

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра електромеханіки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) **В. Ф. Шинкаренко**
(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

на тему: Електромагнітний хвильовий привід на постійних магнітах

Виконав: студент 4 курсу, групи _____ ЕМ-Г62-1
(шифр групи)

Лихогуб Вячеслав Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ доцент к.т.н Реуцький Микола Олександрович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ к.т.н., доцент, Бур'ян Сергій Олександрович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра електромеханіки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація – Електричні машини і апарати

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. Ф. Шинкаренко
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Лихогубу Вячеславу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електромагнітний хвильовий привід на постійних магнітах
керівник проекту Реуцький Микола Олександрович, к.т.н. доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 14.06.20

4. Зміст пояснювальної записки: Зміст. Вступ. 1. Патентний пошук. 2. Опис запропонованої конструкції 3. Електромагнітний розрахунок 4. Механічний розрахунок 5. Побудова характеристик приводу. Висновки. Перелік літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Креслення електромагнітного хвильового приводу на постійних магнітах.

6. Консультанти розділів проекту*

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 10.09.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Патентний пошук	10.11.2019	
2	Опис конструкції	20.12.2019	
3	Електромагнітний розрахунок	15.03.2020	
4	Механічний розрахунок	01.05.2020	
5	Побудова характеристик машини	15.05.2020	
6	Оформлення дипломної роботи	01.06.2020	

Студент

(підпис)

В. О. Лихогуб
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

М.О. Реуцький
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить: сторінок – 54, рисунків – 38, таблиць – 2, креслення на листку А1 та 4 посилання на наукові роботи.

Метою дипломної роботи є проектування хвильового приводу на постійних магнітах у відповідності до вимог, що визначаються у патентному пошуку.

Під час написання дипломної роботи були зроблені наступні розрахунки: двовимірні електромагнітні розрахунки трьох варіантів електромагнітних систем, тривимірний розрахунок оптимальної електромагнітної системи з використанням параметризації, механічні розрахунки кінематичних схем хвильових передач при різних параметрах живлення та розрахунок спрощеної моделі гнучкого елемента у зоні переходу.

У результаті розрахунків наведених вище було отримано конструкцію хвильового приводу, що має ряд інноваційних якостей, а саме: можливість створення багатохвильових механічних систем, фіксація положення при знятті живлення.

По темі дипломної роботи сумісно з Реуцьким М.О. було опубліковано статтю у міжнародному науково-технічному журналі молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики».

ХВИЛЬВОЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ПРИВІД, МОМЕНТНИЙ ДВИГУН, РОЗРАХУНКИ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК, МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК.

SUMMARY

Thesis contains: page - 54, figure - 38, table -2, drawing on sheet A1 and 4 references to scientific works.

The goal of the diploma project is to design electromagnetic strain wave drive with permanent magnets in accordance to requirements that are set by patent search.

During the writing of the diploma the following calculations were made: two-dimensional electromagnetic calculations of three variants of electromagnetic systems, three-dimensional calculation of the optimal electromagnetic system using parameterization, mechanical calculations of kinematic schemes of strain wave drive at different power parameters and calculation of a simplified model of a flexible element.

As a result of calculation, construction with unique characteristics were designed: ability to create multi-wave mechanical system and fixing position after disconnection from supply.

In cooperation with M.O. Reutsky an article related to diploma project in the international scientific and technical journal of young scientist and students "Modern problems of electrical engineering and automation" were published.

ELECTROMAGNETIC STRAIN WAVE DRIVE, ELECTROMAGNETIC HARMONIC DRIVE, TORQUE ENGINE, FINITE ELEMENTS ANALYSIS, ELECTROMAGNETIC CALCULATION, MECHANICS CALCULATION.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
SUMMARY	5
ВСТУП.....	8
1 ПАТЕНТНИЙ ПОШУК	11
1.1 Цільова функція пошуку $F_{ц1}$	11
1.2 Результат патентного пошуку за цільовою функцією пошуку $F_{ц1}$	11
1.3 Аналіз патенту US3169201A.....	14
1.4 Цільова функція пошуку $F_{ц2}$	14
1.5 Результат патентного пошуку за цільовою функцією пошуку $F_{ц2}$	15
1.6 Цільова функція пошуку $F_{ц3}$	15
1.7 Результат патентного пошуку за цільовою функцією пошуку $F_{ц2}$	15
Висновок до розділу.....	16
2 ОПИС ЗАПРОПОНОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ	17
2.1 Загальний огляд.....	17
2.2 Опис електромагнітної частини приводу. Постановка задачі проектування електромагнітної системи.....	17
2.3 Опис механічної частини приводу. Постановка задачі проектування механічної системи	19
Висновок до розділу.....	21
3 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК	22
3.1 Вибір геометрії та принципу дії полюсу	22
Варіант 1	23
Варіант 2.....	26
Варіант 3.....	28

3.2	Методика розрахунку полюсу хвильового двигуна	33
	Дослідження впливу магнітної провідності	33
	Дослідження залежності сили взаємодії від величини залишкової індукції постійного магніту	35
	Дослідження впливу площі поперечного перерізу нижнього магнітопроводу на силу взаємодії	36
	Уточнення залишкової індукції постійних магнітів.....	37
	Побудова сімейства силових характеристик.....	38
	Висновок до розділу.....	40
4	МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК.....	41
4.1	Розрахунок кінематичної схеми при синусоїдальному розподілу сил.....	41
4.2	Розрахунок кінематичної схеми при прямокутному розподілу сил	43
	Висновок до розділу.....	46
5	ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДУ	47
	Визначення максимального сумарного моменту.....	50
	Визначення величини кроку.....	51
	Визначення максимальної швидкості обертання.....	51
	Визначення потужності приводу	51
	Висновок до розділу.....	52
	ВИСНОВКИ.....	53
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	54

ВСТУП

Актуальність проблеми полягає в тому, що велика кількість сучасних систем, зокрема у сферах робототехніки, авіації, космічних систем, ставлять високі вимоги перед електромеханічними перетворювачами. При необхідності отримання високого моменту на низьких обертах результат досягається передачею високошвидкісного обертального руху на редуктор. В порівнянні з системами, де обертовий рух передається напряму до виконавчого органу системи такі системи мають меншу надійність та більші маса-габаритні показники. З іншого боку, використання моментних машин значно ускладнює системи керування, які генерують систему напруг низької частоти у відповідності до сигналу зворотного зв'язку.

Можливим кроком оптимізації систем описаних вище є поєднання принципів редукування обертового руху з принципами електромеханічного перетворення енергії. Дане рішення може усунути проміжні елементи систем, що підвищить їх надійність та зменшить втрати енергії.

У даній роботі буде приведено опис та розрахунок двигуна, що поєднує в собі принцип хвильової редукції та електромеханічного перетворення енергії.

Принцип хвильової редукції був обраний так як він є має ряд переваг, які є надзвичайно важливими для техніки, а саме: забезпечення високого передавального відношення, висока ефективність, відсутність люфту, компактність, висока надійність, можливість нести значний крутний момент.

Крутний момент в хвильовій передачі створюється за допомогою хвиль еластичного матеріалу (рис. 1, 2), що входить в зачеплення з нерухомим елементом (рис. 3) [2]. Хвилі можуть створюватись механічним, гідравлічним, пневматичним, електростатичним та електромагнітним способом.

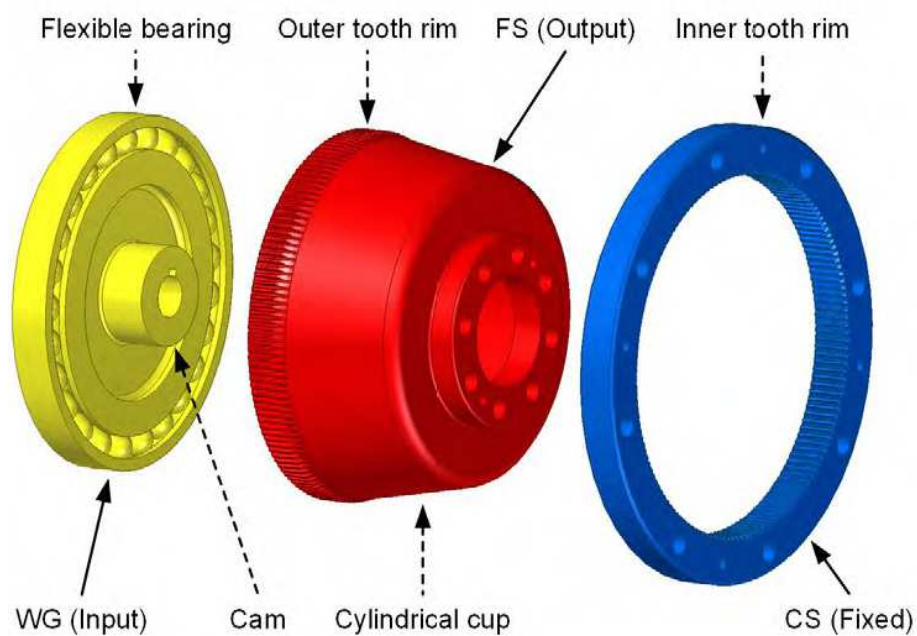


Рис. 1. Основні компоненти хвильової передачі

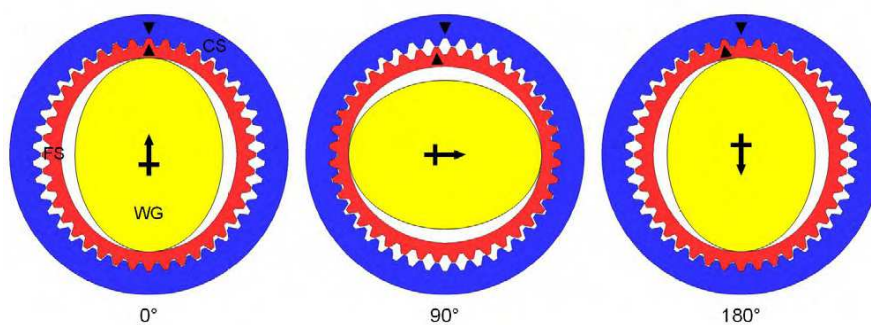


Рис. 2. Залежність між періодом зчеплення та періодом обертання хвильової передачі

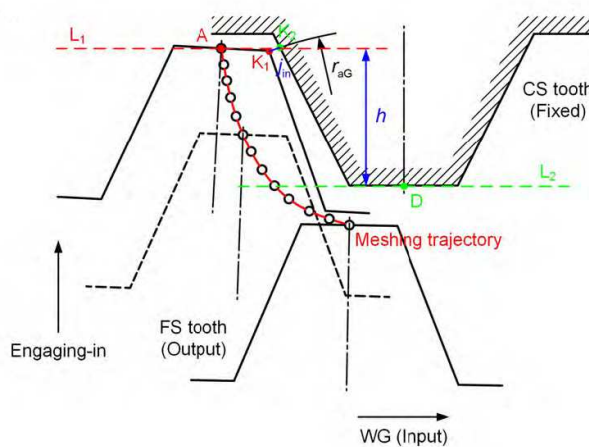


Рис. 3. Відносний рух зубців гнучкого елемента відносно зубів нерухомої шестерні

У разі використання електромагнітного та електростатичного методів для отримання обертового руху хвильова передача споживає виключно електричну енергію і може використовуватись як електромеханічний перетворювач, що здатен забезпечувати високий крутний момент при малій частоті обертання [1].

1 ПАТЕНТНИЙ ПОШУК

1.1 Цільова функція пошуку $F_{ц1}$

Метою патентного пошуку є вивчення робіт по темі поєднання принципу хвильової редукції та електромеханічного перетворення енергії, аналіз результатів досліджень та визначення недоліків.

Критерії пошуку:

- Використання принципу хвильової редукції (англ. Strain wave drive).
- Споживання виключно електричної енергії.
- Отримання на виході обертового руху з частотою обертання нижчою за швидкість обертання магнітного поля.

1.2 Результат патентного пошуку за цільовою функцією пошуку $F_{ц1}$

Принцип дії хвильового двигуна детально описується в патенті US3169201A (США) від 1965 року [3]. Ескіз винайденої машини зображений на Рис. 1.1.

Винахід описаний в патенті включає в себе гнучкий кільцеподібний елемент та елемент реакції (англ. reaction element), що взаємодіють між собою, електромагнітний генератор хвиль з системою керування, що викликає рух хвилі деформації кільцеподібного елемента, в результаті чого вихідний вал приводиться в рух.

Генератор хвиль представляє собою групу котушок, що розподіленні по колу навколо елемента реакції з певним проміжком. Система керування повинна забезпечувати увімкнення котушок на напругу, що забезпечує деформацію елемента реакції в еліптичну форму. При зовнішньому сигналі входу хвиля деформації повинна рухатись в заданому напрямку.

Елемент реакції передає власні деформації на гнучкий елемент, що має зовнішні зубці. При набутті гнучким елементом еліптичної форми зубці вступають в контакт з жорстким елементом більшого радіусу з внутрішніми

зубцями. Кількість зубців жорсткого елемента трішки більша за кількість зубців гнучкого елемента. Гнучкий елемент кріпиться на вихідний вал.

При русі хвилі деформації зубці гнучкого елемента обкатують зубці жорсткого елемента і гнучкий елемент повертається. Швидкість з якою обертається вихідний вал визначається за формулою (1.1).

$$\omega_o = \omega_f \cdot \frac{Z_I - Z_o}{Z_o} \quad (1.1)$$

де ω_o – кутова швидкість вихідного валу, ω_f – кутова швидкість магнітного поля, Z_I – кількість зубців внутрішньої шестерні (гнучкого елемента), Z_o – кількість зубців зовнішньої шестерні (жорсткого елемента).

Так як кількість зубців внутрішньої шестерні менша за кількість зубців зовнішньої шестерні, то кутові швидкості вихідного валу та магнітного поля мають різні знаки.

Feb. 9, 1965

W. B. SPRING ET AL

3,169,201

ELECTROMAGNETIC HARMONIC DRIVE

Filed Feb. 15, 1963

4 Sheets-Sheet 1

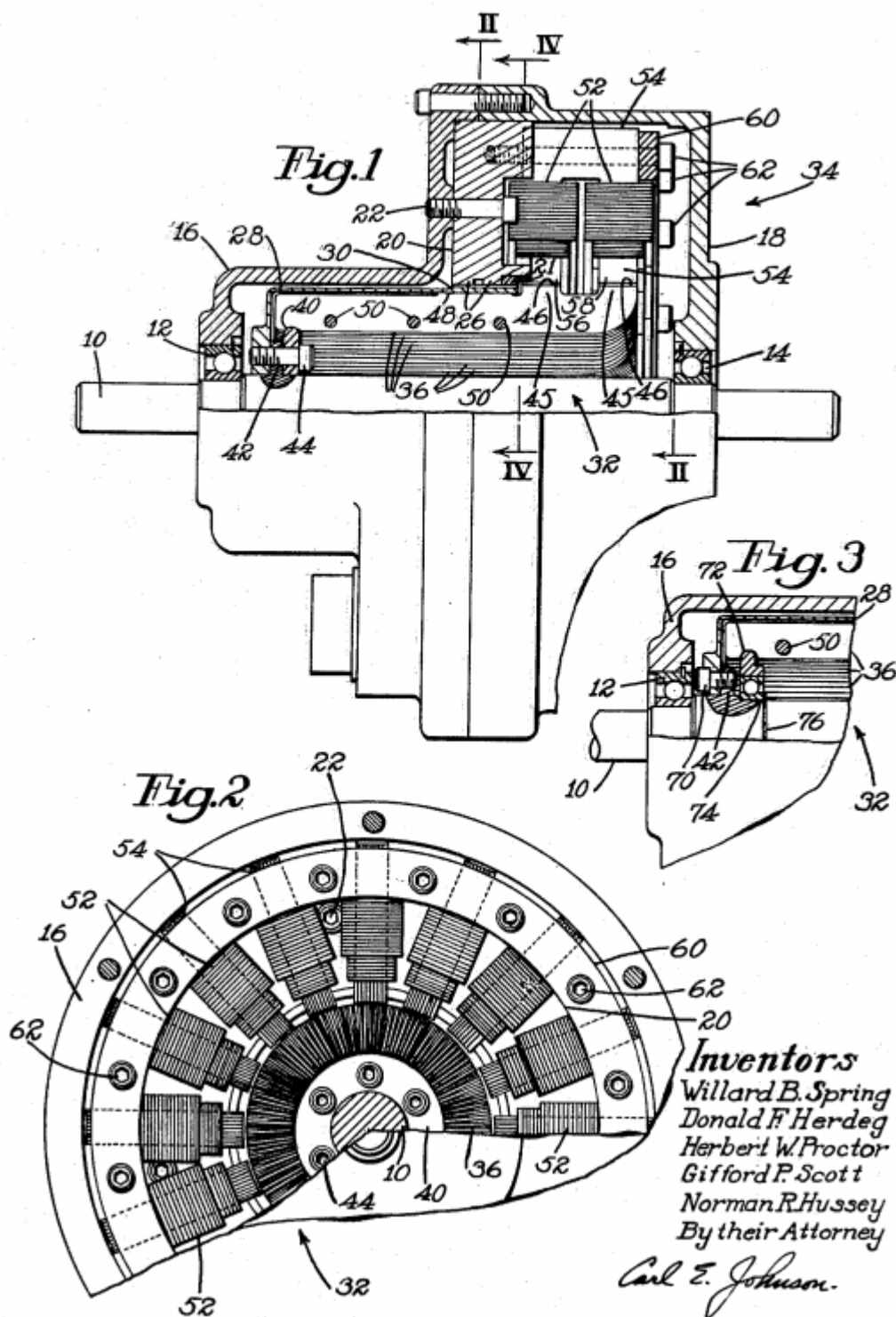


Рис. 1.1 Ескіз хвильового двигуна, що описаний у патенті US3169201A

1.3 Аналіз патенту US3169201A

У порівнянні з класичним виконанням приводу за схемою мотор-редуктор, конструкція наведена у патенті US3169201A має ряд переваг:

- Менші масо-габаритні показники при такій самій потужності та ефективності.
- Значно менший момент інерції за рахунок відсутності деталей, що швидко обертаються.
- Простота та надійність конструкції.

