

Шифр: Магнітний редуктор

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МАГНІТНОЇ ТРАНСМІСІЇ
ЕЛЕКТРОДВИГУНА ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

2021

Зміст

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 ТЕОРІЯ МАГНІТНИХ МЕХАНІЗМІВ	4
1.1. Принцип дії магнітних редукторів.....	4
1.2. Застосування у виробництві автомобілів технологій 3D-друку	7
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ МАГНІТНИХ РЕДУКТОРІВ	9
2.1. Постановка задачі моделювання магнітного поля в магнітному редукторі	9
2.2. Розробка математичної моделі магнітного редуктора з використанням COMSOL Multiphysics.	13
2.3. Обчислення механічних та електричних характеристик магнітного редуктора з використанням розробленої моделі.....	19
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛА МАГНІТНОГО РЕДУКТОРА ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ДІЮЧОЇ ТЕСТОВОЇ МОДЕЛІ МАГНІТНОГО РЕДУКТОРА МЕТОДОМ FDM.....	22
3.1. Розробка конструкції вузла магнітного редуктора з використанням Solidworks.....	22
3.2. Процес виготовлення діючої тестової моделі магнітного редуктора методом FDM.....	26
ВИСНОВОК.....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	29

ВСТУП

В останні роки, магнітні передачі (Magnetic Gears - MG) все частіше привертають до себе увагу як науково-дослідних інститутів так і промисловості. Передбачається, що безперервний технологічний розвиток магнітної трансмісії призведе до значного прогресу в області машинобудування. Магнітні передачі потенційно володіють високою ефективністю і надійністю завдяки їх безконтактній роботі, притаманному внутрішньому захисту від перевантаження і практичній відсутності необхідності технічного обслуговування.

Метою дослідження є аналіз можливостей магнітних передач, та розробка тестової конструкції магнітної передачі на основі математичної моделі із застосуванням адитивних технологій.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз використання магнітних передач в автомобілебудуванні;
2. Провести математичне моделювання електромагнітних процесів магнітних редукторів;
3. Розробити конструкцію вузла магнітного редуктора з використанням Solidworks;
4. Розробити вузол магнітного редуктора з застосуванням методів адитивного виробництва;
5. Перевірити працездатність розробленої конструкції.

Одержані результати можуть бути використані у виробництві автомобілів з електро- та гібридним приводом, особливо для спецтехніки та вантажних автомобілів.

Інформаційною базою дослідження стали дослідження вітчизняних та зарубіжних науковців, наукові статті та матеріали науково-практичних конференцій.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРІЯ МАГНІТНИХ МЕХАНІЗМІВ

1.1. Принцип дії магнітних редукторів

Перший магнітний механізм було розроблено у 1901 році, коли Армстронг розробив електромагнітне циліндричне зубчасте колесо [1]. Фундаментальний принцип роботи даної магнітної шестерні дуже схожий на принцип звичайних механічних коробок передач, за винятком, що передача сили/моменту, який чиниться зубом зачеплення замінюється безконтактною магнітною взаємодією. По суті, магнітний механізм може бути розроблений відповідно до кожної доступної топології її механічного аналога. Рисунок 1.1 ілюструє деякі відповідні передавальні топології між механічними і магнітними передачами.

Для більшості ранніх MG топологій, їх щільність крутного моменту не могла конкурувати з їх механічними аналогами. Дослідження магнітного зв'язку показали, що більш високі передачі крутного моменту можуть бути реалізовані тільки при великій кількості магнітних полюсів [2]. Концепція магнітої передачі (далі МП) [3] була наведена в кінці 1960-х років, яка включає три концентричні частини, тобто внутрішній магніт ротора, зовнішній магніт ротора і модулятор магнітного потоку між ними. Подальше вивчення цієї нової топології МП було зроблено Лаінгом і Аккерманом та ін [1]. Аккерман описав математичні співвідношення між числом пар полюсів постійного магніту (ПМ) роторів і кількістю модуляторів. Унікальна перевага цієї топології МП є те, що всі ПМ беруть участь в передачі крутного моменту, в результаті чого утворюються щільні конструкції з високим крутним моментом.

В останнє десятиліття спостерігається підвищений інтерес до МП. Це може бути пов'язано з наявністю високої щільності енергії ПМ, що є важливим при створенні топологій, які дозволяють МП конкурувати з традиційними механічними передачами з точки зору щільності крутного моменту.

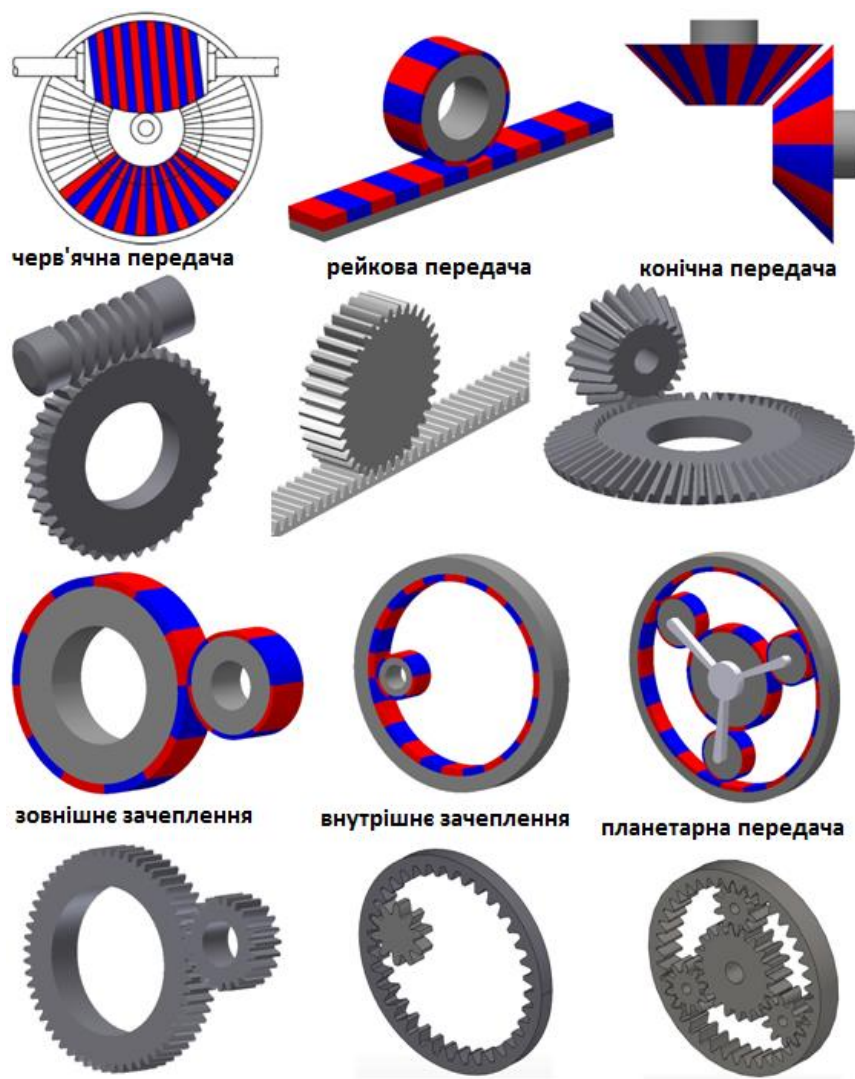
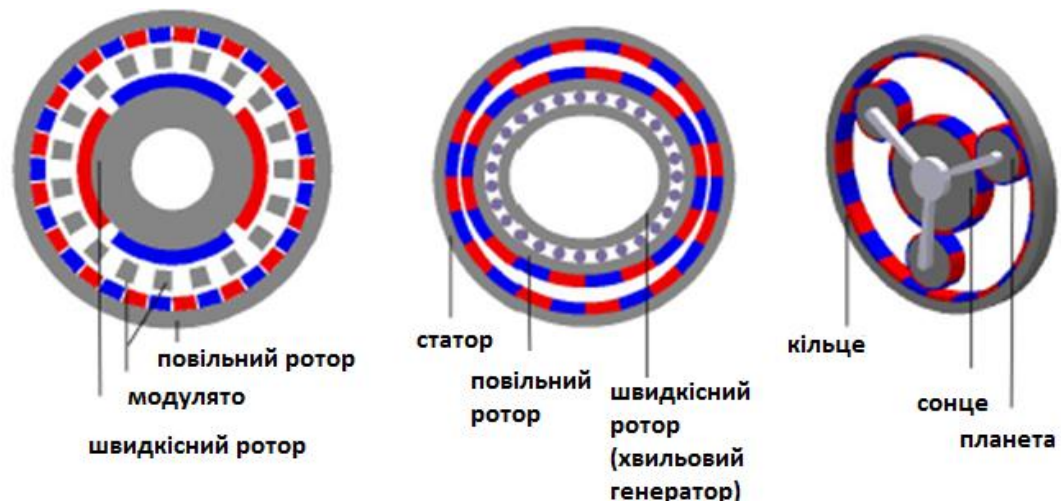


