

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електромеханіки

«На правах рукопису»
УДК 621.313.

До захисту допущено:

В.о. Завідувача кафедри

_____ М.А. Коваленко

«__» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Електричні машини і апарати»

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

на тему: «Вентильний двигун з постійними магнітами»

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕМ-41мп

Чамлай Геннадій Юрійович

Науковий керівник:

доцент, к.т.н.,

Цивінський Сергій Станіславович

Рецензент:

доцент, к.т.н.,

Пушкар Микола Васильович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електромеханіки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електричні машини і апарати»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Михайло КОВАЛЕНКО

«___» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Чамлаю Геннадію Юрійовичу**

1. Тема дисертації «Вентильний двигун з постійними магнітами»,
науковий керівник дисертації Цивінський Сергій Станіславович, доцент, к.т.н,
затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025 р. № 4778-с
2. Термін подання студентом дисертації 09.12.2025
3. Об'єкт дослідження: вентильний двигун
4. Вихідні дані: номінальна потужність $P_n = 60$ Вт, напруга $U_n = 24$ В, частота обертання $n = 167$ об/сек.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: розробка та проектування вентильного електродвигуна з постійними магнітами, розробка математичних моделей вентильного електродвигуна.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація за матеріалами дисертації.
7. Перелік публікацій: Електромашинний підсилювач поперечного поля потужністю 2 кВт / Реуцький М.О., Чамлай Г.Ю., Букань П.Є. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ". – Київ: «Політехніка». – 2024.
Brushless electric motors: design, operating principle, application areas and development prospects / H.Y. Chamlai, S.S. Tsyvinskyi, O.A. Geraskin // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ". – Київ: «Політехніка». – 2025.
(див. додатки)

8. Консультанти розділів дисертації

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

9. Дата видачі завдання 01.11.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Пошук інформації по розділу 1	15.11.2024	
2	Обробка інформації та оформлення розділу 1	25.02.2025	
3	Пошук інформації по розділу 2	01.04.2025	
4	Обробка інформації та оформлення розділу 2	10.06.2025	
5	Оформлення розділу 3 та оформлення результатів дослідження	01.08.2025	
6	Корегування знайденої інформації в період проходження практики	01.10.2025	
7	Оформлення 4 розділу	20.10.2025	
8	Оформлення: вступу, реферату і висновку	15.11.2025	
9	Оформлення пояснювальної записки	10.12.2025	

Студент

(підпис)

Чамлай Г.Ю.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Цивінський С.С.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Метою магістерської дисертації є розробка та дослідження вентильного двигуна загального призначення, що може використовуватись у медичній, авіаційній та в інших галузях промисловості і техніки.

Пояснювальна записка містить: сторінок - 78, таблиць – 7, рисунків - 45.

Двигун що був розрахований відповідає сучасним вимогам.

У магістерській дисертації розглянуто такі питання:

- опис електродвигуна: його будову, принцип роботи, функції, призначення та області застосування;
- проектування вентильного двигуна: визначення головних розмірів, розрахунок зубцевої зони, параметри пазу, розрахунок магнітного кола та активних матеріалів, визначення електричних втрат та ККД;
- математичне моделювання вентильного двигуна.

ABSTRACT

The aim of the master's thesis is to develop and study a general-purpose valve motor that can be used in medical, aviation and other industries and technologies.

The explanatory note contains: pages - 78, tables - 7, figures - 45.

The engine that was designed meets modern requirements.

The master's thesis covers the following issues:

- description of the electric motor: its structure, principle of operation, functions, purpose and areas of application;
- design of a valve motor: determination of main dimensions, calculation of the tooth zone, slot parameters, calculation of the magnetic circuit and active materials, determination of electrical losses and efficiency;
- mathematical modelling of a valve motor.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
Розділ 1. Опис вентильного двигуна з постійними магнітами	20
1.1. Будова вентильного двигуна з постійними магнітами.....	21
1.2. Принцип дії вентильного двигуна з постійними магнітами	29
1.3. Основні дані та характеристики вентильного двигуна з постійними магнітами.....	31
Розділ 2. Розробка вентильного двигуна з постійними магнітами	35
2.1. Основні технічні дані на розрахунок вентильного двигуна з постійними магнітами.....	35
2.2. Особливості конструкції вентильного двигуна з постійними магнітами.....	35
2.3. Електромагнітний розрахунок вентильного двигуна	37
2.3.1. Вхідні дані.....	37
2.3.2. Розрахунок основних розмірів.....	38
2.3.3. Розрахунок зубцевої зони.....	40
2.3.4. Розрахунок параметрів пазу	42
2.3.5. Розрахунок магнітного кола.....	45
2.3.6. Розрахунок маси активних матеріалів	53
2.3.7. Розрахунок втрат та коефіцієнту корисної дії	54
Розділ 3. Моделювання вентильного двигуна з постійними магнітами..	56
3.1. Геометричне моделювання вентильного двигуна з постійними магнітами.....	56
3.1.1. Основні функціональні можливості програмного пакета SolidWorks.....	56
3.1.2. Геометрична 3D модель активної частини вентильного двигуна з постійними магнітами	58
3.2. Математичне моделювання вентильного двигуна з постійними магнітами.....	60

3.2.1. Огляд програмного пакета COMSOL Multiphysics	60
3.2.2. Польова математична модель активної частини у двовимірному просторі.....	61
Розділ 4. Стартап-проект	69
4.1.1. Опис ідеї стартап-проекту	70
4.2. Потенційні користувачі	71
4.3. Структура виплат	71
4.4. Бізнес-модель впровадження	71
Висновок	73
Список використаної літератури	75
Додаток.....	75

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВД - вентильний двигун
ЕК - електронний комутатор
ЕМ - електрична машина
ЕМП - електромеханічний перетворювач
ЕРС - електрорушійна сила
СД - синхронний двигун
ДПР - датчик положення ротора
КНК - керований напівпровідниковий комутатор
БЕМ – безколекторні електродвигуни
ВДПС – вентильний двигун з постійними магнітами
СФСК – система формування сигналів керування
ККД – коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

Вентильний електродвигун (ВД) — клас синхронної машини, що реалізований в замкнутій системі з використанням датчика положення ротора (ДПР), системи керування (перетворювача координат) і силового напівпровідникового перетворювача. Часто їх також називають безконтактними (безколекторними) двигунами постійного струму або оберненою машиною постійного струму [1].

Завдяки цьому вони мають такі переваги:

- висока ефективність (до 95–97 %), оскільки відсутні втрати на тертя щіток.
- надійність і довговічність, оскільки немає механічного зносу комутуючих елементів.
- компактність і мала маса, що робить їх придатними для транспортних систем і портативних пристроїв.
- можливість точного цифрового керування швидкістю, моментом і положенням.

Поєднання електромеханічних перетворювачів (ЕМП) з електронними компонентами (ЕК) дає змогу здійснювати перетворення електричного струму та його параметрів, а також забезпечувати керування, діагностику, захист і низку інших функцій на якісно новому рівні.

Інтеграція енергетичних та інформаційних процесів у межах одного технічного пристрою сприяє створенню модернізованих варіантів електричних машин (ЕМ), які відзначаються підвищеною керованістю, швидкодією, точністю та іншими покращеними або новими характеристиками.

Можливість розробки таких систем повністю базується на використанні силових транзисторів, які забезпечують реалізацію всіх процесів у пристроях перетворення електричної енергії. Новітні електротехнічні системи створюються на основі комплексу сучасних пристроїв, що виконують різноманітні функції: перетворення, регулювання, комутацію та захист електроенергії. Застосування таких систем дозволяє ефективно вирішувати актуальні технічні завдання, серед яких — істотне зниження матеріалоємності, енергоспоживання та

трудомісткості під час розроблення й виробництва електротехнічних пристроїв.

Електронізація набуває особливої актуальності в галузі малих електричних машин, що зумовлено зростанням потреби у виконавчих механізмах та пристроях перетворення інформації для систем автоматичного керування. Такі системи мають бути надійними, гнучкими у регулюванні та здатними до широкої інтеграції з елементами обчислювальної й мікропроцесорної техніки.

Однак досвід показує, що просте поєднання ЕМП з ЕК — як електричне, так і конструктивне — без попередньої оптимізації параметрів не дозволяє досягти необхідних експлуатаційних характеристик за мінімальних витрат, габаритів чи маси. Тобто, включення електронних компонентів до складу електричних машин повинно передбачати попередні розрахунки й проектні оцінки за визначеними критеріями, спрямовані на пошук оптимальних рішень: за кількістю витків і паралельних гілок у якірних обмотках, перерізом провідників і розмірами осердь, методами визначення частоти обертання та просторового положення ротора, а також за типами напівпровідникових перетворювачів і комутаторів. У багатьох випадках виникає потреба у виконанні багатоваріантних розрахунків із застосуванням адекватних математичних моделей, які описують функціонально об'єднані системи ЕМП та ЕК.

Розв'язання задач, пов'язаних з оптимальною електронізацією електричних машин (ЕМ), потребує створення та впровадження спеціальних теорій і технологій, що базуються на раціональному поєднанні принципів електромеханіки, електроніки та кібернетики. Під правильним поєднанням розуміють не формальне об'єднання різних теорій, а їх інтеграцію на основі системного підходу, який передбачає використання нових критеріїв і методологічних принципів.

Електроприводи, що приводять у дію машини й механізми, споживають близько 60 % всієї електроенергії, виробленої у світі. Тому навіть незначне зменшення енергетичних втрат у системах електропривода здатне забезпечити значну економію енергоресурсів у масштабах цілої країни. Одним із найефективніших способів зменшення втрат, а також покращення масогабаритних і експлуатаційних характеристик електропривода є перехід від

нерегульованих до регульованих систем. Це забезпечує суттєве підвищення технічного рівня електроприводів і технологічних процесів, а також істотну економію енергії. Такий напрям є загальносвітовою тенденцією, зумовленою розвитком силової та інформаційної електроніки [2].

Перші ідеї вентильних машин з'явилися ще в середині XX століття — коли виникла потреба в безщіткових двигунах постійного струму.

- 1950–60-ті роки — створено перші безщіткові двигуни постійного струму (BLDC), що використовували механічні датчики положення ротора (Холла).
- 1970–80-ті роки — розвиток силових напівпровідникових елементів (транзисторів, тиристорів) зробив можливим побудову електронних комутаторів.
- 1990-ті — з появою постійних магнітів на основі NdFeB і мікропроцесорних систем керування з'явилися високоефективні PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor).
- 2000-ті — активно розвиваються реактивні вентильні двигуни (SRM, SynRM) як альтернатива дорогим магнітам.
- Сьогодні вентильні машини є ключовим елементом електромобілів, робототехніки, систем точного керування та відновлюваної енергетики.

До 1980-х років основним типом електромеханічного перетворювача, який застосовувався в регульованих електроприводах, була колекторна електрична машина постійного струму. Однак надалі частка таких систем різко скоротилася через недостатню надійність колекторного вузла. За прогнозами експертів, найближчим часом кількість електроприводів з колекторними машинами постійного струму зменшиться до близько 10 % від загальної кількості. Це свідчить про те, що такі приводи практично вичерпали свій потенціал розвитку.

На зміну їм прийшли частотні електроприводи на основі асинхронних двигунів із короткозамкненими роторами та вентильні електродвигуни постійного струму, в яких комутація струму в обмотках здійснюється напівпровідниковими перетворювачами [3].

Типи (конструкції) вентильних машин. Вентильні машини класифікують за

типом ротора та способом створення електромагнітного моменту. Найбільш поширені такі типи:

- вентильний двигун з постійними магнітами (BLDC, PMSM);
- вентильний реактивний двигун (SRM);
- синхронний реактивний вентильний двигун (SynRM);
- гібридні та спеціалізовані конструкції (FSM, Hybrid SRM-PM, Axial-Flux).

Вентильний двигун з постійними магнітами. До цього типу належать BLDC (Brushless DC Motor) та PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor).

Обидва використовують постійні магніти на роторі, але відрізняються формою ЕРС та типом комутації.

Безщітковий двигун постійного струму (BLDC). Конструкція.

Статор: має трифазну обмотку, розміщену у пазах корпусу.

Ротор: містить постійні магніти (NdFeB або SmCo), розташовані на поверхні ротора.

Електронний комутатор: перемикає фази інвертора послідовно, відповідно до положення ротора (за сигналами датчика Холла або безсенсорно).

Принцип роботи. При подачі живлення інвертор подає імпульси струму у відповідну фазу статора, формуючи обертове магнітне поле. Магніти ротора намагаються вирівнятися з цим полем — утворюючи крутний момент.

Коли ротор повертається, система керування перемикає фази (комутація), щоб поле “тягнуло” його далі.

Синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM) (рис.В.1). Конструкція.

Статор: аналогічний BLDC, має трифазну обмотку.

Ротор: постійні магніти можуть бути поверхневими (Surface PMSM — SPM), або вбудованими (Interior PMSM — IPM), що забезпечує кращу механічну міцність і дає реактивну складову моменту.

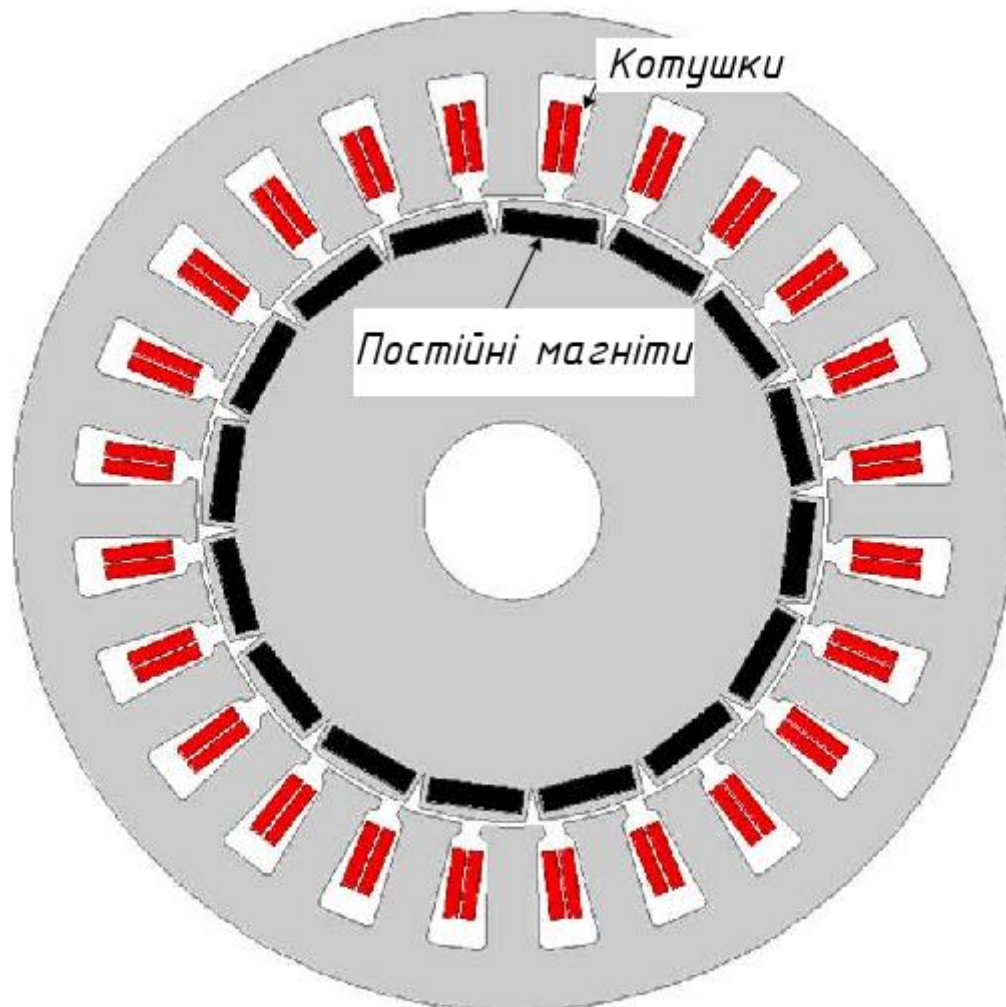


Рис. В.1. – Ескіз поперечного перерізу СД з постійними магнітами

Принцип роботи. Інвертор формує синусоїдальні струми, які створюють синусоїдальне обертове магнітне поле. Поле ротора (від магнітів) “зчіплюється” з полем статора і обертається синхронно з ним. Ротор не має ковзання, тому обертається з частотою поля — звідси назва синхронний.

Вентильний реактивний двигун (SRM — Switched Reluctance Motor) (рис.В.2). Конструкція.

Статор: має виступні полюси з концентрованими обмотками.

Ротор: пасивний, без обмоток і магнітів, виготовлений із феромагнітної сталі, має зубці, що взаємодіють зі статором.

Кількість зубців статора і ротора зазвичай різна (наприклад, 8/6 або 6/4).

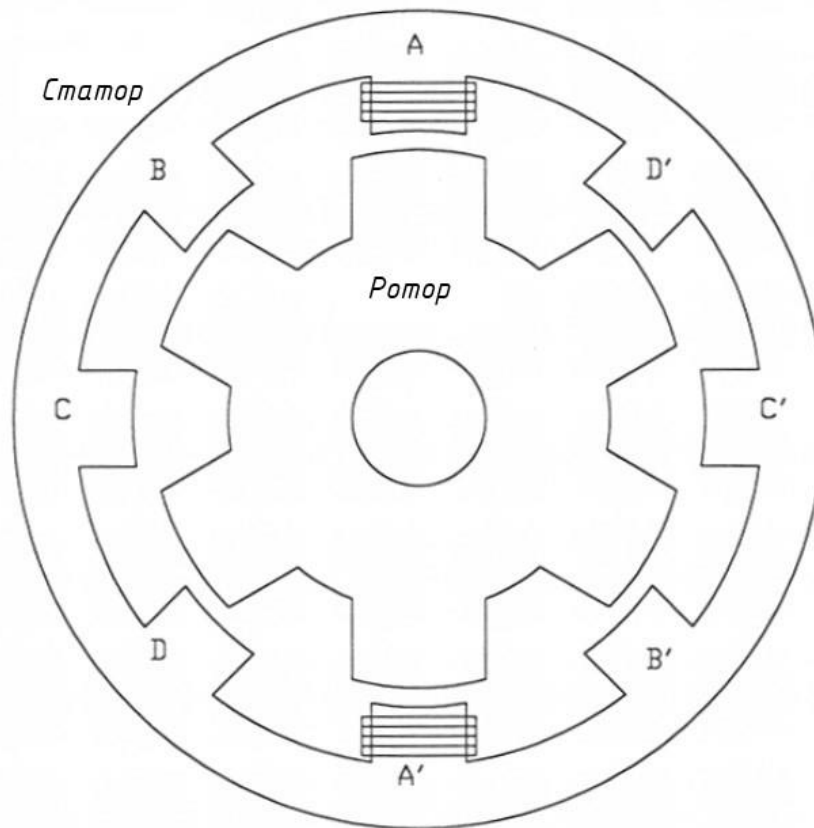


Рис. В.2. – Ескіз поперечного перерізу вентильного реактивного двигуна

Принцип роботи. Коли на одну з фаз статора подається струм, магнітний потік прагне “замкнутися” через зубці ротора, створюючи силу, яка вирівнює зубці ротора з полюсами статора. Таким чином, ротор постійно прагне до положення мінімального магнітного опору. Послідовне вмикання фаз викликає обертання ротора.

Синхронний реактивний вентильний двигун (SynRM) (рис.В.3).
Конструкція.

Ротор: складається з феромагнітних пластин із магнітними бар’єрами (каналами), що створюють різну магнітну проникність по осях d та q .

Статор: трифазна обмотка, як у звичайного синхронного двигуна.

Інвертор: подає синусоїдальні струми, синхронізовані з положенням ротора.

Принцип роботи. Крутний момент утворюється завдяки різниці індуктивностей по двох головних осях ($L_d \neq L_q$). Ротор прагне вирівнятися так, щоб магнітна енергія в системі була мінімальною. Оскільки комутація здійснюється вентилями інвертора, машина називається вентильною.

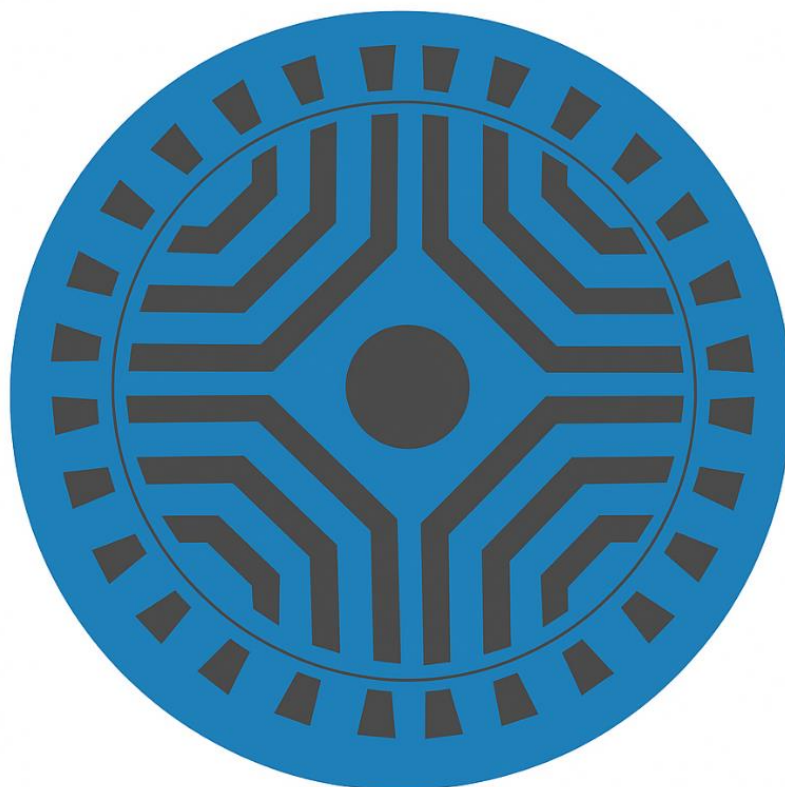


Рис. В.3. – Ескіз поперечного перерізу синхронного реактивного вентильного двигуна

Гібридні вентильні конструкції. У сучасних системах розробляються гібридні двигуни, що поєднують переваги декількох принципів:

Тип	Особливість	Приклад
Hybrid SRM–PM	Комбінація постійних магнітів і реактивного принципу — підвищує момент та зменшує пульсації	Прецизійні серводвигуни
Flux Switching Motor (FSM)	Магніти розташовані в статорі, ротор пасивний; магнітний потік “перемикається” між зубцями	Транспорт, вітрогенератори
Axial-Flux PMSM	Потік спрямований уздовж осі, плоска конструкція	Електромобілі, дрони, приводи коліс

Порівняльна характеристика типів вентильних машин

Показник	BLDC	PMSM	SRM	SynRM
Ротор	Магніти на поверхні	Магніти всередині або на поверхні	Пасивний зубчастий	Пасивний з бар'єрами
Комутація	Прямокутна	Синусоїдна	Імпульсна	Синусоїдна
Момент	Середні пульсації	Плавний	Високі пульсації	Плавний
Вартість	Середня	Висока	Низька	Середня
Ефективність	90–95%	94–98%	80–90%	88–94%
Застосування	Побут, дрони	Електромобілі	Насоси, стартери	Промисловість

Завдяки універсальності, вентильні двигуни знаходять застосування в різних галузях, особливо в тих де раніше застосовувались колекторні електричні машини постійного струму:

- промисловість: електроприводи насосів, вентиляторів, компресорів, верстатобудування
- електротранспорт: сучасні локомотиви та електромобілі оснащуються тяговими вентильними двигунами з системами багаторівневого керування.
- робототехніка й автоматизовані виробничі комплекси: завдяки високій динаміці та точності регулювання такі двигуни стали стандартом у промислових роботах.
- енергетика: інтеграція з відновлюваними джерелами енергії передбачає використання вентильних машин для перетворення та збереження енергії.

Сфери застосування вентильних машин показані на (рис. В.4)

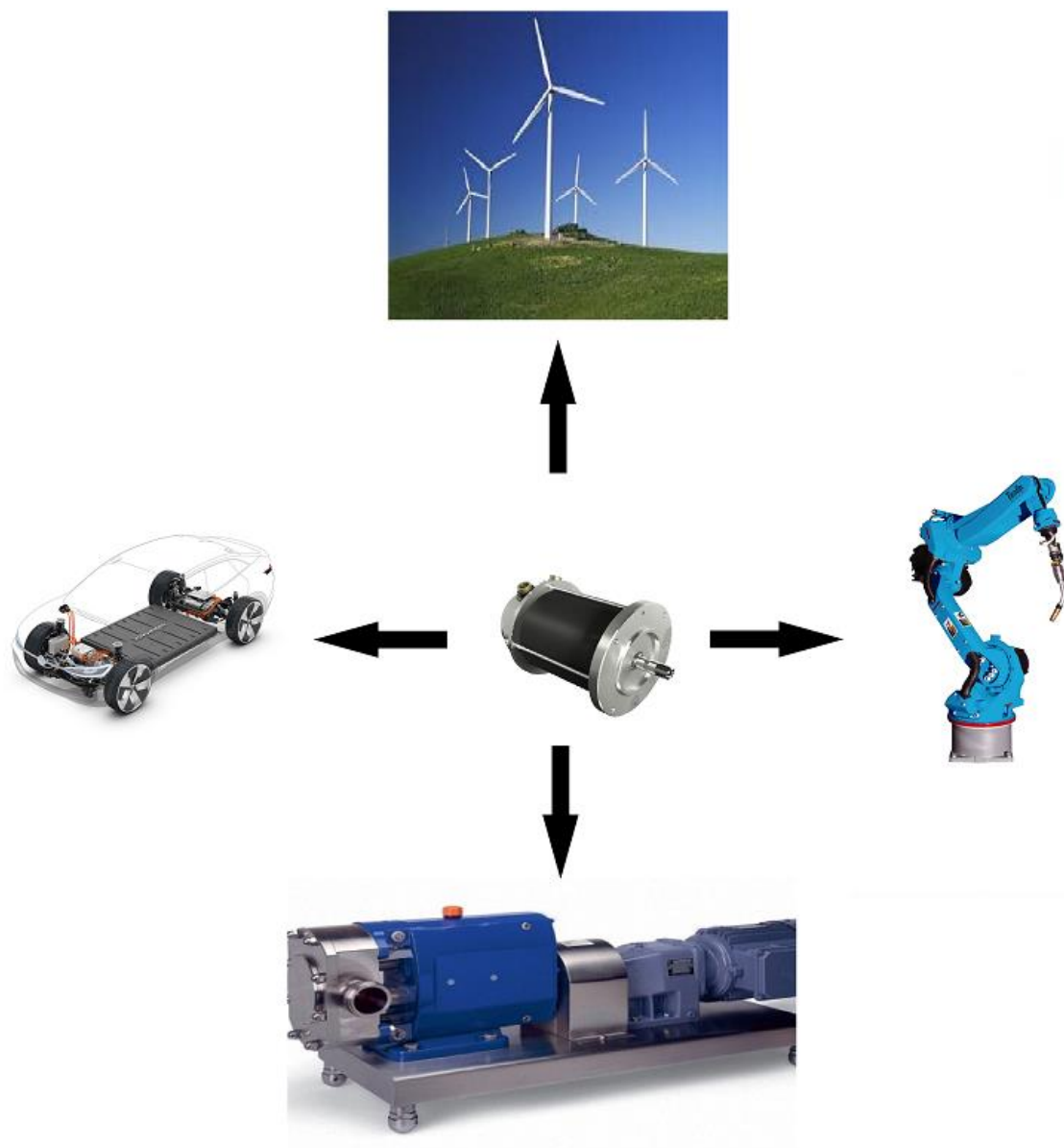


Рис. В.4. – Сфери застосування вентильних машин

Вентильні двигуни отримали широке поширення в наші дні. Їх усе частіше використовують як в спеціалізованих електроприводах (медичне обладнання, аерокосмічна промисловість), так і в електроприводах загального призначення та побутових електроприладах.