Попри всі переваги наведенні вище, дана реалізація приводу перейняла у себе деякі конструктивні недоліки класичних хвильових редукторів, а саме:

- Великий виліт гнучкого елемента за межі зони контакту для забезпечення передачі обертового руху на жорсткий вихідний вал, що збільшує габарити та зменшує жорсткість положення.
- Гнучкий елемент не здатен відштовхуватись від полюсів формуючи впадини, що знижує питому потужність та обмежує максимальну кількість механічних хвиль до трьох.

Також з'явилися нові конструктивні недоліки, пов'язані з реалізацією генератора хвиль та елемента реакції:

- Відсутність фіксації положення при знятті напруги.
- Швидкий знос шару лаку на листах електротехнічної сталі та гумових трубок на елементі реакції.

1.4 Цільова функція пошуку $F_{ц2}$

Зважаючи на перелічені в розділі 1.3 недоліки конструкції проведемо патентний пошук з уточненими критеріями.

Критерії пошуку:

- Використання принципу хвильової редукції (англ. Strain wave drive).
- Споживання виключно електричної енергії.

- Отримання на виході обертового руху з частотою обертання нижчою за швидкість обертання магнітного поля.
- Передача обертового руху з гнучкого елемента без значного вильоту.
- Можливість формувати більше ніж 3 механічні хвилі деформації.
- Фіксація положення вихідного валу при знятті напруги живлення.

1.5 Результат патентного пошуку за цільовою функцією пошуку $F_{ц2}$

У опрацьованих патентних базах не було знайдено інформації про системи з кількістю хвиль більше 3 та можливістю фіксації положення при знятті напруги живлення, тому доцільно прибрати ці критерії з подальшого пошуку.

1.6 Цільова функція пошуку $F_{ц3}$

Критерії пошуку:

- Використання принципу хвильової редукції (англ. Strain wave drive).
- Споживання виключно електричної енергії.
- Отримання на виході обертового руху з частотою обертання нижчою за швидкість обертання магнітного поля.
- Передача обертового руху з гнучкого елемента без значного вильоту.

1.7 Результат патентного пошуку за цільовою функцією пошуку $F_{ц2}$

У патенті «Хвильовий електродвигун» № 75744 (Україна) від 2006 року [4] описана конструкція, що не має проблеми великого вильоту гнучкого елемента за рахунок поєднання елемента реакції та гнучкого елемента в одне ціле.

Гнучкий магніточутливий елемент виконаний у вигляді вигинної у радіальному напрямку одношарової феромагнітної стрічки з упорядковано розташованими у радіальному напрямку аксіальними штирями, кінцеві ділянки яких, що виступають за краї феромагнітної стрічки, розташовані з можливістю

2 ОПИС ЗАПРОПОНОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

2.1 Загальний огляд

Об'єктом даної роботи є електромагнітний хвильовий привід з постійними магнітами, що призначений для електромеханічного перетворення енергії, при якому буде забезпечуватись тихохідний рух вихідного валу зі здатністю отримувати високий момент.

Для отримання бажаного результату було поєднано принцип хвильової редукції та електромеханічного перетворення енергії. Запропонована конструкція складається з групи котушок, що намотані на осердя з шихтованої електротехнічної сталі, елементу реакції, гнучкого елементу, жорсткої шестерні та корпусу.

На базі аналізу недоліків існуючих конструкцій, що були вивчені під час патентного пошуку, було встановлено бажані ознаки для електричної машини, що створюється, а саме:

- Використання принципу хвильової редукції (англ. Strain wave drive).
- Споживання виключно електричної енергії.
- Отримання на виході обертового руху з частотою обертання нижчою за швидкість обертання магнітного поля.
- Передача обертового руху з гнучкого елементу без значного вильоту.
- Можливість формувати більше ніж 3 механічні хвилі деформації.
- Фіксація положення вихідного валу при знятті напруги живлення.

2.2 Опис електромагнітної частини приводу. Постановка задачі проектування електромагнітної системи

Забезпечення таких ознак, як можливість формування більше 3 механічних хвиль та фіксація положення вихідного валу при знятті напруги живлення, потребує принципово нового підходу до створення сили взаємодії між

електричними котушками та елементом реакції порівняно з вже існуючими конструкціями.

При пропусканні магнітного потоку, створеного полюсами статора, через магнітом'який матеріал, що знаходиться на елементі реакції, домени орієнтуються за напрямком зовнішнього магнітного поля, створюючи власне магнітне поле. Взаємодія цих двох полів і породжує притягання гнучкого до полюсів статора. При зміні напрямку магнітного потоку, що створюється котушкою на статорі, магнітне поле в магнітом'якому матеріалі теж змінює свій напрям, і в результаті напрям механічної сили залишається незмінним.

Для забезпечення відштовхування необхідно розмістити на елементі реакції джерело незалежного магнітного поля. Це може бути як електромагніт так і постійний магніт.

Розміщення постійних магнітів на гнучкому елементі дозволить збільшити силу притягання та забезпечити відштовхування, що збільшить питому потужність електромеханічного перетворювача. Також дана конструкція не потребує шихтовки гнучкого елемента, що значно збільшить надійність.

Використання електромагніту забезпечить в рівній мірі як збільшення сили притягання, так і сили відштовхування. Хоч даний варіант і являє собою найскладніший в плані виготовлення, проте він забезпечує найкращі характеристики та найменші масо-габаритні показники.

Можливість забезпечити взаємодію в обидва напрямки дозволяє прикладати більшу силу для деформації гнучкого елемента та створювати більше 3 механічних хвиль, що розширює діапазон передавальних відношень.

В даній роботі буде розглянуто конструкцію, що використовує в якості джерела незалежного магнітного поля на елементі реакції постійні магніти, через те, що лише за допомогою цього варіанту можливо забезпечити фіксацію положення при знятті напруги живлення.

Задачею проектування електромагнітної системи є створення конструкції, яка б забезпечувала у рівній степені як притягання, так і відштовхування

елементу реакції відносно котушки з осердям, з достатньою силою, та в таких геометричних розмірах, що дозволяють розмістити її в корпусі приводу.

2.3 Опис механічної частини приводу. Постановка задачі проектування механічної системи

Механічна частина хвильового приводу складається з гнучкого елемента, зовнішньої та внутрішньої жорстких шестерень. Зовнішня шестерня має внутрішні зубці кількістю Z_1 . Гнучкий елемент має як зовнішні, так і внутрішні зубці з кількістю Z_2 та Z_3 відповідно. Внутрішня шестерня має зовнішні зубці з кількістю Z_4 . Усі зубці в системі мають однакові геометричні розміри. Для такого розташування зубців завжди виконується умова (2.1)

$$Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 \quad (2.1)$$

За рахунок різниць кількості зубців на різних шестернях відбувається редукування швидкості обертання.

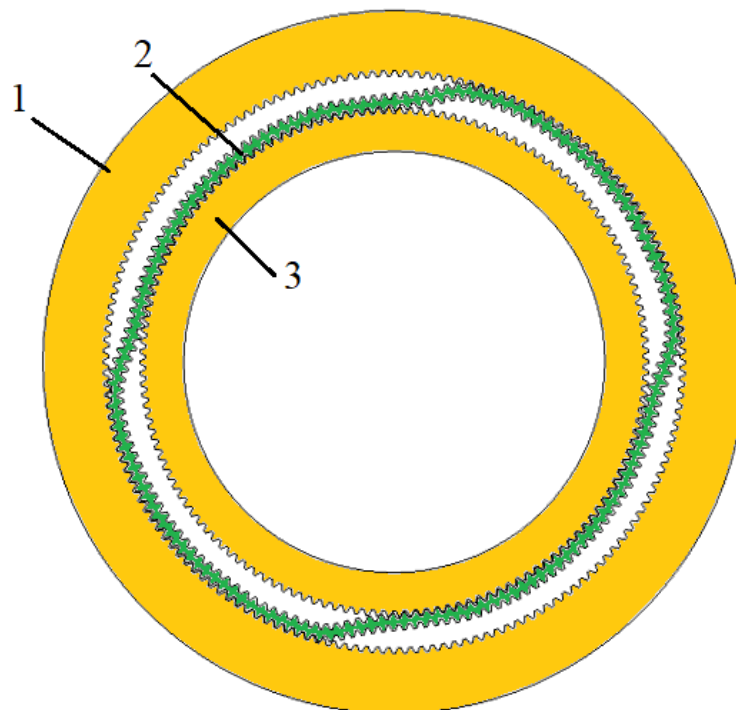


Рис. 2.1. Ескіз механічної системи електромагнітного хвильового приводу.

1 – зовнішня шестерня, 2 – гнучкий елемент, 3 – внутрішня шестерня.

Збільшення кількості механічних хвиль збільшує кількість точок контакту зубців гнучкого елемента з зубцями нерухомого зубчастого колеса, розподіляючи зусилля між зубцями. Це дозволяє зменшити модуль зубця, а значить і зменшити різницю діаметрів гнучкого елемента та нерухомого зубчастого колеса, що в свою чергу зменшує деформації гнучкого елемента та зменшує повітряний проміжок між котушкою з осердям та елементом реакції, який повинен перетинати магнітний потік.

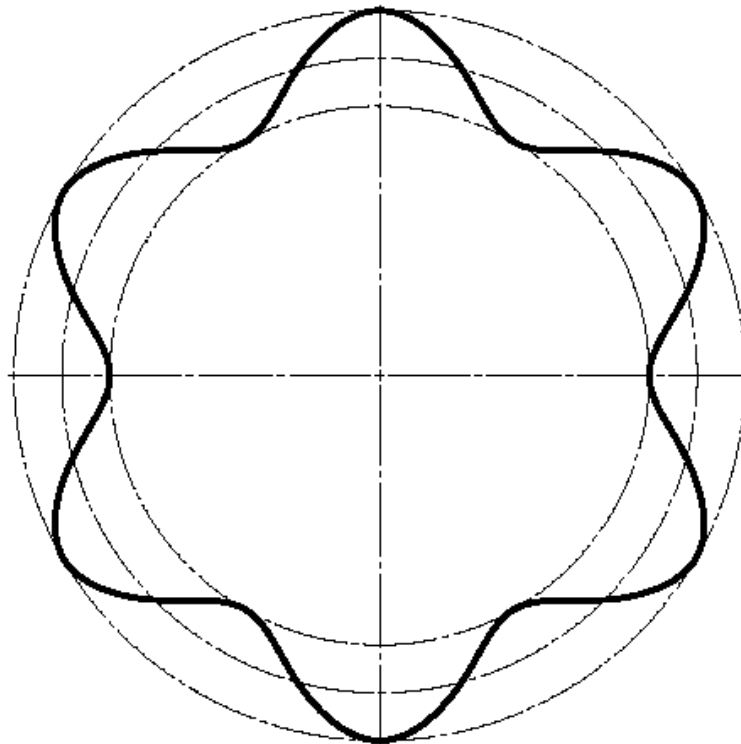


Рис. 2.2. Схематичне відображення багатохвильової системи

Задачею проектування механічної системи є створення конструкції, яка буде забезпечувати можливість хвильового редукування швидкості обертання, можливість роботи з різною кількістю механічних хвиль, надійне кріплення з елементом реакції та його мінімальний хід.

Мінімальний хід елемента реакції необхідний для зменшення магнітного опору шляхом мінімізації повітряного проміжку до котушки з осердям.

Висновок до розділу

У даному розділі була описана запропонована конструкція хвильового приводу на постійних магнітів, яка буде досліджуватись та оптимізуватись впродовж подальшої роботи, були сформульовані задачі, для електромагнітного та механічного розрахунків, що визначило чіткі цілі подальшої роботи.

3 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК

3.1 Вибір геометрії та принципу дії полюсу

Для створення конструкції, яка б забезпечувала у рівній степені як притягання, так і відштовхування елементу реакції відносно котушки з осердям, необхідно використовувати джерело незалежного магнітного поля на елементі реакції, що в даній роботі буде постійний магніт по причинах описаним в розділі 2.2.

Аналітичні методи розрахунку магнітного поля та механічної сили, яку воно створює, не дозволяють працювати з системами складної геометрії та сильно ускладнюють розрахунок при урахуванні насичення магнітопроводу, тому для розрахунку даної машини будуть використовуватись чисельні методи.

У якості пакетів для розрахунку було обрано пакети COMSOL Multiphysics 5.4 та Matlab 2020a.

Для отримання електромагнітної системи полюсу, що відповідає поставленій задачі необхідно підібрати ефективний спосіб взаємодії магнітного поля котушки з магнітним полем постійного магніту.

Параметри моделей, що приведені нижче:

- максимальна сили котушки – 2000 А
- сила постійного магніту – 0.3 Тл
- відносна магнітна провідність магнітопроводів – 2000 в.о.

Найскладнішими моментами роботи полюсу є притягання елементу реакції при максимальному повітряному проміжку та відштовхування елементу реакції при мінімальному повітряному проміжку. Зважаючи на це в подальшому будуть приводитись рисунки розподілу магнітної індукції саме в цих режимах.

При вказанні величини сили, що створюється магнітним полем правило знаків обрано наступним чином: знак «+» позначає відштовхування елементу реакції (рух вгору), знак «-» - притягання елементу реакції (рух вниз).

Варіант 1

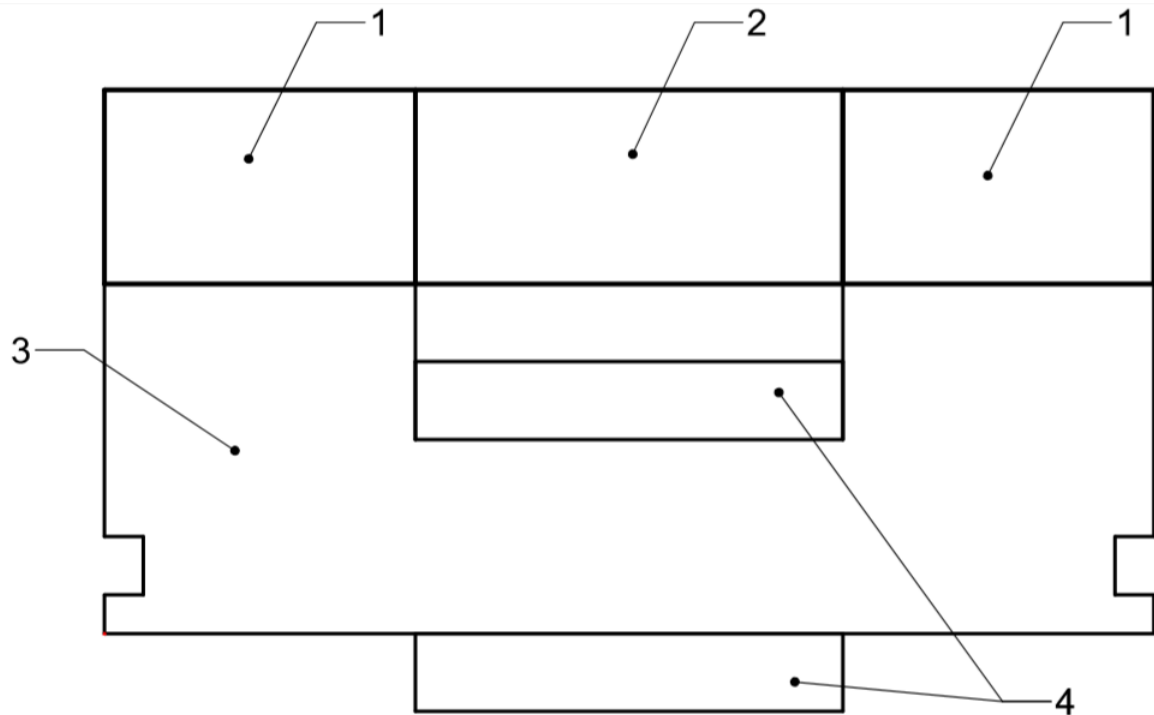


Рис. 3.1. Ескіз полюсу. Варіант 1.

