

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

**Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра електромеханіки**

«На правах рукопису»
УДК 621.313.

До захисту допущено:
В.о. завідувача кафедри
_____ В.В. Чумак
«__» _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Електричні машини і апарати»
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
на тему: «Електростартер для пуску двигуна внутрішнього
згорання легкового автомобіля»**

Виконав:
студент VI курсу, групи ЕМ-21мп
Тарасов Руслан Дмитрович _____

Науковий керівник:
доцент, к.т.н.,
Цивінський Сергій Станіславович _____

Рецензент:
ст. викл., к.т.н.,
Желінський Микола Миколайович _____

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

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електромеханіки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електричні машини і апарати»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Вадим ЧУМАК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Тарасову Руслану Дмитровичу

1. Тема дисертації «Електростартер для пуску двигуна внутрішнього згорання легкового автомобіля»,

науковий керівник дисертації Цивінський Сергій Станіславович, доцент, к.т.н,
затверджені наказом по університету від «03» листопада 2023 р. № 5131-с

2. Термін подання студентом дисертації 12.01.2024

3. Об'єкт дослідження: електростартер

4. Вихідні дані: електростартер для пуску двигуна внутрішнього згорання легкового автомобіля: номінальна потужність $P_n = 1650$ Вт, напруга $U_n = 12$ В, частота обертання $n = 1500$ об/хв.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: удосконалення системи пуску автотранспорту шляхом застосування прогресивних методів проектування електростартерних двигунів.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація за матеріалами дисертації.

7. Перелік публікацій: History of electric starter development for internal combustion engine start-up / Tarasov R.D., Tsyvinskyi S.S., Geraskin O.A. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ". – Київ: «Політехніка». – 2023. (див. додаток)

8. Консультанти розділів дисертації

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

9. Дата видачі завдання 01.10.2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Пошук інформації по розділу 1	15.11.2022	
2	Обробка інформації та оформлення розділу 1	25.02.2023	
3	Пошук інформації по розділу 2	01.04.2023	
4	Обробка інформації та оформлення розділу 2	10.06.2023	
5	Оформлення розділу 3 та оформлення результатів дослідження	01.08.2023	
6	Корегування знайденої інформації в період проходження практики	01.10.2023	
7	Оформлення 4 розділу	20.10.2023	
8	Оформлення: вступу, реферату і висновку	15.11.2023	
9	Оформлення пояснювальної записки	10.12.2023	

Студент

(підпис)

Тарасов Р.Д.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Цивінський С.С.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

В даній магістерській роботі проведено розрахунок і дослідження електростартерного двигуна для пуску двигуна внутрішнього згорання легкового автомобіля.

Пояснювальна записка містить: сторінок - 79, таблиць – 5, рисунків - 18.

Проектований двигун відповідає сучасним вимогам.

У проекті розглянуто такі питання:

- електромагнітний розрахунок: визначено основні параметри, характеристики, масогабаритні показники стартера, розрахунок і аналіз робочих характеристик, тепловий розрахунок;

- технологічний процес виготовлення якоря стартера;

- складання методики випробувань електростартера і мнемосхеми блоків стенда випробувань;

- розробка стартап-проекту щодо впровадження у виробництво спроектованого електростартера.

ABSTRACT

In this master's thesis, the calculation and study of an electric starter motor for starting an internal combustion engine of a passenger car was carried out.

The explanatory note contains: pages - 79, tables - 5, figures - 18.

The designed engine meets modern requirements.