Рис. 1.1 Динамометричні топології магнітних трансмісій

Серед нових запропонованих топологій МП найбільш вагомими є топології в яких використано планетарні магнітні шестерні, як показано на рис. 1.2. Основний принцип дії МП в тому, що феромагнітні полюс-частини, розташовані між внутрішнім і зовнішнім ротором МП і можуть модулювати магнітне поле таким чином, що кожен ротор "бачить" робочу зону, що відповідає своєму власному числу полюсів. Число пар полюсів на внутрішньому високошвидкісному роторі p_h і зовнішньому низькошвидкісному роторі p_l і кількість сегментів модулятора, q_m пов'язані [1]



концентричний

хвильовий

планетарний

Рис. 1.2 Механізми магнітних концентричних гармонічних планетарних передач

$$Q_m = p_h + p_l$$

При не рухомому модуляторі передавальне відношення G_r визначається за формулою:

$$G_r = \frac{p_l}{p_h} = \frac{q_m - p_h}{p_h} = \frac{q_m}{p_h} - 1 = -\frac{\omega_h}{\omega_l}$$

де ω_h і ω_l кутові швидкості високошвидкісних і низькошвидкісних роторів відповідно. Знак мінус означає, що два ротори обертаються в протилежному напрямку. Якщо зовнішній ротор утримується нерухомо, передавальне відношення між високошвидкісним ротором і обертовим модулятором визначається [1]:

$$G_r = \frac{q_m}{p_h} = \frac{\omega_h}{\omega_m}$$

де обидва ротори обертаються в тому ж напрямку і може бути реалізоване трохи більш високе передавальне відношення.

Хвильові магнітні шестерні мають подібний принцип дії, як і у механічних хвильових передачах. Дія магнітної хвильової шестерні базується на наступному механізмі: повітряний зазор між гнучким низько швидкісним ротором і жорстким статора змінюється в часі синусоїдально [2].

Перевагами хвильових магнітних передач є високі передавальні відношення, висока щільність крутного моменту і плавність передачі крутного моменту [2].

Практична реалізація хвильових магнітних передач ускладнюється необхідністю гнучкої магнітної передачі, низькою частотою обертання ротора. Складність конструкції цього типу магнітних передач залишається стримуючим фактором для подальшої експлуатації цієї топології.

Планетарні магнітні передачі застосовуються в пристроях змінної інерції. За аналогією з їх механічними аналогами, передавальне відношення планетарної магнітної передачі з нерухомим зубчастим вінцем визначається:

$$G_r = \frac{p_s}{p_s + p_r}$$

де p_s і p_r є пари полюсів на магнітній центральній шестерні і сонячній шестірні відповідно. Відношення пар полюсів між коронною шестерню, сонячною шестерню і планетарною шестерню задається $p_s + 2 p_p = p_r$. Переваги планетарних магнітних передач полягають у можливості створювати три режими передачі, у високому передавальному відношенню, здатності передавати високий крутний момент.

1.2.Застосування у виробництві автомобілів технологій 3D-друку

На першому етапі від своєї появи на ринку у 80-х роках 20 століття технології 3D-друку або адитивні технології мали переважне застосування для виготовлення масштабних моделей або прототипів виробів, функціональних моделей та різноманітних демонстраційних об'єктів (звідси назва – технології швидкого прототипування). На другому етапі разом з вдосконаленням обладнання та матеріалів адитивні технології починають використовуватись для створення готових виробів. Якщо у 2003 році лише 3,9% виробів виготовлених технологіями 3D-друку мали функціональне призначення, то у 2014 році таких виробів стало 42,6%. На третьому та заключному етапі споживачі мають власні машини для адитивного виробництва (3D-принтери). Даний етап почався в 10-ті

роки з суттєвим зниженням ціни на 3D-принтери, які працюють методом наплавлення.

Адитивні технології (АМ-технології) можна розрізняти за:

- методом фіксації шару: фотополімеризація, сплавлення, склеювання;
- типом конструктивних матеріалів: рідкі, сипучі, ниткоподібні чи пруткові, листові або плівкові;
- ключовою технологією: лазерні, нелазерні.

В автомобільній індустрії на теперішній час найбільш поширеними є:

- адитивні виробництва методом наплавлення (Fused Deposition Modeling - FDM, fused filament fabrication - FFF), наприклад, деталі кузова автомобіля, деталі допоміжних механізмів, зубчасті колеса з пластику та композитних матеріалів (вуглепластик) (рис.1.3).
- вибіркове лазерне спікання (SLS - selective laser sintering), наприклад деталі повітроводів системи вентиляції, термостійкі деталі підкапотного простору з пластику та композитних матеріалів, деталі підвіски, деталі двигуна, зубчасті колеса з металу (неіржавіючої сталі, титанових сплавів) (рис.1.3).



Рис. 1.3 LSEV – перший серійний автомобіль з використанням 3d друку

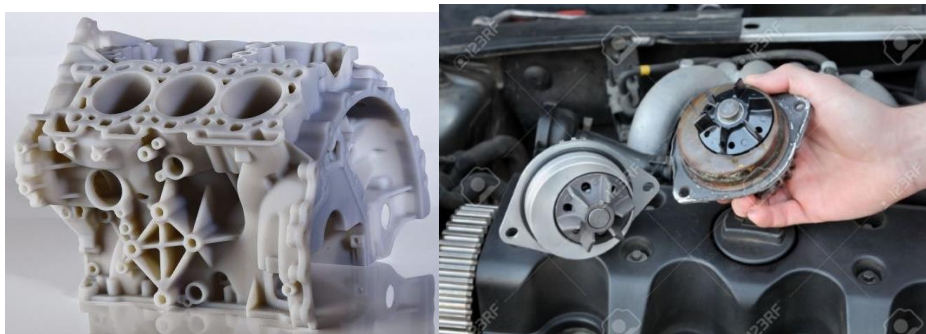


Рис. 1.4 Автодеталі виготовлені методом вибіркового лазерного спікання

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ МАГНІТНИХ РЕДУКТОРІВ

2.1. Постановка задачі моделювання магнітного поля в магнітному редукторі

Магнітні приводи являють собою безконтактні механізми для перетворення крутного моменту в швидкість переміщення, використовуючи постійні магніти або електромагніти. Вони застосовуються в різних поновлюваних джерелах енергії і легко погоджуються з технічними параметрами електромагнітного генератора, підвищуючи тим самим ефективність джерел вітрової енергії, приливної енергії океану, і маховикових накопичувачів енергії. На відміну від своїх механічних аналогів, магнітні приводи мають внутрішній захист від перевантажень, мають високу надійність за рахунок функціонування при відсутності тертя, і не вимагають мастила.

Типовий магнітний привід складається з трьох роторів з різним числом пар магнітних полюсів, розділених невеликим повітряним зазором. Сталеві феромагнітні полюса (середній ротор) модулюють магнітні поля, що породжуються внутрішнім і зовнішнім роторами і створюють просторові гармоніки в повітряних зазорах. Модульовані магнітні поля за допомогою сталевих полюсів взаємодіють з магнітним полем на іншій стороні для передачі крутного моменту.

На рисунку 2.1., приведена ілюстрація принципу дії типового магнітного приводу. Для простоти і наочності ми вибрали конфігурацію лінійного магнітного приводу. У даній конфігурації, модель містить 11 пар полюсів на зовнішньому роторі, 4-х пар полюсів у внутрішнього ротора і 15 пар полюсів в середньому. Вони позначаються P_o , P_i і P_s , відповідно.

Чотири пари полюсів внутрішнього ротора породжують магнітне поле з переважанням 4-ї гармоніки. Потім дане поле модулюється 15 парами сталевих полюсів для генерації поля з домінуванням 11-ї гармоніки. Промодульоване поле взаємодіє з основною 11-ю гармонікою поля, збудженою зовнішнім ротором для

передачі крутного моменту. Це викликає кручення, яке визначається ступенем узгодження гармонійної компоненти поля від зовнішнього ротора з гармонійної компонентою, створюваної промодульованим полем від внутрішнього ротора.

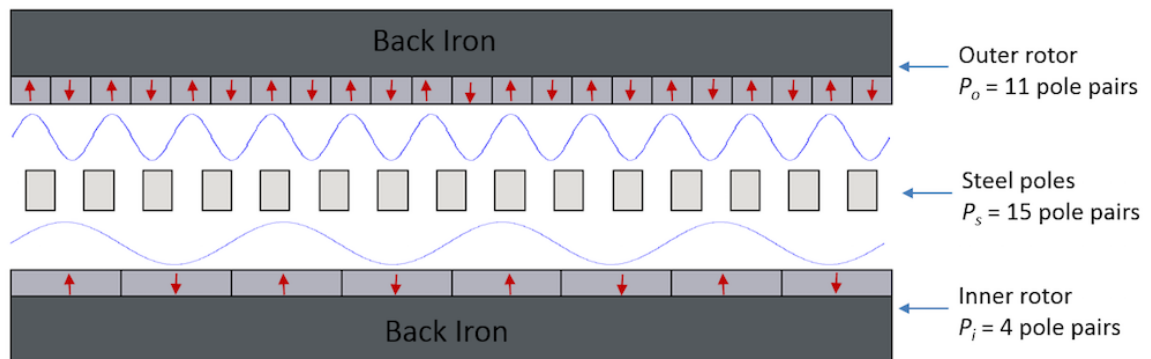


Рис. 2.1. Схематичне зображення компонентів лінійного магнітного приводу.