1 – магнітопроводи, що прилягають до постійного магніту, 2 – постійний магніт, 3 – магнітопровід, 4 – котушка.

На Рис. 3.1 зображений ескіз першого варіанту полюсу. Данна система складається з нерухомого магнітопроводу, на якому намотана котушка, постійного магніту та двох магнітопроводів по торцям магніту. Постійний магніт з приєднаними до нього магнітопроводами є рухомими, та являють собою елемент реакції.

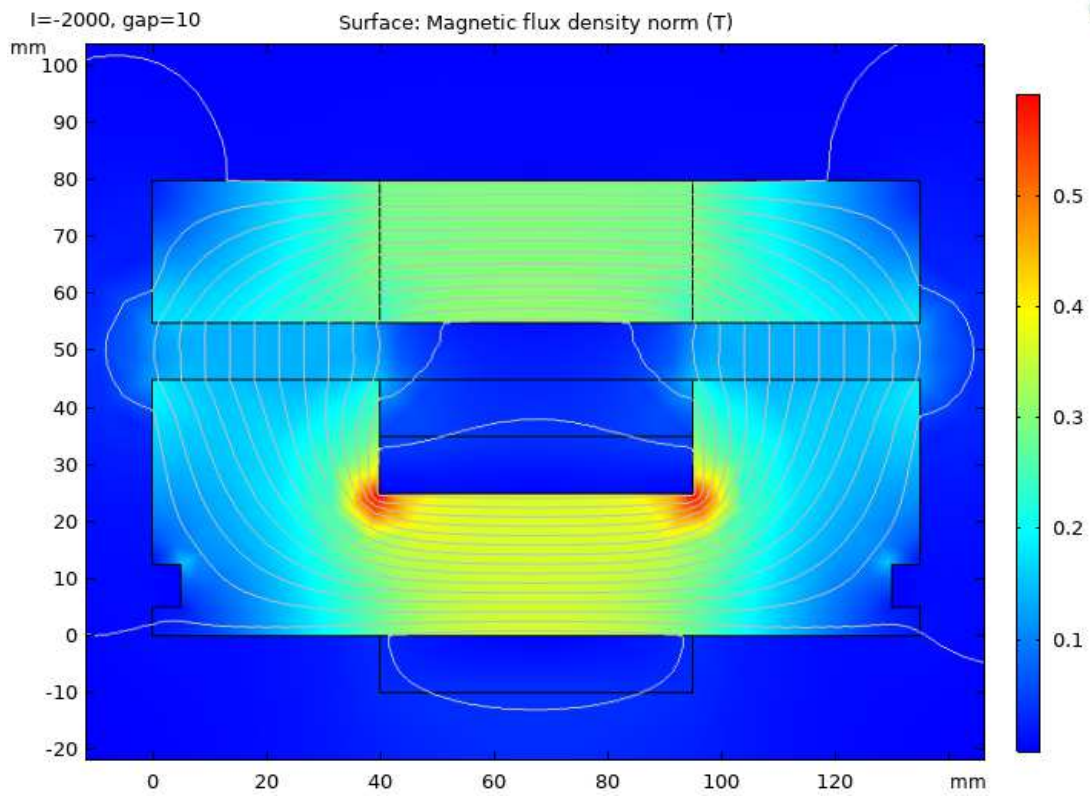


Рис. 3.2. Розподіл магнітної індукції. Повітряний проміжок – 10 мм. Струм на притягання елемента реакції

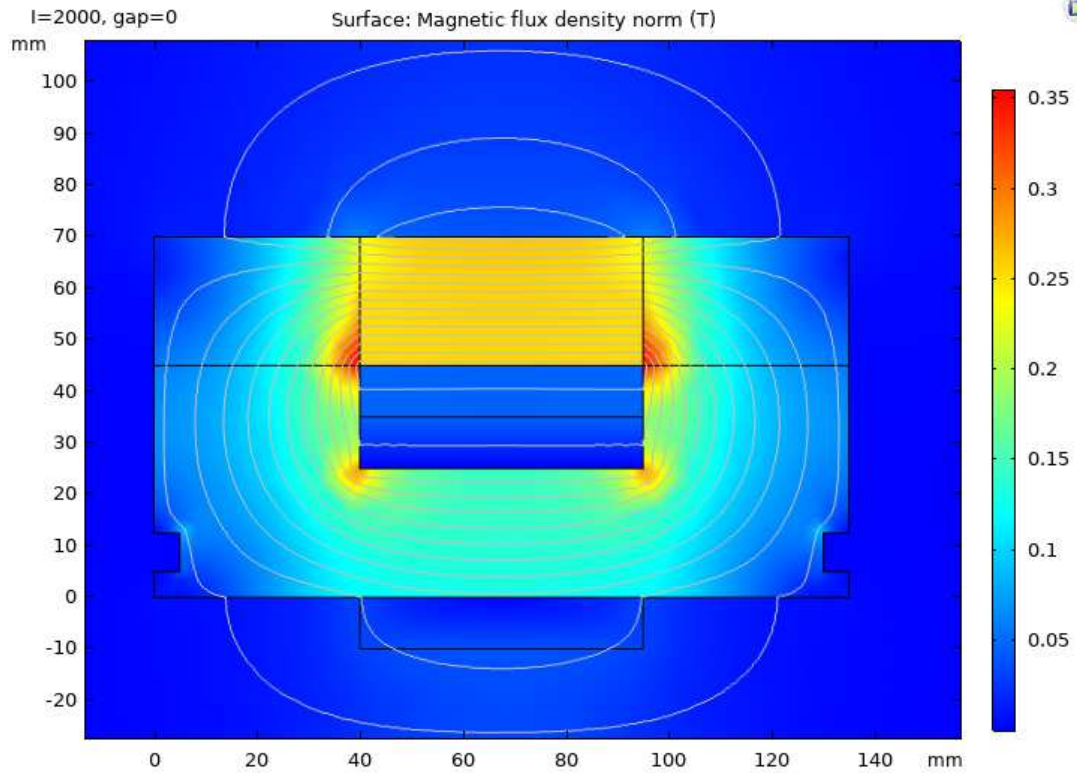


Рис. 3.3. Розподіл магнітної індукції. Повітряний проміжок – 0 мм. Струм на відштовхування елемента реакції.

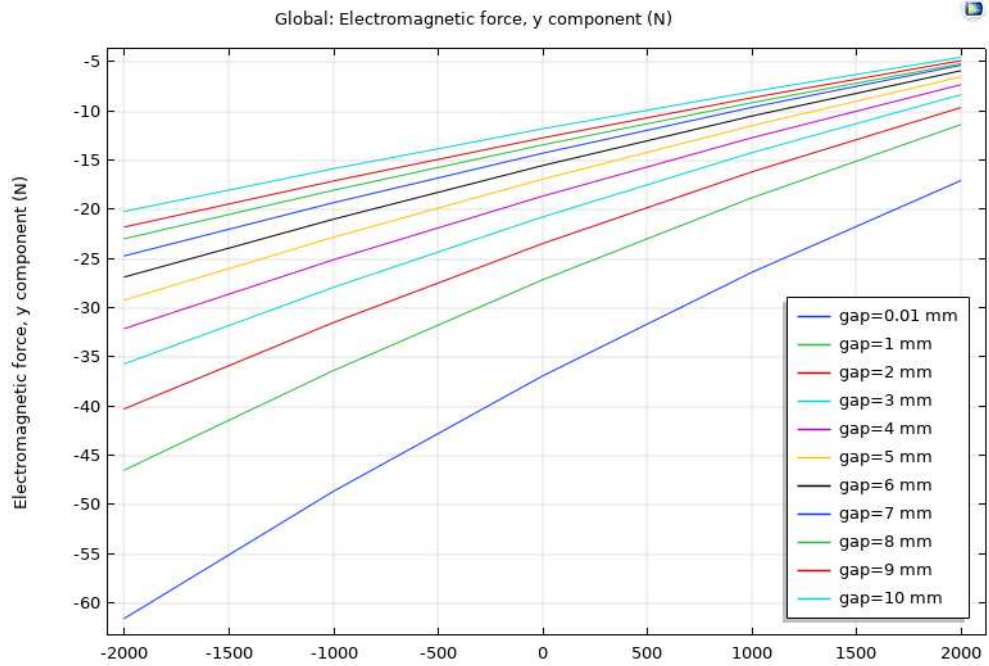


Рис. 3.4. Графік залежності сили взаємодії від сили струму при різних повітряних проміжках.

Як видно з Рис. 3.4, наведена конструкція не забезпечує можливості відштовхування елемента реакції в заданому діапазоні значень сили котушки.

Проведемо розрахунок при збільшеному діапазоні сили котушки.

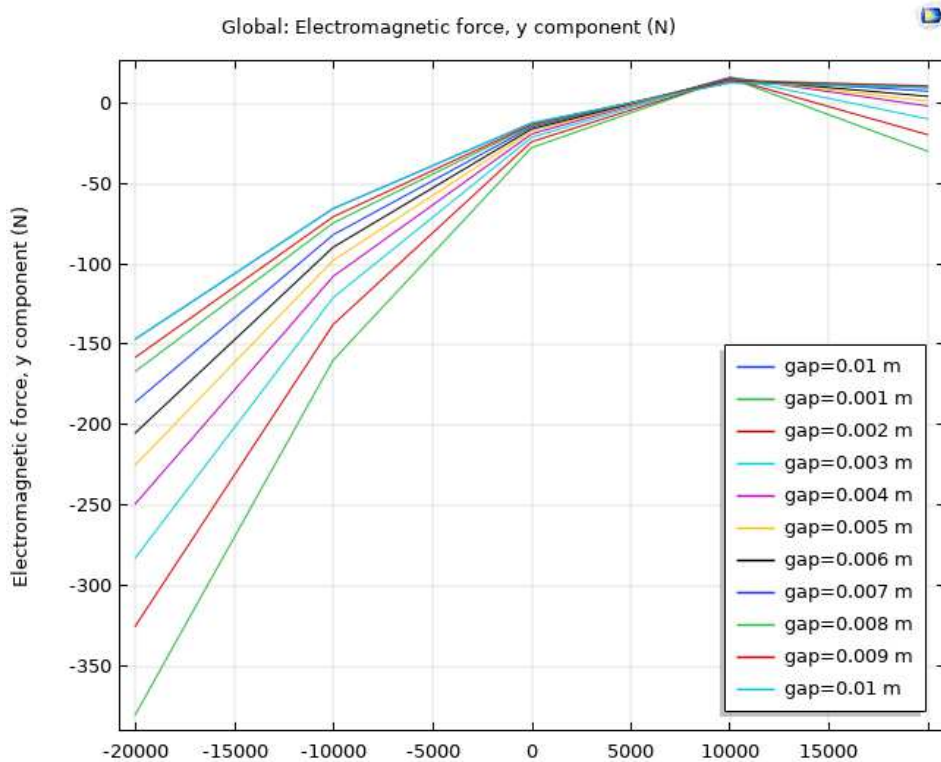


Рис. 3.5. Графік залежності сили взаємодії від сили струму при різних повітряних проміжках (збільшений діапазон).

Як видно з Рис. 3.5, при значному збільшенні струму відбувається відштовхування, проте при подальшому збільшенні струму знак сили знову змінює знак.

Зважаючи на значну несиметричність силової характеристики відносно нуля, потребу дуже великих струмів та забезпечення невеликої сили відштовхування, конструкція вважається невдалою.

Варіант 2

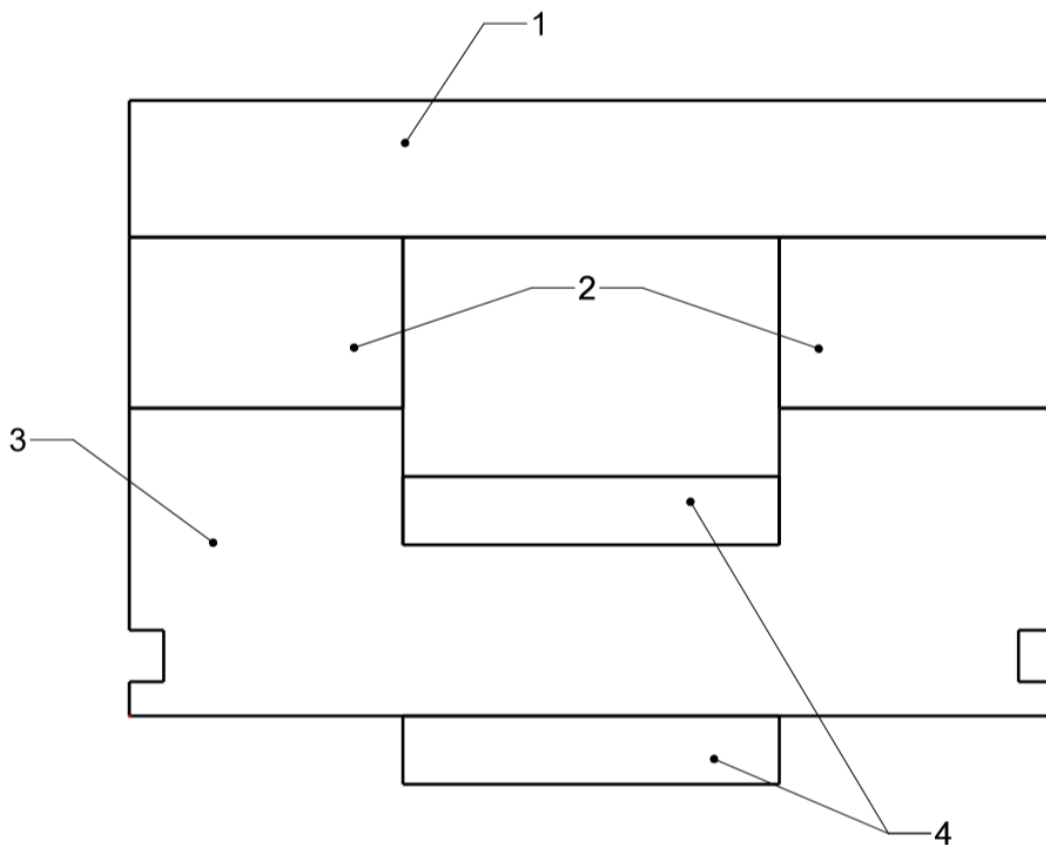


Рис. 3.6. Ескіз полюсу. Варіант 2.

1 – магнітопровід, що прилягає до постійних магнітів, 2 – постійні магніти, 3 – магнітопровід, 4 – котушка.

На Рис. 3.6 зображений ескіз другого варіанту полюсу. Данна система складається з нерухомого магнітопроводу, на якому намотана котушка, постійних магнітів та магнітопроводу, що з'єднує 2 магніти. Постійні магніти з приєднаним до них магнітопроводом є рухомими, та являють собою елемент реакції. Магніти намагнічені вздовж вертикальної осі та мають протилежні напрямки намагніченості.

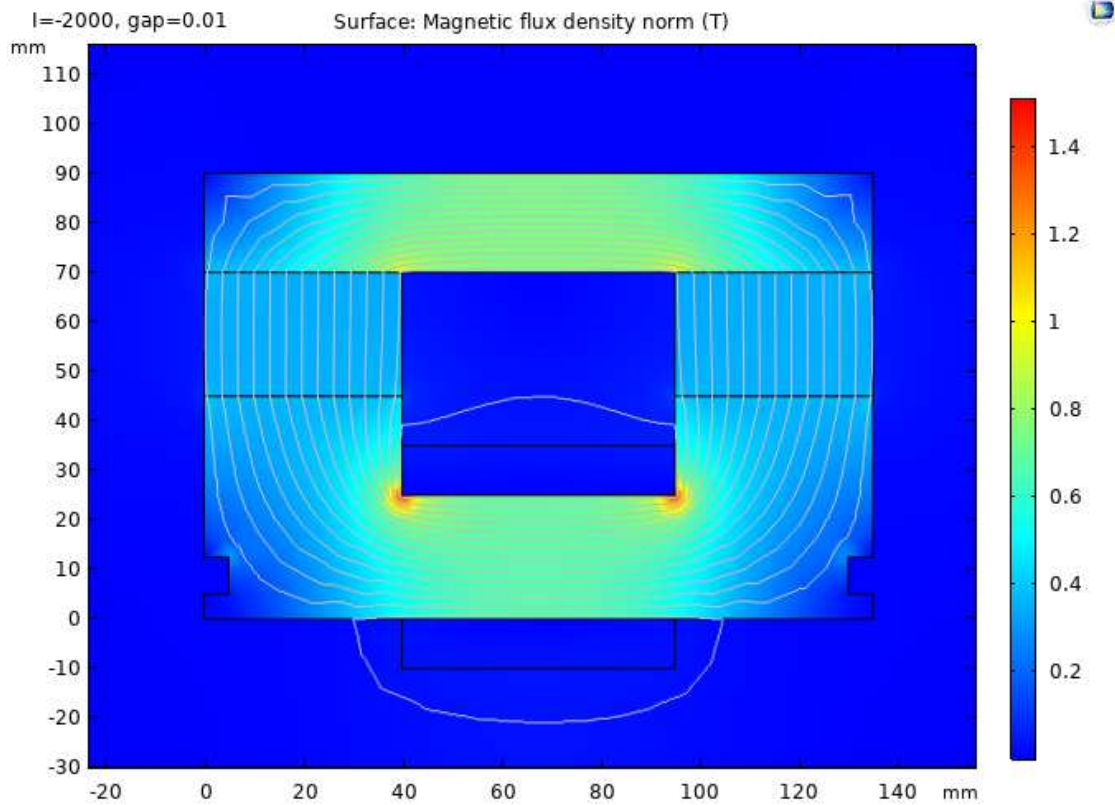


Рис. 3.7. Розподіл магнітної індукції. Повітряний проміжок – 10 мм. Струм на притягання елемента реакції.