У сучасних малопотужних регульованих і стабілізованих електроприводах дедалі ширше використовуються вентильні двигуни різноманітних конструктивних типів. Статорні обмотки таких електричних машин можуть виконуватись п-секційними, розміщеними рівномірно по поверхні гладкого або зубчастого якоря, а також зосередженими на зубцях явнополюсного статора. Ротори при цьому виготовляються з постійними магнітами або є пасивними [4].

Електромеханічний перетворювач і датчик положення ротора зазвичай інтегрують у єдиний конструктивний модуль. Це висуває особливі вимоги до його елементів з огляду на вибір матеріалів, їхні фізико-механічні властивості та необхідну міцність складових частин.

Структурно систему електроприводу умовно поділяють на три частини:

- виконавчий електричний двигун;
- силовий блок, що забезпечує формування напруги необхідної потужності та частоти;
- система керування, що відповідає за гнучке налаштування та надійний захист двигуна і силового блоку.

Враховуючи викладене, можна сформулювати основні вимоги до електроприводу:

- система керування має бути гнучкою, забезпечуючи реалізацію будь-якого алгоритму просторового огляду;
- система електроприводу має мати достатню жорсткість для забезпечення точності обертання та позиціонування;
- передбачення комплексу захисту для безаварійної та безпечної роботи.

Завдяки використанню високоякісних магнітотвердих матеріалів з великою магнітною енергією зріс інтерес до енергоефективних двигунів з постійними магнітами. Безколекторні електродвигуни (БЕМ) широко використовуються в автономних енергетичних установках, транспорті, у важкому машинобудуванні, оборонній промисловості, на літаках та інших сферах, що вимагають високонадійних генераторів і двигунів.

Широке поширення отримали БЕМ з постійними магнітами в електромашинних перетворювачах електроенергії (перетворення роду струму, частоти, фаз тощо), які застосовуються як у наземній техніці, так і в бортових енергосистемах. У вентильних двигунах малої потужності (до сотень ват) відсутній контакт якоря й комутація здійснюється електронно, що значно підвищує надійність і зменшує знос у порівнянні з традиційними електродвигунами.

Метою магістерської дисертації є розробка та дослідження вентильного

двигуна загального призначення з постійними магнітами, що може використовуватись в різних галузях промисловості і техніки. Виконати розрахунок вентильного двигуна з характеристиками, що забезпечують оптимальні показники енергоефективності та надійності для застосування в електроприводах автоматизованих систем.

Завдання роботи: розглянути конструктивні особливості вентильного двигуна з постійними магнітами, дослідити принцип його роботи та електромагнітні процеси, що відбуваються під час перетворення енергії, виконати аналітичні розрахунки основних параметрів двигуна, побудувати механічні та електромагнітні характеристики, провести аналіз впливу параметрів обмоток і магнітної системи на показники ефективності.

Предмет дослідження: вентильний двигун, як частина електроприводу, його електромеханічні параметри та показники.

Шляхи реалізації. Аналіз науково-технічної літератури та конструкторської документації, що стосується вентильних двигунів з постійними магнітами. Ознайомлення з будовою та принципом роботи електричних машин цього типу. Виконання аналітичних розрахунків основних електромагнітних параметрів двигуна в середовищі Mathcad. Розроблення та дослідження математичної моделі вентильного двигуна з постійними магнітами за допомогою програмного комплексу COMSOL Multiphysics для візуалізації та аналізу електромагнітних процесів і розподілу магнітного поля.

РОЗДІЛ 1.

ОПИС ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Під вентильним двигуном з постійними магнітами (ВДПС) слід розуміти синхронний двигун, що живиться від мережі через напівпровідниковий комутатор, керований залежно від кутового положення за допомогою датчика положення ротора (ДПР).

Якщо живлення ВД здійснюється безпосередньо від мережі постійного струму (ВДПС), його схема значно спрощується. По-перше, відпадає необхідність у фільтрі. По-друге, вихідні сигнали ДПР безпосередньо керують силовими транзисторами, і немає потреби у використанні системи формування сигналів керування (СФСК). У цьому випадку функціональна схема ВД має найпростіший вигляд (рис. 1.1), що складається з трьох елементів: Вентильний двигун включає в себе три підсистеми:

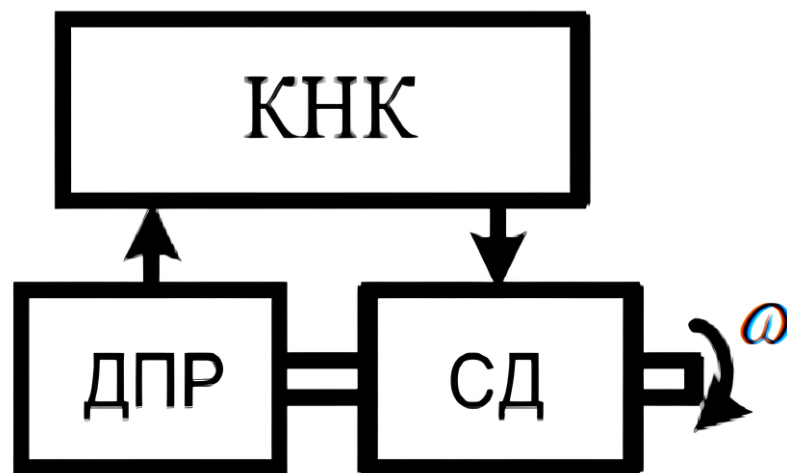


Рис. 1.1 – Функціональна схема ВДПС

- а) виконавчий елемент у вигляді, наприклад, трифазного синхронного двигуна (СД) з збудженням від постійних магнітів;
- б) керований напівпровідниковий комутатор (КНК), виконаний на безконтактних комутаційних елементах (транзисторах або тиристорах), який здійснює комутацію обмотки якоря;
- в) датчик положення ротора (ДПР) двигуна відносно фазних обмоток

(секцій) статора, що є логічним елементом, який визначає моменти та послідовність перемикання секцій обмотки.

За способом живлення всі схеми вентильних двигунів можна поділити на дві групи:

- з однопівперіодною (однополярною) комутацією, коли струм у кожній фазі обмотки протікає лише в одному напрямку;
- з двопівперіодною (двополярною) комутацією, коли струм у кожній фазі змінює напрямок (реверсується).

1.1. Будова вентильного двигуна з постійними магнітами

Конструкція ВД може бути двох типів:

- внутрішньороторна – у цьому типі конструкція розміщена всередині ротора (рис. 1.2);
- зовнішньороторна – у цьому випадку ротор охоплює зовнішню частину конструкції (рис. 1.2)

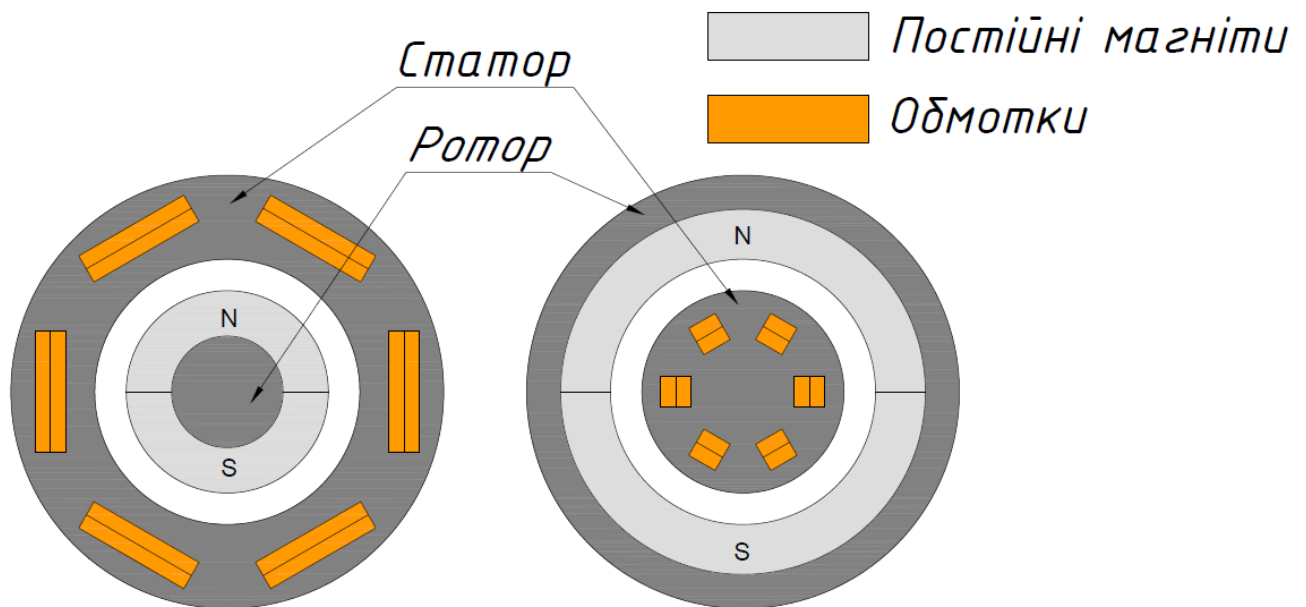


Рис. 1.2 – Типи конструкцій ВДПМ

Будова ВД з внутрішнім ротором показана на рис. 1.3.



Рис. 1.3 – Будова вентильного двигуна з внутрішнім ротором

Будова ВД з зовнішнім ротором показана на рис. 1.4

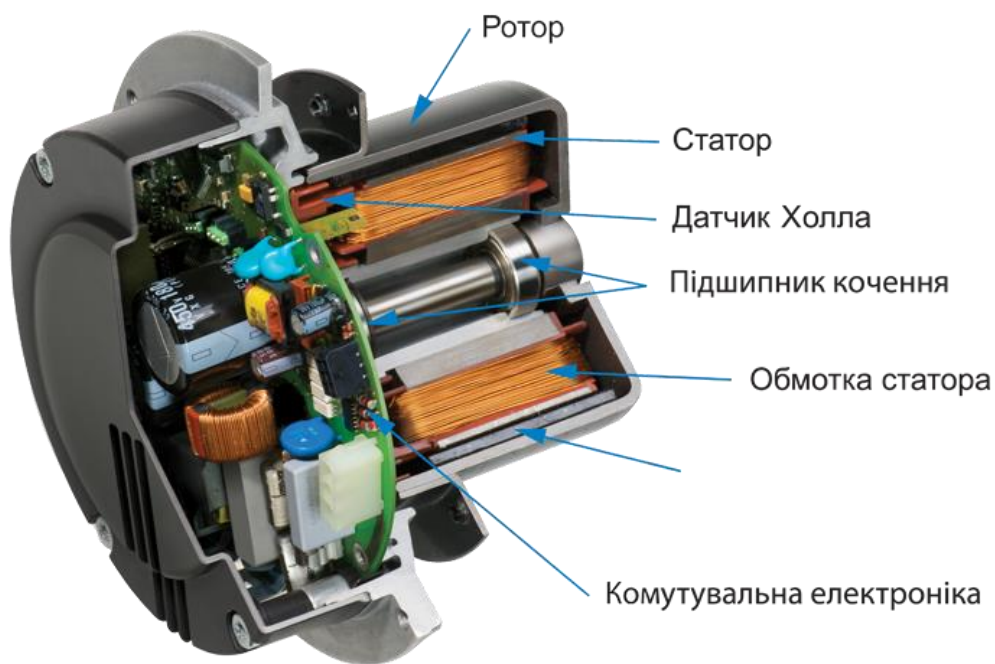


Рис. 1.4 – Будова вентильного двигуна з зовнішнім ротором

Кількість полюсів у таких двигунах може бути різною, як правило, варіюється від двох до 22 з парним кроком. Також відрізняється матеріал постійних магнітів — від класичного феритового сплаву (який має низькі показники магнітної індукції) до рідкоземельних металів (кращі показники, але значно підвищують вартість двигуна).

Постійні магніти. Постійний магніт виготовляється з магнітотвердого феромагнітного матеріалу, властивості якого характеризуються залежністю

$$B_M = \mu_0 M = f'(H) \text{ або } B = f(H)$$

де M — намагніченість, H — напруженість зовнішнього магнітного поля, μ_0 — магнітна проникність вакууму, B — магнітна індукція.

Якщо відома одна з цих залежностей, то іншу можна отримати із співвідношення

$$B = \mu_0(M + H) = \mu_0(\chi H + H) = \mu_0(\chi + 1)H = \mu_0 \mu H = \mu_a H.$$

де χ — магнітна сприйнятливість матеріалу; μ — відносна магнітна проникність; $\mu_a = \mu_0 \mu$ — абсолютна магнітна проникність.

Залежність $B_M = \mu_0 M = f'(H)$ і $B = f(H)$ являють собою відповідно гістерезисні петлі для намагніченості та індукції (рис. 1.5).

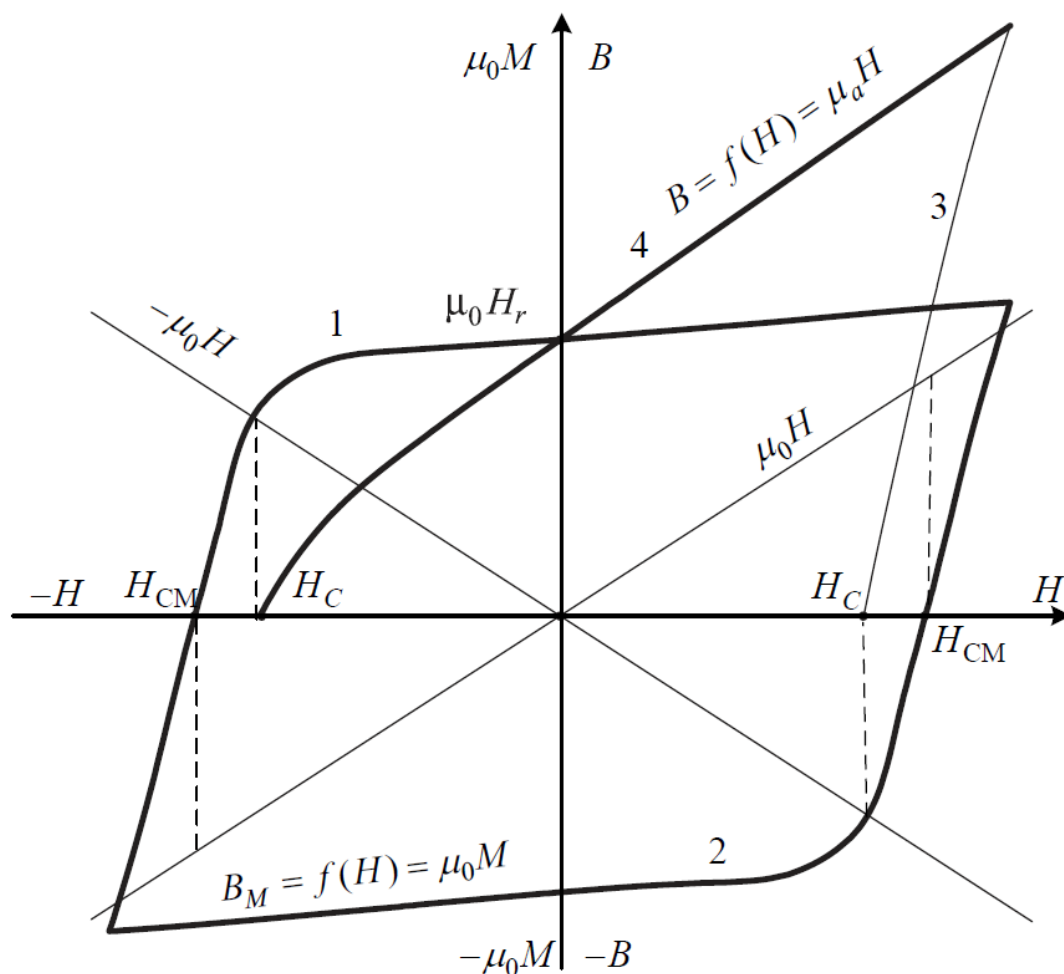


Рис. 1.5 – Залежності $B_M = \mu_0 M = f'(H)$ і $B = f(H)$

Для технічних розрахунків зазвичай використовують характеристику $B=f(H)$. У цьому випадку властивості магнітотвердого матеріалу, з якого виготовлено постійний магніт, характеризуються граничною петлею гістерезису, що утворюється під час намагнічування матеріалу до стану насичення. При цьому особливе значення має частина граничної петлі гістерезису, розташована у другому квадранті й названа кривою розмагнічування (рис. 1.6).

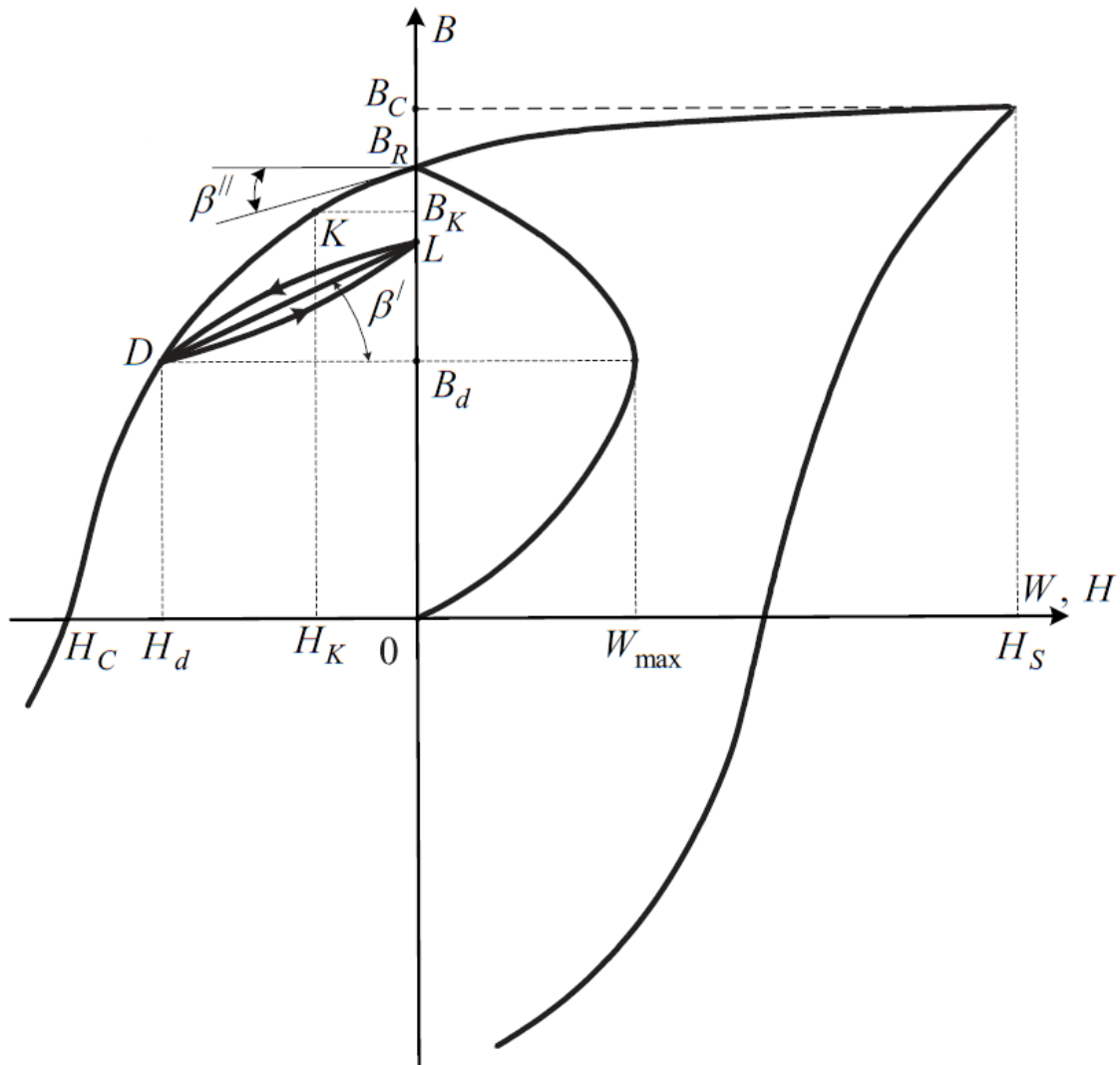


Рис. 1.6 – Петля гістерезису

Зауважимо, що намагніченість M — це векторна величина, яка характеризує магнітний стан речовини, рівна відношенню магнітного моменту елемента об'єму речовини до цього елемента об'єму, коли останній прямує до нуля.

У ферромагнетиках магнітні моменти атомів або іонів перебувають у стані самовільного впорядкування, причому результуючий магнітний момент кожної

з областей із однорідно впорядкованими магнітними моментами атомів або іонів, тобто магнітний момент домену, не дорівнює нулю.

У процесі намагнічування матеріалу, тобто при наявності зовнішнього поля і насиченні матеріалу напрямком всіх векторів намагніченості збігається з напрямком поля. Після усунення останнього вектори намагніченості прагнуть повернутися в найближчий напрямок легкого намагнічування. При цьому у ізотропних матеріалів залишкова намагніченість становить 0,5...0,8 від значення намагніченості насичення. У анізотропних матеріалів розмагніченому стану відповідає рівномірний розподіл векторів намагніченості вздовж осі легкого намагнічування. При намагнічуванні до насичення вздовж текстури, що збігається з віссю легкого намагнічування, всі вектори збігаються з напрямком намагнічуючого поля. Після усунення зовнішнього поля напрямком векторів намагніченості зберігається, оскільки вісь легкого намагнічування збігається з напрямком текстури і з напрямком намагнічуючого поля. Тому у анізотропних матеріалів залишкова намагніченість близька до намагніченості насичення.

Постійні магніти як джерела магнітного поля характеризуються рядом параметрів, основними з яких є:

1. *Індукція насичення B_s* і відповідна їй напруженість магнітного поля H_s . Ці величини характеризують стан так званого технічного намагнічування матеріалу магніту, при якому всі вектори намагніченості (магнітні моменти) доменів орієнтовані паралельно зовнішньому магнітному полю.

2. *Залишкова індукція B_r* — індукція, що виникає в тороїдному або нескінченно довгому прямому магніті з магнітотвердого матеріалу, попередньо намагніченому до технічного насичення, після зняття намагнічувального поля. Значення B_r у сучасних магнітах знаходиться в межах від 0,2 до 1,5 Тл. Чим більше B_r , тим кращий постійний магніт.

3. *Коерцитивна сила за індукцією H_C* — напруженість розмагнічувального поля, при якій індукція в магніті стає рівною нулю. Чим більша коерцитивна сила H_C , тим стійкіший постійний магніт. У сучасних магнітах H_C досягає 60...100 кА/м, а в магнітах на основі інтерметалічних сполук кобальту з рідкісноземельними елементами — 500...560 кА/м.

4. *Коерцитивна сила за намагніченістю* H_{CM} — напруженість розмагнічуючого поля, при якому намагніченість попередньо повністю намагніченого матеріалу доходить до нуля. Коерцитивна сила за намагніченістю завжди більша за коерцитивну силу за індукцією, тобто $H_{CM} > H_C$ (рис. 1.5).

Значення коерцитивної сили H_{CM} є критерієм для поділу феромагнітних матеріалів на магнітотверді та магнітом'які. До магнітотвердих матеріалів належать матеріали з $H_{CM} \geq 1000$ А/м, а до магнітом'яких — з $H_{CM} \leq 1000$ А/м.

5. *Магнітна проникність магніту* μ_a визначається як відношення індукції в будь-якій точці магніту до напруженості магнітного поля в цій точці, тобто $\mu_a = \mu_0 / \mu$. Сучасні постійні магніти мають малу магнітну проникність $\mu = 5 \dots 25$, тоді як у електротехнічної сталі $\mu = (50 \dots 300) \cdot 10^3$.

6. *Максимальна питома магнітна енергія* W_{max} — максимальна енергія, що розвивається магнітом у зовнішньому просторі на одиницю його об'єму. Як відомо, питома магнітна енергія визначається виразом

$$W = 1/2 BH$$

де H і B — напруженість розмагнічуючого поля і відповідно їй індукція.

Статор. Нерухома частина електродвигуна, необхідна для створення обертового електромагнітного поля. Статор у ВД має стандартну для електричних машин конструкцію, може бути як суцільнолитим (з порошкового матеріалу), так і набірним, у пазах якого розміщені фазні проводи (див. рис. 1.7). Найбільшого поширення набули трифазні ВД (вони є найефективнішими), з'єднані за схемою «зірка» або «трикутник». Схема «зірка» призначена для отримання найбільшого крутного моменту, тоді як за допомогою схеми «трикутник» досягаються вищі швидкості обертання.



Рис. 1.7 – Статор вентильного двигуна

Ротор. Обертаюча частина електродвигуна, що складається з валу та постійних магнітів (див. рис. 1.8). У двигунах великої потужності використовують електромагніт.



Рис. 1.8 – Ротор вентильного двигуна

Датчик положення ротора. Є заміною щітково-колекторного вузла та виконує функцію визначення положення ротора, а також необхідний для створення зворотного зв'язку з положенням валу. Це найчутливіший елемент усього двигуна. Найбільшого поширення набули датчики, що працюють на ефекті Холла та фотоелектричному принципі. Розглянемо ВД, що працює на основі датчиків Холла (див. рис.1.9).

Датчики Холла мають такі переваги та недоліки:

1. не потребують обслуговування.
2. можуть виконувати кілька функцій (визначення швидкості, положення, напрямку руху).
3. не піддаються зносу та стійкі до вібрацій.
4. висока температура під час роботи двигуна негативно впливає на опір провідника.
5. можливі проблеми з точністю вимірювання через вплив зовнішніх магнітних полів.
6. невелика відстань вимірювання струму (не більше 10 см).



Рис. 1.9 – Датчик Холла

Система керування. Одна з найскладніших і найдорожчих частин ВД, складається з мікроконтролера, електронних ключів для підключення до обмоток двигуна (комутатор), електричних перетворювачів, підсилювачів, датчиків струму та іншого. Сукупність цих компонентів формує імпульси для керування двигуном (див. рис.1.10).