Червоні стрілки вказують напрямок намагніченості постійних магнітів. Магнітні поля породжуються внутрішнім і зовнішнім роторами представлені у вигляді блакитних кривих.

З метою досягнення максимальної потужності крутного моменту, число пар полюсів кожного з роторів мав би підпорядковуватися наступному співвідношенню:

$$P_o = P_s - P_i$$

Співвідношення між парами полюсів і кутовою швидкістю для всіх трьох роторів при максимальній передачі крутного моменту задається виразом:

$$\omega_i = \frac{P_s}{P_s - P_o} \omega_s - \frac{P_o}{P_s - P_o} \omega_o$$

де ω_i , ω_o і ω_s позначають швидкість внутрішнього, зовнішнього роторів і сталевих полюсів, відповідно. Якщо середній ротор залишається нерухомим, то співвідношення між швидкістю і числом пар полюсів стає:

$$\omega_o = -\frac{P_i}{P_o} \omega_i$$

Кращою комбінацією для P_i , P_s і P_o є та, при якій пульсації в крутному моменті будуть мінімальні. Такі пульсації пов'язані, головним чином, зі зчепленням крутного моменту, що створюється в результаті взаємодії між постійними магнітами двигуна і сталевими полюсами. Параметр, який

використовується для мінімізації зчеплення моменту називається *коефіцієнтом зчеплення*. Він дається наступним виразом:

$$C_f = \frac{2P_i * P_s}{LCM(2P_i, P_s)}$$

де LCM є *найменше спільне кратне* (LCM - *least common multiple*). Мінімум зчеплення моменту досягається при $C_f = 1$. У всіх наведених тут прикладах, дана умова вважається виконаним, і, сталеві феромагнітні полюса зберігають свою нерухомість.

Типи магнітних приводів

Магнітні приводи можна розділити на три типи за принципом їх дії: лінійні, коаксіальні і аксіальні магнітні приводи (ЛМП, КМП і АМП, відповідно). У разі ЛМП або КМП, що генерується магнітне поле, як правило, направлено радіально (всередину або назовні) по відношенню до осі вала. Однак, в разі АМП, силові лінії створюваного магнітного поля паралельні осі ротора. В даному топіку, ми представимо приклади для всіх трьох типів магнітних приводів, використовуючи середовище COMSOL Multiphysics.

Як показано на рисунку 2.2, коаксіальний магнітний привід складається з трьох концентричних роторів з різним числом пар полюсів. Внутрішній ротор містить вісім постійних магнітів (ПМ) і магнітопровід з магнітом'якого заліза, який формує 2 пари полюсів на роторі (2 збірки по 4 ПМ), зовнішній потік. Зовнішній ротор містить 20 ПМ і ще один магнітопровід з м'якого заліза, яка формує потік, що сходиться всередину до осі ротора з 5 пар полюсів. Сім сталевих блоків (наконечників), і таке ж число проміжків між ними, складають нерухоме середнє кільце і формують, таким чином, нерухомий ротор з 7 парами полюсів. В даному прикладі, число пар полюсів вибрано так, щоб передавальне відношення для приводу склало 5:2 і досягався мінімум зчеплення крутного моменту при коефіцієнті зчеплення дорівнює одиниці.

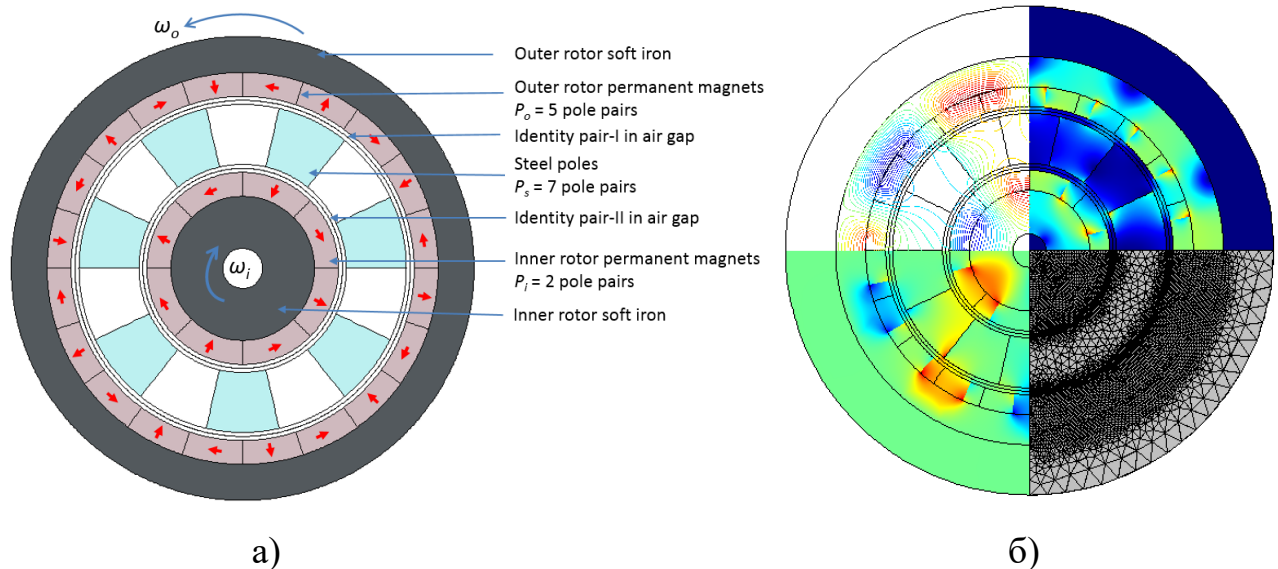


Рис. 2.2.

а) Схема коаксіального магнітного приводу, що показує внутрішній і зовнішній ротори, і нерухомі сталеві полюси.

б) Магнітна індукція (її норма), компонента магнітного векторного потенціалу (A_z), радіальна компонента вектора магнітної індукції (B_r) і графічне відображення сітки розбиття, з 1го по 4ий квадрант, відповідно.

У середовищі COMSOL Multiphysics 2D поперечний переріз коаксіального магнітного приводу моделюється, використовуючи інтерфейс *Rotating Machinery, Magnetic* (Оберткові Машини, магнітні) в модулі AC/DC. Оскільки модель складається з трьох окремих частин, нам необхідно сформувати об'єднання цих частин, для чого буде потрібно доопрацювати геометрію моделі використовуючи функцію *Form Assembly*, так що в областях повітряних зазорів з'являться дві окремі тотожні пари.

Ми застосовуємо нелінійну модель матеріалу в області м'якого заліза, використовуючи для цього криві намагніченості $B-H/H-B$. Однак, нерухомі сталеві полюсні наконечники моделюються як лінійний матеріал з відносною магнітною проникністю $\mu_r = 4000$. Обертання внутрішнього і зовнішнього роторів можна визначити в вузлі *Rotating Domain*. Осьовий крутний момент обох роторів розраховується методом тензора напружень Максвелла за допомогою ініціалізації вузла *Розрахунок Сили* (*Force Calculation*).

В якості постійних магнітів у моделі магнітного редуктора будемо використовувати магніти Nd-Fe-B (неодим-ферум-бор). Силу магніту або індукцію магнітного поля вимірюють в гаусах (Гс) або в теслах (Тл). В розробленому редукторі пропонується використовувати магніти класу N42. Їх основні характеристики:

Залишкова магнітна індукція, 1280-1320 мТл (12,8-13,2 кГс);

Коерцитивна сила, ≥ 955 кА/м (≥ 12 кЕ);

Магнітна енергія, 318-342 кДж/м³ (40-43 МГс-Е);

Робоча температура, 80°C.

2.2. Розробка математичної моделі магнітного редуктора з використанням COMSOL Multiphysics.

Розв'язання цієї задачі здійснимо за допомогою пакета моделювання фізичних процесів COMSOL Multiphysics. Вирішення диференціальних рівнянь в цьому пакеті здійснюється методом кінцевих елементів.

Побудова фізичної моделі в COMSOL складається з наступних етапів.

Вибір у вікні помічника створення моделей, було обрано вирішення двовимірної задачі, розділ Rotating Machinery, Magnetic, для стаціонарних моделей – Stationary.

Rotating Machinery, Magnetic інтерфейс використовується для проектування та аналізу електродвигунів та генераторів. Моделювання стаціонарного та часового домену підтримується в 2D та 3D.