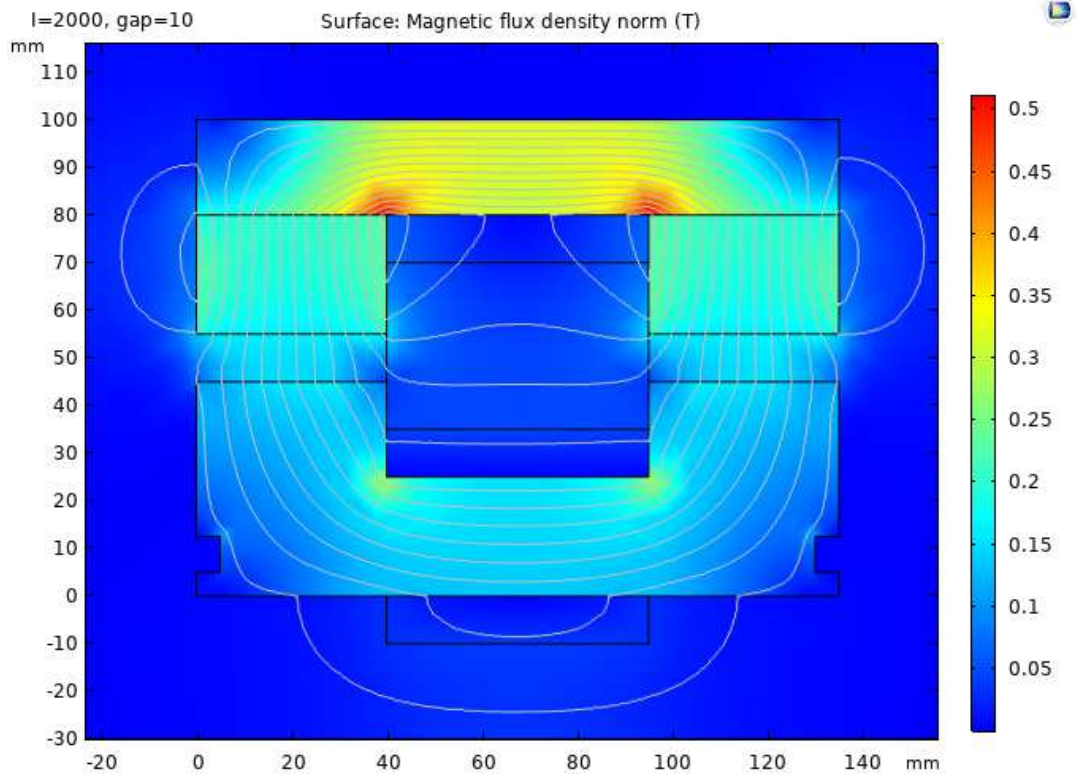


Рис. 3.8. Розподіл магнітної індукції. Повітряний проміжок – 0 мм. Струм на відштовхування елемента реакції.

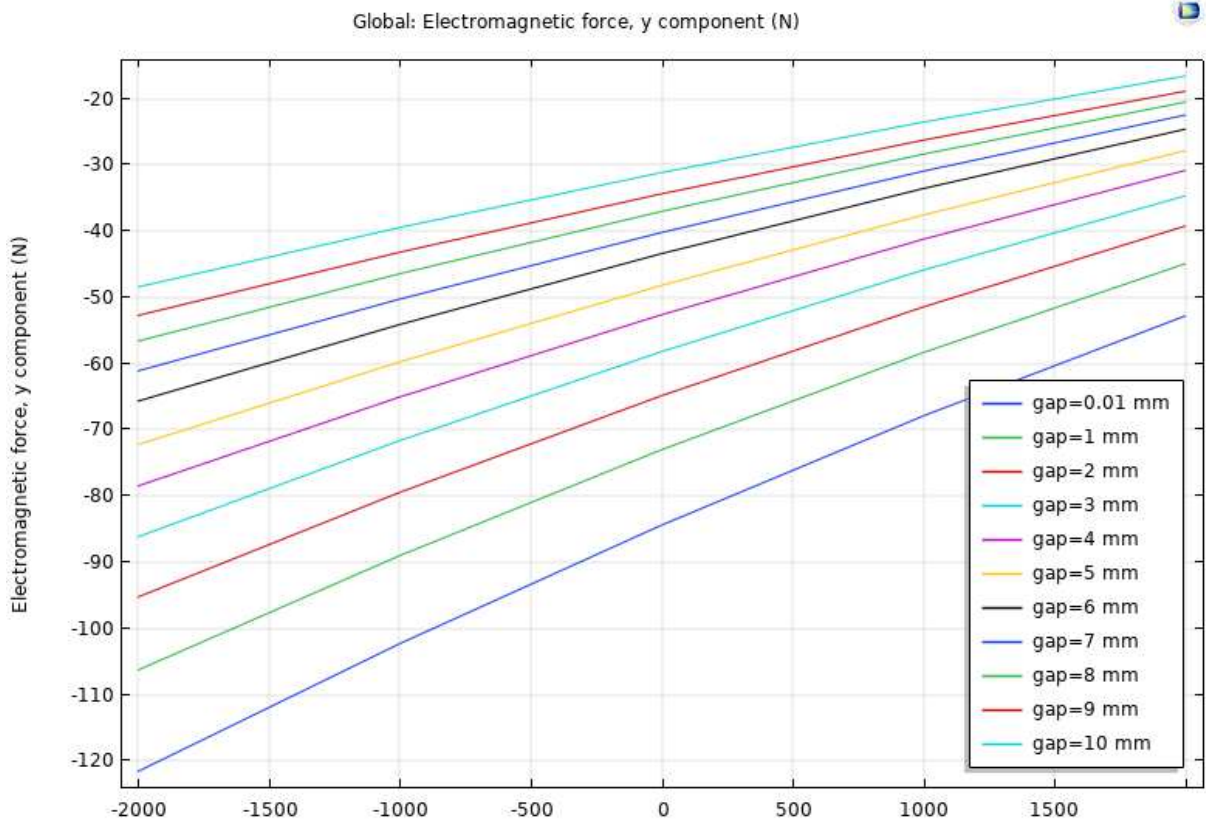


Рис. 3.9. Графік залежності сили взаємодії від сили струму при різних повітряних проміжках.

Як видно з Рис. 3.9, даний варіант має такі ж проблеми, як і у першого варіанту, тому теж вважається невдалим.

Можемо зробити висновок, що відштовхування елемента реакції від котушки з осердям шляхом створення зустрічного магнітного потоку є неефективним.

Варіант 3

Урахувавши помилки, що були зроблені в варіантах 1 та 2, було прийнято рішення не створювати зустрічний магнітний потік до потоку постійного магніту, а керувати шляхом замикання даного потоку.

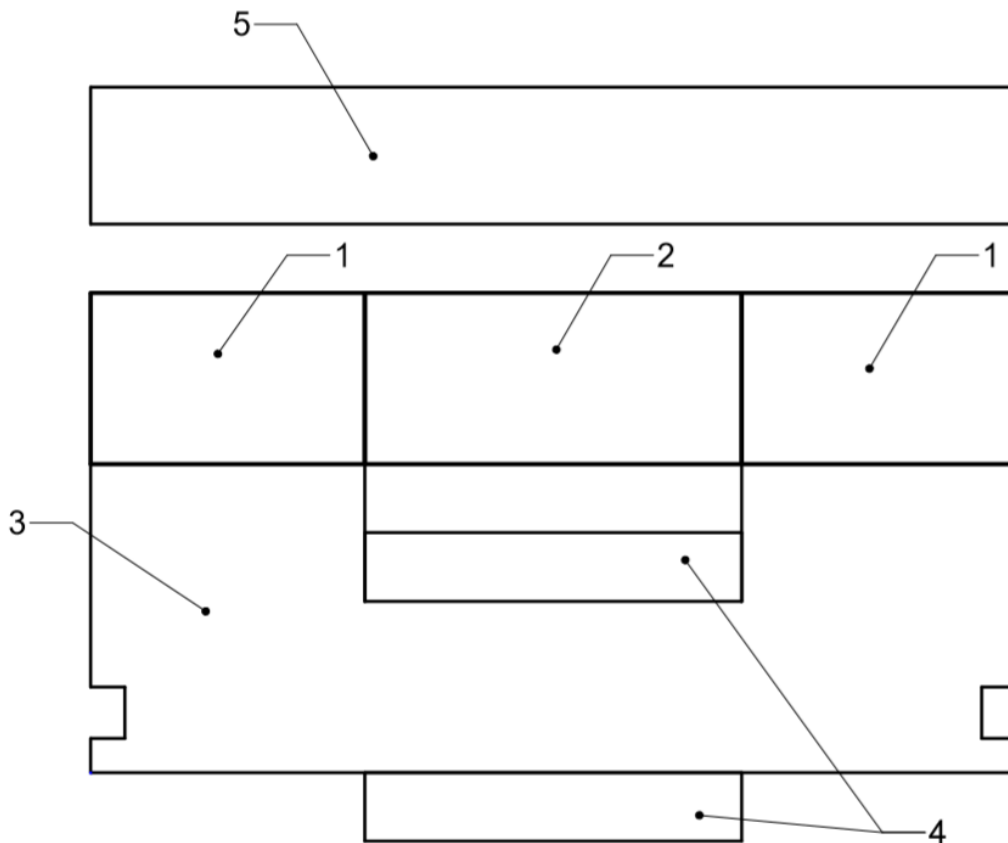


Рис. 3.10. Ескіз полюсу. Варіант 3.

1 – магнітопровід, що прилягає до постійних магнітів, 2 – постійні магніти, 3 – магнітопровід, 4 – котушка, 5 – верхній магнітопровід.

На Рис. 3.10 зображений ескіз третього варіанту полюсу. Данна система складається з нерухомого магнітопроводу, на якому намотана котушка, постійного магніту, двох магнітопроводів по торцям магніту та верхнього нерухомого магнітопроводу. Постійний магніт з приєднаними до нього магнітопроводами є рухомими, та являють собою елемент реакції.

Принцип дії даної схеми полягає в тому, що за допомогою струму в котушці можливо керувати через який магнітопровід (основний чи верхній) замкнеться магнітний потік постійного магніту, а отже до якого магнітопроводу буде притягуватись елемент реакції.

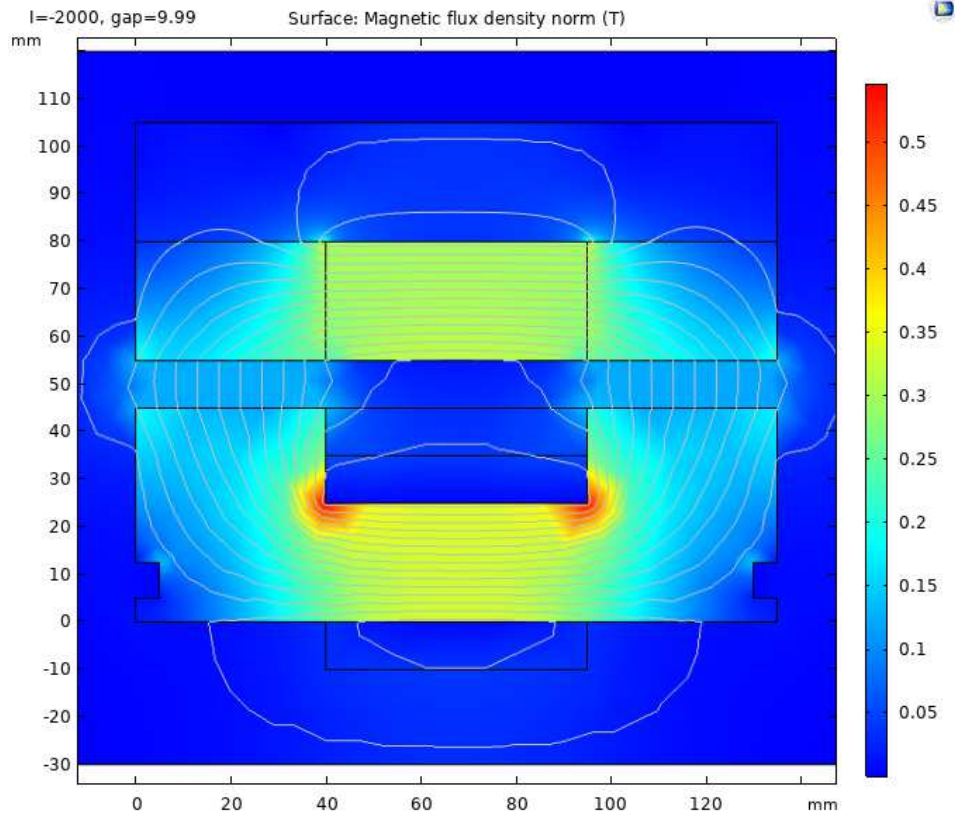


Рис. 3.11. Розподіл магнітної індукції. Повітряний проміжок – 10 мм. Струм на притягання елемента реакції.

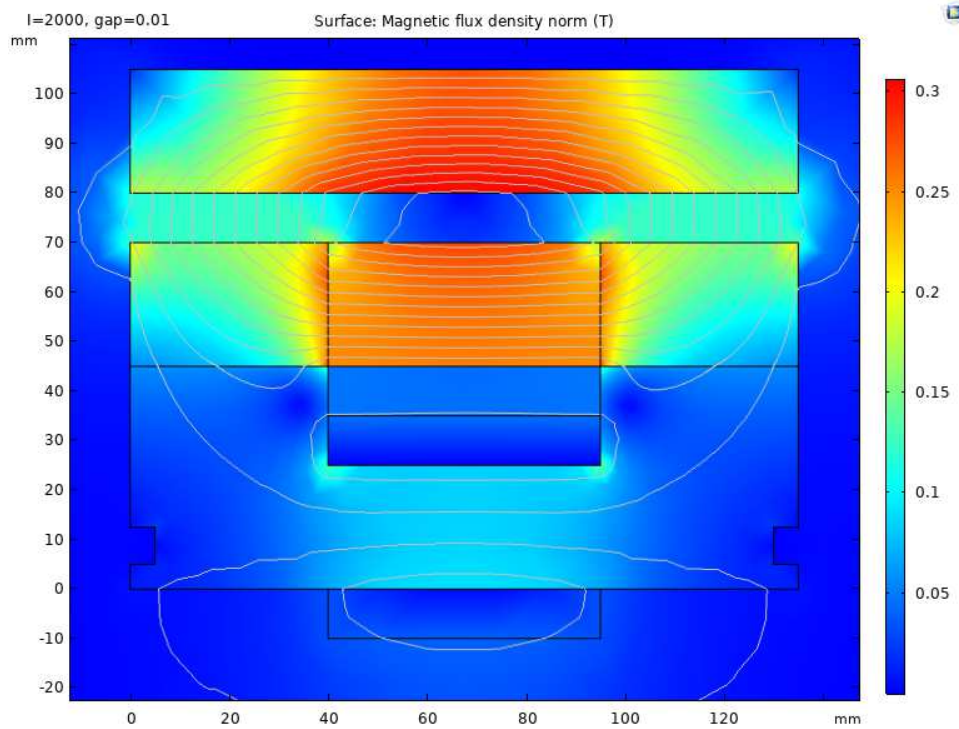


Рис. 3.12. Розподіл магнітної індукції. Повітряний проміжок – 0 мм. Струм на відштовхування елемента реакції.