The project addresses the following issues:

- electromagnetic calculation: the main parameters, characteristics, weight and dimensions of the starter, calculation and analysis of performance characteristics, thermal calculation are determined;

- technological process of manufacturing the starter armature;

- preparation of the test methodology for the electric starter and mnemonic diagram of the test bench blocks;

- development of a start-up project for the introduction into production of the designed electric starter.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Електромагнітний розрахунок стартерного електродвигуна	15
1.1. Вихідні дані.....	15
1.2. Розрахункова потужність. Номінальна ємність та внутрішній опір аккумуляторної батареї.....	15
1.3. Основні розміри електродвигуна.....	17
1.4. Обмотка якоря	19
1.5. Розміри напівзакритого паза прямокутної форми	21
1.6. Магнітна система електродвигуна	23
1.6.1. Зубцева зона.....	23
1.6.2. Повітряний проміжок	26
1.6.3. Корпус, полюс, осердя якоря	27
1.6.4. МДС для повітряного зазору у стику полюса з корпусом.....	29
1.6.5. Характеристики намагнічування електродвигуна.....	29
1.7. Обмотка збудження.....	30
1.8. Колектор та щітки	33
1.9. Робочі характеристики.....	34
1.9.1. Електродвигун послідовного збудження.....	34
1.10. Тепловий розрахунок.....	40
Розділ 2. Технологічний процес виготовлення якоря стартера.....	44
2.1. Розкрій та різання електротехнічної сталі.....	45
2.2. Штампування листів якоря	46
2.3. Термообробка листів магнітопроводу	47
2.4. Складання та скріплення магнітопроводу	47
2.5. Складання осердя на валу	49
2.6. Напресування колектора на вал.....	51
2.7. Укладання обмотки	51
2.8. Бандажування обмоток якір	54
2.9. Просочення якоря.....	55
2.10. Механічна обробка.....	58

Розділ 3. Складання методики випробувань електростартера та мнемосхеми блоків стенду випробувань	60
3.1. Пристрій та принцип дії електростартера	60
3.2. Перевірка технічного стану стартера	64
3.2.1. Перевірка тягового реле стартера.....	64
3.2.2. Режим повного гальмування	65
3.3. Контрольна перевірка стартера	66
Розділ 4. СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	68
4.1. Опис ідеї стартап-проекту.....	68
4.1.1. Опис ідеї стартап-проекту.....	69
4.1.2. Економічні плюси проєктованого стартера	70
4.2. Потенційні користувачі	70
4.3. Структура виплат	71
4.4. Бізнес-модель впровадження	71
Висновок	72
Список використаної літератури	73
Додаток.....	75

ВСТУП

За останні роки в Україні парк автомобілів, що перебувають в експлуатації, сильно змінився і розширився. З'явилася велика кількість зарубіжних автомобілів різних марок, здебільшого старих, що мають певну специфіку системи електрообладнання, яка відрізняється за будовою, принципом дії та особливостями обслуговування елементів. Вітчизняні виробники в боротьбі за конкурентоспроможність своїх виробів істотно модернізували і розширили склад електрообладнання.

Зростання кількості споживачів зажадало збільшення потужності стартерів без істотного збільшення їх маси і габаритів.

Електрообладнання автомобілів і тракторів являє собою складний комплекс взаємопов'язаних електротехнічних та електронних систем, трансмісії та ходової частини, безпеку руху, автоматизацію робочих процесів автомобілів і тракторів, і нормальні умови для водіїв і пасажирів. Автомобільне електрообладнання, включає в себе такі системи і пристрої:

- електропостачання;
- електростартерного пуску двигуна внутрішнього згорання;
- освітлення, світлової та звукової сигналізації;
- електронні системи керування агрегатами автомобіля і трактора;
- інформації та контролю технічного стану автомобіля та його агрегатів;
- електроприводу;
- придушення радіоперешкод;
- комутаційні, захисні пристрої та електропроводку.

До системи електропостачання входять генераторна установка та акумуляторна батарея. До системи електростартерного пуску відносять акумуляторну батарею.

Сьогодні запуск автомобіля за допомогою обертання ключа або натисканням кнопки вважається вже звичайною справою. Проте сто років тому завести автомобіль не було так просто. До появи електростартера потрібно було витратити великі фізичні зусилля і мати трохи надії, щоб почати рух. У ті часи запуск автомобіля з двигуном внутрішнього згорання був у багатьох відносинах

схожий на запуск газонокосарки сьогодні. Це було не лише складно фізично, але й небезпечно. Тоді траплялися випадки травм і навіть смертей людей під час спроби завести автомобіль[9].