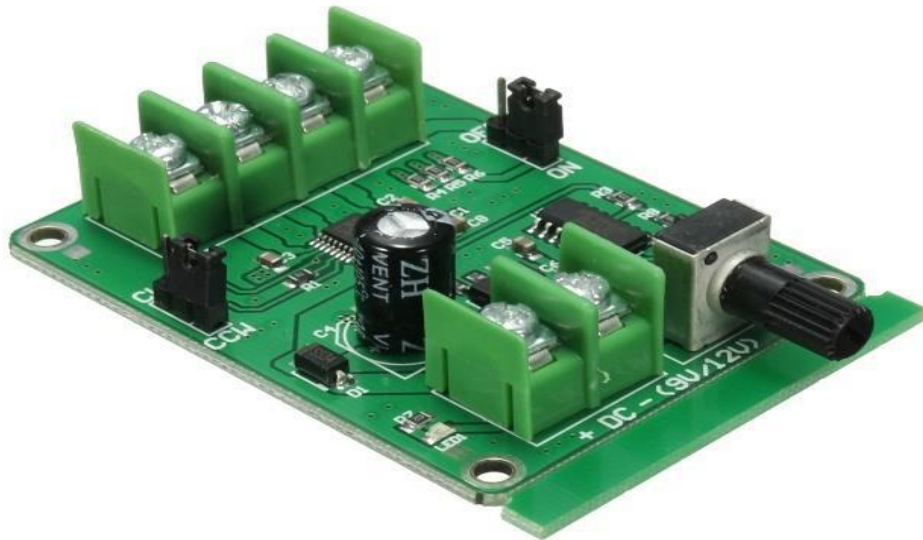


Рис. 1.10 – Плата для керування двигуном

1.2. Принцип дії вентильного двигуна з постійними магнітами

У вентильному двигуні з постійними магнітами, ротор — це елемент із вмонтованими (або розміщеними на поверхні) постійними магнітами, тоді як статор має обмотки, що живляться змінним струмом.

- Постійні магніти на роторі створюють сталий магнітний потік.
- Система обмоток статора формує обертове магнітне поле, яке «крутиться» в просторі з частотою, пропорційною частоті живлення (або керованому інвертором сигналу).
- Вентильний аспект (електронне керування) забезпечує живлення й комутацію обмоток статора у заданій послідовності, щоб забезпечити створення обертового поля — особливо у двигунах з електронною системою керування.

Створення обертового магнітного поля.

Коли на трифазні обмотки статора подається синусоїдальний (або наближений до синусоїди) змінний струм з фазовим зсувом 120° , у повітряному зазорі між статором і ротором формується обертове магнітне поле.

Це поле обертається з синхронною частотою, визначеною формулою:

$$n = \frac{120 * f}{p}$$

де f — частота живлення, p — кількість полюсів двигуна.

Ротор з постійними магнітами, перебуваючи в цьому полі, реагує так, що магнітні полюси ротора прагнуть «відповідати» або «підлаштовуватися» під положення обертового поля статора.

Взаємодія магнітних полів і створення моменту.

Основна сутність дії полягає у взаємодії двох полів: обертового поля статора і сталого поля ротора (постійних магнітів).

- Обертове поле створює напруженість магнітного поля, що рухається відносно ротора.
- Поле ротора створює потік магнітного поля, який буде «шукати» синхронну взаємодію з полем статора: полюси N і S на роторі намагаються бути в певному кутовому положенні відносно поля статора, щоб набрати максимальної сили притягання чи відштовхування.
- В результаті виникає електромагнітний момент, який змушує ротор обертатись разом з полем статора: коли поле статора «обганяє» або «веде» ротор, магнітні полюси ротора намагаються наздогнати це поле, таким чином здійснюючи обертання.

Синхронна робота без ковзання.

Оскільки ротор має постійні магніти і не потребує збудження обмоткою, він може працювати синхронно — тобто частота обертання ротора відповідає частоті обертання магнітного поля статора.

Це означає, що немає суттєвого «ковзання», як у асинхронних двигунах: ротор «запам'ятовує» положення обертового поля і обертається в унісон з ним. У моделях зі зміною частоти — через інвертор — можливо контролювати швидкість обертання ротора, змінюючи частоту обертання поля статора.

Запуск, керування та інвертор.

Запуск і керування двигуном такого типу часто забезпечуються за допомогою електронного інвертора, який керує струмами в обмотках статора для формування потрібного обертового поля.

- Вентильний (інверторний) блок забезпечує живлення обмоток статора, регулює частоту й амплітуду струмів, контролює кутове положення ротора (через датчики Холла або безсенсорні алгоритми).

- Для моделей з постійними магнітами на роторі не потрібно збуджувати роторну обмотку — це спрощує конструкцію і підвищує ефективність.

Специфіка вентильного двигуна з постійними магнітами. Саме для вентильного (з інверторним керуванням) двигуна з постійними магнітами важливі такі моменти:

- система керування повинна координувати включення обмоток статора таким чином, щоб утримувати потрібне положення магнітного поля відносно ротора, забезпечуючи плавний кутовий зсув для створення моменту;
- у режимах високої частоти чи навантаження може застосовуватись режим «ослаблення поля» (field weakening) для підвищення швидкості обертання за рахунок зменшення магнітного потоку;
- ефективність таких двигунів висока за рахунок відсутності втрат на збудження ротора і значно кращого співвідношення потужність/розмір.

Суть принципу роботи. Обмотки статора створюють обертове магнітне поле.

- Ротор із постійними магнітами прагне синхронізуватися зі створеним полем і обертатися разом із ним.
- Взаємодія між полями — через притягання/відштовхування магнітних полюсів — формує крутний момент.
- Система інверторного керування — “вентильна” — контролює синхронність, швидкість, момент і динаміку двигуна, даючи можливість точного керування.

1.3. Основні дані та характеристики вентильного двигуна з постійними магнітами

Основні дані та характеристики вентильного двигуна з постійними магнітами

У цьому розділі розглянуто приклад вентильного двигуна з постійними магнітами на основі моделі тахон ЕС 22 (Ø22 мм, 24 В, 100 Вт). Наведено його

основні номінальні параметри та побудовані графічні залежності, що характеризують роботу двигуна в різних режимах.

У таблиці 1.1 наведено основні електричні та механічні параметри двигуна ЕС 22 (24 В).

Таблиця 1.1.

Параметр	Значення
Номінальна напруга [В]	24,0
Швидкість холостого ходу [об/хв]	29500,0
Струм холостого ходу [А]	0,257
Номінальна швидкість [об/хв]	27000,0
Номінальний момент [мН·м]	48,5
Номінальний струм [А]	6,42
Момент загальмування [мН·м]	691,0
Струм загальмування [А]	89,1
ККД [%]	90,0
Опір обмотки (фаза–фаза) [Ом]	0,269
Індуктивність (фаза–фаза) [мГн]	0,035
Константа моменту [мН·м/А]	7,75
Константа швидкості [об/хв·В]	1230,0

Механічна характеристика (рис. 1.11).

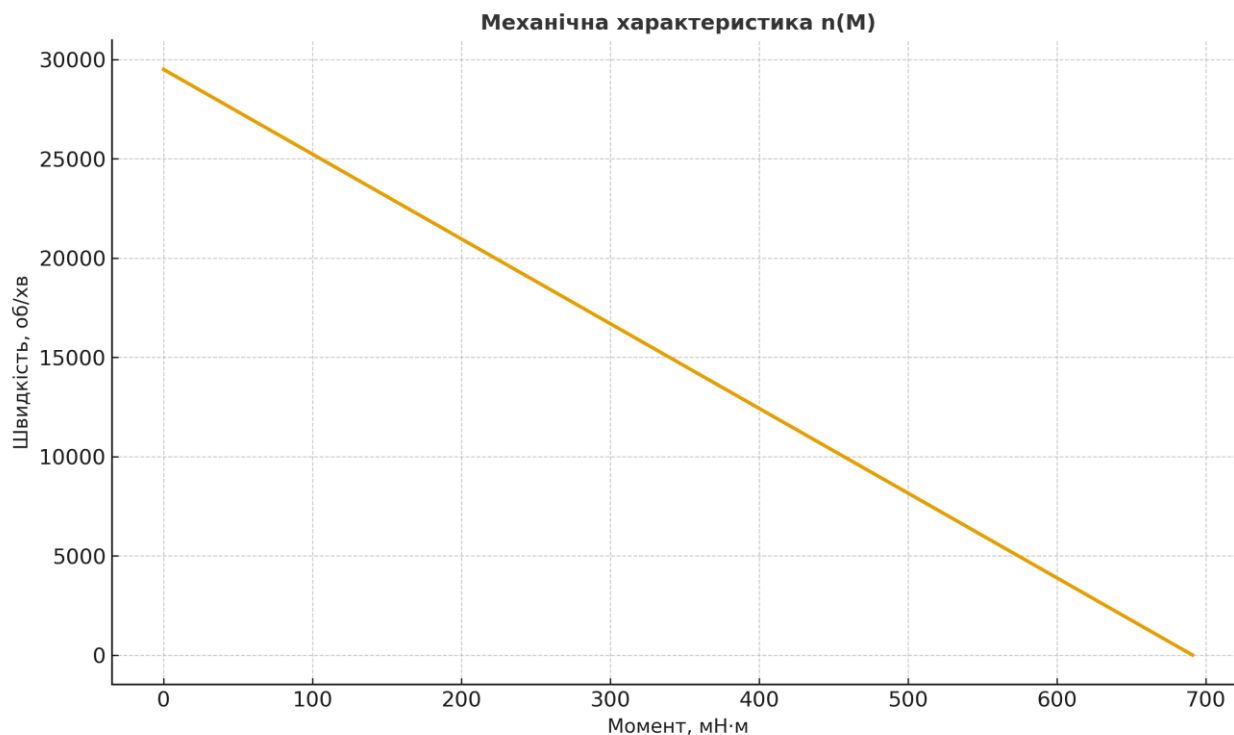


Рис. 1.11 – Механічна характеристика

На графіку показано залежність швидкості обертання ротора від моменту. Зі збільшенням навантаження (моменту) швидкість двигуна зменшується майже лінійно, що є типовою ознакою вентильних двигунів з постійними магнітами. При моменті загальмування швидкість дорівнює нулю.

Залежність струму (рис. 1.12) від моменту є майже лінійною. При збільшенні моменту навантаження пропорційно зростає струм споживання, оскільки момент прямо пропорційний струму ($M = k_M \cdot I$).

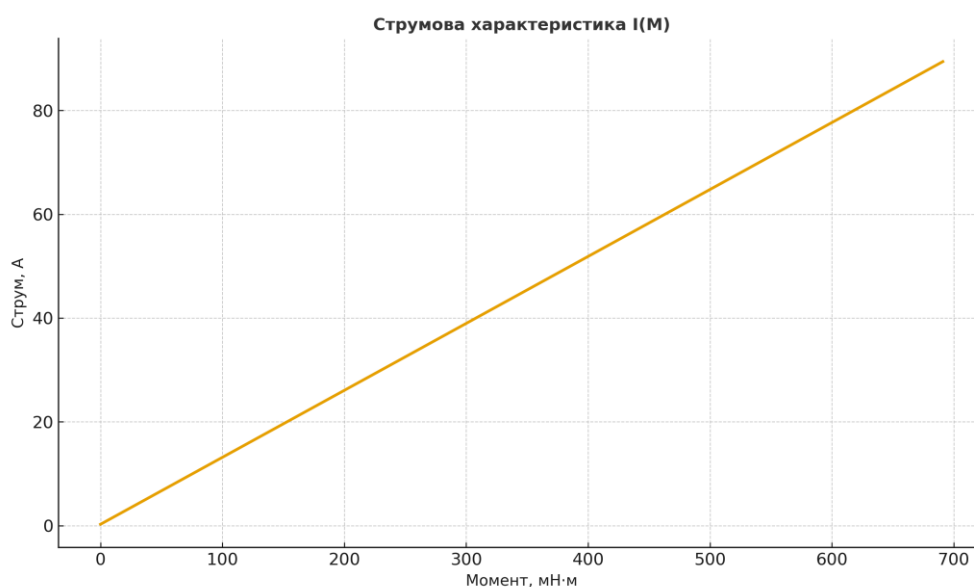


Рис. 1.12 – Струмова характеристика

Характеристика коефіцієнта корисної дії (рис. 1.13).

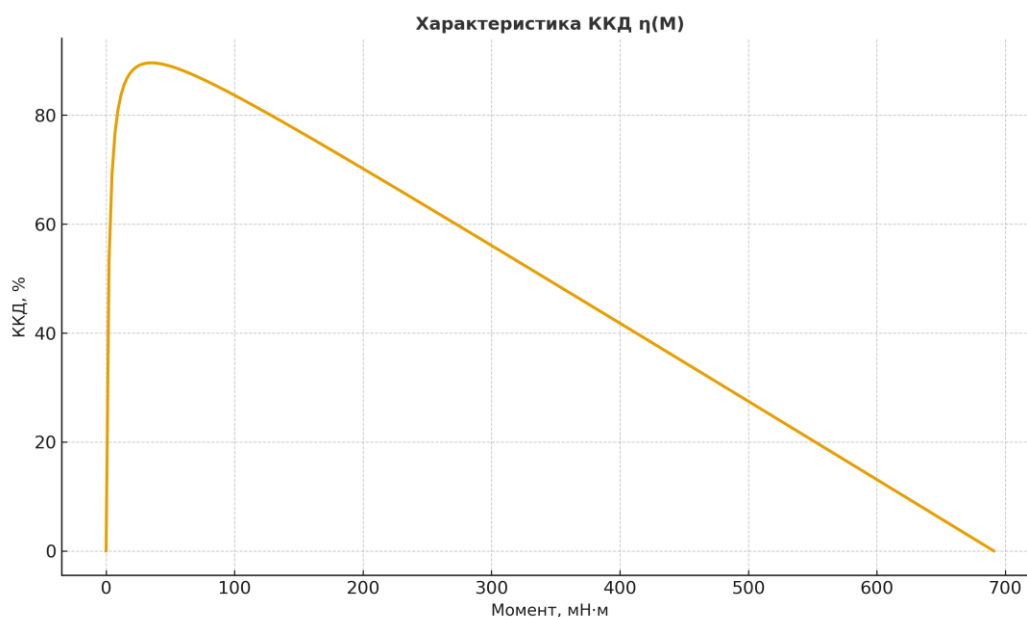


Рис. 1.13 – Характеристика ККД

ККД двигуна залежить від навантаження: при малих і надмірних моментах він зменшується, а максимального значення ($\sim 90\%$) досягає у середньому діапазоні навантажень (близько $0.3\text{--}0.5M \cdot H$). Це свідчить про оптимальну роботу двигуна при середньому навантаженні.

Електромеханічна характеристика $P(M)$ (рис. 1.14).

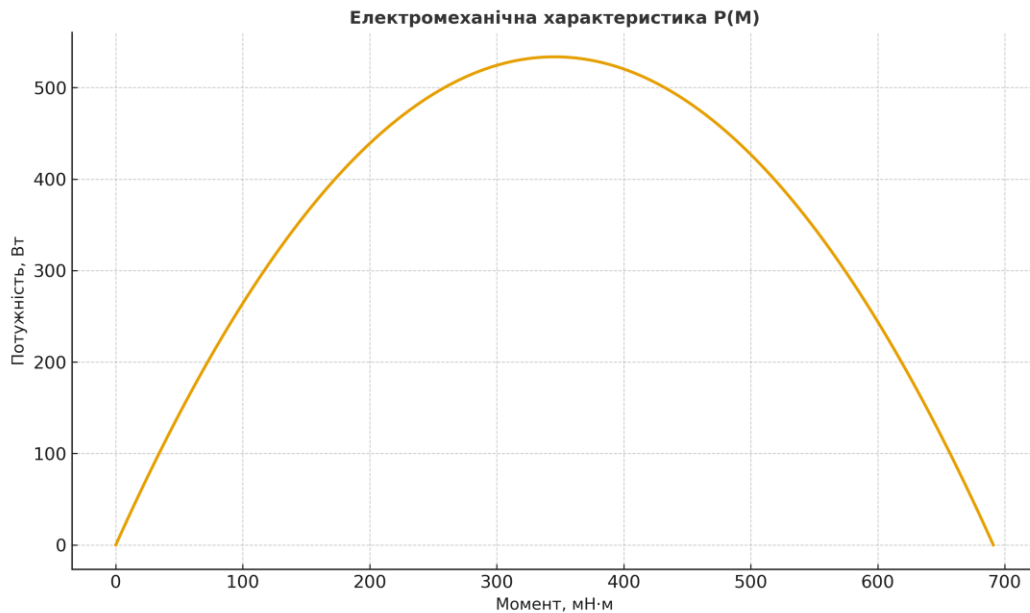


Рис. 1.14 – Електромеханічна характеристика

Графік показує залежність вихідної потужності від моменту. Потужність зростає до певного максимуму (приблизно при половині моменту загальмування), після чого зменшується внаслідок зниження швидкості обертання.

Таким чином, отримані графічні залежності підтверджують типову поведінку вентильних двигунів з постійними магнітами: лінійне зменшення швидкості зі збільшенням моменту, пропорційне зростання струму та наявність оптимального діапазону ККД.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

2.1. Основні технічні дані на розрахунок вентильного двигуна з постійними магнітами

Таблиця 2.1 – Основні технічні дані та характеристики

Найменування параметра	Номінальне значення
Діапазон обробки кутів в антенній системі координат (далі АСК), не менше, °	
курс	∞
нахил	+5...–45
Обробка заданих кутів для урівноваженого навантаження, в усталеному режимі, хвилин дуги, СКО	2
Максимальна кутова швидкість в АСК, не менше, °/с	10
Номінальний момент на осі курсу (нахилу), Н·м	2 (1)
Максимальний момент на осі курсу (нахилу), Н·м	4,4 (2)
Живлення від мережі постійного струму, напруга, В	36
Споживана потужність у статичному режимі, не більше, Вт	6
Середня споживана потужність, не більше, Вт	80
Пікова споживана потужність, не більше, Вт	300
Маса виробу, не більше, кг	7

2.2. Особливості конструкції вентильного двигуна з постійними магнітами

- 1) Діапазон кутів по курсу не обмежений.
- 2) Діапазон кутів по нахилу обмежується кріпленнями корисного навантаження.
- 3) Корисне навантаження має бути рівномірно розподілене навколо точки перетину осей азимута та нахилу.
- 4) Плати керування двигунами, енкодери та необхідні канали живлення й керування інтегровані в корпуси двигунів і конструктив платформи, завдяки

чому повністю відсутні підвісні кабельні системи, необхідні для роботи платформи.

- 5) Від зовнішнього входного роз'єму на осі нахилу платформи проведено 11 користувацьких ліній (інтегрованих у корпус платформи, без обмежень по робочих кутах) із допустимим навантаженням до 1,8 А на лінію.
- 6) До платформи додається програма, що дозволяє виконувати налаштування регулятора приводів відповідно до задач користувача та підключеного навантаження.
- 7) БІНС закріплюється на одній платформі з ПА.
- 8) Безредукторний привід — маса: не більше 7 кг.

Нижче наведено приклад гідростабілізованої платформи з інтегрованою всередину корпусу електропроводкою (рис. 2.1).

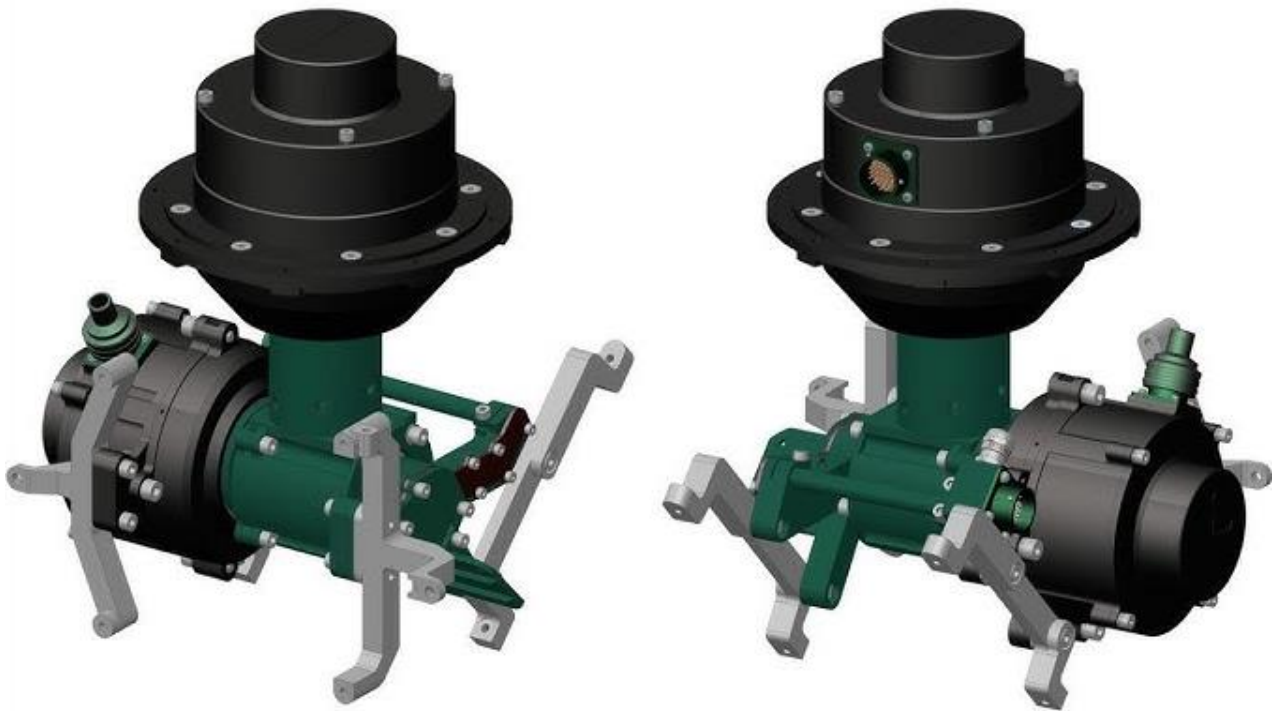


Рис. 2.1 - Приклад гідростабілізованої платформи

Декілька прикладів варіантів приводів гідростабілізованої платформи (рис.2.2)



Рис. 2.2 – Приклади приводів

2.3. Електромагнітний розрахунок вентильного двигуна

2.3.1. Вхідні дані

Момент

$$M = 3.5 \text{ Н} \cdot \text{м} = 3.5 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}$$

Максимальна швидкість

$$\omega = 17.4531 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} = 17.4531$$

Швидкість обертання ротора

$$n = 167.667 \frac{\text{об}}{\text{сек}} = 167.667$$

2.3.2. Розрахунок основних розмірів

Корисна потужність

$$P_2 = M \cdot \omega = 3.5 \cdot 17.4531 = 61.08585 \cdot \text{Вт}$$

Лінійне навантаження

$$A' = 8000 \frac{\text{А}}{\text{м}} = 8000$$

Магнітна індукція

$$B'_\delta = 0.8 \text{Тл}$$

Обмотковий коефіцієнт

$$k_{об} = 0.95$$

Коефіцієнт полюсного перекриття

$$\alpha_\delta = 0.75$$

Зовнішній діаметр статора

$$D' = \sqrt[3]{\frac{P_2}{\frac{k_B \cdot k_{об} \cdot \pi^2 \cdot \alpha_\delta}{60} \cdot A' \cdot B'_\delta \cdot \lambda \cdot n}} = \sqrt[3]{\frac{61.08585}{\frac{1.11 \cdot 0.95 \cdot \pi^2 \cdot 0.75}{60} \cdot 8000 \cdot 0.8 \cdot 1.2 \cdot 167.667}} = 0.07144 \cdot \text{м}$$

приймаємо

$$D = 72 \text{мм} = 0.072 \cdot \text{м}$$

коефіцієнт форми поля

$$k_B = 1.11$$

коефіцієнт форми

$$\lambda = 1.2$$

Розрахункова довжина магнітопроводу статора

$$l' = D \cdot \lambda = 0.072 \cdot 1.2 = 0.0864 \cdot \text{м}$$

приймаємо

$$l = 85.5 \text{мм} = 0.0855 \cdot \text{м}$$

Внутрішній діаметр статора, м:

$$D_{sv} = 0.04$$

Число пар полюсів

$$p = 14$$

Число фаз:

$$N_c = 3$$

Попередньо задане значення ККД

$$\eta = 0.8$$

Електромагнітна потужність

$$P_{EM} = \frac{1 + \eta}{2 \cdot \eta} \cdot P_2 = \frac{1 + 0.8}{2 \cdot 0.8} \cdot 61.08585 = 68.72158 \cdot \text{Вт}$$

Середнє значення ЕРС

$$E_{cp} = \frac{1 + \eta}{2} \cdot U' = \frac{1 + 0.8}{2} \cdot 23.5 = 21.15 \cdot \text{В}$$

падіння напруги в перемикаючому елементі

$$\Delta U_k = 0.5 \text{В}$$

$$U = 24 \text{В}$$

$$U' = U - \Delta U_k = 23.5$$

Тоді середнє значення струму

$$I_{cp} = \frac{P_{EM}}{E_{cp}} = \frac{68.72158}{21.15} = 3.24925 \cdot \text{А}$$

Діючі значення струму двигуна без врахування впливу індуктивності

$$k_D = \sqrt{\frac{1 + k_0 \cdot \left(\frac{E_{cp}}{U'}\right)^2 - 2 \frac{E_{cp}}{U'}}{1 - \frac{E_{cp}}{U'}}} = \sqrt{\frac{1 + 1.005 \cdot \left(\frac{21.15}{23.5}\right)^2 - 2 \cdot \frac{21.15}{23.5}}{1 - \frac{21.15}{23.5}}} = 0.37483$$

для двохнапівперіодної 120-градусної комутації:

$$k_0 = 1.005$$

$$I_D = k_D \cdot I_{cp} = 0.37483 \cdot 3.24925 = 1.21793 \cdot \text{А}$$

Діючі значення струму секції

$$I_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_D = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 1.21793 = 0.99443 \cdot \text{А}$$

Корисний момент на валу двигуна

$$M_2 = \frac{9.55P_2}{n} = 3.47934 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}$$

2.3.3. Розрахунок зубцевої зони

Висота спинки статора

$$h_c = 0.004\text{м}$$

Висота спинки ротора (вибирається із умови необхідності жорсткості магнітопроводу)

$$h_p = 0.004\text{м}$$

Повітряний зазор вибирається мінімальним із технічних міркувань

$$\delta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0.5 \cdot \text{мм}$$