Інтерфейс фізики вирішує рівняння Максвелла, сформульовані за допомогою комбінації магнітного векторного потенціалу та магнітного скалярного потенціалу як залежних змінних.

Встановлення констант моделі у вікні Parameters (рис. 2.3). На цьому етапі задаються швидкості обертання вхідного і вихідного валу з врахування передавального числа редуктора. Для розробленої моделі передавальне число визначається як відношення кількості пар полюсів на валах. Тобто

$$n = \frac{P_o}{P_i} = \frac{17}{4} = 4,25$$

Довжина обраних магнітів – 40 мм.

Залишкова магнітна індукція відповідно до характеристик використаних магнітів приймається 1,3 Тл.

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
f0_ir	600[rpm]	10 1/s	Frequency of inner rotor
f0_or	200[rpm]	3.3333 1/s	Frequency of outer rotor
L	40[mm]	0.04 m	Length of rotors
Br	1.30[T]	1.3 T	Remanent flux density of magnets

Рис. 2.3. Встановлення констант моделі у вікні Parameters

Наступним етапом є імпортування поперечного перерізу моделі редуктора в геометричну область проекту. Для забезпечення моделювання рухомої машини. Імпортування виконується окремо для трьох частин моделі: вхідного і вихідного валів та статора.

Оскільки напрям розташування полюсів магнітів і відповідно напрям формованої ними магнітної індукції є радіально направленим. Оскільки типово визначається декартова прямокутна система координат, для визначення фізичних умов моделі необхідно перетворити координатну систему геометрії в циліндричну

Для встановлення умов виникнення магнітний полів постійних магнітів необхідно визначити групи геометричних об'єктів, які відповідають магнітам з різним розташування полюсів подібно до схеми.

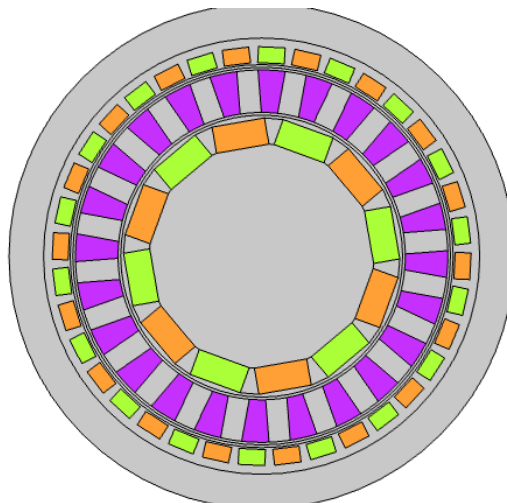


Рисунок 2.4 Групування геометричних областей моделі за призначенням

Для забезпечення умови вільного руху окремих частин моделі відносно одна одної задаються пари суміжних границь (boundary pair) на яких виконуються умови неперервності ліній магнітних полів.

Наступним етапом встановлення умов руху моделі є виділення рухомих об'єктів та об'єктів що описують повітряний зазор. Також на цьому етапі задається закон руху об'єктів. В нашому випадку це рівномірний обертальний рух з однаковою початковою фазою і швидкістю обертання для вхідного валу – 850 об/с та вихідного валу 200 об/с.

Надалі задаються фізичні параметри матеріалів які визначають поведінку моделі. В нашому випадку для спрощення розрахунків ми будемо використовувати три різних матеріали.

Всі геометричні об'єкти які не приймають участі в передачі обертального моменту задаються як повітря.

Air. Для побудови моделі необхідно визначити: відносну магнітну проникність (Relative permeability $\mu=1$) відносну діелектричну проникність (Relative permittivity $\epsilon=1$) електропровідність (Electrical conductivity $\sigma=0$ Ом·м).

Рухомі частини вхідного та вихідного валу виготовляються з спеціалізованої електротехнічної магніто-м'якої сталі. Магнітно-м'які матеріали [2] - матеріали, що мають властивості феромагнетика або ферімагнетика, причому їх коерцитивної сила по індукції становить не більше 4 кА/м. [1] Такі матеріали також мають високу магнітну проникність і малими втратами на гістерезис. Магнітно-м'які матеріали використовуються як осердя трансформаторів, електромагнітів, в вимірювальних приладах і в інших випадках, де необхідно при найменшій витраті енергії домогтися максимальної індукції. Для зменшення втрат на вихрові струми в трансформаторах використовують магнітно-м'які матеріали з підвищеним питомим електричним опором, зазвичай застосовуються у вигляді магнітопроводов, зібраних з окремих ізольованих один від одного тонких листів. Листи ізолюються лаком один від одного. Таке виконання сердечника називається шихтованим

Soft iron (Without Losses). Магнітно-м'яка сталь SS400 - Японія, Сталь конструкційна. Найближчим аналогом даної сталі є СтЗкп, СтЗпс СтЗсп - Сталь конструкційна вуглецева звичайної якості. Для побудови моделі визначимо: електропровідність (Electrical conductivity $\sigma=0$ Ом·м), відносну діелектричну проникність (Relative permittivity $\epsilon=1$) напруженість магнітного поля задається у

вигляді функції (Magnetic field norm $H=BH_inv(normBin)$, А/м), магнітна щільність енергії (Magnetic coenergy density $Wpm=BH_prim(normHin)$, Дж/м³)

Для виготовлення полюсів статора застосовується конструкційна сталь.

Steel AISI 4340 – США, Сталь конструкційна. Найближчим аналогом даної сталі є 40ХН2МА - Сталь конструкційна легована. Для побудови моделі визначимо: відносну магнітну проникність (Relative permeability $\mu=1$) відносну діелектричну проникність (Relative permittivity $\epsilon=1$) електропровідність (Electrical conductivity $\sigma=0$ Ом•м).

Наступним етапом побудови моделі є визначення фізичних процесів у вигляді диференціальних рівнянь.

Інтерфейс обертальних механізмів, Магнетизм вирішує рівняння Максвелла для обчислення розподілу електромагнітного поля. Інші похідні величини, що представляють інтерес (наприклад, крутний момент), можуть бути обчислені з відомих полів. У тимчасовому аналізі, інтерфейс використовує квазістатичне наближення, в якому нехтують щільність струму зміщення, або, що еквівалентно, передбачається, що ємнісні ефекти в двигуні мізерно малі. В рамках цього наближення, все струми в двигуні будуть або зовнішніми (тобто прикладаються за допомогою збудження обмотки), або крайовими, що наводяться в провідних частинах двигуна. Непровідні частини, на зразок повітряного зазору, не містять ніяких струмів.

Існують два підходи, які використовуються в даному інтерфейсі, для вирішення рівнянь Максвелла: формулювання в термінах векторного потенціалу та скалярного потенціалу. У першому підході вводиться векторне поле, **A** (магнітний векторний потенціал), і визначаються вектора магнітної індукції і електричного поля, як

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \end{aligned}$$

В силу цього визначення, поля **B** і **E** автоматично задовольняють двом рівнянням Максвелла: закону Фарадея і закону збереження магнітної індукції (або закону Гаусса для магнітного поля). Це можна записати у вигляді:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Рівняння, яке необхідно вирішити, є закон Ампера:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

Формалізм векторного потенціалу використовується у фізичному інтерфейсі Магнітні Поля.

Формулювання в термінах скалярного потенціалу може бути застосована тільки до областей, в яких щільність електричного струму дорівнює нулю. У цьому випадку вводиться скалярний поле V_m (магнітний скалярний потенціал, не плутати з електричним потенціалом) і магнітне поле визначається як градієнт від цього потенціалу. При цьому визначенні, закон Ампера виконується автоматично і вирішується закон збереження вектора магнітної індукції. Цей формалізм використовується у фізичному інтерфейсі Магнітні Поля, Без струмів.

У порівнянні з формалізмом векторного потенціалу, формулювання в термінах скалярного потенціалу має дещо більшою мірою свободи і призводить до "спрощення" рішення задачі. Зрозуміло, зворотною стороною є те, що вона може застосовуватися тільки при відсутності струмів. Зазвичай, ця умова обмежувало б її застосовність спеціальними випадками, на зразок стаціонарного дослідження постійних магнітів. Однак, завдяки квазістатична наближенню, це формулювання може також застосовуватися до непровідним областям в тимчасовому аналізі.

У разі 3D-моделей, підхід скалярного потенціалу володіє ще однією важливою перевагою. Коли використовується така характеристика пари як Безперервність, це формулювання забезпечує більш точну стиковку вектора магнітної індукції - центральної величини при моделюванні магнітних пристроїв.

Зазначені два формулювання можуть також використовуватися спільно, комбінуючи формалізм векторного потенціалу для провідних або струмопровідних областей і формалізм скалярного потенціалу для повітряного зазору і непровідних областей. Званий змішаним формалізмом, такий підхід особливо корисний для 3D-моделей завдяки підвищеній точності стикування пари, яка забезпечується скалярним формалізмом. У 2D-моделях для магнітних

полів з векторами, розташованими в площині моделювання, схема дискретизації, використовувана для векторного потенціалу аналогічна тій, яка використовується для скалярного. Таким чином, в 2D випадках полів-в-площині, використання змішаного формалізму не є необхідним.