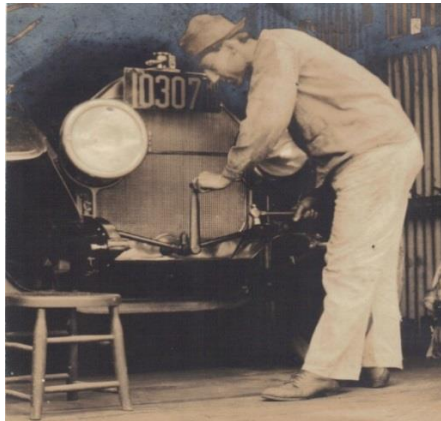


Рисунок 1.1 - Механічний запуск двигуна внутрішнього згоряння

Поступово автомобілі ставали популярнішими, і разом з цим з'явилася потреба в більш зручних та безпечних системах запуску двигунів. Ручні запускники були неефективними та неприпустимими для багатьох водіїв, і ці фактори спонукали інженерів до розробки нових способів автоматизації цього процесу.

Поява перших електростартерів. У 1911 році компанія Cadillac вперше представила світові автомобіль, оснащений електростартером. Цей винахід спростив життя водіїв, дозволяючи запускати двигун за допомогою електродвигуна, який активувався натисканням кнопки. Це стало першим кроком у розвитку автомобільних технологій, спрямованих на покращення зручності та надійності водійського досвіду.

Це була незвичайна система, в якій для живлення стартера використовували чотири батареї по шість вольт, об'єднані разом (24 вольт). Він також мав поворотний перемикач, який після запуску дозволяв генератору заряджати кожен батарею на шість вольт. Наприкінці 1950-х років електричні системи автомобілів перейшли з шести вольт на 12 вольт і відтоді залишаються такими.

Протягом наступних десятиліть технології електростартерів стали значно складнішими. Вони отримали вдосконалені системи безпеки, надійніше з'єднання з електромережою та великий ресурс служби. Сучасні електростартери можуть запускати двигун навіть при найнижчих температурах, забезпечуючи стабільну

роботу автомобіля в різних умовах експлуатації.

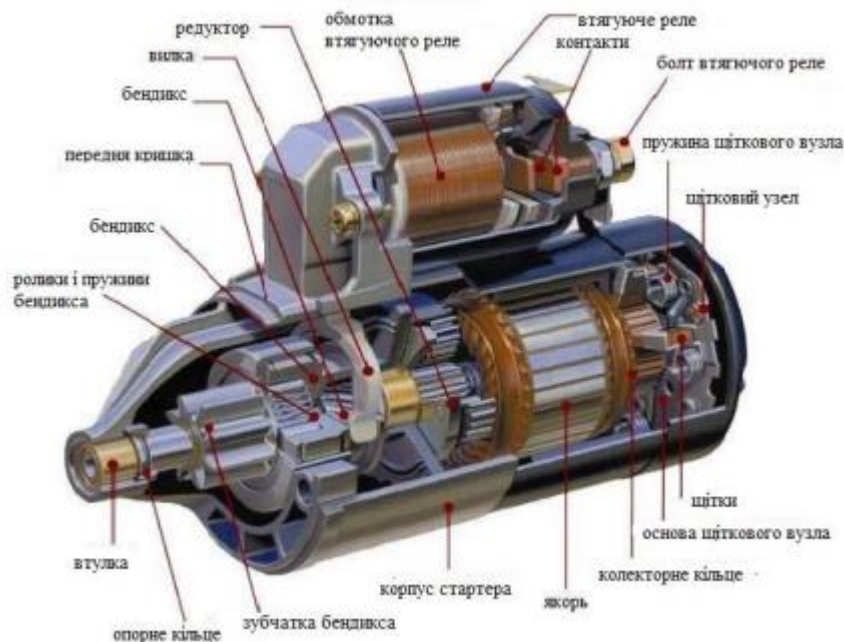


Рисунок 1.2 - Автомобільний стартер

Система «старт-стоп». Це система, яка, визначивши, що автомобіль зупинився, вимикає його двигун. Коли водій знову хоче рушити з місця, двигун автоматично перезапускається, щоб можна було продовжити рух. Тобто, двигун швидко запускається при натисканні на педаль зчеплення (в авто з механічною коробкою передач) або при відпусканні педалі гальма (в авто з автоматичною коробкою передач). Це рішення дозволило:

- знизити споживання палива,
- зменшити викиди вуглекислого газу та інших вихлопних газів,
- збільшити ресурс двигуна.

Запуск холодного двигуна спричиняє велике навантаження . Однак прогрітий приводний блок належним чином змазаний, тому наступні запуски йому не шкідливі. Коли двигун не працює, він не споживає паливо і не виділяє вихлопні гази, а також не зношується. Завдяки цій технології для бензинових і дизельних авто (не електромобілів) економія пального становить 5-10 %[10,11]. Система "старт-стоп" має додаткове завдання в гібридних автомобілях, що підключаються до електромережі. Крім управління роботою двигуна під час зупинки, вона також відповідає за блок горіння під час перемикання типів приводу між електричним і гібридним приводом. Система є найбільш ефективною для автомобілів, що

рухаються містом, витрачаючи багато часу на світлофорах і в заторах.

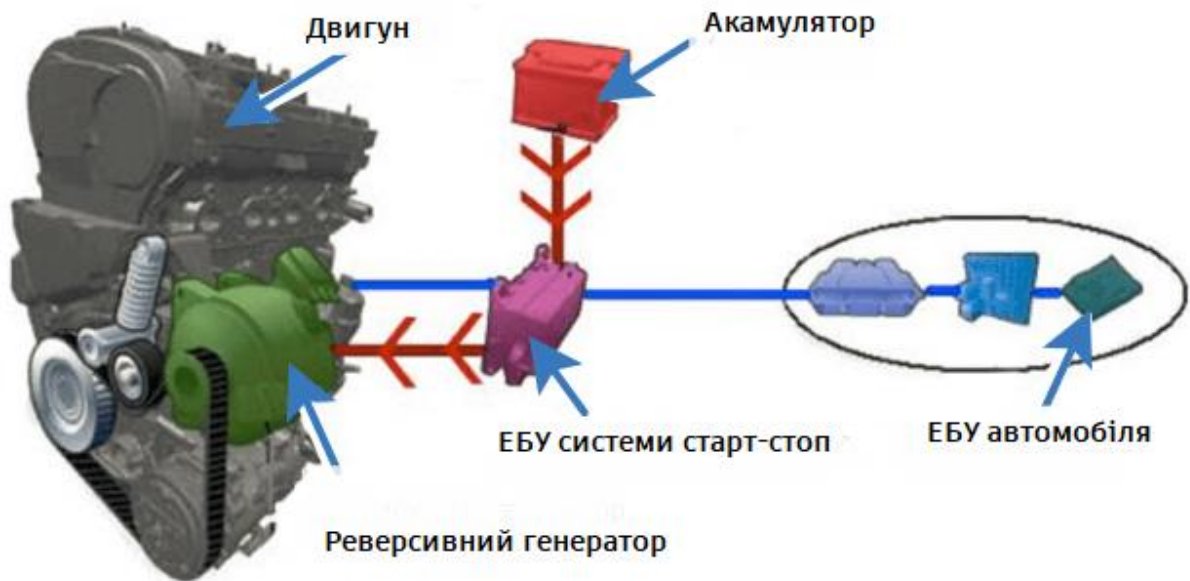


Рисунок 1.3 - Система «старт-стоп»

1. Автомобіль готовий до старту і електронний блок керування запускає двигун. Реверсивний генератор, отримавши енергію від акумулятора, запускає двигун як стартер.

