора цей добуток дорівнює 143 T/s^2 , тоді як для основної перемагнічує гармоніки високошвидкісного ротора він становить 857 T/s^2 . Звідки слід висновок про необхідність вживати заходів щодо захисту високошвидкісного ротора від індукованих струмів, особливо його постійних магнітів, навіщо їх необхідно сегментувати.

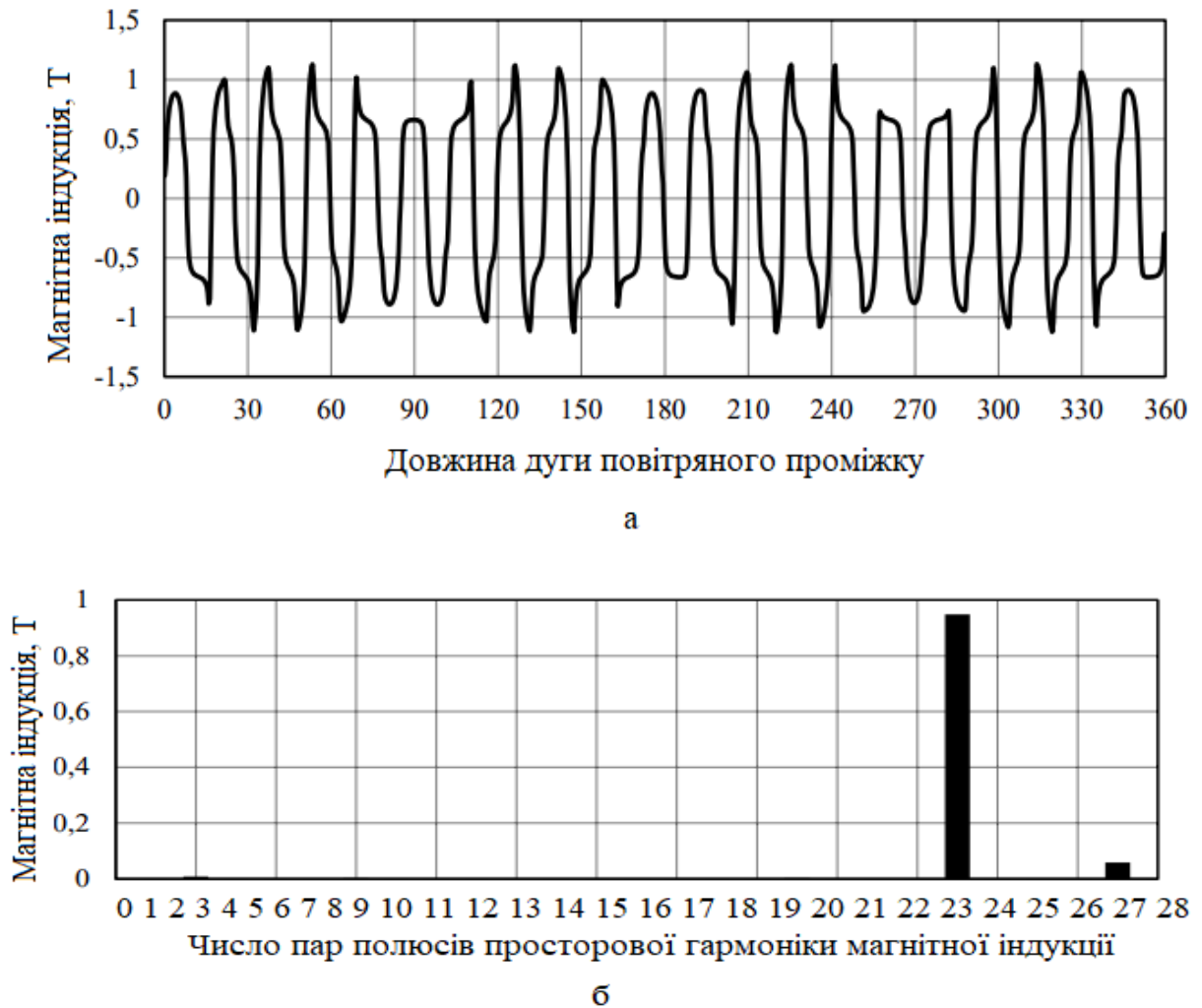


Рисунок 2.26 – Радіальна складова вектора магнітної індукції у зовнішньому немагнітному зазорі за відсутності в магнітній системі ПМ високошвидкісного ротора:
а – просторовий розподіл; б – гармонійний склад

На рис. 2.25 видно, що завдяки наявності низькошвидкісного ротора (модулятора) відбувається зміна гармонійного складу поля постійних магнітів статора таким чином,

що в ньому, крім гармонійної складової, певною кількістю пар полюсів статора, з'являється ще й гармонійна складова з числом пар полюсів високошвидкісного ротора. При внесенні в таку систему постійних магнітів високошвидкісного ротора (рис. 2.27) відбувається силова взаємодія по взаємно нерухомих гармоніках модульованого магнітного поля, створюваного статором, і магнітного поля, створюваного високошвидкісним ротором. З іншого боку, високошвидкісний ротор завдяки наявності модулятора створює в зовнішньому повітряному зазорі розподіл магнітного поля, яке містить гармоніку, що відповідає основній гармоніці магнітного поля статора (рис. 2.24). При внесенні в таке поле магнітної системи статора (рис. 2.26) відбувається силова взаємодія по взаємно нерухомих гармоніках магнітного поля статора та модульованого поля високошвидкісного ротора. Описані ефекти є основою принципу дії магнітної передачі.

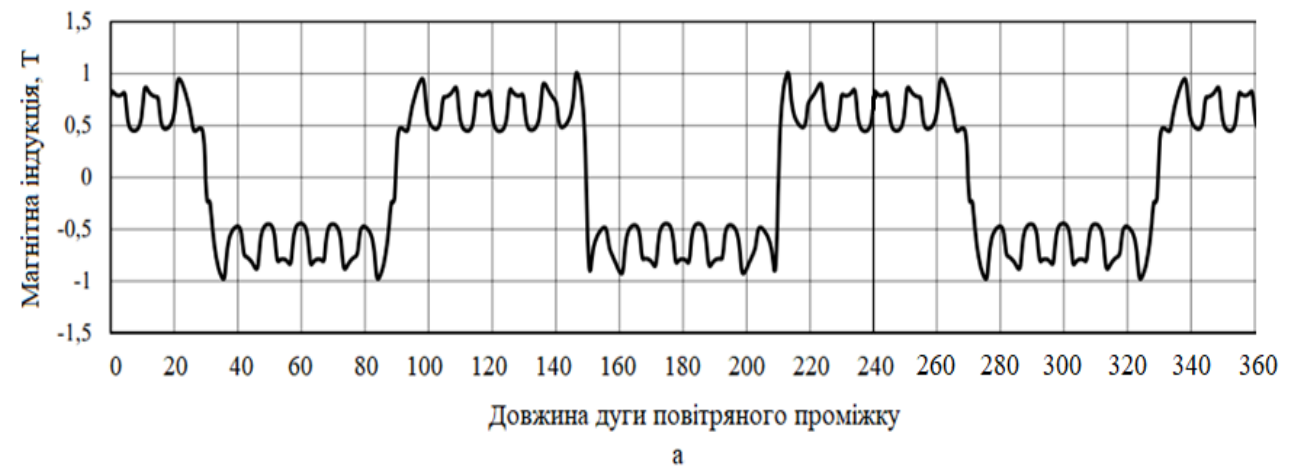


Рисунок 2.27 – Радіальна складова вектора магнітної індукції у внутрішньому немагнітному зазорі за відсутності в магнітній системі ПМ статора:

а – просторовий розподіл; б – гармонійний склад

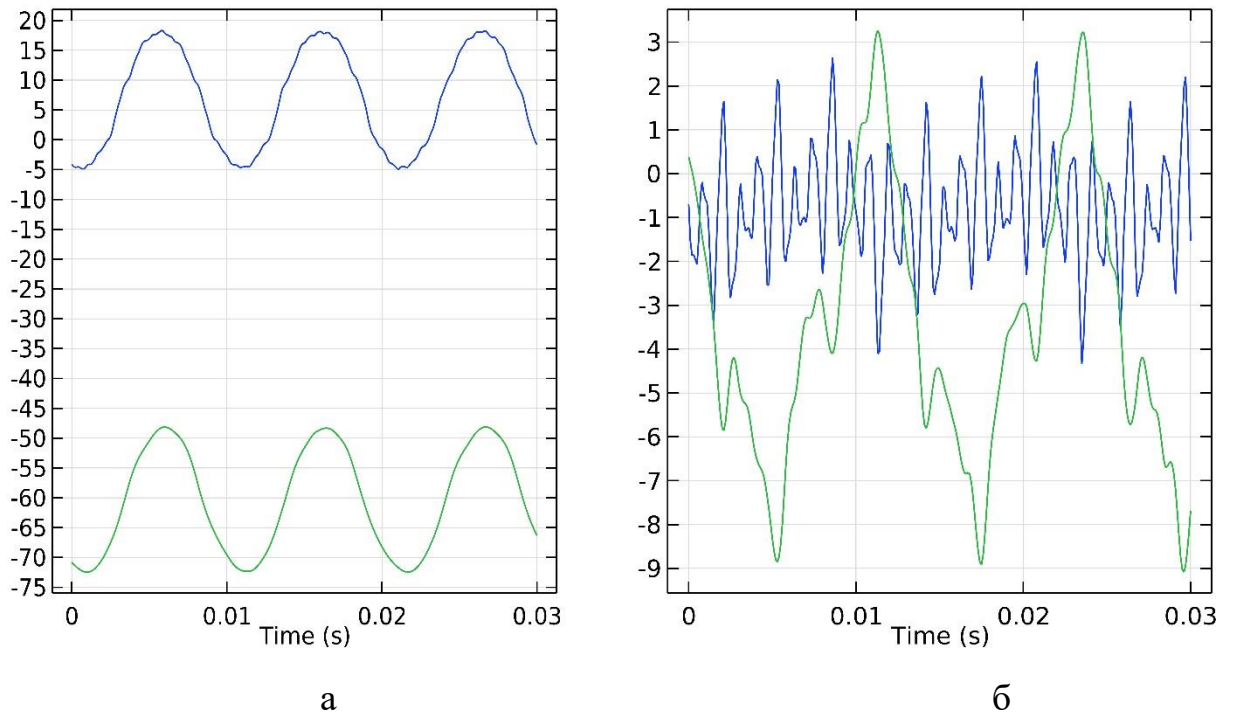


Рисунок 2.28 – Розподіл миттєвого значення електромагнітного моменту
магнітної передачі

а – коефіцієнт передачі 8, б – коефіцієнт передачі 4

Величина електромагнітного моменту та його пульсації залежать від конструктивних параметрів магнітної передачі (як це було показано вище в даному розділі) так і від відношення кількості пар полюсів високо та низькошвидкісного ротора та від передавального відношення. На рис.2.28 (а) показано розподіл миттєвого значення електромагнітного моменту при передавальному відношенні 8, кількості полюсів низькошвидкісного ротора 48 і високошвидкісного 6. При цьому коефіцієнт пульсацій електромагнітного моменту для низькошвидкісного ротора складає 14,3 %. При передавальному відношенні рівному 4 та кількості полюсів низькошвидкісного ротора 8 і високошвидкісного 2 (рис. 2.28 (б)) коефіцієнт пульсації електромагнітного моменту для низькошвидкісного ротора складає 55 %. Аналогічні результати можливо отримати при інших цілих значеннях передавального відношення. Отже, одним із критеріїв

отримання мінімальних пульсацій електромагнітного моменту є виконання магнітної передачі з дробовим передавальним числом.

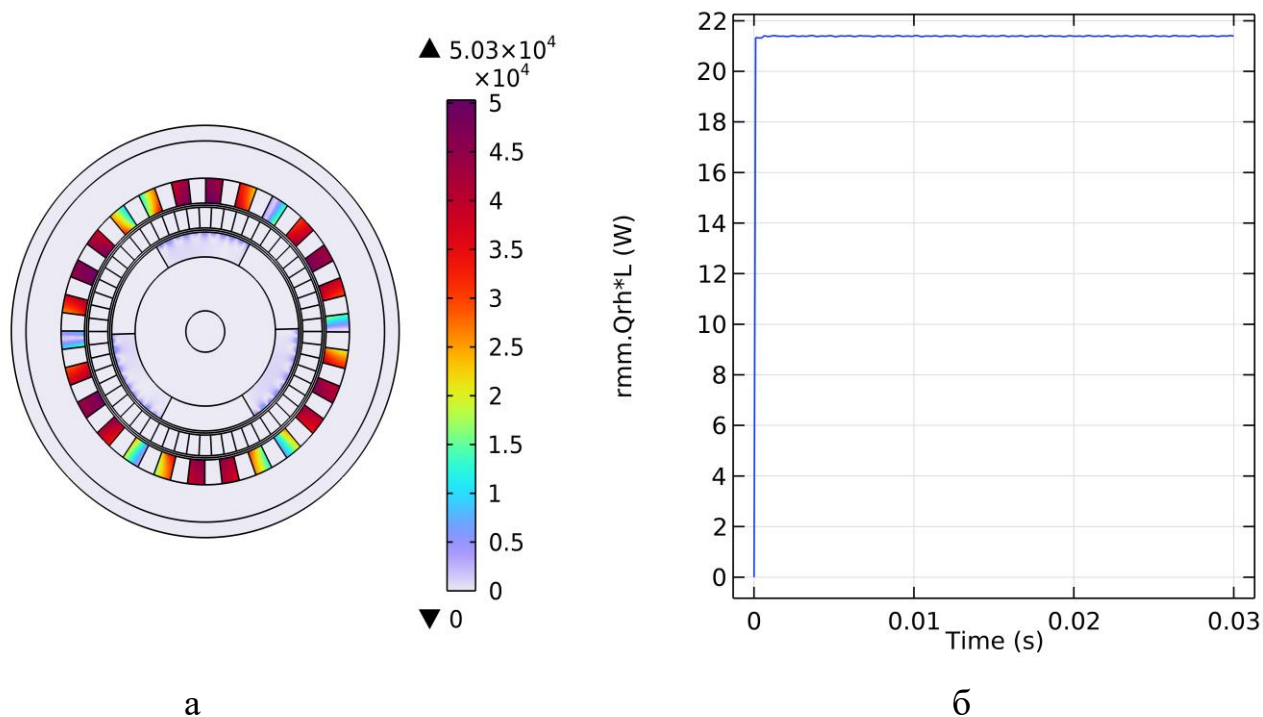


Рисунок 2.29 – Розподіл вихрових струмів в постійних магнітах
низькошвидкісного ротора та втрат

На рис. 2.29 (а) показано розподіл вихрових струмів в постійних магнітах низькошвидкісного ротора при значенні електропровідності $0,56 \cdot 10^6 \frac{C_M}{M}$. При цьому залежність втрат в постійних магнітах від часу показано на рис. 2.29 (б) і складає 21,4 Вт. Даний розрахунок використовується для визначення параметрів чисельної імітаційної моделі в наступному розділі.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено двовимірну польову математичну модель магнітної передачі для роботи у складі вітроустановки малої потужності. За допомогою розробленої моделі проведено аналіз електромагнітного поля, параметрів та характеристик магнітної передачі при постійній та змінній швидкості обертання. Середнє значення електромагнітного моменту зовнішнього (високошвидкісного) ротора становить $\approx 7,4$ Н·м, тоді як величина електромагнітного моменту для зовнішнього ротора становить ≈ 66 Н·м. відношення моментів зовнішнього та внутрішнього роторів становить 8,92, що корелюється із коефіцієнтом редукції досліджуваного редуктора.

2. При зміні швидкості вітру змінюється швидкість обертання магнітної передачі і відповідні величини електромагнітних моментів високошвидкісного та низькошвидкісного роторів магнітної передачі. В даному дослідженні показано, що магнітна система передачі не досягає насичення. При цьому середні значення магнітної індукції в конструктивних елементах передачі залишаються в межах допустимих значень для використовуваних матеріалів та марок сталі. Нерівномірний розподіл індукції вздовж середньої лінії в повітряному проміжку пояснюється наявністю модулятора, який є дискретним елементом в конструкції будь-якої магнітної передачі.

3. Розроблено математичну модель та методику аналізу гармонійного складу магнітного поля в немагнітних проміжках магнітної передачі з урахуванням кінцевих ефектів, на підставі яких обґрунтовано вимоги щодо конструктивного виконання елементів магнітної системи.

4. Отримано оптимальну конфігурацію постійних магнітів та феромагнітних елементів модулятора для досягнення максимальної ефективності та зниження пульсацій електромагнітного моменту. При зменшенні висоти постійних магнітів в 2,2 рази величина моменту зменшується в ≈ 2 рази, при цьому пульсації електромагнітного моменту збільшуються на 30 %. Зменшення повітряного проміжку в 2 рази призводить

до підвищення моменту $\approx 55\%$, в той же час збільшення повітряного проміжку на 2 мм призводить до зменшення моменту на $\approx 35\%$.

5. В результаті виконання дослідження, що базуються на результатах польового та чисельного імітаційного моделювання запропоновано шляхи покращення показників магнітної передачі:

- кожен полюс статора має бути відокремлений від сусіднього полюса електроізоляційною вставкою;
- постійні магніти статора повинні бути поділені на електрично ізольовані сегменти в осьовому напрямку;
- постійні магніти високошвидкісного ротора повинні бути поділені на сегменти як в осьовому, так і в радіальному напрямку;
- сегменти низькошвидкісного ротора повинні бути електрично ізольованими один від одного та мати фаски.

РОЗДІЛ 3

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОЇ ПЕРЕДАЧІ

Моделювання динаміки роботи магнітної передачі пов'язане з розв'язанням системи нелінійних диференціальних рівнянь руху. Аналітичне рішення цієї системи рівнянь має на увазі її лінеаризацію шляхом лінійної апроксимації навантажувальної характеристики [12] і має високу трудомісткість і низьку точність. Тож аналізу динамічних режимів роботи часто застосовують чисельне математичне моделювання, що дозволяє вирішувати системи нелінійних диференціальних рівнянь і рахунок цього отримувати точніші результати. При цьому пов'язане чисельне моделювання механічних та електромагнітних процесів ускладнене внаслідок їхньої різномасштабності. У зв'язку з цим такий підхід має підвищену ресурсоемність [128, 129]. Для подолання цього недоліку деякі автори пропонують замінювати чисельне моделювання розрахунком за допомогою резистивних моделей [130], що значно знижує точність.

Для оптимізації обчислень у дисертації пропонується розділити розрахунок магнітної та механічної підсистем. Суть цього методу полягає у використанні чисельного математичного моделювання для визначення коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь руху та подальше її вирішення за допомогою програмного забезпечення Matlab/Simulink [131 – 133].

3.1 Динамічні рівняння магнітної передачі

Магнітна передача є системою з двома магнітно-пов'язаними елементами, що обертаються з різними швидкостями, — високошвидкісним і низькошвидкісним роторами. Торсійна жорсткість магнітних передач приблизно на три порядки нижче, ніж у їх зубчастих аналогів [22, 134], що відбивається на їх динамічні характеристики. Динаміка роботи магнітної передачі розглянута лише у кількох роботах [130, 135, 136]. Однак у жодній з відомих робіт не представлені математичні макромоделі магнітної

передачі та оцінки впливу параметрів кожного з роторів окремо на частоту вільних коливань.

Для певності надалі робота магнітної передачі розглядається в режимі мультиплікатора, тобто до низькошвидкісного ротора прикладено момент від приводу, а до високошвидкісного ротора - момент навантаження. Однак усі наведені нижче міркування справедливі й у режимі редуктора. Таким чином, у загальному вигляді рівняння, що описують рухи низько- та високошвидкісного роторів, записуються згідно з другим законом Ньютона як

$$\begin{cases} J_H \frac{d\omega_H}{dt} = T_{\text{пр}} - T_H - T_{\text{нав } H}, \\ J_B \frac{d\omega_B}{dt} = T_B - T_{\text{нав } B} - T_{\text{нав}}, \end{cases} \quad (3.1)$$

де J_H, J_B - моменти інерції низько-і високошвидкісного роторів, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

ω_H, ω_B - кутові швидкості низько-і високошвидкісного роторів, рад/с ;

$T_{\text{пр}}$ - момент приводу, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

T_B - електромагнітний момент на високошвидкісному роторі, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

T_H - електромагнітний момент на низькошвидкісному роторі, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

$T_{\text{нав } H}$ - момент втрат, що діє на низькошвидкісний ротор, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

$T_{\text{нав } B}$ - момент втрат, що діє на високошвидкісний ротор, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

$T_{\text{нав}}$ - момент навантаження, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Якщо припустити, що пристрій обертається від ідеального джерела моменту та момент навантаження визначено, то в системі рівнянь (3.1) невідомими змінними є $\omega_H, \omega_B, T_H, T_B, T_{\text{нав } H}, T_{\text{нав } B}$. Таким чином, для її вирішення необхідно додати чотири додаткові рівняння. Перші два додаткові рівняння відображають залежність моментів втрат від швидкості обертання роторів

$$\begin{cases} T_{\text{нав } H} = k_{2H} \cdot \omega_H + k_{1H}, \\ T_{\text{нав } B} = k_{2B} \cdot \omega_B + k_{1B}, \end{cases} \quad (3.2)$$

де k_{2H}, k_{2B} - коефіцієнти дисипації потужності за рахунок індукованих струмів для низько- та високошвидкісного роторів, $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$;

k_{1B}, k_{1B} – коефіцієнти дисипації потужності за рахунок гістерезису для низько- та високошвидкісного роторів, Н·м.