За замовчуванням, Інтерфейс обертальних механізмів, Магнетизм застосовує Закон Ампера (тобто, формалізм векторного потенціалу) до всіх областей, оскільки вона є найбільш загальним формулюванням. Застосування функції Збереження магнітного потоку до областям, вільним від струмів, таким як повітряний зазор і інші непровідні області, переписує закон Ампера. Використовуючи функцію Змішана формулювання кордону, відповідні умови накладаються на межі поділу між областями, описаними скалярним і векторним потенціалами. Відзначимо, що функція Безперервність пари стикується залежні змінні по обидва боки кордону пари, щоб забезпечити ідеальні коректного формалізму з кожної зі сторін. Для поліпшення чисельної стабільності функцію калібрування векторного потенціалу А-поля (Gauge Fixing for A-Field) слід застосувати до всіх областей векторного потенціалу, що зазвичай і використовується в інтерфейсі Магнітні Поля.

В рамках моделі визначаються граничні умови.

Визначаємо умови дії закону Ампера на окремі постійні магніти в циліндричній системі координат.

Для вирішення задачі методом кінцевих елементів необхідно геометрію моделі розбити на трикутні елементи.

На рис. 2.5 представлено розбиття з врахуванням підвищеної точності розрахунку в зазорах між статором та роторами.



Рисунок 2.5 Розбиття геометрії моделі на трикутну сітку для кінцево-елементного рішення задачі та властивості сітки

2.3.Обчислення механічних та електричних характеристик магнітного редуктора з використанням розробленої моделі.

Моделювання виконується за двома кроками дослідження. По-перше, проводиться аналіз стаціонарного дослідження для обчислення початкових умов нестационарного дослідження. Потім залежно від часу дослідження проводиться протягом 100 мс.

COMSOL Multiphysics має вбудовані різноманітні інструменти, які дозволяють провести ретельний аналіз на основі розрахованих даних кінцево-елементного рішення поставленої фізичної задачі.

Використовуючи інтерфейс Data Set ми можемо проаналізувати дані як на площині так і вздовж заданої лінії або в заданій точці. По заданих геометричних об'єктах можуть бути побудовані 3-х, 2-х та одновимірні графіки для різних фізичних величин.

На рисунках 2.6-2.7 показаний розподіл магнітної індукції поля постійних магнітів та щільність магнітного потоку магнітної передачі в різні моменти часу при обертанні редуктора.

Показана на рисунках 2.6-2.7 щільність магнітного потоку відповідає обертанню зовнішнього ротора за годинниковою і внутрішнього ротора проти годинникової стрілки, що пов'язано з заданим співвідношенням полюсів магнітів при якому формуються протележно направлені обертальні моменти.

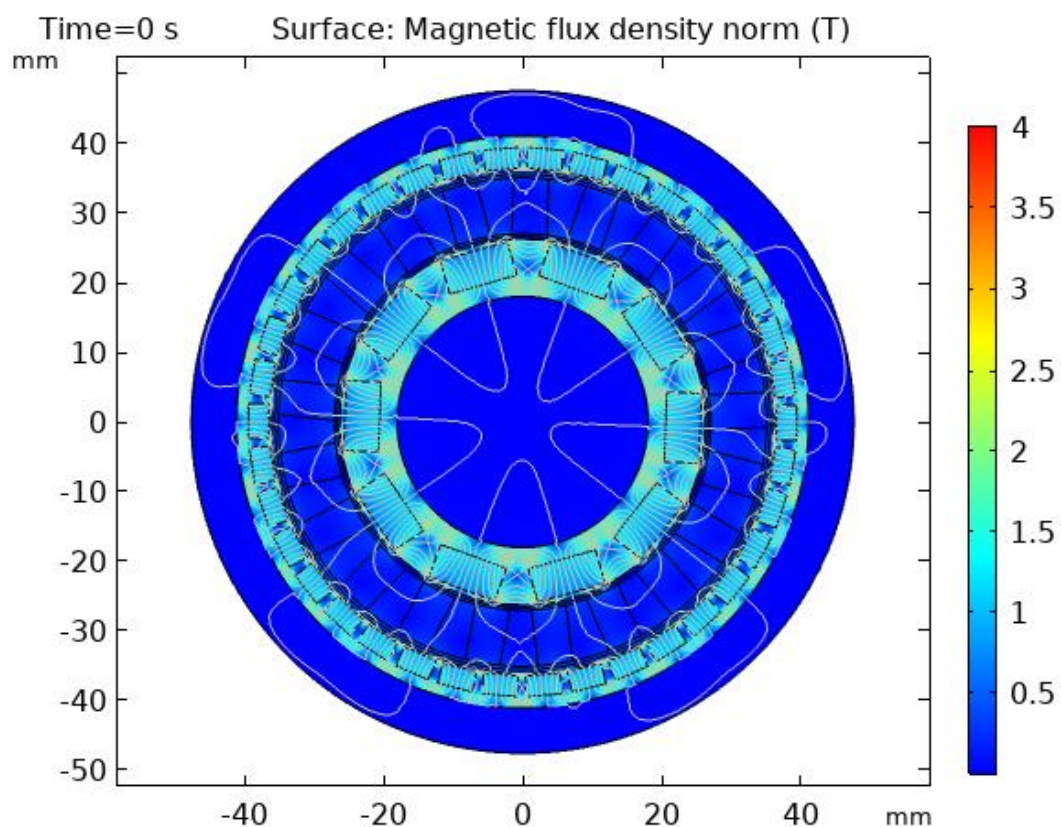


Рисунок 2.6. Нормативна щільність магнітного потоку та магнітний векторний потенціал при $t = 0$ мс.

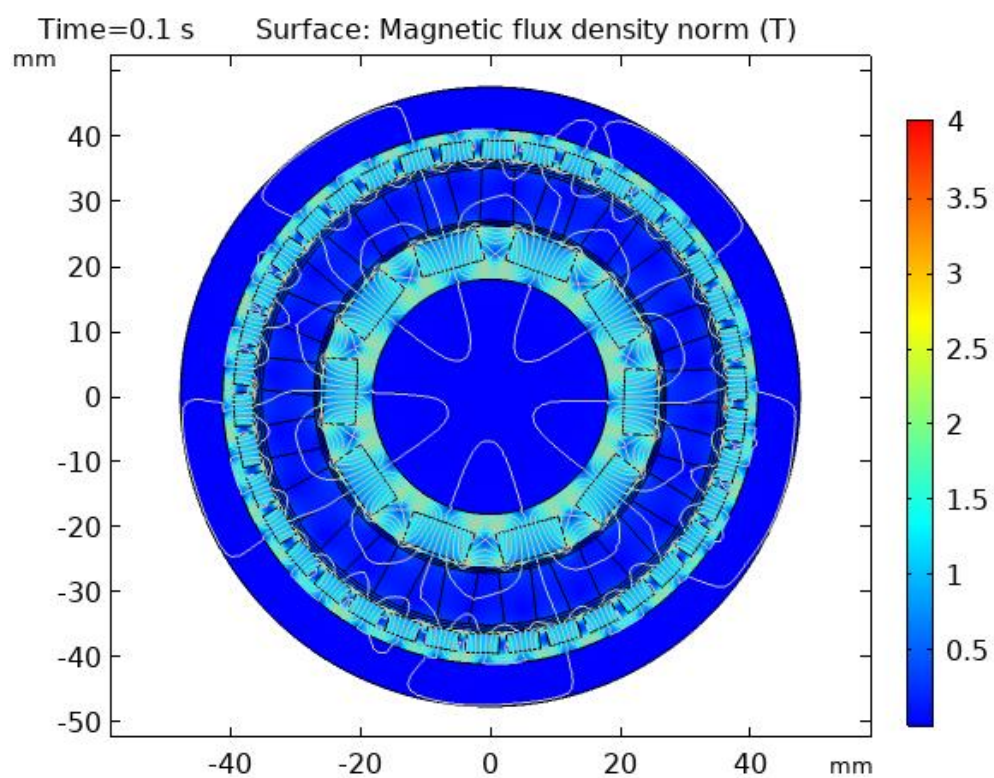


Рисунок 2.7. Нормативна щільність магнітного потоку та магнітний векторний потенціал при $t = 100$ мс.

На рисунку 2.8 показано порівняння осьового крутного моменту, що виробляється на внутрішньому та зовнішньому роторах. Момент, який розвивається на зовнішньому роторі, приблизно в 2 рази перевищує крутний момент на внутрішньому роторі.

Як видно на отриманому графіку на вхідному та вихідному валах виникають досить значні пульсації обертового моменту. Особливо вони виражені на вихідному валі. Зменшити такі пульсації можливо при застосуванні магнітів у формі збірки Холбаха а також за рахунок такого підбору магнітів при якому ми отримаємо мінімальний зазор між ними та мінімальний повітряний зазор між валами та статором.