Висота магнітів

$$h_m = 0.0025\text{м}$$

Висота шліца

$$h_{ш} = 0.001\text{м}$$

Ширина зубця (рис. 2.3) статора

$$a_z = 0.006$$

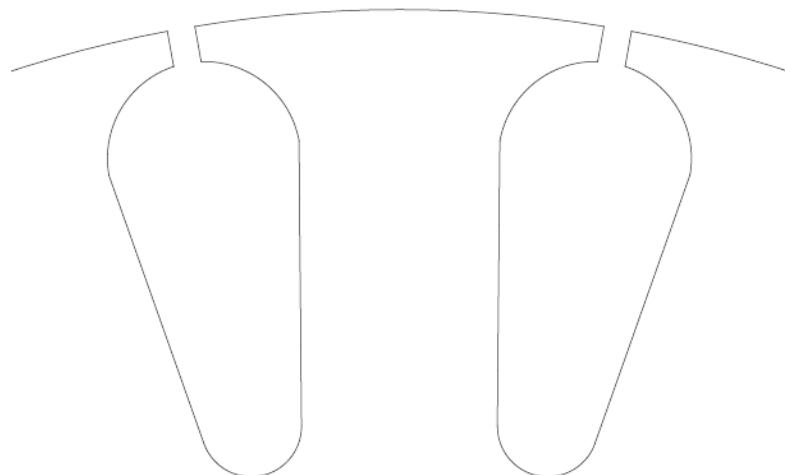


Рис. 2.3 – Зубцева зона статора

Число зубців статора (рис. 2.4):

$$z = 2k \cdot N_c = 18$$

відповідає умовам виконання овального пазу

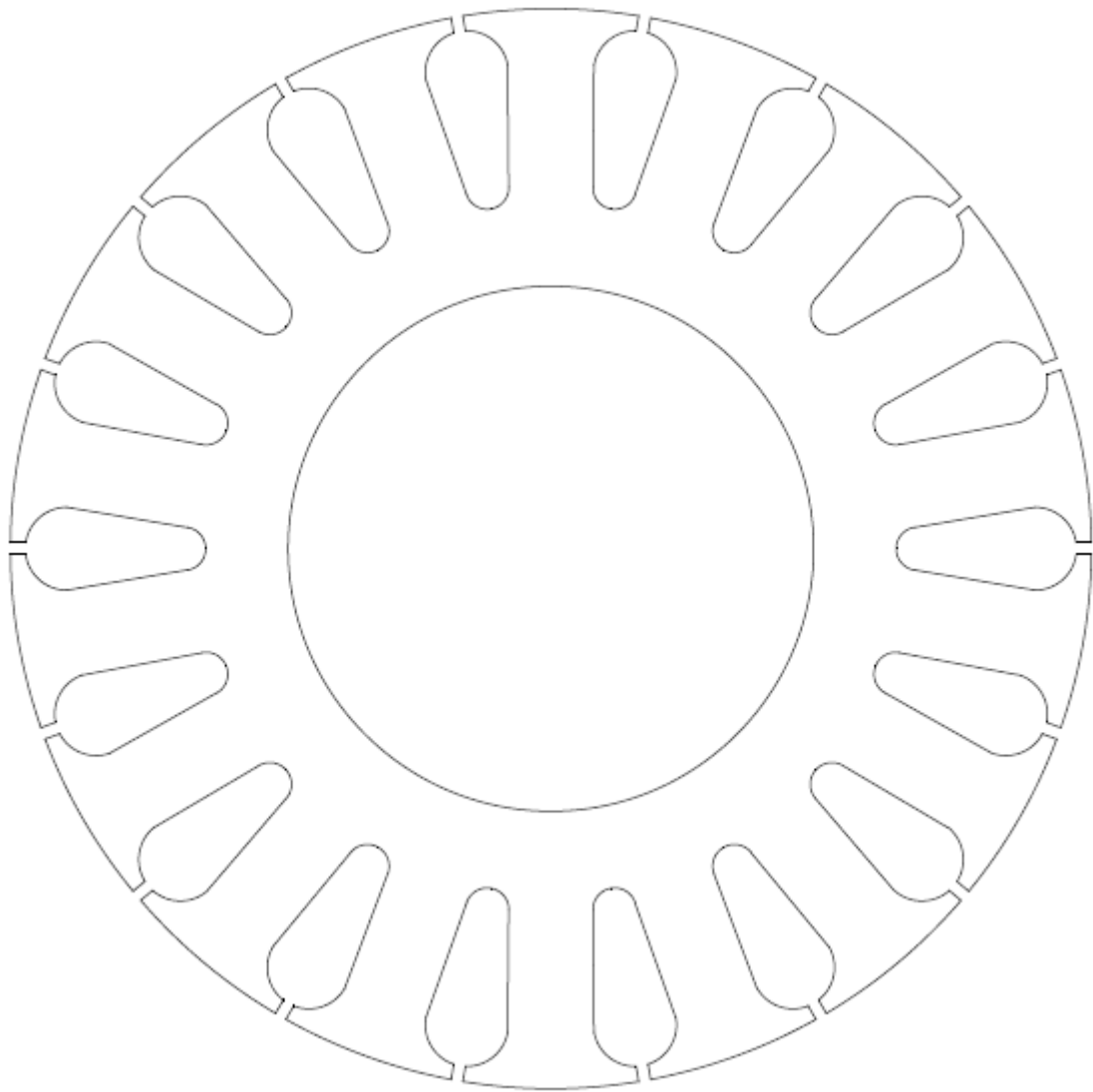


Рис. 2.4 – Статор двигуна

$$k = 3$$

Число пар полюсів

$$p = \frac{z}{2} - 1 = \frac{18}{2} - 1 = 8$$

Міжкомутаційний інтервал (крок дискретності)

$$\alpha = \frac{\pi}{p \cdot N_c} = \frac{\pi}{8 \cdot 3} = 0.1309$$

Кут на полюс

$$\alpha_{\Pi} = \frac{\pi}{p} = \frac{\pi}{8} = 0.3927$$

Кут на зубець

$$\alpha_z = \frac{2\pi}{z} = \frac{2 \cdot \pi}{18} = 0.34907$$

Знаючи висоту спинки ротора та висоту магнітів, визначимо параметри зовнішнього та внутрішнього діаметру ротора відповідно

Зовнішній діаметр ротора (рис.2.5)

$$D_a = D + 2 \cdot (h_p + h_m + \delta) = 0.072 + 2 \cdot (0.004 + 0.0025 + 0.0005) = 0.086 \cdot \text{м}$$

Внутрішній діаметр ротора (рис.2.5)

$$D_b = D - 2 \cdot (h_m - h_p) = 0.072 - 2 \cdot (0.0025 - 0.004) = 0.075 \cdot \text{м}$$

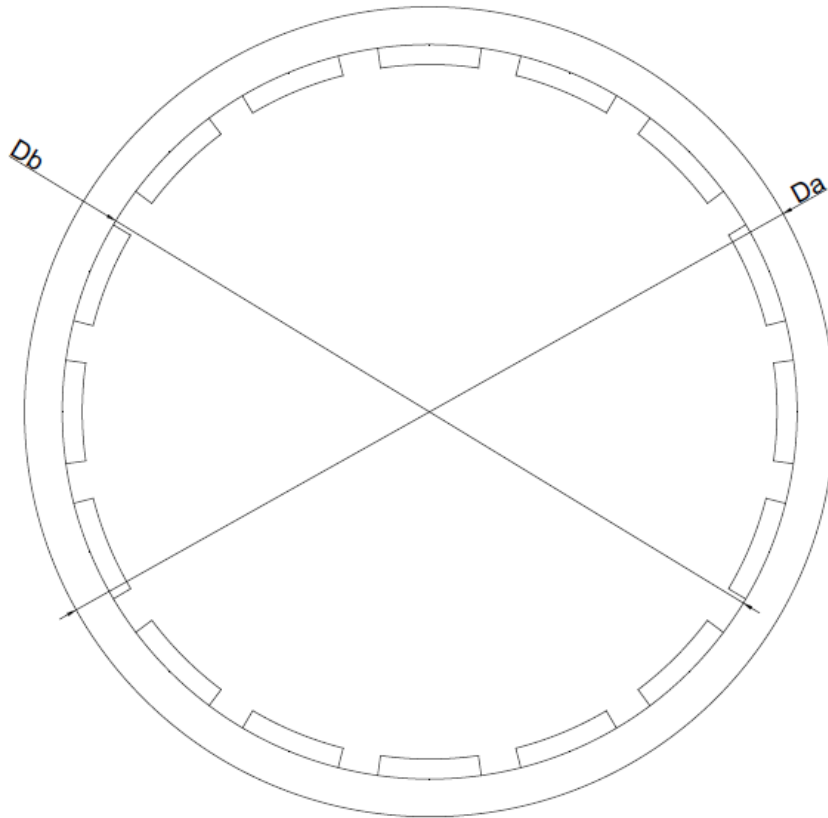


Рис. 2.5 – Ротор двигуна

2.3.4. Розрахунок параметрів пазу

Висота паза (Рис 2.6):

$$h_{\pi} = \frac{D - D_{sv} - 2 \cdot h_c}{2} = \frac{0.072 - 0.04 - 2 \cdot 0.004}{2} = 0.012 \cdot \text{м}$$

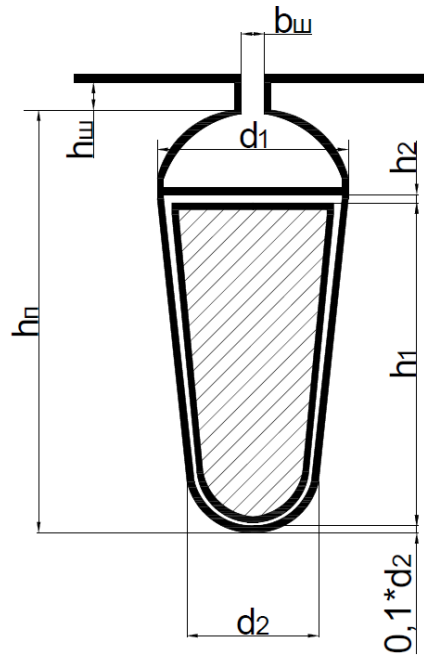


Рис. 2.6 – Паз статора

Діаметр меншої округлості пазу:

$$d_{\Pi 1} = \frac{\frac{\alpha_z}{2} \cdot (D - 2h_c - 2h_p) - a_z}{1 - \frac{\alpha_z}{2}} = \frac{\frac{0.34907}{2} \cdot (0.072 - 2 \cdot 0.004 - 2 \cdot 0.004) - 0.006}{1 - \frac{0.34907}{2}} = 0.00457 \cdot \text{м}$$

Діаметр більшої округлості пазу:

$$d_{\Pi 2} = \frac{\frac{\alpha_z}{2} \cdot (D - 2h_c) - a_z}{1 - \frac{\alpha_z}{2}} = \frac{\frac{0.34907}{2} \cdot (0.072 - 2 \cdot 0.004) - 0.006}{1 - \frac{0.34907}{2}} = 0.00626 \cdot \text{м}$$

Площа паза:

$$h_{l2} = h_{\Pi} - \frac{d_{\Pi 1} + d_{\Pi 2}}{2} = 0.012 - \frac{0.00457 + 0.00626}{2} = 0.00658 \cdot \text{м}$$

$$S_{\Pi} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_{\Pi 1}^2 + d_{\Pi 2}^2) + \frac{h_{l2}}{2} \cdot (d_{\Pi 1} + d_{\Pi 2}) = \frac{\pi}{8} \cdot (0.00457^2 + 0.00626^2) + \frac{0.00658}{2} \cdot (0.00457 + 0.00626) = 5.92735 \times 10^{-5} \cdot \text{м}^2$$

Виліт лобових частин:

$$\tau_{cp} = \frac{\alpha_z}{2} \cdot (D - 2 \cdot h_c - h_{\Pi}) = \frac{0.34907}{2} \cdot (0.072 - 2 \cdot 0.004 - 0.012) = 0.00908$$

$$l_{\text{л}} = \frac{\tau_{\text{ср}} - a_z}{2} = \frac{0.00908 - 0.006}{2} = 0.00154 \cdot \text{м}$$

Коефіцієнт лобових частин:

$$K_{\text{л}} = 1.1$$

Осьова довжина статора:

$$l_{\text{с}} = l - 2 \cdot l_{\text{л}} = 0.08242 \cdot \text{м}$$

Осьова довжина магніту:

$$l_{\text{м}} = l_{\text{с}} - 5 \cdot \delta = 0.08242 - 5 \cdot 0.0005 = 0.07992 \cdot \text{м}$$

Ширина магніту:

$$b_{\text{м}} = \frac{\alpha_{\text{п}}}{2} \cdot (D + 2 \cdot h_{\text{р}}) - 2 \cdot \delta = \frac{0.3927}{2} \cdot (0.072 + 2 \cdot 0.004) - 2 \cdot 0.0005 = 0.01471 \cdot \text{м}$$

Під час визначення певної висоти магніту обчислюють попереднє значення потоку в нейтральному перерізі магніту. Остаточню приймають таку висоту магніту, за якої потік не відрізняється більш ніж на 5% від прийнятих електромагнітних розмірів.

Коерцитивна сила магніту NdFeB:

$$H_{\text{с}} = 840000 \frac{\text{А}}{\text{м}} = 8.4 \times 10^5$$

Коефіцієнт насичення магнітного кола:

$$K_{\mu} = 1.5$$

Постійна електрична проникність повітря

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{Гн}}{\text{м}} = 1.25664 \times 10^{-6}$$

$$V_{\text{м}} = l_{\text{м}} \cdot b_{\text{м}} \cdot h_{\text{м}} = 0.07992 \cdot 0.01471 \cdot 0.0025 = 2.93881 \times 10^{-6} \cdot \text{м}^3$$

$$\Phi_1 = \frac{H_{\text{с}} \cdot \mu_0 \cdot V_{\text{м}}}{\delta \cdot K_{\mu} + h_{\text{м}}} = \frac{8.4 \times 10^5 \cdot 1.25664 \times 10^{-6} \cdot 2.93881 \times 10^{-6}}{0.0005 \cdot 1.5 + 0.0025} = 0.00095 \cdot \text{Вб}$$

Використовуючи метод послідовного приближення, знаходимо:

$$\Phi_1 = 8.32 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Вб}$$

2.3.5. Розрахунок магнітного кола

Розрахунок магнітного кола проводять з метою визначення магніторушійної сили (МРС) обмотки збудження, необхідної для створення магнітного потоку машини в режимі холостого ходу. Потік при обертанні ротора наводить в обмотці статора ЕРС.

Визначаючи відсутні розміри магнітів, які забезпечують необхідний магнітний потік у повітряному зазорі, а також товщину ярма ротора, дотримуємося алгоритму розрахунку. Як магніти використовуємо висококоерцитивні магніти NdFeB N30H.

Індукція магнітного поля в спинці ротора:

$$B_p = \frac{\Phi_1}{2h_p \cdot l_M} = \frac{8.32 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0.004 \cdot 0.07992} = 1.30123 \cdot \text{Тл}$$

Напруженість магнітного поля в спинці ротора:

$$H_p = 1337 \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Середня довжина магнітної силової лінії в спинці ротора на один магніт:

$$l_{\text{ср.р}} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\alpha_{\text{п}}}{4} \cdot (D + h_p) + h_p \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{0.3927}{4} \cdot (0.072 + 0.004) + 0.004 \right] = 0.00573 \cdot \text{м}$$

Опір спинки ротора магнітного потоку:

$$R_p = \frac{H_p \cdot l_{\text{ср.р}}}{\Phi_1} = \frac{1337 \cdot \frac{1}{1} \cdot 0.00573}{8.32 \cdot 10^{-4}} = 9208.97522 \cdot \text{Ом}$$

Опір повітряного зазору магнітного потоку:

$$S_m = l_M \cdot b_M = 0.07992 \cdot 0.01471 = 0.00118 \cdot \text{м}^2$$

$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S_m} = \frac{0.0005}{1.25664 \times 10^{-6} \cdot 0.00118} = 3.38477 \times 10^5 \cdot \text{Ом}$$

Потік через зубець:

$$\Phi_Z = \frac{\Phi_1 \cdot 2p}{z} = \frac{8.32 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 8}{18} = 0.00074 \cdot \text{Вб}$$

Коефіцієнт заповнення пакета сталлю:

$$k_c = 0.95$$

Індукція магнітного поля в зубці статора:

$$B_z = \frac{\Phi_z}{a_z \cdot l_c \cdot k_c} = \frac{0.00074}{0.006 \cdot 0.08242 \cdot 0.95} = 1.57413 \cdot \text{Тл}$$

Напруженість магнітного поля в зубці:

$$H_z = 814.23 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Опір зубця магнітному потоку:

$$l_{cp} = h_{\pi} + h_{\text{ш}} = 0.012 + 0.001 = 0.013 \cdot \text{м}$$

$$R_z = \frac{H_z \cdot l_{cp}}{\Phi_z} = 14312.63672 \cdot \text{Ом}$$

Індукція магнітного поля в спинці статора:

$$B_c = \frac{\Phi_1}{2h_c \cdot l_c \cdot k_c} = \frac{8.32 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0.004 \cdot 0.08242 \cdot 0.95} = 1.32817 \cdot \text{Тл}$$

Напруженість магнітного поля в спинці статора:

$$H_{ст} = 344.34 \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}} = 344.34 \cdot \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Довжина середньої силової лінії магнітного поля в спинці статора:

$$l_{cp.c} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\alpha_{\pi}}{4} \cdot (D_{sv} - h_c) + h_c \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{0.3927}{4} \cdot (0.04 - 0.004) + 0.004 \right] = 0.00377 \cdot \text{м}$$

Опір спинки статора магнітному потоку:

$$R_c = \frac{H_{ст} \cdot l_{cp.c}}{\Phi_1} = \frac{344.34 \cdot 0.00377}{8.32 \cdot 10^{-4}} = 1559.10938 \cdot \text{Ом}$$

Перевірка умов:

$$l_M > b_M = 0.07992 > 0.01471$$

тоді:

$$b_{M1} = 0.07992$$

$$b_{M2} = 0.01471$$

Розміри у відносних одиницях:

$$b_{M1} = \frac{b_{M1}}{h_M} = \frac{0.07992}{0.0025} = 31.968$$

$$b_{M2} = \frac{b_{M2}}{h_M} = \frac{0.01471}{0.0025} = 5.884$$

$$t_1 = 0$$

Розрахунковий відносний коефіцієнт:

$$\rho_H = \frac{\delta \cdot h_M}{\mu_r \cdot S_m} = \frac{0.0005 \cdot 0.0025}{1.1 \cdot 0.00118} = 0.00097$$

Відносна магнітна проникність магніту із сплаву NdFeB

$$\mu_r = 1.1$$

$$b_\delta = \mu_r \cdot b_{M1} \cdot b_{M2} \cdot \rho_H = 1.1 \cdot 31.968 \cdot 5.884 \cdot 0.00097 = 0.20002$$

Конструкція не передбачає наявності магнітних екранів з торця магнітів. Щоб не порушити послідовність подальших обчислень, відстань від торця магніту до бокового екрана приймаємо рівною нулю, $t_1 = 0$.

Відносна глибина проникнення полів розсіювання з боку торцевих екранів:

$$\Delta y_{01} = 0$$

$$\Delta y_{03} = \Delta y_{01} = 0$$

$$\Delta y_{02} = 0$$

$$\Delta y_{04} = \Delta y_{02} = 0$$

Відносна глибина проникнення полів розсіювання зі сторони суміжного магніту:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} = \frac{0.1309}{2} = 0.06545$$

$$\Delta y_{02_04} = 0.1204 + 0.0168 \cdot b_{M2} + 0.236 \cdot b_\delta - 0.0194 \cdot \mu_r \cdot \gamma - 0.00243 \cdot \mu_r \cdot \gamma \cdot b_{M2} = 0.1204 + 0.0168 \cdot 5.884 + 0.236 \cdot 0.20002 - 0.0194 \cdot 1.1 \cdot 0.06545 - 0.00243 \cdot 1.1 \cdot 0.06545 \cdot 5.884 = 0.26403$$

Питома магнітна провідність на одиницю площі нейтрального перерізу:

$$\Delta b_M = b_{M1} - b_{M2} = 31.968 - 5.884 = 26.084$$

$$\lambda_{\mu 1_3} = 1 + \left[0.869 - 0.1023 \cdot b_{M2} - 0.0896 \cdot (\Delta b_M) + 0.0118 \cdot b_{M2} \cdot (\Delta b_M) \right] \cdot \Delta y_{02_04} = 1 + (0.869 - 0.1023 \cdot 5.884 - 0.0896 \cdot 26.084 + 0.0118 \cdot 5.884 \cdot 26.084) \cdot 0.26403 = 0.93161$$

$$\lambda_{\mu 2_4} = 1 + (0.869 - 0.1023 \cdot 'b_{M2}) \cdot \Delta'y_{02_04} = 1 + (0.869 - 0.1023 \cdot 5.884) \cdot 0.26403 = 1.07051$$

Площі ділянок області формування робочого потоку:

$$'S_{M1_3} = \frac{'b_{M1} + \Delta'b_M - 2\Delta'y_{02_04}}{2} \cdot \left(\frac{'b_{M2}}{2} - \Delta'y_{01} \right) = \frac{31.968 + 26.084 - 2 \cdot 0.26403}{2} \cdot \left(\frac{5.884}{2} - 0 \right) = 84.61772$$

$$'S_{M2_4} = \left(\frac{'b_{M2}}{2} - \Delta'y_{01} \right) = \frac{5.884}{2} - 0 = 2.942$$

Провідність взаємоіндукції у відносних одиницях:

$$'L_M = 2 \cdot \mu_r \cdot ('S_{M1_3} \cdot \lambda_{\mu 1_3} + 'S_{M2_4} \cdot \lambda_{\mu 2_4}) = 2 \cdot 1.1 \cdot (84.61772 \cdot 0.93161 + 2.942 \cdot 1.07051) = 180.35677$$

Провідність взаємоіндукції в абсолютних одиницях:

$$\Lambda_M = h_M \cdot \mu_0 \cdot 'L_M = 0.0025 \cdot 1.25664 \times 10^{-6} \cdot 180.35677 = 5.66607 \times 10^{-7}$$

Опір магніту основному магнітному потоку:

$$R_M = \frac{1}{\Lambda_M} = \frac{1}{5.66607 \times 10^{-7}} = 1.76489 \times 10^6 \cdot \text{Ом}$$

Повний магнітний опір магнітному потоку:

$$R = R_p + R_\delta + R_Z + R_c + R_M = 9208.97522 + 3.38477 \times 10^5 + 14312.63672 + 1559.10938 + 1.76489 \times 10^6 = 2.12845 \times 10^6 \cdot \text{Ом}$$

Основний магнітний потік:

$$\Phi = \frac{H_c \cdot h_M}{R} = \frac{8.4 \times 10^5 \cdot 0.0025}{2.12845 \times 10^6} = 0.00099 \cdot \text{Вб}$$

Індукція в повітряному проміжку:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{S_m} = \frac{0.00099}{0.00118} = 0.83932 \cdot \text{Тл}$$

Переріз активної міді (пазу):

$$Q_M = S_{\Pi} \cdot z \cdot k_M = 5.92735 \times 10^{-5} \cdot 18 \cdot 0.3 = 0.00032 \cdot \text{м}^2$$

Коефіцієнт заповнення міддю, що має пряму залежність від загальної кількості ізоляції в пазу:

$$k_M = 0.3$$

Величина залежить від розмірів вікна паза та щільності струму.

Таблиця 2.2 – Середнє значення коефіцієнтів заповнення паза

Середнє значення коефіцієнтів заповнення паза		
Тип обмотки	Значення коефіцієнтів	
	k_e	k_m
Всипні обмотки напругою до 660 В з круглого дроту з ема-левою ізоляцією	0,72	0,30
Обмотки з прямокутного дроту напругою 3000 В (провід марки ПСД)	0,70–0,80	0,22–0,37
Обмотки з прямокутного дроту напругою 6000 В	0,60–0,70	0,14–0,25

Середня довжина напіввитка:

$$l_{cp} = l_c + l_l + \tau_{cp} = 0.08242 + 0.00154 + 0.00908 = 0.09304 \cdot m$$

Число витків в секції при двохнапівперіодній комутації та трапецеїдальному полі

$$W_f = \frac{4.77 \cdot E_{cp}}{n \cdot B_\delta \cdot D \cdot l} = \frac{4.77 \cdot 21.15}{167.667 \cdot 0.83932 \cdot 0.072 \cdot 0.0855} = 116.45484$$

Число витків на зубець:

$$W_z = \frac{W_f \cdot N_c}{z} = \frac{116.45484 \cdot 3}{18} = 19.40914$$

Переріз ефективного провідника:

$$q_{pr} = \frac{S_{II} \cdot 0.35}{2 \cdot W_z} = \frac{5.92735 \times 10^{-5} \cdot 0.35}{2 \cdot 19.40914} = 5.34431 \times 10^{-7} \cdot m^2$$

Після попереднього розрахунку поперечного перерізу ефективного провідника, необхідно визначити нормативне фактичне значення перерізу дроту, найбільш близького до отриманого.

Значення перерізу ефективного провідника

$$q = 0.442 \text{ мм}^2,$$

Діаметр голого проводу 0.75 мм

Частота пульсації струму:

$$f = p \cdot \frac{n}{50} = 8 \cdot \frac{167.667}{50} = 26.82672 \cdot \text{Гц}$$

Максимальне значення ЕРС фази:

$$E_{f\max} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{24}{\sqrt{3}} = 13.85641 \cdot \text{В}$$

ЕРС фази:

$$E_f = \frac{E_{f\max}}{\sqrt{2}} = \frac{13.85641}{\sqrt{2}} = 9.79796 \cdot \text{В}$$

Питомий опір міді:

$$\rho_m = 0.0175 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Число паралельних віток обмотки

$$a = 1$$

Активний опір фази обмотки:

$$R_f = \frac{\rho_m \cdot W_f \cdot l_{cp}}{q \cdot 1^2} = \frac{0.0175 \cdot 10^{-6} \cdot 116.45484 \cdot 0.09304}{0.442 \cdot 0.001^2 \cdot 1^2} = 0.42898 \cdot \text{Ом}$$

$$R_{f155} = R_f \cdot K_t = 0.42898 \cdot 1.54 = 0.66062$$

$$K_t = 1.54$$

Для знаходження максимального коефіцієнта використання двигуна проведемо оптимізацію, спираючись на значення висоти магніту. У таблиці 2.2 представлено результат вибірки різних висот магніту та значення коефіцієнта використання двигуна відповідно до вибраного параметра. Зміна висоти магніту у конструкції впливає на значення індукцій магнітного поля: у спинці ротора, в зубці, у спинці статора. Отримані значення індукцій не повинні перевищувати межі 1,6 Тл, під час обчислень умови були виконані. Таким чином, максимальний коефіцієнт використання двигуна досягається при $h_m=0,0025$ мм, не порушуючи технічних характеристик. Дані наведено в таблиці.