2. У режимі руху (водій не має наміру гальмувати) реверсивний генератор працює в режимі звичайного генератора, перетворюючи механічну енергію в електричну і заряджаючи батарею живлення.

3. У момент, коли швидкість автомобіля знизиться до 8 км\год під час гальмування, блок керування системою «СТОП-СТАРТ» глушить двигун.

4. Після того як педаль відпущена, блок управління «СТОП-СТАРТ» дає команду на запуск двигуна. Енергія від батареї надходить до реверсивного генератора, і він запускає двигун як звичайний стартер.

5. Поїздки закінчено, і блок керування глушить двигун[12]

Стартер-генераторні установки. В даний час широкого застосування отримують суміщені електромеханічні перетворювачі - стартер-генератори. Застосування стартер-генераторів на автомобілях дозволяє покращити низку характеристик. Заміна двох електричних машин - стартера та генератора знижує масу та габарити установки та її вартість. Для зниження викиду в атмосферу шкідливих речовин за частих зупинок у міських умовах руху сучасні автомобілі оснащуються системою «СТОП-СТАРТ». Зменшення габаритів електричної

машини та величини струму в стартерному режимі роботи досягається застосуванням стартер-генератора на напругу вище напруги бортової мережі автомобіля. У цьому випадку передбачається дві напруги бортової мережі. Зв'язок між двома накопичувачами електричної енергії та управління стартер-генератора здійснюється електронною системою[16,17].

Без редукторний стартер-генератор напругою 42 В з асинхронною електричною машиною і напівпровідниковим модулем, що управляє, проект якого розроблений фірмами «Continental» і «BMW AG», розвиває максимальний пусковий момент 200 Нм у стартерному режимі роботи і максимальну потужність в генераторному режимі роботи 2 кВт на 14 В та 2,2 кВт на 42 В.

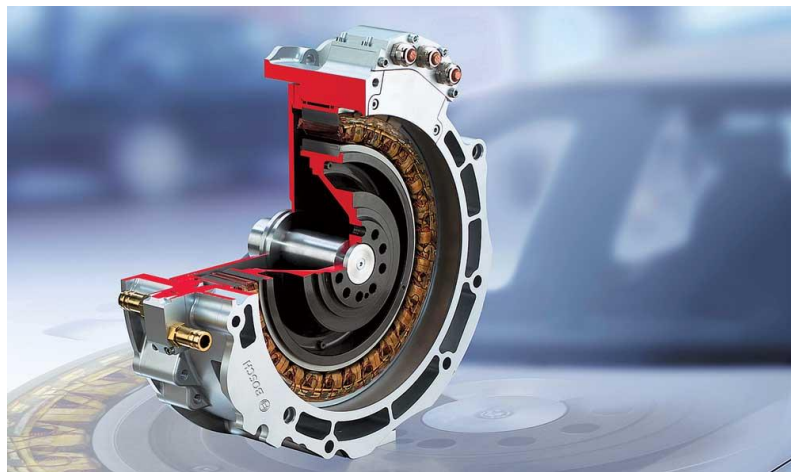


Рисунок 1.4 - Стартер-генераторна установка

Проведені випробування підтвердили працездатність стартера-генератора в різних режимах та умовах роботи. У без редукторних стартер-генераторах можуть застосовуватися синхронні машини з збудженням від постійних магнітів. Можливі дві конструкції синхронних стартер-генератора із внутрішнім ротором та із зовнішнім ротором. Синхронний стартер-генератор із зовнішнім ротором має переваги - більш просте та надійне кріплення магнітів на роторі та гарне охолодження.

У стартерному режимі роботи лінійне навантаження можна збільшити в 3,5 рази в порівнянні з генераторним режимом, а частота обертання в режимі генератора на порядок вища за частоту обертання в режимі стартера. При однакових значеннях інших величин потужність стартера-генератора в генераторному режимі роботи буде втричі більша, ніж у стартерному режимі. У

електромобілі стартер-генератор розраховується на основний режим роботи – режим тягового двигуна, що живиться від акумуляторної батареї. При гальмуванні автомобіля стартер-генератор переводиться в генераторний режим і рекуперує електричну енергію акумуляторну батарею. На автомобілі може бути встановлений кілька стартер-генераторів сумарною потужністю до 100 кВт і більше[13,15].