Відповідно до принципу роботи магнітної передачі та отриманих в результаті його моделювання статичним моментним характеристикам відношення електромагнітних моментів, що діють на низько- та високошвидкісної ротори магнітної системи, зберігається постійним і рівним передатному відношенню, звідки слідує третє додаткове рівняння до системи (3.1)

$$\frac{T_H}{T_B} = -i. \quad (3.3)$$

У повітряних проміжках коаксіальної планетарної магнітної передачі магнітне поле не обмежується однією просторовою гармонікою, а має кілька гармонійних складових, серед яких можна виділити і робочу гармоніку - гармоніку, що бере участь у передачі потужності. За результатами моделювання робоча гармоніка у зовнішньому немагнітному зазорі має p_B пар полюсів, а у внутрішньому — p_H пар полюсів. Інші гармоніки спектру не беруть участь у передачі потужності, створюючи реактивний момент. Тому з метою спрощення моделі, гармоніки, які беруть участь у передачі потужності, не враховуються. Таким чином, приймаючи припущення про синусоїдальність кутової характеристики електромагнітного моменту можна показати електромагнітний момент через кут навантаження. Для певності надалі розглядатимуться магнітні поля в внутрішньому немагнітному зазорі. З принципу дії магнітної передачі відомо, що при обертанні його низькошвидкісного ротора з кутовою частотою ω_H збуджуване ним поле у внутрішньому немагнітному зазорі обертається з частотою $\omega_H \cdot i$ і має робочу гармоніку з парами полюсів. Таким чином, електричний кут повороту робочої гармоніки магнітного поля, що збуджується системою статор – модулятор у внутрішньому немагнітному зазорі

$$\varphi_{\text{нав } H} = p_H \cdot i \int \omega_H(t) dt. \quad (3.4)$$

Електричний кут повороту поля високошвидкісного ротора у внутрішньому немагнітному зазорі

$$\varphi_{\text{на в в}} = p_{\text{в}} \cdot i \int \omega_{\text{в}}(t) dt. \quad (3.5)$$

Отже, електричний кут між полями (кут навантаження) у кожний момент часу

$$\theta = \varphi_{\text{на в н}} - \varphi_{\text{на в в}} = p_{\text{в}} \cdot (i \int \omega_{\text{н}}(t) dt - \int \omega_{\text{в}}(t) dt). \quad (3.6)$$

Так як магнітна передача працює в режимі мультиплікатора, то момент, що діє на низькошвидкісний ротор, повинен мати характер, що гальмує. Залежність моменту від кута навантаження представлена як:

$$T_{\text{н}} = -T_{\text{н max}} \sin \theta, \quad (3.7)$$

де $T_{\text{н max}}$ – максимальний електромагнітний момент, що розвивається низькошвидкісним ротором.

Спільно системи утворюють додаткове четверте рівняння. Таким чином, повна система рівнянь, що описує динаміку роботи магнітної передачі, має такий вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\text{н}} \frac{d\omega_{\text{н}}}{dt} = T_{\text{пр}} - T_{\text{н}} - k_{2\text{н}} \cdot \omega_{\text{н}} - k_{1\text{н}}, \\ J_{\text{в}} \frac{d\omega_{\text{в}}}{dt} = T_{\text{в}} - k_{2\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}} - k_{1\text{в}} - T_{\text{на в в}}, \\ \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{в}}} = -i, \\ T_{\text{н}} = -T_{\text{н max}} \sin \theta, \\ \theta = p_{\text{в}} \cdot (i \int \omega_{\text{н}}(t) dt - \int \omega_{\text{в}}(t) dt). \end{array} \right. \quad (3.8)$$

З системи видно, що миттєве значення відношення частот обертання низько і високошвидкісного роторів може відрізнитися від передавального відношення, що не характерно для зубчастих передач, де швидкості валів пов'язані жорстко через передавальні відносини. У випадку з магнітною передачею дане співвідношення виконується тільки в режимі, який характеризується сталістю частот обертання роторів.

3.2 Розробка чисельної імітаційної математичної моделі в середовищі Matlab/Simulink

Рішення нелінійної системи рівнянь (3.1) зроблено у програмному середовищі Matlab/Simulink (рис. 3.1). Еквівалентна схема магнітної передачі побудована за

принципом прямої моделі, тобто механічні та електромагнітні моменти в системі є фазовими змінними типу потоку, а частоти обертання – типу потенціалу.

Структурно модель складається з трьох основних частин, що відповідають низькошвидкісному ротору, високошвидкісному ротору і магнітного зв'язку між ними, складеною відповідно до системи рівнянь (3.8).

Привід представлений у моделі ідеальним джерелом моменту $T_{пр}$ з використанням блоку "Ideal Torque Source". Моменти інерції роторів J_v , J_n представлені за допомогою блоків "Inertia". Дисипативні елементи представлені за допомогою блоків "Rotational Friction", які дозволяють визначати коефіцієнти k_{2n} , k_{2v} , k_{1n} , k_{1v} системи рівнянь (3.8). Навантаження моделюється введенням додаткового коефіцієнта в'язкого тертя $k_{нав}$. Зв'язок механічних підсистем низько- та високошвидкісного роторів магнітної передачі здійснена за допомогою додавання співвідношення між електромагнітними моментами T_v , T_n , що діють на кожен із роторів. Електромагнітні моменти представлені за допомогою керованих джерел "Ideal Torque Source". Миттєві значення електромагнітних моментів T_v , T_n визначаються трьома останніми рівняннями системи (3.8). Миттєві значення кутів повороту роторів системи розраховуються інтегруванням кутової швидкості обертання, що розраховується за допомогою блоку "Ideal Rotational Motion Sensor".

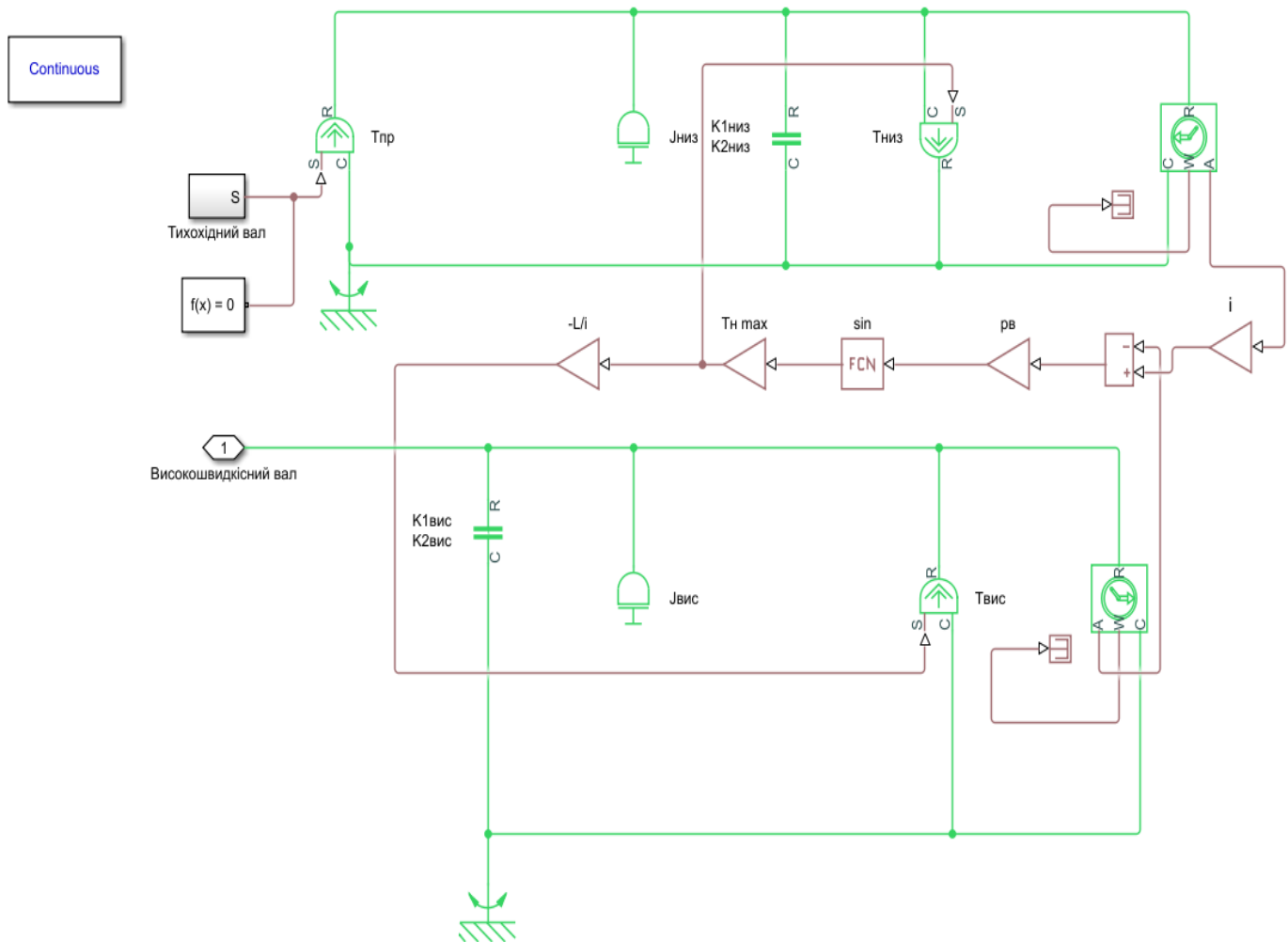


Рисунок 3.1 - Динамічна модель магнітної передачі в Matlab/Simulink

3.3 Методика визначення параметрів імітаційної моделі

Основними параметрами макромоделі, які необхідно визначити для вирішення системи рівняння (3.8), є максимальний електромагнітний момент ($T_{н max}$), передатне відношення (i), число пар полюсів високошвидкісного ротора (p_v) та статора (p_c), а також моменти інерції роторів (J_v, J_n) та узагальнені коефіцієнти дисипації потужності для низькошвидкісного ($k_{1н}, k_{2н}$), та високошвидкісного ($k_{1в}, k_{2в}$) роторів.

Як числовий приклад далі розглядається варіант магнітної передачі, розрахований у розділі 2, максимальний момент якого становив 66 Н·м. Число пар полюсів на

магнітних колесах задається при проектуванні і для варіанта магнітної системи, що розглядається, дорівнює 26 і 3 відповідно. Передатне відношення при заблокованому зовнішньому магнітному колесі дорівнює 8,667 відповідно до формули (1.7). Моменти інерції роторів розраховані за допомогою 3D моделі і склали $13 \cdot 10^{-3}$ кг·м² та $1,1 \cdot 10^{-3}$ кг·м² для низько- та високошвидкісного роторів відповідно.

Узагальнений коефіцієнт втрат потужності k_2 за рахунок індукованих струмів становить $1,1 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с/рад. Узагальнений коефіцієнт втрат потужності k_1 за рахунок втрат на гістерезис становить $9,3 \cdot 10^{-2}$ Н·м. Втрати потужності в системі, пропорційні другому ступеню кутової частоти

$$P_2 = k_2 \omega_B^2 = k_{2B} \omega_B^2 + k_{2H} \omega_H^2. \quad (3.9)$$

У зв'язку з тим, що немає можливості розрахувати коефіцієнти окремо для кожного з роторів прийнято припущення, що $k_{2H} = k_{2B} = k_{2\Sigma 2}$

$$P_2 = k_2 \omega_B^2 = k_{2B} \omega_B^2 + k_{2H} \omega_H^2 = k_{2\Sigma 2} (\omega_B^2 + \omega_H^2) = k_{2\Sigma 2} \left(1 + \frac{1}{i^2}\right) \cdot \omega_B^2, \quad (3.10)$$

звідки

$$k_{2B} = k_{2H} = \frac{k_2 \cdot i^2}{1+i^2} = \frac{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 8,667^2}{1+8,667^2} = 1,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}. \quad (3.11)$$

За аналогією втрати потужності в обох роторах системи, пропорційні першій ступені кутової частоти також складаються

$$P_1 = k_1 \omega_B = k_{1B} \omega_B + k_{1H} \omega_H. \quad (3.12)$$

і при припущенні, що $k_{1H} = k_{1B} = k_{1\Sigma 1}$ отримуємо

$$P_1 = k_1 \omega_B = k_{1B} \omega_B + k_{1H} \omega_B = k_{1\Sigma 1} (\omega_B + \omega_H) = k_{1\Sigma 1} \left(1 + \frac{1}{i}\right) \cdot \omega_B, \quad (3.13)$$

Звідки

$$k_{1B} = k_{1H} = \frac{k_1 \cdot i}{1+i} = \frac{9,3 \cdot 10^{-2} \cdot 8,667}{1+8,667} = 8,6 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.14)$$

3.4 Результати моделювання динамічних процесів

При роботі магнітної передачі можуть виникати такі режими, при яких момент приводу або навантаження перевищує максимальне значення електромагнітного моменту. У такому режимі спостерігається прослизання магнітної передачі («зрив»), у результаті припиняється передача потужності між її роторами.

Для розрахунку такого режиму на тихохідний вал моделі магнітної передачі був поданий момент скидання навантаження. Єдиною відмінністю є те, що в момент часу 1,5 с відбувається збільшення приводного моменту до 90 Н·м, що вище за максимальне значення моменту досліджуваної передачі (рис. 3.5).

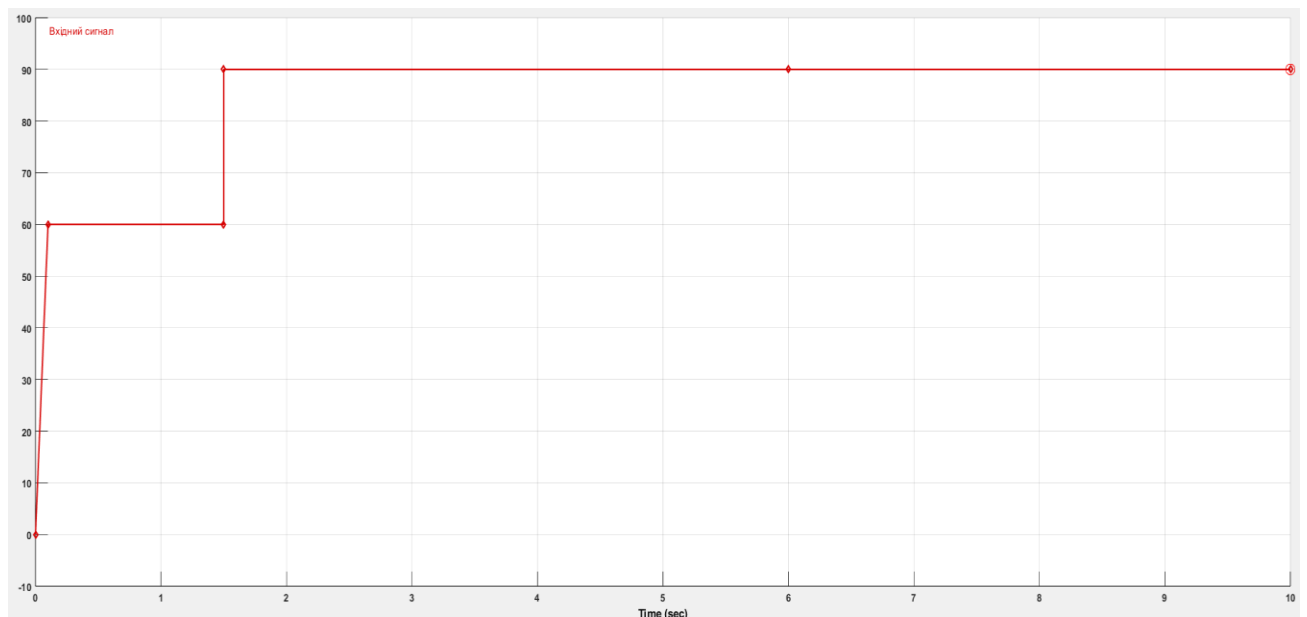
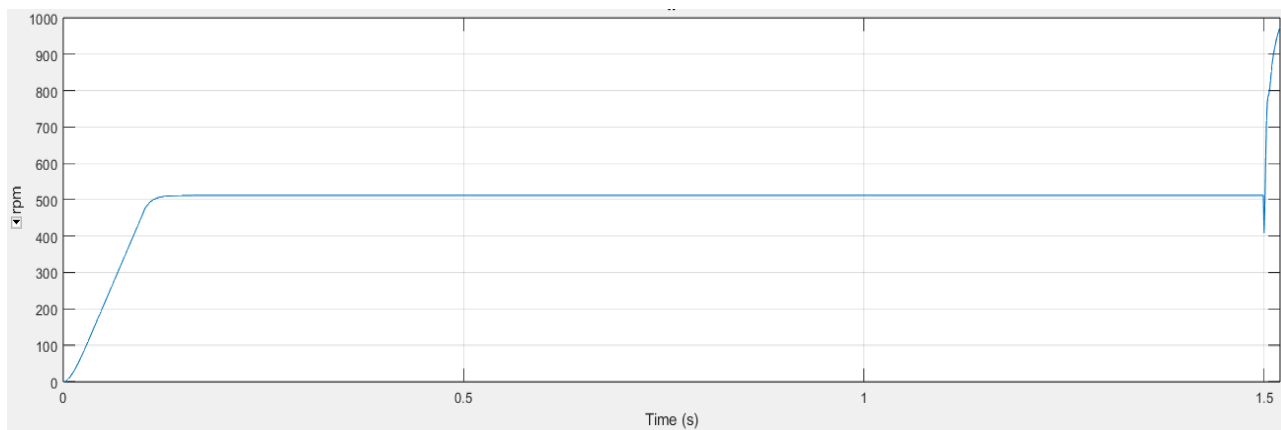
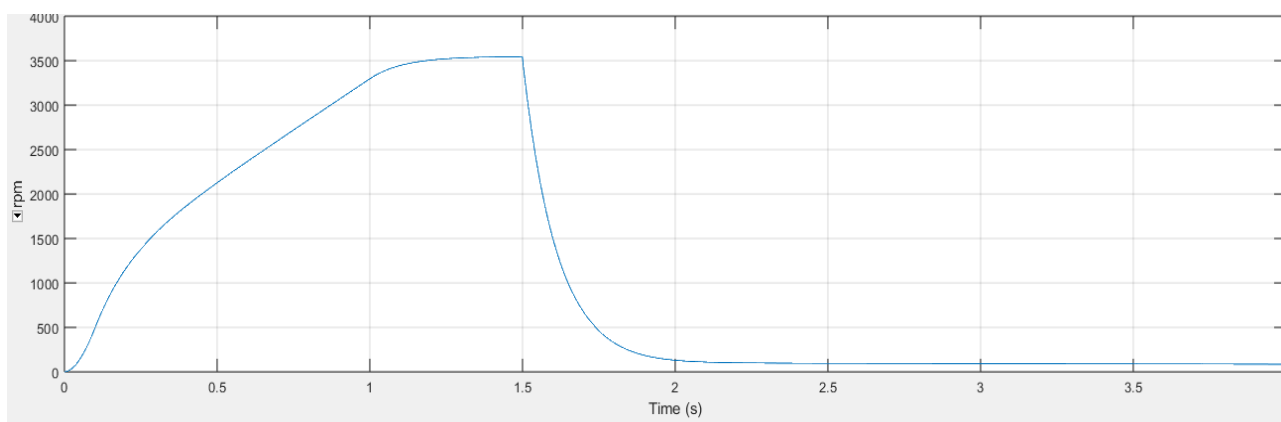


Рисунок 3.5 – Залежність моменту приводу від часу



а



б

Рисунок 3.6 – Розрахункова залежність частоти обертання від часу:

а – для високошвидкісного ротора; б – для низькошвидкісного ротора

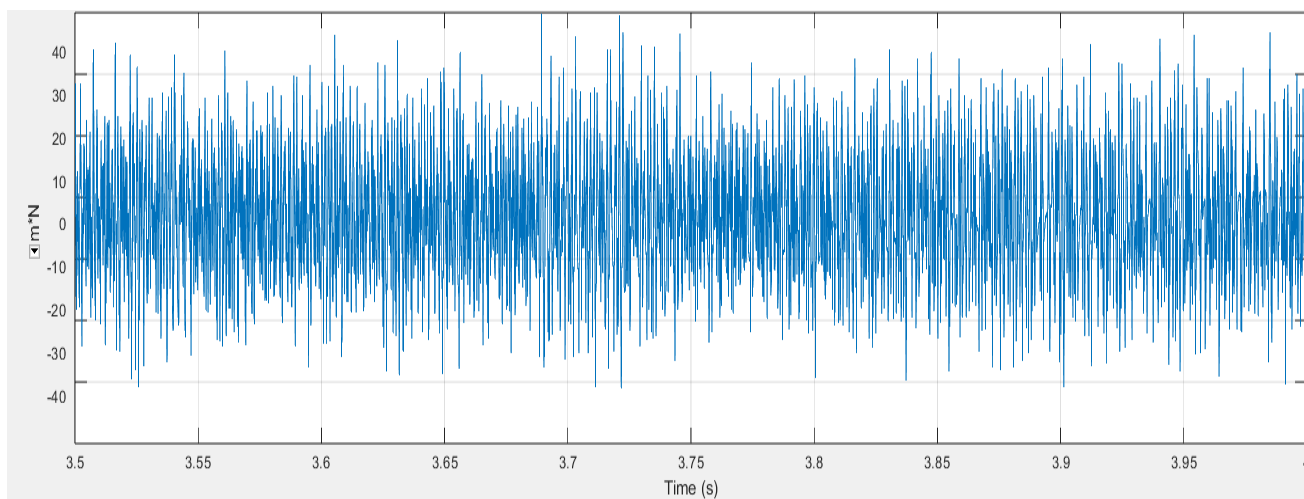


Рисунок 3.7 – Розрахункова залежність моменту, що діє на високошвидкісний ротор в області «зриву»

При перевищенні приводом значення максимального моменту магнітна передача виходить із синхронізму, і його вхідний ротор (низькошвидкісний) починає різко прискорюватися (рис. 3.6 (а)), а вихідний (високошвидкісний) ротор починає сповільнюватися (рис. 3.6 (б)) і в кінці втрачає постійну складову частоти обертання, роблячи коливання щодо нульового значення. Момент магнітної передачі також втрачає постійну складову і коливається щодо нульового значення з амплітудою, що дорівнює максимальному моменту на відповідному роторі (рис. 3.7), тобто фактично набуває реактивного характеру, так як не бере участі в передачі потужності.