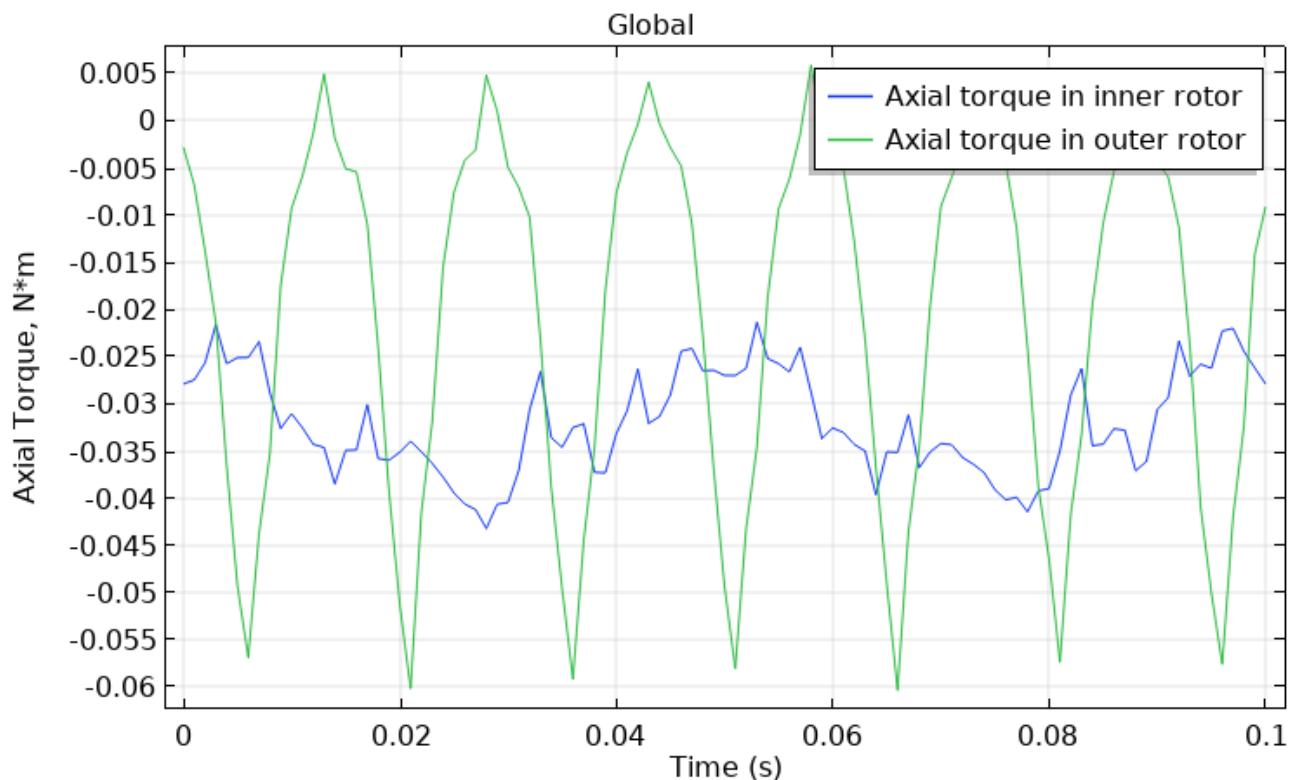


Рисунок 2.8 Обертальний момент який виникає у вхідному та вихідному валах магнітної передачі.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛА МАГНІТНОГО РЕДУКТОРА ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ДІЮЧОЇ ТЕСТОВОЇ МОДЕЛІ МАГНІТНОГО РЕДУКТОРА МЕТОДОМ FDM

3.1. Розробка конструкції вузла магнітного редуктора з використанням Solidworks

З метою дослідження властивостей магнітних редукторів необхідно розробити його стендову модель. Основою досліджуваної конструкції є модель редуктора розрахованого з використанням COMSOL Multiphysics в попередньому розділі.

Процес розробки включає наступні етапи:

- створення моделей окремих деталей вузла з використанням системи Solidworks в режимі Part;
- створення моделі з геометричними зв'язками спроектованих деталей з використанням системи Solidworks в режимі Assembly;

Для забезпечення кращої структурованості розроблюваного вузла можна окремі групи деталей об'єднувати у підбірки зі своїми умовами прив'язки між деталями. Та повну збірку з умовами прив'язки підбірок між собою.

Така модель дозволяє легко вносити зміни при потребі і швидше знаходити нестиковки між деталями.

Моделювання деталей.

У моделюванні деталей ви можете створити деталь з концептуального ескізу за допомогою заснованого на елементах моделювання, а також створювати і технічних змін у конструкцію за допомогою прямого і інтуїтивного графічного маніпулювання.

Для того щоб оцінити можливості магнітних передач було сконструйовано магнітний редуктор, який може бути встановлений на механізмах з передаточним числом – 4,25.

На рисунку 3.1. показано зовнішній вигляд розробленого редуктора. В якості статора використано модулятор балкового типу виготовлений з магнітомякого матеріалу.

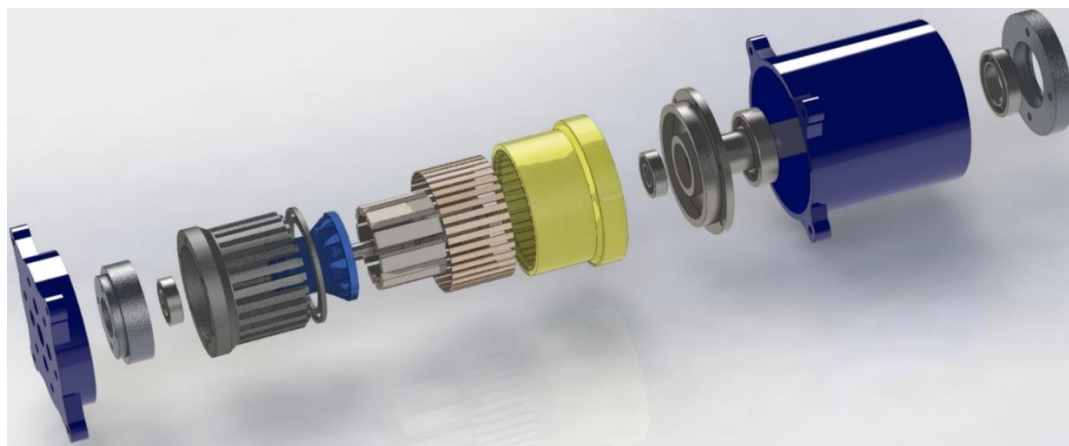


Рисунок 3.1 Загальний вигляд магнітного редуктора

Вихідний вал встановлено на двох вальниціях закріплених в корпусі редуктора марок 180105 та 1000905 з однаковим внутрішнім діаметром (25 мм), але різним зовнішнім 47 і 42 мм відповідно. Вхідний вал встановлено на двох однакових вальниціях типу 101 з внутрішнім діаметром 12 мм. Одна з вальниць встановлена в кришці корпусу, інша у посадковому місці вихідного валу. Завдяки цьому надійно забезпечено співвісність вхідного та вихідного валів. Також менші вальниці забезпечують роботу швидкісного валу, а більші вальниці забезпечують надійну фіксацію високомоментного навантаженого повільного вихідного валу.

Приводом вихідного валу є водило з пазами для встановлення 44 неодимових магнітних пластин.

Корпус редуктора складається з основи яка складається з правої та лівої кришки. Вальниці в корпусі кріпляться лівою та правою накладками.

Ротор встановлюється на вхідному валі і має пази для встановлення 10 неодимових магнітів. Таким чином отримане передаточне число редуктора складає $34 \text{ магніти вихідного валу} / 8 \text{ магнітів вхідного валу} = 4,25$.