Як тягові електродвигуни і стартер-генератори в автомобілях з гібридним приводом використовуються безконтактні асинхронні або синхронні машини з постійними магнітами, що працюють від інверторів. З метою зменшення габаритів можуть виконуватися з вбудованим редуктором і мати водяне охолодження.

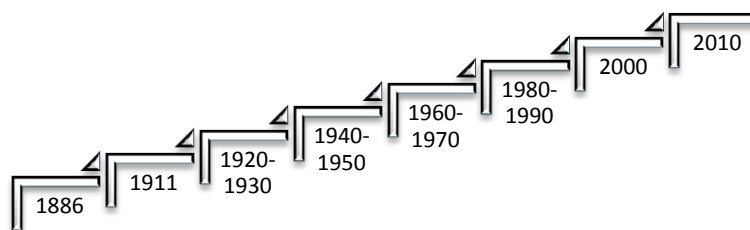


Рисунок 1.5 - Хронологія розвитку електростартеру

Кінець XIX століття:

1886: Карл Бенц запатентував перший автомобіль, що працює на базі двигуна внутрішнього згорання. Для його запуску потрібно було вручну крутити важіль.

Початок XX століття:

1911: Компанія Cadillac представила перший електричний стартер у масовому виробництві автомобілів, усуваючи необхідність ручного крутіння.

1920-1930-і роки:

1920-і: Електричні стартери стали стандартними для більшості автомобілів, значно спрощуючи та забезпечуючи безпеку запуску двигуна.

1930-і: 12-вольтова електрична система стала стандартом в автомобільному дизайні, надаючи більше потужності електричним стартерам.

1940-1950-і роки:

1940-і: Виробники автомобілів впровадили системи запуску за допомогою ключа, замінивши кнопкові стартери. Це спростило процес запуску автомобіля.

1950-і: Електричні стартери стали більш надійними та довговічними, що призвело до їх широкого впровадження в різних типах транспортних засобів, включаючи вантажівки та автобуси.

1960-1970-і роки:

1960-і: З'явилися системи дистанційного запуску, які дозволяли запускати двигун на відстані, це було впроваджено як розкішна функція у деяких автомобілях преміум-класу.

1970-і: Стало більш поширеним використання електронних систем запалювання, що покращило ефективність процесу запуску.

1980-1990-і роки:

1980-і: Прогрес в галузі електроніки призвів до виникнення систем без ключового доступу, які об'єднали функції запуску двигуна та відкривання дверей.

1990-і: З'явилися іммобілайзери, що покращили загальний рівень безпеки автомобіля, вимагаючи електронно закодованого ключа для запуску двигуна.

2000-нині:

2000-і: Системи запуску за допомогою кнопки стали популярними, замінивши традиційний ключ. Водії можуть запускати двигун, натискаючи кнопку, коли без ключовий пульт знаходиться поблизу.

2010-і: Стартер-генераторні установки для легкових автомобілів

Актуальність дисертації пов'язана з постійною необхідністю вдосконалення спрямованою на інтеграцію електричних стартерів із системами гібридних та електричних автомобілів, забезпечуючи ефективну та безперервну роботу системи запуску та зупинки двигуна, особливо в екологічно чистих автомобілях.

Об'єкт роботи: електростартер для пуску двигуна внутрішнього згоряння легкового автомобіля.

Мета роботи: проектування конкурентоспроможного електростартера для пуску двигуна внутрішнього згоряння легкового автомобіля, розробка технологічних процесів виготовлення деталей спроектованого електростартера та складання методики його випробування.

