

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

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ**

**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ В.Ф. Шинкаренко

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
на тему: «Дослідження двигунів постійного струму з неявнополюсним статором для  
стартерів великовантажних транспортних засобів»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕМ-71мн  
Худотеплий Роман Михайлович \_\_\_\_\_

Керівник:

професор, д.т.н.  
Васьковський Юрій Миколайович \_\_\_\_\_

Рецензент:

професор, д.т.н. Островерхов Микола Якович \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет електроенерготехніки та автоматики**  
**Кафедра електромеханіки**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою магістра

Спеціальність (спеціалізація) 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Електричні машини і апарати»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.Ф.Шинкаренко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Худотеплому Роману Михайловичу**

1. Тема дисертації: Дослідження двигунів постійного струму з неявнополюсним статором для стартерів великовантажних транспортних засобів \_\_\_\_\_

науковий керівник дисертації проф. д.т.н. Васьковський Юрій Миколайович,  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 21.03.2019, № 941-С

2. Термін подання студентом дисертації 16.05.2019.

3. Об'єкт дослідження: двигун постійного струму з неявнополюсним статором

4. Предмет дослідження: пускові, масо-габаритні і вагові характеристики двигуна постійного струму.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Аналіз літературних джерел по темі досліджень, 2. Електромагнітні розрахунки, 3. Математичне моделювання електромагнітних полів, 4. Математичне моделювання пуску двигуна, 5. Розробка стартап-проекту, 6. Розробка висновків та рекомендацій.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: Презентація з результатами досліджень та розробок.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 3 статті в виданнях НТУУ «КПІ», у тому числі 2 статті англійською мовою.

#### 8. Консультанти розділів дисертації

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

9. Дата видачі завдання 01.09.2017р.

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації                                                                        | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------|
| 1.    | Аналіз літературних джерел по темі досліджень. Обґрунтування ідеї удосконалення ДПС для стартерів транспортних засобів | 01.09.2017 – 31.12.2017                          |          |
| 2.    | Електромагнітний розрахунок явнополюсного ДПС                                                                          | 02.01.2018 – 31.03.2018                          |          |
| 3.    | Електромагнітний розрахунок неявнополюсного ДПС                                                                        | 01.04.2018 – 30.06.2018                          |          |
| 4.    | Порівняльний аналіз характеристик ДПС явнополюсної та неявнополюсної конструкції                                       | 01.07.2018 – 30.09.2018                          |          |
| 5.    | Математичне моделювання електромагнітних полів в активній зоні ДПС в системі Comsol                                    | 01.10.2018 – 31.01.2019                          |          |
| 6.    | Моделювання процесу пуску ДПС в системі Matlab Simulink                                                                | 01.02.2019 – 31.03.2019                          |          |
| 7.    | Розробка стартап-проекту впровадження результатів досліджень                                                           | 01.04.2019 – 30.04.2019                          |          |
| 8.    | Оформленні текстової та графічної частини магістерської дисертації                                                     | 01.05.2019 – 16.05.2019                          |          |

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Худотеплий Р.М.

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_ (підпис)

проф. д.т.н. Васьковський Ю.М.

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки та ілюстративних матеріалів (електронна презентація). Пояснювальна записка виконана на 104 сторінках формату А4 і містить в собі 42 рисунки, 9 таблиць та 28 джерел використаної літератури. Графічна частина містить 16 слайдів презентації з графіками та таблицями, які візуалізують результати дослідження.

Технічне рішення щодо удосконалення статорів двигунів постійного струму (ДПС) послідовного збудження для автомобілів полягає в використанні неявнополюсної конструкції статора, на відміну від традиційної явнополюсної конструкції. Таке рішення забезпечує економію активних матеріалів, зокрема міді обмотки статора, та покращення експлуатаційних показників стартерів автомобілів.

Об'єктом дослідження є двигун постійного струму з послідовним збудженням для стартерів вантажних автомобілів.

Предметом дослідження є пускові, масо-габаритні параметри і характеристики ДПС.

Метою роботи є обґрунтування технічного рішення щодо використання неявнополюсної конструкції статора ДПС, та порівняльний аналіз ДПС з неявнополюсною та явнополюсною конструкцією.

Проаналізовано особливості роботи, характеристики ДПС з неявнополюсним статором та проведено порівняльний аналіз неявнополюсної та явнополюсної конструкції. За допомогою програми MathCad виконано електромагнітні розрахунки. За допомогою програми COMSOL Multiphysics досліджено особливості розподілу магнітного поля в активних зонах двигунів. За допомогою MATLAB-simulink створено математичну модель двигунів та досліджено їх пускові характеристики.

Ключові слова: двигун постійного струму, явнополюсна конструкція статора, неявнополюсна конструкція статора, магнітне поле, пускові режими.

## **ABSTRACT**

The master's thesis consists of an explanatory note and illustrative materials (posters and electronic presentation). The explanatory note is written on 104 pages of A4 format and contains 42 pictures, 9 tables and 28 cited sources of literature. The graphic part contains 16 presentation slides with charts and tables that exemplify the results of the study.

The technical solution for the improvement of Direct current motors (DCM) of sequential for motor stators presumes usage of a non-salient pole stator structure, in contrast to the traditional salient pole construction. This particular solution economizes the usage conserves the amount of active materials used (in production), such as copper coil used for the stator (winding), and enhances the performance of car starters.

The object of the study is a DC motor with sequential for truck starters.

The subject of the thesis is launch, mass-dimensional and weight characteristics of the DCM.

The purpose of the work is to justify the technical solution of the employment of a salient pole construction of the DCM stator, and a comparative analysis of the DCM with a non-salient pole construction.

The work includes the analysis of the features of the performance, the characteristics of the salient pole stator DCM, and a comparative examination of the salient and a non-salient constructions. The electromagnetic calculations were performed using MathCad (program). COMSOL Multiphysics program aided in the investigation of the features of the magnetic field distribution in the active engine regions. Using MATLAB-simulink, a mathematical model of engines was created and their launch characteristics were examined.

Keywords: Direct current motor, salient pole stator construction, non-salient pole stator construction, magnetic field, launching schedule modes.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>РЕФЕРАТ .....</b>                                                                                                                                   | <b>4</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                                                                                   | <b>5</b>  |
| <b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....</b>                                                                                                                 | <b>8</b>  |
| <b>ВСТУП.....</b>                                                                                                                                      | <b>9</b>  |
| <b>1. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ<br/>СТАРТЕРІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....</b>                                             | <b>13</b> |
| 1.1 Огляд проблеми створення стартерів автомобілів. Ринок існуючих стартерів<br>та їх основні технічні характеристики .....                            | 13        |
| 1.2 Двигун постійного струму послідовного збудження – основний вузол<br>стартерів автомобілів .....                                                    | 15        |
| 1.3 Особливості характеристик двигунів постійного струму, які<br>використовуються в стартерах транспортних засобів .....                               | 23        |
| 1.4 Удосконалення ДПС для стартерів шляхом застосування неявнополюсної<br>конструкції статора.....                                                     | 24        |
| <b>2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ РОЗРАХУНКИ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ<br/>ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ .....</b>                                                       | <b>32</b> |
| 2.1 Електромагнітний розрахунок двигуна постійного струму з явнополюсною<br>конструкцією статора для стартера великовантажного автомобіля [10] .....   | 32        |
| 2.2 Електромагнітний розрахунок двигуна постійного струму з неявнополюсною<br>конструкцією статора для стартера великовантажного автомобіля [10] ..... | 54        |
| 2.3 Порівняння розрахованих двигунів .....                                                                                                             | 74        |
| 2.4 Висновки до розділу .....                                                                                                                          | 74        |
| <b>3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНИХ ПОЛІВ В АКТИВНІЙ ЗОНІ ДПС ..</b>                                                                                 | <b>75</b> |
| 3.1 Побудова польової математичної моделі .....                                                                                                        | 75        |

|                                                                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2 Розподіл індукції та векторного магнітного потенціалу по активній зоні<br>явнополюсного двигуна .....   | 77         |
| 3.3 Розподіл індукції та векторного магнітного потенціалу по активній зоні<br>неявнополюсного двигуна ..... | 81         |
| 3.3 Висновки до розділу .....                                                                               | 83         |
| <b>4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПУСКУ ДПС В СКЛАДІ СТАРТЕРУ<br/>АВТОМОБІЛЯ.....</b>                                | <b>84</b>  |
| 4.1 Побудова математичної моделі.....                                                                       | 84         |
| 4.2 Результати моделювання пуску .....                                                                      | 90         |
| 4.3 Висновки по розділу .....                                                                               | 92         |
| <b>5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....</b>                                                                     | <b>93</b>  |
| 5.1 Опис роботи двигуна постійного струму в складі стартеру. Недоліки .....                                 | 93         |
| 5.2 Опис ідеї стартап-проекту .....                                                                         | 93         |
| 5.3 Технологічний аудит проекту .....                                                                       | 95         |
| 5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....                                                | 95         |
| 5.5 Розроблення ринкової стратегії проекту .....                                                            | 98         |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>                                                                                        | <b>101</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>                                                                 | <b>103</b> |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕМ – електрична машина;

МПС – машина постійного струму;

ЕМПЕ – електромеханічний перетворювач енергії;

ЕРС – електрорушійна сила;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ХХ – холостий хід;

КЗ – коротке замикання;

МРС – магніторушійна сила;

ДПС – двигун постійного струму;

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання.



## ВСТУП

**Актуальність проблеми.** Стартер автомобіля призначений для запуску двигуна внутрішнього згорання. На даний час кількість виготовлених та встановлених на автомобілях, у тому числі великовантажних, стартерів сягає сотні мільйонів екземплярів – кожен автомобіль оснащується стартером. У даний час активно розробляються електромобілі, які не мають в своєму складі стартерів, а приводяться в рух виключно двигунами змінного струму, що живиться через перетворювач частоти від акумуляторної батареї. Але такі приводи використовуються здебільше для легких транспортних засобів. Для важких транспортних засобів використання двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) поки що не має альтернативи, оскільки ДВЗ має велику потужність, легкість поповнення запасів палива, тощо. Проблема покращення характеристик двигунів постійного струму (ДПС), що входять до складу стартерів великовантажних транспортних засобів, буде залишатися актуальною і надалі, оскільки такі транспортні засоби, на відміну від легкових, не можуть ефективно працювати на тягових двигунах змінного струму, що живляться через перетворювач частоти від акумуляторних батарей і не потребують стартера, оскільки час роботи, час заряду та масо-габаритні показники сучасних акумуляторних батарей не досягли прийнятних значень.

З урахуванням сучасних вимог щодо масо-габаритних показників стартерів, збільшення надійності їх функціонування актуальною залишається проблема подальшого удосконалення конструкції та оптимізації параметрів існуючих стартерів. Оскільки привод стартера живиться від акумуляторної батареї, яка розташована на борту транспортного засобу, то в складі стартеру використовуються двигуни постійного струму. Тому удосконалення конструкції стартера в значній мірі пов'язано з удосконаленням ДПС. Двигун стартера працює в короткочасному режимі до моменту запуску ДВЗ і надалі відключається. Використання інших типів приводу, наприклад асинхронного двигуна з перетворювачем частоти, є недоцільним, і тому застосування двигунів постійного струму залишається актуальним для подальших розробок транспортних засобів. Актуальною є проблема зменшення витрат

коштовних активних матеріалів, зокрема міді обмоток, без втрат функціональної надійності стартерів. Це, з урахуванням великих обсягів виробництва стартерів для великовантажних транспортних засобів, призведе до значної економії матеріальних ресурсів і відповідних техніко-економічних ефектів.

Існуючий на даний час ринок стартерів дуже великий, починаючи від електричних машин малої потужності для легкових автомобілів, наприклад АТЕК-2110 потужністю 1,5кВт і закінчуючи стартерами для вантажних автомобілів марки КрАЗ, МАЗ, тощо, наприклад типу СТ-103 потужністю 10кВт або Delco MT39 – виробництво Сполучених Штатів Америки (рисунок 1.1). [26]

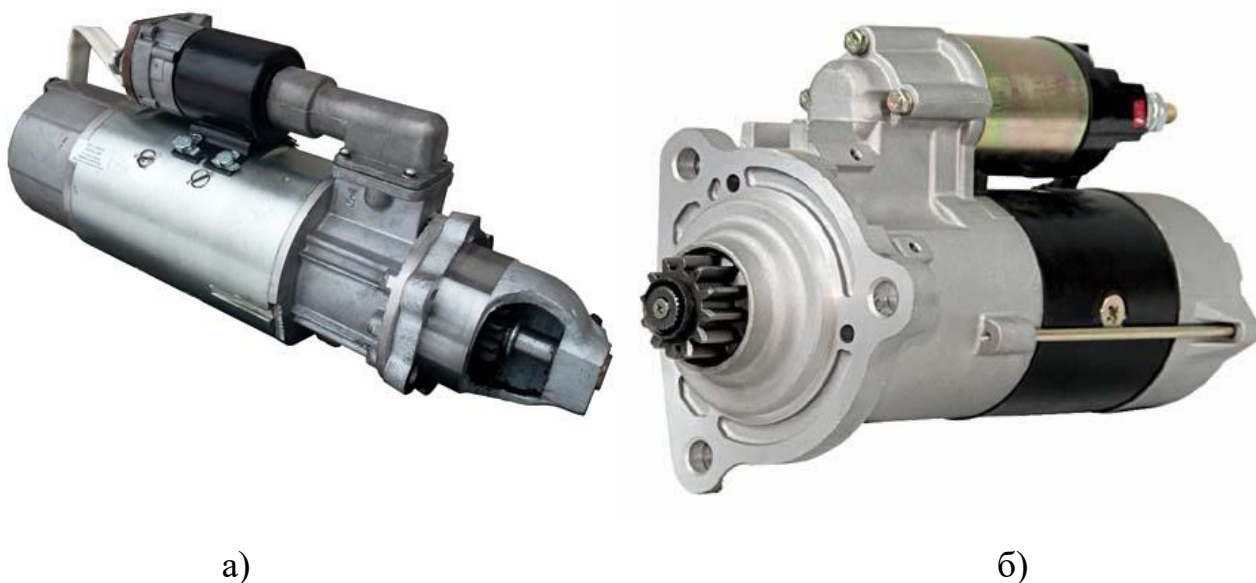


Рисунок 1.1 – а) стартер марки СТ-103; б) стартер марки Delco MT39

Серед двигунів постійного струму найкращі пускові характеристики має ДПС послідовного збудження, який і використовується в складі стартера.

У даній роботі удосконалення двигуна постійного струму послідовного збудження відбувається за рахунок використання неявнополюсної конструкції статора, яка дозволяє суттєво зменшити витрати активних матеріалів і масо-габаритні показники. З урахуванням великої кількості стартерів, що виготовляються на даний час у світі, сумарна економія активних матеріалів і відповідних коштів буде дуже суттєвою.

**Мета дослідження.** Метою роботи є дослідження та розробка технічного рішення ДПС послідовного збудження з неявнополюсним статором, для використання в складі стартерів великовантажних автомобілів, та порівняльний аналіз характеристик такого ДПС з характеристиками ДПС традиційної явнополюсної конструкції. Досягнення поставленої мети сприяє вирішенню проблеми ресурсозбереження при масовому виробництві стартерів автомобілів.

**Задачі дослідження.** Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналітичний огляд проблеми створення приводів стартерів великовантажних автомобілів;
- обґрунтування способу збудження ДПС з неявнополюсним статором;
- вибір технічних даних об'єкту дослідження;
- виконання електромагнітних розрахунків ДПС з явно- і неявнополюсними конструкціями статора;
- дослідження і оптимізація розподілу електромагнітного поля в активній зоні ДПС.
- порівняльний аналіз характеристик ДПС;

**Об'єкт дослідження** – ДПС послідовного збудження з неявнополюсною конструкцією статора.

**Предмет дослідження** – пускові, масо-габаритні параметри і характеристики ДПС послідовного збудження з неявнополюсною конструкцією статора.

**Методи дослідження** – математичне моделювання електромагнітних полів в середовищі COMSOL Multiphysics, розрахунки параметрів та характеристик двигуна в середовищі MathCad, математичне моделювання процесу пуску ДПС в середовищі MATLAB-simulink.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в обґрунтуванні принципу побудови та оптимального технічного рішення альтернативної конструкції двигуна постійного струму з неявнополюсною конструкцією статора для стартерів транспортних засобів.

Покращені масо-габаритних показників у порівнянні з традиційною явнополюсною конструкцією ДПС.

**Практичне застосування одержаних результатів** полягає в розробці технічних пропозицій для використання та широкого впровадження ДПС різної потужності з неявнополюсною конструкцією статора в стартери, призначені для важких транспортних засобів.

**Публікації** – 3 статті в виданнях НТУУ «КПІ імені І. Сікорського», у тому числі 2 статті англійською мовою.

# **1. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ СТАРТЕРІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

## **1.1 Огляд проблеми створення стартерів автомобілів. Ринок існуючих стартерів та їх основні технічні характеристики**

Як видно навіть із самої назви, стартер автомобіля необхідний для запуску двигуна внутрішнього згорання. Для цього він надає колінчастому валу необхідну первинну частоту обертання. Стартер – невід'ємна частина електричного обладнання будь-якого сучасного транспортного засобу. Конструкція стартера вдає із себе двигун постійного струму, зазвичай, з чотирма полюсами, який живиться від батареї акумулятора.

Початок минулого століття в автомобільній індустрії ознаменовується марними спробами автомобілебудівників в заміні заводної рукоятки на щось більш просте і зручне. Експерименти одних базувалися на використанні стисненого повітря, що накопичувався в спеціальному резервуарі, під час роботи мотора. Інші ж покладали надії на використання вихлопних газів. А треті взагалі намагалися використовувати механізми, що конструктивно нагадують годинник, де головну роль відігравала спіральна пружина. Електричний пуск на той час був на грані фантастики і не сприймався автомобільними конструкторами, бо розміри електромоторів могли перевищувати сам двигун, який потрібно було їм заводити.

Чарльз Кеттерінг, молодий інженер з Огайо, придумав електричний двигун для касових апаратів. Та ж ідея була використана Кеттерінгом і в стартерах автомобіля. Він зібрав в лабораторії машинобудування General Motors малогабаритний і слабкий моторчик і в 1912 році привіз його в Детройт, де він вперше був встановлений на автомобіль. Електромотор Кеттерінга зачіпався з зубцями маховика, а не з колінвалом двигуна, це суттєво знизило вимоги до його потужності. А проблема перегріву була вирішена сама собою. За той час, що двигун запускався, електромотор просто не встигав сильно нагріватися.

Потужні стартери використовуються на великовантажних автомобілях БелАЗ, MAN, МАЗ, КрАЗ, а також на транспортних засобах спеціального та військового призначення. Потужність таких ДПС лежить в діапазоні 7 ... 10 кВт, при живленні від акумуляторної батареї напругою 24 В та при швидкості обертання валу від 1000 об\хв до 2000 об\хв.

В таблиці 1.1 наведено марки та характеристики стартерів для вантажівок КрАЗ, які використовуються у даний час. [26]

Таблиця 1.1

| Модель              | Потужність         | Напруга | Кількість обертів | Момент | Маса    | Габарити ДхВхШ |
|---------------------|--------------------|---------|-------------------|--------|---------|----------------|
| СТ142Д              | 7400 Вт            | 24 В    | 1000 - 1300 об\хв | 16 Н*м | 26 кг   | Дст=135 мм     |
| 5432.3708           | 9000 Вт            | 24 В    | 1000 об\хв        | 16 Н*м | 12 кг   | 470х220х170    |
| СТ-25               | 8200 Вт<br>5,1 кВт | 24 В    | 1000 об\хв        | 16 Н*м | 29 кг   | 500х220х150    |
| 2501.3708           | 9100 Вт<br>4.8 кВт | 24 В    | 1000 об\хв        | 16 Н*м | 28.2 кг | 500х220х150    |
| 2501.3708-40        | 9300 Вт            | 24 В    | 1000 - 1300 об\хв | 16 Н*м | 26 кг   | 500х220х150    |
| Delco Remy<br>39MT  | 9000 Вт            | 24 В    | 1500 об\хв        |        | 16 кг   | 300х250х180    |
| СТ103А              | 8200 Вт<br>5 кВт   | 24 В    | 1200 об\хв        | 16 Н*м | 29 кг   | Дст=150 мм     |
| CASE<br>STX500      | 8300 Вт            | 24 В    |                   |        | 16 кг   | 920х470        |
| CASE Steiger<br>480 | 9000 Вт            | 24 В    |                   |        | 16 кг   | 920х470        |

В склад розглянутих стартерів входять двигуни постійного струму послідовного збудження традиційної явнополюсної конструкції статора, в якій на статорі розташовані полюси з обмоткою збудження та компенсаційною обмоткою, яка потрібна для компенсації негативного впливу магнітного поля реакції якоря. На

рисунку 1.2 зображено креслення стартера типу СТ-25. Габарити стартера СТ-25 є такими: 500x220x150 мм, вага від 25 до 30 кг в залежності від модифікації. [9]

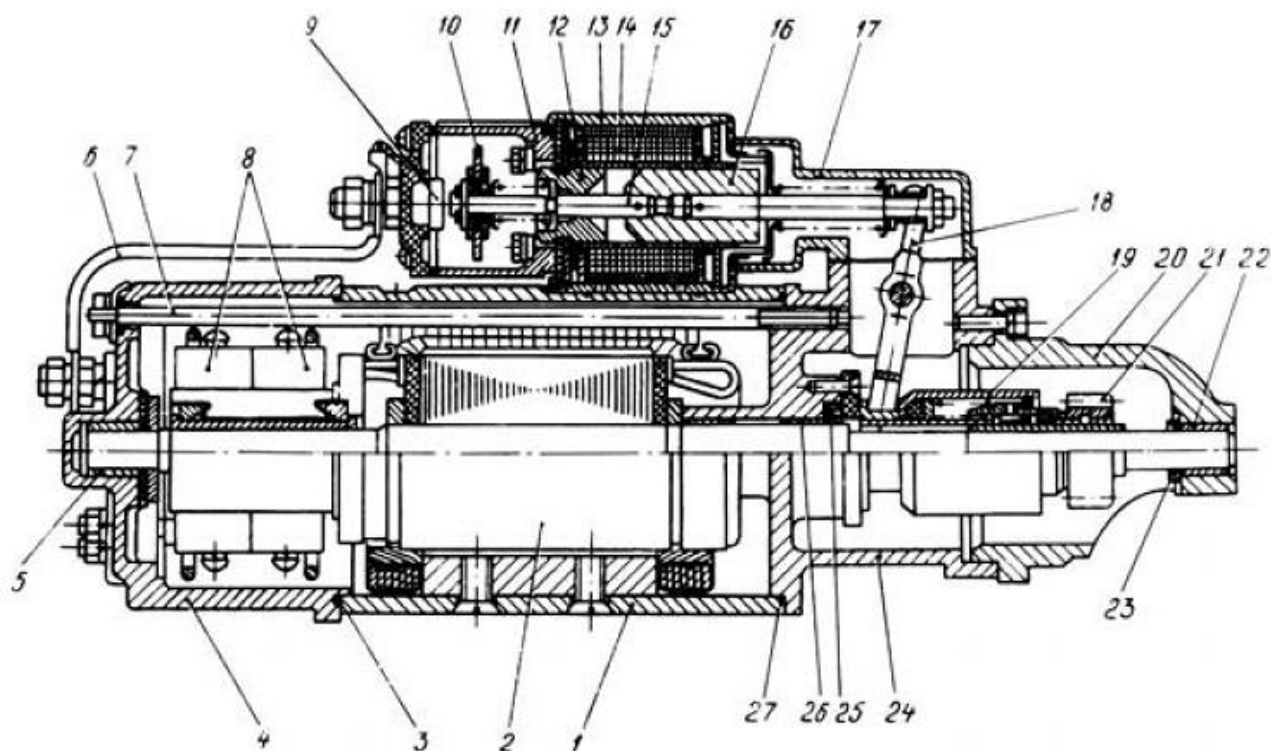


Рисунок 1.2 – будова стартера СТ-25: 1 - корпус; 2 - якор; 3 - ущільнювальні кільця; 4 - кришка з боку колектора; 5 - передній підшипник; 6 - сполучна шина; 7 - стяжна шпилька; 8 - щітки; 9 - контактні болти; 10 - контактний диск; 11 - корпус реле; 12 - сердечник; 13 - утримуюча обмотка реле; 14 - втягує обмотка реле; 15 - шток якоря; 16 - якор реле; 17 - кожух; 18 - важіль приводу; 19 - привід; 20 - кришка з боку приводу; 21 - шестерня приводу; 22 - середній підшипник; 23 - шайба; 24 - корпус приводу; 25 - сальник; 26 - задній підшипник.

## 1.2 Двигун постійного струму послідовного збудження – основний вузол стартерів автомобілів

Стартер являє собою збірну конструкцію, в яку входить двигун постійного струму з доданим в конструкцію механізмом керування, який також називають втягуюче реле, та привідною шестернею, що передає обертання валу на маховик.

Для живлення стартера використовують два електричні кола. Перше коло – це пряме підключення ДПС до акумулятора. В процесі роботи стартер потребує значної кількості енергії, тому для зменшення втрат напруга на електродвигун подається на пряму за допомогою мідного кабелю великого перерізу.

Друге коло використовується для живлення механізму керування, цей процес не потребує значної кількості енергії, тому використовуються звичайні провідники.

В стартері за основу беруть двигуни послідовного збудження. В таких машинах обмотка збудження і обмотка якоря ввімкнені послідовно рисунок 1.3. [4]

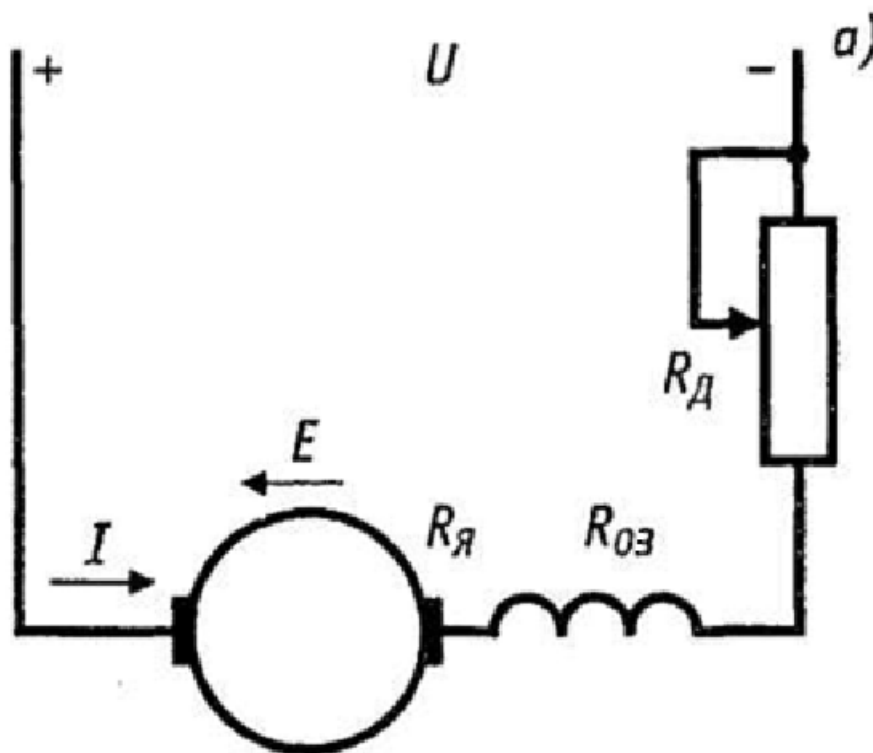


Рисунок 1.3 – електрична схема ДПС з послідовним збудженням

В конструкцію ДПС з послідовним збудженням входять обмотка збудження і компенсаційна обмотка, яка вкладається в пази на кінцівках голосних полюсів, та призначена для компенсації магнітного поля реакції якоря.

Якщо струм якоря змінюється у межах від нуля до номінального, то магнітна система ненасичена і можна вважати, що основний магнітний потік наближено пропорційний струму якоря  $\Phi \approx C_{\Phi} \cdot I_{\text{я}}$



Це означає, що електромагнітний момент пропорційний квадрату значення магнітного потоку або стуму:  $M = C_m \cdot \Phi \cdot I_a \rightarrow M \approx \Phi^2 \rightarrow M \approx I^2$

Враховуючи співвідношення  $\Phi \approx C_\Phi \cdot I_a$ , можна отримати вираз механічної характеристики двигуна з послідовним збудженням рисунок 1.4. [27]

$$n = \sqrt{C_m / C_e^2 \cdot C_\Phi} \cdot \frac{U}{\sqrt{M}} - \frac{R_a + R_{зб}}{C_e \cdot C_\Phi}$$

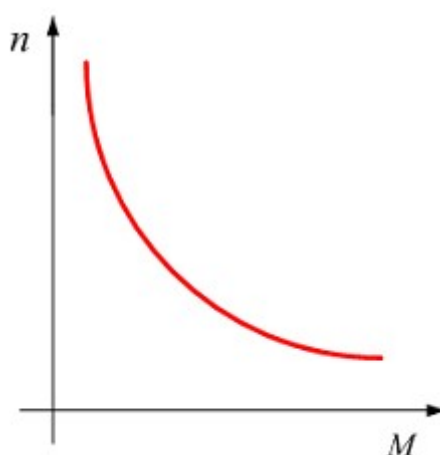


Рисунок 1.4 – Механічна характеристика двигуна постійного струму з послідовним збудженням

Зі зміною моменту навантаження частота обертання різко змінюється, тому таку механічну характеристику називають м'якою. У режимі холостого ходу, якщо момент на валу зменшувати до нуля, частота двигуна необмежено зростає (двигун йде у «рознос»).

Струм, який споживає двигун послідовного збудження з мережі, зі збільшенням навантаження зростає повільніше у порівнянні з двигуном паралельного збудження. Це пояснюється тим, що одночасно зі зростанням струму зростає основний магнітний потік, і обертальний момент двигуна компенсує момент навантаження при меншому струмі. Отже, перевантажувальна спроможність двигуна послідовного збудження більша порівняно з двигуном паралельного збудження. Ця позитивна якість ДПС послідовного збудження використовується там, де можливі значні механічні

перевантаження двигуна: на електротранспорті, у підйомно-транспортних механізмах та в інших пристроях.

Послідовне включення обмоток на надає двигунам унікальну властивість: при невеликих навантаженнях, коли струм якоря  $I_a < I_{ном}$  і магнітна система двигуна ненасичена, електромагнітний момент пропорційний квадрату струму в витках обмотки якоря:

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I_a = C_m \cdot I_a^2$$

Здатність двигунів послідовного збудження розвивати великий електромагнітний момент забезпечує їм хороші пускові властивості.

Конструктивно стартер можна розділити на наступні деталі (рисунок 1.5 - 1.6):

1. Основною частиною є електродвигун постійного струму, який в свою чергу складається з якоря та індуктора.

- Якір. Деталь, яка складається з осі, що виконана з легованої сталі, до якої щільно прилягає сердечник якоря і колекторні пластини. В осерді виконані пази, куди вкладаються обмотки якоря. Кінці обмоток кріпляться до пластин. Ці самі пластини кріпляться по колу на діелектричній основі. Діаметральний розмір сердечника залежить від внутрішнього діаметра корпусу. Якір закріплюється спереду і по заду стартера за допомогою втулок, втулки виробляють або з латуні, або з міді. Вони виконують роль підшипників.

- Індуктор. Нерухома частина на якій розташовані магніти або полюси з обмоткою збудження, компенсаційною обмоткою. [4]

2. Втягуюче реле. Необхідно для подачі енергії на електричний двигун стартера від ключа запалювання. Кріпиться до корпусу стартера. Інша назва - тягове реле. Ззаду тягового реле встановлені, так звані, «п'ятаки» - силові контакти, разом з рухомим контактом-перемичкою. Ці контакти робляться з м'якого металу. Зовні ці «п'ятаки» є звичайними болтами, які спресували в ебонітову кришку реле. Гайками до них прикріплюються силові дроти акумулятора і плюсові щітки стартера. Сердечник реле підключений до обгінної муфти через рухливе «коромисло». При всьому цьому воно покликане виконувати ще одну важливу функцію - виштовхувати

обгону муфту. Конструкція реле складається з силових контрактів і рухомої перемички;

3. Планетарний або циліндричний редуктор, також мають місце безредукторні стартери.