3.5 Методика складання лінеаризованої динамічної моделі

Динамічна модель магнітної передачі, заснована на нелінійній системі диференціальних рівнянь (63), дозволяє отримати точний результат з мінімальними спрощеннями. Однак така модель незручна для використання на початкових етапах проєктування з метою первинної оцінки параметрів коливань. Для цих цілей зручніше скористатися лінеаризованою динамічною моделлю, в якій співвідношення між моментом, що виникає, і кутом навантаження представлене несинусоїдальною функцією, а її лінійною апроксимацією в області робочого моменту. При такому припущенні стає можливим виконати розрахунок системи частотної області.

Найбільш зручно скласти звернену механічну модель, в якій момент є фазовою змінною типу потенціалу, а кутова швидкість обертання - фазовою змінною типу потоку [137]. На рис. 3.8 представлені механічні підсистеми окремо для низько- та високошвидкісного роторів, складені за зверненою моделлю. Відповідно до цієї механічної моделі момент приводу представлений ідеальним джерелом механічної ЕРС, коефіцієнти в'язкого тертя - механічними опорами, коефіцієнти сухого тертя - механічними ЕРС, моменти інерції - механічними індуктивностями. Моменти, які діють низько- і високошвидкісної ротори системи, представлені джерелами механічних ЕРС.

У режимі мультиплікатора момент, що діє на низькошвидкісний ротор, гальмує, а момент, що діє на високошвидкісний ротор, рушійним, що відображено на рис. 3.8.

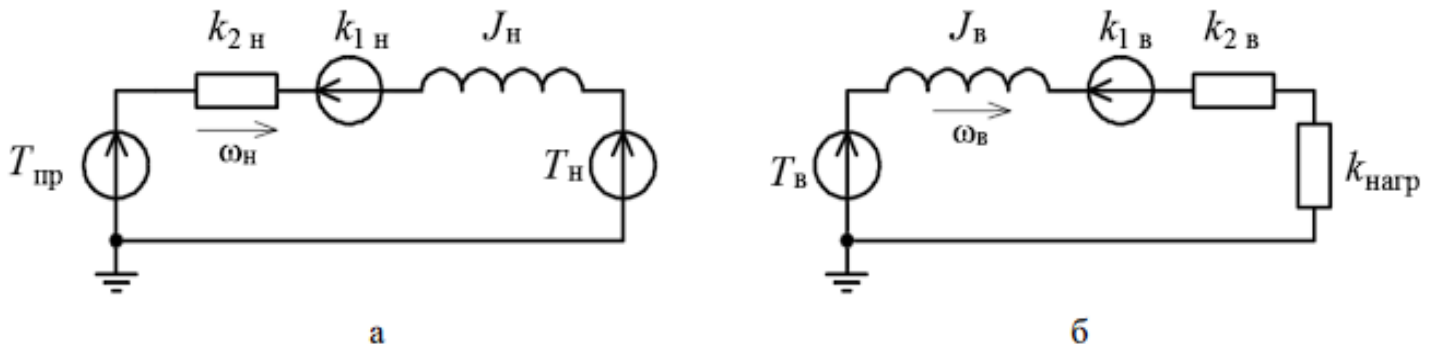


Рисунок 3.8 - Еквівалентні схеми механічних підсистем роторів магнітної передачі: а – низькошвидкісного; б – високошвидкісного

Враховуючи, що моменти низько- та високошвидкісного роторів відносяться як передатне відношення, то для зручності аналізу схеми зроблено приведення високошвидкісного ротора магнітної передачі до його низькошвидкісного ротора. Процес приведення полягає у прирівнюванні моментів низько- та високошвидкісного роторів та наступної модифікації інших елементів еквівалентної схеми відповідно до балансу потужностей. Для електромагнітних моментів можна записати наступне співвідношення

$$T_{\text{в}} = T_{\text{н}} = -i \cdot T_{\text{в}} \quad (3.15)$$

де $T_{\text{в}}$ - наведений момент високошвидкісного ротора, Н · м.

Механічна потужність, що передається на високошвидкісний ротор до і після приведення, має бути незмінною, звідки

$$T_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}} = T_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}} \quad (3.16)$$

де $\omega_{\text{в}}$ - наведена кутова швидкість високошвидкісного ротора, рад/с.

Зі співвідношень (3.15) і (3.16) випливає

$$\omega_{\text{в}} = \frac{\omega_{\text{в}}}{i}. \quad (3.17)$$

Значення моментів інерції роторів та коефіцієнтів дисипації потужності при приведенні повинні бути обрані таким чином, щоб задовольнялися енергетичні

співвідношення. Енергія, запасена в обертовому роторі до приведення, повинна дорівнювати її значенню після приведення, отже

$$\frac{J_B \omega_B^2}{2} = \frac{J'_B \omega_B'^2}{2} \quad (3.18)$$

$$J'_B = J_B \cdot \left(\frac{\omega_B}{\omega'_B}\right)^2 = J_B \cdot i^2 \quad (3.19)$$

де J'_B - наведений момент інерції високошвидкісного ротора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Аналогічно для потужностей, що виділяються в дисипативних елементах

$$k_{2B} \cdot \omega_B^2 = k'_{2B} \cdot \omega_B'^2 \quad (3.20)$$

$$k'_{2B} = k_{2B} \cdot \left(\frac{\omega_B}{\omega'_B}\right)^2 = k_{2B} \cdot i^2 \quad (3.21)$$

$$k_{1B} \cdot \omega_B^2 = k'_{1B} \cdot \omega_B'^2 \quad (3.22)$$

$$k'_{1B} = k_{1B} \cdot \frac{\omega_B}{\omega'_B} = k_{1B} \cdot i \quad (3.23)$$

де k'_{1B} - наведений коефіцієнт дисипації потужності за рахунок гістерезису для високошвидкісного ротора, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

k'_{2B} - наведений коефіцієнт дисипації потужності за рахунок індукованих струмів для високошвидкісного ротора, $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$.

Операція приведення дозволяє об'єднати механічні підсистеми високо- та низькошвидкісного роторів в одну еквівалентну схему (рис. 3.9). При цьому в загальній системі змінна типу потоку має значення різниці кутових швидкостей низькошвидкісного ротора і наведеної кутової швидкості високошвидкісного ротора.

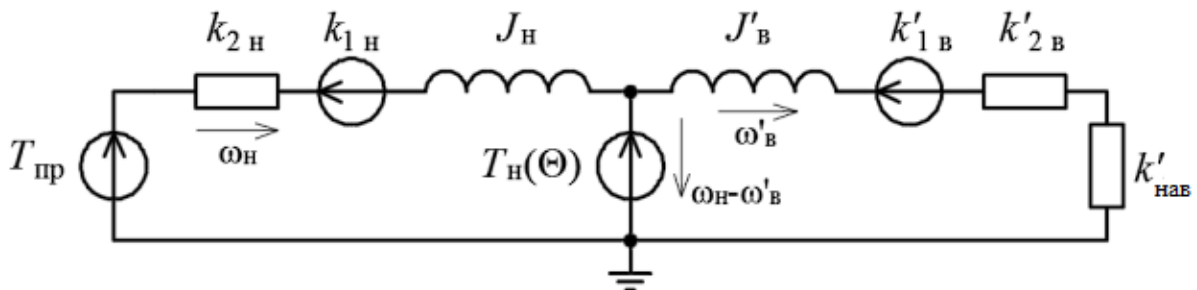


Рисунок 3.9 - Еквівалентна схема механічної підсистеми після приведення високошвидкісного ротора до низькошвидкісного ротора

При припущенні, що амплітуда коливань електромагнітного моменту менша за максимальний момент магнітної передачі, можна лінеаризувати систему, ввівши в неї замість джерела електромагнітного моменту пружний елемент (рис. 3.10) — кутову пружину. Коефіцієнт пружності пружини щодо низькошвидкісного ротора визначається як похідна від навантажувальної характеристики у точці робочого моменту

$$k_y = \left| \frac{dT_{Hmax} \sin \theta}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_p} = T_{Hmax} \cos \theta_p = T_{Hmax} \cos \left(\arcsin \left(\frac{T_p}{T_{Hmax}} \right) \right) = T_{Hmax} \sqrt{1 - \left(\frac{T_p}{T_{Hmax}} \right)^2} = \sqrt{T_{Hmax}^2 - T_p^2} \quad (3.24)$$

де T_p - робочий момент, Н · м;

θ_p - робочий кут навантаження, рад.

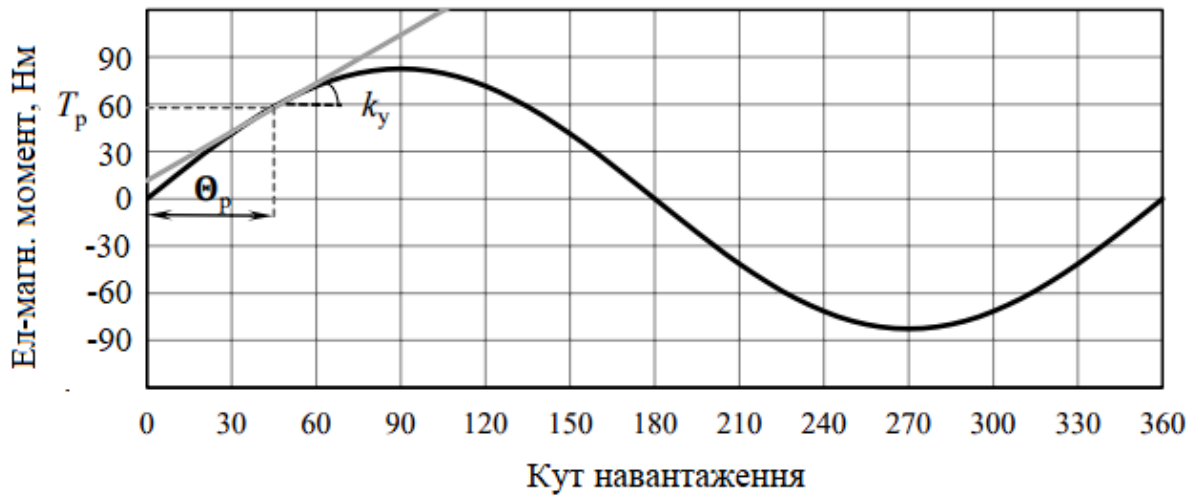


Рисунок 3.10 - Кутова характеристика електромагнітного моменту та її лінеаризація

Враховуючи лінеаризацію навантажувальної характеристики, момент магнітної передачі визначається виразом

$$T_H = k_y \cdot \theta = k_y \cdot p_B (i \cdot \varphi_{\Pi H} - \varphi_{\Pi B}) = k_y \cdot p_B (i \int \omega_H(t) dt - \int \omega_B(t) dt) = k_y \cdot p_B \cdot i \int (\omega_H(t) - \omega'_B(t)) dt. \quad (3.25)$$

Таким чином, джерело моменту загальної системи на рис. 3.9 може бути представлений у вигляді еквівалентного механічного конденсатора (рис. 3.11) ємністю

$$C_M = \frac{1}{k_y \cdot p_B \cdot i} \quad (3.26)$$

Змінна типу потенціалу на механічному конденсаторі визначає електромагнітний момент, що діє на низькошвидкісний і наведений високошвидкісний ротори магнітної системи.

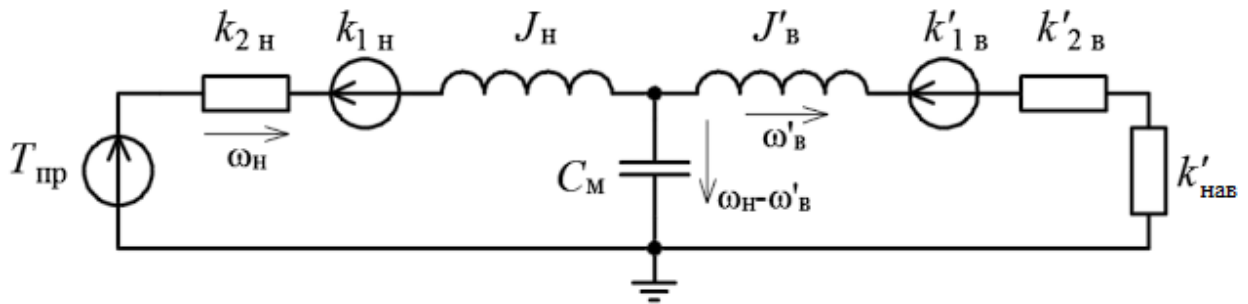


Рисунок 3.11 - Лінеаризована наведена еквівалентна механічна схема магнітної передачі

Як тестовий приклад складена схема лінеаризованої механічної підсистеми магнітної передачі Matlab/Simulink (рис. 3.12). Параметри системи відповідають значенням, що використовуються в п. 3.4. Так як у п. 3.4 розглядалися коливання при робочому моменті 31 Н·м, то для порівняння результатів механічна ємність еквівалентного конденсатора розрахована за формулою (3.26) саме для цього моменту

$$C_M = \frac{1}{p_B \cdot i \cdot \sqrt{T_{нmax}^2 - T_p^2}} = \frac{1}{3 \cdot 8,667 \cdot \sqrt{60^2 - 30^2}} = 7,4 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{м}} \quad (3.27)$$

Результати розрахунку залежності вхідного опору системи від частоти наведено рис. 3.13.

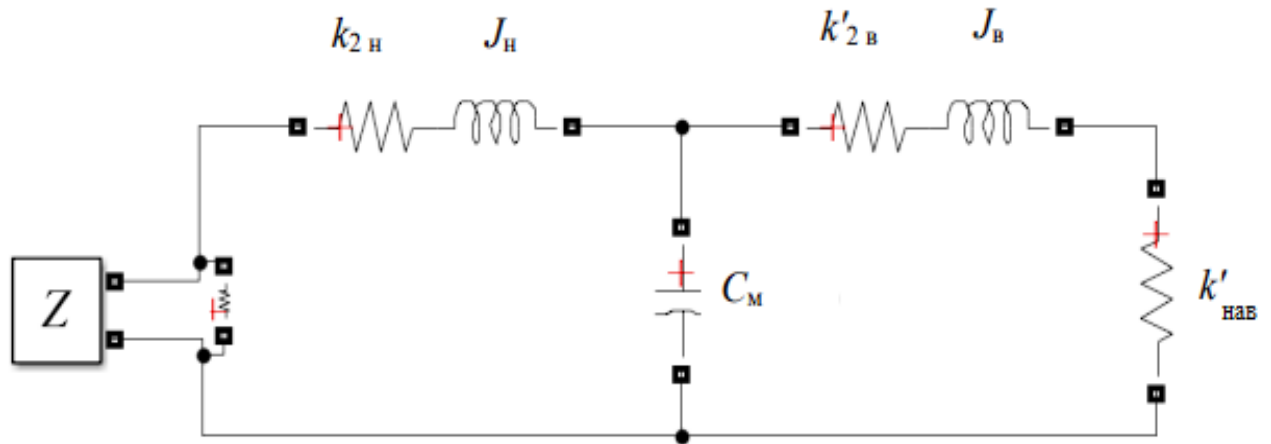


Рисунок 3.12 - Модель визначення власних частот в програмі Matlab/ Simulink

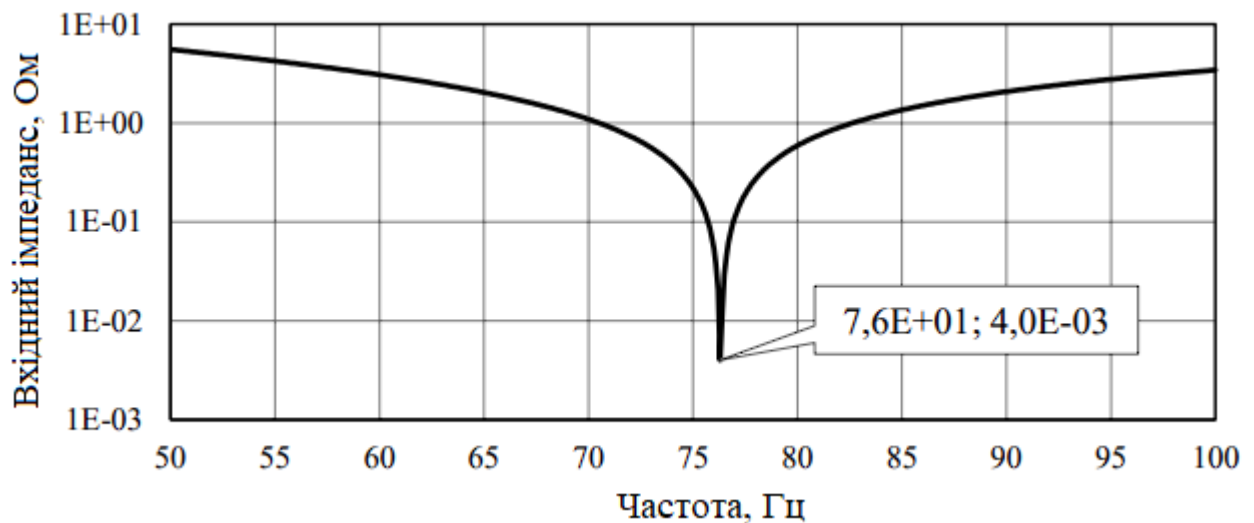


Рисунок 3.12 -ЛАЧХ наведеної механічної підсистеми магнітної передачі

Відповідно до ЛАЧХ системи резонансна частота становила 76,3 Гц. Похибка щодо нелінійної моделі становить 1%. Значення коефіцієнтів дисипації енергії та моментів інерції для низькошвидкісного та високошвидкісного роторів мають значення одного порядку. Однак наведені значення цих величин значно відрізняються один від одного. При передавальному відношенні 8,667 у наведеній механічній підсистемі коефіцієнти дисипації, а також моменти інерції для наведеного високошвидкісного ротора відрізняються на два порядки від відповідних значень низькошвидкісного ротора.

Крім того, у гілки високошвидкісного ротора є навантаження, що ще більше збільшує різницю між повними механічними опорами гілок, що відповідають низькошвидкісному і високошвидкісному роторам. Отже, при оцінці власних частот коливань на перших етапах проектування можна знехтувати гілкою високошвидкісного ротора та скористатися спрощеною еквівалентною схемою (рис. 3.13).