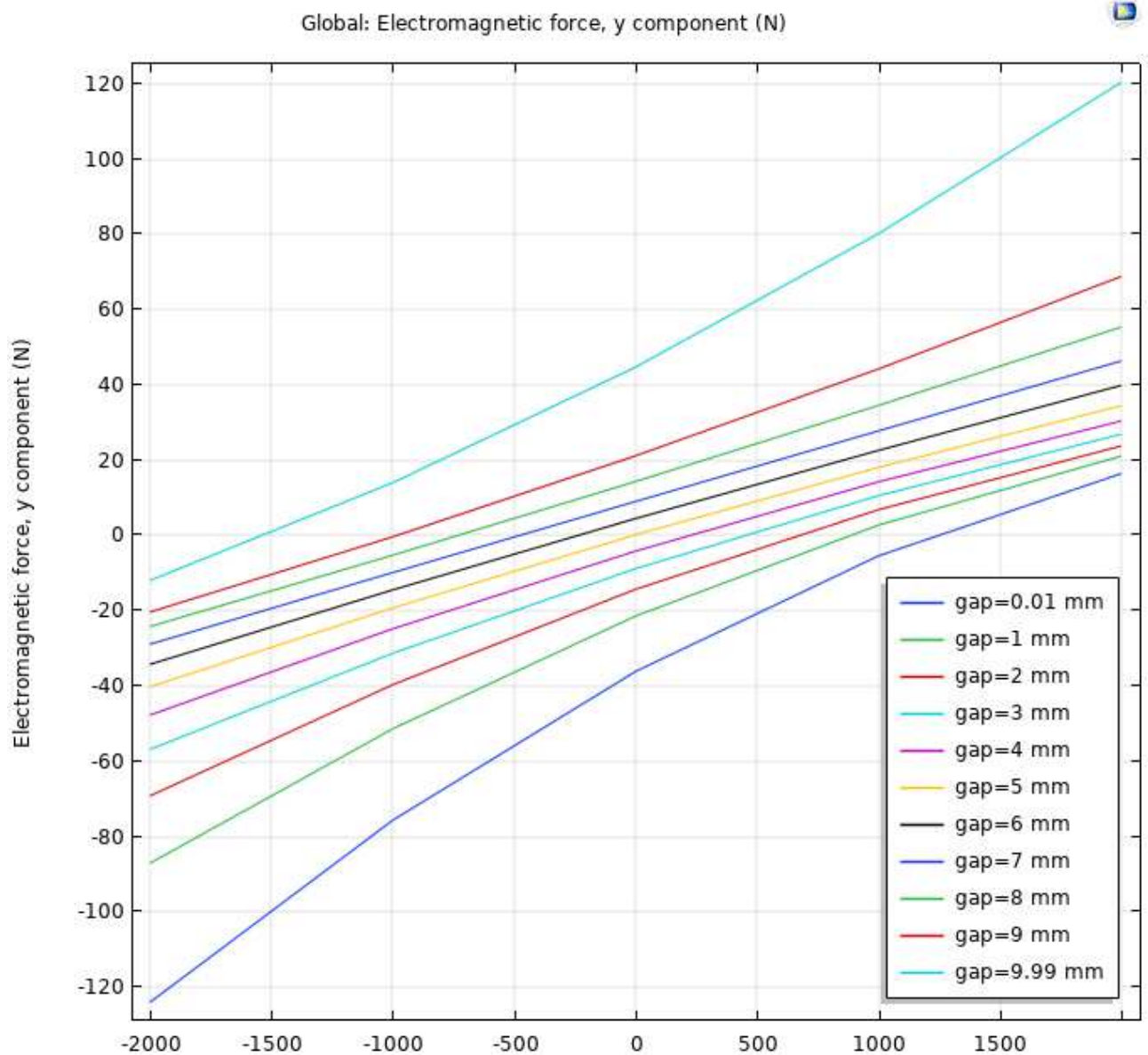


Рис. 3.13. Графік залежності сили взаємодії від сили струму при різних повітряних проміжках.

Як видно на Рис. 3.13, силові характеристики лежать по різні сторони від горизонтальної осі, що означає можливість як притягання, так і відштовхування. Характеристики є приблизно симетричними відносно початку координат, з чого можемо зробити висновок, про те, що для відштовхування та притягання необхідний приблизно однаковий струм.

Ознакою працездатності системи є те, що усі точки, що відповідають максимальному позитивному струму лежать в позитивній півплощині, а точки, що відповідають максимальному негативному струму – в негативній півплощині.

Данну ознаку більш наглядно видно на залежності сили від величини повітряного проміжку при різних струмах (Рис. 3.14).

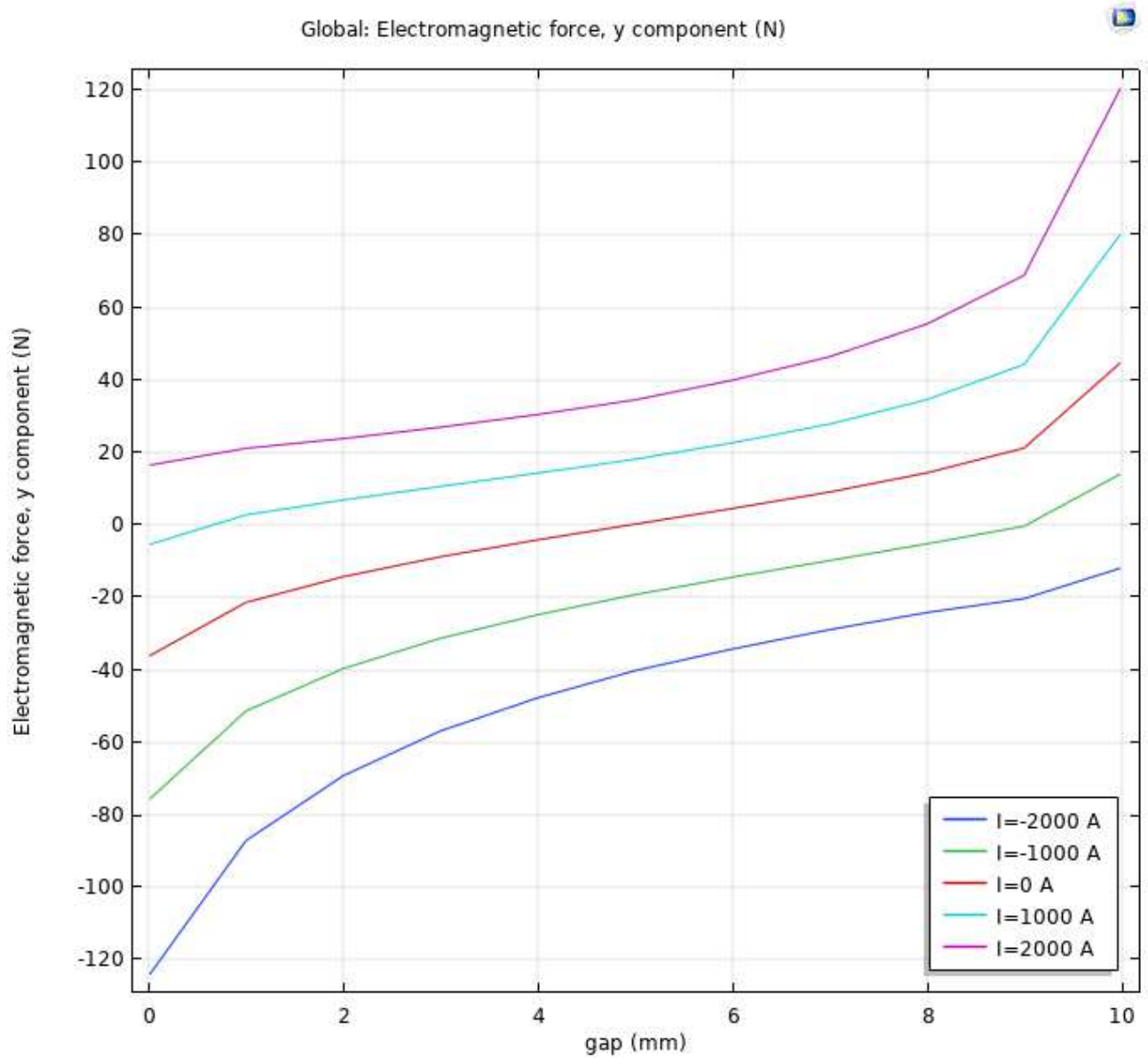


Рис. 3.14. Графік залежності сили від величини повітряного проміжку при різних величинах сили котушки.

3.2 Методика розрахунку полюсу хвильового двигуна

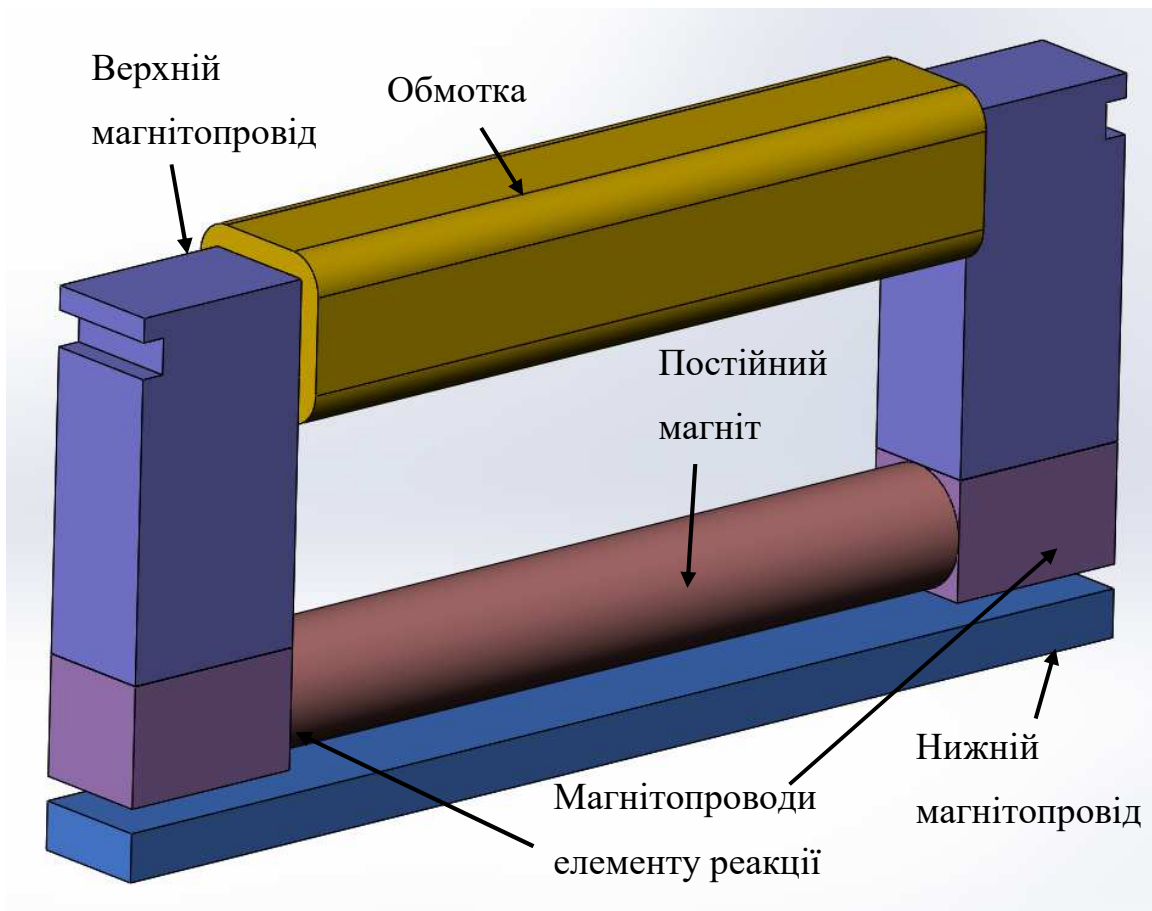


Рис. 3.15 Полюс хвильового двигуна на постійних магнітах

Дослідження впливу магнітної провідності

В показаному досліді рухомий елемент знаходиться в верхньому положенні, а струм прикладений у такому напрямку, щоб забезпечити силу вниз. Як бачимо при збільшенні магнітної проникності сила зростає, екстремуми відсутні. При недостатній магнітній проникності сила на відштовхування не виникає.

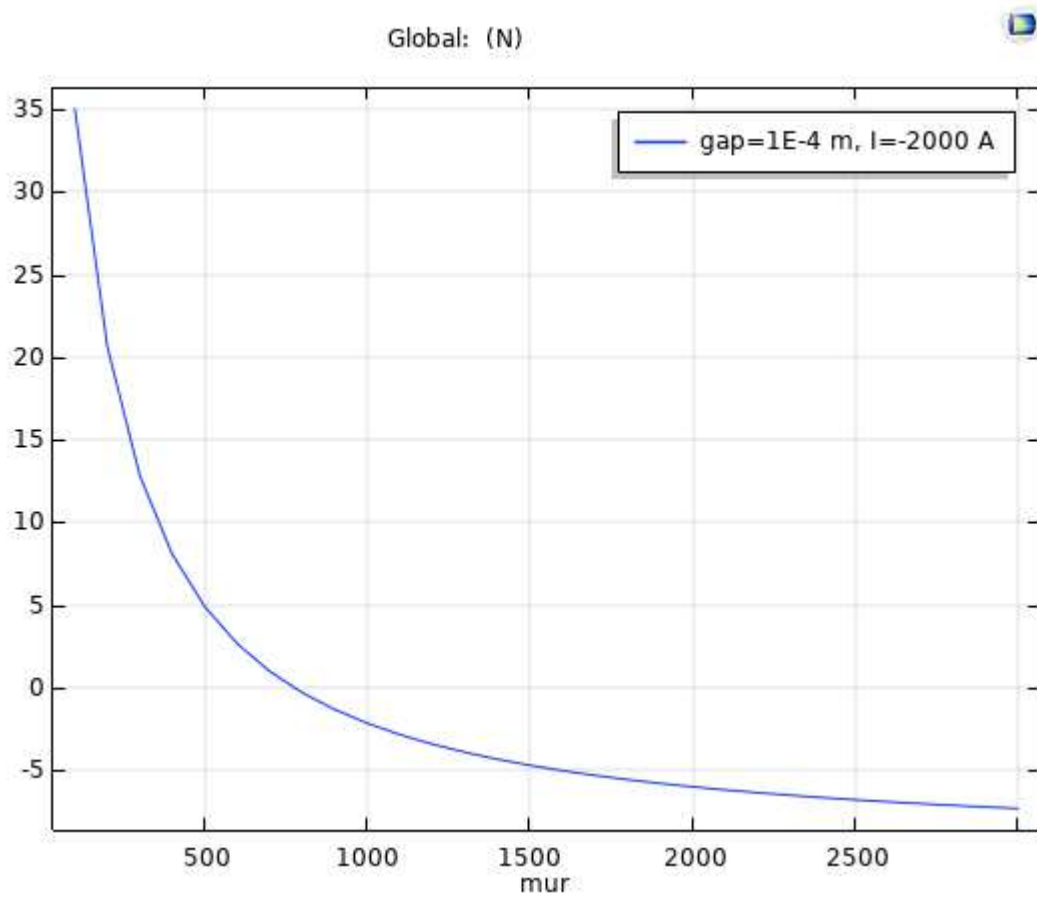


Рис. 3.16 Залежність сили взаємодії від магнітної проникності сталі магнітопроводу

Для подальших розрахунків оберемо криву намагнічення для урахування впливу насичення магнітопроводу.

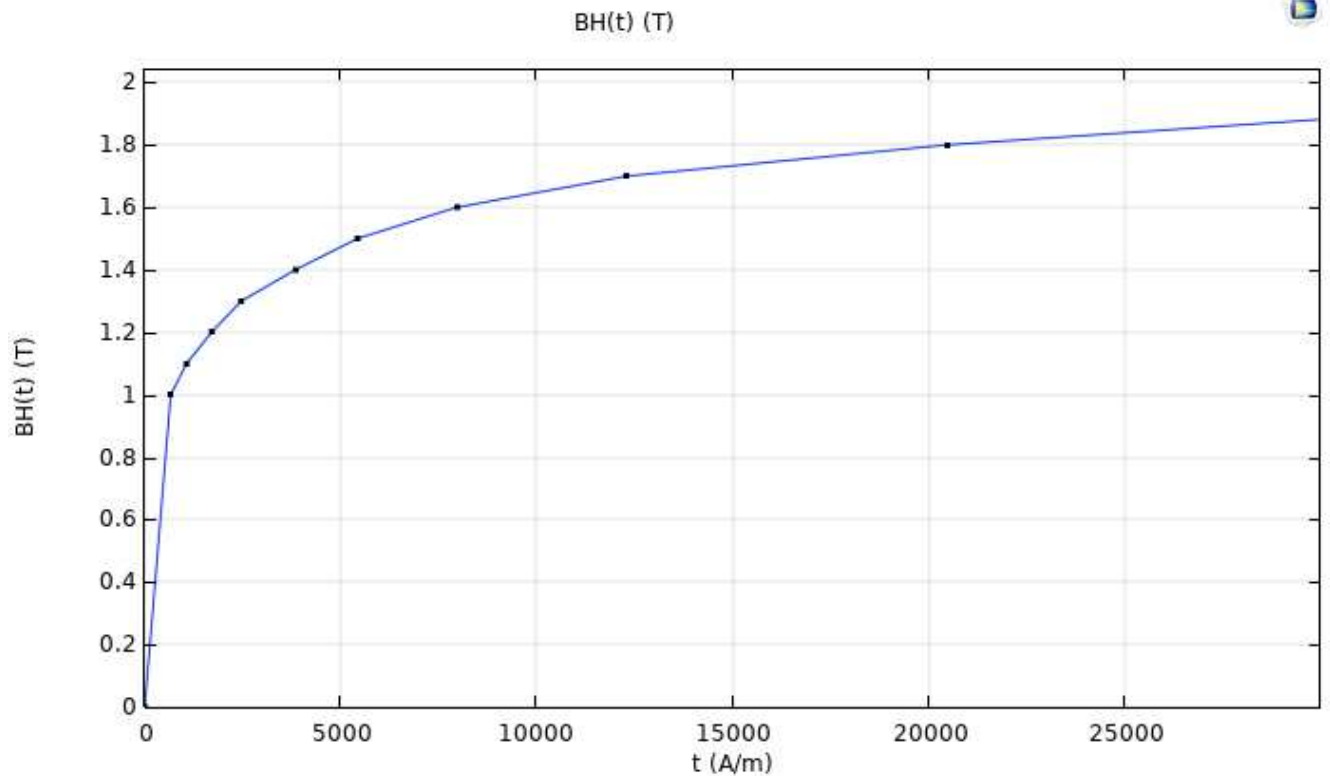


Рис. 3.17 Крива намагнічення електротехнічної сталі

Дослідження залежності сили взаємодії від величини залишкової індукції постійного магніту

На Рис. 3.18 зображені графіки залежності сили взаємодії в залежності від величини залишкової індукції постійного магніту. Синя лінія відповідає верхньому положенню та негативному знаку струму, зелена – нижньому положенню, позитивному знаку струму. Знаки сили обрані так, що корисна складова є негативною в обох випадках. Таким чином бачимо, що для різних положень оптимальна величина залишкової індукції є різною. Данна проблема буде коригуватись у наступному кроці. Для подальших розрахунків оберемо величину залишкової індукції, що відповідає точці перетину цих 2 кривих.