4. Обгінна муфта (Бендикс) і привідна шестерня. Роликовий механізм, який передає крутний момент вінця маховика шляхом спеціальної шестерні зачеплення. Після того, як двигун заустився, Бендикс роз'єднує шестерню приводу і вінець маховика, що забезпечує подальше збереження стартера від пошкоджень. Коли обертання виконується в протилежному напрямку, ролики западають в сепаратор, а шестерня обертається самостійно, незалежно від обойми зовні;

5. Щіткотримачі і щітки. Необхідні для того, щоб подавати робочу напругу на пластини колектора і якоря. Щіткотримач являє собою діелектричну обойму, в якій є металеві вставки, всередині яких встановлені щітки. Контакти щіток, які мають вигляд м'яких багатожильних дротів, кріпляться до полюсним пластин точковим зварюванням. Вони так само підвищують потужність мотора в момент здійснення основного робочого циклу стартера. Більшість стартерів влаштовані аналогічно і складаються з компонентів, що були наведені вище. Відмінності можуть бути, але вони зовсім незначні. Найчастіше це стосується механізму, який автоматично роз'єднує шестерні. А на автомобілях з автоматичними коробками передач комплектування стартера включає в себе додаткові утримуючі обмотки. Їх завдання полягає в запобіганні непередбаченого запуску двигуна. [27]

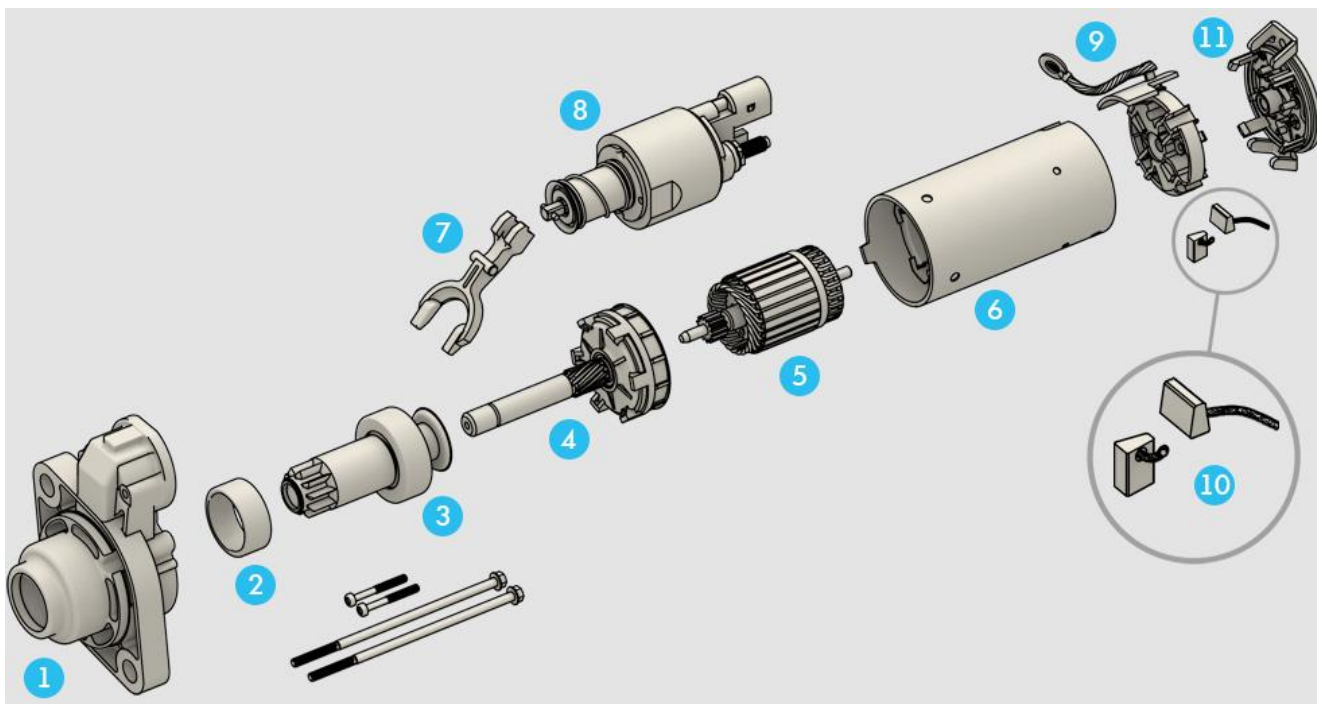


Рисунок 1.5 – будова стартера автомобіля: 1 – кришка передня (маска); 2 – втулка стартера; 3 – бендикс; 4 – редуктор; 5 – якір; 6 – корпус; 7 – вилка; 8 – втягуюче реле; 9 – щітковий вузол; 10 – щітки; 11 – задня кришка.

Процес роботи електричного стартера умовно розділяється на три етапи: з'єднання шестерні приводу з маховиком, безпосередньо пуск стартера і роз'єднання приводної шестерні і маховика. Стартер виконує короточасну роботу і в подальшому русі автомобіля, після запуску, він участі не приймає. Його основним завданням є запуск двигуна. При більш детальному розгляді робота стартера здійснюється за наступним принципом:

- 1) Водій, повернувши ключ в положення запуску в замку запалювання, направляє електричний струм по ланцюгу від акумулятора на тягове реле;
- 2) Спрацьовує електромагніт, який є складовою частиною реле, та штовхає через привідний механізм бендикс;
- 3) Привідна шестерня Бендикс зачіпається за маховик;
- 4) Одночасно з рухом і зачепленням шестерні муфти, на електродвигун подається напруга, замикаючи ланцюг;
- 5) Електричний струм потрапляє на обмотку збудження і на щітки;

6) Через щітки струм потрапляє на колектор і проходить по виткам обмотки якоря;

7) Якір починає обертатися, при цьому обертаючи планетарний редуктор и шестерню;

8) Оберти передаються на маховик двигуна;

9) Маховик двигуна приблизно в 10 разів більший за шестерню, а для його запуску мінімальна швидкість обертів повинна складати 100 об\хв, це в свою чергу означає, що якір ДПС обертається зі швидкістю 1000 об\хв;

10) Обертаючись маховик починає обертати колінчатий вал на якому розташовані поршні – двигун запускається.

11) Після того, як оберти мотора в кількісному співвідношенні перевищать кількість обертів стартера, Бендикс роз'єднує привідну шестерню з валом електричного двигуна. Для уникнення механічних пошкоджень ДПС. [28]

Стартери поділяються на два типи:

- Редукторні;
- Безредукторні.

*Стартер з редуктором.* Доцільним є використання редукторного стартера. Обумовлюється це твердження тим, що цей пристрій не вимагає високих витрат електричного струму для своєї ефективної роботи. Подібні пристрої забезпечать кручення колінчастого вала двигуна навіть за умов з низьким акумуляторним зарядом. Ще одним дуже важливим перевагою є наявність постійних магнітів, які зводять проблеми з обмоткою статора нанівець. Зворотний ж сторона медалі говорить про ймовірні поломки шестерні. Але це часто виникає через заводський брак або простіше кажучи неякісне виробництво.

*Стартери, що не мають редукторного пристрою,* безпосередньо впливають на обертання шестерні. В цьому випадку автомобільні власники, які мають стартери без редуктора виграють в тому плані, що їх конструкція простіша і легше ремонтується. Так само відзначимо, що за рахунок струму, що подається на електромагнітний вимикач, зчеплення шестерні і маховика відбувається миттєво, що забезпечує досить швидке запалювання. Без редукторні стартери

наділені високою витривалістю, а ймовірність появи несправностей, пов'язаних з електричним впливом, зведена до мінімуму. Але мінусом такої конструкції є великі розміри, та нестабільна робота в умовах низьких температур при низькому заряді батареї. [28]

### **Переваги та недоліки**

Основними перевагами безредукторних стартерів є:

- перевірена роками надійність;
- легкий ремонт завдяки незмінній конструкції;
- необхідні запасні частини завжди легко дістати.

Недоліки:

- громіздкий з великою масою;
- вимагає великого споживання електроенергії;
- порівняно висока вартість заміни елементів, в зв'язку з використанням дорогих матеріалів.

Переваги редукторного стартера:

- тривалий термін експлуатації;
- компактний розмір;
- мала вага;
- ефективно запускає двигун навіть при низьких температурах;
- дуже низьке споживання енергії.

Недоліки редукторного стартера:

- дешевизна використовуваних матеріалів позначається на їхній якості;
- не завжди можна просто знайти запасні частини;
- складніший ремонт в порівнянні з без редукторним стартером.

Очевидно, що майбутнє за редукторними стартерами, опираючись на їх позитивні сторони.

### **1.3 Особливості характеристик двигунів постійного струму, які використовуються в стартерах транспортних засобів**

Двигуни постійного струму, які використовуються в стартерах автомобілів іноді повинні працювати в складних умовах, тому такі машини мають ступінь захисту починаючи від IP54 – захист від пилу та водяних бризок, IP55 – захист від пилу та струменю води під тиском і вище.

Оскільки в автомобілі немає високовольтного джерела живлення, а вся напруга надходить від акумулятора, що має свої обмеження по характеристикам, ДПС для стартерів по напрузі живлення розподіляються на два види:

- Двигуни, що живляться напругою в 12 В;
- Двигуни, що живляться напругою в 24 В.

Також до системи електричного пуску двигуна внутрішнього згорання стоять наступні вимоги:

- Бензиновий двигун запускається при 40 ... 100 об\хв;
- Дизельний двигун при 180 ... 200 об\хв.

Зазвичай маховик двигуна внутрішнього згорання є в десять разів більший за шестерню, яка його розкручує, тобто швидкість на валу ДПС повинна бути також в десять разів більшою 1000 ... 2000 об\хв, щоб передати необхідну кількість обертів на вал.

На рисунку 1.6 зображена будова стартера у цілому. [25]

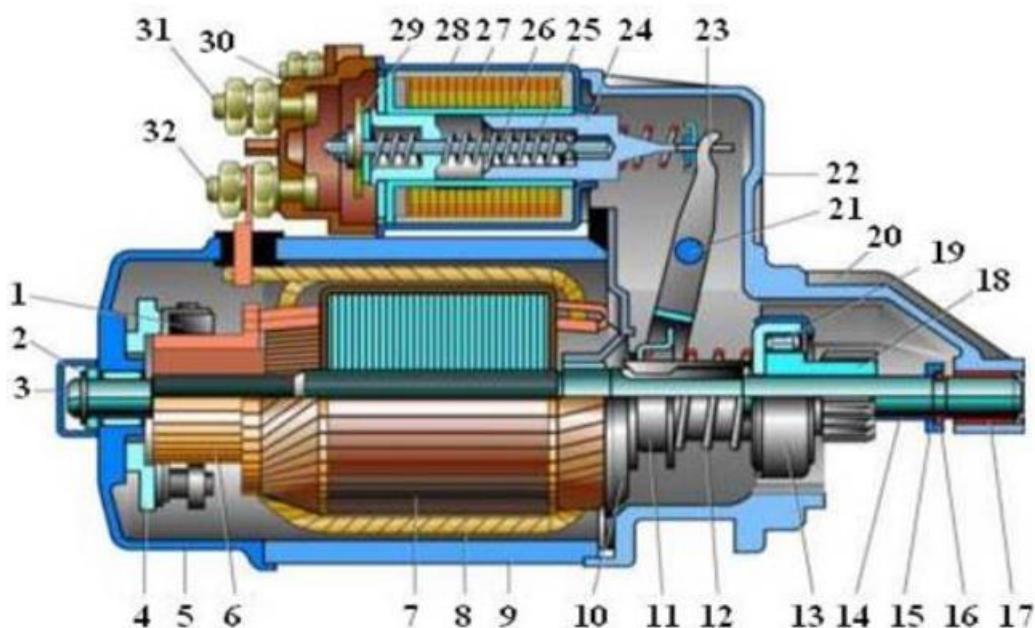


Рисунок 1.6 – будова стартера: 1 – щітковий вузол; 2 – задня втулка; 3 – накривка втулки; 4 – тримач щіток; 5 – задня накривка корпусу стартера; 6 – щітковий колектор; 7 – якір; 8 – обмотка збудження; 9 – корпус (стакан); 10 – ізолююча шайба; 11 – втулка відведення; 12 – буферна пружина; 13 – муфта вільного ходу; 14 – вал якоря; 15 – упорна шайба; 16 – гумове кільце; 17 – втулка (підшипник ковзання) вала якоря; 18 – шестірня обгінної муфти (бендикс); 19 – ролики муфти вільного ходу; 20 – передня накривка корпусу стартера; 21 – валик важеля вмикання стартера; 22 – накривка тягового реле; 23 – важіль вмикання стартера; 24 – якір тягового реле; 25 – пружина; 26 – шток; 27 – котушка тягового реле; 28 – корпус тягового реле; 29 – контактний диск; 30 – пластмасова накривка тягового реле; 31, 32 – контактні гвинти.

#### 1.4 Удосконалення ДПС для стартерів шляхом застосування неявнополюсної конструкції статора

Постійною проблемою в ДПС була і залишається реакція якоря, що негативно впливає на роботу машини. Найбільш розповсюджена конструкція МПС (рисунок 1.7, а) включає в себе явнополюсний статор, обмотку збудження, обмотку якоря, щітки, що розташовані на лінії геометричної нейтралі. При роботі генератора



на навантаження по обмотці індуктора протікає струм який створює основний магнітний потік  $F_d$ , а по обмотці якоря струм, який створює магнітне поле якоря. Вісь поля якоря співпадає з лінією геометричної нейтралі, тому воно перпендикулярне до основного поля головних полюсів. Виникає результуюче поле і нерівномірний розподіл індукції під полюсами. Один край полюсу, від якого рухається якір, менш насичений, а інший, до якого рухається якір, сильно насичений. В результаті з'являється потік повздовжньої розмагнічуючої реакції якоря  $F_a$ , що зменшує магнітний потік збудження. Результуюче поле, яке виникає після накладання поля якоря на поле індуктора повернуто на деякий кут в напрямку обертання якоря, це в свою чергу призводить до зміщення фізичної лінії нейтралі. Щітки опиняються в місці де різниця потенціалів між точками не набуває найменшого значення, погіршується ЕРС, збільшується іскріння на щітках. У двигуна постійного струму якір обертається в протилежну сторону, результуюче магнітне поле повернуто на кут протилежний напрямку обертання, це призводить до зменшення обертового моменту двигуна.

Для зменшення негативного впливу реакції якоря збільшують повітряний проміжок, а це призводить до необхідності збільшення магніторушійної сили основних полюсів, тобто до збільшення витрати міді основних полюсів. МРС додаткових полюсів направлена зустрічно МРС якоря і повинна дещо перевершувати її, що потребує збільшених витрат міді додаткових полюсів. В двигунах, що працюють при різко змінних навантаженнях, в полюсних наконечниках розміщують компенсаційну обмотку (рисунок 1.7, б), що конструктивно ускладнює машину і здорожує її виготовлення. Велика кількість міді основних і додаткових полюсів зумовлює не тільки збільшення втрат електричної енергії і зменшення коефіцієнту корисної дії, але й збільшення вартості двигуна, що у цілому зменшує його привабливість для споживача.

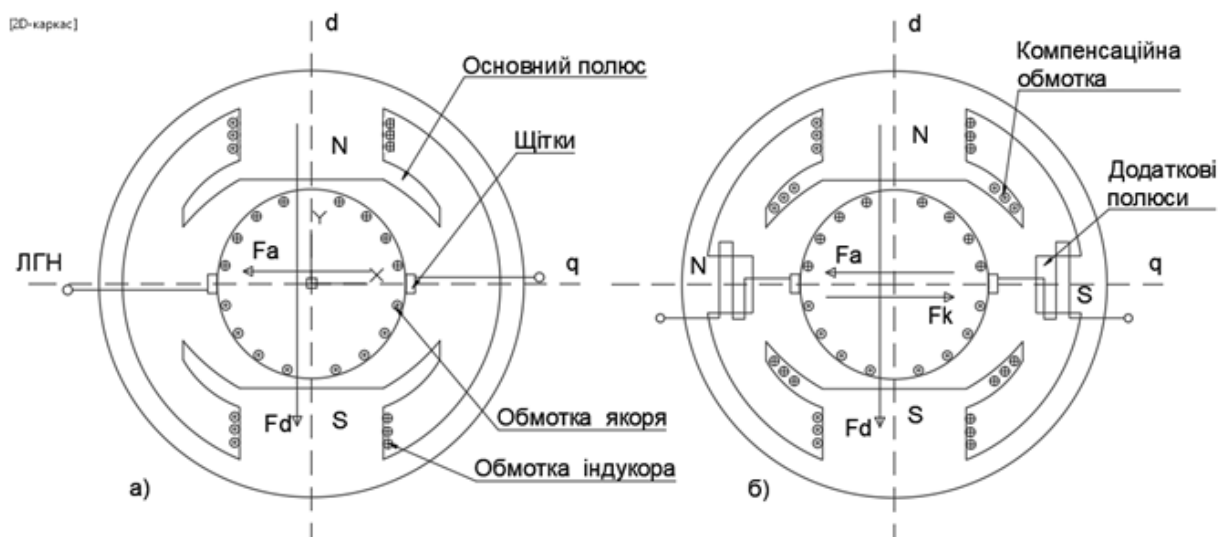


Рисунок 1.7 – Явнополюсна машина постійного струму:

а) спрощена конструкція; б) конструкція з додатковими полюсами та компенсаційною обмоткою.

Основна ідея подолання зазначених проблем традиційних конструкцій ДПС з явнополюсним статором і покращення їх масо-габаритних показників полягає у використанні конструкцій ДПС з неявнополюсним статором. Такі ідея уперше запропонована в роботах німецьких авторів. В варіанті двигуна, показаного на рисунку 1.8, використовують неявнополюсний шихтований магнітопровід статора з виштампуваними пазами для розміщення рівномірно укладеної у всі пази статора компенсаційної обмотки, а також для розміщення в пазах статора обмоток головних і додаткових полюсів.

Відмова від зосереджених головних полюсів ДПС на розподілену в пазах статора обмотку збудження дозволяє зменшити габаритний діаметр двигуна. При цьому, компенсаційна обмотка, при умові вкладання узгодженої кількості її витків, спроможна повністю компенсувати поле реакції якоря. Але на її виготовлення потрібно витрати міді на 10 ... 15% більше, ніж для якірної обмотки, оскільки вона розміщена на більшому діаметрі порівняно з якірною обмоткою. [14]



обмотка розміщується в пазах статора на половині полюсної поділки. Обмотки з'єднані послідовно.

Послідовне включення обмоток дозволяє подавати на них однаковий струм, що в свою чергу дозволяє створювати магнітний потік компенсації, який пропорційний потоку реакції якоря. [14]

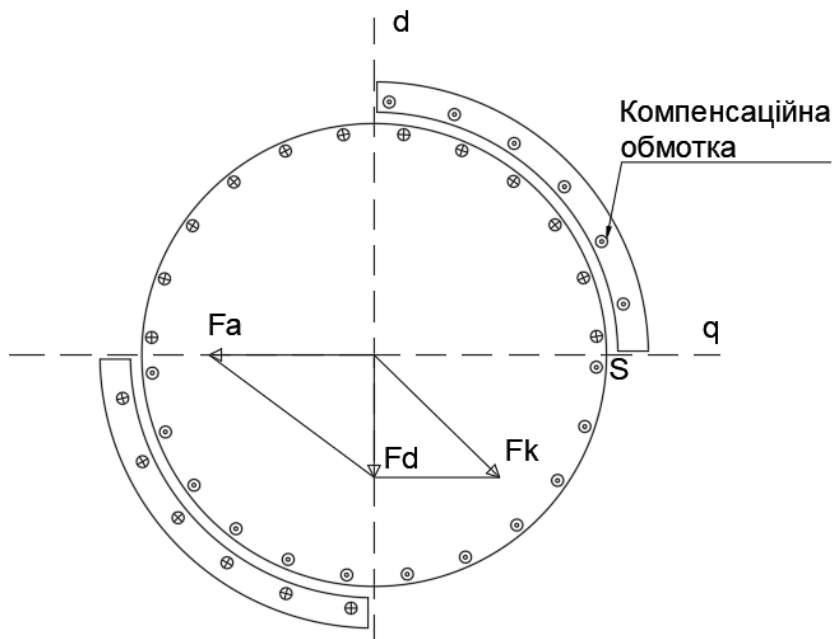


Рисунок 1.9 – Неявинополюсна машина постійного струму з інтегрованою обмоткою статора

Струм в інтегрованій обмотці має протилежний напрям до струму в пазах якоря. На рисунку 1.9 зображена векторна діаграма, яка відображає просторовий зсув МРС і магнітних потоків якірної обмотки ротора і інтегрованої обмотки статора. Видно, що в результаті взаємодії цих потоків при умові узгодженої кількості витків утворюється як їх геометрична сума результуючий магнітний потік  $F_d$ , який направлений ортогонально секціям обмотки якоря і таким чином може розглядатися, як потік збудження. Тобто, завдяки зазначеному розміщенню обмотки статора в пазах неявинополюсного статора, результуючий потік, який вона створює, направлений по повздовжній осі  $d$ . Таким чином МРС інтегрованої обмотки статора виконує дві корисні функції: 1) компенсує МРС реакції якоря; 2) виконує функцію обмотки

збудження, змушуючи при цьому обмотку якоря також брати участь у створенні корисного магнітного потоку ДПС. Тому використання інтегрованої обмотки статора зазначеної неявнополіусної конструкції ДПС дозволяє відмовитися від двох окремих обмоток – збудження і компенсаційної, які використовуються в явнополіусних ДПС традиційного виконання, що у цілому сприяє покращенню масо-габаритних показників ДПС. [14]

Амплітудне значення МРС обмотки статора

$$F_{km} = A_k \cdot \frac{\tau}{4} = \frac{N_k I_k \cdot \tau}{2p \frac{\tau}{2}} = \frac{N_k I_a}{4p},$$

повинно дорівнювати амплітудному значенню МРС якірної обмотки:

$$F_{am} = A_a \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{N_a I_a \cdot \tau}{2a \cdot 2p \cdot \tau} = \frac{N_a I_a}{2a \cdot 2p \cdot 2},$$

де  $N_k$  - число активних провідників обмотки статора,  $N_a$  - число активних провідників обмотки якоря.

Діюче значення МРС першої гармоніки для одного витка обмотки статора з діаметральним кроком, використовуючи закон повного струму і розклад в ряд Фур'є прямокутної форми кривої МРС витка, дорівнює:

$$F'_{k1} = \frac{2}{\pi} I_a$$

Діюче значення МРС першої гармоніки  $w_k / p$  витків однієї пари полюсів інтегрованої обмотки статора, враховуючи, що  $w_k / p = N_k / 2p$  і використовуючи першу формулу,

$$F_{k1} = \frac{2}{\pi} I_a \frac{N_k}{2p} K_{об.к} = \frac{4}{\pi} F_{km} k_{об.к} = \frac{8\sqrt{2}}{\pi^2} F_{km},$$

де обмотковий коефіцієнт для компенсаційної обмотки:

$$K_{об.к} = \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\frac{\pi}{4}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}$$

Діюче значення МРС першої гармоніки одного витка обмотки якоря з діаметральним кроком:

$$F'_{a1} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{I_a}{2a}$$

Діюче значення МРС першої гармонічної  $w_a / p$  витків однієї пари полюсів обмотки якоря,

$$F_{a1} = \frac{2}{\pi} \frac{I_a}{2a} \frac{N_a}{2p} K_{об.а} = \frac{4}{\pi} F_{am} k_{об.а} = \frac{8}{\pi^2} F_{am},$$

де обмотковий коефіцієнт для якорної обмотки:

$$K_{об.а} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi}$$

Як видно із порівняння формул перші гармоніки МРС обмоток при рівності амплітудних значень  $F_{km}$  і  $F_{am}$  відрізняються в  $\sqrt{2}$  раз. Вектори МРС  $F_{k1}$  та  $F_{a1}$ , які визначають просторове розміщення обмоток, направлені під кутом  $135^\circ$  рисунок 1.9.

$$F_{cm} = \sqrt{2} \cdot F_a$$

$$I_{cm} \cdot w_{cm} = \sqrt{2} \cdot I_a \cdot w_a$$

Обмотки статора та якоря з'єднані послідовно:

$$I_{cm} = I_a$$

$$w_{cm} = \sqrt{2} \cdot w_a$$

Звідси маємо:

$$\frac{U_{ncm} \cdot Z_{cm}}{2} = \sqrt{2} \frac{U_{na} \cdot Z_a}{2}$$

$$U_{ncm} = \frac{2 \cdot U_{na} \cdot Z_a}{\sqrt{2} \cdot Z_{cm}}$$

При складанні цих векторів одержуємо вектор результуючої МРС  $F_d$ , який направлений по поздовжній осі. В результаті спільної дії МРС обмотки якоря і компенсаційної обмотки створюється рівномірно розподілений вздовж кола якоря основний магнітний потік, направлений уздовж поздовжній вісі  $d$ . Рівномірність основного магнітного потоку виключає можливість появи кругового вогню по колектору. [14]

Таким чином щоб створити цю різницю в МРС кількість витків статорної обмотки повинна бути в  $\sqrt{2}$  разів більша за кількість витків обмотки якоря.

Перехід до неявнополюсної конструкції статора дозволяє зменшити габарити, зменшити витрати активних матеріалів міді, що з огляду на велику кількість виготовлених зразків зменшеної вартості дасть суттєвий інтегральний економічний ефект.

## 2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ РОЗРАХУНКИ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

### 2.1 Електромагнітний розрахунок двигуна постійного струму з явнополюсною конструкцією статора для стартера великовантажного автомобіля [10]

В якості прототипу двигуна для розрахунку було обрано серійний ДПС для стартерів марки СТ- 25, що має наступні вхідні данні.

$$U_H = 24 \text{ В}$$

$$P_{2H} = 9100 \text{ Вт}$$

$$n_H = 1300 \text{ об / хв}$$

$$p = 2$$

$$a = 1$$

*Розрахункова потужність. Номінальна ємність та внутрішній опір акумуляторної батареї*

$$\eta_{эм} = 0.95 \quad k = 0.5$$

$$P_{эм} = \frac{P_{2H}}{4 \cdot (1-k) \cdot k \cdot \eta_{эм}} = \frac{9.1 \cdot 10^3}{4 \cdot (1-0.5) \cdot 0.5 \cdot 0.95} = 9.579 \cdot 10^3$$

$$P_{\mathcal{O}} = P_{эм} = 9.579 \cdot 10^3$$

Частота обертання

$$n_{mi} = 0.5 \cdot \frac{n_H}{1-k} = 0.5 \cdot \frac{1300}{1-0.5} = 1.3 \cdot 10^3$$

$$n = n_{mi} = 1.3 \cdot 10^3$$

ЕРС в обмотці якоря

$$\Delta U_{щ} = 2$$

$$E_{ати} = (U_H - \Delta U_{щ}) \cdot (1-k) = (24 - 2) \cdot (1-0.5) = 11$$

$$E_a = E_{ати} = 11$$

Сила струму двигуна



$$I_{амн} = \frac{P_{2H}}{\eta_{эм} \cdot U_H} = \frac{9100}{0.95 \cdot 24} = 399.123$$

Сила струму в обмотці якоря

$$I_a = I_{амн} = 399.123$$

$$x = 0.6$$

Сумарний опір кола якоря

$$\Sigma R_a = \frac{U_H - \Delta U_{щ} - E_a}{I_a} = \frac{24 - 2 - 11}{399.123} = 0.027560426234519183309$$

Номінальна ємність акумуляторної батареї

$$C_{20} = \frac{P_{эмх}^x}{U_H} = \frac{9.579 \cdot 10^3 \cdot 600 \cdot 10^{-3}}{24} = 239.474$$

$$a_\delta = 0.05$$

$$R_\delta = a_\delta \frac{U_H}{C_{20}} = 0.05 \cdot \frac{24}{237.474} = 5.011 \cdot 10^{-3} \text{ опір акумулятора}$$

Головні розміри двигуна

$$D_a = 0.0884$$

$$A = 87000$$

$$B_\delta = 0.8$$

$$сх_\delta = 0.568$$

Довжина пакета якоря

$$l_a = \frac{6.1 \cdot P_{эмх}}{A \cdot B_\delta \cdot сх_\delta \cdot n_H \cdot D_a^2} = \frac{6.1 \cdot 9578.9473684210526316}{87000 \cdot 0.8 \cdot 0.568 \cdot 1300 \cdot 0.0884^2} = 0.145$$

$$l_a = 0.14$$

Полюсна поділка

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0.0884}{2 \cdot 2} = 0.069$$

Основний магнітний потік

$$\Phi = сх_\delta \cdot \tau \cdot B_\delta \cdot l_a = 0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.8 \cdot 0.14 = 4.39 \cdot 10^{-3}$$

Вибір кількості пазів

$$\pi \frac{D_a}{2 \cdot 10^{-2}} = 13.886$$

$$\pi \frac{D_a}{1 \cdot 10^{-2}} = 27.772$$

Число активних провідників

$$N = 32$$

Число пазів якоря та колекторних пластин

$$Z = 16 \quad K = 16 \quad U_{II} = 2$$

Число витків в секції обмотки

$$W_{cp} = \frac{N}{2 \cdot Z} = \frac{32}{2 \cdot 16} = 1$$

$$W_c = 1$$

Уточнене значення числа активних провідників

$$N_{ym} = 2 \cdot W_y \cdot Z = 2 \cdot 16 = 32$$

Уточнене значення лінійного навантаження

$$A_{ym} = \frac{l_a \cdot N_{ym}}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D_a} = \frac{399.123 \cdot 32}{2 \cdot \pi \cdot 0.0884} = 2.299 \cdot 10^4$$

Уточнене значення довжини пакета якоря

$$l_{aym} = 0.14$$

Відношення довжини якоря до діаметра

$$\lambda = \frac{l_{aym}}{D_a} = \frac{0.14}{0.0884} = 1.584$$

Уточнене значення основного магнітного потоку

$$\Phi_{ym} = c x_{\delta} \cdot \tau \cdot B_{\delta} \cdot l_{aym} = 0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.8 \cdot 0.14 = 4.39 \cdot 10^{-3}$$

Крок обмотки по колектору і результуючий крок

$$Y_k = 1$$

$$Y = Y_k = 1$$

Перший частковий крок

$$Y_1 = \left( \frac{Z}{2 \cdot p} \right) = \frac{16}{2 \cdot 2} = 4$$

Другий частковий крок

$$Y_2 = Y - Y_1 = 1 - 4 = -3$$

На рисунку 2.1 показана схема двошарової петльової обмотки якоря явнополюсного двигуна.