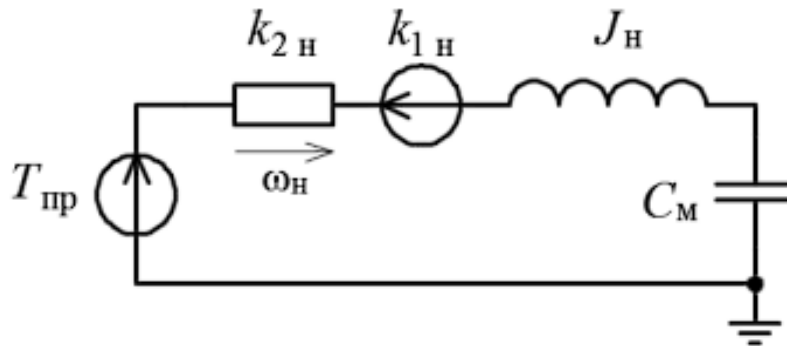


Рисунок 3.13 - Спрощена еквівалентна схема магнітної передачі

Так як моменти роторів магнітної передачі відносяться як передатне відношення, то коливання моментів, що виникають, мають однакову фазу пульсацій. Ці моменти призводять до виникнення коливань частоти обертання, початкові фази яких можуть відрізнятися. Відношення амплітуди пульсацій кутових швидкостей обертання на холостому ході визначається відповідно до виразу

$$\frac{\omega_{нmax}}{\omega_{вmax}} \approx i \quad (3.28)$$

Коефіцієнти втрат потужності та моменти інерції для високо- та низькошвидкісного роторів зазвичай мають близькі значення. На холостому ході амплітуда пульсації кутової швидкості на низькошвидкісному роторі більше приблизно в передавальне число разів, ніж на високошвидкісному роторі. При додаванні навантаження пульсації на внутрішньому роторі ще більше зменшуються, тобто демпфуються навантаженням.

Слід також зазначити, що у зв'язку з тим, що комплексні значення механічних опорів гілок низько- і високошвидкісного роторів різні, початкові фази пульсацій їх

кутових швидкостей також різні, що викликає яскраво виражену мінливість передатного відношення за швидкістю під час перехідного режиму, що необхідно враховувати під час проєктування електромеханічних систем з магнітними передачами.

3.6 Імітаційне моделювання магнітної передачі для автономної вітроустановки

В якості прототипу магнітної передачі використано конструкцію з 26 парами полюсів низькошвидкісного ротора, 3 парами полюсів на високошвидкісному роторі та 29 сегментами магнітного модулятора [19], [20]. Передавальне відношення даної магнітної передачі становить 8,67. Основні конструктивні параметри прототипу магнітної передачі, які використовуються для розробки імітаційної математичної моделі, наведені в табл. 3.1. В конструкції магнітної передачі використовуються секторальні постійні магніти із однорідною намагніченістю в радіальному напрямку, виготовлені зі сплаву NdFeB типу N38UH з залишковою магнітною індукцією 1,26 Т.

Таблиця 3.1 - Основні параметри магнітної передачі

	Основні параметри	Розрахункові значення
1	Кількість пар полюсів швидкохідного ротора	3
2	Кількість пар полюсів тихохідного ротора	26
3	Кількість сталевих сегментів модулятора	29
4	Осьова довжина, мм	80
5	Залишкова магнітна індукція ПМ, Тл	1,26 (N38UH)
6	Передаточне число	8,67
7	Матеріал магнітопроводу статора	2411

8	Матеріал магнітопроводу тихохідного ротора	Samoloy
9	Матеріал магнітопроводу високошвидкісного ротора	Steel 21850
10	Електропровідність постійних магнітів, МСм/м	0,56
11	Електропровідність Samoloy, МСм/м	0,14
12	Висота постійних магнітів, b_{mag} , мм	22
13	Ширина феромагнітних вставок модулятора, мм	12
14	Швидкість обертання внутрішнього (швидкохідного) ротора, об/хв	1735
15	Швидкість обертання зовнішнього (тихохідного) ротора, об/хв	200
16	Ширина повітряного проміжку, мм	4

Надалі робота магнітної передачі розглядається в режимі мультиплікатора, тобто до низькошвидкісного ротора прикладено момент від приводу, а до високошвидкісного ротора – момент навантаження. Однак усі наведені нижче міркування справедливі й для режиму редуктора. Таким чином, у загальному вигляді рівняння, що описують рух низько- та високошвидкісних роторів, записуються згідно з другим законом Ньютона як

$$\begin{cases} J_e \frac{d\omega_e}{dt} = T_t - T_e - T_{le}, \\ J_i \frac{d\omega_i}{dt} = T_i - T_{li} - T_l, \end{cases} \quad (3.29)$$

де J_e, J_i – моменти інерції низько-і високошвидкісних роторів, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

ω_e, ω_i – кутові швидкості низько-і високошвидкісних роторів, рад/с ;

T_t – момент привідного рушія (ротора вітроустановки), $\text{Н} \cdot \text{м}$;

T_i – електромагнітний момент високошвидкісного ротора, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

T_e – електромагнітний момент низькошвидкісного ротора, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

T_{le} – момент втрат низькошвидкісного ротора, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

T_{li} – момент втрат високошвидкісного ротора, Н·м;

T_l – момент навантаження генератора із постійними магнітами, Н·м.

Якщо припустити, що момент навантаження визначено параметрами вітрової турбіни, то в системі рівнянь (3.29) невідомими змінними є ω_e , ω_i , T_i , T_e , T_{le} , T_{li} . Таким чином, для вирішення (3.29) необхідно додати чотири додаткові рівняння. Перші два додаткові рівняння до системи (3.29) відображають залежність моментів втрат від швидкості обертання роторів

$$\begin{cases} T_{le} = k_{2e} \cdot \omega_e + k_{1e}, \\ T_{li} = k_{2i} \cdot \omega_i + k_{1i}, \end{cases} \quad (3.30)$$

де k_{2e} , k_{2i} – коефіцієнти втрат потужності, викликані втратами від вихрових струмів в магнітному осерді низько- та високошвидкісного роторів;

k_{1e} , k_{1i} – коефіцієнти втрат потужності, викликані втратами на гістерезис в магнітному осерді низько- та високошвидкісного роторів.

Відношення електромагнітних моментів, що діють на низько- та високошвидкісної ротори магнітної системи, зберігається постійним і рівним передавальному відношенню, звідки впливає третє додаткове рівняння до системи (3.29)

$$\frac{T_e}{T_i} = -i. \quad (3.31)$$

У повітряних проміжках магнітної передачі магнітне поле має складний характер розподілу та має велику кількість гармонійних складових, серед яких виділяється робоча гармоніка, яка бере участь у передачі потужності. Кут повороту магнітного поля, що збуджується системою ротор – модулятор для низькошвидкісного ротора у внутрішньому немагнітному проміжку можна записати наступним чином

$$\varphi_e = p_e \cdot i \int \omega_e(t) dt. \quad (3.32)$$

Вираз (3.32) справедливий для будь-якої гармоніки, що обертається в немагнітному проміжку магнітної передачі. Очевидно, що для передачі основного крутного моменту інтерес представляє перша, або основна гармоніка магнітного потоку.

Кут повороту поля високошвидкісного ротора у внутрішньому немагнітному повітряному проміжку

$$\varphi_i = p_i \cdot i \int \omega_i(t) dt. \quad (3.33)$$

Знаючи залежність кутів повороту від часу для обох роторів магнітного редуктора (3.32), (3.33) можливо визначити кут навантаження (кут між магнітними полями) у кожен момент часу

$$\theta = \varphi_e - \varphi_i = p_i \cdot (i \int \omega_e(t) dt - \int \omega_i(t) dt). \quad (3.33)$$

Оскільки магнітна передача працює в режимі мультиплікатора, то момент, що діє на низькошвидкісний ротор, буде гальмівним. Залежність моменту від кута навантаження представлена наступним виразом

$$T_e = -T_{emax} \sin \theta, \quad (3.34)$$

де T_{emax} – максимальний електромагнітний момент низькошвидкісного ротора.

Спільно (3.34) і (3.35) утворюють додаткове четверте рівняння для системи (3.29). Таким чином, повна система рівнянь, що описує динаміку роботи магнітної передачі, має такий вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} J_e \frac{d\omega_e}{dt} = T_t - T_e - k_{2e} \cdot \omega_e - k_{1e}, \\ J_i \frac{d\omega_i}{dt} = T_i - k_{2i} \cdot \omega_i - k_{1i} - T_l, \\ \frac{T_e}{T_i} = -i, \\ T_e = -T_{emax} \sin \theta, \\ \theta = p_i \cdot (i \int \omega_e(t) dt - \int \omega_i(t) dt). \end{array} \right. \quad (3.36)$$

Рішення нелінійної системи рівнянь проводиться у програмному середовищі Matlab-Simulink. Еквівалентна схема магнітної передачі побудована за та таким принципом, що механічні та електромагнітні моменти в системі є фазовими змінними типу потоку, а частоти обертання – типу потенціалу. Структура розробленої моделі магнітної передачі показана на Рис. 3.14.

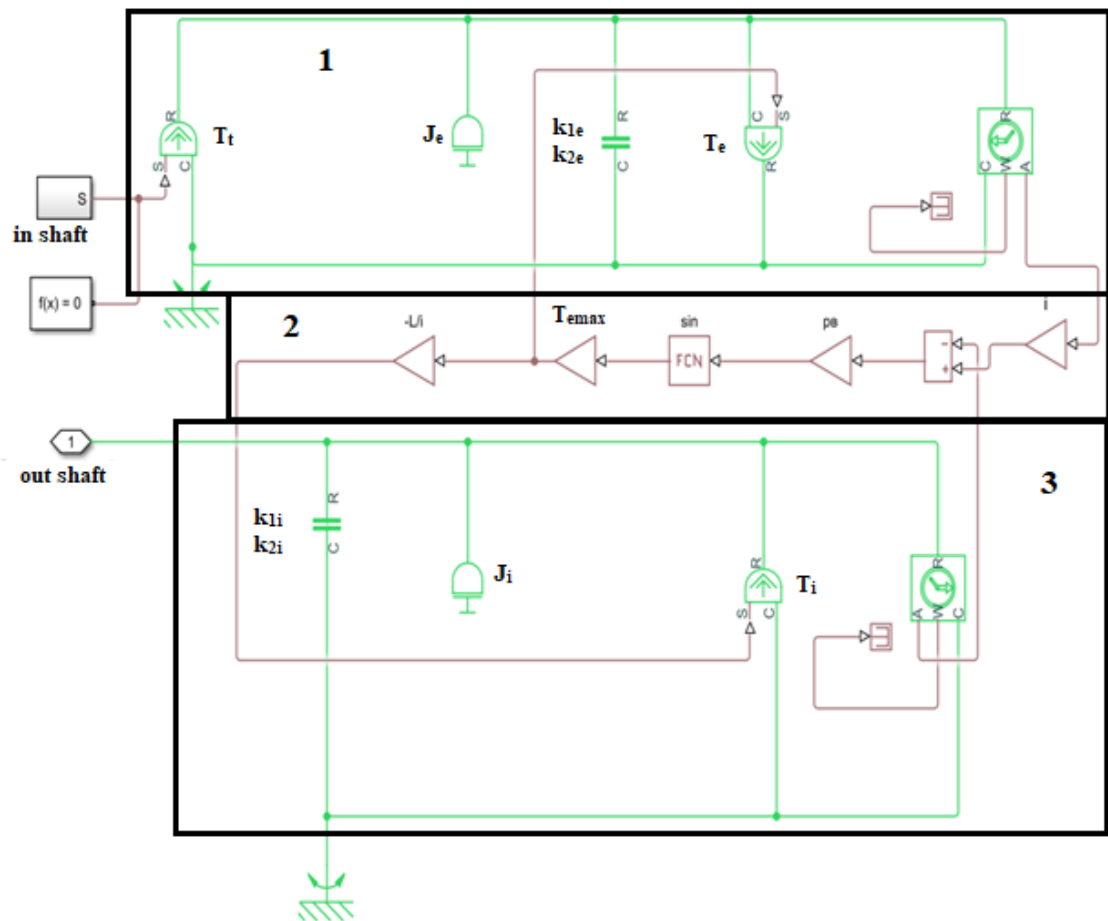


Рисунок 3.14 - Модель магнітної передачі в Matlab/Simulink.

Структурно, модель на рис. 3.14 складається із 3-х блоків, які відповідають за: 1 – низькошвидкісний ротор магнітної передачі; 2 – магнітний зв'язок між роторами магнітної передачі, тобто модулятор магнітного потоку; 3 – високошвидкісний ротор. Основні складові розробленої моделі: моменти інерції роторів J_i , J_e представлені за допомогою відповідних блоків; втрати на гістерезис та вихрові струми в сталевих елементах конструкції магнітної передачі k_{2e} , k_{2i} , k_{1e} , k_{1i} представлені блоками, які містять імітацію втрат в магнітному осерді.

Навантаження в подальшому моделюється приєднанням до вихідного, високошвидкісного валу, генератора із постійними магнітами. Зв'язок механічних підсистем низько- та високошвидкісного роторів магнітної передачі реалізована шляхом додавання співвідношення між електромагнітними моментами T_i , T_e , що діють на кожен

із роторів (блок 2, Рис. 3.14).

Розробка імітаційної моделі системи, яка включає в себе ротор вітрової установки – магнітну передачу – електроджерела електричної енергії, виконана за допомогою засобів програмного пакету MATLAB/Simulink. У цьому пакеті доступні математичні моделі ротора вітрової установки, навантаження, вимірювальних приладів і т.ін. В даній роботі для розробки імітаційної моделі використовується модель синхронної машини з постійними магнітами. Блок електроджерела електричної енергії дозволяє моделювати як генераторний, так і режим роботи двигуна. Електрична та механічна складові джерела електричної енергії описані алгебраїчними та диференціальними рівняннями. При розробці математичної моделі машини з постійними магнітами, зроблено наступні припущення: повітряний проміжок є рівномірним, обмотка статора розподілена рівномірно. Загальна система рівнянь включає опис роботи синхронної машини із постійними магнітами в системі координат d-q

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} V_d - \frac{R_1}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} V_q - \frac{R_1}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\Phi p \omega_r}{L_q} \\ T_{em} = 1.5p [\Phi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \end{cases} \quad (3.37)$$

де L_q, L_d – індуктивності обмотки якоря по осям d, q; R_1 – активний опір обмотки статора; i_q, i_d – складові струму обмотки якоря джерела електричної енергії по осям d, q; V_q, V_d – складові напруги обмотки якоря по осям d, q; ω_r – кутова швидкість ротора; Φ – амплітуда магнітного потоку, створена постійними магнітами на роторі, що індукуює ЕРС в обмотці якоря джерела електричної енергії а; p – кількість пар полюсів джерела електричної енергії; T_{em} – електромагнітний момент джерела електричної енергії.

Положення ротора впливає на величину індуктивностей L_q та L_d . Ці величини визначаються фазною індуктивністю. Наприклад, індуктивність між фазами a та b може бути описана наступним виразом

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos \left(2\theta_e + \frac{\pi}{3} \right) \quad (3.38)$$

де θ_e – електричний кут положення ротора джерела електричної енергії.

Ротор вітрової турбіни є джерелом механічного моменту для низькошвидкісного валу магнітної передачі. Вважається, що жорсткість приводу вітрової турбіни нескінченна, а коефіцієнт тертя і інерція турбіни узгоджуються та реалізуються з відповідними коефіцієнтами, що приєднується до турбіни. Вихідна потужність на валу ротора вітроустановки задається наступним рівнянням [21]

$$P_t = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_w^3, \quad (3.39)$$

де P_m – вихідна механічна потужність ротора вітроустановки (Вт);

c_p – коефіцієнт корисної дії вітрової турбіни;

ρ – густина повітря (кг/м³);

A – площа ротора вітрової турбіни;

v_w – швидкість вітру (м/с);

λ – коефіцієнт відношення швидкості обертання турбіни до швидкості вітру;

β – кут нахилу лопаті.

Вхідними параметрами вітрової турбіни в середовищі, що визначаються в імітаційній моделі MATLAB-Simulink є:

- номінальна вихідна механічна потужність на валу ротора вітроустановки;
- номінальна потужність електроджерела електричної енергії (ВА). Даний параметр використовується для розрахунку вихідного номінального моменту;
- номінальна швидкість вітру (м/с) використовується в системі в.о. задається значення очікуваної (середньої) величини швидкості вітру для заданого регіону або швидкість, зав якої розвивається номінальна потужність вітроустановки;
- максимальна потужність при базовій швидкості вітру;
- базова швидкість вітру;
- кут атаки лопатей вітрової турбіни.

На основі імітаційної моделі магнітної передачі розроблено чисельну математичну модель магнітної передачі у складі автономної вітроустановки малої потужності, що працює на генератор із постійними магнітами. Вигляд розробленої моделі в програмному

пакеті MATLAB/Simulink показано на Рис.3.15.

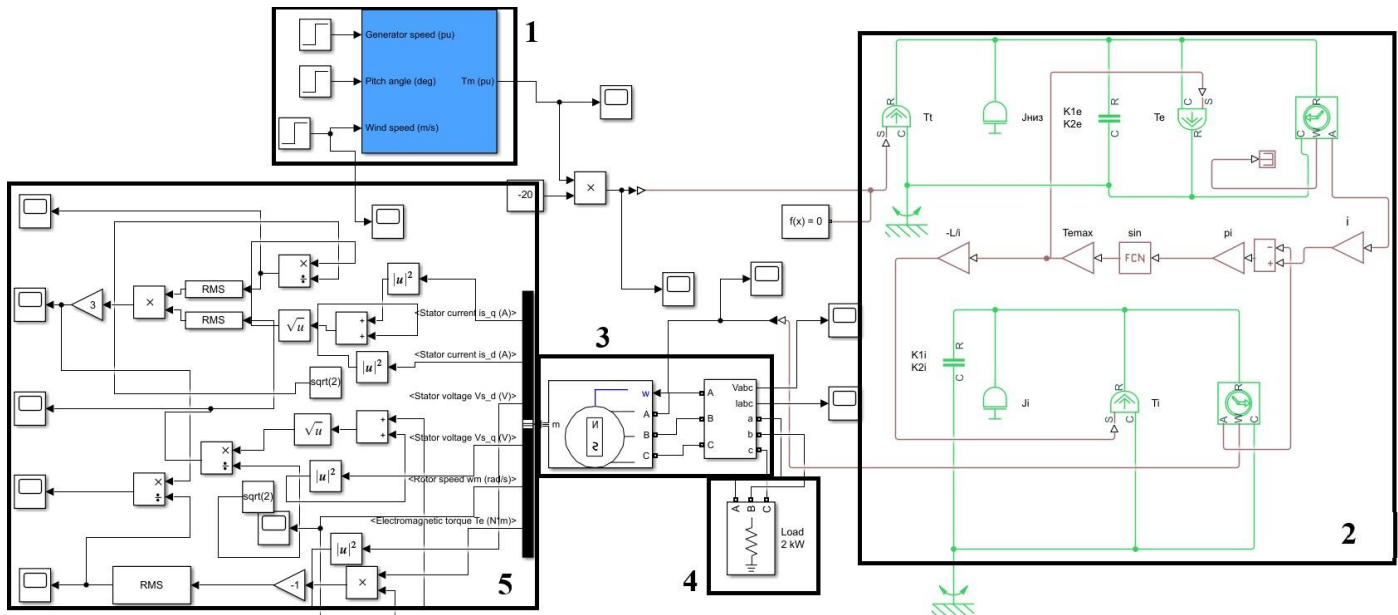


Рисунок 3.15 - Імітаційна модель вітроелектричної установки із магнітною передачею.

На рис. 3.15 показано: 1 – блок ротора вітроустановки з заданими параметрами лопаті NASA 40 та генератором випадкових чисел, який імітує зміну швидкості вітру в межах 3-8 м/с. Робота блока відбувається відповідно до (3.36); 2 – блок, який реалізує нелінійні диференційні рівняння (3.37) магнітної передачі; 3 – блок параметрів електроджерела електричної енергії із постійними магнітами, що реалізує систему диференційних рівнянь (3.36) та (3.37); 4 – блок, в якому реалізоване навантаження джерела електричної енергії а у вигляді трифазного навантаження; 5 – блок виміру, контролю, запису та обробки вихідних параметрів електроджерела електричної енергії, навантаження та механічних параметрів системи.

Тобто, кожен із елементів імітаційної моделі в середовищі представлено окремим блоком, який в свою чергу, описується системою нелінійних (лінеаризованих) диференційних рівнянь. Наприклад, блок-схема ротора вітроустановки в системі MATLAB-Simulink має 3 логічних входи та один вихід, вихідною величиною моделі вітрової турбіни є величина механічного моменту, що на пряму прикладається до валу

досліджуваного джерела електричної енергії.