Таблиця 2.3 – Відповідність висоти магніту до коефіцієнту використання двигуна

Висота магніту h_m , мм	Коефіцієнт використання двигуна
---------------------------	---------------------------------

1,5	2,008
2	2,201
2,5	2,353
3	2,302

Діаметр двигуна по середині повітряного проміжку:

$$D_{\delta} = D_{sv} + 2h_p + 2h_m + \delta = 0.04 + 2 \cdot 0.004 + 2 \cdot 0.0025 + 0.0005 = 0.0535$$

Коефіцієнт форми поля в повітряному проміжку:

$$K_{\Pi} = 0.85$$

Коефіцієнт комутації:

$$K_k = \frac{2}{3}$$

Питомий опір міді:

$$\rho = 0.175 \cdot 10^{-7}$$

Температурний коефіцієнт:

$$k_t = 1$$

Коефіцієнт використання двигуна:

$$K_{\Pi} = 0.5 \cdot D_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot K_{\Pi} \cdot l_c \cdot \sqrt{\frac{Q_M \cdot K_k}{\rho_M \cdot l_{cp} \cdot k_t \cdot 1}} = 0.5 \cdot 0.0535 \cdot 0.83932 \cdot 0.85 \cdot 0.08242 \cdot \sqrt{\frac{0.00032 \cdot \frac{2}{3}}{0.0175 \cdot 10^{-6} \cdot 0.09304}} = 0.56945$$

Визначаємо об'єм:

$$V = \frac{\pi \cdot l}{4} \cdot (D^2 - D_{sv}^2) = \frac{\pi \cdot 0.0855}{4} \cdot (0.072^2 - 0.04^2) = 0.00024$$

Коефіцієнт використання об'єму:

$$f_v = \frac{2 \cdot K_{\Pi}}{D \cdot \sqrt{V}} = \frac{2 \cdot 0.56945}{0.072 \cdot \sqrt{0.00024}} = 1019.62604$$

Число пазів на полюс та секцію:

$$q = \frac{z}{2N_c} = \frac{18}{2 \cdot 3} = 3$$

Коефіцієнт провідності для потоку пазового розсіювання:

$$\Lambda_{\Pi} = \left(0.618 + \frac{h_{III}}{a_{III}} + \frac{h_{II} - h_{III} - 1.5 \cdot a_{III}}{3 \cdot d_{III}} \right) = 0.618 + \frac{0.001}{0.001} + \frac{0.012 - 0.001 - 1.5 \cdot 0.001}{3 \cdot 0.00457} = 2.31066$$

$$h_{III} = 1 \cdot 10^{-3} = 0.001$$

$$a_{III} = 1 \cdot 10^{-3} = 0.001$$

Коефіцієнт провідності для потоку розсіювання лобових частин:

$$\Lambda_L = 0.34 \cdot \frac{q}{l_c} \cdot \left(l_n + \tau_{cp} - 0.64 \cdot \frac{\pi \cdot D_{\delta}}{z} \right) = 0.34 \cdot \frac{3}{0.08242} \cdot \left(0.00154 + 0.00908 - 0.64 \cdot \frac{\pi \cdot 0.0535}{18} \right) = 0.05739$$

Коефіцієнт провідності потоку статора, що замикається через магніти:

$$BH_{\max} = \frac{B_r}{2} \cdot \frac{H_c}{2} = \frac{1.05}{2} \cdot \frac{8.4 \times 10^5}{2} = 2.205 \times 10^5$$

$$\Lambda_M = \frac{1}{2 \cdot p \cdot \mu_0} \cdot \left[1 - 2 \cdot \sqrt{\frac{B_r \cdot H_c}{(BH_{\max})}} - \frac{(B_r \cdot H_c)}{(BH_{\max})} \right] \frac{B_r}{H_c} = \frac{1}{2 \cdot 8 \cdot 1.25664 \times 10^{-6}} \cdot$$

$$\cdot \left(1 - 2 \cdot \sqrt{\frac{1.05 \cdot 8.4 \times 10^5}{2.205 \times 10^5}} - \frac{1.05 \cdot 8.4 \times 10^5}{2.205 \times 10^5} \right) \cdot \frac{1.05}{8.4 \times 10^5} = -0.43519$$

де, кінцева індукція магніту NdFeB:

$$B_r = 1.05$$

$$\Lambda'_M = \frac{1}{2 \cdot 8 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(1 - 2 \cdot \sqrt{\frac{1.05 \cdot 84 \cdot 10^4}{2.205 \cdot 10^5}} - \frac{1.05 \cdot 84 \cdot 10^4}{2.205 \cdot 10^5} \right) \frac{1.05}{84 \cdot 10^4} = 4.86 \cdot 10^{-7}$$

Сума коефіцієнтів провідностей для всіх магнітних потоків статора:

$$\Sigma \Lambda = \Lambda_{\Pi} + \Lambda_L + \Lambda_M = 2.31066 + 0.05739 + -0.43519 = 1.93286$$

Індуктивність секції:

$$L_C = 2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{W_f^2 \cdot l_c}{p \cdot q} \cdot \Sigma \Lambda = 2 \cdot 1.25664 \times 10^{-6} \cdot \frac{116.45484^2 \cdot 0.08242}{8 \cdot 3} \cdot 1.93286 = 0.00023$$

Електромагнітна постійна часу:

$$\tau = \frac{L_C}{R_0} = \frac{0.00023}{0.6} = 0.00038$$

$$R_0 = 0.6$$

2.3.6. Розрахунок маси активних матеріалів

Для оцінки масогабаритних показів параметрів проектного двигуна, а також для розрахунку втрат необхідно визначити масу активних матеріалів. Для цього введемо деякі величини:

Щільність сталі:

$$\rho_{ст} = 7.8 \cdot 10^3 \quad l_a = 0.086 \text{ м}$$

У зв'язку з деякими розбіжностями магнітних характеристик електротехнічних сталей однакових марок, що випускаються різними підприємствами, наводяться посередні числа, котрі можуть бути використані при навчальному проектуванні. Коефіцієнт заповнення пакета сталлю k_z залежить від роду ізоляції та товщини листів сталі. Для листів товщиною 0.5 та 0.35 мм k_z зазвичай приймається відповідно 0.95 та 0.9, якщо листи ізолювані спеціальним лаком, і 0.9 і 0.85, якщо вони ізолювані шляхом обклеювання папером.

При розрахуванні даного двигуна коефіцієнт заповнення пакета сталлю:

$$k_z = 0.93$$

Маса сталі статора, кг:

$$m_c = \left[\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - D_{sv}^2) - S_{\Pi} \cdot z \right] \cdot l_a \cdot k_z \cdot \rho_{ст} = \left[\frac{\pi}{4} \cdot (0.072^2 - 0.04^2) - 5.92735 \times 10^{-5} \cdot 18 \right] \cdot 0.086 \cdot 0.93 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 1.09044$$

Маса спинки статора, кг:

$$m_c = \frac{\pi}{4} \cdot [D^2 - (D_{sv} + 2 \cdot h_{\Pi})^2] \cdot (l_a \cdot k_z \cdot \rho_{ст}) = \frac{\pi}{4} \cdot [0.072^2 - (0.04 + 2 \cdot 0.012)^2] \cdot 0.086 \cdot 0.93 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 0.53308$$

Маса зубців статора, кг:

$$m_z = m_c - m_c = 1.09044 - 0.53308 = 0.55736$$

Маса міді обмотки статора, кг:

$$\rho_{mid} = 8.9 \cdot 10^3$$

$$m_{mid} = 3 \cdot q \cdot l_{cp} \cdot W_f \cdot \rho_{mid} = 3 \cdot 0.442 \cdot 0.001^2 \cdot 0.09304 \cdot 116.45484 \cdot 8.9 \cdot 10^3 = 0.12786$$

Маса сталі ротора, кг:

$$m_{str} = \frac{\pi}{4} \cdot [(D_a - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_M)^2 - (D_a - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_M - 2 \cdot h_p)^2] \cdot l_a \cdot \rho_{ст} = \frac{\pi}{4} \cdot [(0.086 - 2 \cdot 0.0005$$

$$- 2 \cdot 0.0025)^2 - (0.086 - 2 \cdot 0.0005 - 2 \cdot 0.0025 - 2 \cdot 0.004)^2] \cdot 0.086 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 0.64064$$

Маса магнітів, кг:

$$m_{\text{mag}} = 2 \cdot p \cdot l \cdot b_M \cdot h_M \cdot \rho_{\text{ст}} = 2 \cdot 8 \cdot 0.0855 \cdot 0.01471 \cdot 0.0025 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 0.39235$$

Маса ротора, кг:

$$m_r = m_{\text{str}} + m_{\text{mag}} = 0.64064 + 0.39235 = 1.03299$$

Повна маса активної частини двигуна, кг:

$$m = m_c + m_{\text{mid}} + m_r = 1.09044 + 0.12786 + 1.03299 = 2.2513$$

Коефіцієнт використання маси:

$$f_m = \frac{2 \cdot K_{\text{п}}}{D \cdot \sqrt{m}} = \frac{2 \cdot 0.56945}{0.072 \cdot \sqrt{2.2513}} = 10.54231$$

Отримана величина визначає витрати активних матеріалів та дозволяє порівняти різні варіанти проектуваних машин.

Момент інерції ротора, приймаючи його за повний циліндр, кг^м²:

$$J_p = \frac{m_r}{12} \left[3 \left(\frac{D_{\delta}}{2} \right)^2 + 3 \left(\frac{D_a}{2} \right)^2 + l_M^2 \right] = \frac{1.03299}{12} \left[3 \left(\frac{0.0535}{2} \right)^2 + 3 \left(\frac{0.086}{2} \right)^2 + 0.07992^2 \right] = 0.00121$$

2.3.7. Розрахунок втрат та коефіцієнту корисної дії

$$I_s = \frac{P_2}{\frac{U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}} \cdot 3} = \frac{61.08585}{\frac{24}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}} \cdot 3} = 2.07818 \cdot A$$

Основні електричні втрати в обмотці статора:

$$k_d = 1.75$$

$$P_{\text{el}} = k_d \cdot N_c \cdot I_s \cdot R_{f155} = 1.75 \cdot 3 \cdot 2.07818 \cdot 0.66062 = 7.2077 \cdot \text{Вт}$$

Магнітні втрати в ярмі магнітопроводу статора:

$$P_a = k_{da} \cdot p_a \cdot B_c^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} \cdot m_c = 1.75 \cdot 1.55 \cdot 1.32817^2 \cdot \left(\frac{26.82672}{50} \right)^{1.3} \cdot 0.53308 = 1.1354 \cdot \text{Вт}$$

$$\text{де } k_{da} = 1.75 \quad p_a = 1.55$$

Магнітні втрати в зубцях статора:

$$P_Z = k_{dz} \cdot p_z \cdot B_z^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3} \cdot m_z = 2.5 \cdot 1.45 \cdot 1.57413^2 \cdot \left(\frac{26.82672}{50}\right)^{1.3} \cdot 0.55736 = 2.22845 \cdot \text{Вт}$$

$$k_{dz} = 2.5 \quad p_z = 1.45$$

Механічні втрати:

$$v_p = \pi(D + 2 \cdot h_p + 2 \cdot h_m) \cdot \frac{n}{60} = \pi \cdot (0.072 + 2 \cdot 0.004 + 2 \cdot 0.0025) \cdot \frac{167.667}{60} = 0.74622$$

$$P_{\text{mex}} = 3.68 \cdot p \cdot \left(\frac{v_p}{1}\right)^3 \cdot \sqrt{0.86} = 3.68 \cdot 8 \cdot \left(\frac{0.74622}{1}\right)^3 \cdot \sqrt{0.86} = 11.34442 \cdot \text{Вт}$$

Додаткові втрати:

$$P_{\text{dod}} = N_c \cdot U_f \cdot I_f \cdot 0.0005 = 3 \cdot 74.246 \cdot 141.421 \cdot 0.0005 = 15.74992$$

$$U_f = 74.246 \quad I_f = 141.421$$

Імпульсні втрати в роторі:

$$\tau = \frac{(D - 2 \cdot \delta) \cdot \pi}{2 \cdot p} = \frac{(0.072 - 2 \cdot 0.0005) \cdot \pi}{2 \cdot 8} = 0.01394$$

$$t_{z1} = \frac{D \cdot \pi}{z} = \frac{0.072 \cdot \pi}{18} = 0.01257$$

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1} + 10 \cdot \delta}{t_{z1} - a_{\text{III}} + 10 \cdot \delta} = \frac{0.01257 + 10 \cdot 0.0005}{0.01257 - 0.001 + 10 \cdot 0.0005} = 1.06036$$

$$B_0 = B_{\delta} \cdot (k_{\delta 1} - 1) = 0.83932 \cdot (1.06036 - 0.0855) = 0.81822$$

$$l_1 = 0.184$$

$$k_0 = 23.3$$

Повні втрати в двигуні:

$$P_{\text{povn}} = P_{\text{el}} + P_a + P_Z + P_{\text{mex}} + P_{\text{dod}} + P_{\text{pov}} = 7.2077 + 1.1354 + 2.22845 + 11.34442 + 15.74992 + 6.28565 = 43.95155$$

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{povn}}}{N_c \cdot I_S \cdot U_f + P_{\text{povn}}} = 1 - \frac{43.95155}{3 \cdot 2.07818 \cdot 74.246 + 43.95155} = 0.91328$$

РОЗДІЛ 3.

МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

3.1. Геометричне моделювання вентильного двигуна з постійними магнітами

Метою підрозділу є розробка 3-D моделі активної зони вентильного двигуна з постійними магнітами.

Геометрична тривимірна модель вентильного двигуна створена у сучасному комп'ютерному пакеті автоматизованого проектування SolidWorks.

3.1.1. Основні функціональні можливості програмного пакета SolidWorks

За допомогою програмного середовища SolidWorks можна створювати тривимірні моделі та двовимірні креслення (рис. 3.1).

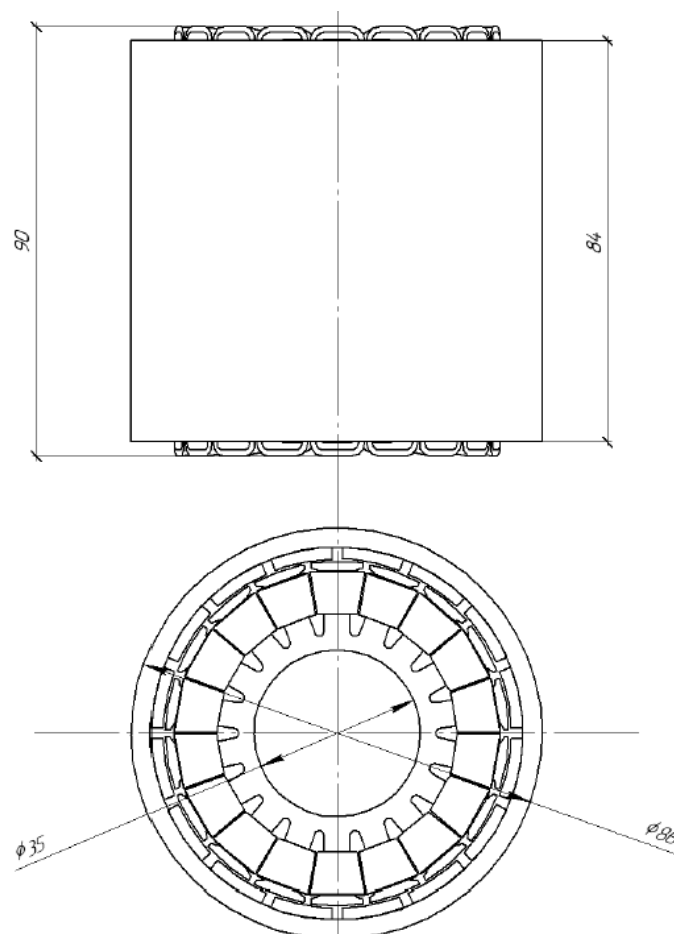


Рис. 3.1 – Двовимірне креслення

SolidWorks це система, що працює за принципом задання розмірів.

Можна задати розміри та геометричні взаємозв'язки між елементами. При зміні розмірів також змінюються форма і розмір деталі, проте зберігається загальний задум проекту. Наприклад, в зображеної на рис. 3.2 деталі бобишка завжди наполовину менше підстави.

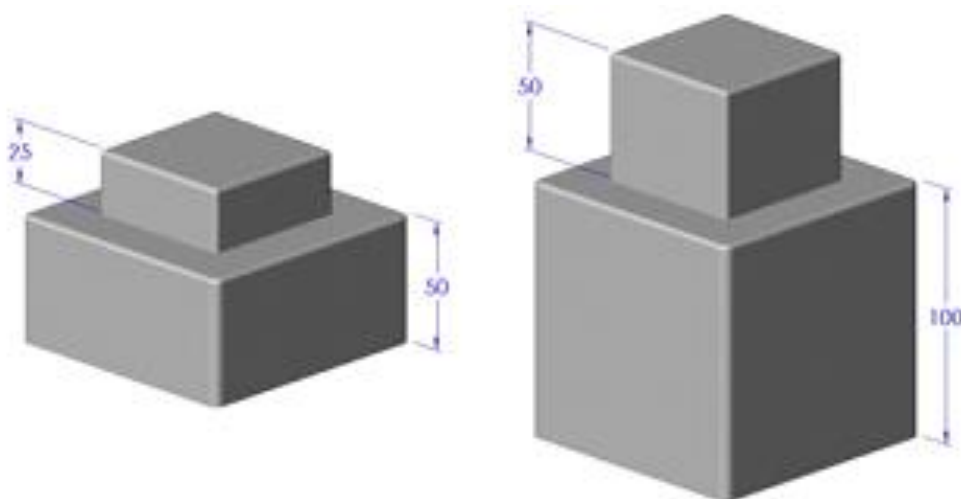


Рис. 3.2 – Приклад 3D деталі

В SolidWorks тривимірна модель складається зі зборок, креслень і деталей.

Деталі, креслення та збірки відображають одну і ту ж модель в різних документах. Будь-які зміни, що вносяться в модель в одному документі, поширюються на інші документи, які містять цю модель (рис. 3.3).

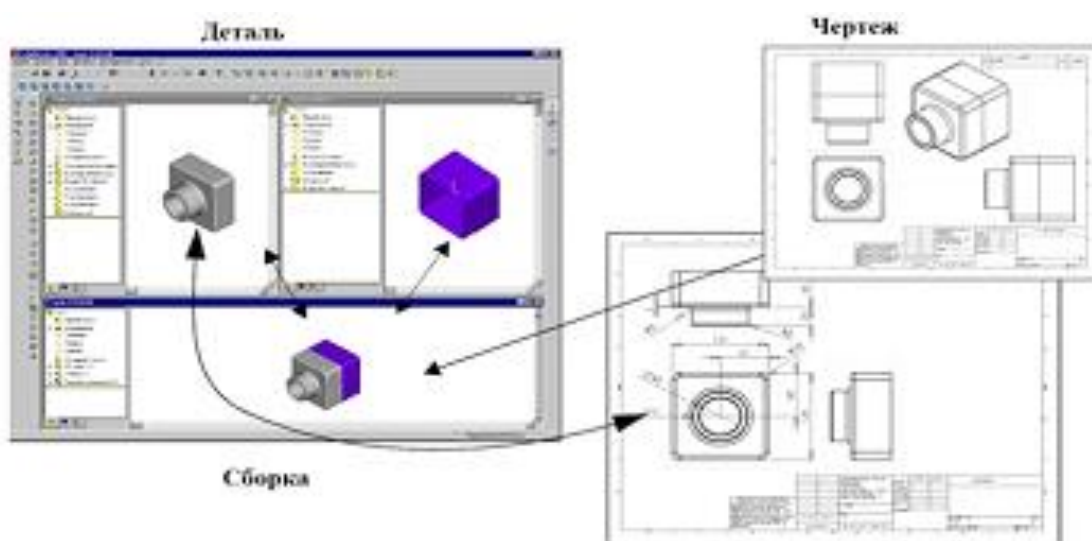


Рис. 3.3 – Взаємозв'язок документів у SolidWorks

3.1.2. Геометрична 3D модель активної частини вентильного двигуна з постійними магнітами

Активна зона ВДПМ складається з обмотки якоря (статора), магнітопроводу якоря (статора), магнітів, та магнітопроводу ротора.

Модель створювалась у наступній послідовності:

- створення окремих деталей (обмотка якоря, постійні магніти, магнітопровід статора);
- створення збірки ротора;
- створення збірки активної частини.

Постійний магніт зображено на рис. 3.4.

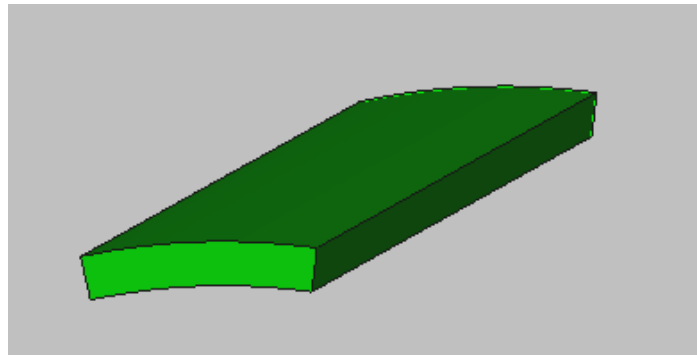


Рис. 3.4 – Тривимірна модель постійного магніту

Обмотка якоря зображена на рис. 3.5.

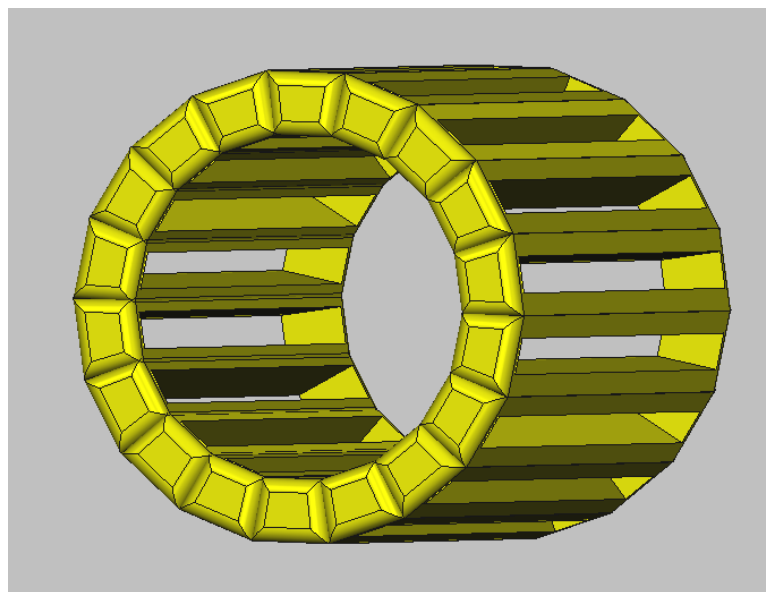


Рис. 3.5 – Тривимірна модель обмотки якоря

Магнітопровід статора зображено на рис. 3.6.

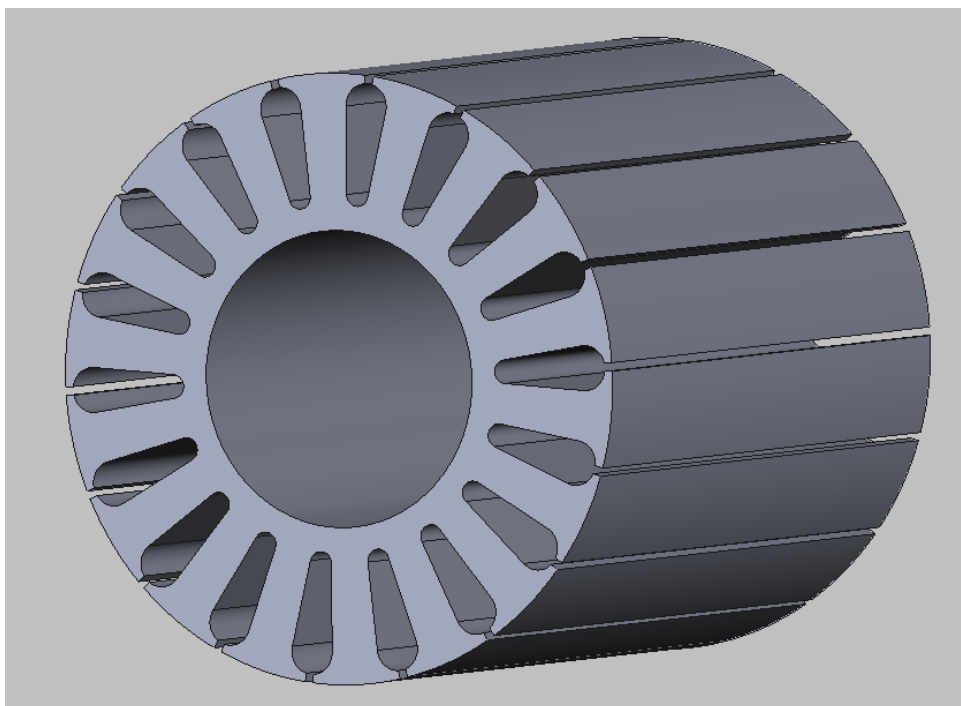


Рис. 3.6 – Тривимірна модель магнітопроводу статора

Збірка ротора зображена на рис. 3.7.