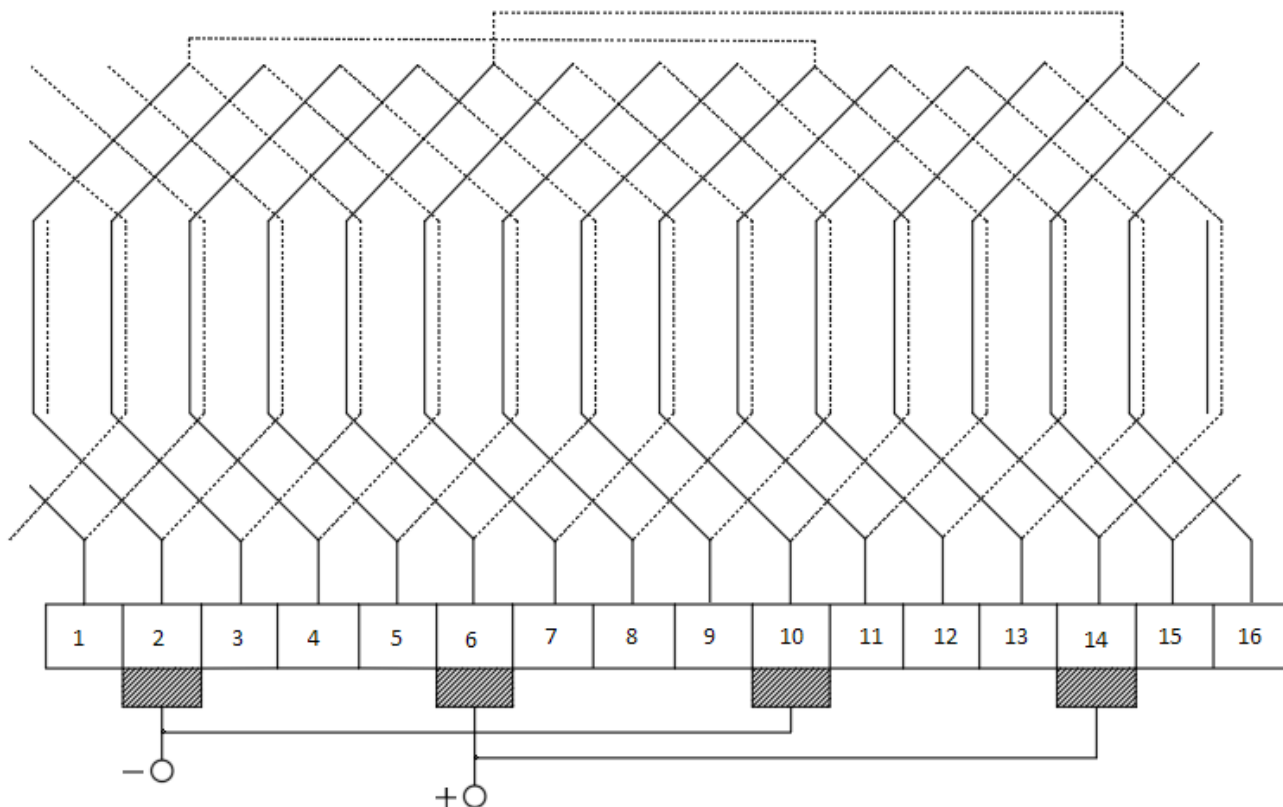


Рисунок 2.1 – Двошарова петльова обмотка якоря

Сумарний опір обмотки якоря та збудження

$$R_{cm} = \Sigma R_a - R_\delta = 0.027560426234519183309 - 0.005011 = 0.023$$

Опір обмотки якоря

$$R_a = 0.55 \cdot R_{cm} = 0.55 \cdot 0.023 = 0.012$$

$$R_a = 0.013$$

Середня довжина провідника

$$L_{аср} = l_{ам} + 1.3 \cdot \tau = 0.14 + 1.3 \cdot 0.069 = 0.23$$

Площа перерізу провідника розрахункова

$$K_t = 1.2$$

$$\rho = 17.83 \cdot 10^{-9}$$

$$S_{арасч} = \frac{K_t \cdot \rho \cdot L_{аср} \cdot N_{ym}}{(2 \cdot a)^2 \cdot R_a} = \frac{1.2 \cdot 17.83 \cdot 10^{-9} \cdot 0.23 \cdot 32}{2^2 \cdot 0.013} = 3.03 \cdot 10^{-6}$$

Ширина проводу розрахункова

$$b_{арасч} = \sqrt{\frac{S_{арасч}}{0.49}} = \sqrt{\frac{0.00000303}{0.49}} = 2.487 \cdot 10^{-3}$$

Прийняті значення по стандартам

$$a = 2.65 \cdot 10^{-3} \quad b = 5 \cdot 10^{-3} \quad S_a = 12.7 \cdot 10^{-6}$$

Густина струму в обмотці якоря

$$AJ = 1.2 \cdot 10^{11}$$

$$j_{ан} = \frac{AJ}{A_{ym}} = \frac{1.2 \cdot 10^{11}}{22994.533339969788} = 5.219 \cdot 10^6$$

Уточнене значення опору обмотки якоря

$$K_{тym} = \frac{\Sigma R_a}{\left(\frac{R_{cm}}{K_t}\right) + a_\delta \frac{U_n}{C_{20}}} = \frac{0.027560426234519183309}{\frac{0.022549426234519186}{1.2} + 0.05 \cdot \frac{24}{239.474}} = 1.158$$

$$R_{aym} = \frac{K_{тym} \cdot \rho \cdot L_{аср} \cdot N_{ym}}{(2 \cdot a)^2 \cdot S_a} = \frac{1.158 \cdot 17.83 \cdot 10^{-9} \cdot 0.23 \cdot 32}{2^2 \cdot 12.7 \cdot 10^{-6}} = 2.991 \cdot 10^{-3}$$

Маса міді обмотки якоря

$$m_a = 8900 \cdot L_{аср} \cdot N_{ym} \cdot S_a = 8900 \cdot 0.23 \cdot 32 \cdot 12.7 \cdot 10^{-6} = 0.832$$

### **Розміри пазу**

Радіус заокруглення проводу

$$r_{пrb} = 0.6 \cdot \sqrt{a \cdot b - S_a} = 0.6 \cdot \sqrt{2.65 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} - 12.7 \cdot 10^{-6}} = 0.0004$$

Ширина паза

$$\Delta a = 3 \cdot 10^{-4}$$

$$b_n = a + 2 \cdot 2 \cdot \Delta a = 2.65 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 3.85 \cdot 10^{-3}$$

Ширина прорізі паза

$$a_{np} = 0.6 \cdot a = 0.6 \cdot 2.65 \cdot 10^{-3} = 1.59 \cdot 10^{-3}$$

Максимальний діаметр другої ділянки зубцевої зони

$$h_{np} = 0.001$$

$$D_{2max} = D_a - 2 \cdot \left( h_{np} + 0.5 \cdot \sqrt{b_n^2 - a_{np}^2} \right) = 0.0884 - 2 \cdot \left( 0.001 + 0.5 \cdot \sqrt{0.00385^2 - 0.00159^2} \right) = 0.083$$

Висота другої ділянки зубцевої зони

$$h_2 = b_n + 2 \cdot b - 4 \cdot r_{npb} - 0.0003 - 0.0566 \cdot \sqrt{b_n - 2 \cdot r_{npb} - 0.001} = 0.00385 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 0.0004 \cdot 0.0003 - 0.0566 \times \\ \times \sqrt{0.00385 - 2 \cdot 0.0004 - 0.001} = 9.387 \cdot 10^{-3}$$

Висота 3 ділянки зубцевої зони

$$3h = 0.5 \cdot b_n = 0.5 \cdot 0.00385 = 1.925 \cdot 10^{-3}$$

$$h_n = h_2 + 2 \cdot 3h = 0.0093873260059071113 + 2 \cdot 0.001925 = 0.013$$

$$b_{uu} = a_{np} = 1.59 \cdot 10^{-3}$$

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

Мінімальний діаметр другої ділянки зубцевої зони

$$D_{2\min} = D_{2\max} - 2 \cdot h_2 = 0.083 - 2 \cdot 0.0093873260059071113 = 0.064$$

Відстань між провідниками в пазу

$$ON = 0.5 \cdot a - r_{npb} = 0.5 \cdot 2.65 \cdot 10^{-3} - 0.0004 = 9.25 \cdot 10^{-4}$$

$$OK = 0.5 \cdot b_n - \Delta a - r_{npb} = 0.5 \cdot 3.85 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4} = 1.225 \cdot 10^{-3}$$

$$KN = \sqrt{OK^2 - ON^2} = \sqrt{0.0012250000000000002^2 - 0.000925^2} = 8.031 \cdot 10^{-4}$$

$$KF = r_{npb} = 4 \cdot 10^{-4}$$

$$OX = KN + KF = 0.00080311892021045072 + 0.0004 = 0.001203 = 1.203 \cdot 10^{-3}$$

$$1 = h_2 - 2 \cdot (b - OX) = 0.0093873260059071113 - 2 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 0.001203) = 0.00179 = 1.79 \cdot 10^{-3}$$

Мінімальний діаметр якоря

$$D_{a\min} = D_{2\max} - b_n = 0.064225347988185785 - 0.00385 = 0.06$$

На рисунку 2.2 показано переріз паза якоря двигуна постійного струму з явнополюсним статором.

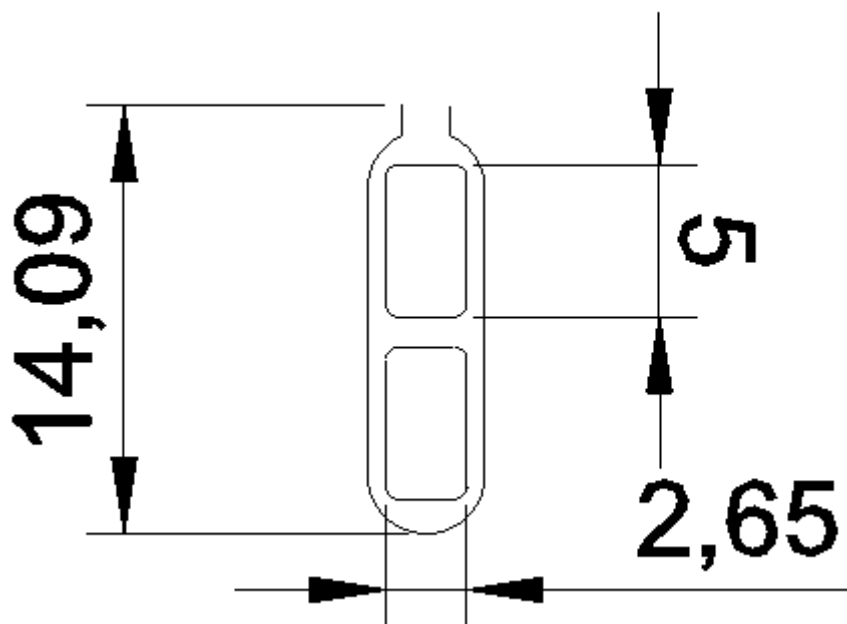


Рисунок 2.2 – Паз якоря

**Магнітний розрахунок. Зубцева зона**

Розрахункові діаметри на трьох ділянках зубцевої зони

$$D_1 = 0.5 \cdot (D_a + D_{2\max}) = 0.5 \cdot (0.0884 + 0.083) = 0.0857$$

$$D_{2cp} = 0.5 \cdot (D_{2\max} + D_{2\min}) = 0.5 \cdot (0.083 + 0.064225347988185785) = 0.074$$

$$D_3 = D_{2\min} - 0.5 \cdot b_n = 0.064225347988185785 - 0.5 \cdot 0.00385 = 0.0623$$

Висота першої ділянки зубцевої зони

$$h_1 = 0.5 \cdot (D_a - D_{2\max}) = 0.5 \cdot (0.0884 - 0.083) = 2.7 \cdot 10^{-3}$$

Висота третьої ділянки зубцевої зони

$$h_2 = 0.5 \cdot b_n = 0.5 \cdot 0.00385 = 1.925 \cdot 10^{-3}$$

Висота зубця

$$h_z = h_1 + h_2 + h_3 = 0.0027000000000000001 + 0.001925 + 0.001925 = 0.014$$

Зубцеві кроки по зовнішньому діаметру якоря і в розрахункових перерізах зубця

$$t_z = \frac{\pi \cdot D_a}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.0884}{16} = 0.017$$

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.0857}{16} = 0.017$$

$$t_{2\max} = \frac{\pi \cdot D_{2\max}}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.083}{16} = 0.0163 = 0.016$$

$$t_{2cp} = \frac{\pi \cdot D_{2cp}}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.074}{16} = 0.01453 = 0.015$$

$$t_{2\min} = \frac{\pi \cdot D_{2\min}}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.064225347988185785}{16} = 0.013$$

$$t_3 = \frac{\pi \cdot D_3}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.0623}{16} = 0.012$$

Ширина зубців

$$b_z = t_z - a_{np} = 0.017 - 0.00159 = 0.015$$

$$b_1 = t_1 - \sqrt{b_n^2 - h_1^2} = 0.017 - \sqrt{0.00385^2 - 0.002700000000000001^2} = 0.014$$

$$b_{2\max} = t_{2\max} - b_n = 0.0163 - 0.00385 = 0.01245 = 0.012$$

$$b_{2cp} = t_{2cp} - b_n = 0.01453 - 0.00385 = 0.01068 = 0.011$$

$$b_{2\min} = t_{2\min} - b_n = 0.012610617588370779 - 0.00385 = 0.0087606 = 8.761 \cdot 10^{-3}$$

$$b_3 = t_3 - 0.866 \cdot b_n = 0.012232576394915257 - 0.866 \cdot 0.00385 = 0.0088985 = 8.899 \cdot 10^{-3}$$

Магнітні індукції в розрахункових перерізах зубця

$$K_c = 0.95$$

$$B_1 = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_1} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.014255459965677311} = 1.004$$

$$B_{z\min} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_{2\max}} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.01245} = 1.15$$

$$B_{z\max} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_{2\min}} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.0087606} = 1.634$$

$$B_{2cp} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_{2cp}} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.01068} = 1.34$$

$$B_3 = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_3} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.0088985} = 1.609$$

Зубцеві коефіцієнти

$$K_{z1} = \frac{t_1}{K_c \cdot b_1} - 1 = \frac{0.017}{0.95 \cdot 0.014255459965677311} - 1 = 0.255$$

$$K_{2\min} = \frac{t_{2\min}}{K_c \cdot b_{2\max}} - 1 = \frac{0.012610617588370779}{0.95 \cdot 0.01245} - 1 = 0.0662$$

$$K_{2cp} = \frac{t_1}{K_c \cdot b_{2cp}} - 1 = \frac{0.017}{0.95 \cdot 0.01068} - 1 = 0.68$$

$$K_{2\max} = \frac{t_1}{K_c \cdot b_{2\min}} - 1 = \frac{0.017}{0.95 \cdot 0.0087606} - 1 = 1.043$$

$$K_3 = \frac{t_1}{K_c \cdot b_3} - 1 = \frac{0.017}{0.95 \cdot 0.0088985} - 1 = 1.011$$

Напруженості магнітного поля в розрахункових перерізах зубця

$$H_{2\min} = 10000 \quad H_{2cp} = 20000 \quad H_{2\max} = 30000$$

Середня напруженість на 1, 2 та 3 ділянках

$$H_2 = \frac{1}{6} \cdot (H_{2\min} + 4 \cdot H_{2cp} + H_{2\max}) = \frac{1}{6} \cdot (10000 + 4 \cdot 20000 + 30000) = 2 \cdot 10^4$$

$$H_1 = 10000 \quad H_3 = 30000$$

МРС для першої, другої та третьої ділянки

$$F_{1z} = 2 \cdot h_1 \cdot H_1 = 2 \cdot 0.0027000000000000001 \cdot 10000 = 54$$

$$F_{2z} = 2 \cdot h_2 \cdot H_2 = 2 \cdot 0.0093873260059071113 \cdot 20000 = 375.493$$

$$F_{3z} = 2 \cdot h_3 \cdot H_3 = 2 \cdot 0.001925 \cdot 30000 = 115.5$$

МРС зубцевої зони

$$F_z = F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} = 54.0000000000000021 + 375.49304023628446 + 115.5 = 544.993$$

**Повітряний проміжок**

$$\delta = 0.0006$$

Коефіцієнт повітряного проміжку

$$K_\delta = \frac{t_z + 10 \cdot \delta}{b_z + 10 \cdot \delta} = \frac{0.017 + 10 \cdot 0.0006}{0.015410000000000002 + 10 \cdot 0.0006} = 1.074$$

МРС для повітряного проміжку

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$F_\delta = \frac{2 \cdot K_\delta \cdot \delta \cdot B_\delta}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 1.0742643624474544 \cdot 0.0006 \cdot 0.8}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 820.678$$

Зовнішній діаметр корпусу



$$D_{j1} = 1.5 \cdot D_a = 1.5 \cdot 0.0884 = 0.133$$

$$D_j = 0.150 \quad \text{ГОСТ 9944-77}$$

Довжина корпуса

$$l_j = 1.5 \cdot l_{aym} = 1.5 \cdot 0.14 = 0.21$$

Площа розрахункового переріза корпуса

$$B_j = 1.5 \quad \sigma = 1.2$$

$$S_j = \frac{\sigma \cdot \Phi_{ym}}{2B_j} = \frac{1.2 \cdot 0.00438950400000000007}{2 \cdot 1.5} = 0.002 = 2 \cdot 10^{-3}$$

Товщина корпусу

$$h_j = \frac{S_j}{l_j} = \frac{0.002}{0.210000000000000002} = 9.524 \cdot 10^{-3}$$

Діаметр вала якоря

$$D_b = 0.3 \cdot D_a = 0.3 \cdot 0.0884 = 0.027$$

Діаметр розточки полюсів

$$D_i = D_a + 2\delta = 0.0884 + 2 \cdot 0.0006 = 0.09$$

Давжина розточки полюсів

$$l_i = c\chi_\delta \cdot \tau + 2\delta = 0.568 \cdot 0.069 + 2 \cdot 0.0006 = 0.04$$

Центральний кут полюсної дуги

$$\beta = \frac{2l_i}{D_a} = \frac{2 \cdot 0.040392}{0.0884} = 0.914$$

Довжина полюса

$$l_m = l_{aym} - 0.002 = 0.14 - 0.002 = 0.138$$

Площа перерізу полюса

$$B_m = 1.4$$

$$S_m = \frac{\sigma \cdot \Phi_{ym}}{2B_m} = \frac{1.2 \cdot 0.00438950400000000007}{2 \cdot 1.4} = 0.002$$

Висота полюса

$$h_m = 0.5 \cdot (D_j - D_i - 2h_j) = 0.5 \cdot (0.150 - 0.0896000000000000013 - 2 \cdot 0.0095238095238095229) = 0.02068$$

Ширина полюса

$$bb = \frac{\sigma \cdot \Phi_{ym}}{K_c \cdot l_m \cdot 1.7} = 0.024$$

Висота полюсного накінецьника

$$h_{нк} = 0.3 \cdot h_m = 0.3 \cdot 0.02068 = 0.0062$$

Довжина полюсного накінецьника

$$b_{нк} = 0.5 \cdot (cx_\delta \cdot \tau - h_m) = 0.5 \cdot (0.568 \cdot 0.069 - 0.02068) = 9.256 \cdot 10^{-3}$$

Висота осердя якоря

$$h_a = 0.5 \cdot (D_a - 2h - D_b) = 0.5 \cdot (0.0884 - 2 \cdot 0.014012326005907112 - 0.026520000000000002) = 0.017$$

Магнітна індукція в осерді якоря

$$B_a = \frac{cx_\delta \cdot \tau \cdot B_\delta}{2K_c \cdot h_a} = \frac{0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.8}{2 \cdot 0.95 \cdot 0.016927673994092889} = 0.975$$

Магнітна індукція в полюсі

$$b_m = \frac{\sigma \cdot \Phi_{ym}}{B_m \cdot l_m} = \frac{1.2 \cdot 0.00438950400000000007}{1.4 \cdot 0.138} = 0.027$$

$$b_{mym} = \frac{\sigma \cdot cx_\delta \cdot \tau \cdot l_a \cdot B_\delta}{2 \cdot l_j \cdot b_m} = \frac{1.2 \cdot 0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.14 \cdot 0.8}{2 \cdot 0.210000000000000002 \cdot 0.027264000000000004} = 0.46$$

Магнітна індукція в корпусі

$$b_{jym} = \frac{\sigma \cdot cx_\delta \cdot \tau \cdot l_a \cdot B_\delta}{2 \cdot l_j \cdot h_j} = \frac{1.2 \cdot 0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.14 \cdot 0.8}{2 \cdot 0.210000000000000002 \cdot 0.0095238095238095229} = 1.317$$

Довжина середньої магнітної силової в осерді

$$L_a = \left[ \frac{\pi \cdot (D_b + h_a)}{2p} \right] + h_a - 0.5 \cdot b_m =$$

$$= \frac{\pi \cdot (0.026520000000000002 + 0.016927673994092889)}{2 \cdot 2} + 0.016927673994092889 -$$

$$- 0.5 \cdot 0.027264000000000004 = 0.037$$

Довжина середньої магнітної силової в корпусі

$$L_j = \left[ \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2p} \right] + h_j - 0.5 \cdot b_m =$$

$$= \frac{\pi \cdot (0.150 + 0.0095238095238095229)}{2 \cdot 2} + 0.0095238095238095229 -$$

$$- 0.5 \cdot 0.027264000000000004 = 0.121$$

Напруженість магнітного поля для сталі 2411

$$H_a = 10000$$

МРС в осерді якоря

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.037419397352944514 \cdot 10000 = 374.194$$

МРС для корпусу

$$H_j = 10000$$

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0.12118151654197387 \cdot 10000 = 1.212 \cdot 10^3$$

МРС для полюса

$$H_m = 10000$$

$$F_m = 2h_m \cdot H_m = 2 \cdot 0.02068 \cdot 10000 = 413.6$$

МРС для повітряного проміжку на стику полюса з корпусом

$$\delta_{cm} = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$F_{\sigma cm} = \frac{2\sigma \cdot c\chi_\delta \cdot l_{aym} \cdot \delta_{cm} \cdot B_\delta}{\mu_0 \cdot l_m \cdot b_m} = \frac{2 \cdot 1.2 \cdot 0.568 \cdot 0.14 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 0.8}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.138 \cdot 0.027264000000000004} = 1.292 \cdot 10^{-3}$$

Сумарна МРС для полюса

$$F_\Sigma = F_z + F_\delta + F_a + F_m + F_j + F_{\sigma cm} = 544.99304023628451 + 820.67752066068385 + 374.19397352944515 + 413.6 + 1211.8151654197386 + 1291.6922917603097 = 4.657 \cdot 10^3$$

### **Обмотка збудження**

Необхідна МРС збудження з врахуванням розмагнічуючої дії реакції якоря

$$F_b = 1.3 \cdot F_\Sigma = 1.3 \cdot 4656.9719916064623 = 6.054 \cdot 10^3$$

Число витків у котушці

$$a_c = 1$$

$$W_{kc} = \frac{F_b \cdot a_c}{2 \cdot I_a} = 7.584$$

$$W_{kc} = 9$$

Витки на 4 полюси

$$W_{kc4} = W_{kc} \cdot 4 = 36$$

Опір обмотки збудження

$$R_c = R_{cm} - R_{aym} = 0.022549426234519186 - 0.0029913966614173227 = 0.02$$

Опір котушки

$$Z_c = 1$$

$$R_{kc} = \frac{a_c^2 R_c}{Z_c} = \frac{1^2 \cdot 0.019558029573101862}{1} = 0.02$$

Середня довжина витка котушки

$$K_{kcp} = 2(l_m + b_m) + \pi b_k = 2 \cdot (0.138 + 0.027264000000000004) + \pi \cdot 0.019 = 0.39$$

Площа перерізу проводу котушки

$$S_c = \frac{K_t \cdot \rho \cdot I_{kcp} \cdot W_{kc}}{R_{kc}} = \frac{1.2 \cdot 17.83 \cdot 10^{-9} \cdot 0.39021826041820612 \cdot 9}{0.019558029573101862} = 3.842 \cdot 10^{-6}$$

Висота котушки і проводу

$$h_k = h_m - h_{нк} = 0.02068 - 0.0062 = 0.014$$

Висота проводу

$$\Delta b_n = 0.0011$$

$$b_{np} = h_k - 2 \cdot \Delta b_n = 0.01448 - 2 \cdot 0.0011 = 0.012$$

Дійсна ширина, товщина та площа котушки

$$\Delta c = 0.0003 \quad a_{kt} = 2.65 \cdot 10^{-3} \quad b_{kt} = 5 \cdot 10^{-3} \quad s_{ct} = 12.7 \cdot 10^{-6}$$

Уточнене значення ширини котушки

$$b_{квт} = a_{kt} \cdot W_{kc} + \Delta c (W_{kc} - 1) + 2 \Delta b_n = 2.65 \cdot 10^{-3} \cdot 9 + 0.0003 \cdot (9 - 1) + 2 \cdot 0.0011 = 0.028$$

Уточнене значення середньої довжини витка

$$L_{kcp.ym} = 2(l_m + b_m) + \pi \cdot b_{квт} = 2 \cdot (0.138 + 0.027264000000000004) + \pi \cdot 0.02845 = 0.42$$

Уточнене значення опору котушки

$$R_{kc.ym} = \frac{K_t \cdot \rho \cdot L_{kcp} \cdot W_{kc}}{S_{ct}} = \frac{1.2 \cdot 17.83 \cdot 10^{-9} \cdot 0.39021826041820612 \cdot 9}{12.7 \cdot 10^{-6}} = 5.917 \cdot 10^{-3}$$

Уточненне значення опору обмотки

$$R_{c.ym} = \frac{Z_c \cdot R_{kc}}{a_c^2} = \frac{0.019558029573101862}{1^2} = 0.02$$

Маса міді обмотки збудження

$$m_{bc} = 8900 \cdot L_{kcp.ym} \cdot W_{kc4} \cdot S_{ct} = 8900 \cdot 0.41990631099462966 \cdot 36 \cdot 12.7 \cdot 10^{-6} = 1.709$$

Густина струму в обмотці

$$j_{сн} = \frac{K_t \cdot I_a}{2k \cdot a_c \cdot S_a} = \frac{1.2 \cdot 399.123}{2 \cdot 0.5 \cdot 12.7 \cdot 10^{-6}} = 3.771 \cdot 10^7$$

Уточненне значення сумарного опору обмотки якоря

$$R_{ct} = R_a + R_c = 0.013 + 0.019558029573101862 = 0.033$$

Уточненне значення опору кола якоря

$$\Sigma R_{aym} = R_{ct} + R_{\delta} = 0.03255802957310186 + 0.005011 = 0.038$$

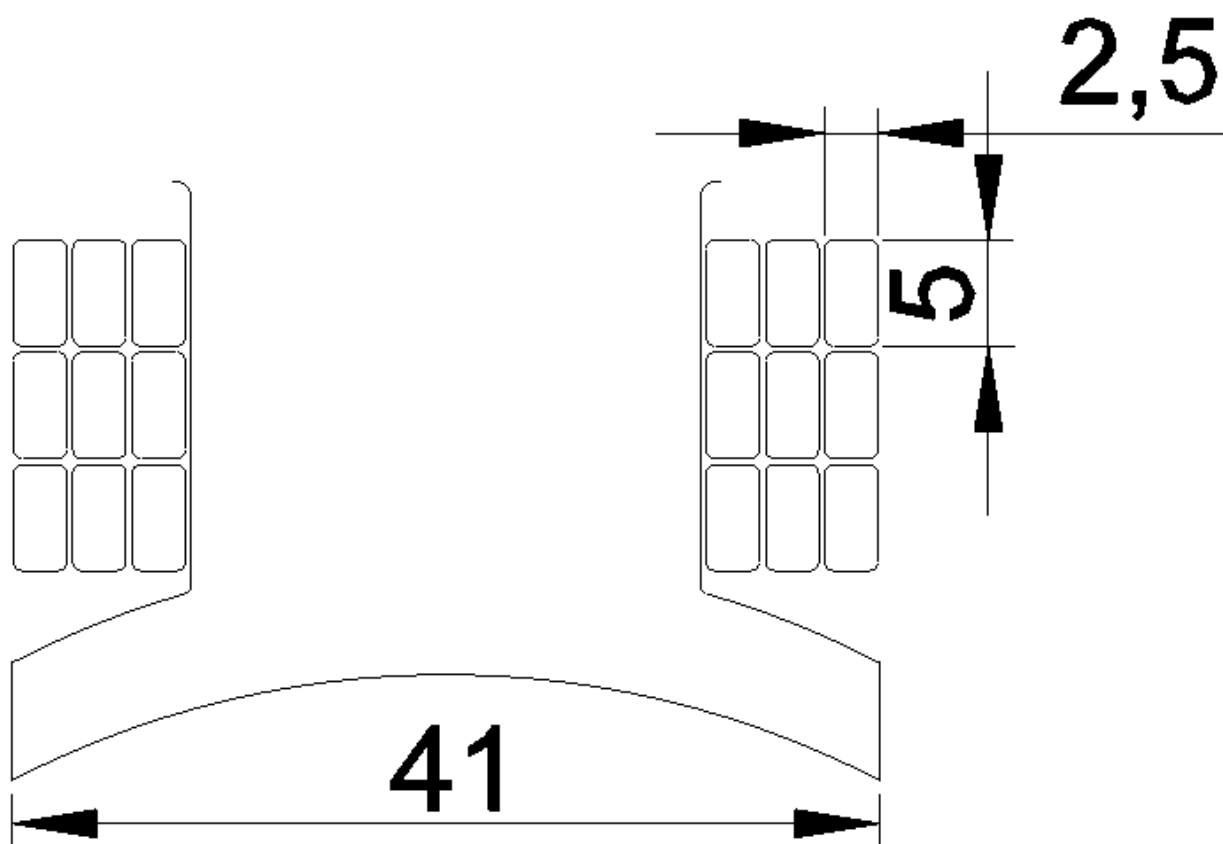


Рисунок 2.3 – Полюс індуктора

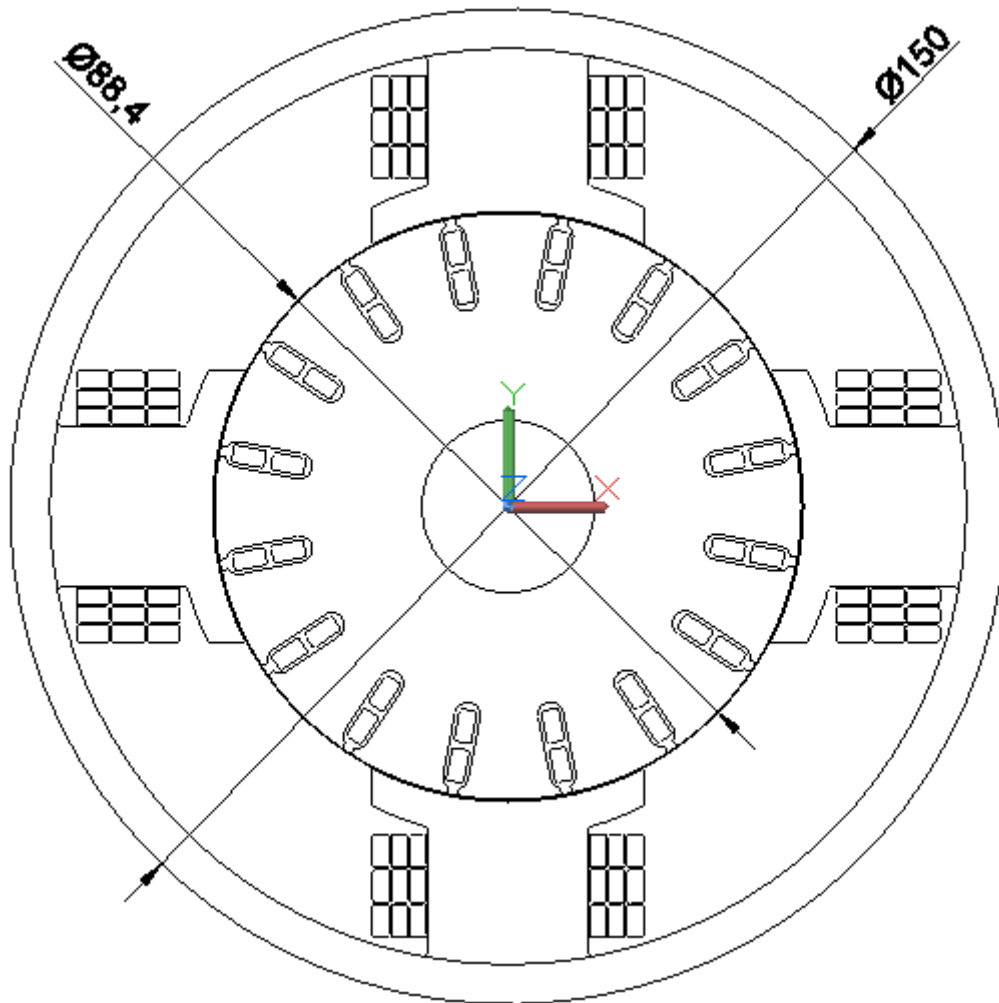


Рисунок 2.4 – Поперечний переріз явнополюсного двигуна

### ***Колектор та щітки***

Діаметр робочої поверхні колектора

$$D_k = 0.6 \cdot D_a = 0.6 \cdot 0.0884 = 0.053$$

Зовнішній діаметр

$$D_n = D_k + 2b + 0.002 = 0.053040000000000004 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 0.002 = 0.065$$

Колекторна поділка

$$\beta_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 0.053040000000000004}{16} = 0.01$$

Ширина колекторної пластини

$$\Delta_{изк} = 0.0006$$

$$b_k = \beta_k - \Delta_{изк} = 0.010414379646650165 - 0.0006 = 9.814 \cdot 10^{-3}$$

Ширина щітки

$$B_{щ} = 1.6\beta_k = 1.6 \cdot 0.010414379646650165 = 0.017$$

Площа перерізу щітки

$$j_{щк} = 85 \cdot 10^4$$

$$S_{щ} = \frac{I_a}{2k \cdot p \cdot j_{щк}} = \frac{399.123}{2 \cdot 0.5 \cdot 2 \cdot 85 \cdot 10^4} = 2.348 \cdot 10^{-4}$$

Довжина щітки

$$L_{щ} = \frac{S_{щ}}{B_{щ}} = \frac{0.00023477823529411765}{0.016663007434640265} = 0.014$$