Особливістю розробленої моделі є те, що при зміні навантаження електроджерела електричної енергії (блок 4, Рис. 3.15), змінюється електромагнітний момент джерела електричної енергії (блок 3, Рис. 3.15), що призводить до зміни робочої точки на механічній характеристиці ротора вітроустановки, що є важливою особливістю розробленої моделі. І навпаки, при зміні параметрів вітру змінюються вихідні параметри джерела електричної енергії: його вихідна потужність P_1 , напруга U_1 , струм I_1 та електромагнітний момент джерела електричної енергії T_{em} .

При роботі магнітної передачі виникають різні зміни як приводного моменту так і навантаження. Це призводить до зміни кута навантаження θ та викликає коливальний процес роторів. Для моделювання процесів, що відбуваються при різкій зміні моменту приводу (наприклад, при різких поривах вітру), в математичній моделі магнітної передачі до тихохідного валу прикладений момент, що змінюється в часі відповідно до показаної на Рис. 3.16 функції.

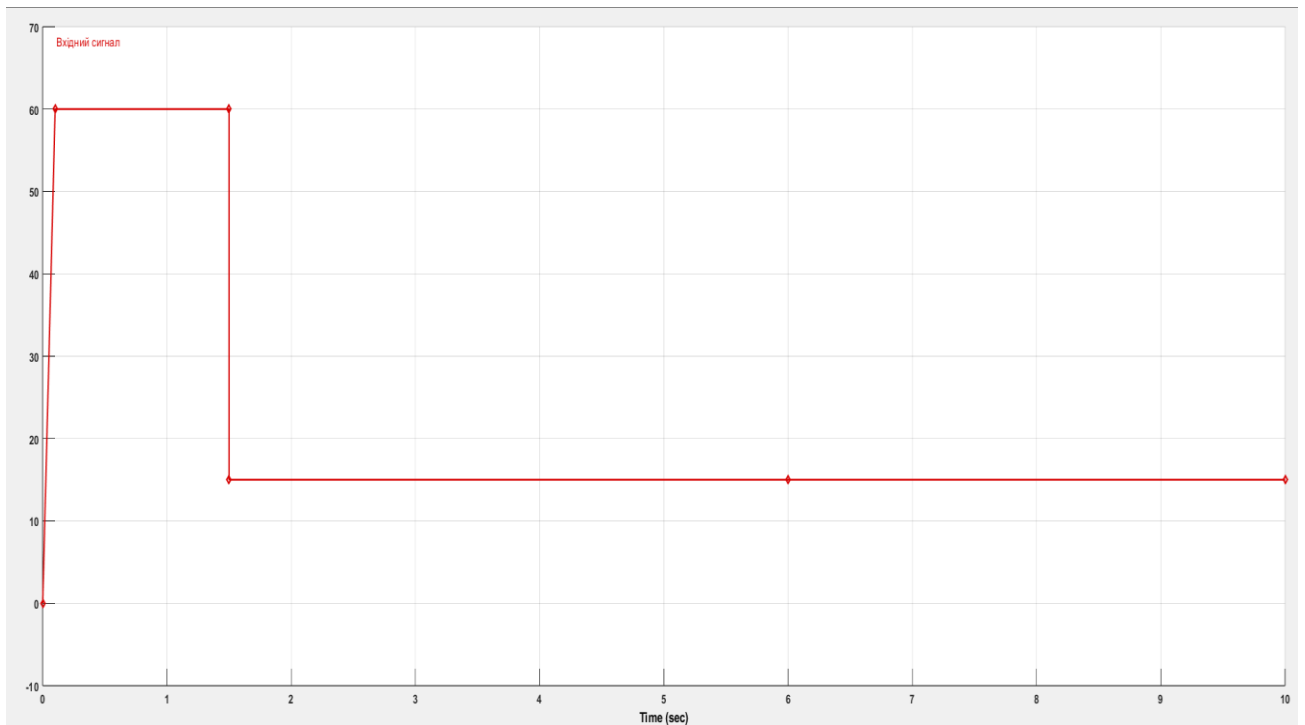


Рисунок 3.16 - Залежність моменту приводу від часу.

Момент збільшується від нульового значення до номінального за 0,1 с. Далі момент має постійне значення, яке зберігається до моменту часу 1,5 с. За цей час частота обертання роторів досягає встановленого значення. Під впливом привідного моменту вітрової турбіни обидва ротори починають обертатися в протилежних напрямках, відповідно до принципу дії планетарної коаксіальної магнітної передачі. У час 1,5 з відбувається скидання приводного моменту на 50 %, що викликає пульсації швидкості обертання та електромагнітного моменту роторів (Рис. 3.17).

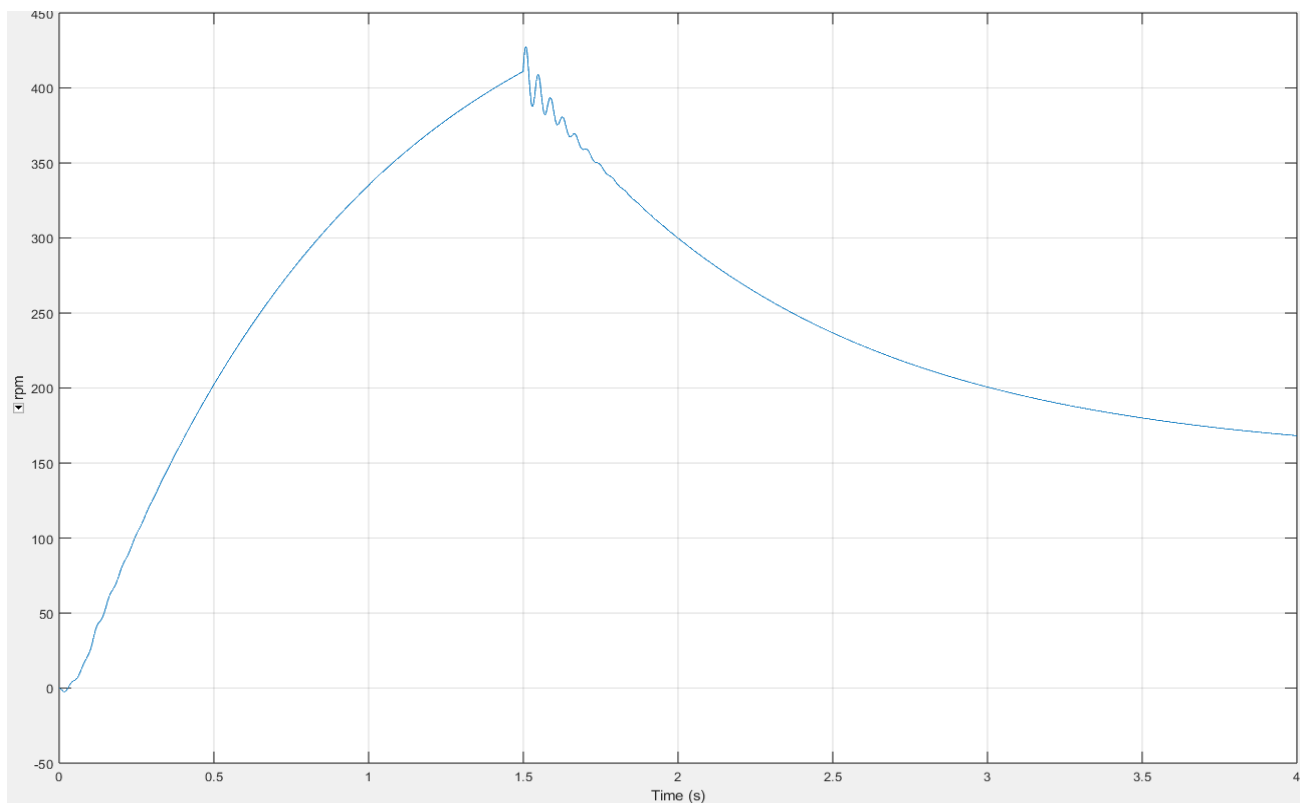


Рисунок 3.17 - Розрахункові залежності швидкості обертання для низькошвидкісного ротора.

Частоти коливань, що виникають в обох роторах однакові, при цьому їх амплітуда на високошвидкісному роторі набагато менше, ніж на низькошвидкісному (Рис. 3.18). У спектрі частот коливань також присутні субгармоніки, пов'язані з нелінійністю кутової характеристики електромагнітного моменту, але їхня амплітуда мала порівняно з амплітудою основної гармоніки.

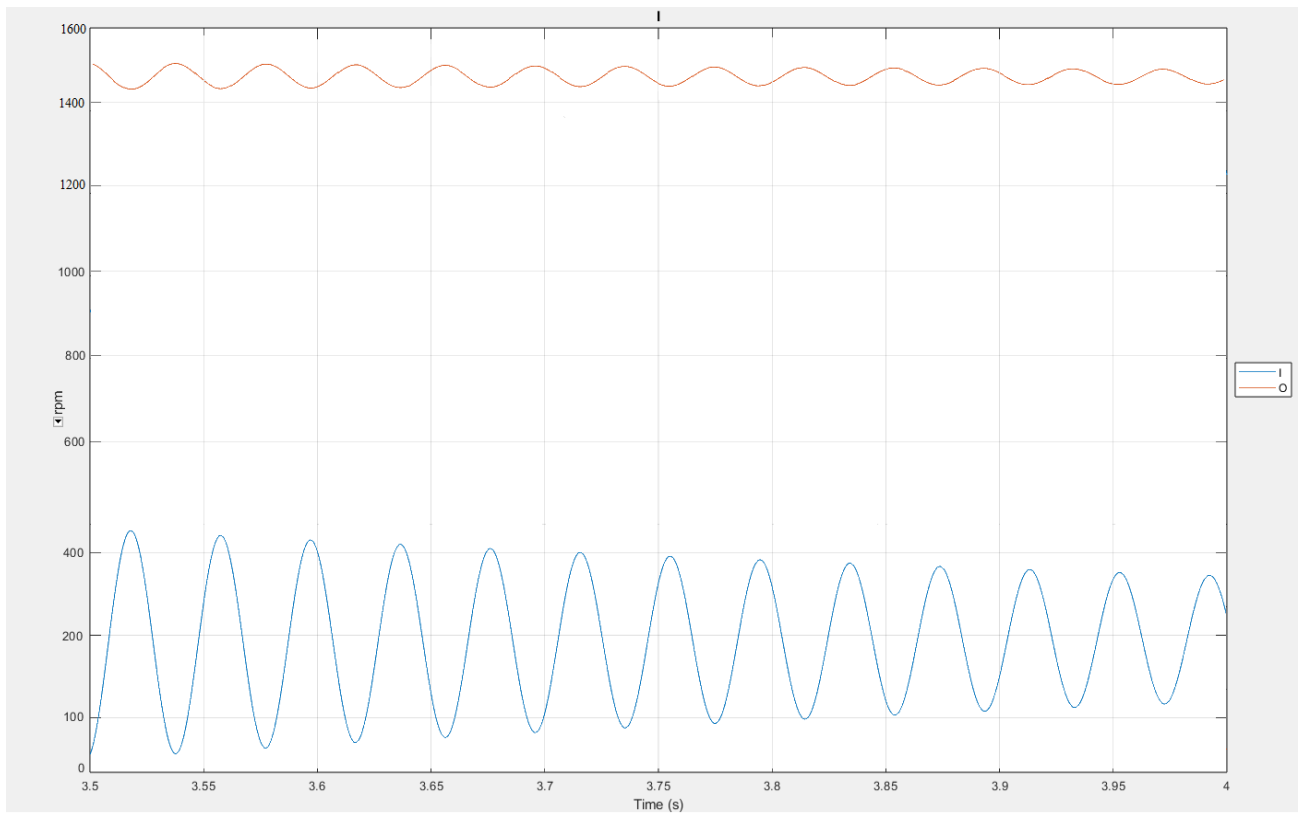
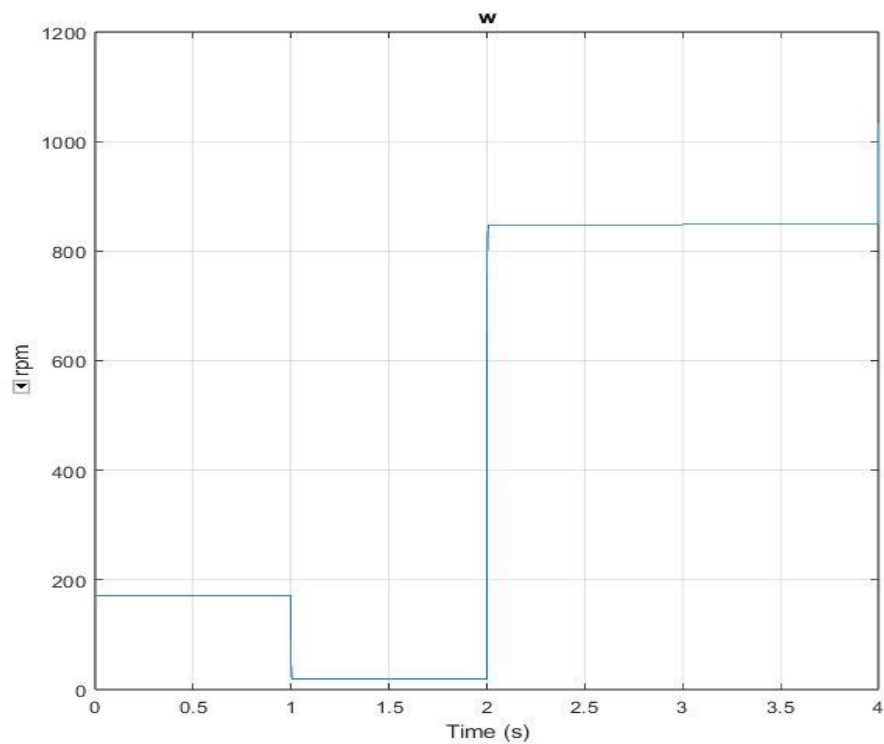


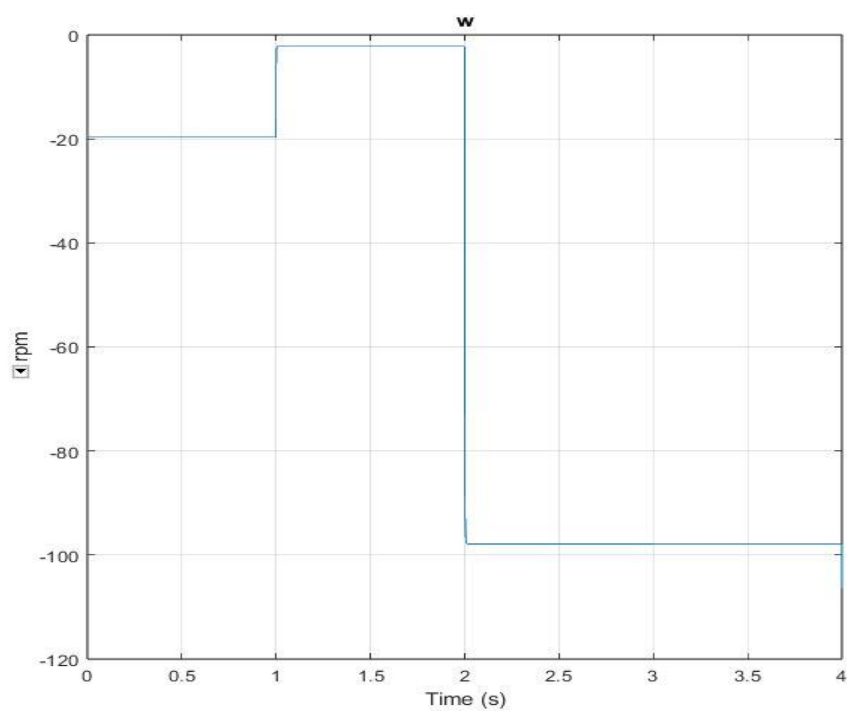
Рисунок 3.18 - Розрахункові пульсації швидкості на проміжку часу від 3,5 до 4 с: 1 – низькошвидкісний ротор, 0 – високошвидкісний ротор

Наявність пульсацій електромагнітного моменту (Рис. 3.18) магнітної передачі та їх врахування в розробленій чисельній імітаційній моделі є ще однією характерною особливістю розробленої системи магнітної передачі, що відрізняє її від відомих аналогів.

При змінній швидкості вітру змінюються і відповідні параметри магнітної передачі та вихідні параметри електроджерела електричної енергії. На рис. 3.19 показано зміну швидкості обертання низькошвидкісного та високошвидкісного ротора магнітної передачі.



а)

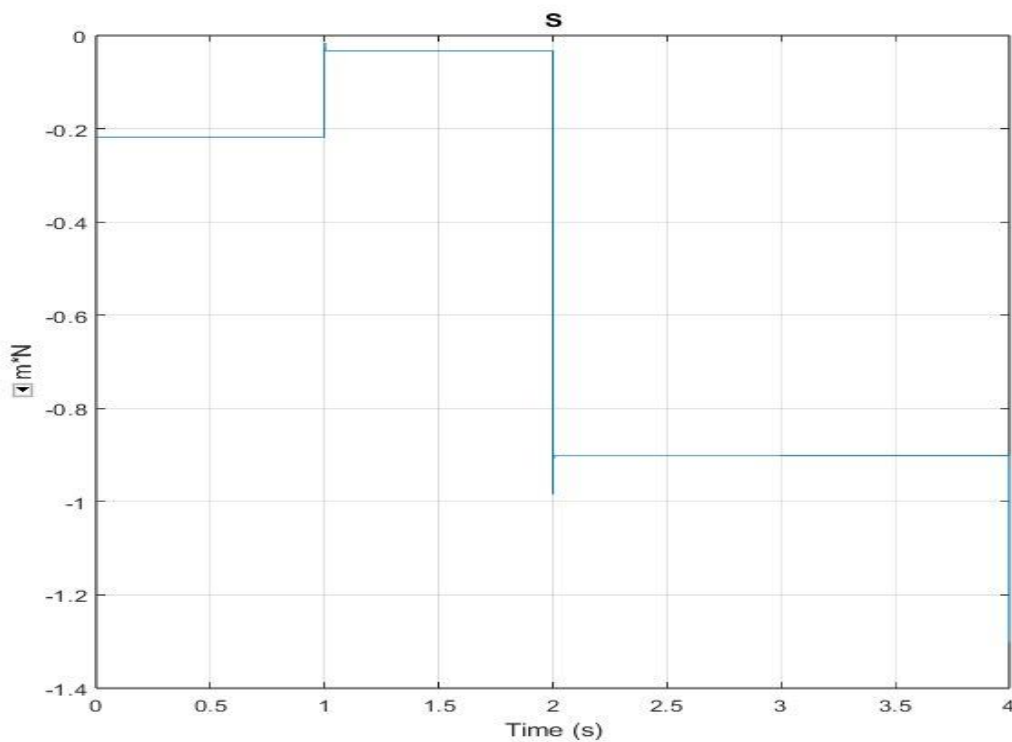


б)

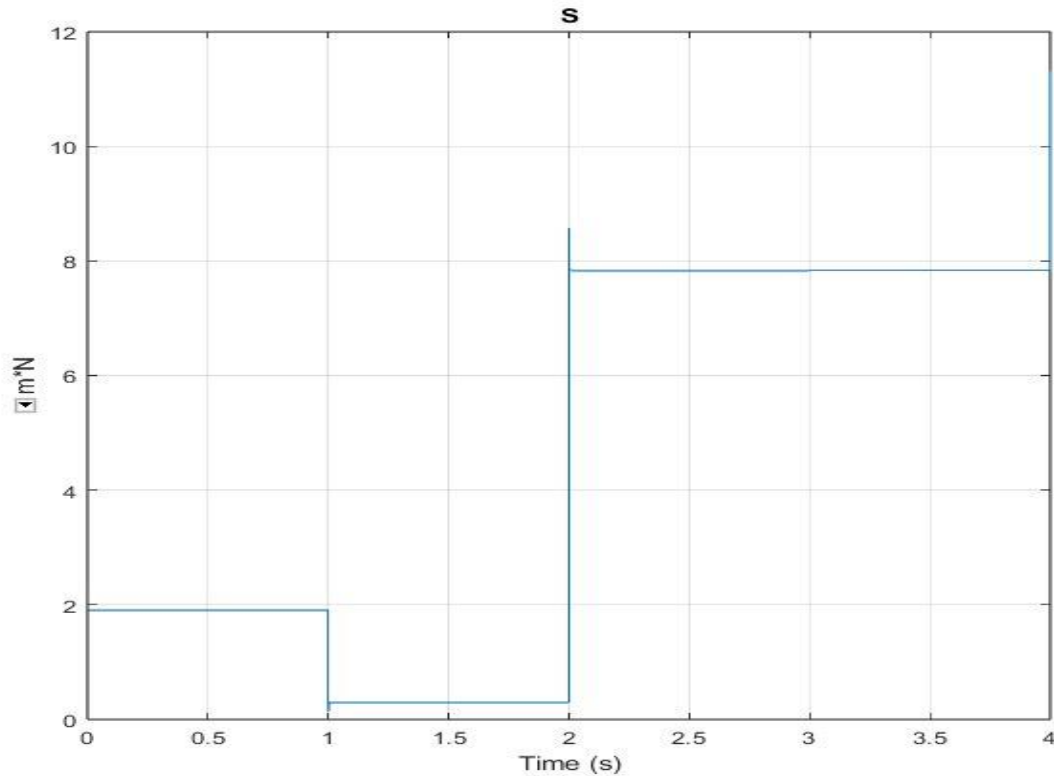
Рисунок 3.19 - Зміна швидкості обертання при зміні швидкості вітру: а) – високошвидкісного ротора; б) – низькошвидкісного ротора

Зона від 0-1 с на рис. 6, відповідає швидкості вітру 4,4 м/с, при цьому швидкість обертання ротора вітроустановки і низькошвидкісного ротора магнітної передачі становить 21 об/хв. При цьому швидкість обертання високошвидкісного ротора (вихідного ротора) становить 183 об/хв, що відповідає коефіцієнту редукції 8,7. Що корелюється із даними, вказаними у табл. 1.