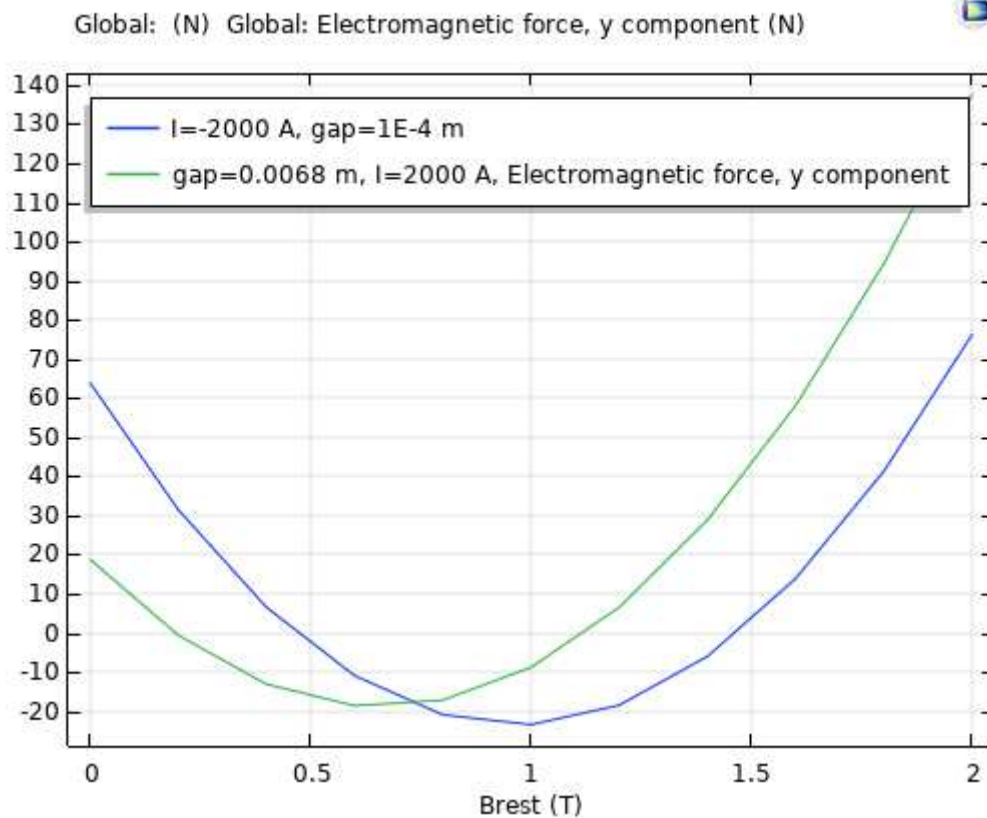


Рис. 3.18 Залежність сили взаємодії від залишкової індукції постійного магніту в крайніх положення рухомого елемента

Дослідження впливу площі поперечного перерізу нижнього магнітопроводу на силу взаємодії

Для забезпечення однакової сили взаємодії в обох напрямках було досліджено вплив площі поперечного перерізу нижнього магнітопроводу. Знаки сили обрані так, що корисна складова є від'ємною в обох випадках. Оптимальною площею поперечного перерізу є площа, що відповідає точці перетину кривих. Для даного випадку оберемо значення 80 мм^2 .

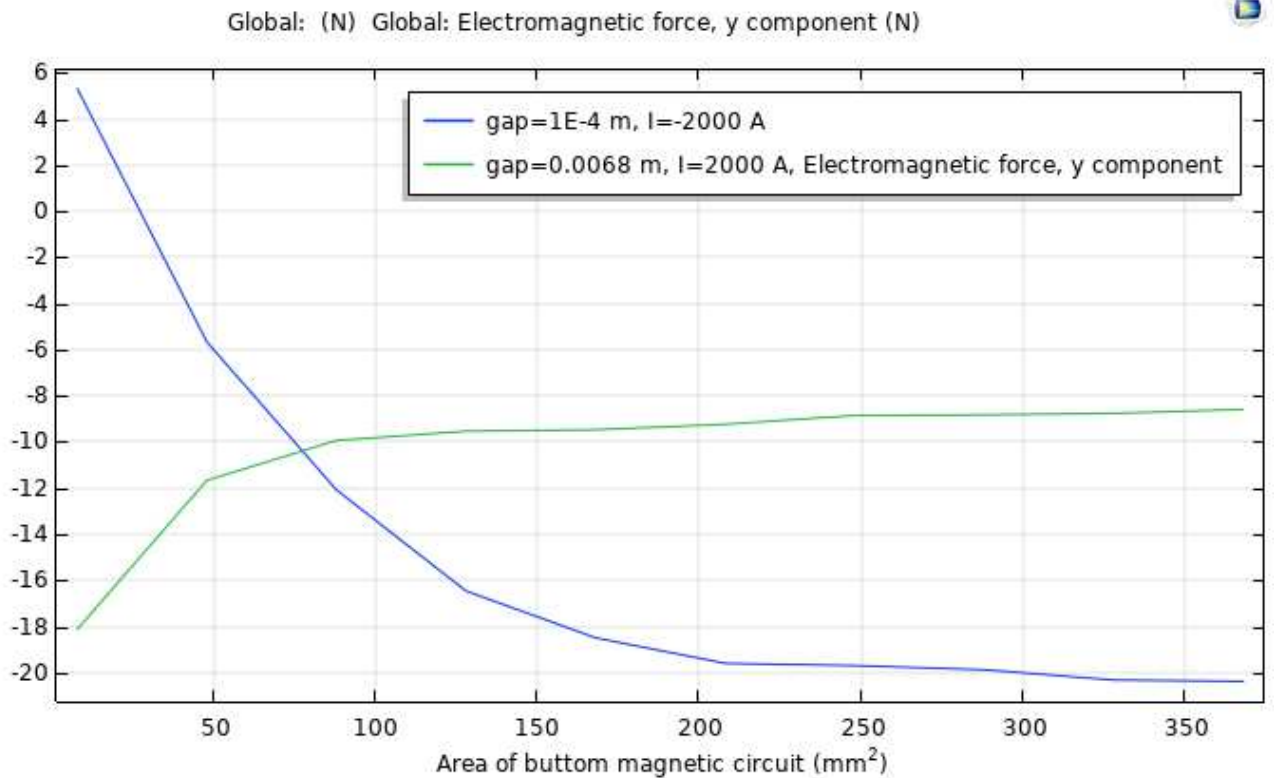


Рис. 3.19 Залежність сили взаємодії від площі поперечного перерізу нижнього магнітопроводу в крайніх положеннях рухомого елемента.

Уточнення залишкової індукції постійних магнітів

Так як на попередньому кроці ми змінили площу поперечного перерізу нижнього магнітопроводу, а отже і магнітний опір, доречно уточнити оптимальне значення залишкової індукції постійних магнітів. Зменшення площі поперечного перерізу викликало насичення при високих значеннях залишкової індукції. Як видно з графіку екстремуми функцій мають незначну розбіжність. Для повного її усунення необхідно декілька разів повторити кроки 3 та 4, знайшовши глобальний мінімум функції методом Гаусса-Зейделя.

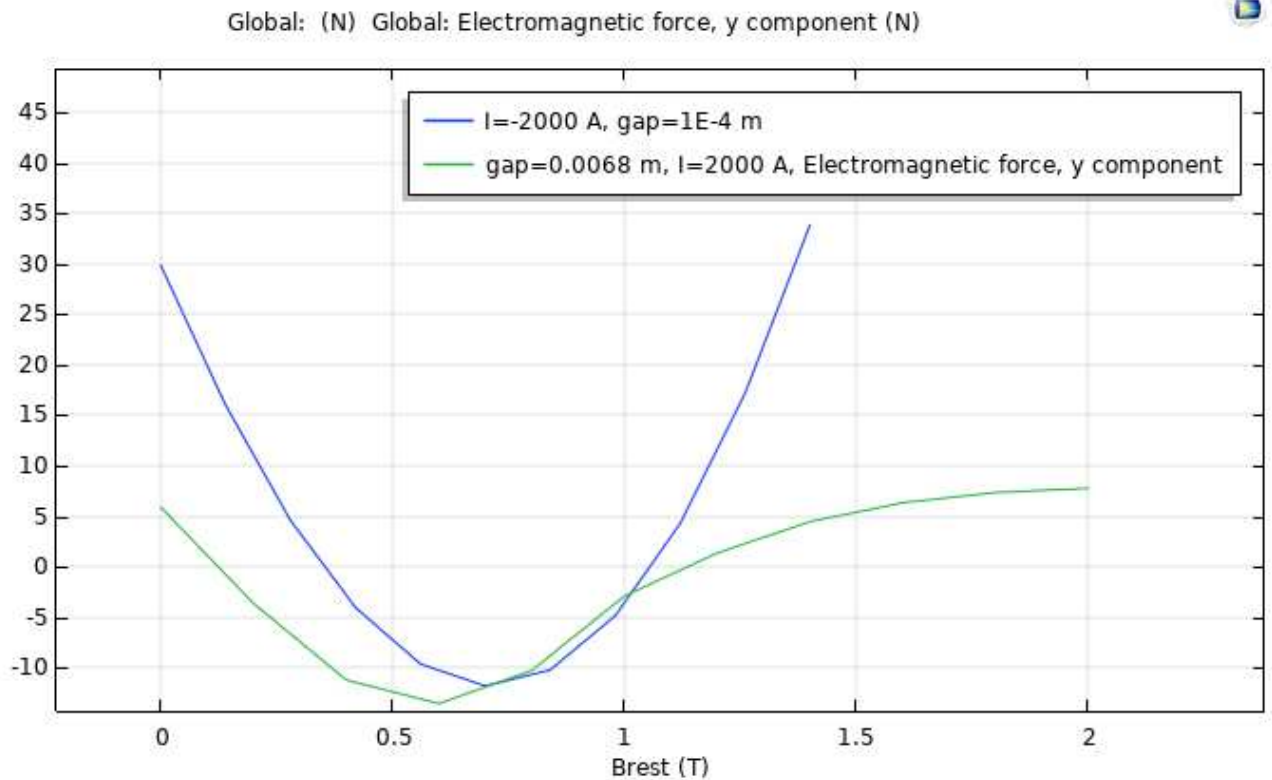


Рис. 3.20 Залежність сили взаємодії від залишкової індукції постійного магніту в крайніх положення рухомого елемента після підбору оптимальної площі поперечного перерізу нижнього магнітопроводу.

Побудова сімейства силових характеристик

Результатом розрахунку одного полюсу хвильового двигуна з постійними магнітами можна вважати сімейство силових характеристик, що відображають силу взаємодії в залежності від струму в котушці та положення рухомого елемента. Для того, щоб машина була працездатною, криві, що відповідають максимальному та мінімальному значенню струму, повинні лежати по різні сторони від осі X та не перетинати її у всьому діапазоні значень величини повітряного проміжку. Параметри системи можна вважати якісно підібраними, так як мінімальні абсолютні значення сил даних кривих приблизно однакові, а крива, що відповідає відсутності струму в котушці перетинає вісь X при середньому положення рухомого елемента.

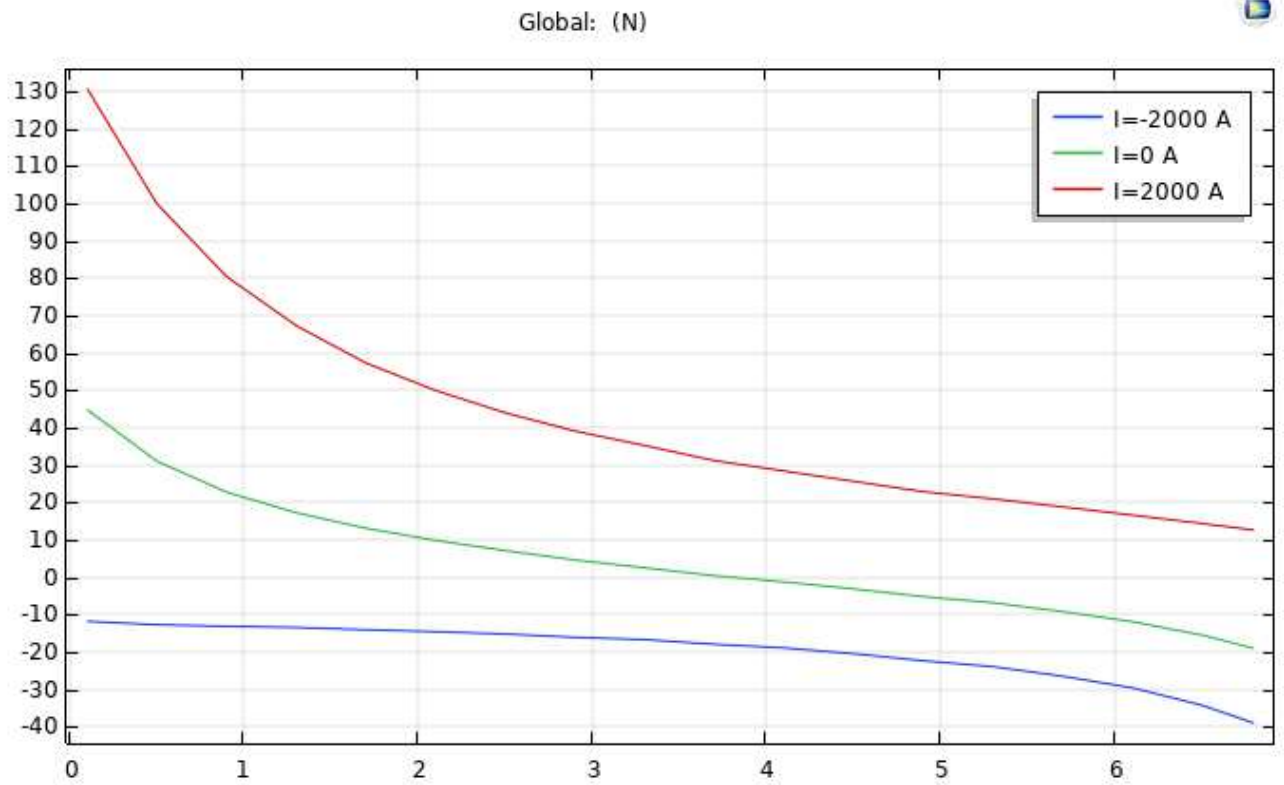


Рис. 3.21 Силкові характеристики полюсу (залежність сили взаємодії від положення рухомого елемента та струму в котушці).