Уточнене значення густини струму щітки

$$r_t = 1$$

$$j_{щ} = \frac{r_t \cdot I_a}{2k \cdot p \cdot b_{щ} \cdot l_{щ}} = \frac{399.123}{2 \cdot 0.5 \cdot 2 \cdot 0.0125 \cdot 0.05} = 3.193 \cdot 10^5$$

$$\frac{b_{щ}}{b_k} = 1.274$$

Опір щіток

$$R_{щ} = 0.31 \cdot 10^{-2}$$

Довжина робочої поверхні колектора

$$N_{щ} = 1$$

$$l_{ка} = l_{щ} \cdot N_{щ} + 0.006 = 0.05 + 0.006 = 0.056$$

Довжина петушка

$$q = 1.6 \cdot b = 1.5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 8 \cdot 10^{-3}$$

Повна довжина колектора

$$l_k = l_{ка} + q = 0.056 + 0.008 = 0.064$$

Окружна швидкість колектора

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.05304000000000004 \cdot 1300}{60} = 3.61$$

Коефіцієнт магнітної провідності паза

$$h_n = h_2 + 2h_3 = 0.013$$

$$b_{uy} = a_{np} = 1.59 \cdot 10^{-3}$$

$$h_{uy} = 0.8 \cdot 10^{-3}$$

$$l_1 = 1.3 \cdot \tau = 0.09$$

$$v_a = \frac{\pi \cdot D_a \cdot n_n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.0884 \cdot 1300}{60} = 6.017$$

$$\lambda_p = 0.6 \frac{h_n}{2 \frac{b_n}{2}} + \frac{h_{uy}}{b_{uy}} + \frac{l_1}{l_a} + \frac{2.5 \cdot 10^5 \cdot a}{A \cdot l_a \cdot W_c \cdot v_a \cdot p} = 0.6 \frac{0.013237326005907112}{2 \frac{0.00385}{2}} + \frac{0.8 \cdot 10^{-3}}{0.00159} + \frac{0.0897000000000000016}{0.14} + \frac{2.5 \cdot 10^5 \cdot 2.65 \cdot 10^{-3}}{87000 \cdot 0.14 \cdot 6.017197129175651 \cdot 2} = 3.211$$

Реактивна ЕРС

$$l_\delta = l_{aym} = 0.14$$

$$E_p = 2\lambda_p \cdot W_c \cdot l_\delta \cdot A \cdot v_a \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 3.211338586260498 \cdot 0.14 \cdot 87000 \cdot 6.017197129175651 \cdot 10^{-6} = 0.471$$

### **Робочі характеристики**

Сила струму в режимі гальмування

$$I_{kct} = \frac{U_n - \Delta U_{uy}}{\Sigma R_a} = \frac{24-2}{0.027560426234519183309} = 798.246$$

Уточнене значення сили струму при  $P_{mn}$

$$I_{amn} = \frac{I_{kct}}{2} = \frac{798.246}{2} = 399.123$$

Напруга на клеммах стартера

$$U_{st} = U_n - R_\delta \cdot I_a = 24 - 0.005011 \cdot 399.123 = 22$$

МРС збудження на два полюси

$$F_B = 2W_{kc} \frac{I_a}{a_c} = 2 \cdot 9 \cdot \frac{399.123}{1} = 7.184 \cdot 10^3$$

Лінійне навантаження якоря

$$a_e = 1$$

$$A_a = \frac{N_{ym} \cdot I_a}{2a_e \cdot \pi \cdot D_a} = \frac{32 \cdot 399.123}{2 \cdot \pi \cdot 0.0884} = 2.299 \cdot 10^4$$

МРС поперечної реакції якоря

$$F_q = c\chi_\delta \cdot \tau \cdot A_a = 0.568 \cdot 0.069 \cdot 22994.533339969788 = 901.202$$



Магнітна індукція у повітряного проміжку з урахуванням розмагнічуючої дії реакції

$$B_{\delta \max} = 1.6 \quad B_{\delta i} = 1.4 \quad B_{\delta \min} = 1.2$$

$$B_{\delta i} = \frac{1}{6}(B_{\delta \max} + 4B_{\delta i} + B_{\delta \min}) = \frac{1}{6}(1.6 + 4 \cdot 1.4 + 1.2) = 1.4$$

Магнітний потік

$$\Phi = c x_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\text{aym}} \cdot B_{\delta i} = 0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.14 \cdot 1.3999999999999997 = 7.682 \cdot 10^{-3}$$

ЕРС в обмотці якоря

$$E_a = U_n - \Delta U_{\text{щ}} - \Sigma R_a \cdot I_a = 24 - 2 - 0.027560426234519183309 \cdot 399.123 = 11$$

Частота обертання якоря

$$n = \frac{60a \cdot E_a}{p \cdot N_{\text{ym}} \cdot \Phi} = \frac{60 \cdot 11}{2 \cdot 32 \cdot 0.0076816319999999999} = 1.342 \cdot 10^3$$

Електромагнітна потужність

$$P_{\text{emax}} = \frac{(U_n - \Delta U_{\text{щ}})^2}{4R_a} = \frac{(24 - 2)^2}{4 \cdot 0.013} = 9.308 \cdot 10^3$$

Втрати в підшипниках

$$\Delta P_n = 0.03 \cdot P_{\text{emax}} \cdot \frac{n}{n} = 0.03 \cdot 9307.6923076923085 \cdot \frac{1342.4881587662624}{1300} = 288.357$$

Втрати на тертя між щітками та колектором

$$\Phi = 0.25 \quad P_{\text{щ}} = 20 \cdot 10^3$$

$$\Sigma S_{\text{щ}} = 2 \cdot p \cdot N_{\text{щ}} \cdot S_{\text{щ}} = 2 \cdot 2 \cdot 0.00023477823529411765 = 9.391 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta P_{\text{щ}} = v_k \cdot \Phi \cdot P_{\text{щ}} \cdot \Sigma S_{\text{щ}} = 3.6103182775053906 \cdot 0.25 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0.00093911294117647061 = 16.952$$

Сумарні механічні втрати

$$\Delta P_{\text{mex}} = \Delta P_n + \Delta P_{\text{щ}} = 288.35692404269423 + 16.952483080856283 = 305.309$$

Частота перемагнічування

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 1300}{60} = 43.333$$

Діаметр на 1/3 висоти прямокутної ділянки зубця від основи

$$D_{1/3} = D_{2\min} + 2 \frac{h_2}{3} = 0.064225347988185785 + 2 \cdot \frac{0.0093873260059071113}{3} = 0.07$$

Зубцевий крок по  $D_{1/3}$

$$t_{1/3} = \pi \frac{D_{1/3}}{Z} = \pi \frac{0.070483565325457187}{16} = 0.014$$

Ширина взуття по  $D_{1/3}$

$$b_{1/3} = t_{1/3} - b_n = 0.013839415689079536 - 0.00385 = 9.989 \cdot 10^{-3}$$

Магнітна індукція в перерізі зубця по  $D_{1/3}$

$$B_{1/3} = \frac{t_z \cdot B_{\delta i}}{K_c \cdot b_{1/3}} = \frac{0.017 \cdot 1.3999999999999997}{0.95 \cdot 0.0099894156890795345} = 2.508$$

Магнітна індукція в осерді якоря

$$B_a = \frac{c x_{\delta} \cdot \tau \cdot B_{\delta i}}{K_c \cdot 2 h_a} = \frac{0.568 \cdot 0.069 \cdot 1.3999999999999997}{0.95 \cdot 2 \cdot 0.016927673994092889} = 1.706$$

Маса зубцевого шару

$$m_z = 7850 \cdot K_c \cdot l_{aym} \cdot \left[ 0.25 \cdot \pi \cdot (D_a^2 - D_{amin}^2) - z (b_n \cdot h_z + 0.25 \cdot \pi \cdot b_n^2 \cdot a) \right] = 7850 \cdot 0.95 \cdot 0.14 \cdot \\ \cdot \left[ 0.25 \cdot \pi \cdot (0.0884^2 - 0.06^2) - 16 (0.00385 \cdot 0.014012326005907112 + 0.25 \cdot \pi \cdot 0.00385^2) \right] = 2.36$$

Магнітні втрати у зубцевому шарі

$$\Delta = 0.0012$$

$$\Delta P_z = 2 (B_{1/3})^2 \cdot m_z (0.044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) = 2 \cdot 2.5079176158756704^2 \cdot 2.3602664757196492 \cdot \\ \cdot (0.044 \cdot 43.33333333333336 + 2240 \cdot 0.0012^2 \cdot 43.33333333333336^2) = 236.444$$

Маса осердя якоря

$$m_a = 0.25 \cdot \pi \cdot 7850 \cdot K_c \cdot l_{aym} \cdot (D_{amin}^2 - D_b^2) = 0.25 \cdot \pi \cdot 7850 \cdot 0.95 \cdot 0.14 \cdot \\ \cdot (0.06^2 - 0.026520000000000002^2) = 2.375$$

Магнітні втрати в осерді якоря

$$\Delta P_a = 2 (B_a)^2 \cdot m_a (0.044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) = 2 \cdot 1.7059825112151323^2 \cdot 0.83190079999999988 \cdot \\ \cdot (0.044 \cdot 43.33333333333336 + 2240 \cdot 0.0012^2 \cdot 43.33333333333336^2) = 38.562$$

Магнітні втрати

$$\Delta P_{mag} = \Delta P_z + \Delta P_a = 236.44408703981125 + 38.562180152309679 = 275.006$$

Сумарні магнітні та механічні втрати

$$\Delta P_m = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{ел}} = 305.3094071235505 + 275.00626719212096 + 399.123^2 \cdot 0.027560426234519183309 = 4.971 \cdot 10^3$$

Електричні втрати

$$\Delta P_{\text{ел}} = I_a^2 \cdot \Sigma R_a$$

Корисна потужність на валу

$$P_2 = P'_{\text{э max}} - \Delta P = 9307.6923076923085 - 4970.6686743156715 = 4.337 \cdot 10^3$$

Електромагнітний момент

$$M = \frac{9.55 \cdot P'_{\text{э max}}}{n'} = \frac{9.55 \cdot 9307.6923076923085}{1342.4881587662624} = 66.212$$

Корисний момент на валу

$$M_2 = \frac{9.55 \cdot P_2}{n'} = \frac{9.55 \cdot 4337.023633376637}{1342.4881587662624} = 30.852$$

Потужність, що подається до двигуна стартером

$$P_1 = U_{\text{st}} \cdot I_a = 21.999994647 \cdot 399.123 = 8.781 \cdot 10^3$$

Електромагнітний ККД

$$\eta_{\text{эм}} = \frac{P_2}{P'_{\text{э max}}} = \frac{4337.023633376637}{9307.6923076923085} = 0.466$$

ККД двигуна стартера

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{4337.023633376637}{8780.703863494582} = 0.494$$

ККД СЕП

$$\eta_{\text{сеп}} = \frac{P_2}{U_n \cdot I_a} = \frac{4337.023633376637}{24 \cdot 399.123} = 0.453$$

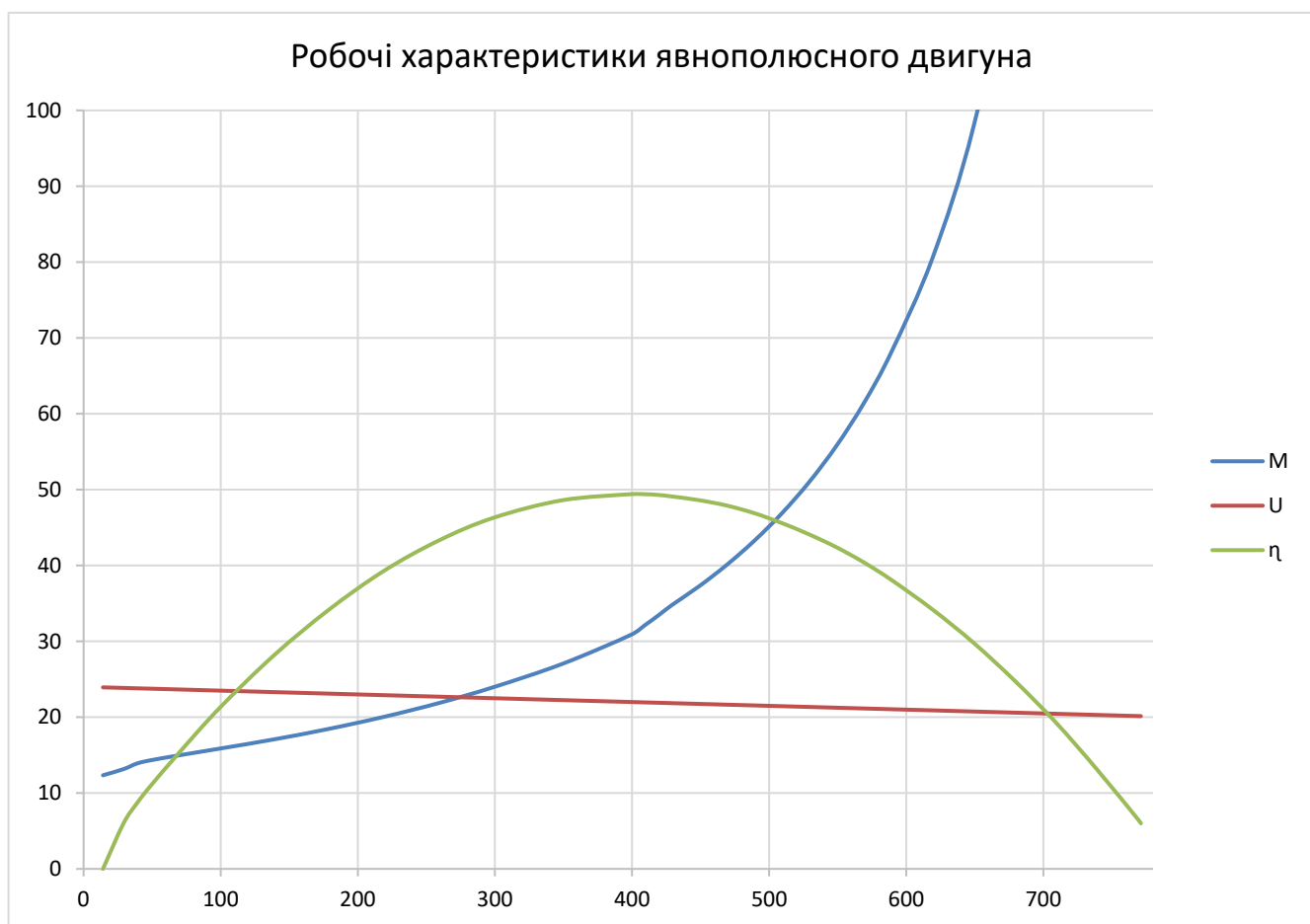


Рисунок 2.5 – Робочі характеристики явнополюсного двигуна

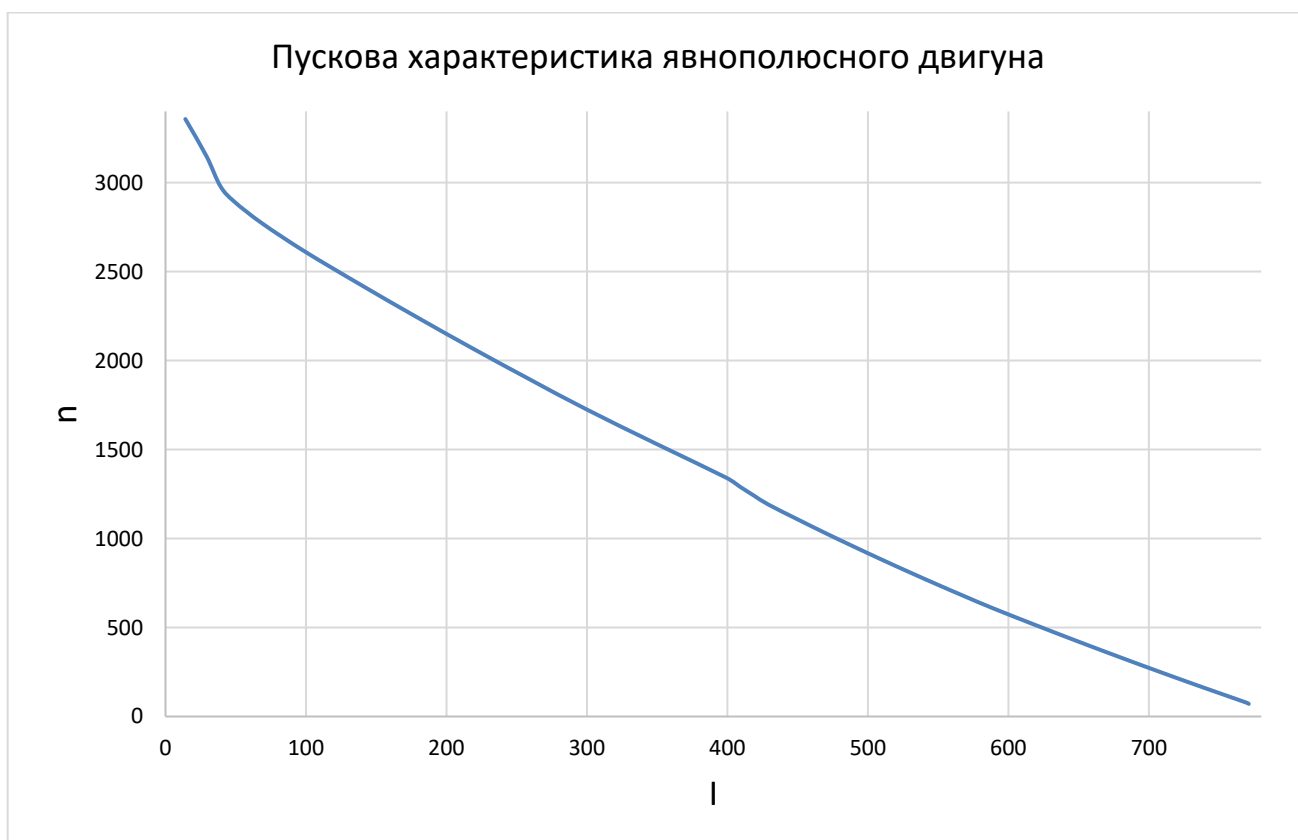


Рисунок 2.6 – Залежність швидкості від струму

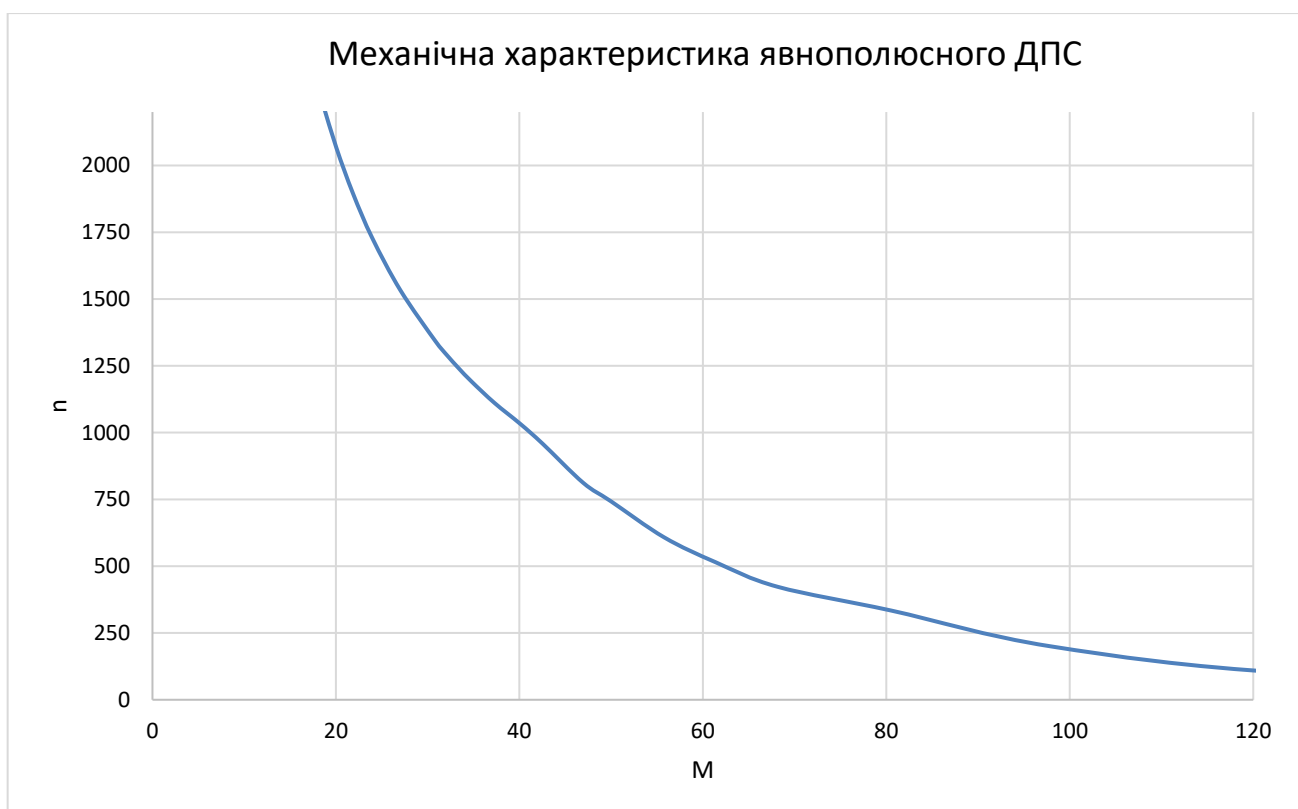


Рисунок 2.7 – Залежність швидкості від моменту

## 2.2 Електромагнітний розрахунок двигуна постійного струму з неявнополюсною конструкцією статора для стартера великовантажного автомобіля [10]

Електромагнітний розрахунок неявнополюсного двигуна постійного струму послідовного збудження виконується при наступних умовах:

1. Конструкції якоря (обмотка, магнітопровід) явно- і неявнополюсних ДПС ідентичні.

2. Вхідні данні явно- і неявнополюсного ДПС є однаковими. Тобто для неявнополюсного двигуна маємо:

$$U_H = 24 \text{ В}$$

$$P_{2H} = 9100 \text{ Вт}$$

$$n_H = 1300 \text{ об / хв}$$

$$p = 2$$

$$a = 1$$

**Розрахункова потужність. Номінальна ємність та внутрішній опір акумуляторної батареї**

$$\eta_{эм} = 0.95 \quad k = 0.5$$

$$P_{эмах} = \frac{P_{2H}}{4 \cdot (1-k) \cdot k \cdot \eta_{эм}} = \frac{9.1 \cdot 10^3}{4 \cdot (1-0.5) \cdot 0.5 \cdot 0.95} = 9.579 \cdot 10^3$$

$$P_{э} = P_{эмах} = 9.579 \cdot 10^3$$

Частота обертання

$$n_{ми} = 0.5 \cdot \frac{n_H}{1-k} = 0.5 \cdot \frac{1300}{1-0.5} = 1.3 \cdot 10^3$$

$$n = n_{ми} = 1.3 \cdot 10^3$$

ЕРС в обмотці якоря

$$\Delta U_{щ} = 2$$

$$E_{амн} = (U_H - \Delta U_{щ}) \cdot (1-k) = (24 - 2) \cdot (1-0.5) = 11$$

$$E_a = E_{амн} = 11$$

Сила струму двигуна

$$I_{амн} = \frac{P_{2H}}{\eta_{эм} \cdot U_H} = \frac{9100}{0.95 \cdot 24} = 399.123$$

Сила струму в обмотці якоря

$$I_a = I_{амн} = 399.123$$

$$x = 0.6$$

Сумарний опір кола якоря

$$\sum R_a = \frac{U_H - \Delta U_{ш} - E_a}{I_a} = \frac{24 - 2 - 11}{399.123} = 0.027560426234519183309$$

Номінальна ємність акумуляторної батареї

$$C_{20} = \frac{P_{эмх}^x}{U_H} = \frac{9.579 \cdot 10^3 \cdot 600 \cdot 10^{-3}}{24} = 239.474$$

$$a_\delta = 0.05$$

$$R_\delta = a_\delta \frac{U_H}{C_{20}} = 0.05 \cdot \frac{24}{237.474} = 5.011 \cdot 10^{-3} \text{ опір акумулятора}$$

Головні розміри двигуна

$$D_a = 0.0884$$

$$A = 87500$$

$$B_\delta = 0.8$$

$$cx_\delta = 0.568$$

Довжина пакета якоря

$$l_a = \frac{6.1 \cdot P_{эмх}}{A \cdot B_\delta \cdot cx_\delta \cdot n_H \cdot D_a^2} = \frac{6.1 \cdot 9578.9473684210526316}{87000 \cdot 0.8 \cdot 0.568 \cdot 1300 \cdot 0.0884^2} = 0.145$$

$$l_a = 0.14$$

Полюсна поділка

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0.0884}{2 \cdot 2} = 0.069$$

Основний магнітний потік

$$\Phi = cx_\delta \cdot \tau \cdot B_\delta \cdot l_a = 0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.8 \cdot 0.14 = 4.39 \cdot 10^{-3}$$

Вибір кількості пазів

$$\pi \frac{D_a}{2 \cdot 10^{-2}} = 13.886$$

$$\pi \frac{D_a}{1 \cdot 10^{-2}} = 27.772$$

Число активних провідників

$$N = 32$$

Число пазів якоря та колекторних пластин

$$Z = 16 \quad K = 16 \quad U_{II} = 2$$

Число витків в секції обмотки

$$W_{cp} = \frac{N}{2 \cdot Z} = \frac{32}{2 \cdot 16} = 1$$

$$W_c = 1$$

Уточнене значення числа активних провідників

$$N_{ym} := 2 \cdot W_c \cdot Z = 2 \cdot 16 = 32$$

Уточнене значення лінійного навантаження

$$A_{ym} = \frac{l_a \cdot N_{ym}}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D_a} = \frac{399.123 \cdot 32}{2 \cdot \pi \cdot 0.0884} = 2.299 \cdot 10^4$$

Уточнене значення довжини пакета якоря

$$l_{aym} = 0.14$$

Відношення довжини якоря до діаметра

$$\lambda = \frac{l_{aym}}{D_a} = \frac{0.14}{0.0884} = 1.584$$

Уточнене значення основного магнітного потоку

$$\Phi_{ym} = c x_{\delta} \cdot \tau \cdot B_{\delta} \cdot l_{aym} = 0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.8 \cdot 0.14 = 4.39 \cdot 10^{-3}$$

Крок обмотки по колектору і результуючий крок

$$Y_k = 1$$

$$Y = Y_k = 1$$

Перший частковий крок

$$Y_1 = \left( \frac{Z}{2 \cdot p} \right) = \frac{16}{2 \cdot 2} = 4$$



Другий частковий крок

$$Y_2 = Y - Y_1 = 1 - 4 = -3$$

На рисунку 2.8 показана схема двошарової петльової обмотки якоря неявнополюсного двигуна.

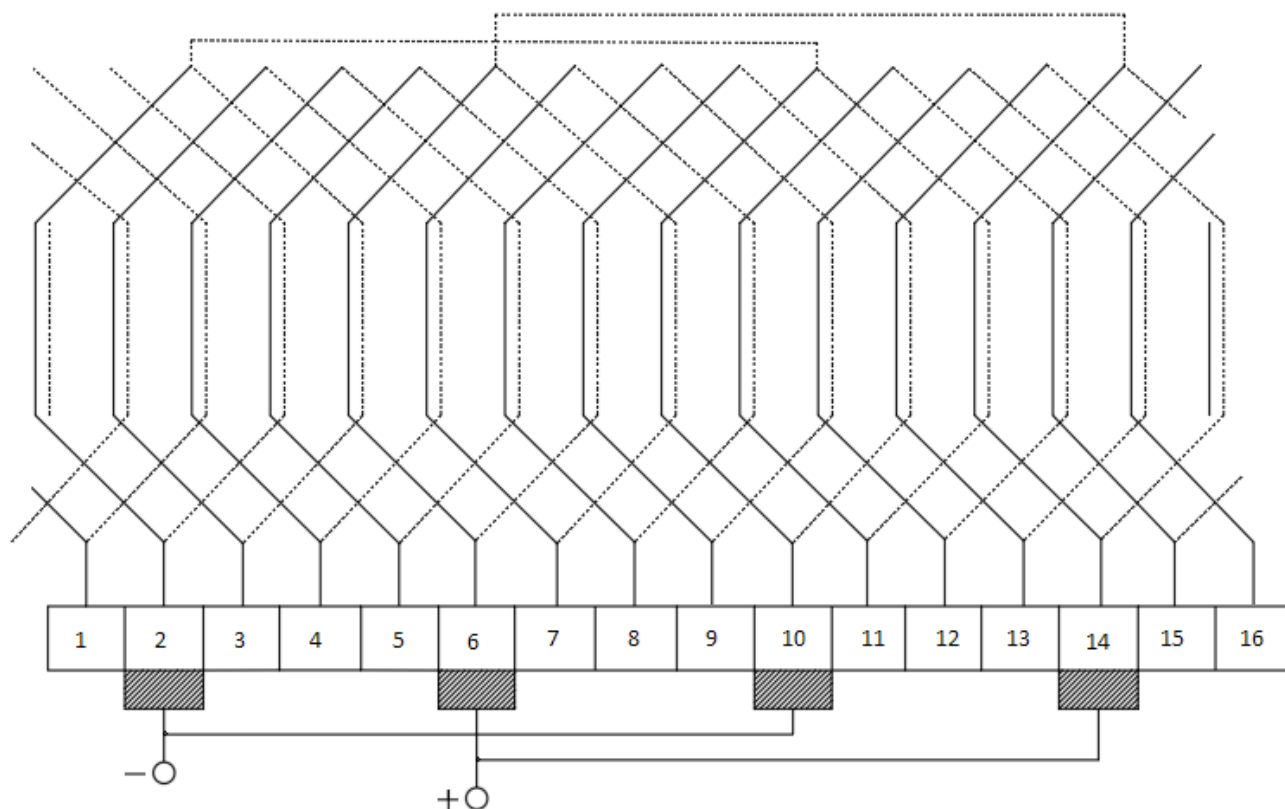


Рисунок 2.8 – Двошарова петльова обмотка якоря

Опір обмотки якоря

$$R_a = 0.55 \cdot (\Sigma R_a - R_\delta) = 0.55 \cdot (0.027560426234519184 - 0.0050109890109890113) = 0.0124$$

$$R_a = 0.013$$

Середня довжина провідника

$$L_{аср} = l_{аум} + 1.3 \cdot \tau = 0.14 + 1.3 \cdot 0.069 = 0.23$$

Площа перерізу провідника розрахункова

$$K_t = 1.2 \quad \rho = 17.83 \cdot 10^{-9}$$

$$S_{арасч} = \frac{K_t \cdot \rho \cdot L_{аср} \cdot N_{ум}}{(2 \cdot a)^2 \cdot R_a} = \frac{1.2 \cdot 17.83 \cdot 10^{-9} \cdot 0.22970000000000002 \cdot 32}{2^2 \cdot 0.013} = 3.02 \cdot 10^{-6}$$

Ширина проводу розрахункова

$$b_{арасч} = \sqrt{\frac{S_{арасч}}{0.49}} = \sqrt{\frac{0.00000302}{0.49}} = 2.483 \cdot 10^{-3}$$

Прийняті значення по стандартам

$$a = 2.65 \cdot 10^{-3} \quad b = 5 \cdot 10^{-3} \quad S_a = 12.7 \cdot 10^{-6}$$

Густина струму в обмотці якоря

$$J_{ан} = 1.821 \cdot 10^7$$

Маса міді обмотки якоря

$$m_a = 8900 \cdot L_{аср} \cdot N_{ym} \cdot S_a = 8900 \cdot 0.22970000000000002 \cdot 32 \cdot 12.7 \cdot 10^{-6} = 0.831$$

### ***Розміри пазу***

Радіус заокруглення проводу

$$r_{прб} = 0.6 \cdot \sqrt{a \cdot b - S_a} = 0.6 \cdot \sqrt{2.65 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} - 12.7 \cdot 10^{-6}} = 0.0004$$

Ширина паза

$$\Delta a = 3 \cdot 10^{-4}$$

$$b_n = a + 2 \cdot 2 \cdot \Delta a = 2.65 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 3.85 \cdot 10^{-3}$$

Ширина прорізі паза

$$a_{пр} = 0.6 \cdot a = 0.6 \cdot 2.65 \cdot 10^{-3} = 1.59 \cdot 10^{-3}$$

На рисунку 2.9 показано переріз паза якоря двигуна постійного струму з неявнополюсним статором.