При зміні швидкості вітру та навантаження джерела електричної енергії із постійними магнітами змінюється пропорційно величина електромагнітного моменту магнітної передачі, що показано на рис. 3.20.



a)



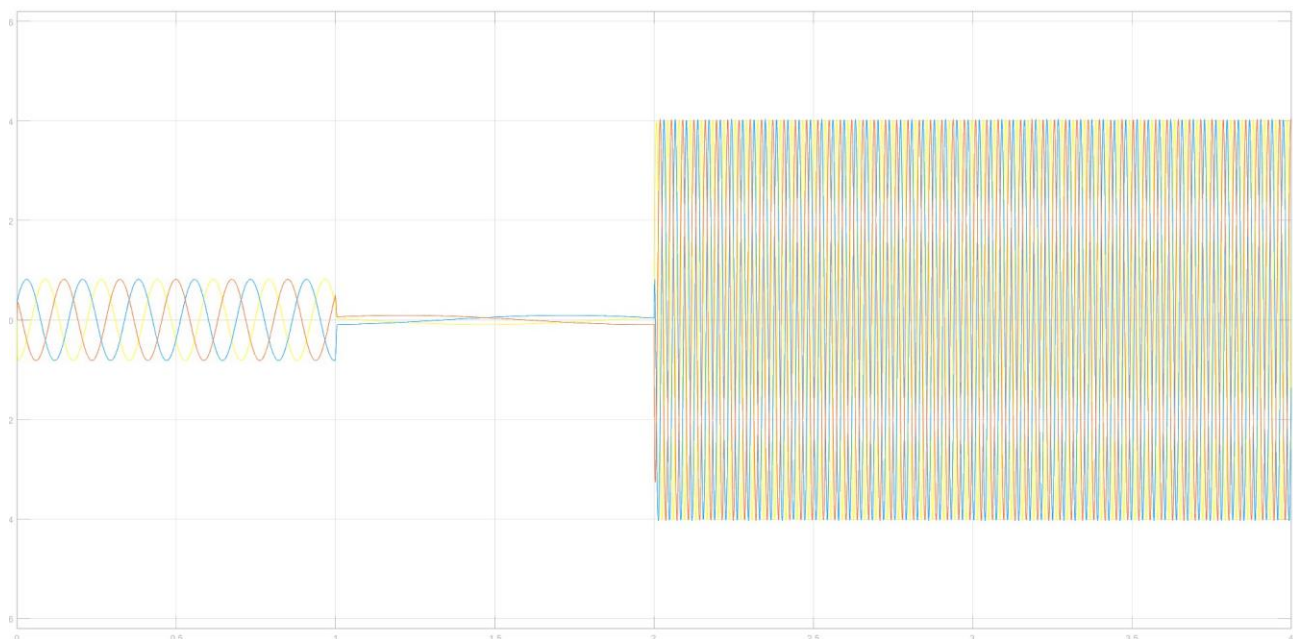
б)

Рисунок 3.20 - Залежність електромагнітного моменту магнітної передачі для: а) високошвидкісного ротора, б) низькошвидкісного ротора.

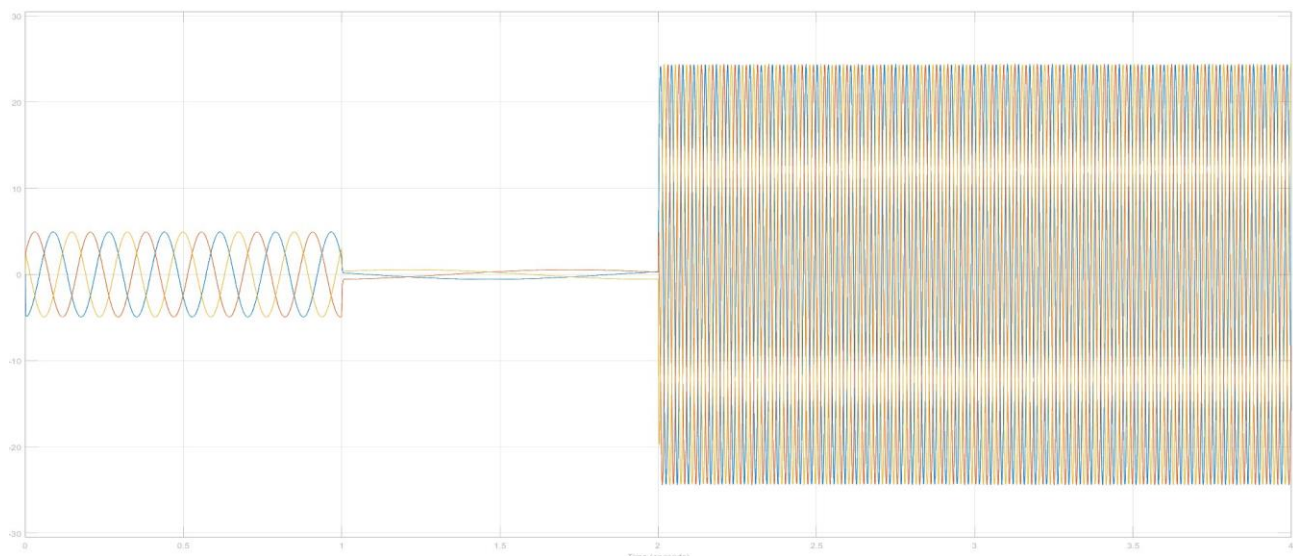
Очевидно, що момент високошвидкісного ротора менший моменту низькошвидкісного ротора. Наприклад для діапазону часу 2 - 4 с, при швидкості вітру 7,8 м/с момент високошвидкісного ротора становить – 0,91 Н·м, тоді як момент низькошвидкісного ротора має величину 7,8 Н·м, що відповідає передавальному коефіцієнту 8,6. Варто відмітити, що коефіцієнт трансформації в даному випадку відрізняється від отриманого вище значення, оскільки в моделі враховано втрати в магнітному осерді магнітної передачі та механічні втрати. Оскільки низькошвидкісний ротор є привідним, то він створює гальмівний момент і має знак «+», а на високошвидкісний ротор діє генераторний момент, тому він має знак «–».

При зміні швидкості вітру змінюються і вихідні параметри синхронного джерела

електричної енергії із постійними магнітами. Зміну миттєвих значень фазної напруги та струму при зміні швидкості вітру на затискачах джерела електричної енергії показано на рис. 3.21.



а)



б)

Рисунок 3.21 - Миттєві значення: а) струму, б) напруги на виході джерела електричної енергії із постійними магнітами

При швидкості вітру 4,4 м/с (в момент часу 0-1 с) амплітудне значення струму в

фазі обмотки якоря синхронного джерела електричної енергії становить 0,82 А, амплітудне значення напруги в цей же момент часу – 5,2 В. При зміні швидкості вітру, відповідно змінюється і величина напруги, струму та потужності на виході електроджерела електричної енергії, а також спостерігається зміна частоти, що відповідає реальним фізичним процесам і свідчить про адекватність розробленої імітаційної моделі.

На рис. 3.22 показано зміну миттєвого значення потужності в фазах джерела електричної енергії при зміні швидкості вітру.



Рисунок 3.22 - Миттєве значення потужності кожної фази джерела електричної енергії

Видно, що при слабкому вітру < 3 м/с діюче значення вихідної потужності становить ≈ 0 Вт. Більшість із корисної потужності, яку розвиває ротор вітроустановки в такому випадку іде на покриття механічних та електричних втрат в магнітній передачі та електроджерелі електричної енергії.

Розроблена модель має широкі функціональні можливості для аналізу вихідних параметрів як електроджерела електричної енергії так і магнітної передачі, що працює у складі автономної вітроелектричної установки. Наприклад на рис. 3.23 показано

розрахункове значення ККД, джерела електричної енергії із постійними магнітами, що використовується в рамках даного імітаційного моделювання.



Рисунок 3.23 – Миттєве ККД джерела електричної енергії при навантаженні

ККД на рис. 3.23 отримано при активному навантаженні джерела електричної енергії 2,0 кВт і становить $\approx 75\%$, при зменшенні величини активного навантаження (наприклад при 1,0 кВт), розрахункове значення ККД становить 81,3 %. Це відповідає тенденціям та загальній теорії електромеханічних перетворювачів енергії.

При роботі магнітної передачі виникають такі режими роботи, при яких момент приводу або навантаження перевищує максимальне значення електромагнітного моменту. Такі режими властиві різким поривам вітру (> 12 м/с) або аварійним режимам роботи електроджерела електричної енергії : раптове коротке замикання, перевантаження, різкий накид навантаження і т.ін. У такому режимі спостерігається проковзування магнітної передачі («зрив»), у результаті якого припиняється передача потужності між роторами. Даний режим аналогічний режиму випадання із синхронізму синхронної електричної машини.

Випадання магнітної передачі із синхронізму не розглядається як недолік при використанні у складі автономної вітроелектричної установки. Оскільки такий ефект дозволяє зберегти механічну частину вітроустановки та сприяє згладжуванню різких

механічних коливань. Подібні явища при використанні механічних мультиплікаторів призвели б до аварійної зупинки установки або взагалі виходу її з ладу.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено чисельну імітаційну математичну модель магнітної передачі, що працює у складі з автономною вітроелектричною установкою з джерелом електричної енергії із постійними магнітами. Використання магнітної передачі для автономних вітроелектричних систем дозволяє підвищити надійність роботи таких установок, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність їх роботи. В аварійних режимах роботи використання магнітної передачі дозволяє уникнути руйнувань або аварійних зупинок роботи електрообладнання.

2. Розроблена імітаційна модель магнітної передачі враховує пульсації електромагнітного моменту через дискретну структуру магнітної передачі та зміну параметрів моделі при зміні вхідного моменту: пульсацій, втрат в магнітному осерді та постійних магнітах, зміну кута навантаження та передавального електромагнітного моменту. Особливістю розробленої моделі системи магнітної передачі є те, що зміна навантаження електроджерела електричної енергії призводить до зміни робочої точки на механічній характеристиці ротора вітроустановки. І навпаки, при зміні параметрів вітру змінюються вихідні параметри джерела електричної енергії : потужність, напруга, струм та електромагнітний момент.

3. За допомогою розробленої моделі можливо досліджено параметри та характеристики не лише магнітної передачі, а і інших складових системи: електроджерела електричної енергії, вітрової турбіни, навантаження і т.ін., що підвищує варіативність та можливості для проведення наукових досліджень пошукового характеру.

4. В якості альтернативи динамічній моделі, що є незручна для використання на початкових етапах проєктування з метою первинної оцінки параметрів коливань запропоновано концепцію лінеаризованої динамічної моделі, в якій співвідношення між моментом і кутом навантаження представлене несинусоїдальною функцією, а її лінійною апроксимацією в області робочого моменту.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗРАЗКА МАГНІТНОЇ ПЕРЕДАЧІ

4.1 Загальний опис конструкції експериментального зразка

Експериментальний зразок магнітної передачі розроблено в рамках виконання дисертаційного дослідження з подальшим виготовленням і монтажем в спеціалізованій лабораторії кафедри електромеханіки. Основні параметри та геометричні дані експериментального зразка магнітної передачі зведені в табл. 4.1. У зв'язку з високою вартістю розробки реального макетного зразка (в металі) магнітної передачі, в даному розділі показано результати дослідження магнітної передачі, виготовлено з використанням технології тривимірного друку, а з метою заощадження матеріально-технічних ресурсів всі немагнітопровідні елементи магнітної передачі виготовлені з ABS пластику із пропорційним зменшенням масштабу відносно прототипу, дані якого неведені в розділі 2.

Таблиця 4.1 - Основні розрахункові параметри експериментального зразка магнітного редуктора

Основні параметри	Розрахункові значення	Дані прототипу
Максимальний електромагнітний момент, Нм	66	0,137
Аксіальна довжина, мм	80	30
Передавальне відношення	8,667	8,73

Загальний вигляд експериментального зразку магнітної передачі представлений на рис. 4.1.

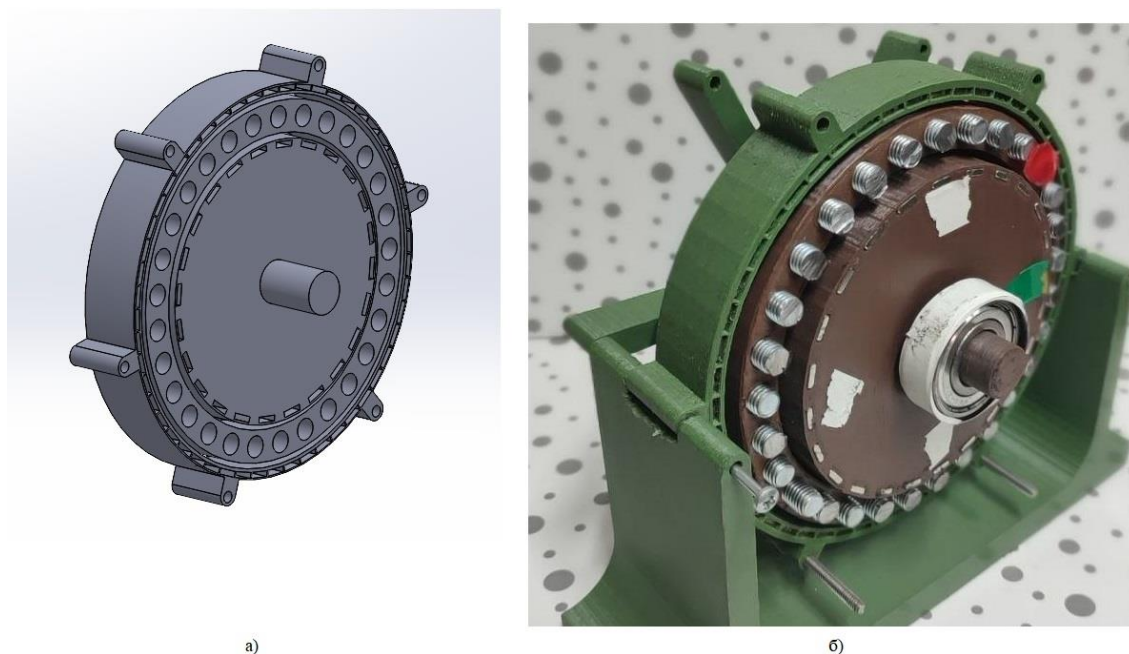


Рисунок 4.1 – Експериментальний зразок магнітної передачі :
а – 3D модель ; б – загальний вигляд

На першому етапі створено модель експериментального зразку магнітної передачі в пакеті програм 3D моделювання SolidWorks. Конструктивно магнітна передача складається з 3 основних частин, які показано на рис. 4.2, а саме 2 – зовнішній ротор, 3 – внутрішній ротор, 4 – модулятор, та 1 – постійні магніти, які використовувалися в експериментальному зразку. Основні конструктивні складові показано на рис. 4.2. На другому етапі за допомогою 3д принтеру ANYCUBIC 4MAX FORMAX PRO проведено друк всіх комплектуючих. На третьому етапі проведено монтаж магнітів у свої пази та подальший збір магнітної передачі в єдиний магнітоелектричний модуль.



Рисунок 4.2 - Основні конструктивні складові магнітної передачі

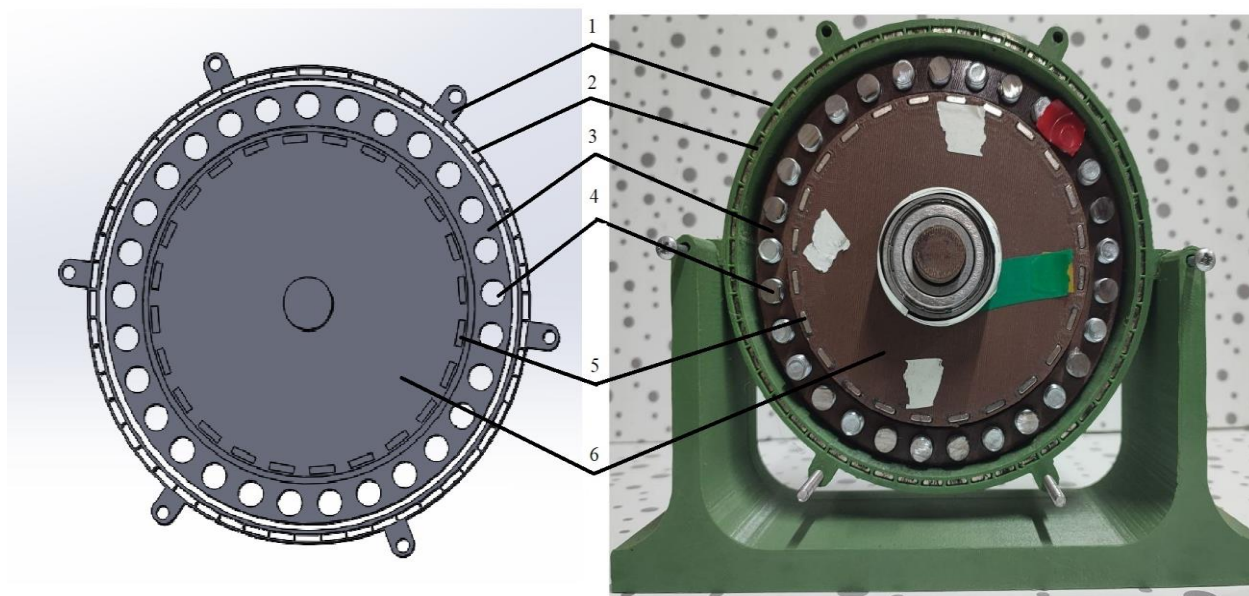


Рисунок 4.3 – Основні частини магнітної передачі

На рис. 4. 3 показано : 1 – корпус зовнішнього ротору ; 2 – магніти зовнішнього ротору ; 3 – корпус модулятора ; 4 – магнітопровідні секції модулятора ; 5 – магніти внутрішнього ротору; 6 – корпус внутрішнього ротору.

В зовнішньому роторі передбачено 52 пази та у внутрішньому 24 пази для постійних магнітів марки NdFeB, №38. Магнітопровідні секції модулятора являють собою сталь марки сталь 3.

При роботі магнітної передачі на номінальних швидкостях обертання (2500 – 3000 об/хв) високошвидкісного ротора в електропровідних елементах магнітної передачі наводяться значні за величиною вихрові струми. Особливо це стосується нерухомого модулятора магнітного потоку, який виготовляється з магнітопровідного та електропровідного матеріалу (сталь). У випадку виготовлення феромагнітних елементів магнітного модулятора у вигляді масивних елементів в них наводяться значні за величиною вихрові струми, призводить до виникнення значних поверхневих втрат та підвищеного нагріву. Для зменшення впливу цього явища необхідно виконувати сегменти модулятора магнітного потоку шихтованим, з окремих пластин електротехнічної сталі. При розробці дослідного експериментального зразка магнітної передачі, що представлений в даному розділі, використовувались масивні магнітопровідні елементи в конструкції модулятора магнітного потоку, з метою спрощення та здешевшання конструкції дослідного зразку.

Окремі сегменти модулятора магнітного потоку досліджуваної передачі необхідно відділяти одна від одної легким, немагнітним, неелектропровідним матеріалом таким як пластик, міцні клеї, композитні матеріали, карбоно-кобальтові конструкції. Немагнітні властивості вставок використовуються для того, щоб відокремити один від одного елементи модулятора і не допустити шунтування магнітного потоку від внутрішнього та зовнішнього роторів магнітної передачі. Неелектропровідним матеріал повинен виконуватись з метою зниження втрат в магнітній передачі, зменшення нагріву та збільшення коефіцієнта корисної дії. Однак, необхідно враховувати той факт, що матеріал між феромагнітними сегментами модулятора повинен мати досить високу

механічну міцність, оскільки він, як правило, є нерухомим і на нього діють значні по величині електромагнітні зусилля.