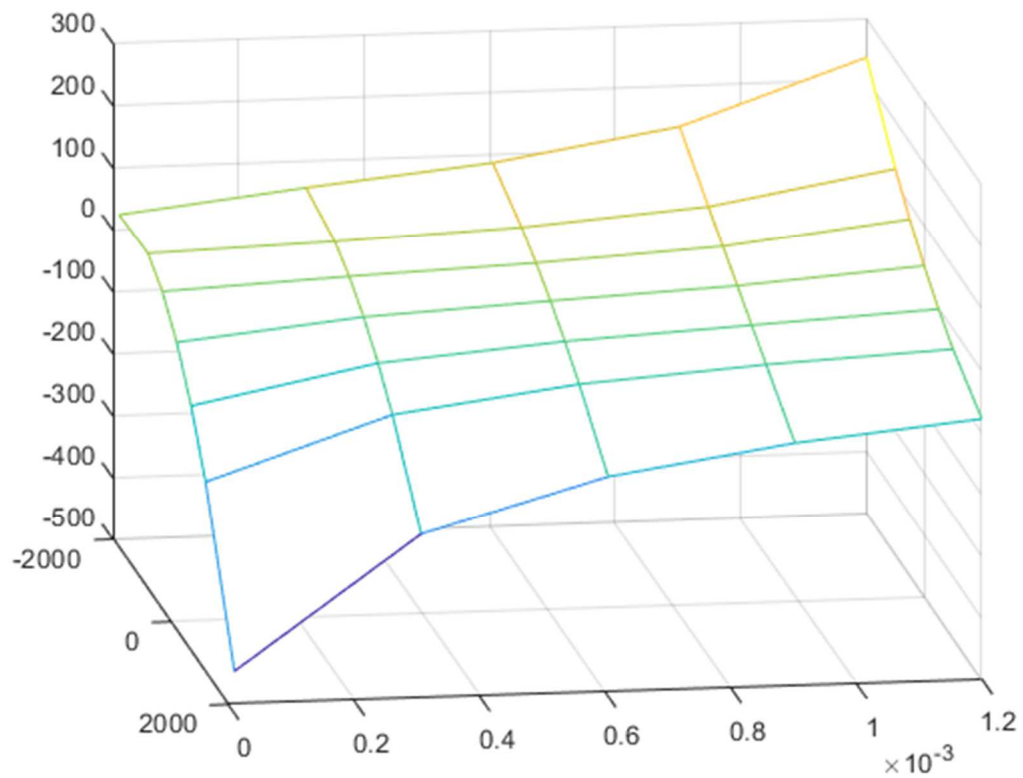


Рис. 3.22 Тривимірне відображення силової характеристики.

Висновок до розділу

У даному розділу шляхом розрахунків у пакеті COMSOL Multiphysics було обрано оптимальну конструкцію електромагнітної системи, досліджено параметри полюсу, виконана оптимізацію геометрії та, як результат, отримано силову характеристику полюсу, що буде використовуватись у подальших розрахунках.

4 МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

4.1 Розрахунок кінематичної схеми при синусоїдальному розподілу сил

Для підтвердження працездатності запропонованої у розділі 2.3 кінематичної схеми було проведено механічний розрахунок в пакеті COMSOL Multiphysics з використанням бібліотеки Multibody Dynamics.

Модель кінематичної схеми складається з гнучкого елемента, внутрішнього та зовнішнього колеса. Для спрощення розрахунку зубці на шестернях відсутні, а елементи передають обертовий рух за рахунок значної сили тертя. До гнучкого елемента прикладена радіальна сила, що змінюється за синусоїдальним законом вздовж довжини гнучкого елемента. З плином часу синусоїда переміщується вздовж гнучкого елемента, що викликає рух механічних хвиль.

Результат розрахунку показаний у відеоролику «Кінематична схема при синусоїдальному розподілу сили.avi».

Як видно з Рис. 4.1 та відеоролику дана кінематична схема при синусоїдальному розподілу сил є працездатною.

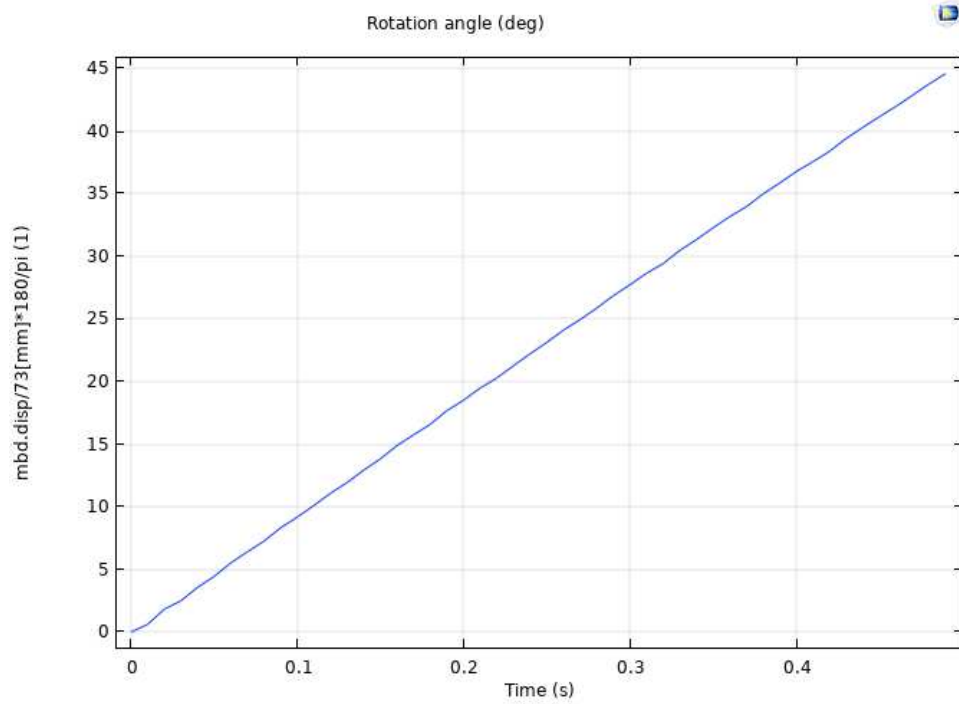


Рис. 4.1. Кут, на який повертається внутрішнє колесо, в залежності від часу при кількості хвиль $waves = 2$ та кутовій швидкості руху механічної хвилі 31.4 рад/с

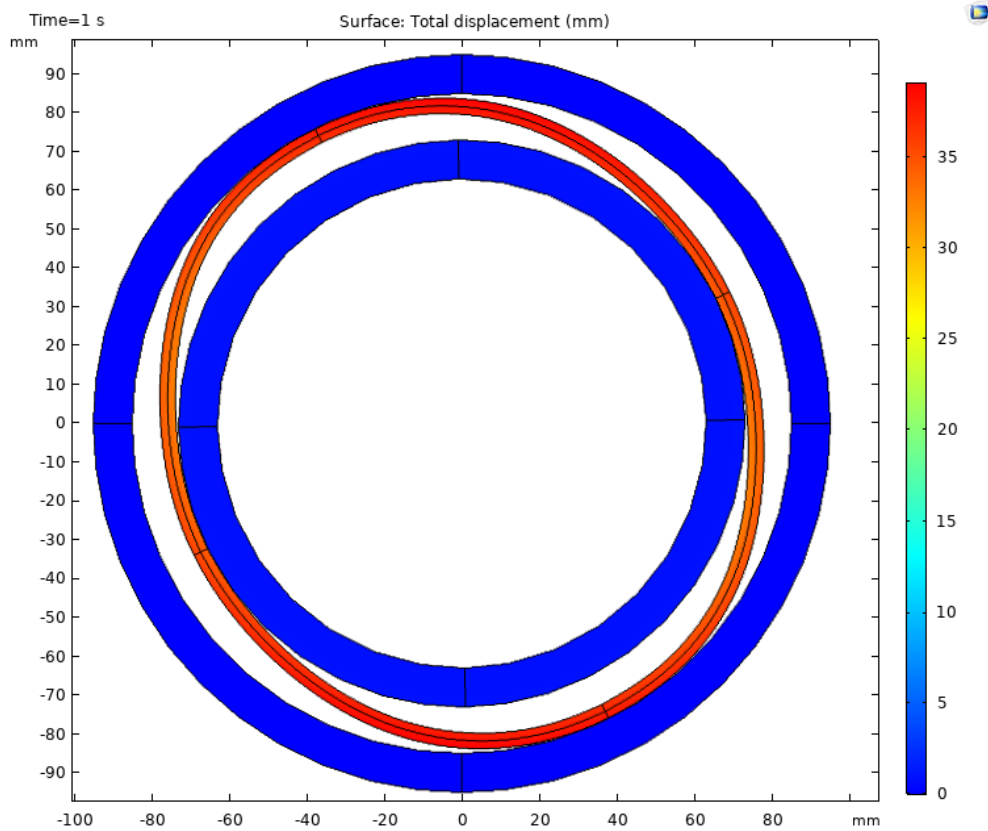


Рис. 4.1. Переміщення точок механічної частини хвильового приводу при прикладенні сили до гнучкого елемента, що змінюється по синусоїдальному закону вздовж довжини гнучкого елемента

4.2 Розрахунок кінематичної схеми при прямокутному розподілу сил

При використанні електромагнітної схеми, що описана у розділі 3, розподіл сили вздовж довжини гнучкого елемента очікується прямокутним. Для перевірки працездатності кінематичної схеми, що досліджується, було проведено механічний розрахунок, аналогічний до попереднього, але з прямокутним розподілом сили.

При складанні загальної збірки електромагнітної системи було обрано кількість полюсів – 32, тому розподіл сили повинен моделюватись відповідно до цього.

Математичний опис розподілу сили був виконаний за допомогою функції (4.1) в COMSOL:

$$\text{forceSquare}(\text{waves} * \text{sys2.phi} + \text{floor}(\omega * t / \text{angle}) * \text{angle}), \quad (4.1)$$

де forceSquare – меандр з кутовою швидкістю $\omega = 1$ рад/с,

waves – кількість механічних хвиль,

sys2.phi – кут точки в полярній системі координат,

ω – кутова швидкість руху механічних хвиль,

t – час,

angle – кут, що припадає на 1 полюс.

Конструкція « $\text{floor}(\omega * t / \text{angle}) * \text{angle}$ » забезпечує ступінчастий рух розподілу сили вздовж гнучкого елемента з плином часу. Таким чином математично описана дискретність розташування полюсів.

При $\text{waves} = 2$, $\text{angle} = \frac{360}{32} \cdot \frac{\pi}{180}$ в початковий момент часу $t = 0$ с маємо розподіл сили вздовж гнучкого елемента, що зображений на Рис. 4.2.

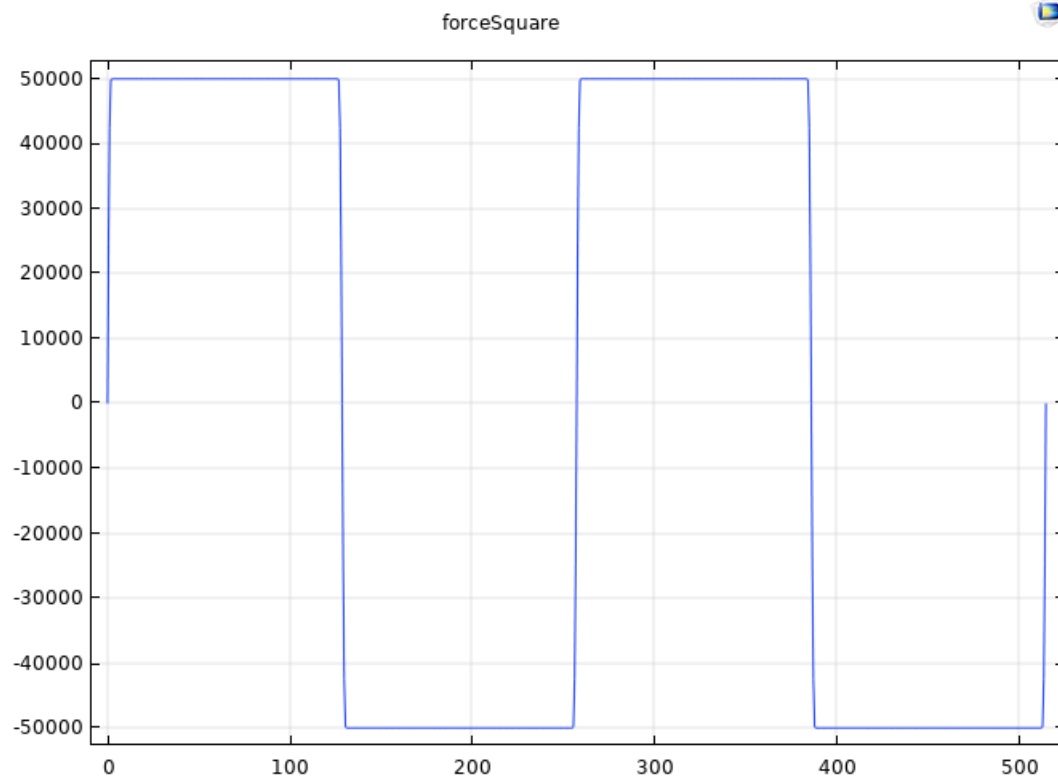


Рис. 4.2. Розподіл сили вздовж гнучкого елемента при в початковий момент часу при кількості механічних хвиль $waves = 2$

Результат розрахунку з кількістю механічних хвиль $waves = 2$ показаний у відеоролику «Кінематична схема при прямокутному розподілу сили $waves = 2.avi$ ».

Як видно з Рис. 4.3 та відеоролику дана кінематична схема при прямокутному розподілу сил теж є працездатною.

Запізнення початку руху внутрішнього колеса при початку симуляції пов'язане з часом, що необхідний для гнучкого елемента щоб увійти в зчеплення з колесами.

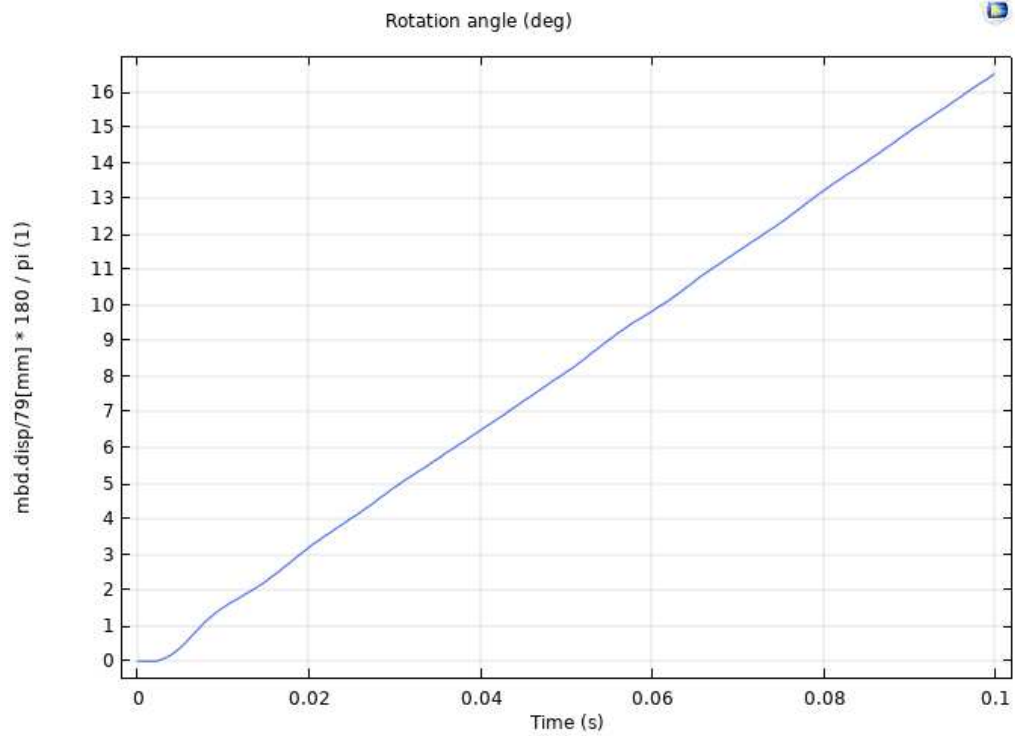


Рис. 4.3. Кут, на який повертається внутрішнє колесо, в залежності від часу при кількості хвиль $waves = 2$ та кутовій швидкості руху механічної хвилі 126 рад/с

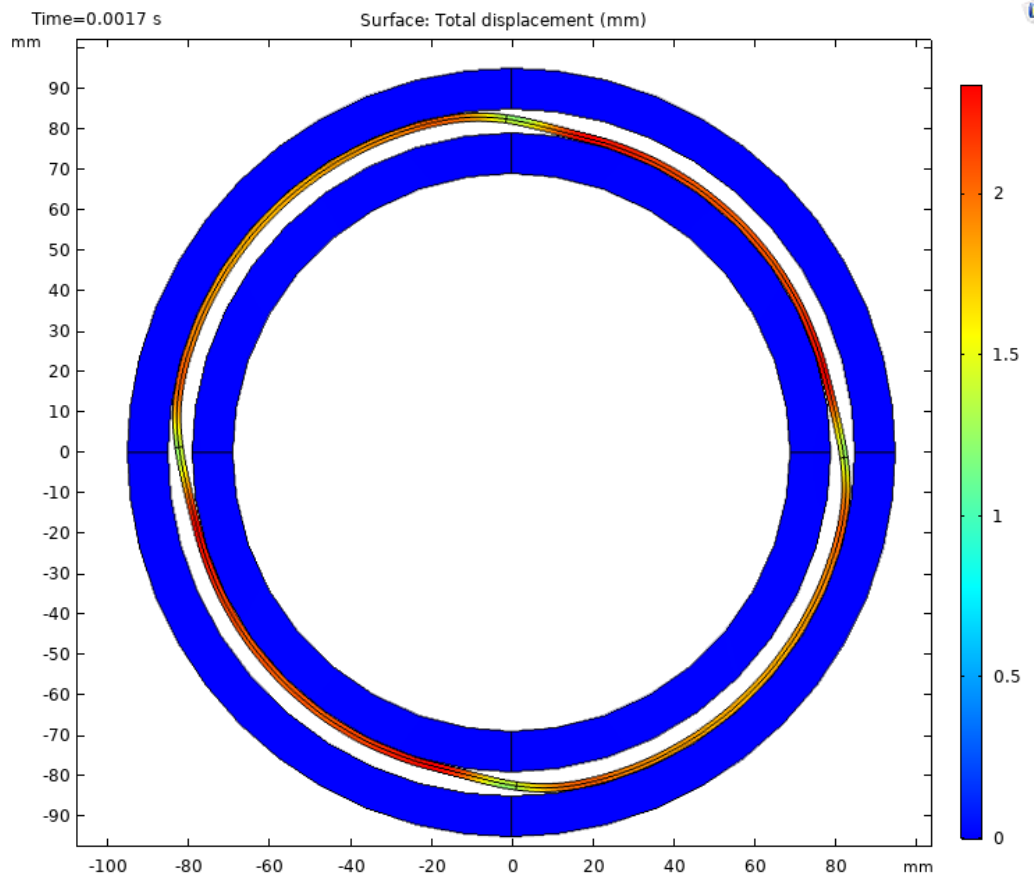


Рис. 4.2. Переміщення точок механічної частини хвильового приводу при прямокутному розподілі сили та кількості механічних хвиль $waves = 2$

Висновок до розділу

У даному розділі було шляхом проведення розрахунків у пакеті COMSOL Multiphysics було доведено працездатність запропонованої кінематичної схеми при різних розподілах сили вздовж гнучкого елемента при наявності двох механічних хвиль.