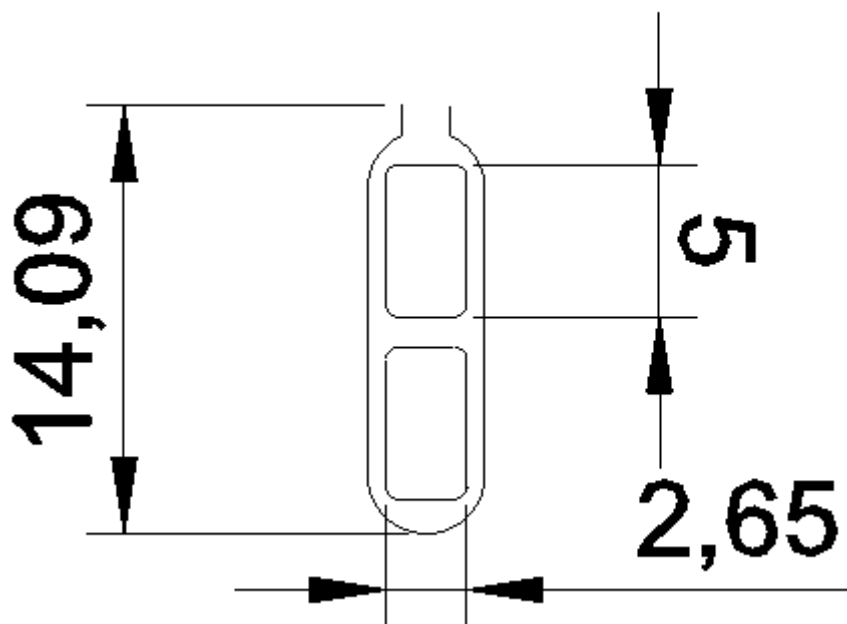


Рисунок 2.9 – Паз якоря

Максимальний діаметр другої ділянки зубцевої зони

$$h_{np} = 0.001$$

$$D_{2max} = D_a - 2 \cdot \left( h_{np} + 0.5 \cdot \sqrt{b_n^2 - a_{np}^2} \right) = 0.0884 - 2 \cdot \left( 0.001 + 0.5 \cdot \sqrt{0.00385^2 - 0.00159^2} \right) = 0.083$$

Висота другої ділянки зубцевої зони

$$h_2 = b_n + 2 \cdot b - 4 \cdot r_{npb} - 0.0003 - 0.0566 \cdot \sqrt{b_n - 2 \cdot r_{npb} - 0.001} = 0.00385 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 0.0004 - 0.0003 - 0.0566 \cdot \sqrt{0.00385 - 2 \cdot 0.0004 - 0.001} = 9.387 \cdot 10^{-3}$$

Мінімальний діаметр другої ділянки зубцевої зони

$$D_{2min} = D_{2max} - 2 \cdot h_2 = 0.083 - 2 \cdot 0.0093873260059071113 = 0.064$$

Відстань між провідниками в пази

$$ON = 0.5 \cdot a - r_{npb} = 0.5 \cdot 2.65 \cdot 10^{-3} - 0.0004 = 9.25 \cdot 10^{-4}$$

$$OK = 0.5 \cdot b_n - \Delta a - r_{npb} = 0.5 \cdot 3.85 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4} = 1.225 \cdot 10^{-3}$$

$$KN = \sqrt{OK^2 - ON^2} = \sqrt{0.0012250000000000002^2 - 0.000925^2} = 8.031 \cdot 10^{-4}$$

$$KF = r_{npb} = 4 \cdot 10^{-4}$$

$$OX = KN + KF = 0.00080311892021045072 + 0.0004 = 0.001203 = 1.203 \cdot 10^{-3}$$

$$1 = h_2 - 2 \cdot (b - OX) = 0.0093873260059071113 - 2 \cdot (5 \cdot 10^{-3} - 0.001203) = 0.00179 = 1.79 \cdot 10^{-3}$$

Висота 3 ділянки зубцевої зони

$$3h = 0.5 \cdot b_n = 0.5 \cdot 0.00385 = 1.925 \cdot 10^{-3}$$

$$h_n = h_2 + 2 \cdot 3h = 0.0093873260059071113 + 2 \cdot 0.001925 = 0.013$$

$$b_{uu} = a_{np} = 1.59 \cdot 10^{-3}$$

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

Мінімальний діаметр якоря

$$D_{a \min} = D_{2 \max} - b_n = 0.064225347988185785 - 0.00385 = 0.06$$

**Магнітний розрахунок. Зубцева зона**

Розрахункові діаметри на трьох ділянках зубцевої зони

$$D_1 = 0.5 \cdot (D_a + D_{2 \max}) = 0.5 \cdot (0.0884 + 0.083) = 0.0857$$

$$D_{2cp} = 0.5 \cdot (D_{2 \max} + D_{2 \min}) = 0.5 \cdot (0.083 + 0.064225347988185785) = 0.074$$

$$D_3 = D_{2 \min} - 0.5 \cdot b_n = 0.064225347988185785 - 0.5 \cdot 0.00385 = 0.0623$$

Висота першої ділянки зубцевої зони

$$h_1 = 0.5 \cdot (D_a - D_{2 \max}) = 0.5 \cdot (0.0884 - 0.083) = 2.7 \cdot 10^{-3}$$

Висота зубця

$$h_z = h_1 + h_2 + h_3 = 0.0027000000000000001 + 0.0093873260059071113 + 0.001925 = 0.014$$

Зубцеві кроки по зовнішньому діаметру якоря і в розрахункових перерізах зубця

$$t_z = \frac{\pi \cdot D_a}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.0884}{16} = 0.017$$

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.0857}{16} = 0.017$$

$$t_{2 \max} = \frac{\pi \cdot D_{2 \max}}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.083}{16} = 0.0163 = 0.016$$

$$t_{2cp} = \frac{\pi \cdot D_{2cp}}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.074}{16} = 0.01453 = 0.015$$

$$t_{2 \min} = \frac{\pi \cdot D_{2 \min}}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.064225347988185785}{16} = 0.013$$

$$t_3 = \frac{\pi \cdot D_3}{Z} = \frac{\pi \cdot 0.0623}{16} = 0.012$$

Ширина зубців

$$b_z = t_z - a_{np} = 0.017 - 0.00159 = 0.015$$

$$b_1 = t_1 - \sqrt{b_n^2 - h_1^2} = 0.017 - \sqrt{0.00385^2 - 0.002700000000000001^2} = 0.014$$

$$b_{2\max} = t_{2\max} - b_n = 0.0163 - 0.00385 = 0.01245 = 0.012$$

$$b_{2cp} = t_{2cp} - b_n = 0.01453 - 0.00385 = 0.01068 = 0.011$$

$$b_{2\min} = t_{2\min} - b_n = 0.012610617588370779 - 0.00385 = 0.0087606 = 8.761 \cdot 10^{-3}$$

$$b_3 = t_3 - 0.866 \cdot b_n = 0.012232576394915257 - 0.866 \cdot 0.00385 = 0.0088985 = 8.899 \cdot 10^{-3}$$

Магнітні індукції в розрахункових перерізах зубця

$$K_c = 0.95$$

$$B_1 = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_1} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.014255459965677311} = 1.004$$

$$B_{z\min} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_{2\max}} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.01245} = 1.15$$

$$B_{z\max} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_{2\min}} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.0087606} = 1.634$$

$$B_{2cp} = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_{2cp}} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.01068} = 1.34$$

$$B_3 = \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_3} = \frac{0.017 \cdot 0.8}{0.95 \cdot 0.0088985} = 1.609$$

Зубцеві коефіцієнти

$$K_{z1} = \frac{t_1}{K_c \cdot b_1} - 1 = \frac{0.017}{0.95 \cdot 0.014255459965677311} - 1 = 0.255$$

$$K_{2\min} = \frac{t_{2\min}}{K_c \cdot b_{2\max}} - 1 = \frac{0.012610617588370779}{0.95 \cdot 0.01245} - 1 = 0.0662$$

$$K_{2cp} = \frac{t_1}{K_c \cdot b_{2cp}} - 1 = \frac{0.017}{0.95 \cdot 0.01068} - 1 = 0.68$$

$$K_{2\max} = \frac{t_1}{K_c \cdot b_{2\min}} - 1 = \frac{0.017}{0.95 \cdot 0.0087606} - 1 = 1.043$$

$$K_3 = \frac{t_1}{K_c \cdot b_3} - 1 = \frac{0.017}{0.95 \cdot 0.0088985} - 1 = 1.011$$

Напруженості магнітного поля в розрахункових перерізах зубця

$$H_{2\min} = 10000$$

$$H_{2cp} = 20000$$

$$H_{2\max} = 30000$$

Середня напруженість на 1, 2 та 3 ділянках

$$H_2 = \frac{1}{6} \cdot (H_{2\min} + 4 \cdot H_{2cp} + H_{2\max}) = \frac{1}{6} \cdot (10000 + 4 \cdot 20000 + 30000) = 2 \cdot 10^4$$

$$H_1 = 10000 \quad H_3 = 30000$$

МРС для першої, другої та третьої ділянки

$$F_{1z} = 2 \cdot h_1 \cdot H_1 = 2 \cdot 0.0027000000000000001 \cdot 10000 = 54$$

$$F_{2z} = 2 \cdot h_2 \cdot H_2 = 2 \cdot 0.0093873260059071113 \cdot 20000 = 375.493$$

$$F_{3z} = 2 \cdot h_3 \cdot H_3 = 2 \cdot 0.001925 \cdot 30000 = 115.5$$

МРС зубцевої зони

$$F_z = F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} = 54.0000000000000021 + 375.49304023628446 + 115.5 = 544.993$$

**Повітряний проміжок**

$$\delta = 0.0006$$

Коефіцієнт повітряного проміжку

$$K_\delta = \frac{t_z + 10 \cdot \delta}{b_z + 10 \cdot \delta} = \frac{0.017 + 10 \cdot 0.0006}{0.015410000000000002 + 10 \cdot 0.0006} = 1.074$$

МРС для повітряного проміжку

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$F_\delta = \frac{2 \cdot K_\delta \cdot \delta \cdot B_\delta}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 1.0742643624474544 \cdot 0.0006 \cdot 0.8}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 820.678$$

Зовнішній діаметр корпусу

$$D_{j1} = 1.5 \cdot D_a = 1.5 \cdot 0.0884 = 0.133$$

$$D_j = 0.140$$

Довжина корпусу

$$l_j = 1.5 \cdot l_{aym} = 1.5 \cdot 0.14 = 0.21$$

Площа розрахункового перерізу корпусу

$$B_j = 1.56 \quad \sigma = 1.15$$

$$S_j = \frac{\sigma \cdot \Phi_{ym}}{2B_j} = \frac{1.2 \cdot 0.00438950400000000007}{2 \cdot 1.5} = 0.002 = 2 \cdot 10^{-3}$$

Товщина корпусу

$$h_j = \frac{S_j}{l_j} = \frac{0.002}{0.210000000000000002} = 9.524 \cdot 10^{-3}$$

Діаметр вала якоря

$$D_b = 0.3 \cdot D_a = 0.3 \cdot 0.0884 = 0.027$$

Висота осердя якоря

$$h_a = 0.5 \cdot (D_a - 2h - D_b) = 0.5 \cdot (0.0884 - 2 \cdot 0.014012326005907112 - 0.026520000000000002) = 0.017$$

Магнітна індукція в осерді якоря

$$B_a = \frac{c\chi_\delta \cdot \tau \cdot B_\delta}{2K_c \cdot h_a} = \frac{0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.8}{2 \cdot 0.95 \cdot 0.016927673994092889} = 0.975$$

Магнітна індукція в корпусі

$$b_{jym} = \frac{\sigma \cdot c\chi_\delta \cdot \tau \cdot l_a \cdot B_\delta}{2 \cdot l_j \cdot h_j} = \frac{1.15 \cdot 0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.14 \cdot 0.8}{2 \cdot 0.210000000000000002 \cdot 0.0095238095238095229} = 1.262$$

Довжина середньої магнітної силової в осерді

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_b + h_a)}{2p} + h_a = \frac{\pi \cdot (0.026520000000000002 + 0.016927673994092889)}{2 \cdot 2} + 0.016927673994092889 = 0.051$$

Довжина середньої магнітної силової в корпусі

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2p} + h_j = \frac{\pi \cdot (0.150 + 0.0095238095238095229)}{2 \cdot 2} + 0.0095238095238095229 = 0.121$$

Напруженість магнітного поля для сталі 2411

$$H_a = 10000$$

МРС в осерді якоря

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.051051397352944519 \cdot 10000 = 510.514$$

МРС для корпусу

$$H_j = 10000$$

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0.12695953490799941 \cdot 10000 = 1.27 \cdot 10^3$$

Сумарна МРС для полюса

$$F_\Sigma = F_z + F_\delta + F_a + F_j = 544.993 + 820.678 + 510.514 + 1.27 \cdot 10^3 = 3.146 \cdot 10^3$$

**Обмотка статора**

Необхідна МРС збудження з врахуванням розмагнічуючої дії реакції якоря

$$F_b = 1.3 \cdot F_\Sigma = 1.3 \cdot 3145.7798835064077 = 4.09 \cdot 10^3$$

Число паралельних витків у фазі статора

$$a_c = 1$$

$$Z_1 = 16 \quad F_{ct} = \sqrt{2} \cdot F_a \quad I_{ct} = I_a$$

Число пазів статора

$$Z_1 = 16$$

Коефіцієнт розподілення статорної обмотки

$$K_p = \frac{\sin\left(\frac{3\pi}{28}\right)}{6 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{56}\right)} = 0.982$$

$$I_{ct} \cdot W_{kc} \cdot K_p = \sqrt{2} \cdot I_a \cdot W_a$$

Число витків обмотки

$$W_{ct} = \sqrt{2} \cdot \frac{16}{0.982} = 23.042$$

$$W_{kc} = 24$$

$$U_{II} = \frac{(W_{kc} \cdot 2)}{Z_1} = \frac{24 \cdot 2}{16} = 3$$

Витків на полюс

$$W_{ct1} = \frac{W_{kc}}{4} = 6$$

Число активних провідників статорної обмотки

$$N_1 = U_{II} \cdot W_{kc} = 3 \cdot 24 = 72$$

Обмотка: одношарова концентрична

На рисунку 2.10 показана схема одношарової концентричної обмотки статора неявнополюсного двигуна.

На рисунку 2.11 показано переріз прямокутного паза статора неявнополюсного двигуна.

На рисунку 2.12 показано поперечний переріз двигуна постійного струму з неявнополюсною конструкцією статора.



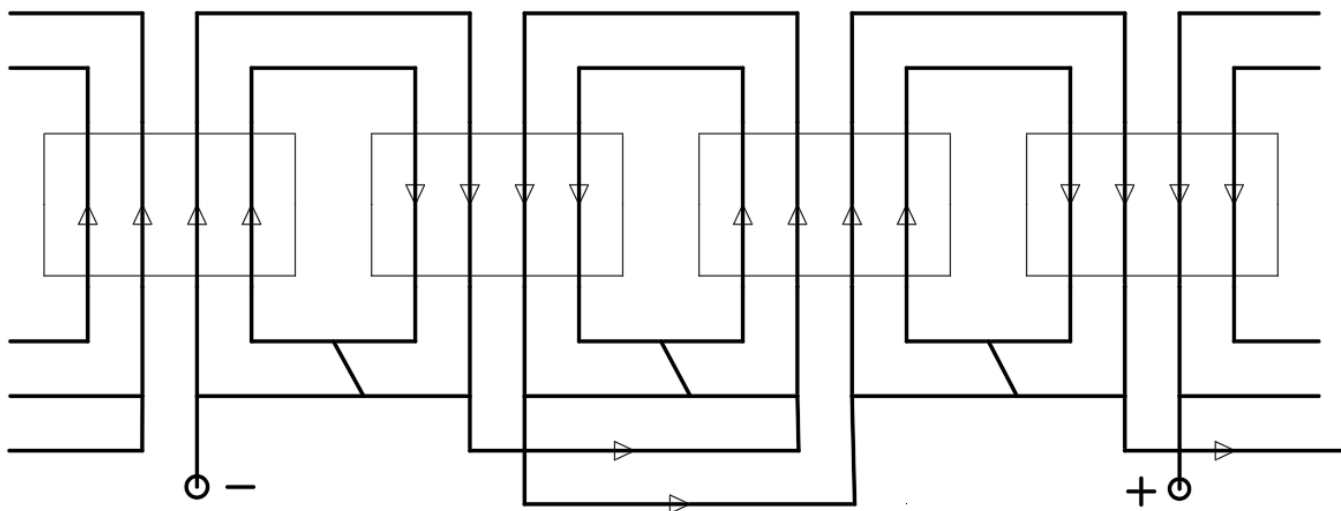


Рисунок 2.10 – Одношарова концентрична обмотка статора

Опір статорної обмотки

$$R_c = R_a \cdot \sqrt{2} = 0.013 \cdot \sqrt{2} = 0.018$$

$$a = 2.65 \cdot 10^{-3} \quad b = 5 \cdot 10^{-3} \quad s_a = 12.7 \cdot 10^{-6}$$

Ширина котушки

$$b_{kt} = \frac{\pi(0.09+0.018)}{4} = 0.085$$

Коефіцієнт вильоту лобових частин

$$k_{\text{л}} = 1.5$$

Довжина лобових частин

$$l_{\text{л}} = k_{\text{л}} \cdot b_{kt} \cdot 2 \cdot 0.25 = 0.064$$

Середня довжина витка

$$l_{cp} = 2(l_a + l_{\text{л}}) = 0.407$$

Маса статорної обмотки

$$m_k = 8900 \cdot l_{cp} \cdot W_{kc} \cdot S_a = 8900 \cdot 0.40723450247038662 \cdot 24 \cdot 12.7 \cdot 10^{-6} = 1.105$$

Густина струму в обмотці

$$j_{\text{сн}} = \frac{K_t \cdot I_a}{2k \cdot a_c \cdot S_a} = \frac{1.2 \cdot 399.123}{2 \cdot 0.5 \cdot 12.7 \cdot 10^{-6}} = 3.771 \cdot 10^7$$

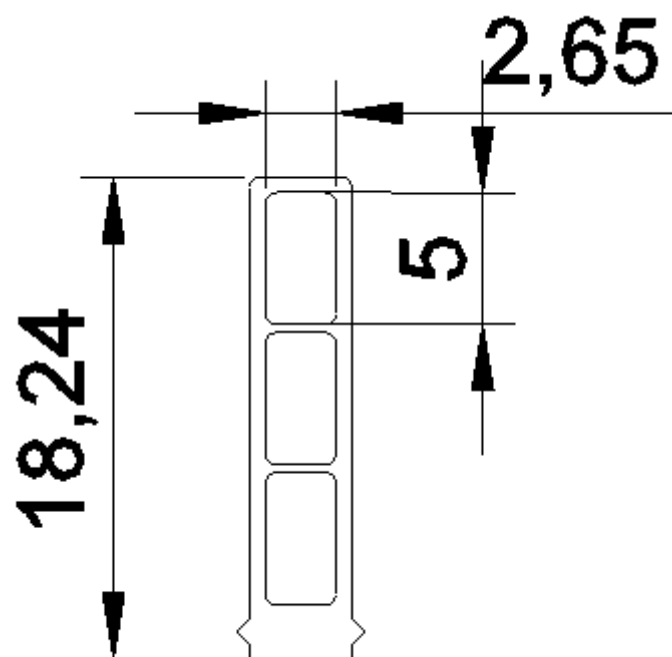


Рисунок 2.11 – Паз статора

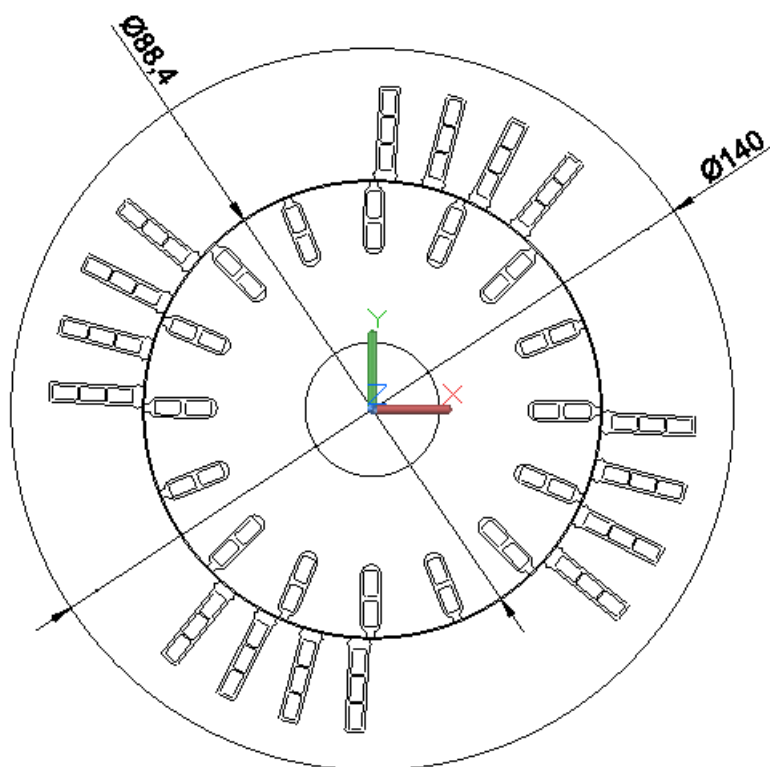


Рисунок 2.12 – Поперечний переріз неявнополюсного двигуна

**Колектор та щітки**

Діаметр робочої поверхні колектора

$$D_k = 0.6 \cdot D_a = 0.6 \cdot 0.0884 = 0.053$$

Зовнішній діаметр

$$D_n = D_k + 2b + 0.002 = 0.053040000000000004 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 0.002 = 0.065$$

Колекторна поділка

$$\beta_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 0.053040000000000004}{16} = 0.01$$

Ширина колекторної пластини

$$\Delta_{изк} = 0.0006$$

$$b_k = \beta_k - \Delta_{изк} = 0.010414379646650165 - 0.0006 = 9.814 \cdot 10^{-3}$$

Ширина щітки

$$B_{щ} = 1.6\beta_k = 1.6 \cdot 0.010414379646650165 = 0.017$$

Площа перерізу щітки

$$j_{щк} = 85 \cdot 10^4$$

$$S_{щ} = \frac{I_a}{2k \cdot p \cdot j_{щк}} = \frac{399.123}{2 \cdot 0.5 \cdot 2 \cdot 85 \cdot 10^4} = 2.348 \cdot 10^{-4}$$

Довжина щітки

$$L_{щ} = \frac{S_{щ}}{B_{щ}} = \frac{0.00023477823529411765}{0.016663007434640265} = 0.014$$

Уточнене значення густини струму щітки

$$r_t = 1$$

$$j_{щ} = \frac{r_t \cdot I_a}{2k \cdot p \cdot b_{щ} \cdot l_{щ}} = \frac{399.123}{2 \cdot 0.5 \cdot 2 \cdot 0.0125 \cdot 0.05} = 3.193 \cdot 10^5$$

Опір щіток

$$R_{щ} = 0.31 \cdot 10^{-2}$$

Довжина робочої поверхні колектора

$$N_{щ} = 1$$

$$l_{ка} = l_{щ} \cdot N_{щ} + 0.006 = 0.05 + 0.006 = 0.056$$

Довжина півника

$$q = 1.6 \cdot b = 1.5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 8 \cdot 10^{-3}$$

Повна довжина колектора

$$l_k = l_{ka} + q = 0.056 + 0.008 = 0.064$$

Окружна швидкість колектора

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.053040000000000004 \cdot 1300}{60} = 3.61$$

Коефіцієнт магнітної провідності паза

$$l_1 = 1.3 \cdot \tau = 0.09$$

$$v_a = \frac{\pi \cdot D_a \cdot n_u}{60} = \frac{\pi \cdot 0.0884 \cdot 1300}{60} = 6.017$$

$$\lambda_p = 0.6 \frac{h_n}{2 \frac{b_n}{2}} + \frac{h_{ui}}{b_{ui}} + \frac{l_1}{l_a} + \frac{2.5 \cdot 10^5 \cdot a}{A \cdot l_a \cdot W_c \cdot v_a \cdot p} = 3.34$$

Реактивна ЕРС

$$l_\delta = l_{aym} = 0.14$$

$$E_p = 2 \lambda_p \cdot W_c \cdot l_\delta \cdot A \cdot v_a \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 3.34 \cdot 0.14 \cdot 87500 \cdot 6.017197129175651 \cdot 10^{-6} = 0.492$$

### ***Робочі характеристики***

Сила струму в режимі гальмування

$$I_{kct} = \frac{U_n - \Delta U_{ui}}{\Sigma R_a} = \frac{24 - 2}{0.027560426234519183309} = 798.246$$

Уточнене значення сили струму при  $P_{mn}$

$$I_{amn} = \frac{I_{kct}}{2} = \frac{798.246}{2} = 399.123$$

Напруга на клеммах стартера

$$U_{st} = U_n - R_\delta \cdot I_a = 24 - 0.005011 \cdot 399.123 = 22$$

МРС збудження на два полюси

$$F_B = 2 W_{ct1} \frac{I_{amn}}{a_c} = 2 \cdot 6 \cdot \frac{399.123}{1} = 4.789 \cdot 10^3$$

Лінійне навантаження якоря

$$a_e = 1$$

$$A_a = \frac{N_{ym} \cdot I_a}{2a_e \cdot \pi \cdot D_a} = \frac{32 \cdot 399.123}{2 \cdot \pi \cdot 0.0884} = 2.299 \cdot 10^4$$

МРС поперечної реакції якоря

$$F_q = c\chi_\delta \cdot \tau \cdot A_a = 0.568 \cdot 0.069 \cdot 22994.533339969788 = 901.202$$

Магнітна індукція у повітряного проміжку з урахуванням розмагнічуючої дії реакції

$$B_{\delta \max} = 1.6 \quad B_{\delta i} = 1.4 \quad B_{\delta \min} = 1.2$$

$$B_{\delta i} = \frac{1}{6}(B_{\delta \max} + 4B_{\delta i} + B_{\delta \min}) = \frac{1}{6}(1.6 + 4 \cdot 1.4 + 1.2) = 1.4$$

Магнітний потік

$$\Phi = c\chi_\delta \cdot \tau \cdot l_{aym} \cdot B_{\delta i} = 0.568 \cdot 0.069 \cdot 0.14 \cdot 1.3999999999999997 = 7.682 \cdot 10^{-3}$$

ЕРС в обмотці якоря

$$E_a = U_n - \Delta U_{ui} - \Sigma R_a \cdot I_a = 24 - 2 - 0.027560426234519183309 \cdot 399.123 = 11$$

Частота обертання якоря

$$n = \frac{60a \cdot E_a}{p \cdot N_{ym} \cdot \Phi} = \frac{60 \cdot 11}{2 \cdot 32 \cdot 0.007681631999999999} = 1.342 \cdot 10^3$$

Електромагнітна потужність

$$P_{\delta \max} = \frac{(U_n - \Delta U_{ui})^2}{4R_a} = \frac{(24 - 2)^2}{4 \cdot 0.013} = 9.308 \cdot 10^3$$

Втрати в підшипниках

$$\Delta P_n = 0.03 \cdot P_{\delta \max} \cdot \frac{n}{n} = 0.03 \cdot 9307.6923076923085 \cdot \frac{1342.4881587662624}{1300} = 288.357$$

Втрати на тертя між щітками та колектором

$$\Phi = 0.25 \quad P_{ui} = 20 \cdot 10^3$$

$$\Sigma S_{ui} = 2 \cdot p \cdot N_{ui} \cdot S_{ui} = 2 \cdot 2 \cdot 0.00023477823529411765 = 9.391 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta P_{ui} = v_k \cdot \Phi \cdot P_{ui} \cdot \Sigma S_{ui} = 3.6103182775053906 \cdot 0.25 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0.00093911294117647061 = 16.952$$

Сумарні механічні втрати

$$\Delta P_{mex} = \Delta P_n + \Delta P_{ui} = 288.35692404269423 + 16.952483080856283 = 305.309$$

Частота перемагнічування

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 1300}{60} = 43.333$$

Діаметр на 1/3 висоти прямокутної ділянки зубця від основи

$$D_{1/3} = D_{2min} + 2 \frac{h_2}{3} = 0.064225347988185785 + 2 \cdot \frac{0.0093873260059071113}{3} = 0.07$$

Зубцевий крок по  $D_{1/3}$

$$t_{1/3} = \pi \frac{D_{1/3}}{Z} = \pi \frac{0.070483565325457187}{16} = 0.014$$

Ширина взуття по  $D_{1/3}$

$$b_{1/3} = t_{1/3} - b_n = 0.013839415689079536 - 0.00385 = 9.989 \cdot 10^{-3}$$

Магнітна індукція в перерізі зубця по  $D_{1/3}$

$$B_{1/3} = \frac{t_z \cdot B'_{\delta i}}{K_c \cdot b_{1/3}} = \frac{0.017 \cdot 1.3999999999999997}{0.95 \cdot 0.0099894156890795345} = 2.508$$

Магнітна індукція в осерді якоря

$$B'_a = \frac{cx_{\delta} \cdot \tau \cdot B'_{\delta i}}{K_c \cdot 2h_a} = \frac{0.568 \cdot 0.069 \cdot 1.3999999999999997}{0.95 \cdot 2 \cdot 0.016927673994092889} = 1.706$$

Маса зубцевого шару

$$m_z = 7850 \cdot K_c \cdot l_{aym} \cdot \left[ 0.25 \cdot \pi \cdot (D_a^2 - D_{amin}^2) - z(b_n \cdot h_z + 0.25 \cdot \pi \cdot b_n^2 \cdot a) \right] = 7850 \cdot 0.95 \cdot 0.14 \cdot \left[ 0.25 \cdot \pi \cdot (0.0884^2 - 0.06^2) - 16(0.00385 \cdot 0.014012326005907112 + 0.25 \cdot \pi \cdot 0.00385^2) \right] = 2.36$$

Магнітні втрати у зубцевому шарі

$$\Delta = 0.0010$$

$$\Delta P_z = 2(B_{1/3})^2 \cdot m_z (0.044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) = 181$$

Маса осердя якоря

$$m_a = 0.25 \cdot \pi \cdot 7850 \cdot K_c \cdot l_{aym} \cdot (D_{amin}^2 - D_b^2) = 2.38$$

Магнітні втрати в осерді якоря

$$\Delta P_a = 2(B'_a)^2 \cdot m_a (0.044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2) = 29.6$$

Магнітні втрати

$$\Delta P_{mag} = \Delta P_z + \Delta P_a = 210.6$$

Сумарні магнітні та механічні втрати

$$\Delta P_m = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{ел}} = 305.3094071235505 + 274.5 + 399.123^2 \cdot 0.027560426234519184 = 4.906 \cdot 10^3$$

Електричні втрати

$$\Delta P_{\text{ел}} = I_a^2 \cdot \Sigma R_a$$

Корисна потужність на валу

$$P_2 = P'_{\text{эmax}} - \Delta P = 9307.6923076923085 - 4970.162407123551 = 4.401 \cdot 10^3$$

Електромагнітний момент

$$M = \frac{9.55 \cdot P'_{\text{эmax}}}{n'} = \frac{9.55 \cdot 9307.6923076923085}{1342.4881587662624} = 66.212$$

Корисний момент на валу

$$M_2 = \frac{9.55 \cdot P_2}{n'} = \frac{9.55 \cdot 4337.5299005687575}{1342.4881587662624} = 31.31$$

Потужність, що подається до двигуна стартером

$$P_1 = U_{\text{ст}} \cdot I_a = 21.999994647 \cdot 399.123 = 8.781 \cdot 10^3$$

ККД двигуна стартера

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{4337.023633376637}{8780.703863494582} = 0.501$$

ККД СЕП

$$\eta_{\text{сеп}} = \frac{P_2}{U_n \cdot I_a} = \frac{4337.023633376637}{24 \cdot 399.123} = 0.459$$