4.2 Методика та результати вимірювання максимального моменту

Максимальний момент експериментального зразка магнітної передачі визначався на експериментальній установці, зображеній на рис. 4.4. Для проведення експерименту магнітну передачу 1 закріплюється на нерухомій підставі 2. До швидкохідного валу магнітної передачі приєднаний шків 3 радіусом 150 мм, на який намотана тонка нитка 4. До нитки 4, своєю чергою, прикріплений тонкостінна посудина 5. У посудину 5 додавався малими порціями вантаж до моменту «зриву» (досягнення максимального електромагнітного моменту). Після цього проводиться вимір маси посудини з піском за допомогою електронних вагів. Було проведено сім експериментів за різних положень роторів щодо статора, результати яких наведені в табл. 4.2. Середнє значення маси судини з піском склало 93г. При цьому середній максимальний електромагнітний момент високошвидкісного ротора

$$T_{в max} = m_r \cdot g \cdot R_{шк} = 93 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 150 \cdot 10^{-3} = 0,137 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4.1)$$

де m_r – маса грузу, кг;

$R_{шк}$ – радіус шків, м.

Експериментальне визначення максимального моменту на низькошвидкісному роторі є більш трудомістким, що пов'язане з його великим значенням. Однак момент на низькошвидкісному роторі може бути розрахований виходячи з того, що відношення електромагнітних моментів, що розвиваються роторами, дорівнює передатному відношенню, що, у свою чергу, було отримано при моделюванні і далі буде підтверджено експериментально. Таким чином, максимальний електромагнітний момент, що діє на низькошвидкісний ротор, становить

$$T_{н max} = T_{в max} \cdot i = 0,137 \cdot 8,667 = 1,19 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.2)$$

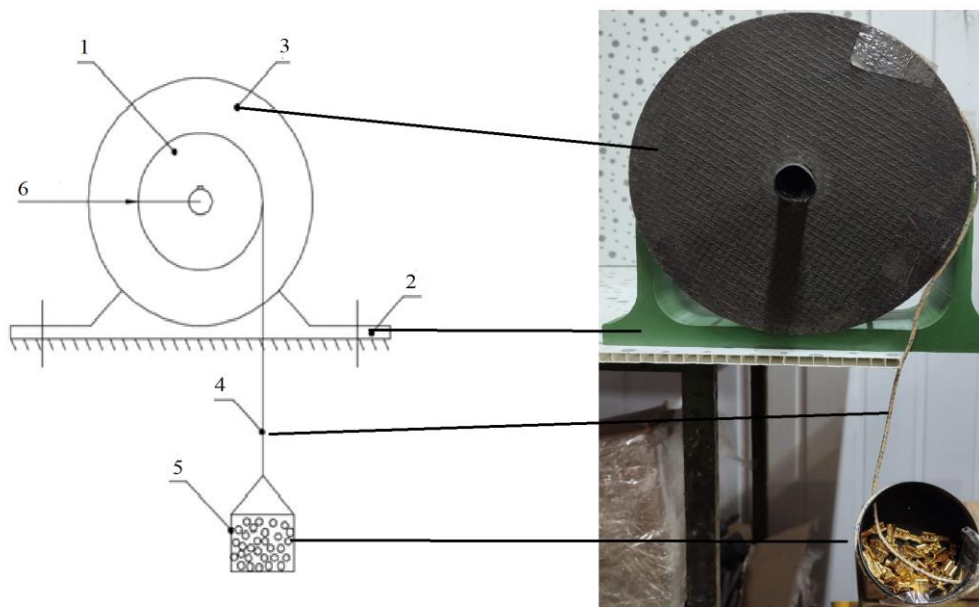


Рисунок 4.4 - Експериментальна установка для визначення максимального електромагнітного моменту:

1 – магнітна передача; 2 – основа; 3 – шків; 4 – нитка; 5 – вантаж; 6 – $R_{\text{шківа}}$

Таблиця 4.2 – Результати експерименту по визначенню максимального моменту

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6	7	Середнє значення
Маса вантажу, г	97	90	93	94	89	91	95	93

4.3 Методика та результати досліджень в режимі неробочого ходу

У робочому режимі магнітна передача виступає у ролі перетворювача механічної енергії, змінюючи частоту обертання та момент. При цьому вона повинна бути здатна пропускати через себе потік механічної потужності, що проходить від джерела до споживача. Визначення здатності функціонувати у робочому режимі досліджено на лабораторному стенді (рис. 4.5).

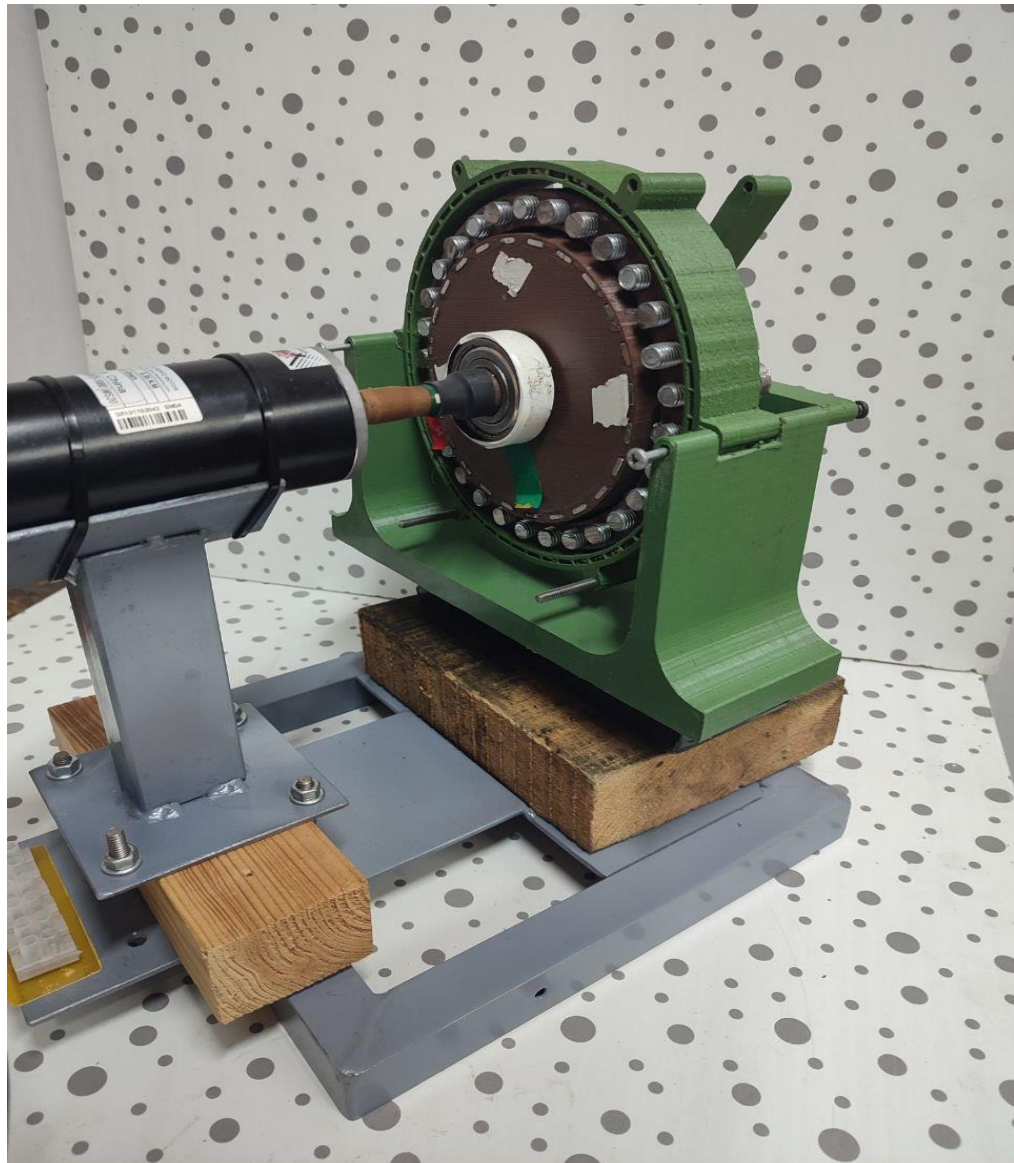


Рисунок 4.5 – Експериментальна установка для дослідження магнітної передачі в робочому режимі

Стенд для проведення лабораторних досліджень отримує живлення від мережі постійного струму 12 В. В якості приводу використовується двигун DCM 50207D – 1000. Керування швидкістю обертання двигуна відбувається за допомогою транзисторного DC регулятора. Визначення швидкості обертання двигуна та високошвидкісного ротору магнітної передачі відбувалося за допомогою лазерного безконтактного тахометру UNIT UT373.

Для визначення передавального коефіцієнту було проведено низку дослідів з різною швидкістю обертання вхідного валу. Для спрощення проведення дослідів вхідну швидкість було прикладено до високошвидкісного ротору магнітної передачі і в такому випадку магнітоелектричний модуль працює в режимі редуктора. Результати дослідів зведено в табл. 4.3 та графічно показано на рис. 4.6.

Таблиця 4.4 – Результати експерименту по визначенню передавального коефіцієнту

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Високошвидкісний ротор, об/хв	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200	1000	800
Низькошвидкісний ротор, об/хв	344	320	299	276	252	230	207	182	160	138	115	90

Передавальний коефіцієнт визначається за відношенням :

$$i = \frac{w_{\text{вис}}}{w_{\text{низ}}} \quad (4.2)$$

За даними дослідження передавальні коефіцієнти зведено в таб. 4.5.

Таблиця 4.5 – Визначення передавального коефіцієнту

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
i	8,72	8,75	8,69	8,69	8,73	8,69	8,69	8,79	8,75	8,69	8,69	8,88

Середнє значення передавального коефіцієнту:

$$i_{\text{сер}} = \frac{i_1 + \dots + i_{12}}{\text{кількість дослідів}} = \frac{104,76}{12} = 8,73 \quad (4.3)$$

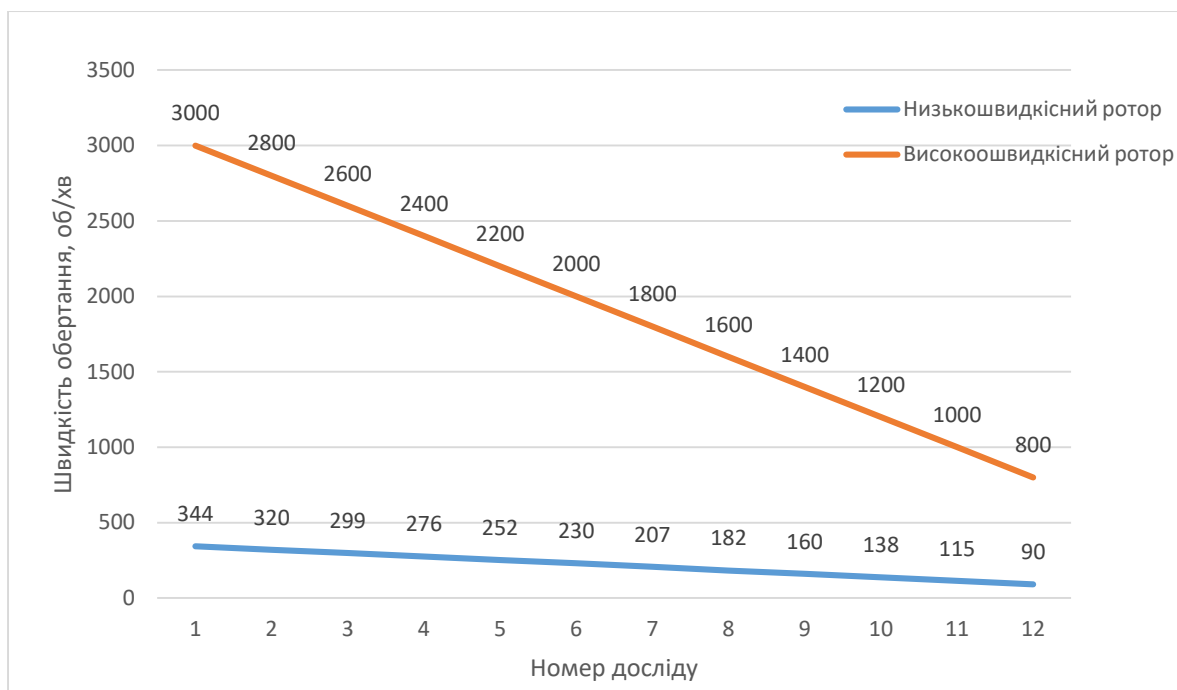


Рисунок 4.6 – Визначення передавального коефіцієнту

Передавальний коефіцієнт відрізняється від розрахованого на 0,72%. Дане відхилення можливе за рахунок похибки вимірювання швидкості.

Висновки до розділу 4

1. На підставі отриманих розрахункових даних розроблено конструктивні рішення, застосовані в експериментальному зразку магнітної передачі.
2. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень магнітної передачі, на підставі якої проведено ряд вимірювань, підтвердили як дані проведених теоретичних досліджень, так і працездатність експериментального зразка магнітної передачі як перетворювач параметрів механічної енергії.
3. Отримані результати визначення втрат потужності показали, що крім магнітних втрат у магнітній системі, значну частину загальних втрат потужності складають механічні втрати в підшипниках, спричинені підвищеним навантаженням на них внаслідок наявності некомпенсованих радіальних електромагнітних зусиль, а також магнітні втрати в елементах конструкції, спричинені вираженими кінцевими ефектами.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання, що полягає в розробці системи перетворення низькопотенціальної механічної енергії в електричну на основі магнітної передачі у складі автономної вітроустановки шляхом математичного та імітаційного моделювання.

Відповідно до поставленої мети в роботі отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Найбільш перспективними топологіями магнітних передач є планетарна, планетарна коаксіальна та циклоїдна. Циклоїдна магнітна передача застосовується на практиці лише у двоступінчастому виконанні, що знижує щільність її моменту в два рази. Принципова наявність ексцентриситету циклоїдної магнітної передачі породжує вібрації та некомпенсовані радіальні електромагнітні сили, що зменшують ресурс підшипників. Магнітні передачі коаксіальної планетарної топології можуть бути виконані з мінімальними радіальними електромагнітними силами, а співвісне розташування частин, що обертаються, дозволяє не вдаватися до додаткових пристроїв для зняття моменту з її вихідного валу як у циклоїдної передачі. Її недоліками є наявність пульсацій моменту і складна технологія виготовлення модулятора.

2. Розроблено двовимірну польову математичну модель магнітної передачі для роботи у складі вітроустановки малої потужності. За допомогою розробленої моделі проведено аналіз електромагнітного поля, параметрів та характеристик магнітної передачі при постійній та змінній швидкості обертання. Середнє значення електромагнітного моменту зовнішнього (високошвидкісного) ротора становить $\approx 7,4$ Н·м, тоді як величина електромагнітного моменту для зовнішнього ротора становить ≈ 66 Н·м. відношення моментів зовнішнього та внутрішнього роторів становить 8,92, що корелюється із коефіцієнтом редукції досліджуваного редуктора.

3. При зміні швидкості вітру змінюється швидкість обертання магнітної передачі і відповідні величини електромагнітних моментів високошвидкісного та

низькошвидкісного роторів магнітної передачі. В даному дослідженні показано, що магнітна система передачі не досягає насичення. При цьому середні значення магнітної індукції в конструктивних елементах передачі залишаються в межах допустимих значень для використовуваних матеріалів та марок сталі. Нерівномірний розподіл індукції вздовж середньої лінії в повітряному проміжку пояснюється наявністю модулятора, який є дискретним елементом в конструкції будь-якої магнітної передачі

4. Отримано оптимальну конфігурацію постійних магнітів та феромагнітних елементів модулятора для досягнення максимальної ефективності та зниження пульсацій електромагнітного моменту. При зменшенні висоти постійних магнітів в 2,2 рази величина моменту зменшується в ≈ 2 рази, при цьому пульсації електромагнітного моменту збільшуються на 30 %. Зменшення повітряного проміжку в 2 рази призводить до підвищення моменту $\approx 55\%$, в той же час збільшення повітряного проміжку на 2 мм призводить до зменшення моменту на $\approx 35\%$.

5. Розроблено чисельну імітаційну математичну модель магнітної передачі, що працює у складі з автономною вітроелектричною установкою з генератором із постійними магнітами. Використання магнітної передачі для автономних вітроелектричних систем дозволяє підвищити надійність роботи таких установок, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність їх роботи. В аварійних режимах роботи використання магнітної передачі дозволяє уникнути руйнувань або аварійних зупинок роботи електрообладнання.

6. Розроблена імітаційна модель магнітної передачі враховує пульсації електромагнітного моменту через дискретну структуру магнітної передачі та зміну параметрів моделі при зміні вхідного моменту: пульсацій, втрат в магнітному осерді та постійних магнітах, зміну кута навантаження та передавального електромагнітного моменту. Особливістю розробленої моделі системи магнітної передачі є те, що зміна навантаження електроджерела електричної енергії призводить до зміни робочої точки на механічній характеристиці ротора вітроустановки. І навпаки, при зміні параметрів

вітру змінюються вихідні параметри джерела електричної енергії : потужність, напруга, струм та електромагнітний момент.

7. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень магнітної передачі, на підставі якої проведено ряд вимірювань, підтвердили як дані проведених теоретичних досліджень, так і працездатність експериментального зразка магнітної передачі як перетворювач параметрів механічної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chumack, V., Bazenov, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, I., & Tkachuk, I. (2021). Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114)), 56–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246601>.
2. Лихогуб, А., Коваленко, М., Ткачук, І., & Гончарук, А. (2021). Параметрична оптимізація торцевого магнітоелектричного генератора із подвійним статором. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, (1 (5)), 33–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.1.06>.
3. Grebenikov, V.V. & Pavlov, V.B. & Gamaliia, R.V. & Popkov, V.S.. (2022). Comparative analysis of electric machines characteristics with permanent magnets for electric vehicles and wind turbines. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. 21-27. [10.15407/techned2022.04.021](https://doi.org/10.15407/techned2022.04.021).
4. Гребеніков, В., Гамалія, Р., & Попков, В. (2021). Генератор з постійними магнітами і осьовим магнітним потоком для вітроустановок. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, (1 (5)), 26–32. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.1.05>.
5. Ткачук, І., & Коваленко, М. (2021). Електромагнітні редуктори в електромеханічних системах. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, (1 (5)), 42–46. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.1.08>.
6. Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., & Tkachuk, I. (2020). Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5 (103)), 30–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193495>.
7. Чумак, В., Коваленко, М., Ткачук, І., & Коваленко, І. (2022). Порівняння синхронних генераторів електричної енергії ів для автономної бензинової установки.

Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (8), 32–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06>.

8. Головка В.М, Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Визначення впливу геометричних параметрів лопаті на енергетичні характеристики ротора. Відновлювана енергетика, Київ. 2014. №3. С. 58-63.

9. Grebenikov, V. V., Gamaleja, R. V. (2019). Magnitnyj reduktor dlja vetroustanovok maloj moshchnosti. Hidroenerhetyka Ukrainy, 3-4, 65-68 <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001142792>.

10. Kovalenko, M., Chumack, V., Kovalenko, I., Tkachuk, I., & Harford, A. (2023). Evaluation of magnetic gear parameters for autonomous wind installation with changing wind speed. Electrical Engineering and Power Engineering, (2), 32–42. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-2-4>.

11. Чумак, В., Коваленко, М., Коваленко, І., & Ткачук, І. (2023). Математичне моделювання гібридного магнітного редуктора для автономної вітроустановки малої потужності. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (9), 45–51. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.07>.

12. Чумак, В., Коваленко, М., Коваленко, І., & Ткачук, І. (2023). Експериментальне дослідження універсального високошвидкісного колекторного двигуна змінного струму. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (9), 39–44. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.06>.

13. Чумак, В., Коваленко, М., Коваленко, І., Ткачук, І., & Тимощук, О. (2023). Математичне моделювання безконтактного аксіального магнітоелектричного генератора із подвійним статором для електричних комплексів малої потужності. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (10), 20–25. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.2.04>.

14. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джура О.В., Шихненко М.О. Математичне моделювання і алгоритми керування електромеханічної системи з

генератором на постійних магнітах і напівпровідниковим регулятором напруги. Обчислювальні проблеми електротехніки. Національний університет «Львівська політехніка». 2020. Вип. 10. № 2. – С.

2. 15. Порівняння традиційного генератора із постійними магнітами з торцевим генератором із двосторонньою активною поверхнею для вітроустановок. [Головко В.М., Монахов Е.А., Коваленко І.Я., Пономарьов О.І.] Відновлювана енергетика. Київ. 2018. №2(53). С. 30-38.

16. Статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: ФЕА КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С.331-336.

17. Статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: ФЕА КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С.234-238.

18. Статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: ФЕА КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 291-296.