Багатохвильові системи дослідити не вдалось, через складність математичної моделі, яка не дозволила успішно провести розрахунок. Даний аспект потребує подальшого дослідження.

5 ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДУ

Результатом розробки хвильового приводу повинні стати параметри та залежності, які будуть описувати показники машини при заданій геометрії. Для охарактеризування даної розробки були обрані такі параметри та залежності:

- максимальна швидкість обертання
- максимальний момент в залежності від кількості хвиль
- Крок валу, при переключенні однієї групи котушок

Розрахунок даних характеристик при постановці повної двовимірної задачі з урахуванням точної геометрії елементів механічної системи (Рис. 5.1) виявився неможливим, через високу нелінійність математичної моделі.

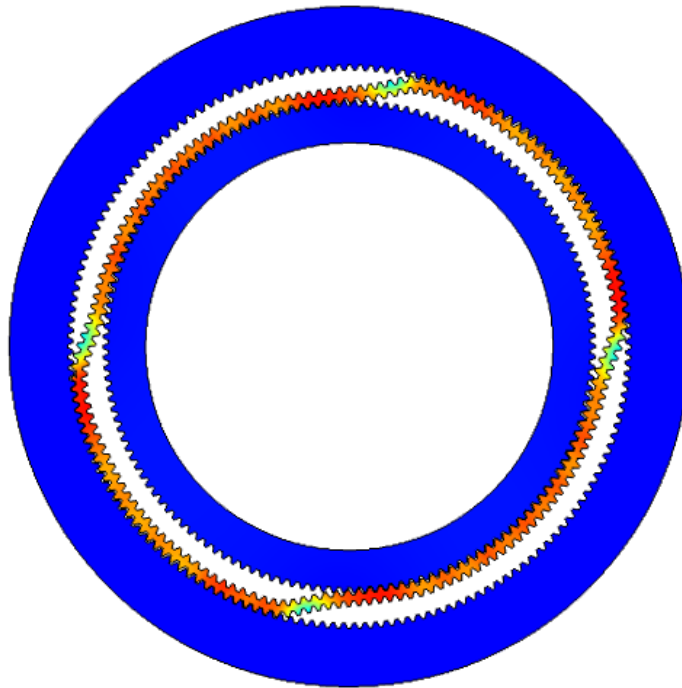


Рис. 5.1. Розрахунок механічної системи з урахуванням точної геометрії елементів механічної системи

Створення механічного моменту відбувається під час перемикання котушки та переходу сегменту гнучкого елемента від однієї шестерні до іншої. Якщо змодельовати цей процес, можливо отримати значення механічної сили, яка при цьому створюється.

Для цього створимо спрощену модель, яка б описувала даний процес, у пакеті COMSOL Multiphysics з використанням модуля Multibody Dynamics у вигляді двовимірної ферми (Рис. 5.2).

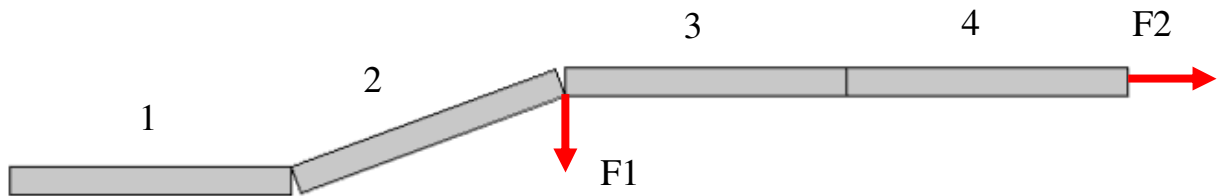


Рис. 5.2. Спрощена модель, яка характеризує процес переходу сегменту рухомого елемента від однієї шестерні до іншої

На Рис. 5.2 зображено 4 сегменти. Сусідні сегменти з'єднані між собою шарнірним зв'язком. Сегмент 1 є жорстко закріпленим, сегмент 4 здатен вільно переміщуватись по горизонталі, але не здатен переміщуватись вздовж вертикалі.

Така схема описує гнучкий елемент, що виконаний з жорстких сегментів, у зоні переходу. Сегмент 1 відповідає частині гнучкого елемента, що зчеплений з внутрішньою шестернею, сегмент 4 – з зовнішньою, сегменти 2 та 3 відповідають частині гнучкого елемента, що змінює свої положення.

Геометрія спрощеної схеми була отримана шляхом аналізу отриманих результатів при спробі врахувати повну геометрію механічної частини (Рис. 5.1). Фізичні властивості сегментів враховують маси реальних елементів конструкції.

Шарнірне з'єднання між сегментами 1 та 2 є обмеженим таким чином, щоб сегмент 2 не був здатен відхилятися від горизонталі вниз, що описує реакцію опори внутрішньої шестерні.

До системи прикладені дві сили, що на Рис. 5.2 зображені червоними стрілками.

До правої частини сегменту 2 вертикально вниз прикладена сила F_1 , що створюється взаємодією елемента реакції з магнітним полем котушки з осердям. Величина цієї сили залежить від струму в котушці та положення елемента

реакції. Данна залежність реалізована шляхом інтерполяції результатів отриманих у розділі 3.2. Під час руху точки, до якої прикладена сила, величина сили змінюється автоматично. Сила котушки прийнята 2000 А.

До правого ребра сегменту 4 прикладена сила F_2 , що характеризує момент навантаження на валу машини.

Метою дослідження є знаходження максимальної сили F_2 , при якій сила F_1 здатна перекинути сегмент 2 у нижнє положення.

У відеофайлі «Movment 1.avi» показано рух системи при силі $F_2 = 410$ Н, що є максимальною силою, при якій сегмент 2 здатен перейти у нижнє положення. На

Рис. 5.3 показано динаміку руху сегменту 4. З даного рисунку видно, що система займає стабільне положення після перехідного процесу. Варто відмітити, що рух сегменту 4 не є монотонним, що означає нерівномірний рух вихідного валу при сегментованому гнучкому елементі.

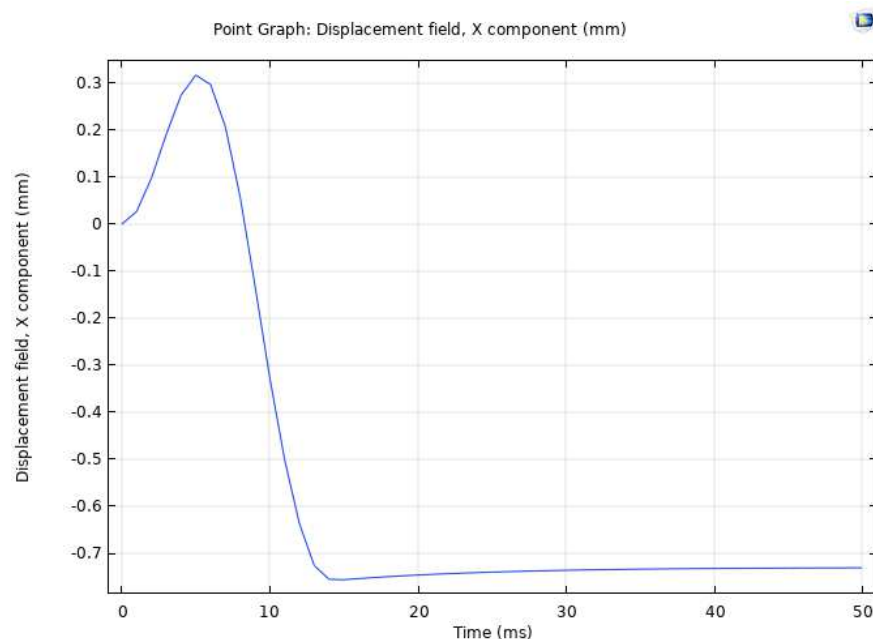


Рис. 5.3. Динаміка руху сегменту 4 при силі $F_2 = 410$ Н

У відеофайлі «Movment 2.avi» показано рух системи при силі $F_2 = 420$ Н. На Рис. 5.4 показано динаміку руху сегменту 4. З даного рисунку видно, що система не здатна зайняти стабільне положення, що свідчить про неможливість роботи двигуна.

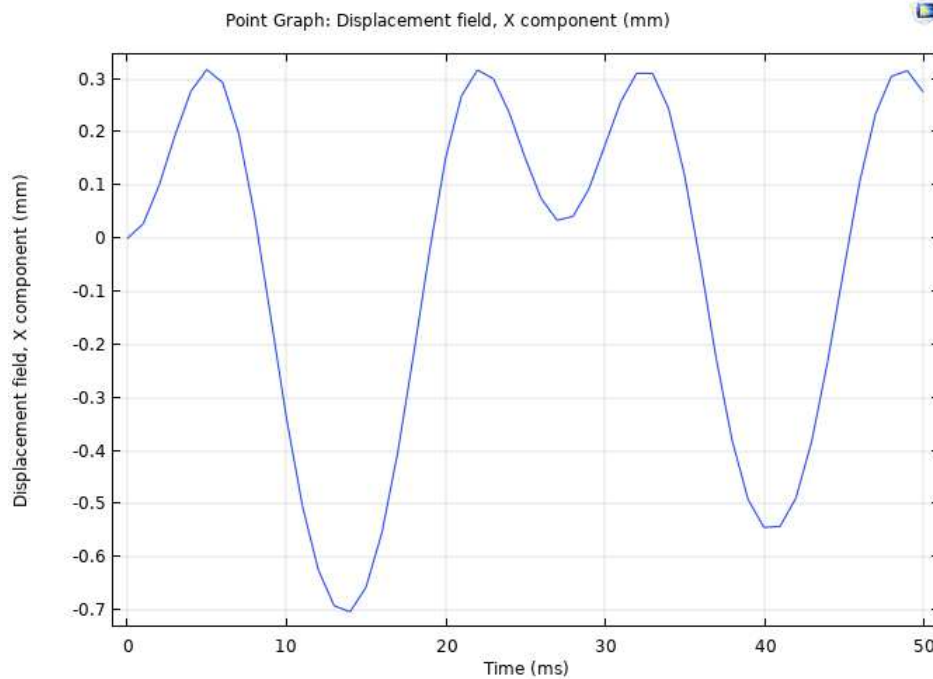


Рис. 5.4. Динаміка руху сегменту 4 при силі $F_2 = 420$ Н

Визначення максимального сумарного моменту

Маючи максимальну значення сили F_2 та радіус гнучкого елементу R_f можемо порахувати еквівалентний момент, що створюється 1 гребнем механічної хвилі (5.1).

$$M_w = F_{2\max} \cdot R_f = 410 \cdot 0.049 = 20.09 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.1)$$

Так як кожна хвиля має 2 переходи можемо записати максимальний сумарний момент з урахуванням кількості механічних хвиль W , що може створює привід (5.2).

$$M_{\max} = 2 \cdot F_{2\max} \cdot R_f \cdot W \quad (5.2)$$

Конструкція, що розраховувалась може мати не більше 4 хвиль, тому залежність максимального моменту від кількості хвиль має область визначення від 2 до 4 включно та буде лінійною залежністю, що показана у таблиці 1.

Таблиця 1

Кількість механічних хвиль W	Максимальний момент M_{\max} , Н·м
2	80.36
3	120.54
4	160.72

Визначення величини кроку

При переключенні 1 групи котушок вихідний вал зміщується на фіксований кут. Як видно з Рис. 5.3, поверхня шестерні зміщується на 0.73 мм, з чого можемо вирахувати крок кутового переміщення (5.3).

$$\alpha = \frac{\Delta x}{R_f} = \frac{0.73}{49.7} \cdot \frac{180}{\pi} = 0.8536^\circ \quad (5.3)$$

Визначення максимальної швидкості обертання

Швидкість обертання обмежується часом, що є необхідним для зміни положення сегменту гнучкого елемента.

Як видно з Рис. 5.3, час перехідного процесу при максимальній допустимій силі F_2 складає приблизно $t_s = 15$ мс, а крок, на який переміщується вал $\alpha = 0.8536^\circ$, з чого можемо вирахувати максимальну швидкість (5.4).

$$n_{\max} = \frac{\alpha \cdot 60 \cdot c}{t_s \cdot 360^\circ} = \frac{0.8536^\circ \cdot 60}{0.015 \cdot 360^\circ} = 9.484 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (5.4)$$

Визначення потужності приводу

Важливим показником, який використовується для порівняння з аналогами, є корисна потужність на валу. При даній конструкції потужність машини залежить від кількості хвиль, тому доречно визначити залежність максимальної потужності на валу від кількості хвиль. Для цього скористаємось формулою (5.5).

$$P_{\max} = n_{\max} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot M_{\max} \quad (5.5)$$

Результати розрахунку показані у таблиці 2.

Таблиця 2

Кількість механічних хвиль W	Максимальна потужність P_{\max} , Вт
2	79.81
3	119.72
4	159.62

Висновок до розділу

У даному розділі були визначені параметри машини при геометрії, що показана на кресленні (додаток 1), шляхом створення спрощеної моделі гнучкого елемента у зоні переходу.

ВИСНОВКИ

В роботі було показано процес розробки електромагнітного приводу на постійних магнітах, що включав в себе патентний пошук, електромагнітний та механічний розрахунки, визначення параметрів машини.

Розрахований привід може забезпечувати такі показники:

- момент 160 Н·м
- швидкість обертання 9.48 об/хв
- крок 0.85°

Враховуючи специфіку отриманих показників можемо зробити висновок, що дана машина в багатьох моментах поводить себе аналогічно кроковому двигуну та може бути корисною у системах, де необхідно отримати високий момент при невисокій швидкості обертання, фіксацію положення при відключенні живлення та точне позиціонування без контуру зворотного зв'язку.

Ряд проведених розрахунків у пакеті COMSOL Multiphysics показав можливість реалізації електромагнітного хвильового приводу запропонованої конструкції, проте для його реалізації необхідні подальші дослідження. Для покращення параметрів машини необхідно провести оптимізацію механічної системи, що на даний момент являє собою основну перепону перед підвищенням питомої потужності, так як потребує значного ходу гнучкого елемента, а отже і великого повітряного проміжу, який повинен бути пройдений магнітним потоком. Також є необхідність подальшого дослідження поведінки багатохвильових систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Лихогуб В.О., Реуцький М.О, «Електромагнітний хвильовий привід на постійних магнітах», КПІ ім. І. Сікорського, Київ, Україна
2. Donghui Ma, Rui Wang, Pengfei Rao, Ruomin Sui, Shaoze Yan, «Automated analysis of meshing performance of harmonic drive gears undervarious operating conditions» Tsinghua University, Beijing 100084, China
3. Willard B Spring, Donald F Herdeg, Herbert W Proctor, Gifford P Scott, Norman R Hussey, «Electromagnetic harmonic drive», United Shoe Machinery Corp, US3169201A, USA
4. Марков Олександр Михайлович, «Хвильовий електродвигун», Товариство з обмеженою відповідальністю фірма "ТЕТРА, LTD", UA75744, Україна