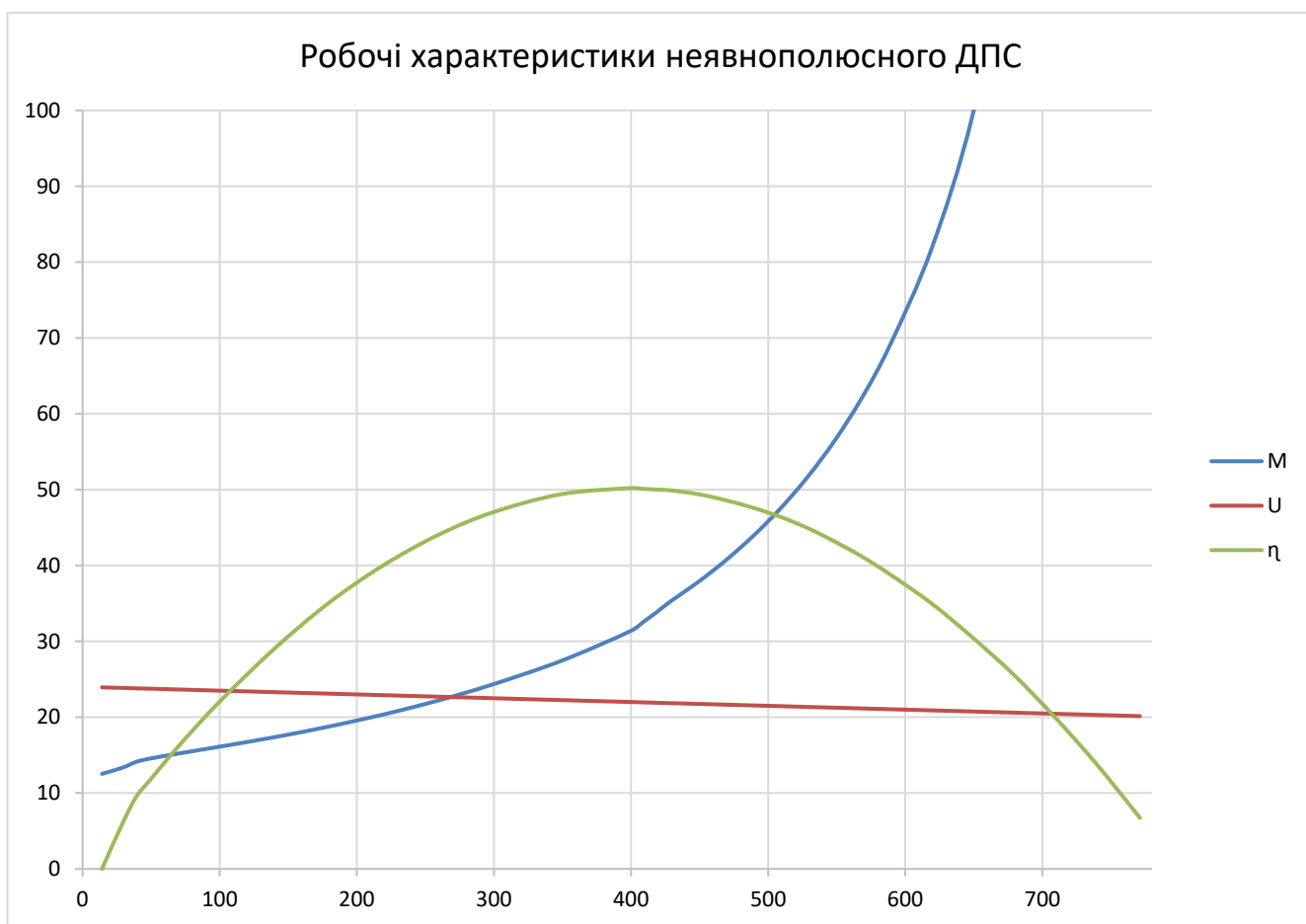


Рисунок 2.13 – Робочі характеристики неявнополюсного двигуна



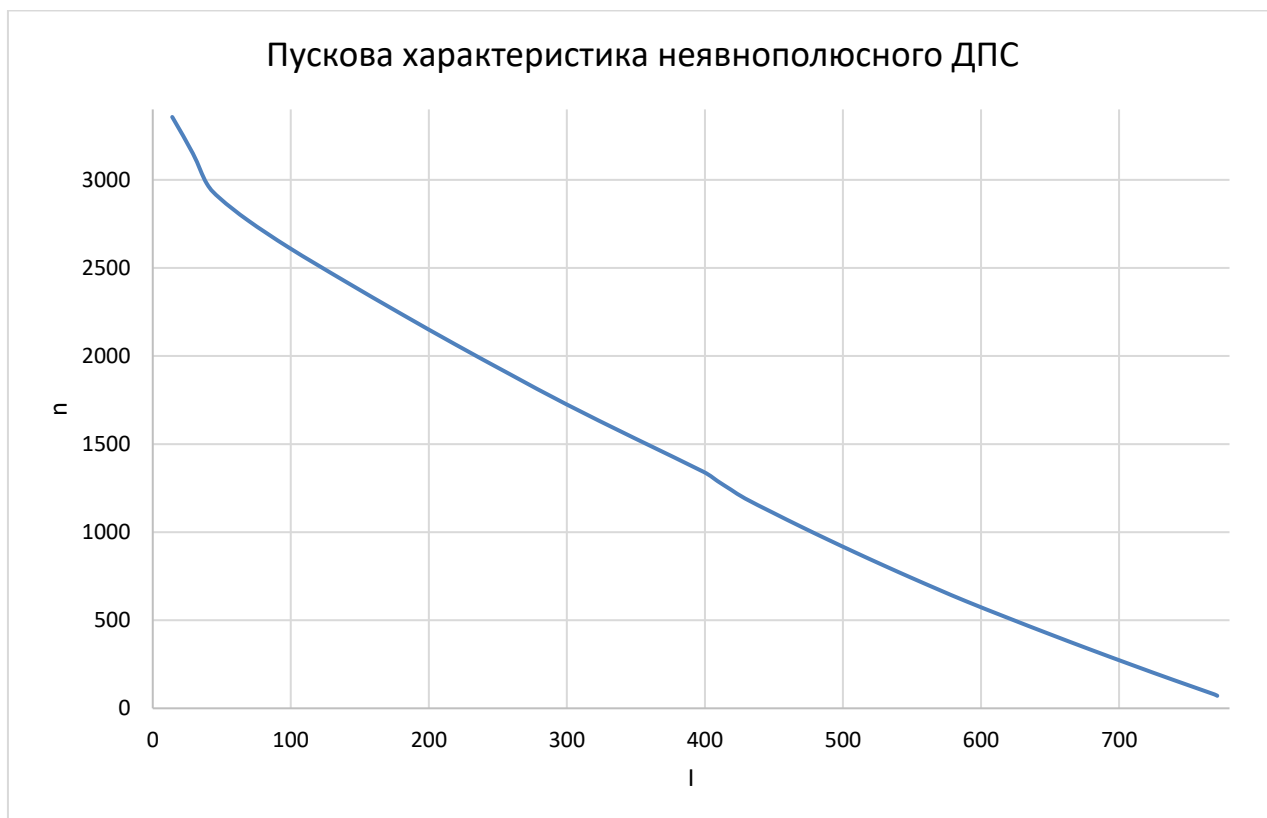


Рисунок 2.14 – Залежність швидкості від струму

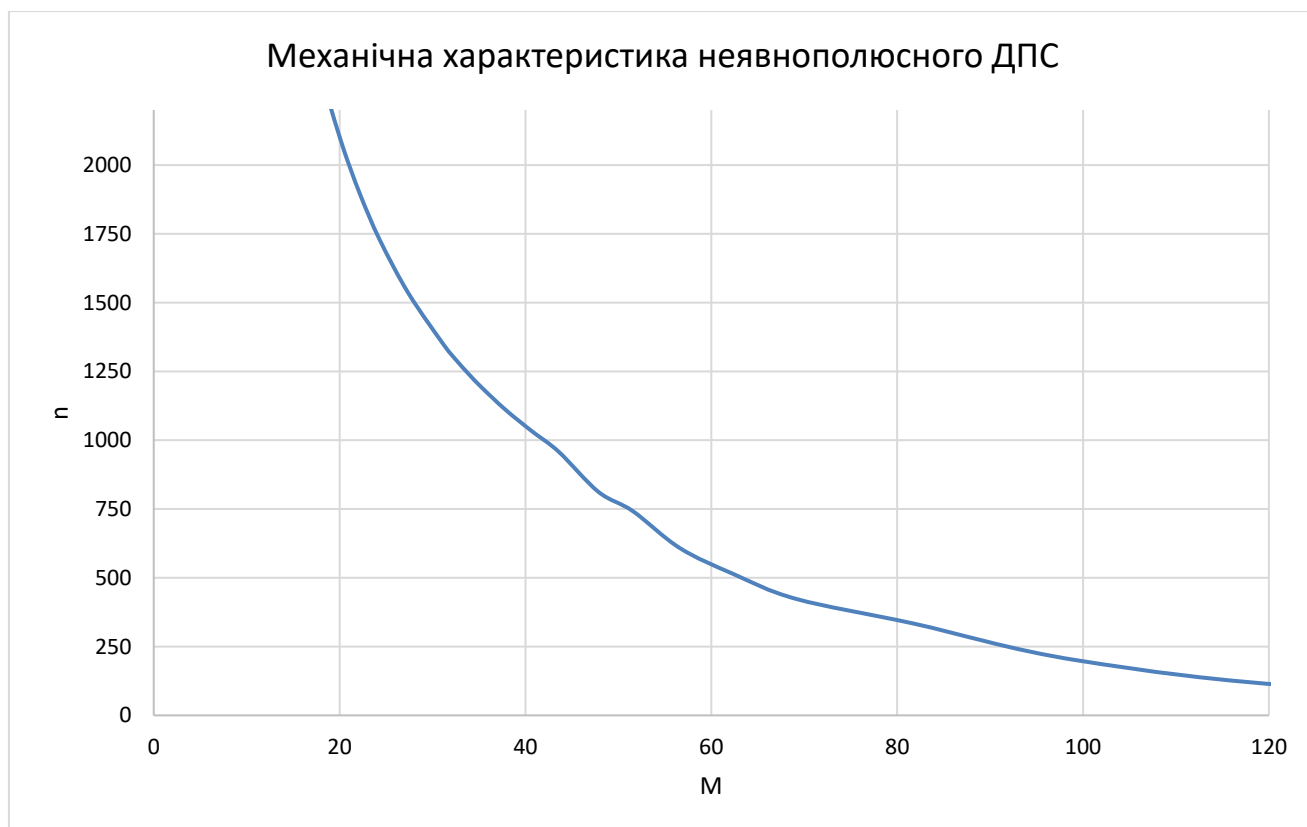


Рисунок 2.15 – Залежність швидкості від моменту

## 2.3 Порівняння розрахованих двигунів

Результати проведених електромагнітних розрахунків наведено нижче в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

|    | Параметр                  | Явнополюсний ДПС | Неявнополюсний ДПС |
|----|---------------------------|------------------|--------------------|
| 1  | Потужність                | 9300 Вт          | 9307 Вт            |
| 2  | ККД ДПС                   | 49.4%            | 50.1%              |
| 3  | ККД стартера              | 45.3%            | 45.9%              |
| 4  | Швидкість обертання       | 1342 об/хв       | 1342 об/хв         |
| 5  | Напруга живлення          | 24 В             | 24 В               |
| 6  | Момент на валу            | 30.85 Нм         | 31.31 Нм           |
| 7  | Номінальний струм         | 399 А            | 399.1 А            |
| 8  | Пусковий струм            | 798 А            | 798 А              |
| 9  | Зовнішній діаметр статора | 150 мм           | 140 мм             |
| 10 | Довжина                   | 140 мм           | 140 мм             |
| 11 | Маса сталі статора        | 8.45 кг          | 8.61 кг            |
| 12 | Маса міді обмотки якоря   | 0.832 кг         | 0.832 кг           |
| 13 | Маса міді обмотки статора | 1.7 кг           | 1.1 кг             |

## 2.4 Висновки до розділу

Порівняльний аналіз розрахункових даних свідчить, що двигун постійного струму неявнополюсної конструкції розраховувався з максимальним наближенням до аналогічного двигуна явнополюсної конструкції. Відсутність значних змін в характеристиках двигунів підтверджує розрахунок, але при цьому ми можемо спостерігати, що при збереженні основних технічних даних ДПС з неявно полюсним статором має менші на 35% витрати міді та дещо більші на 2% витрати електротехнічної сталі. Завдяки зменшенню діаметру на 10 мм (7.1%), неявнополюсна конструкція має кращі габаритні показники.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНИХ ПОЛІВ В АКТИВНІЙ ЗОНІ ДПС

Двигуни постійного струму, що входять до складу стартерів, на відміну від ДПС загального призначення, мають значно менші габарити, від 130мм до 150мм в діаметрі. Такі габарити не дозволяють створити в полюсах пази та вкласти компенсаційну обмотку для компенсації реакції якоря. Це є причиною збільшення кількості витків обмотки збудження, яка створює основний магнітний потік необхідний для нормальної роботи машини, що призводить до значних витрат міді. Інноваційність неявнополюсної конструкції полягає в можливості частково компенсувати потік реакції якоря, а це в свою чергу означає зменшення витрати активних матеріалів.

#### 3.1 Побудова польової математичної моделі

Магнітне поле в активній зоні ДПС описується наступним диференціальним рівнянням відносно векторного магнітного потенціалу  $A_z$  :

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{z \text{ стор}}$$

де  $\mu$  – магнітна проникність,  $J$  – густина струму в обмотках

Дане рівняння розв'язується чисельним методом скінченних елементів, який реалізується в програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics.

Для дослідження розподілу магнітних полів двигунів постійного струму послідовного збудження явнополюсної та неявнополюсної конструкції в програмному забезпеченні AutoCAD побудовано та перенесено в COMSOL Multiphysics моделі поперечного перерізу двигунів.

Виходячи з розрахунків наведених в другому розділі, поперечний переріз представлено на (рис. 3.1 а; б) ДПС з явно вираженими полюсами та ДПС з неявнополюсною конструкцією.

Параметри моделювання:

$$J = 1.7 \cdot 10^7 \text{ A / м}^2$$

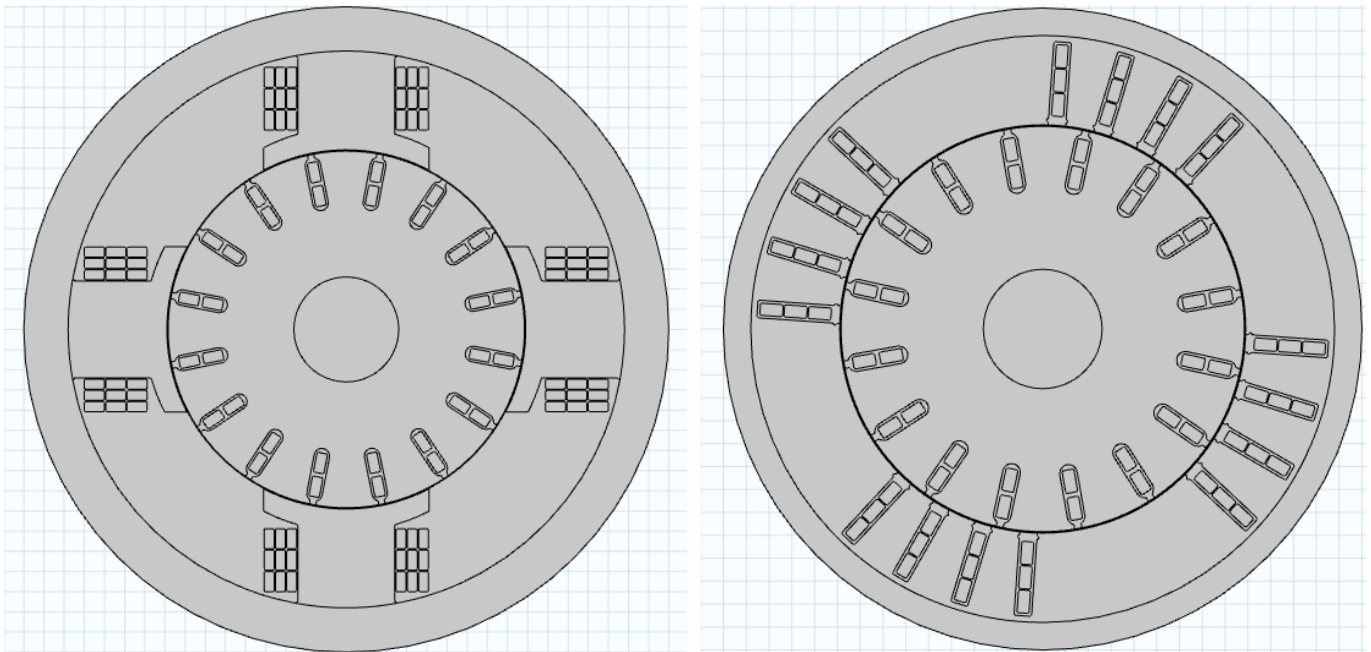
Матеріали:

1 – Повітря (Air) для всіх повітряних проміжків;

2 – Мідь (Copper) для всіх провідників;

3 – Електротехнічна сталь (Soft iron) для ротора, корпусу та полюсів.

Для кожного провідника окремо задано густину струму (рисунок 3.2).



а)

б)

Рисунок 3.1 – Поперечний переріз двигунів з а – явнополюсною; б – неявнополюсною конструкціями

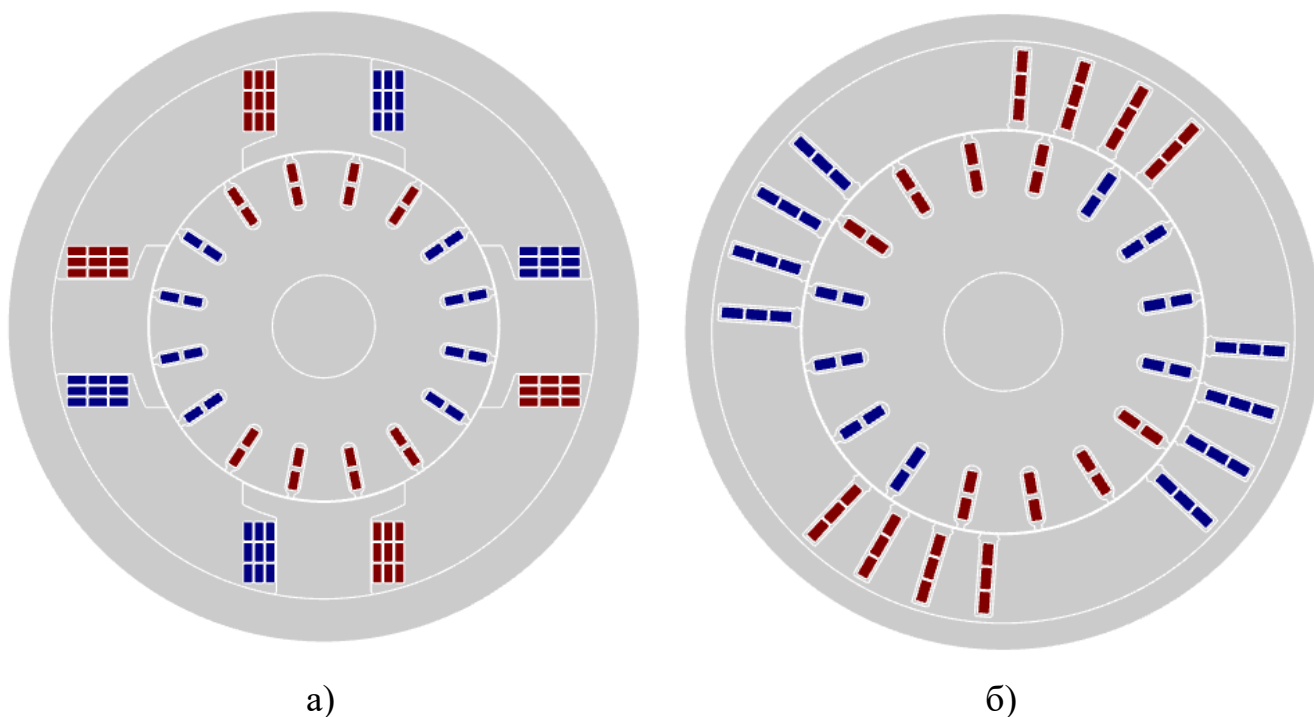


Рисунок 3.2 – Струм в обмотках двигунів з а – явнополюсною; б – неявнополюсною конструкціями

### 3.2 Розподіл індукції та векторного магнітного потенціалу по активній зоні явнополюсного двигуна

На рисунках 3.3 – 3.5 показано розподіл векторного магнітного потенціалу в ДПС з явнополюсним статором в режимах відповідно холостого ходу (XX), режиму реакції якоря і при спільній дії магнітних потоків статора (збудження) і якоря.

З рисунку 3.4 видно, що потік реакції якоря є поперечним, а рис. 3.5 свідчить про нерівномірний розподіл поля уздовж поверхні полюсного наконечника. Зокрема права частина полюсу є насиченою, а ліва – розмагніченою.

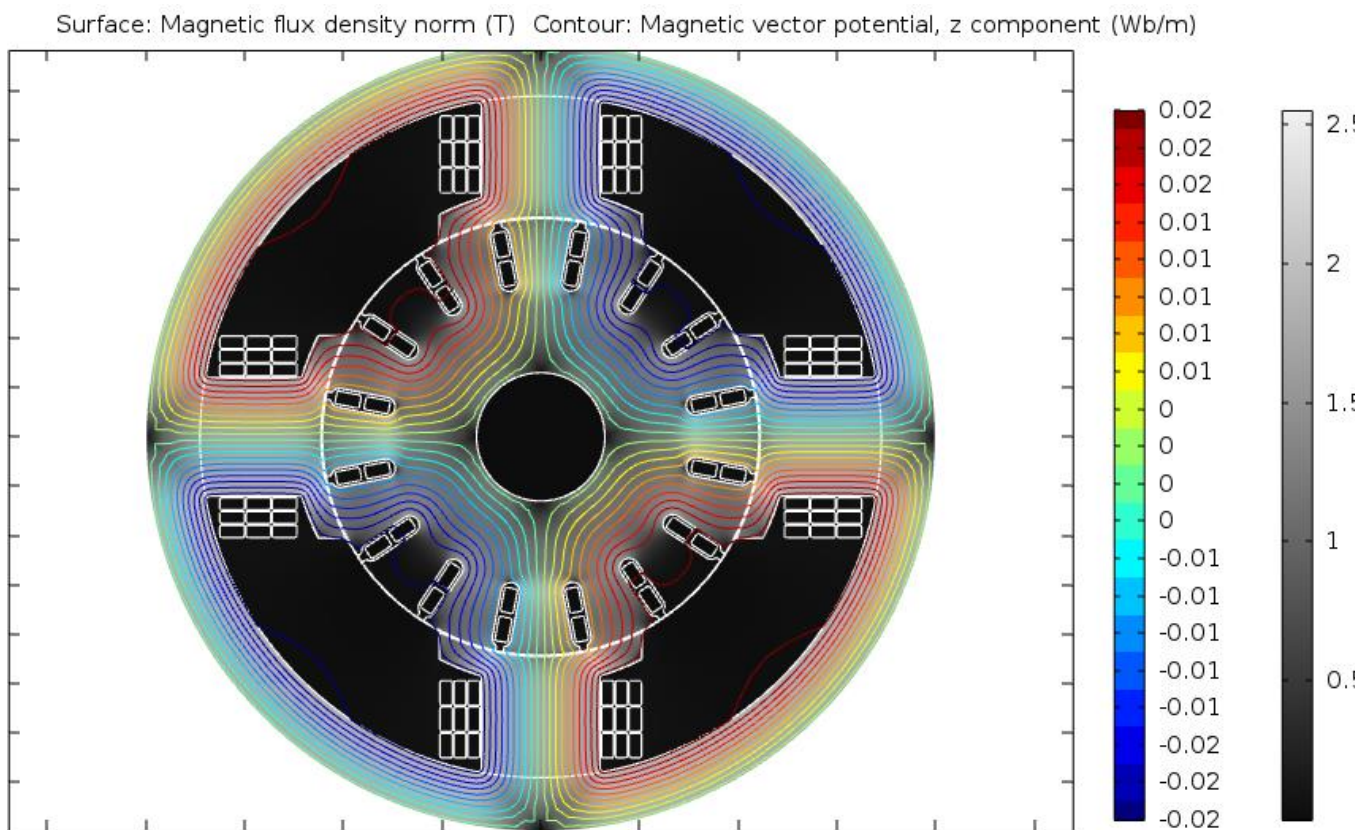


Рисунок 3.3 – Потік збудження явнопольсної машини

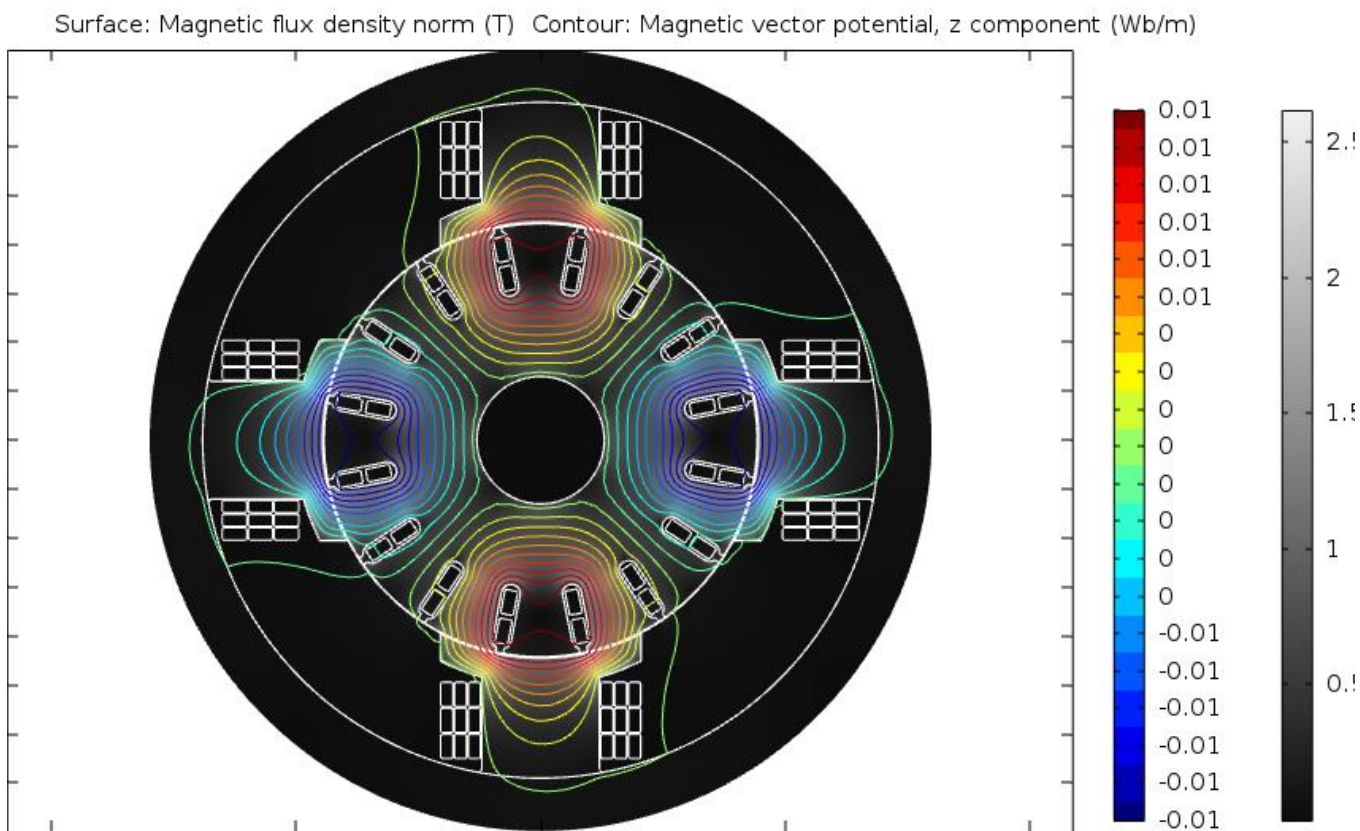


Рисунок 3.4 – Потік реакції якоря явнопольсної машини



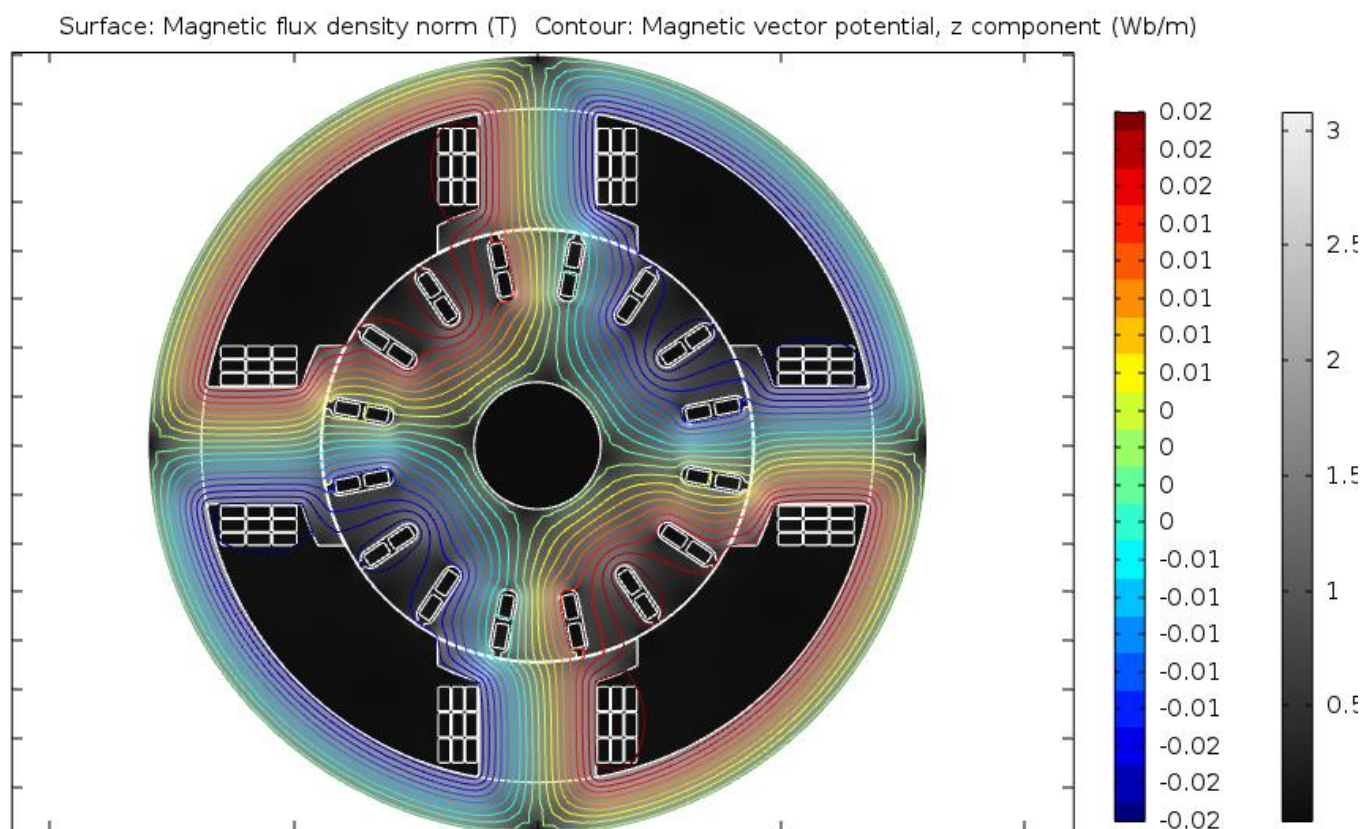


Рисунок 3.5 – Сумарний потік в явнополісній машині

На рисунку 3.6 зображено розподіл магнітної індукції вздовж поверхні полюсного наконечника ДПС, який засвідчує суттєву нерівномірність розподілу магнітної індукції уздовж поверхні полюсу. На одній половині полюсу локальні значення індукції сягають 1.8 Тл, а на іншій 0.6 Тл. Нерівномірне значення розподілу індукції спостерігається по всій довжині полюсу.