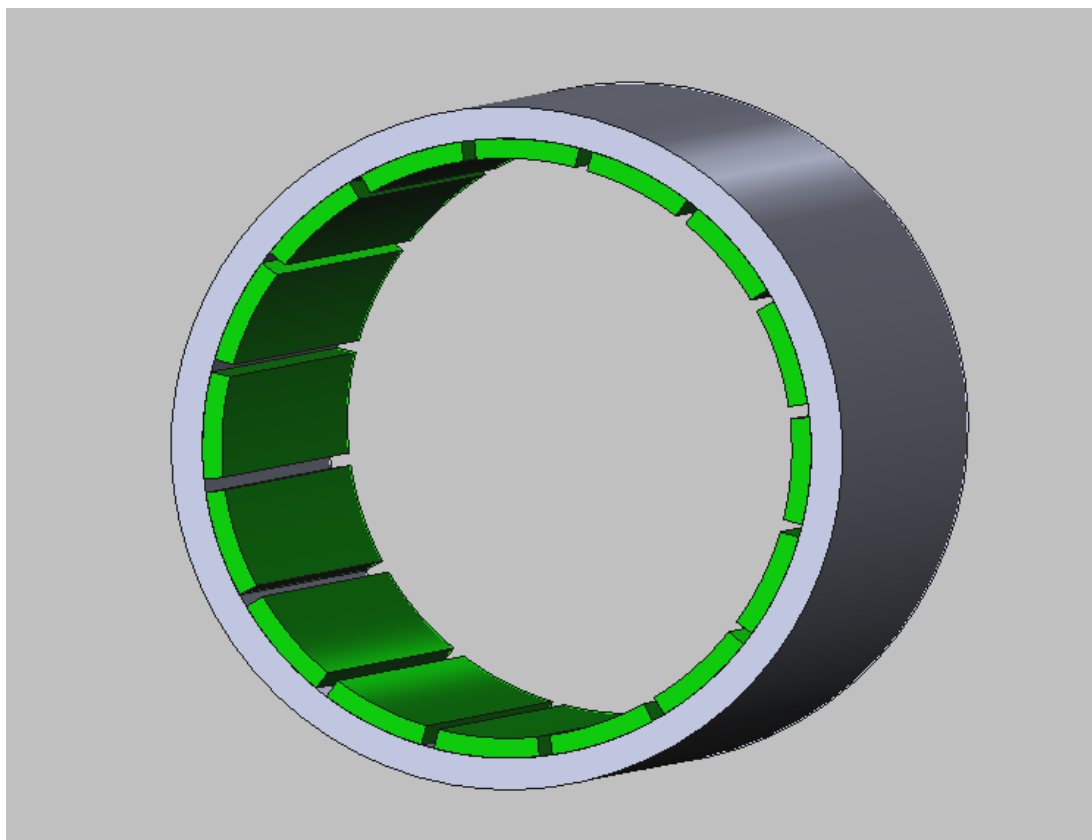


Рис. 3.7 – Тривимірна модель збірки ротора

Збірка активної частини вентильного двигуна з постійними магнітами частини, що складається з обмотки якоря, магнітопроводу статора та ротора з постійними магнітами зображена на рис. 3.8

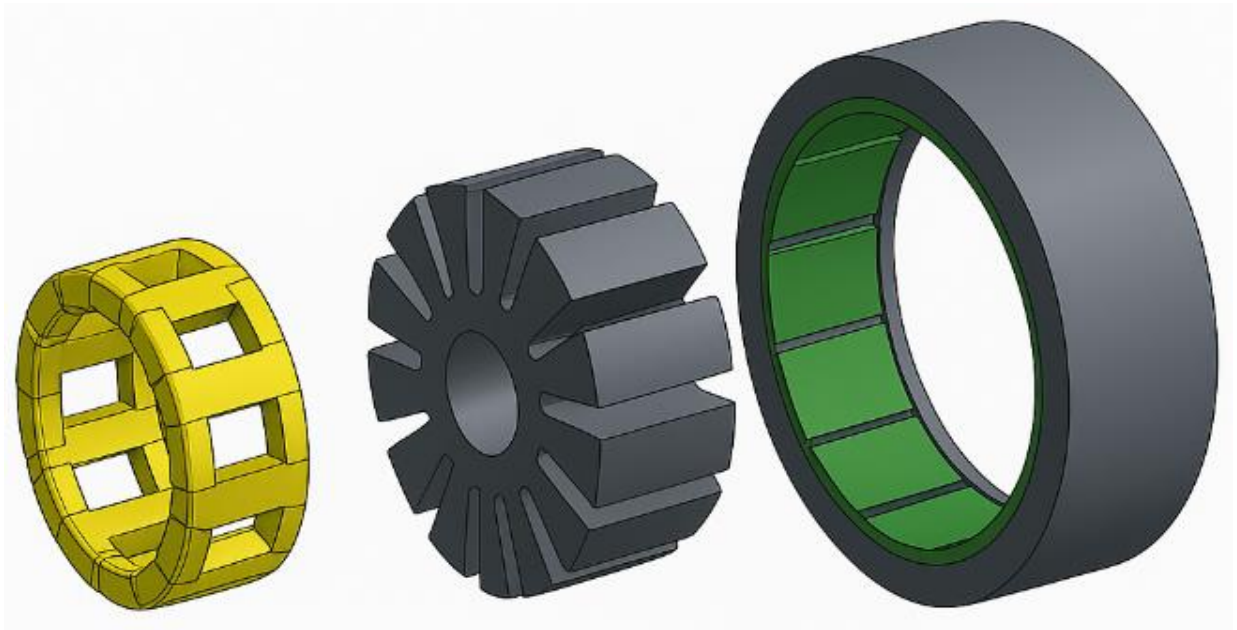


Рис. 3.8 – Збірка активної частини у тривимірному просторі

3.2. Математичне моделювання вентильного двигуна з постійними магнітами

Метою підрозділу є розробка тривимірної польової математичної моделі активної зони вентильного двигуна з постійними магнітами та проведення на її основі досліджень магнітного поля.

Тривимірна польова математична модель вентильного двигуна з постійними магнітами реалізована у сучасному програмному забезпеченні для комп'ютерного моделювання фізичних процесів COMSOL Multiphysics.

3.2.1. Огляд програмного пакета COMSOL Multiphysics

Програмний пакет COMSOL Multiphysics® — це комплексна платформа для комп'ютерного моделювання, яка охоплює всі його етапи: від створення геометрії, задання фізико-механічних властивостей матеріалів і опису фізичних процесів до налаштування обчислень та обробки результатів. Такий підхід забезпечує отримання точних і достовірних результатів.

Ця програма дозволяє виконувати розрахунки різноманітних процесів і явищ за допомогою методу кінцевих елементів. Користувачі COMSOL Multiphysics® не обмежені типовими рамками, властивими іншим пакетам для моделювання, і можуть повністю контролювати всі аспекти створення моделі. Програмне середовище сприяє творчому підходу до побудови моделей і розв'язанню складних або нетипових задач шляхом поєднання довільної кількості фізичних явищ, а також можливості самостійно задавати рівняння, умови та вирази через зручний графічний інтерфейс (GUI).

Мультифізичне моделювання в COMSOL забезпечує високу точність результатів, враховуючи широкий діапазон робочих параметрів і різноманіття фізичних процесів. Завдяки цьому користувачі можуть ефективно аналізувати, проектувати та оптимізувати процеси й пристрої з урахуванням реальних умов їх експлуатації.

COMSOL Multiphysics® є однією з найзручніших програм для моделювання фізичних процесів, що відкриває широкі можливості для наукових досліджень і проектної діяльності. Вона також чудово підходить для впровадження у навчальний процес університетів, оскільки є зручною та наочною платформою для початкового вивчення моделювання фізичних явищ і процесів.

3.2.2. Польова математична модель активної частини у двовимірному просторі

Математичне моделювання проводилось для номінального режиму роботи вентильного двигуна.

Створення польової моделі починається з виконання геометрії активної частини двигуна. Геометрія була створена у пакеті AutoCad (рис. 3.9) і експортована у пакет COMSOL Multiphysics. Розрахункова область активної частини показана на рис. 3.10

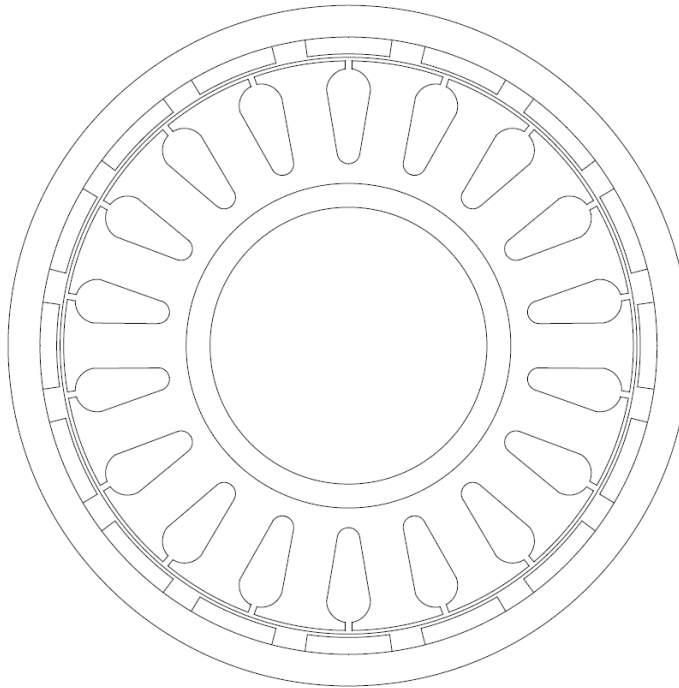


Рис. 3.9 – Двовимірна геометрія активної частини ВДПМ створена в AutoCad

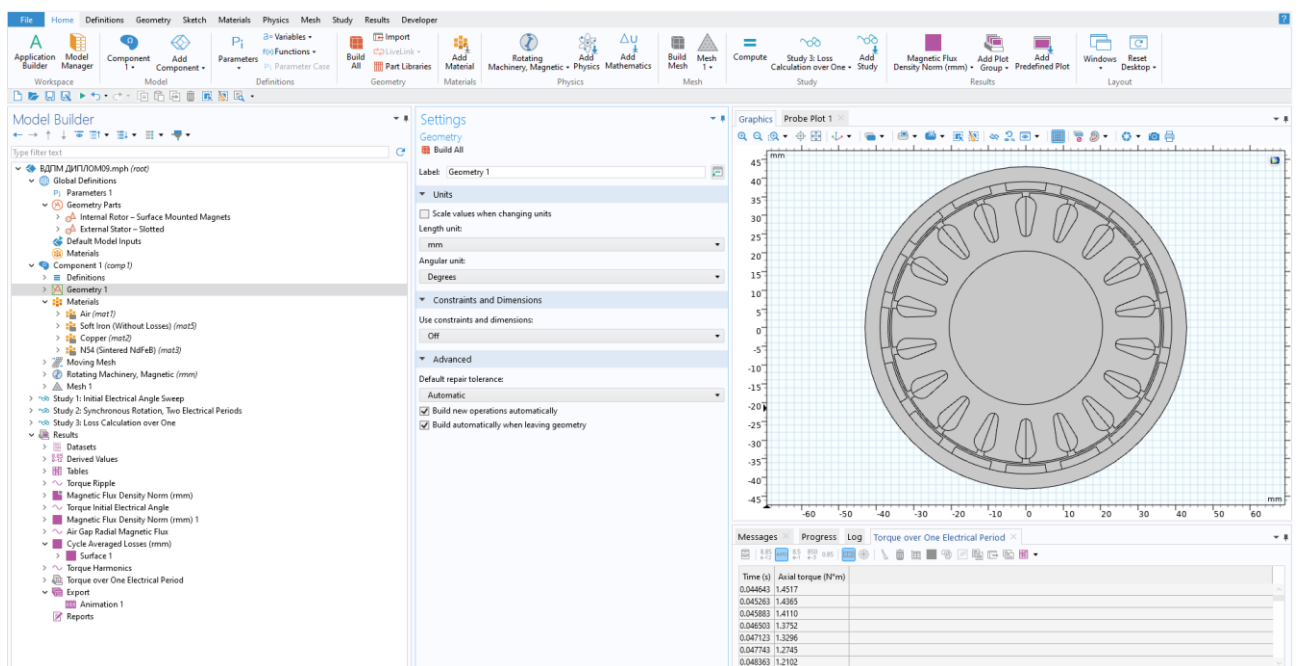


Рис. 3.10 – Розрахункова область активної частини ВДПМ

Для початку необхідно визначитися із низкою загальних параметрів, які будуть використовуватися в моделі (рис. 3.11).

Settings				
Parameters				
Label: Parameters 1				
Parameters				
Name	Expression	Value	Description	
L	84[mm]	0.084 m	Товщина двигуна вздовж осі (поперечна товщина)	
init_ang	270[deg]	4.7124 rad	Початковий механічний кут	
Np	16	16	Кількість полюсів	
Ns	18	18	Кількість пазів	
w_rot	168[rpm]	2.8 1/s	Частота обертання / швидкість обертання	
f_el	w_rot*(Np/2)	22.4 1/s	Електрична частота	
I0	3[A]	3 A	Піковий струм	
Nturn	10	10	Кількість витків проводу в пазу	
ff_slot	0.8	0.8	Коефіцієнт заповнення пазу	

Рис. 3.11 – Основні параметри активної частини ВДПМ

Наступним етапом моделювання є задання властивостей матеріалів. У моделі використовувались такі матеріали.

- Електротехнічне залізо з нелінійними магнітними властивостями (магнітопровід статора). У моделі задавалась крива намагнічування. На рис. 3.12 магнітопровід статора показано зеленим кольором.

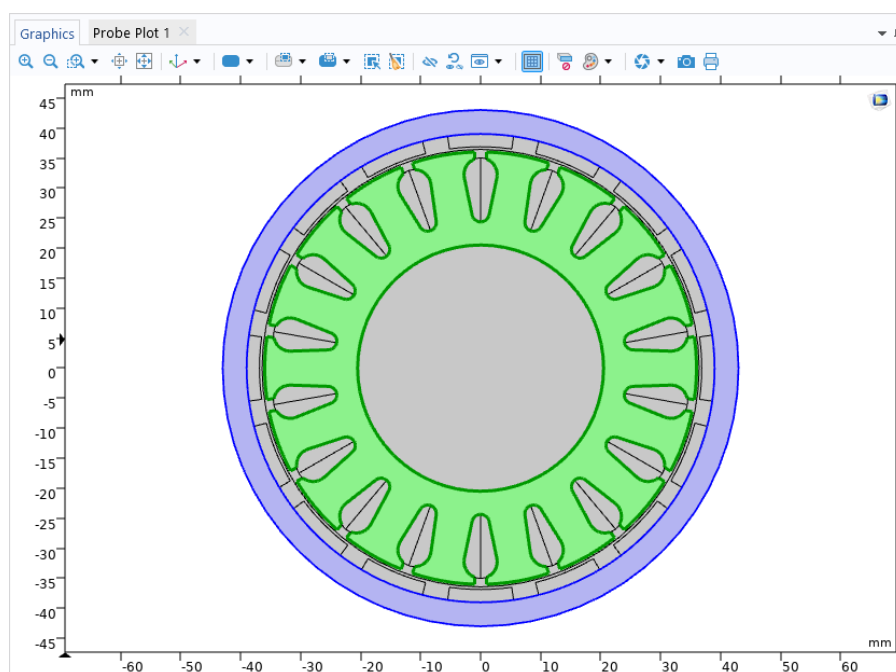


Рис. 3.12 – Задання матеріалу для магнітопроводу статора

- Мідний провід (обмотка якоря (статора)). На рис. 3.13 показані зеленим кольором провідники в пазах статора. Магнітні властивості обмотки якоря подібні властивостям повітря.

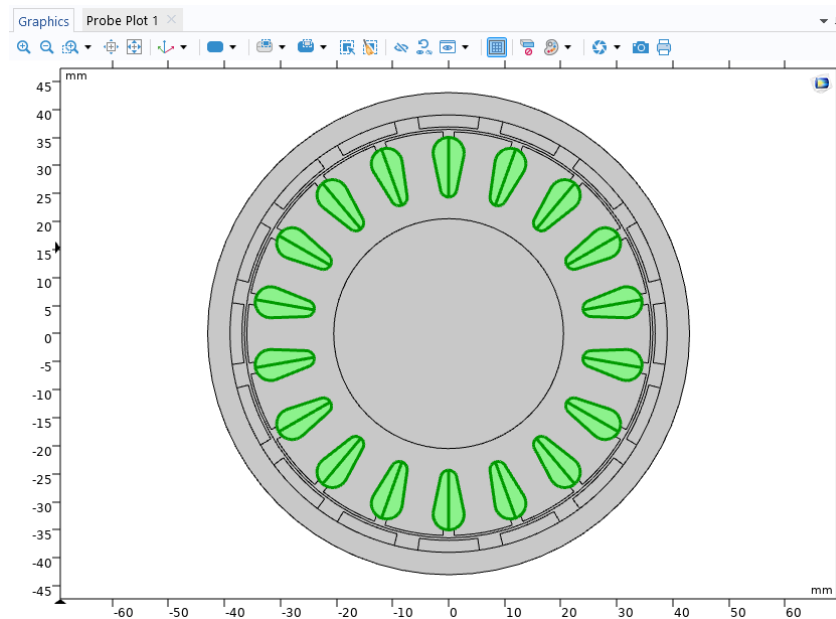


Рис. 3.13 – Задання матеріалу для обмотки якоря (статора)

- Повітря (зазор між статором та ротором). На рис. 3.14 повітря, що оточує активну частину двигуна показане зеленим кольором.

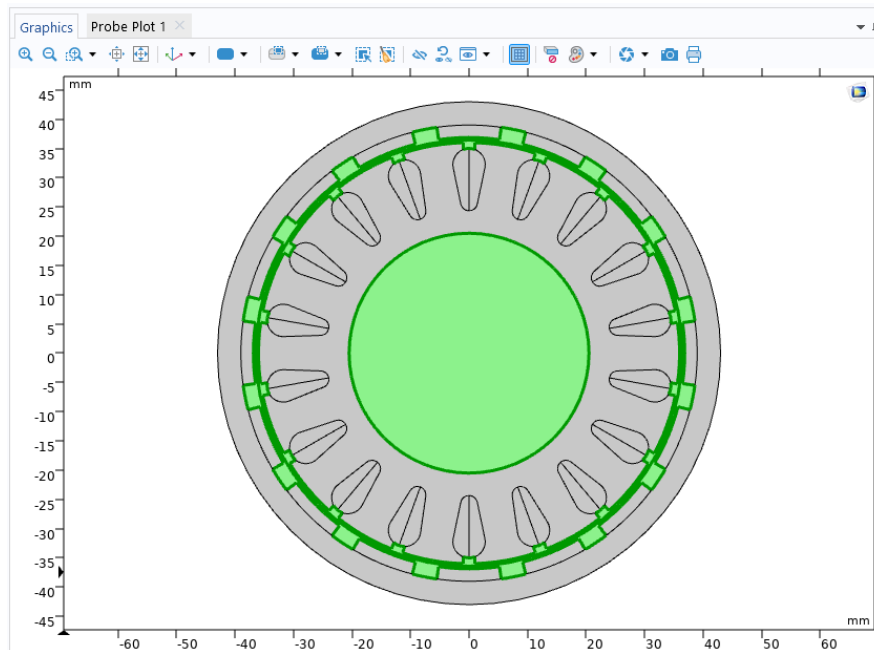


Рис. 3.14 – Задання матеріалу для зазору між статором та ротором

- Постійні магніти, що розташовуються на осерді ротора позначено зеленим кольором (рис. 3.15).

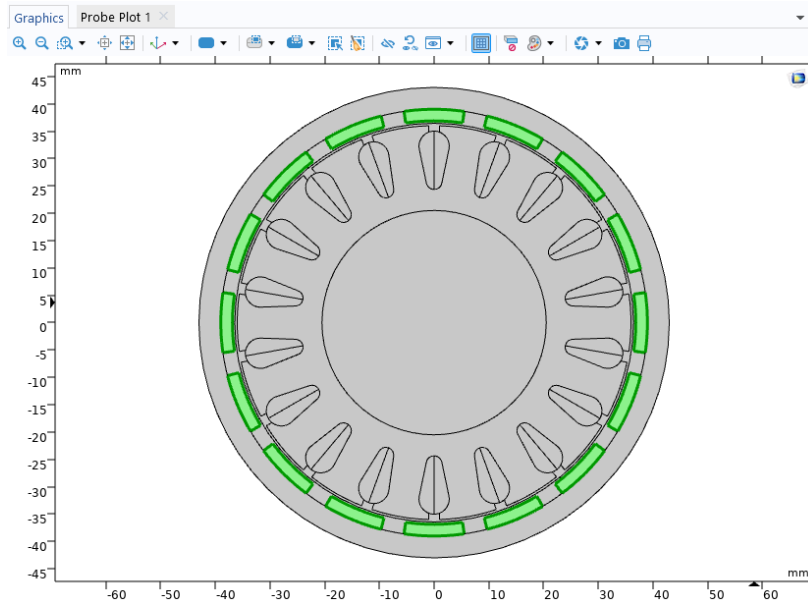


Рис. 3.15 – Задання матеріалу для постійних магнітів що на роторі

Розрахункова область розбивається на сітку скінченних елементів, що зображена на рис. 3.16. Розрахункова область складається з 17518 трикутних елементів.

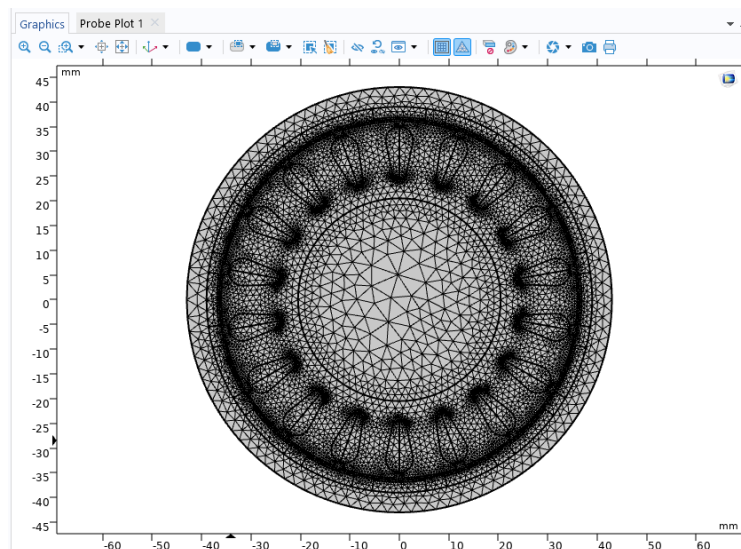


Рис. 3.16 – Сітка розрахункової області ВДПМ

У результаті розрахунку отримано розподіл магнітного поля у активній частині вентильного двигуна з постійними магнітами.

На рис. 3.17 показано розподіл магнітної індукції у середній площині активної частини двигуна.

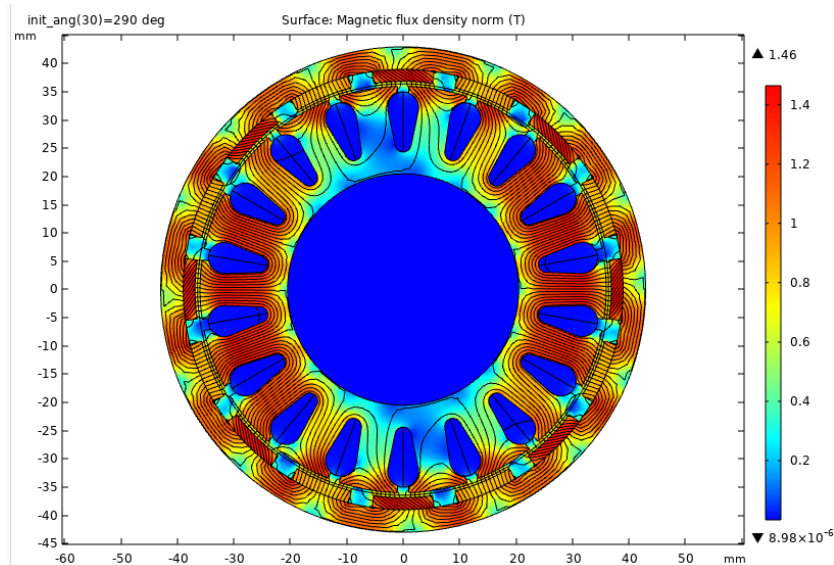


Рис. 3.17 – Розподіл магнітної індукції в активній частині ВДПМ

На рис. 3.18 показано розподіл магнітного векторного потенціалу (Z-складова) у середній площині активної частини двигуна.

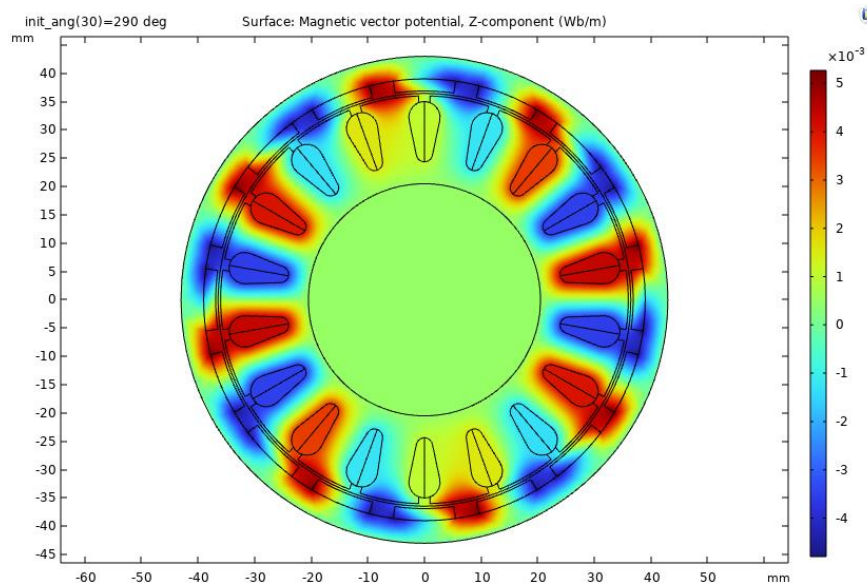


Рис. 3.18 – Розподіл магнітного векторного потенціалу в активній частині ВДПМ

Метою першого дослідження є визначення початкового механічного кута, який створює максимальний обертовий момент на роторі. Як показано на рис. 3.19, параметричне сканування початкового кута дає криву з двома екстремумами: один відповідає прискорювальному моменту, а інший — моменту уповільнення в напрямку заданого обертання проти годинникової стрілки. Для максимального прискорювального моменту перший екстремум обирають як початковий кут.

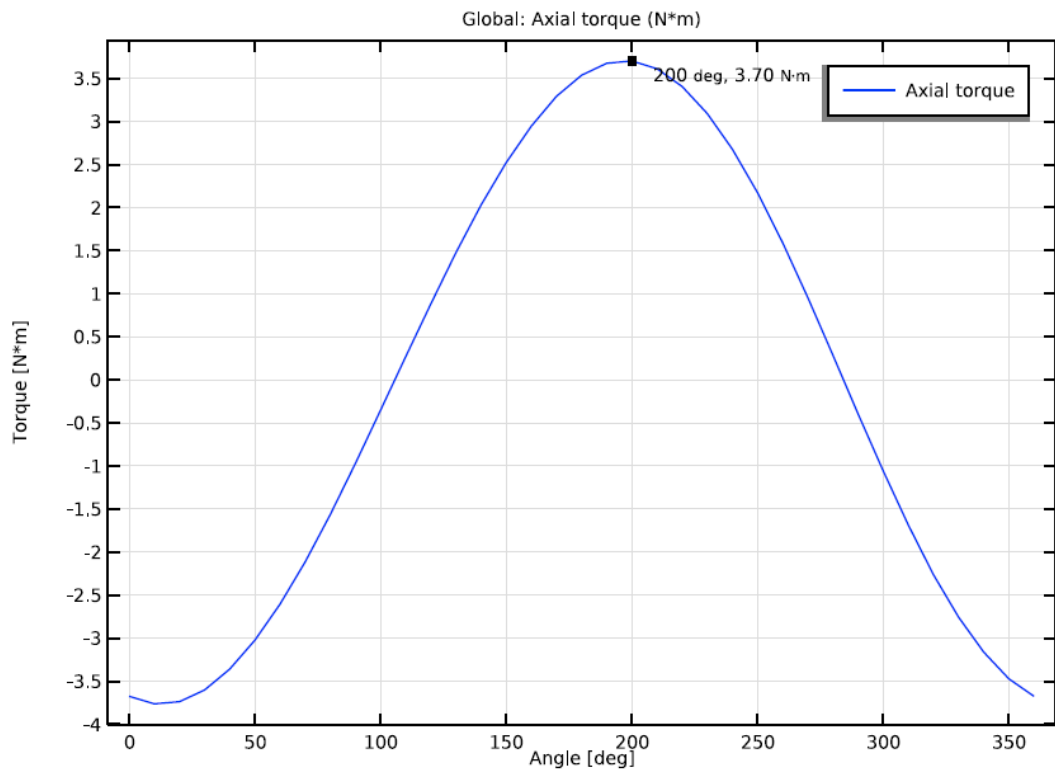


Рис. 3.19 – Електромагнітний момент як функції механічного кута ротора.