РОЗДІЛ 1.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК СТАРТЕРНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

1.1. Вихідні дані

Номінальна напруга;

$$U_H := 12 \text{ В}$$

Номінальна потужність;

$$P_{2H} := 1650 \text{ Вт}$$

Частота обертів;

$$n_H := 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Число полюсів;

$$p := 3$$

$$2 \cdot p = 6$$

Тип обмотки – проста хвильова

$$a_{\text{я}} := 1$$

$$2 \cdot a_{\text{я}} = 2$$

$$k := 0.5$$

Автомобіль: ZAZ Forza.

1.2. Розрахункова потужність. Номінальна ємність та внутрішній опір аккумуляторної батареї

За оптимальний режим приймається режим максимальної електромагнітної потужності P_{max}

Електромагнітний ККД з рис. 1.1 $\eta_{\text{ЭМ}} = 0.87 \dots 0.91$. Приймаємо $\eta_{\text{ЭМ}} := 0.885$

Припустимо, що кратність струму k в режимі номінальної потужності дорівнює 0.5, тоді розрахункова потужність Вт:

$$P_{\text{Эmax}} := \frac{P_{2H}}{4 \cdot (1 - k) \cdot k \cdot \eta_{\text{ЭМ}}} \quad P_{\text{Эmax}} := \frac{1650}{4 \cdot (1 - 0.5) \cdot 0.5 \cdot 0.885} \quad P_{\text{Эmax}} = 1.8644 \times 10^3$$

$$P_{\text{э}} := P_{\text{эmax}} P_{\text{э}} = 1.8644 \times 10^3$$

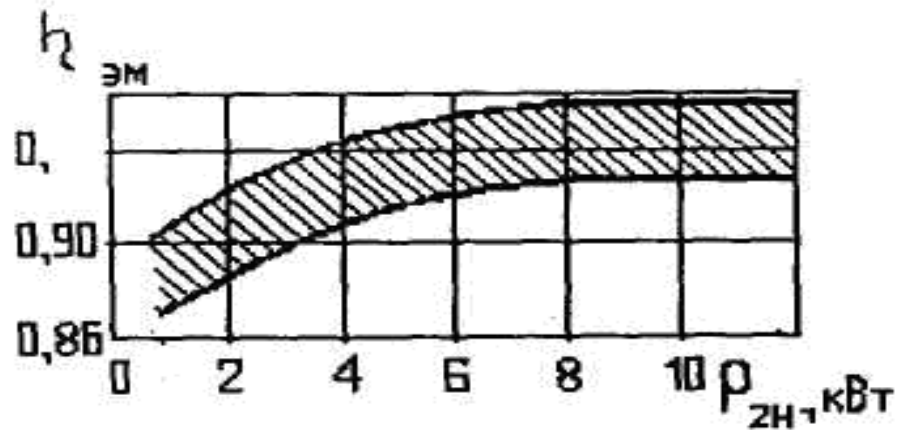


Рис. 1.1 - Залежність ККД стартерного електродвигуна від номінальної потужності.

Частота обертання в розрахунковому режимі роботи, об/хв:

$$n_{\text{мн}} := 0.5 \cdot \frac{n_{\text{н}}}{1 - k} \quad n_{\text{мн}} := 0.5 \cdot \frac{1500}{1 - 0.5} \quad n_{\text{мн}} = 1500$$

$$n := n_{\text{мн}}$$

ЕРС в обмотці якоря, В:

$$\Delta U_{\text{щ}} := 1.5$$

$$E_{\text{амн}} := (U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{щ}}) \cdot (1 - k) \quad E_{\text{амн}} := (12 - 1.5) \cdot (1 - 0.5) \quad E_{\text{амн}} = 5.25$$

$$E_{\text{а}} := E_{\text{амн}}$$

Сила струму в обмотці якоря, А:

$$I_{\text{амн}} := \frac{P_{2\text{H}}}{E_{\text{а}}} \quad I_{\text{амнэ}} := \frac{1650}{5.25} \quad I_{\text{амн}} = 314.286$$

$$I_{\text{а}} := I_{\text{амн}}$$

$$I_{\text{а}} = 314$$

Сумарний опір ланцюга якоря, Ом:

$$\Sigma R_{\text{а}} := \frac{U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{щ}} - E_{\text{а}}}{I_{\text{а}}} \quad \Sigma R_{\text{а}} := \frac{12 - 1.5 - 5.25}{314} \quad \Sigma R_{\text{а}} = 0.0167$$