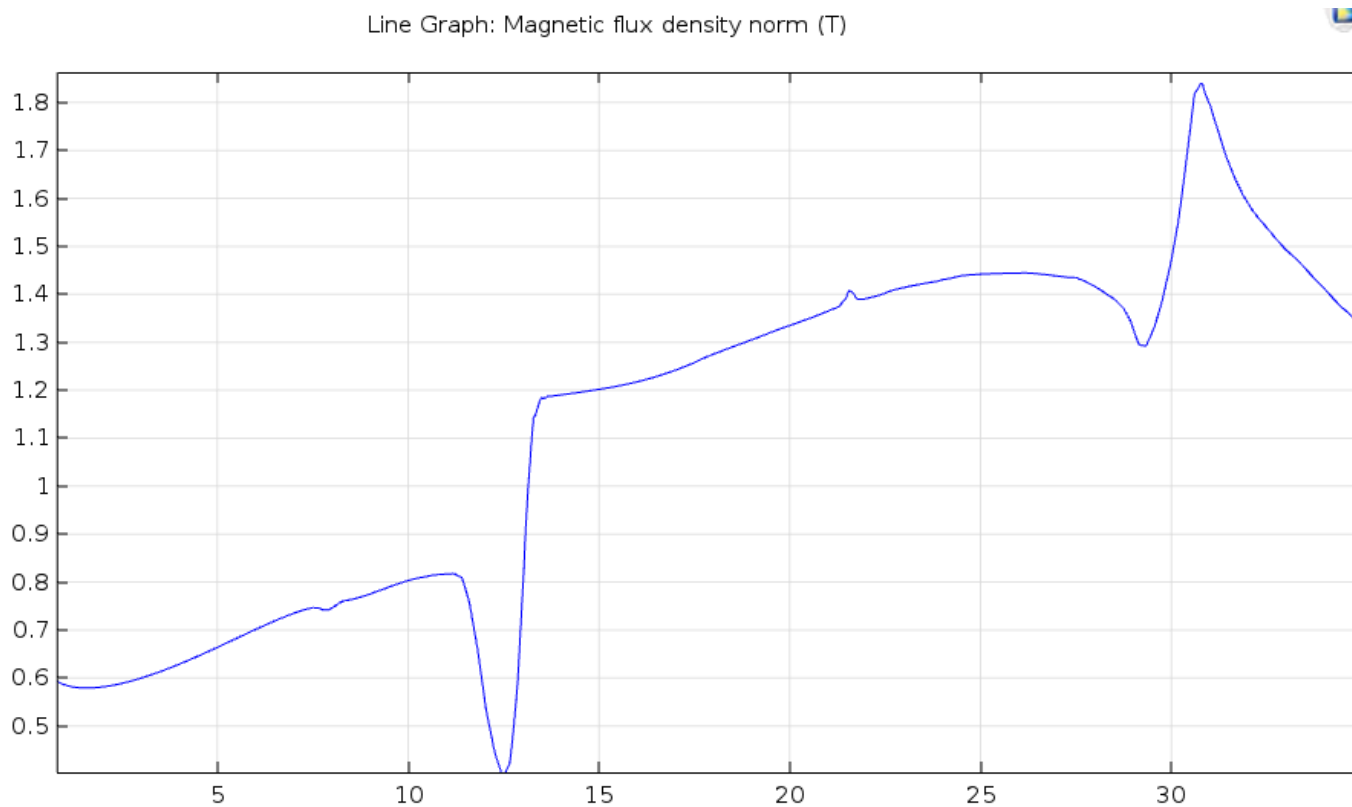


Рисунок 3.6 – Розподіл індукції по полюсу явнополюсної машини



### 3.3 Розподіл індукції та векторного магнітного потенціалу по активній зоні неявнополюсного двигуна

На рисунках 3.7 – 3.9 показано розподіл векторного магнітного потенціалу в ДПС з неявнополюсним статором в режимах холостого ходу (ХХ), режиму реакції якоря і при спільній дії магнітних потоків статора (збудження) і якоря.

З рисунку 3.7 видно, що потік обмотки статора проходить через середину необмотаної частини осердя статора, яка утворює магнітний полюс. Потік реакції якоря є поперечним (рисунок 3.8) і проходить через середину обмотаної частини осердя статора.

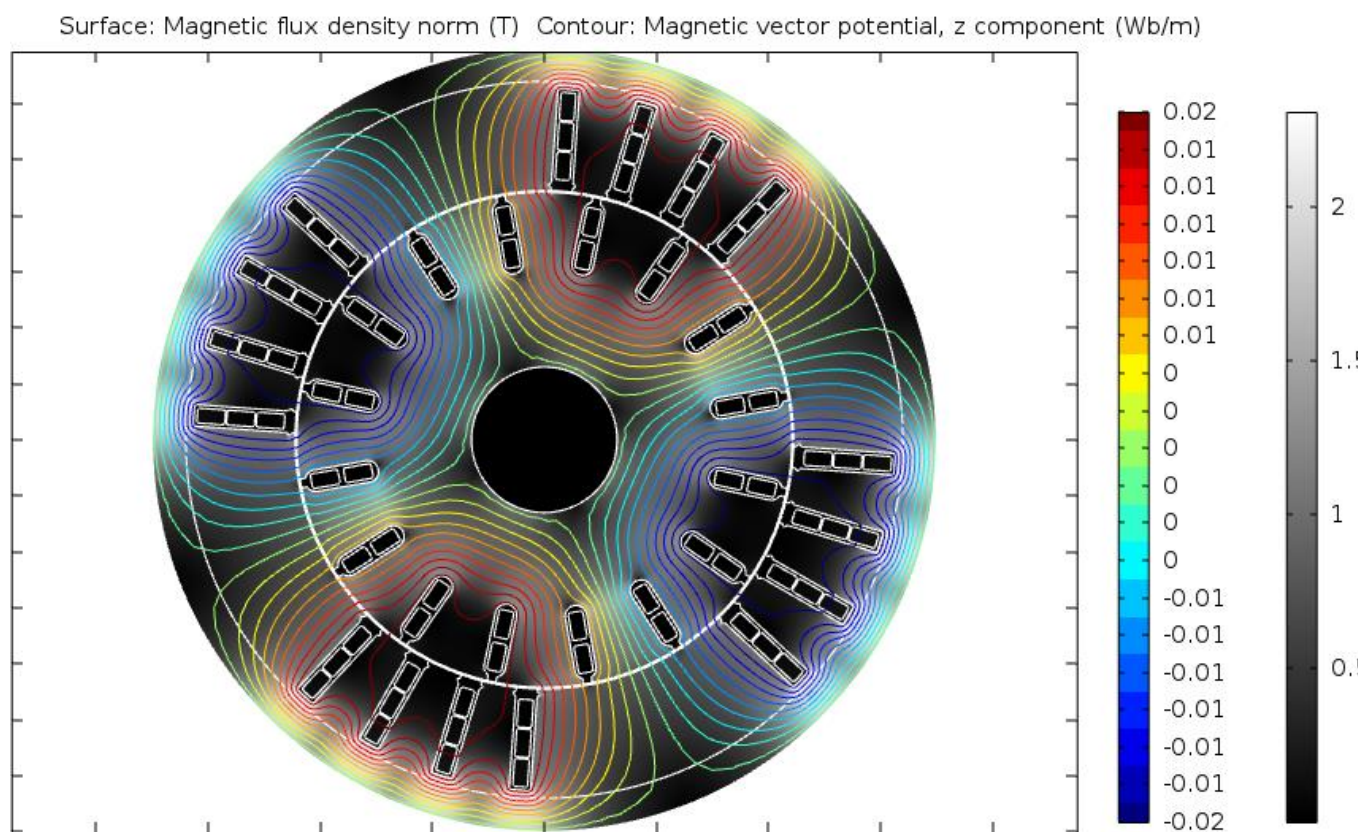


Рисунок 3.7 – Потік збудження неявнополюсної машини

На рис. 3.9 можна спостерігати спільну дію потоків реакції якоря і статора – результуючий потік, та їх вплив на індукцію в окремих зонах поперечного перерізу двигуна.

Surface: Magnetic flux density norm (T) Contour: Magnetic vector potential, z component (Wb/m)

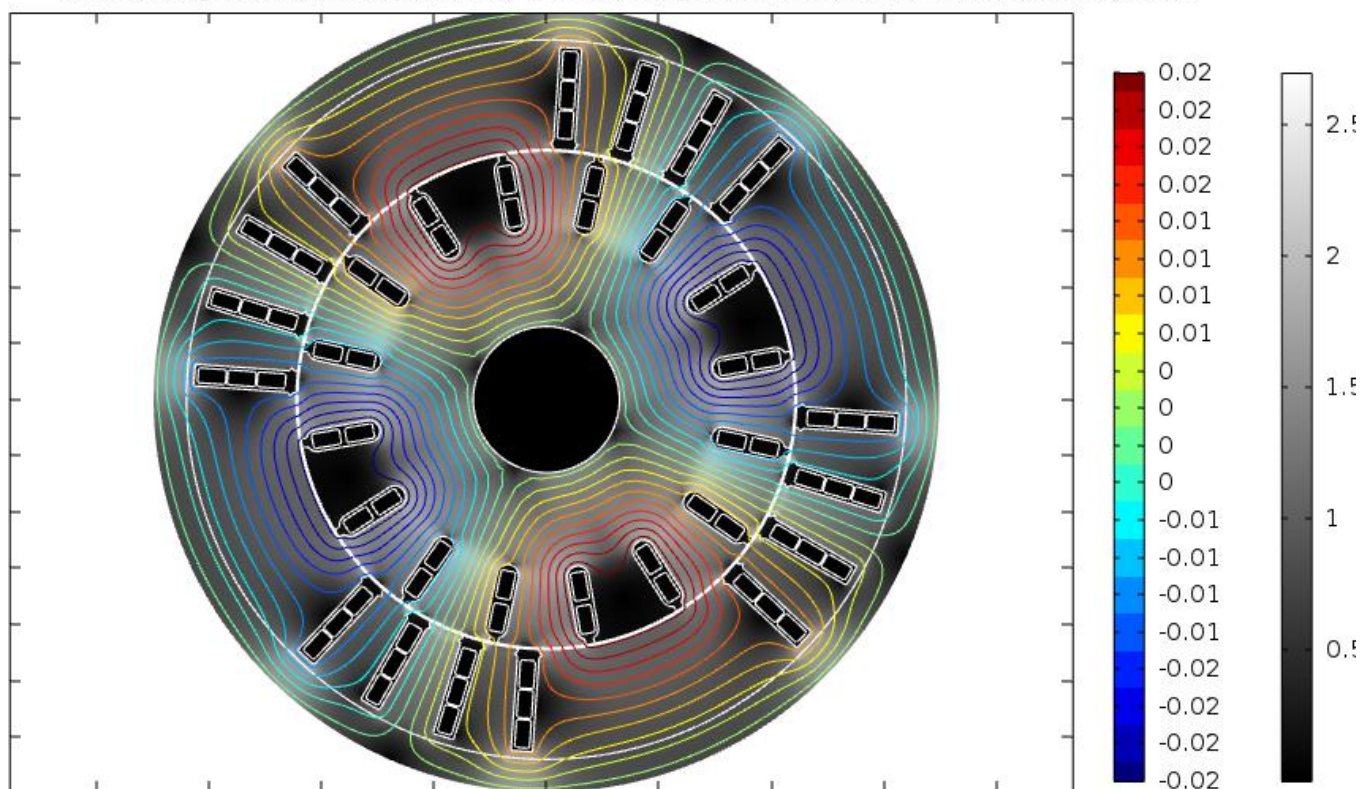


Рисунок 3.8 – Потік реакції якоря неявнополісної машини

Surface: Magnetic flux density norm (T) Contour: Magnetic vector potential, z component (Wb/m)

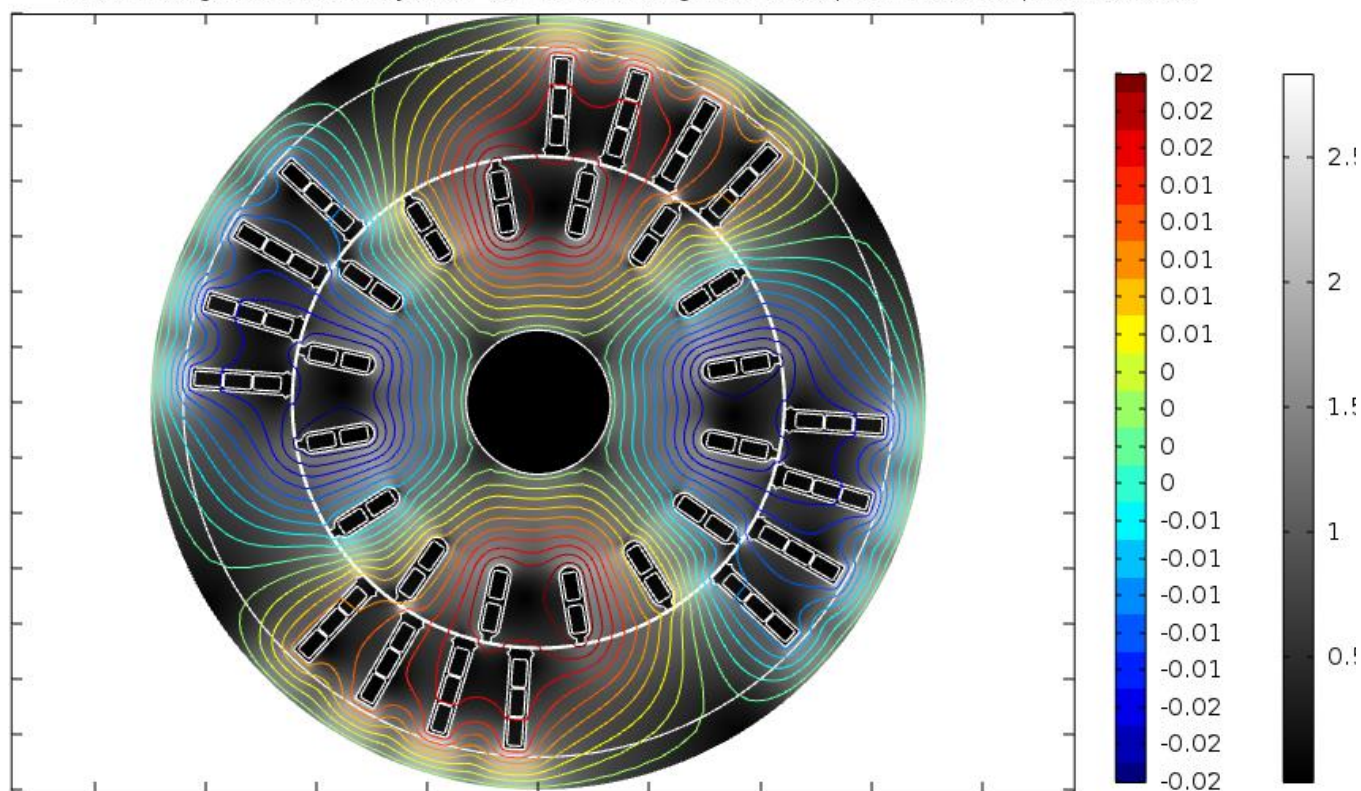


Рисунок 3.9 – Сумарний потік в неявнополісній машині

На рисунку 3.10 зображено розподіл магнітної індукції вздовж поверхні індуктора без пазів, яка в нашому випадку формує полюс. З графіку видно, що на полюсі присутня зона рівномірного розподілу індукції величиною 1 Тл. При цьому є зони мінімального 0.4 Тл, та максимального 1.9 Тл значень індукції.

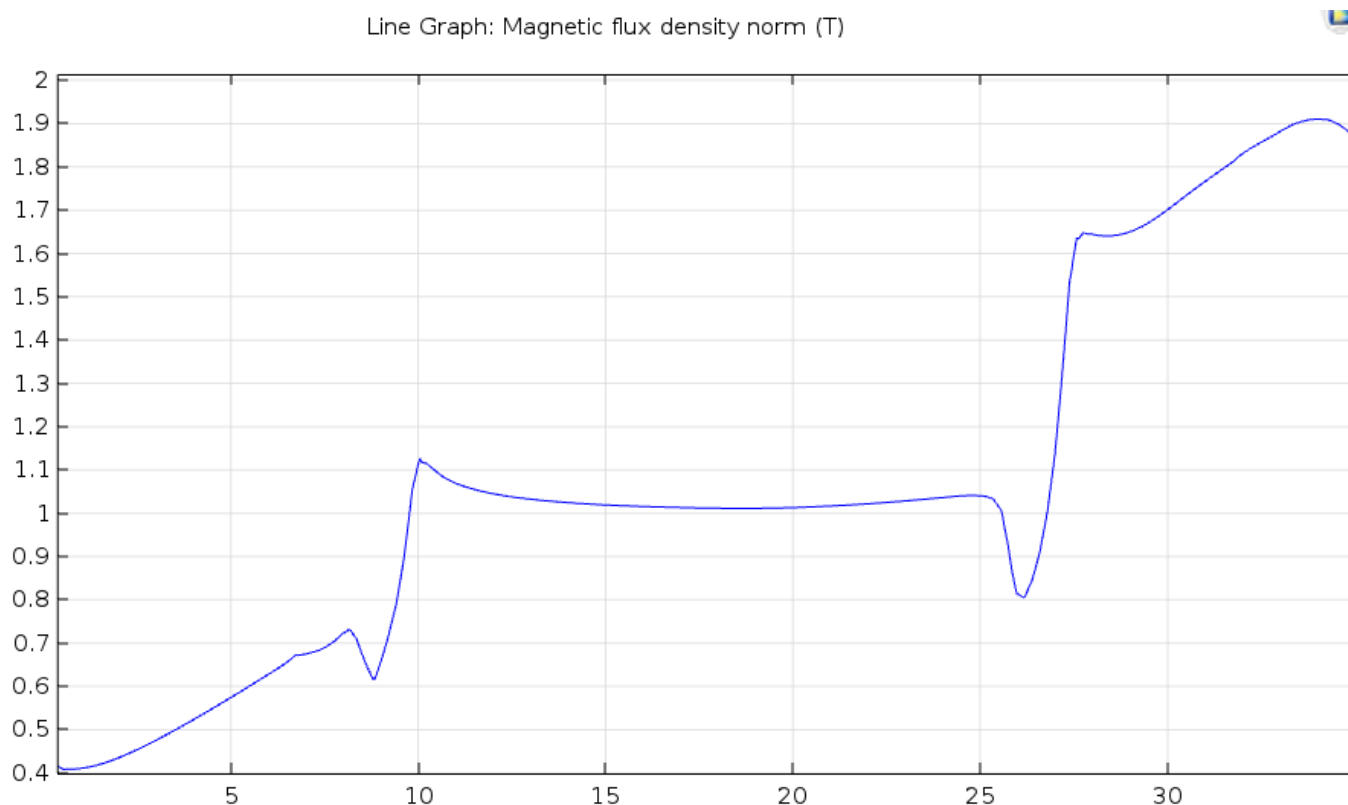


Рисунок 3.10 – Розподіл індукції по полюсу неявнополюсної машини

### 3.3 Висновки до розділу

Порівнюючи отримані результати можна зробити висновки, що в машині постійного струму з явнополюсною конструкцією потік реакції якоря не скомпенсований і замикається по полюсному наконечнику, що в свою чергу негативно впливає на роботу ДПС. В двигуні з неявнополюсною конструкцією при порівнянні (рисунок 3.7 - 3.8) видно компенсацію (рисунок 3.9) реакції якоря, забезпечену раціональним розташуванням інтегрованої обмотки на половинях полюсних поділок індуктора. При цьому негативний вплив реакції якоря не може бути скомпенсований повністю (рисунок 3.6, 3.10) спостерігається підмагнічення одного краю полюса та розмагнічення іншого. Але при цьому неявнополюсний двигун має більш рівномірний розподіл індукції уздовж полюсу.



## 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПУСКУ ДПС В СКЛАДІ СТАРТЕРУ АВТОМОБІЛЯ

Двигуни постійного струму, що входять до складу стартера, на відміну від електричних машин загального призначення не можуть працювати в тривалому режимі, та розраховані на короткочасну роботу в декілька секунд. Цього цілком достатньо для пуску основного двигуна внутрішнього згорання. В даному розділі розглянуто процес пуску електричної машини в нормальному режимі з допустимим навантаженням на валу, та в режимі короткого замикання, коли навантаження на валу значно перевищує допустимі значення.

### 4.1 Побудова математичної моделі

Для дослідження процесу пуску двигуна постійного струму послідовного збудження в програмному забезпеченні MATLAB-Simulink створена модель (рисунок 4.4), яка включає в себе елементи Simulink library, розраховані та задані параметри двигуна і моменту навантаження.

Модель двигуна постійного струму послідовного збудження (рисунок 4.1) містить:

- 1 – джерело для завдання моменту навантаження  $M_n$  у вигляді постійного сигналу (Constant);
- 2 – блок вибору рішення для схеми (Powergui);
- 3 – двигун постійного струму (DC\_Motor);
- 4 – джерело постійної напруги ланцюга якоря  $E$  і ланцюга збудження  $E_f$  (DC Voltage Source);
- 5 – блок, що відображає кінцеві значення після проходження процесу (Display);
- 7 – блоки для спостереження (вимірювання) значень кутової швидкості ротора ( $w$ ), струму якорного ланцюга ( $I_a$ ), струму ланцюга збудження ( $I_f$ ), електромагнітного моменту, що розвивається двигуном  $M_{дв}$ , позначений на моделі як  $T_e$ ;
- 8 – блок BUSselector для поділу сигналів.

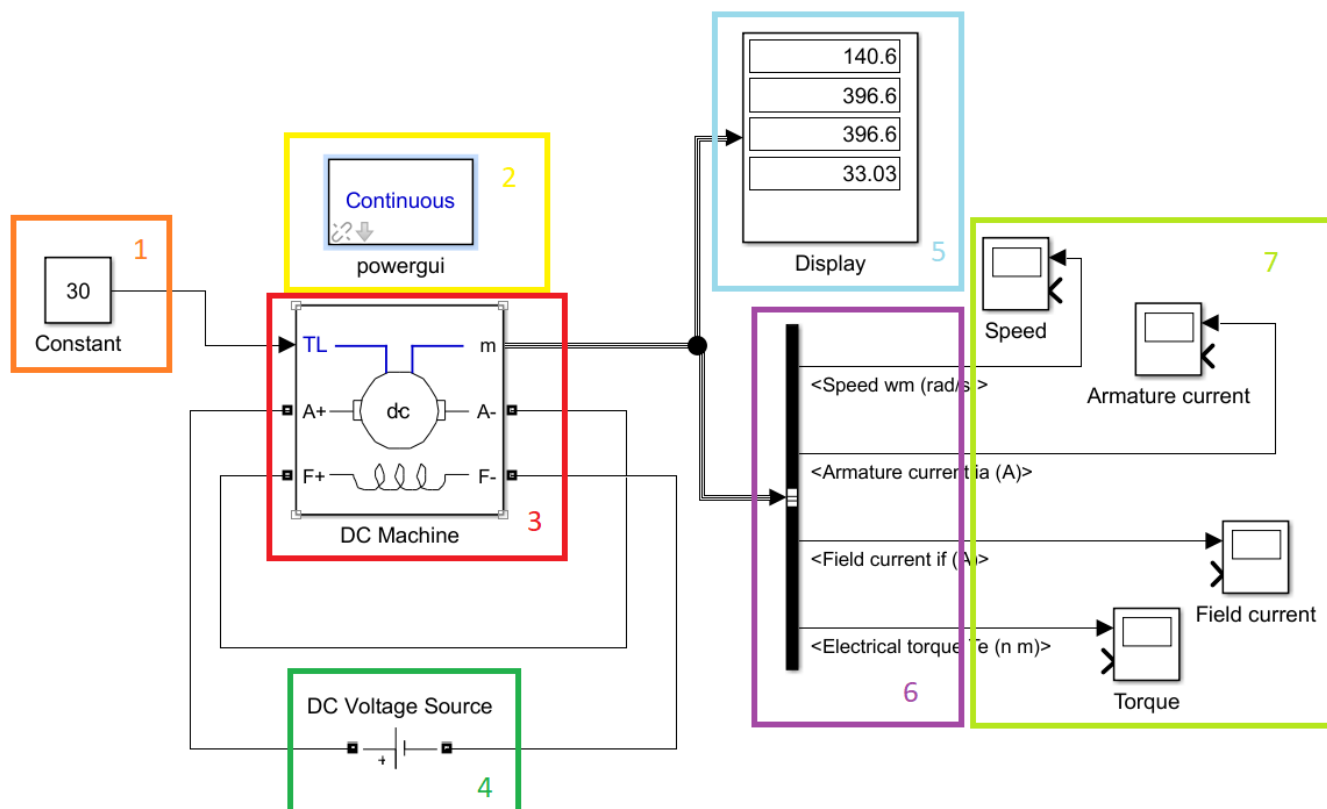


Рисунок 4.1 – Елементи Simulink моделі

Вікно налаштування параметрів двигуна постійного струму показано на рисунках 4.2 - 4.3. У полях задані:

- навантаження: момент на валу (Torque TL);

$$M_1 = 30$$

$$M_2 = 120$$

- тип обмотки: виткова;

- опір та індуктивність якорного ланцюга ( $R_a$ ,  $L_a$ );

$$R_a = 0.013 \, \Omega$$

$$L_a = k \cdot \frac{U_n}{2 \cdot p \cdot n \cdot I_n} = 5 \cdot \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 1300 \cdot 399} = 0.000059 \, \text{Гн}$$

- опір та індуктивність ланцюга збудження ( $R_f$ ,  $L_f$ );

$$R_a = 0.018 \, \Omega$$

$$L_f = k \cdot \frac{U_n}{2 \cdot p \cdot n \cdot I_n} = 5 \cdot \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 1300 \cdot 399} = 0.000059 \, \text{Гн}$$

- взаємна індуктивність обмоток якоря і збудження ( $L_{af}$ );

$$L_{af} = 0.00021 \text{ Гн}$$

- момент інерції (J);

$$J = 0.35 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

- коефіцієнт в'язкого тертя (Bm);

$$B_m = \frac{U}{n} = \frac{24}{1300} = 0.0184 \text{ В} \cdot \text{с}$$

- момент сухого тертя (Tf);

$$T_f = \frac{M}{I} = \frac{66.12}{399} = 0.1695 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

- початкова швидкість (Initial speed) ;

$$n_0 = 0 \text{ рад} / \text{с}$$

- початкове значення струму в обмотці якоря (Initial field current);

$$I_0 = 0 \text{ А}$$

- час симуляції процесу.

$$t = 6 \text{ с}$$

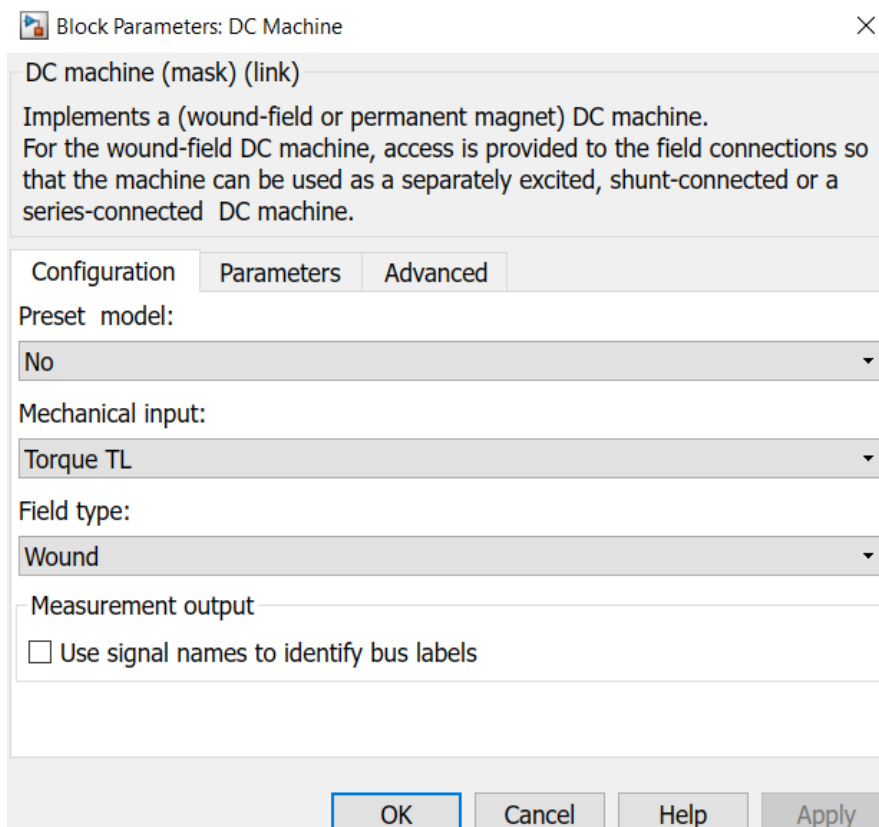


Рисунок 4.2 – Конфігурація машини постійного струму

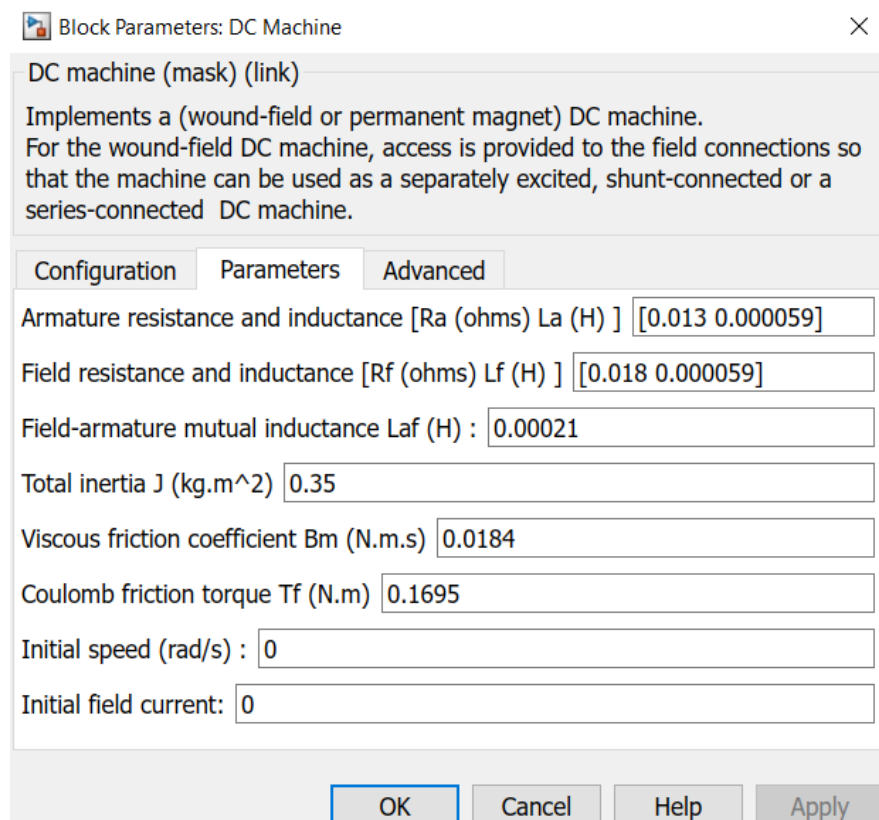


Рисунок 4.3 – Параметри двигуна постійного струму

Повна модель дослідження пуску (рисунок 4.4) включає в себе чотири двигуна постійного струму послідовного збудження (DC motor, DC motor2 і т.д.), що живляться від джерел постійної напруги (DC Voltage Source, DC Voltage Source2 і т.д)  $U=24$  В, окремі елементи розподілу сигналів (BUS selector, BUS selector2 і т.д) та елементи відображення сигналів (Display, Speed, Armature current, Field current, Torque). На перший, другий, третій та четвертий двигуни подається навантаження  $M_1$ ,  $M_2$  відповідно.

Для запуску двигуна внутрішнього згорання автомобіля електричний двигун стартера повинен створити момент рівний 15 – 48 Нм та розвинути швидкість 1000-1300 обертів за хвилину 130-140 рад\с відповідно.

Навантаження  $M_1$  має місце при нормальному пуску першого та другого ДПС характеристики яких представлені на рисунках 4.5 - 4.8 під номером (1),(2).

Навантаження  $M_2$  має місце при пуску третього та четвертого ДПС з надмірним навантаженням, що в свою чергу є аналогом режиму короткого замикання, ротор нерухомий, характеристики представлені на рисунках 4.5 - 4.8 під номером (3)(4).