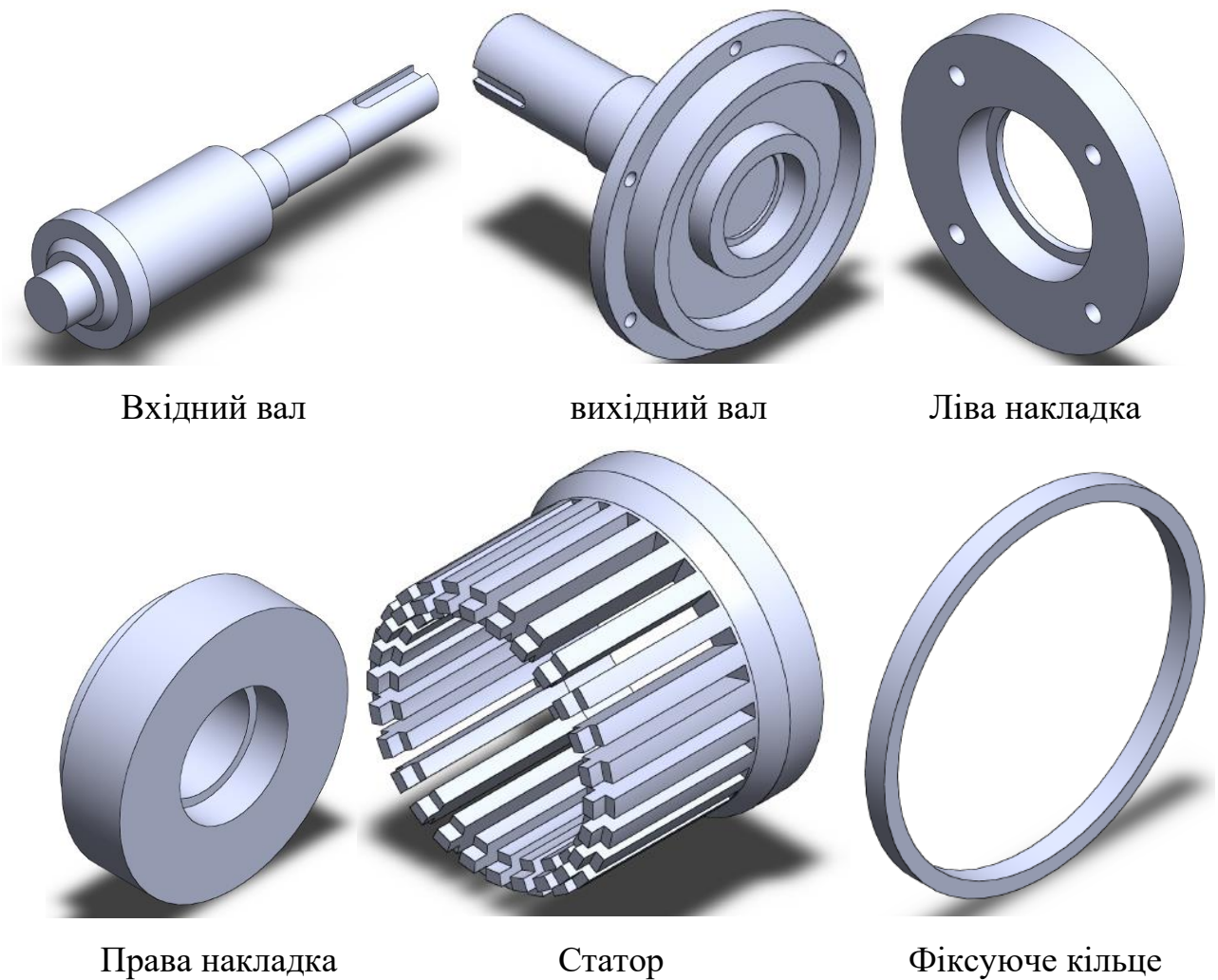
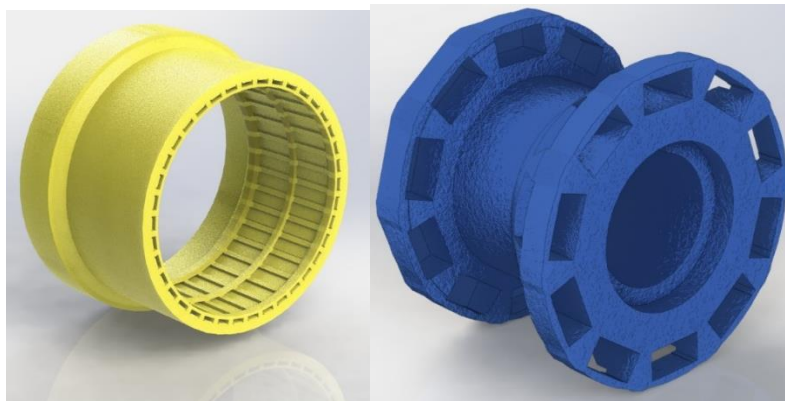


Рисунок 3.2 Деталі, які виготовляються методами точіння та фрезерування

Статор-модулятор виготовляється з магнітом'якого матеріалу. До магнітом'яких матеріалів відносяться технічно чисте залізо, листові електротехнічна сталь, сплави заліза з нікелем, що підучили назву пермалоїв і альсиферів - сплави заліза, кремнію й алюмінію. Усі ці матеріали мають високу магнітну проникність, дуже малу коерцитивну силу і невеликі втрати на гістерезис [5]. Кількість полюсів статора-модулятора визначає напрям обертання вихідного валу.

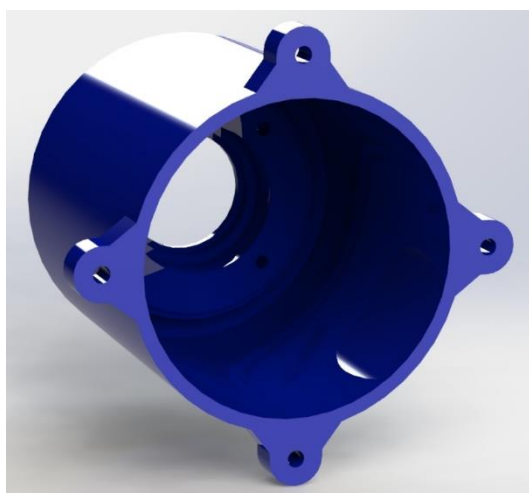
В розробленому редукторі напрями обертання вхідного та вихідного вала протилежні тому кількість полюсів статора визначається за формулою:

$$N=(34+8)/2=21 \text{ полюсів.}$$

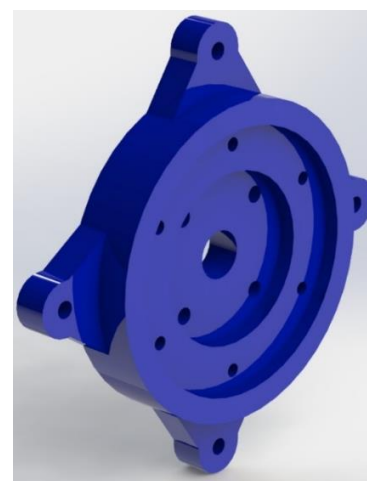


Водило

Ротор



Ліва кришка



Права кришка

Рисунок 3.3 Деталі, які виготовляються адитивним методом

Кінцівки полюсів фіксуються за допомогою кільця.

В якості матеріалів редуктора використовуються:

- для виготовлення деталей корпусу (основа, кришки, накладки) конструкційна сталь ст3;
- для виготовлення вхідного, вихідного валів, ротора та зовнішнього кільця з пазами для кріплення неодимових магнітів нержавіюча не магнітна сталь X18H19T;
- магніти вихідного кільця - неодимовий супермагніт, NdFeB 40x4x1 мм;
- магніти ротора - неодимовий супермагніт, NdFeB 40x10x5 мм.

3.2. Процес виготовлення діючої тестової моделі магнітного редуктора методом FDM

Для підготовки деталей до друку скористаємось програмним забезпечення Simplify3D. Simplify3D є комерційним продуктом для нарізки (слайсінга) 3D-моделей, а так само керуючим ПО для різних 3D-принтерів.

Друк відбуватиметься з використанням сопла діаметром 0,4 мм шарами товщиною 0,2 мм, внутрішнім заповненням 40%. Матеріал для друку – полікарбонат (PC). Швидкість друку 50 мм/с.

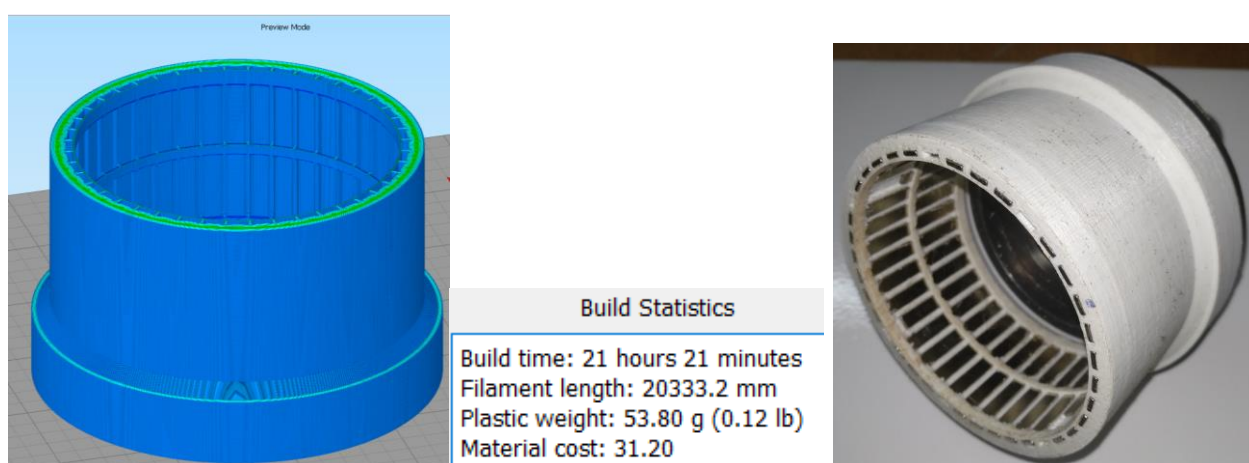


Рисунок 3.4. Моделювання процесу 3D-друку водила вихідного валу та отримана деталь