Наступне перехідне дослідження розв'язує задачу синхронного обертання поля статора та ротора. На рис. 3.20 показано пульсації моменту ротора як функцію часу.

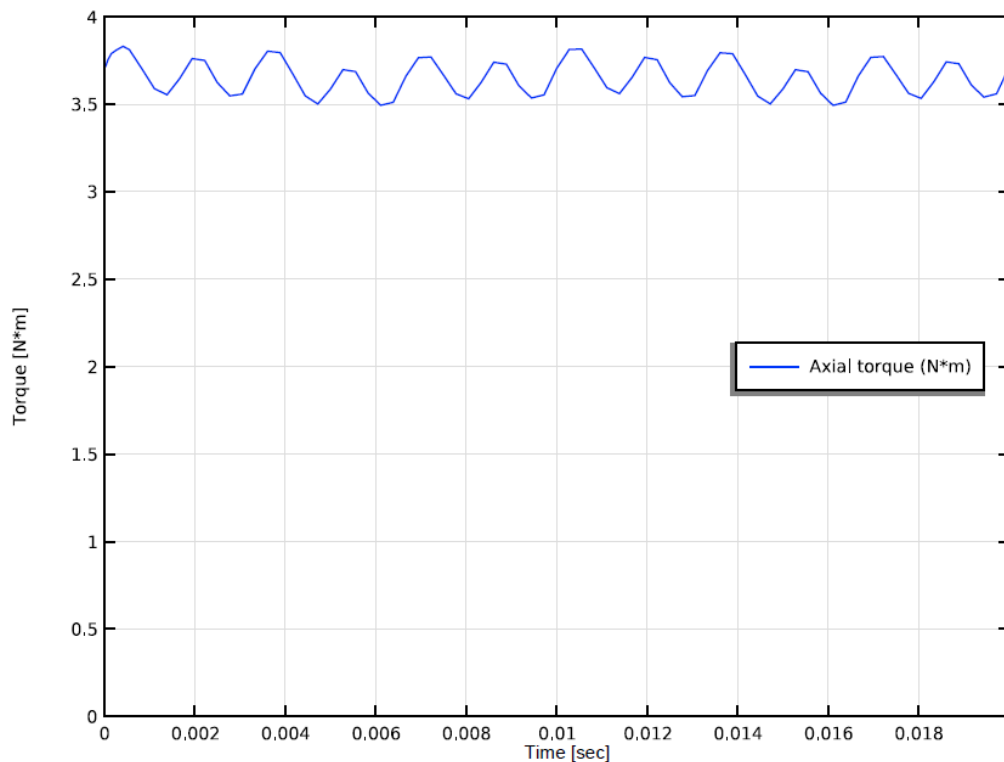


Рис. 3.20 – Пульсації крутного моменту ротора від часу.

Проведено розрахунок густини втрат в активній частині вентильного двигуна. Рис. 3.21 демонструє отриману густину втрат у статорі та в залізі ротора.

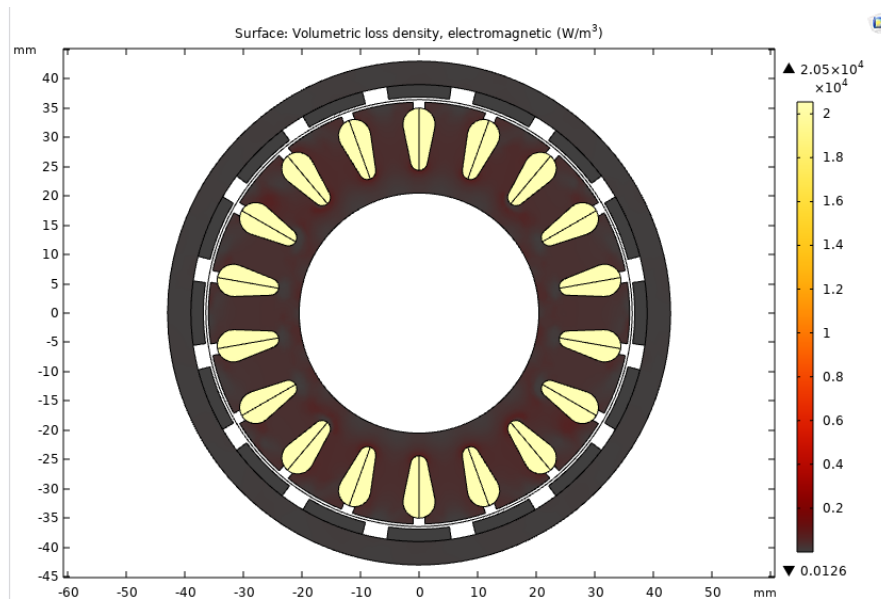


Рис. 3.21 – Розподіл густини електромагнітних втрат у двигуні

На рис. 3.22 показано розподіл радіальної складової магнітної індукції в повітряному зазорі машини вздовж дугової координати. Графік відображає зміну густини магнітного потоку під час проходження магнітних полюсів ротора відносно зубців статора.

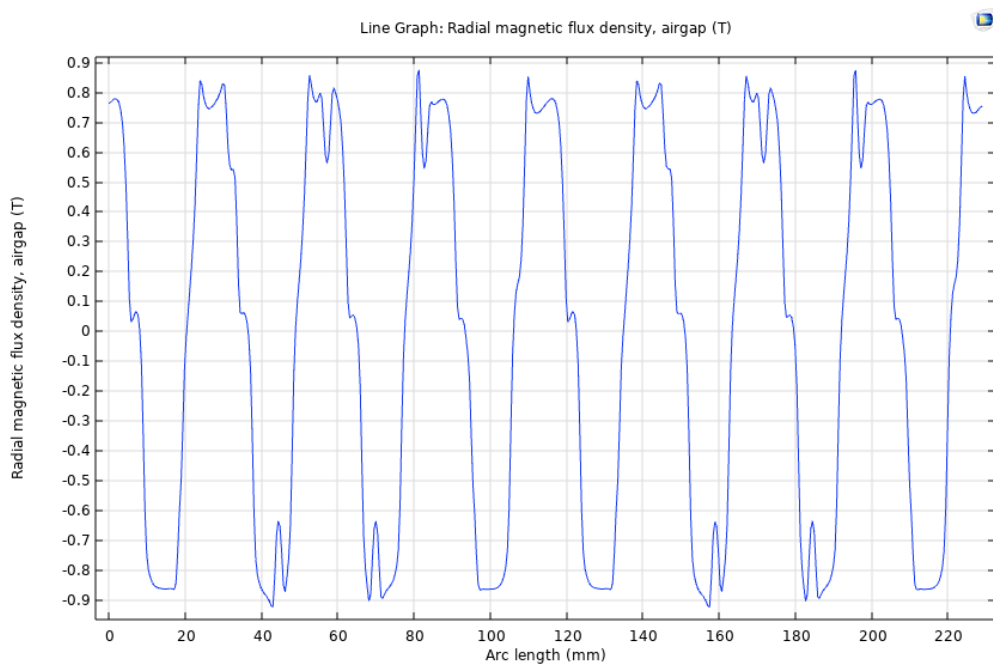


Рис. 3.22 – Розподіл радіальної складової магнітної індукції в повітряному зазорі машини вздовж дугової координати

РОЗДІЛ 4.

СТАРТАП-ПРОЕКТ

Стартап — це нова форма бізнесу, яка раніше не існувала. Його головна мета полягає у впровадженні на ринок чогось принципово нового — продукту, технології чи концепції, що не мали аналогів. Основна відмінність стартапу від традиційного бізнесу полягає в тому, що він залучає інвесторів ще до появи прибутку. Інвестори вкладають кошти у саму ідею та її потенціал на початкових етапах розвитку проєкту. У сучасних умовах великі корпорації зазвичай працюють із уже відомими технологіями та продуктами, тоді як стартапи активно зростають, швидко впроваджуючи інноваційні рішення. Їхня гнучкість і швидкість розвитку дають змогу конкурувати з компаніями, які не приділяють належної уваги нововведенням чи створенню власної інтелектуальної власності.

Опис ідеї стартап-проєкту.

Створення будь-якого стартапу ґрунтується на інноваційній ідеї. Основна мета цієї магістерської дисертації полягає у реалізації вдосконаленої конструкції вентильного двигуна з постійними магнітами.

Наступним етапом дослідження є впровадження розробленої конструкції та залучення фінансування для проведення рекламної кампанії. Важливо також поширювати ключову інформацію серед користувачів цього типу техніки, пояснюючи значущість розробки та її переваги.

Окрім цього, необхідно активно шукати потенційних інвесторів і компаній, які могли б підтримати організацію виробництва таких двигунів і забезпечити сервісне обслуговування агрегатів, що цього потребують. Важливою складовою є створення ефективної маркетингової стратегії, спрямованої на підвищення обізнаності та привернення уваги потенційних споживачів до нового продукту.

Для успішного запуску та подальшого розвитку стартапу необхідно тісно співпрацювати з інженерами та спеціалістами в галузі електротехніки та електромеханіки для розв'язання технічних завдань і досягнення максимальної ефективності розробленого вентильного двигуна з постійними магнітами. Також важливо налагодити партнерські стосунки з потенційними споживачами та

бізнес-партнерами, щоб забезпечити стабільне впровадження і поширення нового продукту на ринку.

4.1.1. Опис ідеї стартап-проекту

Таблиця 4.1 - Можливі напрямки застосування

Зміст ідеї	Можливі напрямки застосування	Основні вигоди для користувача	Відмінності від аналогів та замінників
Магнітна система	Електротехнічна промисловість	Підвищена ефективність та стабільність роботи двигуна завдяки використанню постійних магнітів.	Використання високоефективних неодимових магнітів забезпечує високу густину потужності та зменшує габарити двигуна.
Конструкція статора	Енергетика, промислове обладнання	Зменшення втрат енергії та покращення тепловідведення під час роботи.	Оптимізована форма пазів статора знижує рівень шуму та вібрацій порівняно з традиційними електродвигунами.
Система керування	Автомобільна, робототехнічна та побутова техніка	Забезпечення плавного регулювання швидкості та високої точності позиціонування.	Використання сучасних мікроконтролерів та алгоритмів керування дозволяє реалізувати безсенсорне керування.
Матеріали ротора	Авіаційна та транспортна галузі	Зменшення ваги двигуна при збереженні високих механічних характеристик.	Легкі композитні матеріали підвищують динамічні властивості системи та знижують інерційність ротора.
Охолодження двигуна	Промислове обладнання, електротранспорт	Підвищення надійності та довговічності двигуна.	Використання комбінованих систем охолодження (повітряно-рідинних) підвищує ефективність тепловідведення.

Дана таблиця формує узагальнене уявлення про суть ідеї стартап-проекту, окреслює потенційні напрями його застосування, основні переваги для користувачів, а також відмінності від наявних аналогів і замінників.

Економічні переваги проектного вентильного двигуна з постійними магнітами. У даному випадку у проєкті використовується вентильний двигун з постійними магнітами, який характеризується високою частотою обертання без навантаження, що забезпечує необхідну швидкість обертання робочого механізму. Такий двигун відзначається компактними розмірами та меншою масою.

Вентильний двигун з постійними магнітами застосовується для

використання в енергетичних, промислових та транспортних установках. Йому притаманна проста конструкція, надійність і зручність обслуговування. Порівняно з базовими моделями, проєктований двигун має ряд переваг, серед яких — вищий коефіцієнт корисної дії. Це стало можливим завдяки впровадженню сучасних технічних рішень та матеріалів, зокрема високоенергетичних постійних магнітів.

4.2. Потенційні користувачі

Ефективне використання спеціалізованого обладнання потребує висококваліфікованих фахівців, які володіють сучасними технологіями та відповідним інструментарієм. Варто враховувати, що процес виробництва та обслуговування електричних машин є складним, дороговартісним і вимагає великої відповідальності. Помилки у технологічному процесі або порушення вимог можуть призвести до зниження експлуатаційних характеристик обладнання, створити небезпеку для людей та спричинити значні фінансові втрати у виробництві.

4.3. Структура виплат

Одним із найважливіших елементів стартап-проєкту є формування та чітке визначення структури витрат. Це має вирішальне значення для потенційних інвесторів, оскільки саме прозорість фінансових розрахунків визначає їхню довіру та готовність до співпраці. У межах даної магістерської роботи, спрямованої на розробку й упровадження нових конструкцій машин, особливий акцент слід зробити на детальному аналізі витрат, з урахуванням вартості матеріалів і спеціалізованого технологічного обладнання.

4.4. Бізнес-модель впровадження

Бізнес-модель упровадження — це стисле та зрозуміле відображення діяльності підприємства, яке дозволяє повноцінно проаналізувати систему

взаємопов'язаних бізнес-процесів. Такі моделі застосовуються для опису, структурування та класифікації компаній, особливо у сфері підприємництва. У науковій і практичній площині поняття «бізнес-модель» охоплює різноманітні аспекти функціонування бізнесу — його цілі, основні процеси, цільову аудиторію, ціннісні пропозиції, стратегії, інфраструктуру, організаційну побудову, джерела фінансування, а також операційну діяльність і політики, з урахуванням культурних особливостей.

ВИСНОВОК

У магістерській дисертації розроблено та досліджено вентильний двигун з постійними магнітами загального призначення, що може використовуватись у медичній, авіаційній та інших галузях промисловості. Проведено комплекс інженерних, конструкторських і математичних досліджень, спрямованих на підвищення ефективності, надійності та енергоощадності спроектованого електродвигуна.

Актуальність теми магістерської роботи зумовлена стрімким розвитком електромеханічних систем та зростаючою потребою в компактних, високоточних і енергоефективних електричних приводах. Особлива увага приділяється важливості застосування вентильних двигунів у сучасних технічних комплексах, де критичними є точність керування, висока динаміка та мінімальні енергетичні втрати.

У межах роботи виконано повний цикл проєктування вентильного двигуна з постійними магнітами: визначено основні технічні характеристики, проведено розрахунок головних розмірів і зубцевої зони, здійснено побудову геометричної 3D-моделі активної частини двигуна в середовищі SolidWorks. Подальше математичне моделювання виконано у програмному пакеті COMSOL Multiphysics, що дало змогу сформувавши детальну польову модель та отримати високоточні електромагнітні параметри.

Виконано розрахунок магнітного поля, отримано розподіл густини магнітного потоку в повітряному зазорі, визначено характерні гармоніки та особливості взаємодії статора й ротора. Параметричний аналіз початкового кута показав наявність двох екстремумів моменту, що дозволило визначити оптимальне вихідне положення ротора для отримання максимального прискорювального моменту. Перехідне моделювання забезпечило отримання пульсацій електромагнітного моменту за один електричний період, а додатковий аналіз втрат показав розподіл тепловиділення в активних частинах двигуна.

Результати моделювання підтвердили, що обрана конструкція забезпечує стабільні робочі характеристики, рівномірний розподіл магнітного потоку та

відсутність критичних зон насичення. Аналіз втрат засвідчив, що максимальні значення густини втрат не перевищують допустимих меж.

Важливо підкреслити, що при розробці двигуна враховано сучасні вимоги до енергоефективності та компактності електроприводів, що є актуальним з огляду на тенденцію до інтенсифікації електромеханічних систем та підвищення екологічності сучасних технологічних процесів.

Також у рамках роботи розглянуто можливість інтеграції спроектованого вентильного двигуна до реальних технічних систем, а отримані електромагнітні характеристики свідчать про перспективність його використання у високоточних механізмах та приводах з підвищеними вимогами до динаміки й надійності.

Отримані результати відкривають можливості подальшого розвитку конструкції, оптимізації системи керування та впровадження сучасних матеріалів, що сприятиме створенню більш ефективних і технологічно досконалих електричних приводів нового покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Brushless electric motors: design, operating principle, application areas and development prospects / H.Y. Chamlai, S.S. Tsyvinskyi, O.A. Geraskin // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ". – Київ: «Політехніка». – 2025.
2. Ebers J.J., Moll J.L. Large-signal behavior of junction transistors. – 1954, – Proc. IRE, 42. – 1761–1772.
3. Miller T.J.E. Switched Reluctance Motors and Their Control // Magna Physics Publishing, Clarendon Press-Oxford, 1993. – P. 76–82.
4. Radziwill W. A Highly Efficient Small Brushless d.c. Motor // Philips Technical Review. – 1989. – Vol. 30, no. 1. – P. 7–12.
5. Tkachuk V. Research System of Electric Drives on the Basis of Switched Reluctance Motor // Матеріали 4-ї Міжнар. конф. "Compatibility in Power Electronics" (CPE'05). – Polska, 2005. – P. 75–77.
6. Tkachuk V.I., Kasha L.V., Greschuk O.V. Mathematical Modeling of SRM with Buffer of Energy // Матеріали 13-го Міжнар. симпозіуму з теоретичної електротехніки (ISTET'05). – Львів, 2005. – P. 308–311.
7. Безконтактні магнітоелектричні машини із постійними магнітами: монографія / Чумак В.В., Островерхов М.Я., Тимощук О.Л., Коваленко М.А., Цивінський С.С., Коваленко І.Я. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид во «Політехніка», 2022. – 210 с.
8. В.В. Чумак, О.І. Пономарьов, О.А. Гераскін, С.С. Цивінський, Ю.А. Гайдено (2023). ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ТА ДІАПАЗОНУ РЕГУЛЮВАННЯ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З МАГНІТНИМ ШУНТОМ ЗМІННОЇ ПРОВІДНОСТІ. Vidnovluvana energetika, , 4(75), pp. 72-78 DOI: 10.36296/1819-8058.2023.4(75).72-78

9. В.В. Чумак, А.С. Стулішенко, С.С. Цивінський, В.О. Ігнат'єв, «Діагностика ізоляції електричних машин з використанням комутаційних процесів», Журнал —«Енергетика: економіка, технології, екологія», №3, 2021, Київ, с. 70-77

10. Васьковський Ю.М., Гайдено Ю.А. Дослідження електромагнітних процесів в синхронних машинах з постійними магнітами на основі коло-польових математичних моделей // Технічна електродинаміка №2, 2018, с. 47 – 54.

11. Васьковський Ю.М., Коваленко М.А. Математичне моделювання електричних машин методами теорії поля. Київ, 2025, 257 с.

12. Гайдено Ю.А, Жовнуватий О.С. Вентильний реактивний двигун для приводу вентилятора з покращеним законом керування // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: «Політехніка», 2017. – С.261-263.

13. Гайдено Ю.А., Пелипенко К.О. Синхронний реактивний двигун для використання в системах вентиляції // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: «Політехніка», 2017. – С.264-267.

14. Гайдено Ю.А., Пелипенко К.О. Оцінка ефективності роботи синхронного реактивного двигуна при несиметричному живленні // Гідроенергетика України. – 2020. – №3-4. – С. 62-70.

15. Гайдено Ю. А., Чумак Є. С. Ефективність генерування ЕРС в синхронних машинах з постійними магнітами для різних типів роторів // Міжнародний науково-технічний журнал молодих вчених, аспірантів та студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: «Політехніка», 2020. – С.192-195.

16. Гайдено Ю.А, Герасименко Є.О. Вибір оптимального двигуна для приводу малопотужних квадрокоптерів // Міжнародний науково-технічний журнал молодих вчених, аспірантів та студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: «Політехніка», 2018. – С.359-362.

17. Електромашинний підсилювач поперечного поля потужністю 2 кВт / Реуцький М.О., Чамлай Г.Ю., Букань П.Є. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ". – Київ: «Політехніка». – 2024.

18. Коваленко М.А., О.В. Труханов Експериментальний стенд для випробування малопотужних вентильних двигунів // III Міжнародна науково-практична конференція "Теорія і практика сучасної науки, 8-9 червня 2018 р.". – Київ, 2018. С. 55-60.

19. Коваленко М.А., Самойленко О.О. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МАЛОПОТУЖНИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ // [Електронний ресурс]: 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. 340-342.

20. О.С. Перпелиця, Є.О. Тітов, М.А. Коваленко, В.А. Святненко Порівняння моделей малопотужного двигуна постійного струму з феррит барієвими магнітами та неодимовими магнітами / Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". - 2020. - с.239-242

21. Осідач Ю.В., Ткачук В.І. Основні розрахункові співвідношення вентильних реактивних двигунів // Електромеханіка. – Львів-Славськ, 1996. – С. 143–145.

22. Осідач Ю.В., Ткачук В.І. Порівняльний аналіз електромагнітного моменту колекторного і вентильного реактивного двигуна постійного струму // Електромеханіка. – Львів-Славськ, 1996. – С. 140–142.

23. Осідач Ю.В., Ткачук В.І., Мацарук О.Б. Особливості роботи і основні характеристики вентильного двигуна з зосередженими обмотками якоря // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – 1998. – № 347. – С. 124–130.

24. Ткачук В. Підсистема автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів // Технічна електродинаміка. – 1998. – С. 180–187.

25. Ткачук В.І., Білявський І.Є., Макачук О.В. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму: Монографія, Видавництво Львівської політехніки, Львів, 2011. – С. 8–9.
26. Ткачук В.І. Електромеханотроніка: Навч. посібник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2001. – С. 440.
27. Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Копчак Б.Л. Експериментальна верифікація на базі вентильних двигунів із двома незалежними виходами // Вісник Михайла Остроградського. – 2001. – Вип. 3(6), ч. 2. – С. 64–67.
28. Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Продивус В.М., Вайда Б.Р. Особливості теплового розрахунку електромеханічного перетворювача з явнополюсним статором і зовнішнім пасивним ротором // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2007. – № 587: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 94–100.
29. Ткачук В.І., Григоренко М.К. Автоматизована підсистема проектування ВРД з буферними енергіями // Новые решения в современных технологиях: Вестник ХПТУ. – 2000. – № 4. – С. 179–184.
30. Ткачук В.І., Копчак Б.Л. Використання вольт-амперних характеристик вентильного реактивного двигуна // Вісник Михайла Остроградського. – 2000. – № 3(14). – С. 168–171.
31. Ткачук В.І., Осідач Ю.В. Транзисторні комутатори з змінним накопичуванням енергії // Вісник Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – 1996. – № 301: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 115–122.
32. Чумак В.В., Коваленко М.А., Баженов В.А., Тимощук О.Л., Цивінський С.С. Математичне моделювання лінійного електромеханічного перетворювача енергії із постійними магнітами / Електромеханічні і енергозберігаючі системи № 1/2023 (60). - с. 71-77.

ДОДАТОК

BRUSHLESS ELECTRIC MOTORS: DESIGN, OPERATING PRINCIPLE, APPLICATION AREAS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Chamlai H.Y., magister; Tsyvinskyi S.S., Ph.D., associate professor, Geraskin O.A., Ph.D., associate professor

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Department of Electromechanics

Introduction. Modern electric drive technology is rapidly evolving due to the integration of power electronics and automated control systems. One of the key areas of this development is the use of brushless electric motors. A distinctive feature of such motors is the combination of the electromechanical part with a semiconductor converter, which allows flexible control of frequency, voltage, and phase currents. Unlike traditional asynchronous or synchronous machines, brushless motors are characterized by high efficiency, a wide speed control range, and the ability to be optimized for specific operating conditions [1, 2].

Objective. To study the design features, operating principles, and modern application areas of brushless electric motors, as well as to determine the prospects for their development in the context of digitalization and energy saving.

Materials and Research Results. Design and Operating Principle. The basic schematic of a brushless drive is shown in fig. 1.

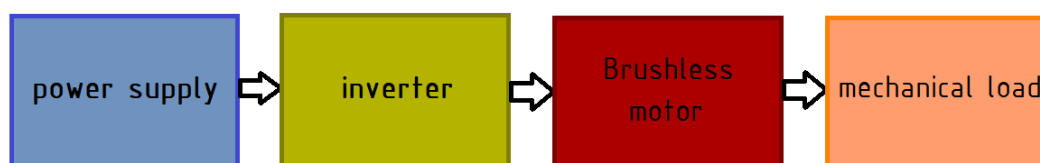


Figure 1 – Basic schematic of a brushless drive

A brushless drive generally consists of an electric machine (often a permanent magnet synchronous motor – see fig. 2a, or a switched reluctance motor – see fig. 2b) and a semiconductor inverter that acts as a switching interface between the power supply and the motor.

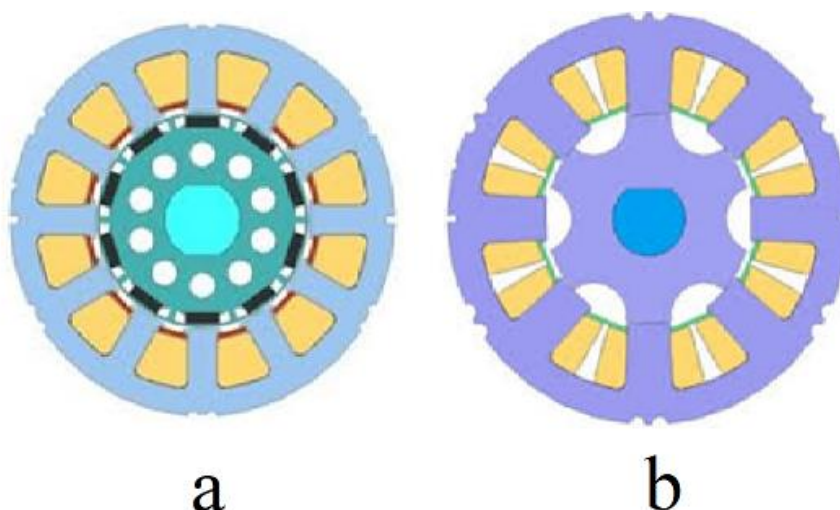


Figure 2 – Cross-section of a permanent magnet motor (a) and a reluctance motor (b)

This configuration allows for various control schemes – from simple pulse-width modulation to advanced model predictive control methods [3, 4].

Structurally, a brushless electric motor consists of a rotor and a stator, similar to conventional synchronous machines. However, its key difference is the absence of a mechanical commutator — its function is performed by an electronic inverter that synchronizes the currents in the stator windings according to the rotor position. The rotor position is determined using Hall sensors, an encoder, or sensorless algorithms that calculate position from back electromotive forces (EMF).

In most designs, the rotor uses permanent magnets (neodymium NdFeB or samarium-cobalt SmCo), placed on the surface or embedded inside the rotor (fig. 3). This design allows high torque in a compact size and reduces excitation losses. The stator windings are usually three-phase, with distributed or concentrated coil arrangements, optimizing the magnetic field.



Figure 3 – Brushless electric motor with permanent magnets

The operating principle is that the inverter converts the DC supply voltage into AC currents of the required frequency and phase, creating a rotating magnetic field in the stator. This field interacts with the rotor's magnetic field, generating an electromagnetic torque that drives the motor shaft.

Speed and torque control are achieved by changing the inverter's switching frequency or the amplitude of phase currents, providing a wide control range. Modern systems also employ vector control algorithms, enabling high positioning accuracy and smooth operation.

Multilevel inverters reduce harmonic distortions and improve motor rotation smoothness, which is particularly important for high-precision and high-speed drives [5].

Using such circuits together with permanent magnet motors ensures high energy efficiency and compact equipment [6].

Application Areas.