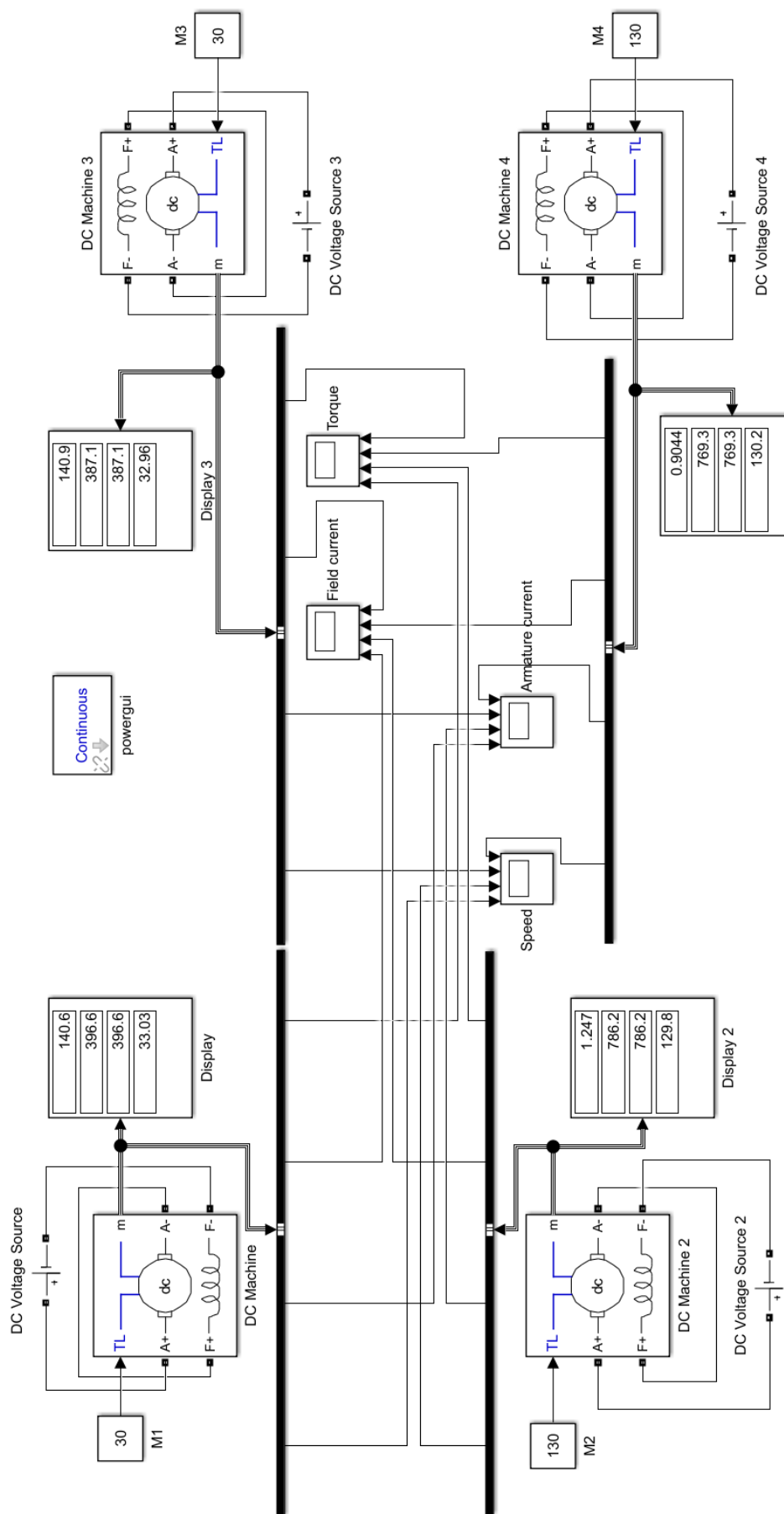


Рисунок 4.4 – Повна модель для дослідження пуску ДПС стартера

## 4.2 Результати моделювання пуску

На рисунку 4.5 зображено зростання швидкості ДПС при пуску протягом  $t = 6$  с, для явнополюсного (позначено 1-ЯП) та неявнополюсного (позначено 2-НЯП) двигуна. Пуск відбувається при номінальному моменті навантаження від ДВЗ величиною 30 Нм. ДПС набирають необхідну для спрацювання ДВЗ швидкості  $\omega = 132 \text{ рад/с}$ . Практично номінальна швидкість досягається в обох випадках через 3 с після початку пуску.

У разі заклинення ротора явнополюсний (3-ЯП-КЗ) та неявнополюсний (4-НЯП-КЗ) двигуни не можуть створити достатній рушійний момент при підвищеному значенні навантаження.

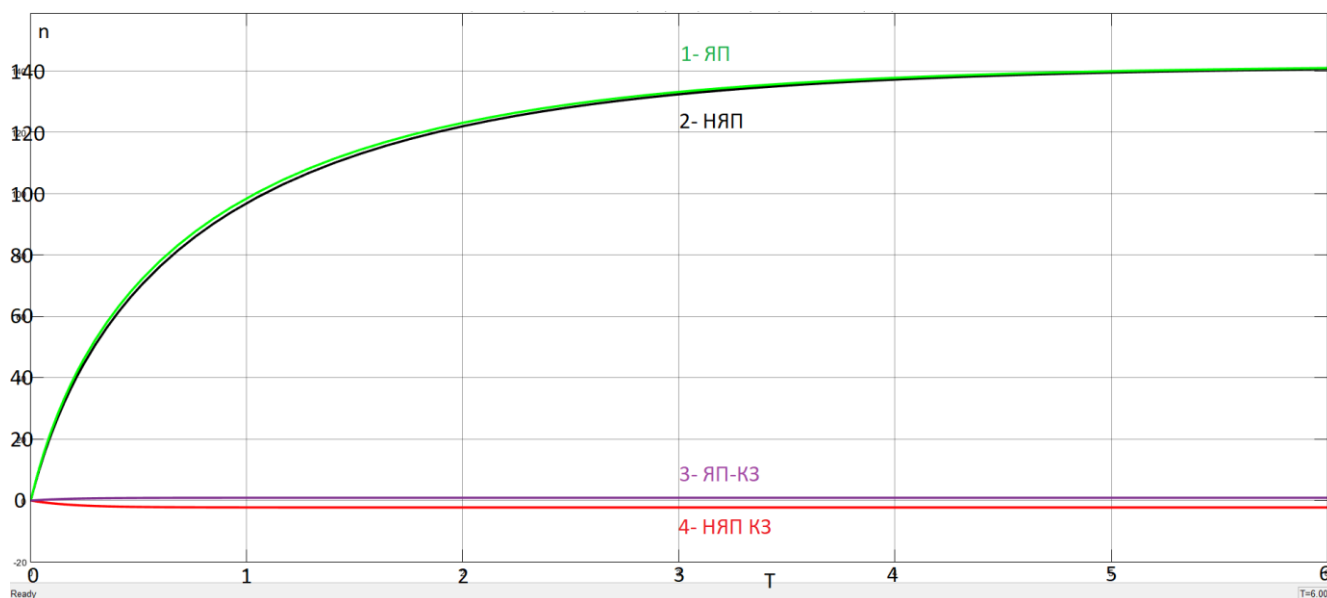


Рисунок 4.5 – Зміна швидкості ДПС при пуску

На рисунках 4.6 – 4.7 можна спостерігати зміну струму ДПС. Обмотки якоря і збудження з'єднані послідовно, тому струми в якорі та індукторі мають однакові значення. При пуску струм в першому двигуні (1) рівномірно спадає від пускового значення  $I_{\text{п}} = 769 \text{ А}$  до номінального  $I_{\text{н}} = 387 \text{ А}$  зі збільшенням швидкості. Струм в двигуні (2) спадає аналогічно першому. Струми в двигунах (3) і (4) залишаються в пусковому значенні, що в свою чергу може призвести до поломки електричної машини.

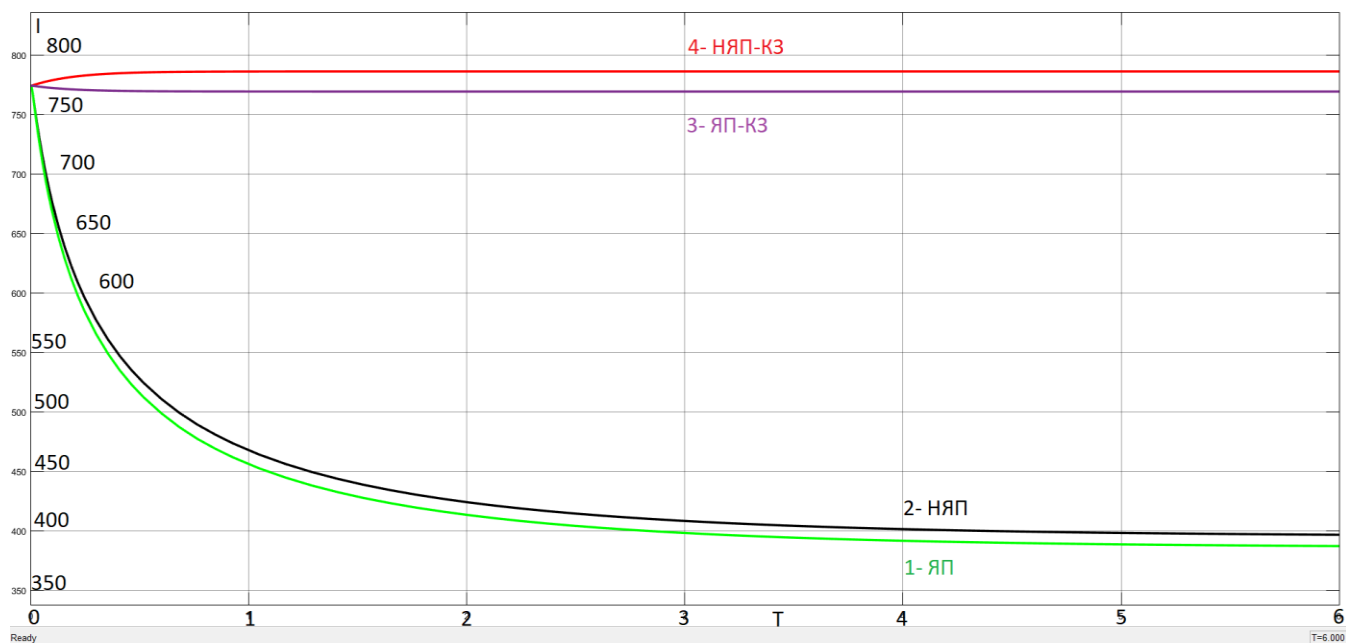


Рисунок 4.6 – Зміна струму якоря ДПС

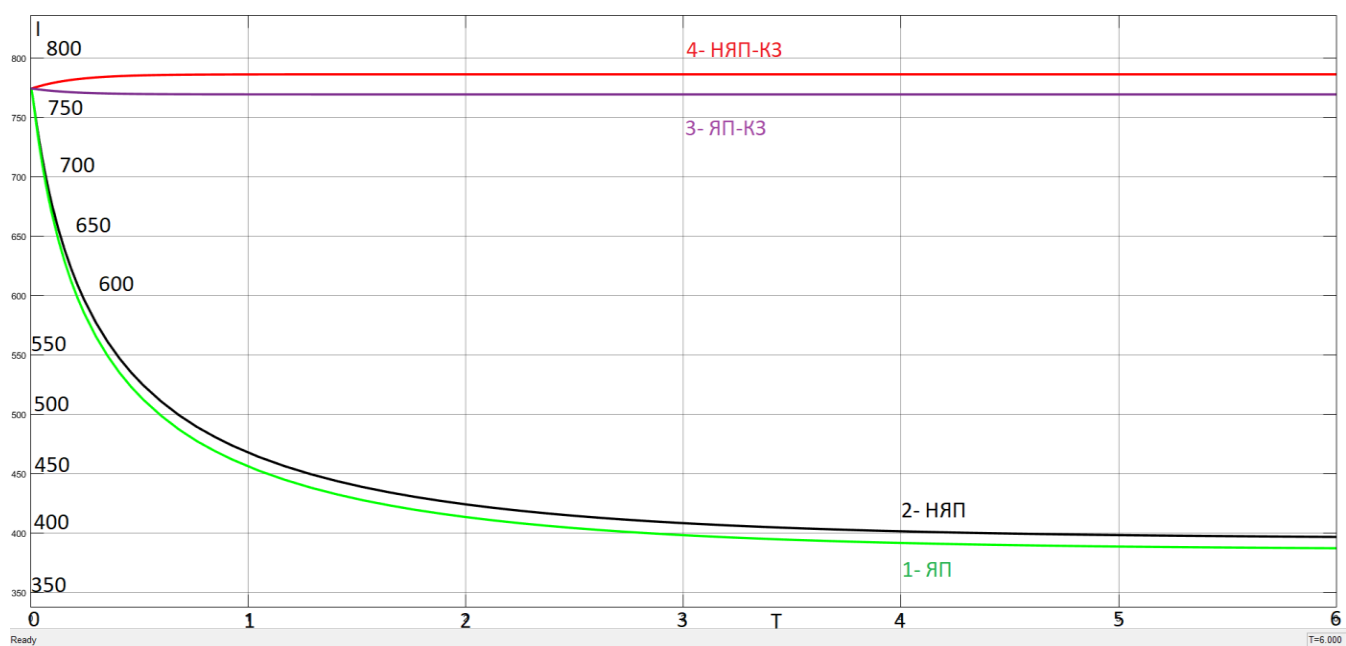


Рисунок 4.7– Зміна струму індуктора ДПС

На рисунку 4.8 зображено зміну моменту за час  $t = 6$  с. В момент пуску момент першого двигуна (1) набуває пускового значення  $M_p = 120$  Нм, та спадає пропорційно струму зі збільшенням швидкості до номінального значення необхідного для обертання двигуна внутрішнього згорання  $M_n = 32,86$  Нм. Неявнополіусний двигун (2) має аналогічну характеристику зміни, але дещо більший номінальний момент  $M_n = 33.03$  Нм. Двигуни (3) та (4) намагаються розвинути необхідне значення моменту для подолання моменту опору та розкрутити ротор.

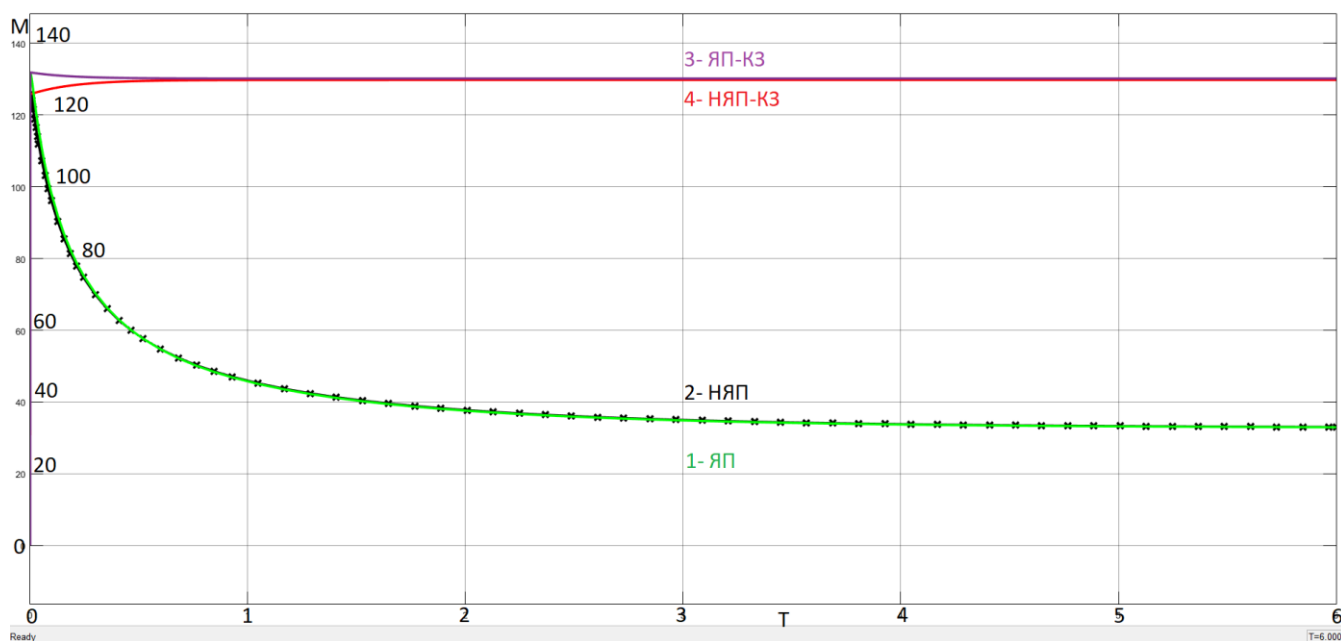


Рисунок 4.8 – Зміна моменту на валу ДПС

### 4.3 Висновки по розділу

Динамічні характеристики пуску двох розглянутих варіантів ДПС є майже ідентичними, що засвідчує можливість їх використання для запуску ДВЗ в однакових умовах експлуатації. Сталий струм та номінальний момент явнополіусного ДПС є дещо нижчими, що пояснюється більш високим показником індуктивності статорної обмотки.

## **5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ**

### **5.1 Опис роботи двигуна постійного струму в складі стартеру. Недоліки**

Стартер являється необхідною складовою для кожного транспортного засобу, який має двигун внутрішнього згорання. Так як системи автомобілів живляться від джерел постійного струму (акумуляторів), раціональною складовою стартера може бути лише двигун постійного струму. Під час повороту ключа запалювання ДПС, витримуючи при цьому значні механічні та електричні перевантаження, повинен максимально швидко розвивати необхідні момент та швидкість для запуску ДВЗ.

Стартер закріплюється на двигуні внутрішнього згорання та механічно під'єднується до нього, тому стартер повинен мати як можна менші розміри для можливості його компактного розміщення між основними вузлами транспортного засобу.

Стартер працює короткий відрізок часу, перевагою короткочасної роботи є високий пусковий момент та захист від перегріву, який виникав би при роботі в номінальному режимі завдяки високому номінальному та в декілька раз його перевищуючому пусковому струму. Але проблемою залишаються створення необхідного потоку збудження для нормальної роботи такого двигуна та його габарити. Доцільним напрямком розвитку для двигунів постійного струму послідовного збудження, які входять до складу стартерів транспортних засобів є вирішення цих проблем.

### **5.2 Опис ідеї стартап-проекту**

- зміст ідеї;
- можливі напрямки застосування;
- основні вигоди, що може отримати виробник двигунів.

Опишемо наведені вище пункти в вигляді таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – опис ідеї стартап-проекту

| <i>Зміст ідеї</i>                                                                              | <i>Напрямки застосування</i>                         | <i>Вигоди для виробника</i>                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Зменшення габаритів та використання активних матеріалів шляхом використання нової конструкції. | Транспортні засоби з двигунами внутрішнього згорання | Зменшення грошових витрат на активні матеріали. Економія ресурсів. |

Для визначення переваг запропонованої ідеї порівняємо її з пропозиціями конкурентів (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 – порівняння двигунів

| <i>Двигуни явнопольсної конструції запропоновані на ринку та розраховані за обраним прототипом</i>                                                                                                                                                                            | <i>Двигун неявнопольсної конструції розрахований за обраним прототипом явнопольсного двигуна</i>                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P_H = 9100 \text{ Вт}$<br>$U_H = 24 \text{ В}$<br>$I_H = 300..400 \text{ А}$<br>$I_{II} = 700..1500 \text{ А}$<br>$M_H = 16..30.85 \text{ Нм}$<br>$m_{\text{міді}} \text{ обмотки якоря} = 0.832 \text{ кг}$<br>$m_{\text{міді}} \text{ обмотки збудження} = 1.7 \text{ кг}$ | $P_H = 9100 \text{ Вт}$<br>$U_H = 24 \text{ В}$<br>$I_H = 390 \text{ А}$<br>$I_{II} = 760 \text{ А}$<br>$M_H = 31.31 \text{ Нм}$<br>$m_{\text{міді}} \text{ обмотки якоря} = 0.832 \text{ кг}$<br>$m_{\text{міді}} \text{ обмотки збудження} = 1.1 \text{ кг}$ |

Порівнюючи дані двигуни можна зробити висновки, що виробництво двигуна неявнопольсної конструції є значно вигіднішим в плані витрат активних матеріалів та коштів на них. При цьому не потрібно встановлювати нову технологію виготовлення листів статорів з пазами, так як вона є відомою і використовується при виготовленні асинхронних, синхронних машин. Листи електротехнічної сталі для статора можуть бути виготовлені на штампі.

### 5.3 Технологічний аудит проекту

Для реалізації даного проекту – «використання двигунів постійного струму з неявнополюсним статором для стартерів великовантажних транспортних засобів», буде використано ідею компенсації реакції якоря шляхом зміни конструкції двигуна, а саме зміни конструкції статора з явнополюсної на неявнополюсну. Ідея полягає в розміщенні однієї статорної обмотки послідовно з'єднаної з обмоткою якоря на половинах полюсних поділок, що дозволить протікати по ним однаковому струму з різним знаком, тобто створювати потік компенсації рівний потоку реакції якоря. Взаємодія потоку компенсації, який направлений під кутом до потоку реакції якоря, створить результуючий потік який може вважатися корисним потоком збудження. Таким чином обмотка на статорі виконує відразу дві функції: обмотки збудження та компенсаційної обмотки, при цьому відпадає необхідність ускладнювати процес виготовлення полюсів машини роблячи в них додаткові пази для компенсаційної обмотки, та зменшує витрату активних матеріалів на додаткові обмотки. Також більше немає необхідності збільшувати кількість витків на полюсах ДПС, щоб створити необхідний для нормальної роботи машини потік збудження. Відмова від явно виражених полюсів дозволяє зменшити габарити машини, що безумовно є великим плюсом при розміщенні стартера в обмеженому просторі.

### 5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.

Щоб визначити напрямки розвитку проекту, потреби виробників та клієнтів необхідно дослідити теперішній ринок продукції.

Аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку; зображено в таблиці 5.3

Таблиця 5.3 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| <i>№ п/п</i> | <i>Показники стану ринку (найменування)</i>              | <i>Характеристика</i>                 |
|--------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1            | Кількість головних гравців, од                           | Відсутні                              |
| 2            | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од                        | 1                                     |
| 3            | Динаміка ринку (якісна оцінка)                           | Розвивається                          |
| 4            | Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень) | Відсутній рівень первинних інвестицій |
| 5            | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації      | Стандарти з випереджаючими вимогами   |
| 6            | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %  | 100%                                  |

Проаналізувавши дану таблицю слід звернути увагу на 5 пункт. Стандарти з випереджаючими вимогами є своєрідним прогнозом технічного прогресу продукції, що розробляється. При цьому повинні використовуватись найсучасніші методи прогнозування і оптимізації.

В даному випадку інвестором являється підприємство на якому виробляються двигуни з неявнополюсною конструкцією статора. [15]

Якщо виробляти 100 тисяч стартерів кожен рік. При цьому середня вартість нового стартера для великовантажного автомобіля складає 8-10 тис. грн., а ціна міді за 1 кг складає 120-140 грн. Можна розрахувати економію міді та коштів за рік:

Загальна маса міді яка витрачається для намотки явнополюсних двигунів:

$$m_{\text{ек.міді}} = 1.7 \text{ кг} \cdot 1 \cdot 10^5 = 170000 \text{ кг}$$

Економія міді на виготовленні одного двигуна:



$$m_{ек.міді} \% = \left| \left( \frac{1.1 \text{ кг} \cdot 1 \cdot 10^5}{1.7 \text{ кг} \cdot 1 \cdot 10^5} - 1 \right) \right| \cdot 100\% = 35.3\%$$

Економія коштів на 1 двигуні:

$$m_{ек.міді} = 1.7 - (100\% - 35.3\%) = 0.6 \text{ кг}$$

$$S_{ек} = 1.7 \text{ кг} \cdot 120 \text{ грн} = 204 \text{ грн} - 64.7\% = 72 \text{ грн}$$

Економія міді на 100 тисяч вироблених двигунів:

$$m_{ек.міді} = 170000 - (100\% - 35.3\%) = 60000 \text{ кг}$$

Витрати на мідь явнопольного двигуна:

$$S_{я} = 170000 \text{ кг} \cdot 120 \frac{\text{грн}}{\text{кг}} = 20400000 \text{ грн}$$

Витрати на мідь неянопольного двигуна:

$$S_{ня} = S_{я} - E = 20400000 \text{ грн} - 7200000 \text{ грн} = 13200000 \text{ грн}$$

Економія коштів на міді двигунів за рік:

$$E = 60000 \text{ кг} \cdot 120 \frac{\text{грн}}{\text{кг}} = 7200000 \text{ грн}$$

Виходячи зі значень економії міді можна розрахувати скільки двигунів може бути намотано понад норми:

$$D_{ня} = \frac{m_{ек.міді}}{m_i + m_a} = \frac{60000 \text{ кг}}{1.1 \text{ кг} + 0.832 \text{ кг}} = 31055.9 \text{ шт.}$$

На основі аналізу факторів загроз та ринкових можливостей маркетингового середовища був складений SWOT – аналіз (таблиця 5.4). Матриця аналізу сильних (Strenght) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities).

Таблиця 5.4 SWOT – аналіз стартап-проекту

|                       |                                                                             |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <i>Сильні сторони</i> | Високий показник економії коштів, економія ресурсів, висока рентабельність. |
| <i>Можливості</i>     | Можливість збільшення виробництва.                                          |
| <i>Слабкі сторони</i> | Зміна технології виробництва.                                               |
| <i>Загрози</i>        | Перехід індустрії транспортних засобів з ДВЗ на АД.                         |

## 5.5 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробці ринкової стратегії передуює становлення ринкових цілей компанії (таблиця 5.5).

Існують різні класифікації цілей. Загальноприйнятою є тільки класифікація за часом, на яке встановлюються цілі. Зазвичай виділяють довгострокові і короткострокові цілі. Іноді між довгостроковими і короткостроковими цілями встановлюються проміжні цілі, їх називають середньостроковими. При цьому не існує загальноприйнятої шкали віднесення цілей до короткострокових, середньострокових або довгострокових. У наших умовах короткостроковими зазвичай вважають цілі до 1 року, середньостроковими 1-3 роки, довгостроковими - від 3-х років. [15]

Таблиця 5.5 – Ринкові цілі

| <b>Ринкові цілі</b>                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Число клієнтів.                                                                                                                                                          | $N = 100000$ кл.                                                                                                                                                               |
| Частка ринку.                                                                                                                                                            | Весь ринок                                                                                                                                                                     |
| Обсяг продажів в натуральному і вартісному вираженні.                                                                                                                    | $D = 100000$ шт.<br>$S = 10000$ грн/шт.                                                                                                                                        |
| Виробничі цілі ( внутрішні програмні цілі ) є наслідком ринкових. Включають в себе все, що необхідно для досягнення ринкових цілей (за винятком організаційних ресурсів) | <p>Забезпечити певний обсяг виробництва (обсяг виробництва = обсяг продажів - існуючі запаси + плановані запаси.</p> <p>Розробка нової технології виробництва не потрібна.</p> |
| <p>Фінансові цілі - пов'язують між собою всі цілі в вартісному вираженні наприклад:</p> <p>Чистий обсяг продажів (з "ринкових цілей").</p>                               | $D = 100000$ шт.                                                                                                                                                               |
| Величина витрат (з "виробничих" цілей).                                                                                                                                  | $S_{\text{вит}} = 5000$ грн/шт                                                                                                                                                 |
| Валовий і чистий прибуток.                                                                                                                                               | $S_{\text{пр}} = D \cdot S - D \cdot S_{\text{вит}}$                                                                                                                           |

Визначення цільового ринку та цільових сегментів наведено в таблиці 5.6. [15]

Таблиця 5.6 – Цільові сегменти

|                    |                                                                                    |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Товар              | Продукт: двигун постійного струму послідовного збудження з неявнополюсним статором |
| Ринок              | Ринок комплектуючих транспортних засобів                                           |
| Сегмент            | Стартери для транспортних засобів                                                  |
| Цільовий маркетинг | Великовантажні автомобілі, легкові автомобілі.                                     |
| Цільова група      | Власники транспортних засобів                                                      |

## ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації розв'язано науково-технічне завдання по удосконаленню конструкції двигуна постійного струму послідовного збудження що використовуються в складі стартерів великовантажних транспортних засобів. Пропонується удосконалення статора двигуна за рахунок переходу від традиційної явнополюсної конструкції статора до неявнополюсної конструкції. На статорі укладається розподілена в пазах обмотка постійного струму, яка одночасно виконує функції, як компенсаційної обмотки, так і обмотки збудження. При цьому конструкція якоря залишається незмінною.

Доведено шляхом розрахунків та математичного моделювання, що при збереженні основних експлуатаційних показників двигуна (потужність, момент, струм, швидкість, тощо) запропонована конструкція неявнополюсного ДПС дозволяє зменшити витрати кошовної міді обмотки статора на 35%, при незначному на 2% збільшенні маси сталі магнітопроводу статора. Також на 7.1% може бути зменшеним зовнішній діаметр статора.

З урахуванням великих обсягів виробництва стартерів для транспортних засобів така економія може дати суттєві економічні ефекти. Тому ДПС з неявнополюсним статором можуть бути рекомендовані для подальших розробок, досліджень та широкого впровадження в стартери транспортних засобів.

Основні технічні данні явно- та неявнополюсних варіантів ДПС наведені в таблиці 6.1:

Таблиця 6.1

|   | Параметр            | Явнополюсний ДПС | Неявнополюсний ДПС |
|---|---------------------|------------------|--------------------|
| 1 | Потужність          | 9300 Вт          | 9307 Вт            |
| 2 | ККД двигуна         | 49.4%            | 50.1%              |
| 3 | ККД установки       | 45.3%            | 45.9%              |
| 4 | Швидкість обертання | 1342 об/хв       | 1342 об/хв         |
| 5 | Напруга живлення    | 24 В             | 24 В               |

Продовження таблиці 6.1

|    |                           |          |          |
|----|---------------------------|----------|----------|
| 6  | Момент на валу            | 30.85 Нм | 31.31 Нм |
| 7  | Номінальний струм         | 399 А    | 399.1 А  |
| 8  | Пусковий струм            | 798 А    | 798 А    |
| 9  | Зовнішній діаметр статора | 150 мм   | 140 мм   |
| 10 | Довжина                   | 140 мм   | 140 мм   |
| 11 | Маса сталі статору        | 8.45 кг  | 8.61 кг  |
| 12 | Маса міді обмотки якоря   | 0.832 кг | 0.832 кг |
| 13 | Маса міді обмотки статора | 1.7 кг   | 1.1 кг   |

Наукова новизна отриманих результатів полягає в обґрунтуванні принципу побудови та оптимальних технічних рішень щодо створення неявнополюсного ДПС, а практична значимість отриманих результатів полягає в рекомендаціях щодо широкого впровадження таких двигунів в конструкції стартерів транспортних засобів.

### Список використаної літератури

1. Васьковский Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів швів енергії. Посібник для студентів вищ.тех.навч. закладів. Київ., НТУУ «КПІ», 2003.-161 с.
2. Васьковский Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. Посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2007.-192 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины .-Л.: «Энергия», 1978.-832
4. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л., “Энергия”, 1974.
5. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 784 с.: ил.
6. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил.
7. Ермолин Н.П. Переходные процессы в машинах постоянного тока. ГЭИ, М. 1951. – 190 с.
8. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. Учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. — М.: Академия, 2005. — 480 с.
9. Кацман М.М. Электрические машины. Учебник. — М.: Высшая школа, 2003. — 463 с.
10. Копылов И.П. Проектирование электрических машин : Учебное пособие для вузов. М.: «Энергия», 1980.-496с.,ил.
11. Копылов И.П. и Б. К. Клоков. Справочник по электрическим машинам. М.: Энергоатомиздат, 1988. - 456 с. Том 1
12. Копылов И.П. и Б. К. Клоков. Справочник по электрическим машинам. М.: Энергоатомиздат, 1988. - 456 с. Том 2
13. Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета COMSOL-multiphysics: Учебное пособие. М. НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.

14. Лущик В.Д. Двигатели постоянного тока с неявнополюсным статором // Электротехника. – 1992. - №8-9. С. 14-17.
15. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
16. Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Ф. Н. Сарапулов. COMSOL-multiphysics Учебное пособие - Москва : Спутник+, 2011. - 157 с.
17. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink.- М.:ДМК Пресс; СПб.: Питер 2008.- 288 с.: ил
18. COMSOL AB. Введение в COMSOL Multiphysics (версия 5.2), США: COMSOL, 2015. - 193 с.
19. Mercury Learning & Information, Comsol for Engineers (Multiphysics Modeling), March 27th, 2014, 254 p.
20. M. Tabatabaian, Mercury Learning & Information, Comsol for Engineers., 2014, 252 p.
21. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach, Jones & Bartlett Publishers, Multiphysics Modeling Using COMSOL Inc., 2011, 872 p.
22. The MathWorks, Inc. Simulink Tutorial, 1999, 605 p.
23. <https://www.mathworks.com/>
24. <https://www.comsol.com/>
25. <https://vseosvita.ua/>
26. <https://www.ucukltd.com/truck/electrical/engine-electrical/starter-motors>
27. <https://studfiles.net/>
28. <http://avtomotoprof.ru>