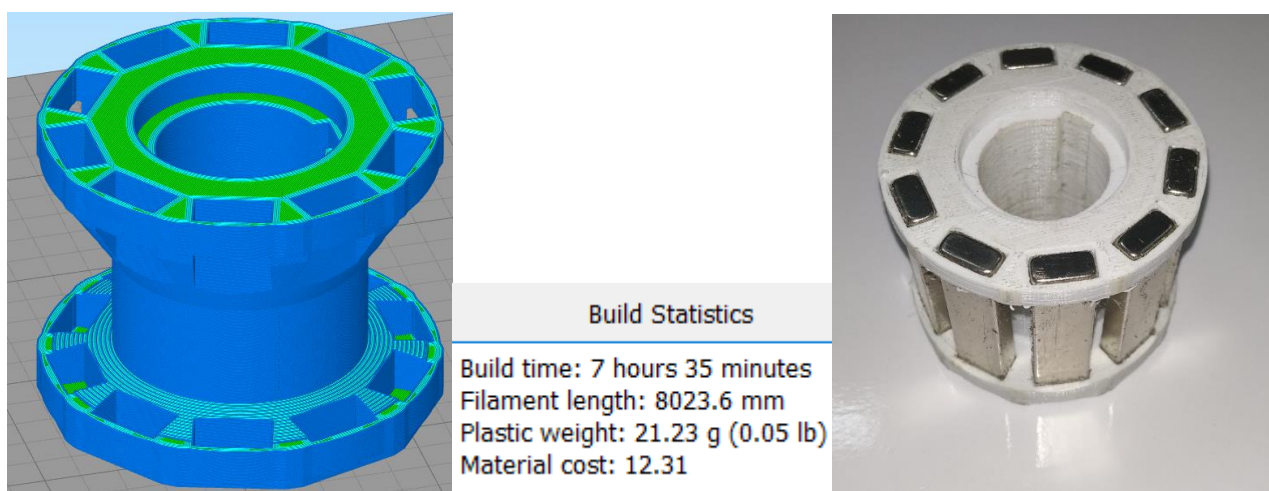


Рисунок 3.5. Моделювання процесу 3D-друку ротора вхідного валу та отримані деталі

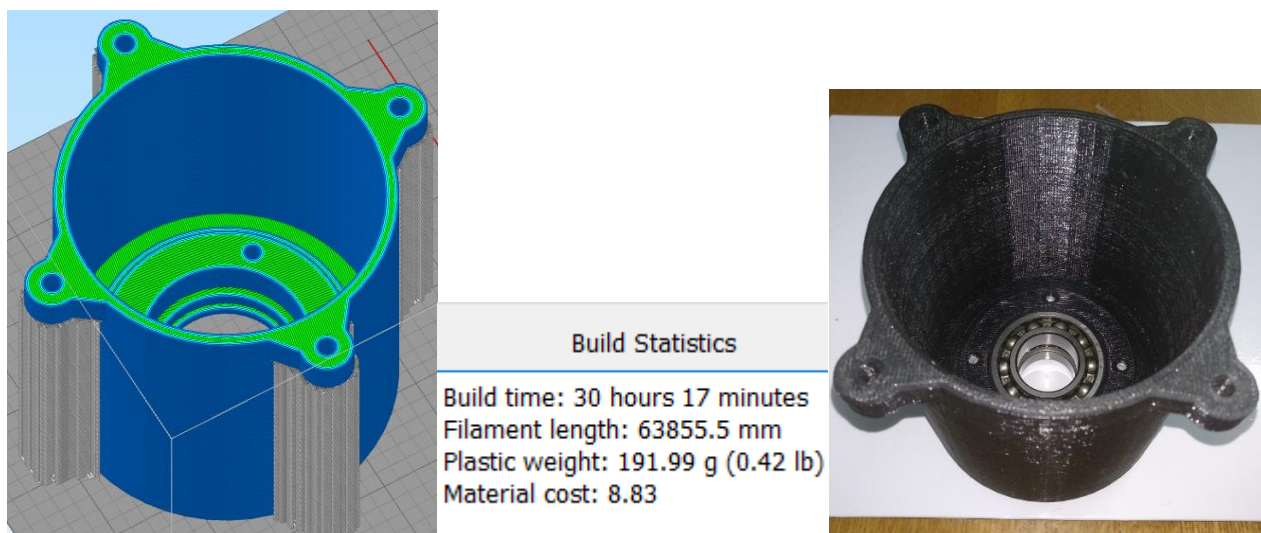


Рисунок 3.6. Моделювання процесу 3D-друку лівої кришки – зовнішнього корпусу редуктора та отримані деталі

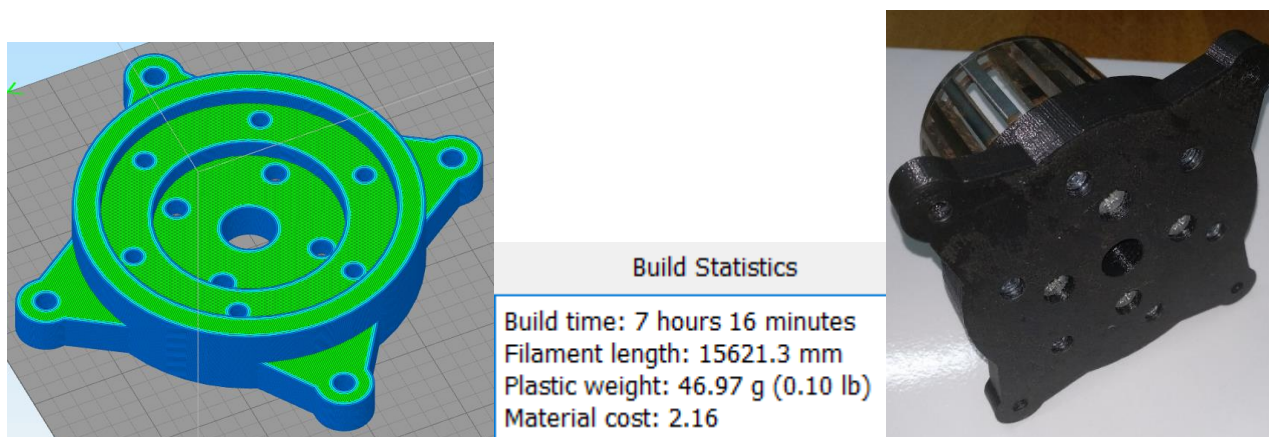


Рисунок 3.7. Моделювання процесу 3D-друку ведучої конічної шестерні та привідного маховика та отримані деталі



Рисунок 3.8. Кінематична модель магнітного редуктора виготовлена з застосуванням технологій 3D-друку

ВИСНОВОК

В умовах розвитку машинобудування та інших суміжних галузей зростає роль виробництва приводів, без яких в даний час не може обійтися жоден механізм машини. Одним з таких видів передач є магнітні редуктори. Магнітні редуктори можуть перетворювати обертальний рух між співвісними валами і забезпечувати передавальні числа значно вище, ніж зубчасті. У ряді випадків використання магнітних редукторів в приводах машин допомагає вирішити проблеми компоновання їх в обмеженому просторі. Магнітні передачі потенційно володіють високою ефективністю і надійністю завдяки їх безконтактній роботі, притаманному внутрішньому захисту від перевантаження і практично відсутній потребі у технічному обслуговуванні.

В роботі запропонована та виготовлена конструкція магнітного редуктора з передавальним числом 4,25 планетарної схеми. Виготовлена модель відповідає її теоретичним параметрам розрахованим з використанням COMSOL Multiphysics. Це дозволяє використовувати дану модель для подальших розробок магнітних редукторів подібної конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. C. G. Armstrong, "Power transmitting device," US Pat. 687292, 1901.
2. Magnetic gear technologies: A review Conference Paper (PDF Available) · September 2014 with 1,974 Reads DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960233
3. Surface Magnet Gears with a New Magnet Arrangement and Optimal Shape of Stationary Pole Pieces Journal of Electromagnetic Analysis and Applications Vol. 5 No. 6 (2013) , Article ID: 32637 , 7 pages DOI:10.4236/jemaa.2013.56039
4. L. Jian, K. T. Chau, "Design and analysis of an integrated halbach-magnetic-geared PM motor for electric vehicles," J. of Asian Electric Vehicles, 7(1):1213-1219, 2009.
5. R. Holm et al., "Design of a magnetic lead screw for wave energy conversion," in Int. Conf. on Electr. Machines, pp.618-626, 2012.
6. L. Shah et al., "A magnetic gear box for application with a contrarotating tidal turbine," in Int. Conf. on Power Electron. & Drive Sys. (PEDS), pp.989-993, 2007.