Due to their versatility, brushless motors are used in various fields, especially where traditional DC commutator motors were previously applied:

- Industry: electric drives for pumps, fans, compressors, and machine tools.
- Electric transport: modern locomotives and electric vehicles are equipped with traction brushless motors using multilevel control systems [7].
- Robotics and automated manufacturing systems: due to high dynamics and control accuracy, such motors have become the standard in industrial robots.
- Energy sector: integration with renewable energy sources involves using brushless machines for energy conversion and storage [8].

The areas of application of brushless machines are shown in fig. 4.

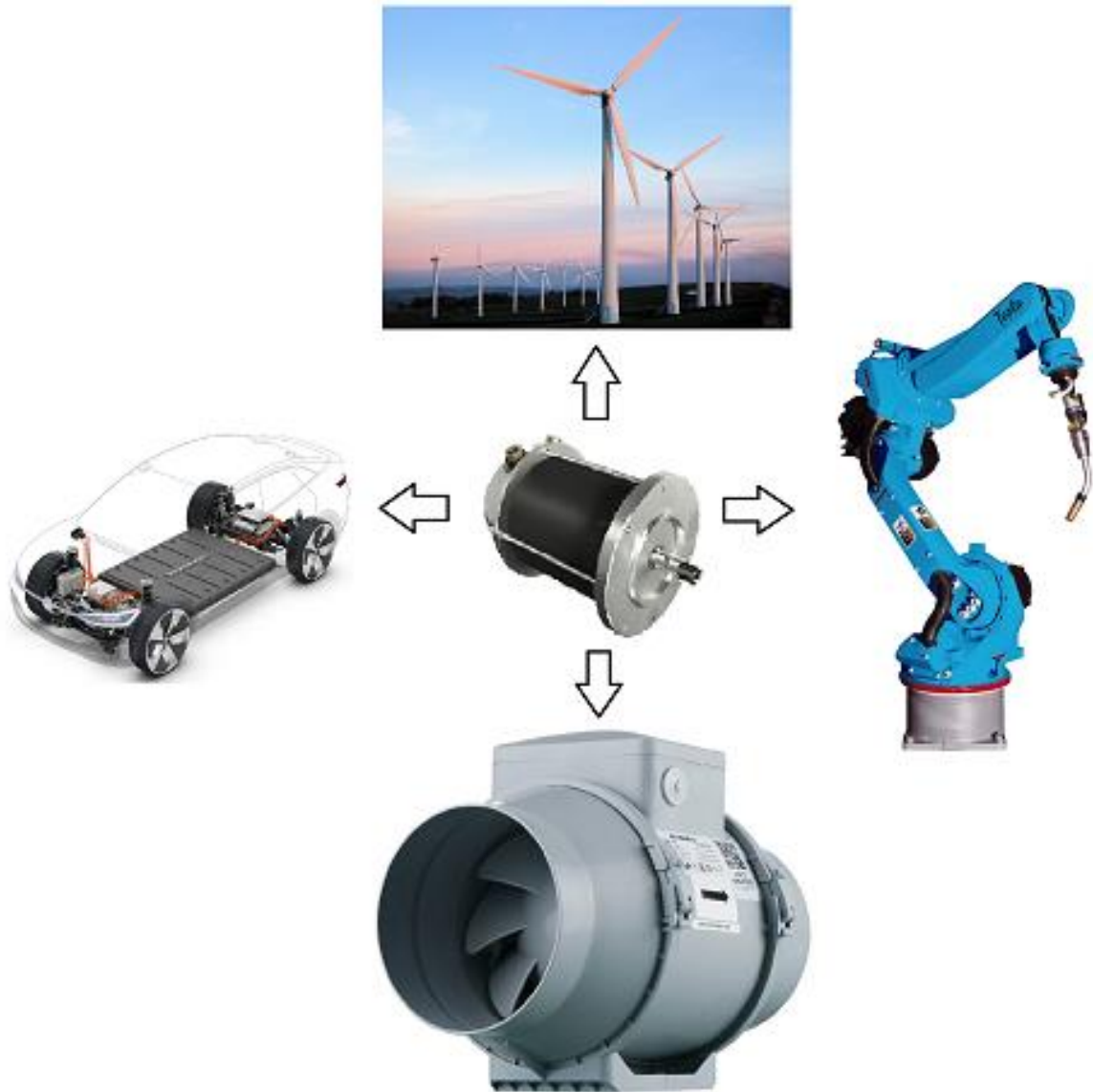


Figure 4 – Application areas of brushless machines

Control Systems and Challenges.

The main challenges in operating brushless motors are harmonic distortions, power electronics losses, and electromagnetic interference. Modern approaches — such as predictive control of current and torque — significantly reduce torque ripple and improve drive smoothness [8].

Another important direction is diagnostics and condition monitoring of inverter systems since power switch failure can lead to complete equipment shutdown.

Development Prospects.

The further development of brushless electric motors is associated with:

- new materials for permanent magnets and electrical steels,
- more efficient control algorithms considering energy efficiency and equipment lifespan,
- integration with renewable energy systems and smart grids.

Conclusions.

Brushless electric motors are among the key components of modern energy-efficient electric drive systems. They provide high reliability, efficiency, and adaptability, making them highly promising for future development.

References

1. Савченко, А. М. Репозитарій навчальних матеріалів з класифікації електроприводів. – Вінниця: ВНТУ, 2024. – Доступ: <https://ir.lib.vntu.edu.ua> (станом на 2025).
2. Дослідження вентильних реактивних двигунів: матеріали конференцій та наукових праць кафедри електромеханічних систем. – Львів: Львівська політехніка, 2019–2024 – pp. 55–74.
3. Geng, Q., Zhang, L., Xu, H. *Weightless Model Predictive Control for Permanent Magnet Synchronous Motor*. // *Applied Sciences (MDPI)*, Vol. 14, No. 3, 2024 – pp. 210–225. DOI: 10.3390/app14030210.
4. Mohamed, E.E.M., Rashed, M., Hassan, M. *T-Type Multilevel Inverter-Fed Interior PM Machine Drives: Analysis and Performance Evaluation*. // *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 1024, Springer, 2024 – pp. 155–170. DOI: 10.1007/978-3-031-56017-6_12.
5. Ramesh, T., Kumar, P., Singh, D. *Five-Level Inverter-Fed Model Predictive Current Control of Five-Phase PMSM Drive*. // *Electric Power Components and Systems (Taylor & Francis)*, Vol. 52, No. 4, 2024 – pp. 412–426. DOI: 10.1080/15325008.2024.2416327.
6. Матеріали конференцій КПІ та ХПІ (2019–2023) щодо модернізації тягових електроприводів. // Збірник наукових праць «Електромеханічні системи автоматизації», Вип. 32, 2023 – pp. 20–35.
7. Sardar, M.U., Akhtar, S., Ahmad, I., et al. *Inverter-Fed Motor Drive System: A Systematic Analysis of Condition Monitoring and Practical Diagnostic Techniques*. // *Energies*, Vol. 16, No. 21, 2023 – pp. 1–22. DOI: 10.3390/en16217129.
8. Gao, J. *Model Predictive Control of Permanent Magnet Machines*. – Hoboken: Wiley, 2021. – 312 p. ISBN 978-1-119-71712-9.

ЕЛЕКТРОМАШИННИЙ ПІДСИЛЮВАЧ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ ПОТУЖНІСТЮ 2 кВт

Реуцький М.О., к.т.н., доцент, Букань П.Є., Чамлай Г.Ю., магістранти
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

Вступ. У вирішенні проблеми автоматизації електромеханічних комплексів ключова роль належить електрифікованим системам автоматичного регулювання, що використовуються як у промислових, так і в енергетичних установках. Одним із основних елементів системи автоматичного регулювання є підсилювачі, які дозволяють за допомогою малих потужностей керувати великими потужностями електричних машин, і не чутливі до зміни кліматичних та механічних впливів [1].

В якості підсилювачів застосовують електромашинні, магнітні та напівпровідникові підсилювачі, а також електронні. Зі стрімким розвитком різноманітних систем автоматичного регулювання великого поширення набули електромашинні підсилювачі (ЕМП). Завдяки великому коефіцієнту підсилення, швидкодії, високій перевантажувальній здатності та хорошим техніко-економічним і експлуатаційним показникам, ЕМП широко використовують у силовому автоматизованому електроприводі та багатьох енергетичних установках [2].

Мета роботи. Розібратися в принципі дії, будові, та характеристиках електромашинного підсилювача. Виконати розрахунок електромашинного підсилювача поперечного поля, який характеризується високим коефіцієнтом підсилення сигналу керування для використання в автоматизованих приводах.

Матеріали та результати досліджень. Об'єктом дослідження є Електромашинний підсилювач поперечного поля потужністю 2 кВт. ЕМП складається з генератора та приводного двигуна.

Основні параметри та характеристики генератора і двигуна приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри та характеристики генератора і двигуна

Номер	Назва параметру та одиниці виміру	Значення і характеристика
1.	Номінальна потужність генератора, кВт, не менше	2,0
2.	Номінальна вхідна потужність обмоток керування генератора, Вт, не більше	4,0
3.	Номінальна вихідна напруга генератора, В	95,0
4.	Номінальний струм навантаження генератора, А	21,5

Таблиця 1 – Параметри та характеристики генератора і двигуна (продовження)

Номер	Назва параметру та одиниці виміру	Значення і характеристика
5.	Номінальний струм навантаження генератора, А	21,5
6.	Номінальна напруга двигуна, В	27
7.	Номінальний споживаний струм двигуна, А, не більше	145
8.	Номінальна частота обертання двигуна, об/хв, не більше	6000±600
9.	Коефіцієнт корисної дії (К.К.Д.) двигуна, %, не менше	52
10.	Вихідна напруга в режимі форсування генератора, В	131,5
11.	Струм навантаження в режимі форсування вихідної напруги, А	21
12.	Вхідна потужність обмоток керування в режимі форсування вихідної напруги двигуна, Вт, не більше	30
13.	Режим роботи підсилювача	Тривалий, S1 по ДСТУ 183–74
14.	Виконання підсилювача	Захищений, ступінь захисту IP20 по ДСТУ 17494–96
15.	Спосіб охолодження	Повітряне примусове – IC01 по ДСТУ 20459–87
16.	Робоче положення підсилювача	Будь-яке (при вертикальному положенні вентилятором вниз)
17.	Маса підсилювача, кг, не більше	64
18.	Габаритні розміри підсилювача, мм	Ø192×619

Об'єктом дослідження є приводна частина ЕМП – двигун зі збудженням від постійних магнітів ЮНДК 35Т5БА, потужністю 4 кВт, на напругу 27 В, з частотою обертання 6000 об/хв.

Двигун складається з загального з електромашинним підсилювачем корпусу, виконаного зі сталеві труби, марка сталі Ст.10, з загального якоря з обмотками, системи збудження, колектора та щіток. Хвильова обмотка якоря вкладається в пази.

Якір обертається в магнітному полі збудження (рис. 1). На валу насаджено сердечник з електротехнічної сталі марки 2411, в пазах сердечника розміщена обмотка.

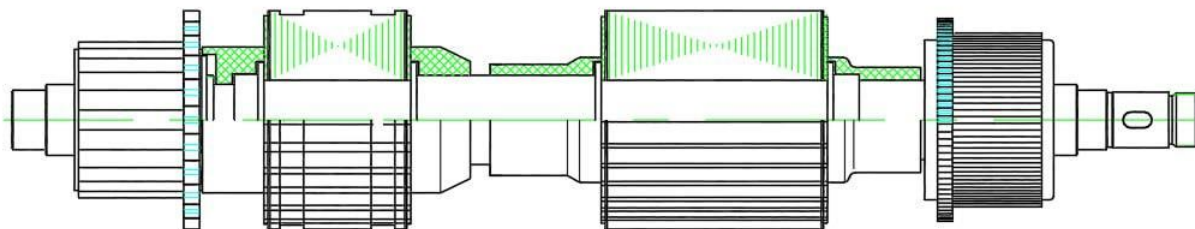


Рисунок 1 – Якір електромашинного підсилювача

Обмотка якоря з мідного дроту вкладається у пази, які ізолювані ізоляцією марки синтофлекс класу нагрівостійкості F – 155°C. Хвильова обмотка якоря з'єднана з колектором.

Колектор складається з мідних пластин, ізолюваних одна від одної міканітовою ізоляцією (рис. 2).

Графітові щітки притискаються до колектора з певним зусиллям і є струмовідводом до обмотки якоря.

Обмотки якоря виготовлені з прямокутного мідного дроту марки ПСЛДКТ 2.8*5.6 класу нагрівостійкості F – 155°C.

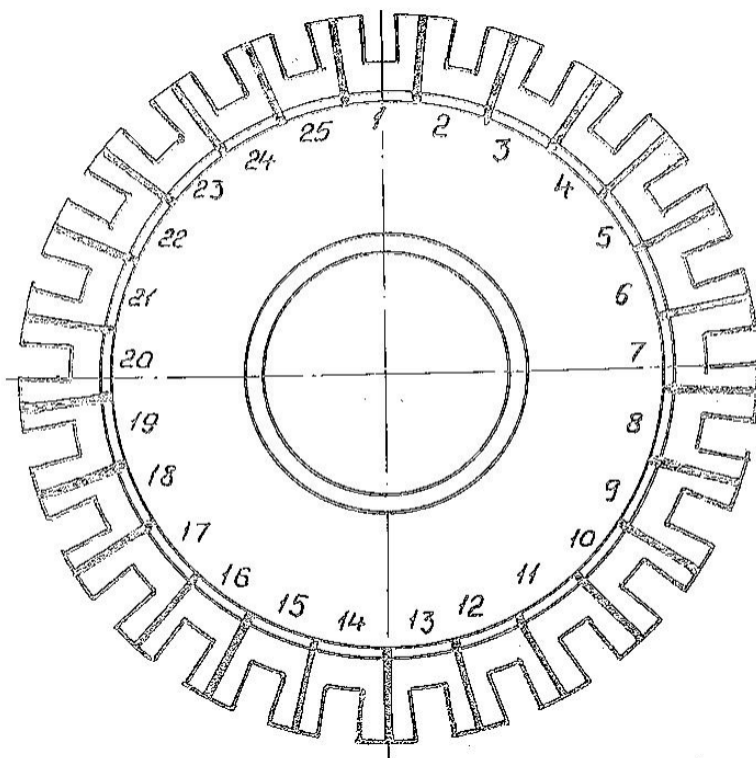


Рисунок 2 – Схема розташування пластин колектора

В модернізованому підсилювачі використовуються постійні магніти замість електромагнітного збудження.

Трудомісткість виготовлення полюсів для електромашинного підсилювача з електромагнітним збудженням включає виготовлення чотирьох шихтованих осердь полюсів і чотирьох полюсних котушок. Постійні магніти ЮНДК 35Т5БА можна замовляти в розмір, необхідний для встановлення в машину. Постійні магніти кріпляться до корпусу за допомогою сталевих черевиків – концентраторів магнітного потоку. Для намагнічування полюсів використовується легка намагнічувальна обмотка.

Поліпшення були досягнуті заміною електромагнітного збудження на збудження від постійних магнітів. Застосування постійних магнітів для системи збудження приводного двигуна виключає можливість аварійних режимів у ланцюзі збудження. У разі обриву обмотки збудження на холостому ходу за малого навантаження двигун іде в рознос, а за номінального навантаження внаслідок зупинки під напругою виникає режим короткого замикання [3].

В конструктивному відношенні ЕМП поперечного поля являє собою генератор постійного струму з розщепленими полюсами та додатковим комплектом щіток на колекторі. При розщепленій системі полюсів кожен північний полюс поділяється на два часткових північних N, N (n, n), кожен південний – на два часткових південних S, S (s, s). Така система полюсів забезпечує однакову магнітну провідність як по повздовжній, так і по поперечним осях машини. Обмотка якоря виконується з діаметральним чи трохи скороченим кроком. Загальний вид ЕМП наведено на рис. 3.

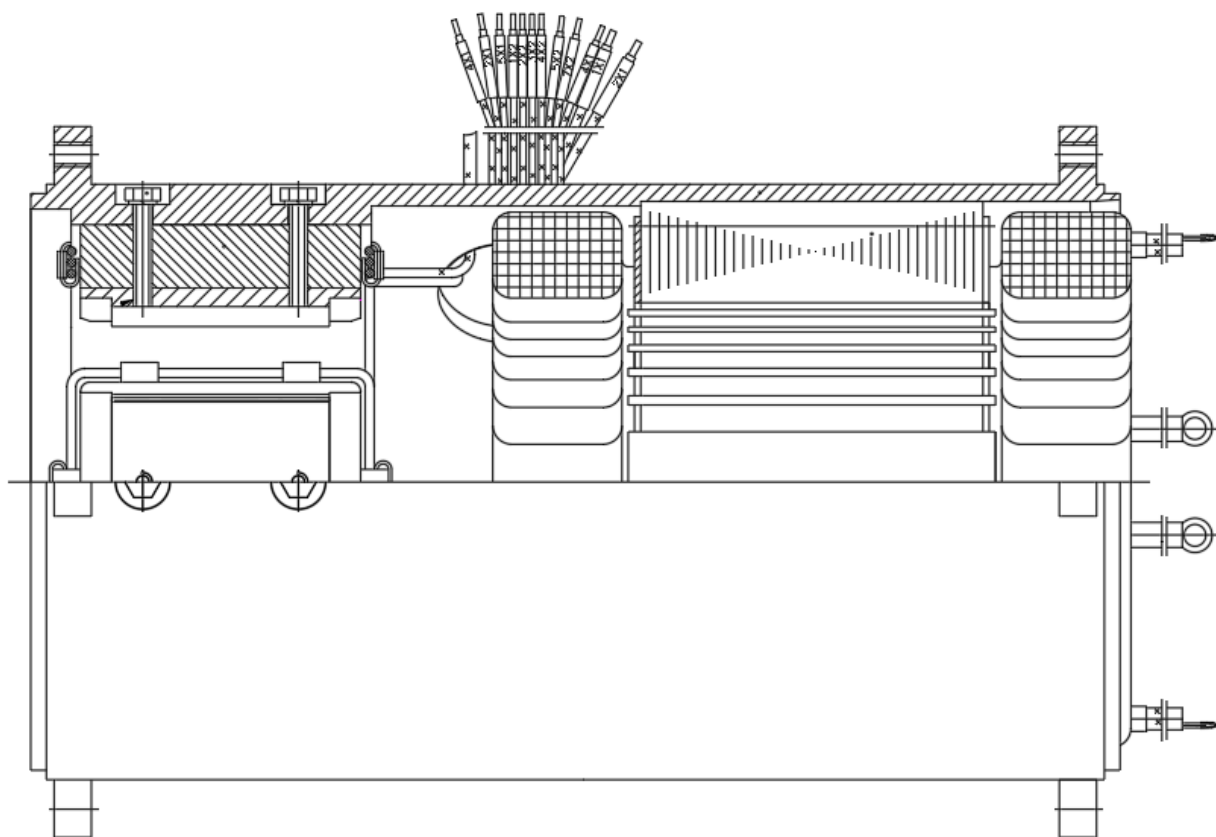


Рисунок 3 – Загальний вид статора ЕМП

Ескіз магнітопроводу з вказівками на розташування обмоток показаний на рис. 4.

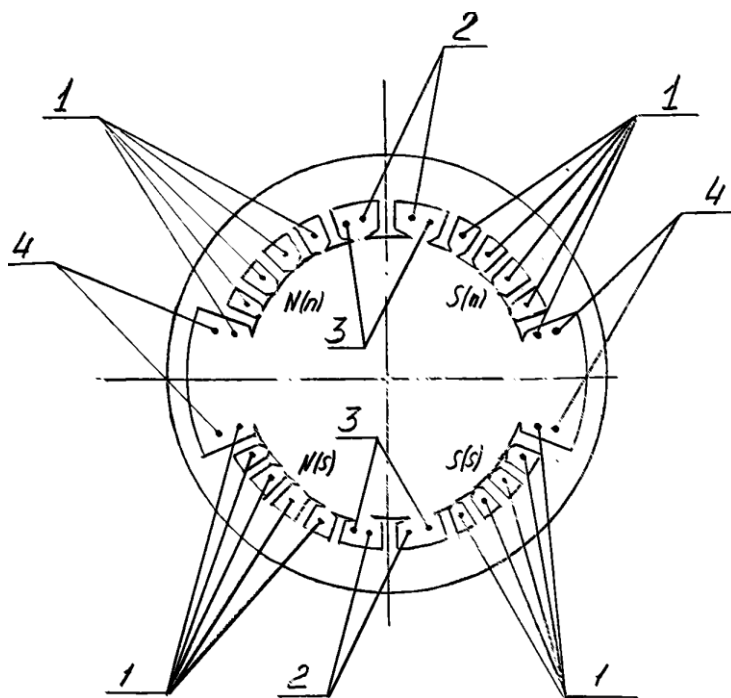


Рисунок 4 – Ескіз магнітопроводу з вказівками на розташування обмоток: 1 – компенсаційна обмотка; 2 – обмотка додаткових полюсів; 3 – поперечна обмотка; 4 – обмотка керування.

Сердечник якоря набирається зі штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. Листи насаджуються безпосередньо на вал. У пази на зовнішній поверхні якоря укладаються котушки обмотки якоря. Лобові частини обмотки, які виступають з кожного боку з сердечника якоря, мають вигляд циліндричного кільця і своїми внутрішніми поверхнями спираються на обмоткотримачі, а на зовнішній поверхні кріпляться бандажами.

Обмотка якоря приєднується до колектора. Він складається з мідних пластин, ізолюваних одна від одної міканітовими прокладками товщиною близько 1 мм. Пластини мають трапецеїдальний переріз і разом із прокладками складають кільце, яке скріплюється за допомогою натискних фланців, стягнутих стяжними болтами. Від натискних фланців пластини колектора ізолюються міканітовими колекторними манжетами. Зібраний колектор кріпиться на валу за допомогою шпонки. До кожної пластини колектора приєднуються з'єднувальні провідники «півники» – від обмотки якоря. Щітковий апарат виконується з двома парами щіток, встановленими на одній траверсі під кутом 90° . Застосовуються щітки марки ЕГ–8 $b_{щ} \times L_{щ} = 7,8 \times 8$ мм.

Дані розрахунку зовнішньої характеристики приведені в табл. 2, зовнішня характеристика представлена на рис. 5.

Таблиця 2 – Дані розрахунку зовнішньої характеристики

№	Позначення величини	$\Delta U_3, B$		
		39,45	8,30	0,00
1	$\sum R_3(O_M)$	2,59	0,55	0,00
2	$R_{ЯК} (O_M)$	2,05	0,00	-0,55
3	Δk_k	-0,00582	0,00	0,00155
4	k_k	0,99418	1,00	1,00155
5	Δk_{III}	0,24851	0,25581	0,25776
6	k_{III}	0,75	0,74	0,74
7	$R_{шк} (O_M)$	0,55	0,53	0,52
8	$I_{шк} (A)$	3,78	3,89	3,92
9	$U_3(B)$	105,37	136,52	144,82

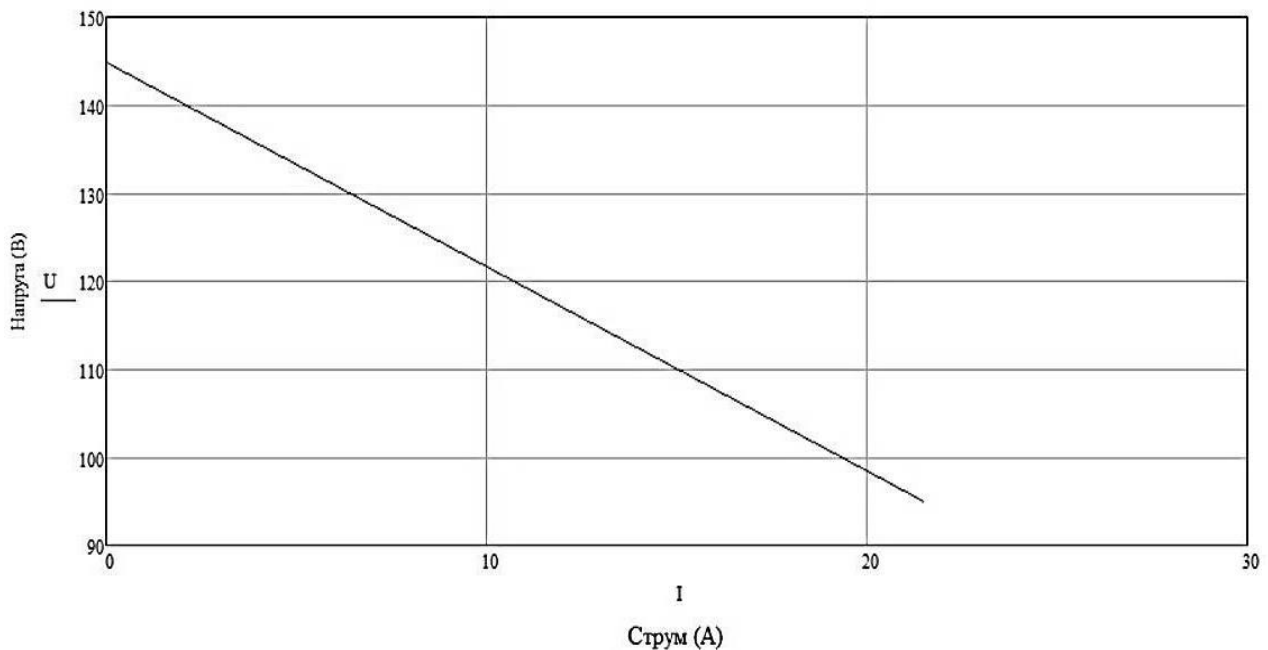


Рисунок 5 – Зовнішня характеристика ЕМП

Висновок. Представлені результати дослідження електромашинного підсилювача поперечного поля потужністю 2 кВт, розробленого для автоматизованих електроприводів і промислових систем регулювання. Основна увага приділена вивченню принципу дії, будові та характеристикам модернізованого підсилювача, який, завдяки використанню збудження від постійних магнітів замість електромагнітного збудження, забезпечує низку

переваг. Зокрема, така модернізація дозволяє підвищити надійність системи, виключаючи ризик аварійних режимів у ланцюзі збудження, а також сприяє оптимізації технічних показників.

Підсилювач забезпечує високий коефіцієнт підсилення сигналу керування, швидкодію, і стабільність роботи в різних умовах, що робить його ефективним для застосування в енергетичних установках. У роботі детально описано конструкцію підсилювача, а також проведено розрахунки, що підтверджують його переваги у тривалих режимах роботи. Завдяки конструктивним особливостям і покращеним експлуатаційним властивостям, підсилювач можна використовувати в автоматизованих електроприводах і промислових автоматизованих системах, де потрібна висока надійність і точність.

Перелік посилань

1. Черданцев Н.А., Пояркова М.Ф. Генератори та двигуни постійного струму. Л.: Енергія, 1972. 543 с.
2. Горяїнов Ф.А. Електромашинні підсилювачі. Л.: Енергія, 1970. 500 с.
3. Постійні магніти: довідник / під ред. д.т.н., проф. Ю.М. Пятина. 1980.