19. Jian, Huang & Yao, Ligang & Li, Wen-jian & Zhang, Jun. (2017). Design and realization of a novel magnetic nutation drive for industry robotic wrist reducer. *Industrial Robot: An International Journal*.

20. Yu, W & Wang, C & Xu, T. (2019). The design method of a novel magnetic suction gear reducer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 504. 012093. 10.1088/1757-899X/504/1/012093.

21. Rasmussen, P. O. Development of a high performance magnetic gear / P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, O. Nielsen // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 2003. — 41, № 3. — С. 1696.

22. Jørgensen, F. T. Design and construction of permanent magnetic gears : PhD diss. / Frank Thorleif Jørgensen. — Дания : UNI.PRINT. Aalborg University. — 2010. — 127 с.
23. Nakamura, K. Performance improvement of magnetic gear and efficiency comparison with conventional mechanical gear / K. Nakamura, M. Fukuoka, O. Ichinokura // Journal of Applied Physics. — 2014. — 115, № 17. — 3 с.
24. Torque Density of PM motors Developed under Government Programs [Электронный ресурс] : Report 06–08 / Precision Magnetics Inc. ; Dantam K. R. — 2008. — 7 с. — Режим доступа: <https://scribd.com/document/87569175/Torque-Density-of-PM-Motors>.
25. A new PM Machine topology for low-speed, high-torque drives / K. Atallah // Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines. — 2008. — 4 с.
26. Electromagnetic gearing : патент 750009 США / Thordon E. — 06.02.1903. — 6 с.
27. Transmission mechanism : патент 2167641 США / Dewan L — 22.10.1937. — 2 с.
28. Permanent magnet device for generating electrical energy : патент 3273001 США / Baermann M. — 01.06.1965. — 4 с.
29. S. Hasanpour, M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "Cycloidal Reluctance Magnetic Gears for High Gear Ratio Applications," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 6, pp. 1-10, June 2022, Art no. 8001210, doi: 10.1109/TMAG.2022.3163419.
30. M. C. Gardner, B. Praslicka, M. Johnson and H. A. Toliyat, "Optimization of Coaxial Magnetic Gear Design and Magnet Material Grade at Different Temperatures and Gear Ratios," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 36, no. 3, pp. 2493-2501, Sept. 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3054806.
31. Magnet gearing : патент 2243555 США / Faus H. T. — 21.08.1940. — 3 с.
32. Magnetic gearing system : пат. 2548373 США / Hurvitz H. — 15.11.1948. — 2 с.

33. Magnetic circuits and devices : патент 2722617 CIIA / Cluwen J. M. — 19.11.1952. — 7 с.
34. Magnetic Transmission : патент 3523204 CIIA / Rand S. — 19.01.1968. — 4 с.
35. B. Dai, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya and K. Kuritani, "Cogging Torque Reduction of Integer Gear Ratio Axial-Flux Magnetic Gear for Wind-Power Generation Application by Using Two New Types of Pole Pieces," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 8, pp. 1-5, Aug. 2022, Art no. 8002205, doi: 10.1109/TMAG.2022.3159002.
36. Low friction miniature gear drive for transmitting small forces, and method of making same : патент 3792578 CIIA / Hetzel M. B. — 10.01.1973. — 3 с.
37. Tsurumoto, K. A new magnetic gear using permanent magnet / K. Tsurumoto, S. Kikuchi // IEEE Transactions on Magnetics. — 2016. — T. 23, № 5. — C. 3622.
38. Magnetic coupling studies between radial magnetic gears / Y. D. Yao // IEEE Transactions on Magnetics. — 2017. — T. 33, № 5. — C. 4236.
39. The radial magnetic coupling studies of perpendicular magnetic gears / Y. D. Yao // IEEE Transactions on Magnetics. — 2015. — T. 32, № 5. — C. 5061.
40. Moghimi, Ali & Aliabadi, Mahmood & Farahani, Hassan. (2022). Triple-speed coaxial magnetic gear for wind turbine applications: introduction and comprehensive analysis. COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 41. 10.1108/COMPEL-01-2022-0001.
41. Improvements in Worm Gearing : патент 15780 CIIA / Lecoche J. — 15.12.1906. — 6 с.
42. Magnetic gearing : патент 1337732 CIIA / Stoller H. M. — 07.11.1916. — 5 с.
43. K. Aiso, K. Akatsu and Y. Aoyama, "A Novel Flux-Switching Magnetic Gear for High-Speed Motor Drive System," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 6, pp. 4727-4736, June 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2988230.
44. Ruiz-Ponce, G.; Arjona, M.A.; Hernandez, C.; Escarela-Perez, R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. Energies 2023, 16, 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721> .

45. Kikuchi, S. Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet / S. Kikuchi, K. Tsurumoto // IEEE Transactions on Magnetics. — 2013. — T. 25, № 6. — C. 2923.
46. Pakdelian, S. Principles of the Trans-Rotary Magnetic Gear / S. Pakdelian, N. W. Frank, H. A. Toliyat // IEEE Transactions on Magnetics. — 2013. — T. 49, № 2. — C. 883.
47. Heikkinen, J. E. Rotordynamics of a Trans-Rotary Magnetic Gear Rotor / J. E. Heikkinen, S. Pakdelian // Proceedings of the International Mechanical Engineering . Congress and Exposition. — 2013. — Paper № IMECE2013–63813.
48. Willis, R. Principles of Mechanism / R. Willis. — London: John W. Parker, West Strand. — 2014. — 450 c.
49. Magnetic transmission: патент 5013949 CIIA : МПК7 H02K 49/10 / Mabe W. J. — 25.06.1990. — 15 с.
50. Y. Wang, M. Filippini, N. Bianchi and P. Alotto, "A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 5, pp. 4557-4566, Sept.-Oct. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2916765.
51. Development of a Magnetic Planetary Gearbox / D. G. Dorrell // IEEE Transactions on Magnetics. — 2008. — 44, № 3. — C. 403.
52. Niguchi, N Transmission Torque Analysis of a Novel Magnetic Planetary Gear Employing 3-D FEM / N. Niguchi, K. Hirata // IEEE Transactions on Magnetics. — 2012. — 48, № 2. — C. 1043.
53. Magnetic gear : патент 2010/0207472 A1 CIIA : МПК7 H 02 K 49/10 / Atallah K. ; Magnomatics Limited. — 11.05.2007.
54. Jørgensen, F. T. The cycloid permanent magnetic gear / F. T. Jørgensen, T. O. Andersen, P. O. Rasmussen // IEEE Transactions on Industry Applications. — 44, № 6. — C. 1659.
55. Jelaska, D. Gears and Gear Drives / D. Jelaska. — Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2012. — 465 с.

56. S. S. Nielsen, H. Y. Wong, H. Baninajar, J. Z. Bird and P. O. Rasmussen, "Pole and Segment Combination in Concentric Magnetic Gears: Vibrations and Acoustic Signature," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 37, no. 3, pp. 1644-1654, Sept. 2022, doi: 10.1109/TEC.2022.3151654.
57. A Novel Magnetic Harmonic Gear / J. Rens // Proceedings of Electric Machines & Drives Conference. — 2007. — C. 698.
58. A Novel Magnetic Harmonic Gear / J. Rens [и др.] // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2010. — 46, № 1. — C. 206.
59. Chicurel-Uziel, R. Cycloidal Magnetic Gear Speed Reducer / R. ChicurelUziel // Modern Mechanical Engineering. — 2013. — №3. — с. 147.
60. Pérez, L. Diseño y construcción de un reductor de velocidad cicloidal magnético balanceado : магистерская диссертация / Luis Alberto Vázquez Pérez. — Мехико, 2013. — 54 с.
61. Optimum design for improving modulating-effect of coaxial magnetic gear using response surface methodology and genetic algorithm / L. Jian // Progress In Electromagnetics Research. — 2011. — T. 116. — C. 297.
62. Magnetic transmission : патент 3378710 США / Martin T. B. — 01.06.1964.
63. Appsratus for transmitting power : патент 1171351 США / Neuland A. H. — 22.03.1913.
64. Magnetic transmission : патент 3645650 США / Laing L. — 09.02.1970.
65. Vernier motor : патент 1894979 США / Chubb L. W. — 26.07.1931.
66. E. -J. Park, S. -Y. Jung and Y. -J. Kim, "Torque and Loss Characteristics of Magnetic Gear by Bonded PM Magnetization Direction," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 6, pp. 1-4, June 2021, Art no. 8001304, doi: 10.1109/TMAG.2021.3064705.
67. Vernier Motor : патент 2066965 США / Dicke, O. H. — 23.05.1929.
68. Magnetic Gearing Arrangement : патент 3301091 США / Reese G. A. — 05.07.1963.

69. Syam, Sudirman & Kurniati, Sri & Ramang, Ruslan. (2022). Design and Characteristics of Axial Magnetic Gear Using Rectangular Magnet. 10.31219/osf.io/5c724.
70. Mizuana, Yuma & Nakamura, Kenji & Suzuki, Yuma & Oishi, Yuhei & Tachiya, Yuichi & Kuritani, Kingo. (2020). Development of spoke-type IPM magnetic gear. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 64. 771-778. 10.3233/JAE-209389.
71. Magnetic gears : патент US3382386 США / Schlaeppli H. P. — 23.12.1964.
72. Cansiz, Ahmet & Akyerden, Emre. (2019). The use of high temperature superconductor bulk in a co-axial magnetic gear. Cryogenics. 98. 10.1016/j.cryogenics.2019.01.008.
73. Tzouganakis, Panteleimon & Gakos, Vasilios & Kalligeros, Christos & Papalexis, Christos & Tsolakis, Antonios & Spitas, V.. (2022). Torque ripple investigation in coaxial magnetic gears. MATEC Web of Conferences. 366. 01004. 10.1051/matecconf/202236601004.
74. Misron, N.; Mohd Saini, L.; Aris, I.; Vaithilingam, C.A.; Tsuyoshi, H. Simplified Design of Magnetic Gear by Considering the Maximum Transmission Torque Line. Appl. Sci. 2020, 10, 8581. <https://doi.org/10.3390/app10238581>.
75. S. Ishikawa and T. Todaka, "Transient-operation phenomena of a magnetic reducer analyzed with the time-stepping FEM," 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hamamatsu, Japan, 2020, pp. 1898-1901, doi: 10.23919/ICEMS50442.2020.9291208.
76. Tzouganakis, Panteleimon & Gakos, Vasilios & Kalligeros, Christos & Tsolakis, Antonios & Spitas, V.. (2022). Fast and efficient simulation of the dynamical response of coaxial magnetic gears through direct analytical torque modelling. Simulation Modelling Practice and Theory. 123. 102699. 10.1016/j.simpat.2022.102699.
77. J. Ding, L. Yao, Z. Xie, Z. Wang and G. Chen, "A Novel 3-D Mathematical Modeling Method on the Magnetic Field in Nutation Magnetic Gear," in IEEE Transactions on

Magnetics, vol. 58, no. 5, pp. 1-10, May 2022, Art no. 8000910, doi: 10.1109/TMAG.2022.3158973.

78. "Magnetic Gears and Gearboxes: Design and Applications" - Jacek F. Gieras

79. "Design, analysis and realization of magnetic gears and gearboxes: A review" - Aleksandar M. Stanković, Rada M. Stojanović, Dragan D. Antić.

80. Atallah, K. Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear / K. Atallah, S. Calverley, D. Howe // IEE Proceedings of Electric Power Applications. — 2006. — C. 135.

81. Performance of a magnetic gear using ferrite magnets for low speed ocean power generation / Jonathan Bird // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). — 2012. — C. 3348.

82. Analysis and Design Optimization of a Coaxial Surface-Mounted \Permanent-Magnet Magnetic Gear / Zhang X. // Energies. — 2014. — № 7. — C. 8535.

83. A magnetic gearbox with an active region torque density of 239Nm/L / Jonathan Bird // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). — 2014. — C. 1422.

84. Torque Ripple Reduction of Radial Magnetic Gearbox Using Axial Pole Pairing / H. Zaytoon // Proceedings of 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014). — 2014. — C. 1.

85. Torque ripple alleviation of a radial magnetic gearbox using step skewing approach / H. Zaytoon // Proceedings of 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). — 2014. — C. 648.

86. Frank, N. W. Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines / N. W. Frank, H. A. Toliyat // Proceedings of 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. — 2009. — C. 1224.

87. Eddy current analysis of magnetic gear employing 3-D FEM / N. Niguchi [и др.] // Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation. — 2010. — C. 1.

88. Bird, J. Z. An Iterative Magnetomechanical Deflection Model for a Magnetic Gear / K. K. Uppalapati, J. Z. Bird // IEEE Transactions on Magnetics. — 2014. — 50, № 2. — C. 245.
89. Analysis of the Harmonic Response of a Modulation Permanent Magnetic Transmission Equipment Based on ANSYS / Z. Zeng — Energy and Power Engineering. — 07, № 3. — C. 63.
90. Frank, N. W. Analysis of the Concentric Planetary Magnetic Gear With Strengthened Stator and Interior Permanent Magnet Inner Rotor / N. W. Frank, H. A. Toliyat // IEEE Transactions on Industry Appl. — 2011. — 47, № 4. — 1652.
91. Gerber, S. Evaluation of a prototype magnetic gear // Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). — 2013. — C. 319.
92. Design and transient behavior of magnetic gears / P. Zheng // Journal of Applied Physics. — 2014. — № 115. — C. 17E706.
93. A New Coaxial Magnetic Gear Using Stationary Permanent Magnet Ring / K. Tsurumoto // IEEE Transactions on Magnetics. — 2013. — 23, № 5. — C. 3622.
94. Niguchi, N Electromagnetic Vibration Analysis and Measurement of a Magnetic Gear / N. Niguchi, K. Hirata, A. Zaini // IEEJ Journal of Industry Application. — 2013. — 2, № 6. — C. 261.
95. Surface Magnet Gears with a New Magnet Arrangement and Optimal Shape of Stationary Pole Pieces / T. Fujita // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. — 2013. — № 5. — C. 243.
96. Evans, D. J. Influence of design parameters on magnetic gear's torque capability / D. J. Evans, Z. Q. Zhu // Proceedings of 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). — 2011. — C. 1403.
97. Design optimization of magnetic gears using mesh adjustable finite-element algorithm for improved torque / S. Niu // IEEE Transactions on Magnetics. — 2012. — 48, № 11. — C. 4156.

98. Fukuoka, M. A method for optimizing the design of SPM type magnetic gear based on reluctance network analysis / M. Fukuoka, K. Nakamura, O. Ichinokura // Proceedings of 2012 20th International Conference on Electrical Machines). — 2012. — C. 30.
99. Jian, L. A coaxial magnetic gear with halbach permanent-magnet arrays / L. Jian, K. Chau // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2010. — 21, № 2 — C. 319.
100. Study on Improvement of Transmission Torque for a Surface Permanent Magnet Type Magnetic Gear / M. Oka // Materials Science Forum. — 2012. — 721. — C. 237.
101. An improved coaxial magnetic gear using flux focusing / X. Li // Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems. — 2011. — C. 2.
102. Slip investigation and magnetic redesign of motor integrated permanent magnet gear / T. V Frandsen // Proceedings of 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). — 2015. — C. 929.
103. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives" - Ramu Krishnan.
104. Ge, Y. A three dimensional analytical calculation of the airgap magnetic field and torque of coaxial magnetic gears / Y. J. Ge, C. Y. Nie, Q. Xin // Progress In Electromagnetics Research. — 2012. — 131. — C. 391.
105. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors - Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang.
106. Design and analysis of interior-magnet outer-rotor concentric magnetic gears / X. Liu // Journal of Applied Physics. — 2009. — 105, № 7. — C. 103.
107. COMSOL Inc. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.comsol.ua.
108. Arnold Magnetic Technologies. Neodymium-Iron-Boron Magnets [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.arnoldmagnetics.com/enus/Products/Neodymium-Magnets.
109. Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications" - Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech.
110. Advanced Electromagnetism: Foundations, Theory and Applications" - Constantine A. Balanis.

111. Magnetic Sensors and Their Applications" - Liviu M. Popa-Simil.
112. Höganäs [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.hoganas.com.
113. Pyrhönen, J. Design of Rotating Electrical Machines / J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovcová. — Chichester : JohnWiley & Sons Ltd, 2008. — 512 с.
114. Magnetic Resonance Imaging: Physical and Biological Principles" - Stewart C. Bushong.
115. Zhu, Z. Q. Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines / Z. Q. Zhu, D. Howe // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2000. — 15, № 4. — С. 407.
116. Arnold Magnetic Technologies. Нк: A Key Magnetic Figure of Merit [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.arnoldmagnetics.com/enus/Tech-Library/Technical-Publications>.
117. Analyses and experimental validation of coaxial magnetic planetary gear / O. Molokanov, P. Dergachev, V. Kiruhin, P. Kurbatov // Proceedings of 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA). — 2014. — С. 1.
118. Magnetic Techniques for the Characterization of Materials - R. E. Newnham.
119. Electromechanical Systems and Devices - Sergey Edward Lyshevski.
120. Jian, L. Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in Coaxial Magnetic Gears / L. Jian, K.T. Chau // Progress In Electromagnetics Research. — 2009. — 92. — С. 1.
121. Jiles, D. Ferromagnetic hysteresis / D. Jiles, D. Atherton // IEEE Transactions on Magnetics. — 2013. — 19, № 5. — С. 2183.
122. Study on cogging torque in coaxial planetary magnetic gear / O. Molokanov, P. Dergachev, S. Osipkin, P. Kurbatov // Proceedings of IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference. — 2016. — С. 1.
123. Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control" - Sergey Edward Lyshevski.

124. Magnetic pole-piece structure : патент 2011/0133594 США : МПК7 H 02 K 1/06 / Atallah K., Clark R. E., Rens J. J ; Magnomatics Limited. — 12.05.2009.
125. Improved pole-piece structure : патент WO 2013/186551: МПК7 H 02 K 51/00 / Birchall J. G. ; Magnomatics Limited. — 11.06.2012.
126. "Magnetic Gearing: A Review of Recent Developments" - авторы: Reza Hashemian, Timothy C. Green.
127. "Analysis and design of a magnetic gearbox for electric vehicle drive" - авторы: Bin Liu, Xiaoqing Liao, Jie Zhu, Lifa Zhang.
128. Transient analysis of coaxial magnetic gears using finite element comodeling / K. T. Chau // Journal of Applied Physics. — 2007. — 103, № 7. — С. 101.
129. Oka, M. Study on Force-Transmissibility of a Magnetic Gear by Using 3-D Boundary Element Analysis / M. Oka, T. Todaka, M. Enokizono // Material Science Forum. — 2014. — 792. — С. 221.
130. Fukuoka, M. Dynamic Analysis of Planetary-Type Magnetic Gear Based on Reluctance Network Analysis / M. Fukuoka, K. Nakamura, O. Ichinokura // IEEE Transactions on Magnetics. — 2011. — 47, № 10. — С. 2414.
131. Dynamic model of coaxial magnetic planetary gear / O. Molokanov, P. Kurbatov, P. Dergachev, A. Alami // Proceedings of 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). — 2015. — 944.
132. "Development of a Magnetic Gearbox Concept for Wind Turbines" - авторы: Michele De Vita, Lorenzo Molinaro, Salvatore Baglio.
133. MATLAB [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.mathworks.com>.
134. Song, X. The torsional stiffness of involute spur gears / X. Song [и др.] // Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. Mechanisms and Machine Science. — 2015. — Т. 21. — С. 1369.

135. Montague, R. G. Magnetic gear dynamics for servo control / R. G. Montague, C. M Bingham, K. Atallah // 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. — 2010. — C. 1192.
136. Montague, R. G. Dual-observer-based position-servo control of a magnetic gear / R. G. Montague, C. M Bingham, K. Atallah // IET Electric Power Applications. — 41, № 9. — C. 708.
137. "Design and analysis of a novel magnetic gearbox for application in wind energy conversion systems" - автори: Asghar Akbarzadeh, Mohammad Amiri, Hasan Rastegar.
138. "Design and Simulation of Magnetic Gearbox for Wind Energy Conversion System" - автори: Mohd Anas Zakaria, Liew Pay Jun, Tan Jia Xuan.
139. Liang, J. W. Identifying Coulomb and viscous friction from free-vibration decrements / J. W. Liang, B. F. Feeny // Nonlinear Dynamics. — 1998. — 16, № 4. — C. 337.
140. "Investigation of magnetic gearbox for tidal energy extraction" - автори: Wenjie Wang, Ruifeng Wang, Youguang Guo.
141. "Development of a low-speed high-torque magnetic gearbox for direct drive applications" - автори: Andy C. J. Wu, Alistair R. J. Moat, David A. Staton.
142. Peng, S A Novel High Torque-Density Triple-Permanent-Magnet-Excited Magnetic Gear / S. Peng, W. N. Fu, S. L. Ho // IEEE Transactions on Magnetics. — 2014. — 50, № 11. — C. 1.