Питома енергія $\frac{L_{\delta}}{P_{\text{мн}}}$ акумуляторної батареї складає 0.6 Втч/Вт.

$$\text{Приймаємо: } \frac{L_{\delta}}{P_{\text{мн}}} := 0.6$$

Номінальна ємність акумуляторної батареї, А*год:

$$P_{\text{эmax}} = 1.8644 \times 10^3$$

$$C_{20} := \frac{P_{\text{эmax}}^{0.6}}{U_{\text{H}}} \quad C_{20} := \frac{1.8644 \times 10^3 \cdot 0.6}{12} \quad C_{20} = 93.22$$

Обираємо акумуляторну батарею 6СТ-105ЕМ

Внутрішній опір акумуляторної батареї, Ом:

$$a_{\delta} := 0.05$$

$$R_{\delta} := a_{\delta} \cdot \frac{U_{\text{H}}}{C_{20}} \quad R_{\delta} := 0.05 \cdot \frac{12}{93.2} \quad R_{\delta} = 6.4378 \times 10^{-3}$$

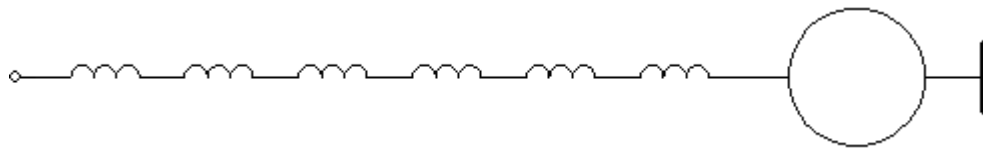


Рис. 1.2 - Схема з'єднання котушки збудження у шестиполусному стартерному електродвигуні послідовного збудження.

$$Z_s := 1 \quad a_c := 1 \quad a_s := 1 \quad a_c := a_s$$

1.3. Основні розміри електродвигуна

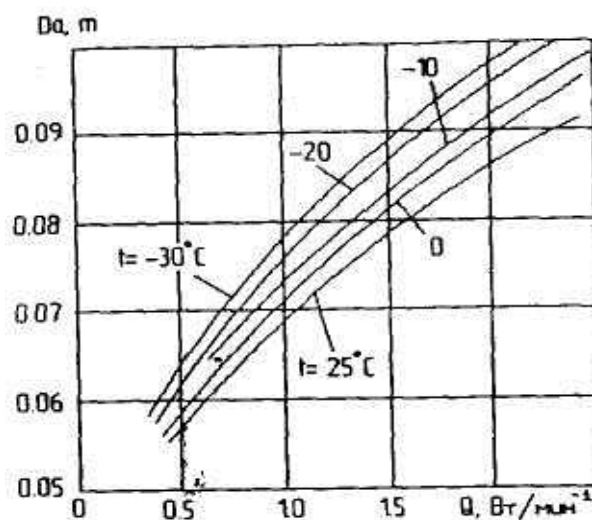


Рис. 1.3 - Залежність діаметра якоря стартерного електродвигуна.

По рис.1.3 вибираємо діаметр якоря, м:

$$D_a := 0.073$$

Зовнішній діаметр корпусу, м:

$$D_j := 1.5 \cdot D_a \quad D_j := 1.5 \cdot 0.073 \quad D_j = 0.11$$

$$Q := 0.5 \cdot \frac{P_{\Sigma}}{k \cdot n_H} \quad Q := 0.5 \cdot \frac{1.8644 \times 10^3}{0.5 \cdot 1500} \quad Q = 1.24$$

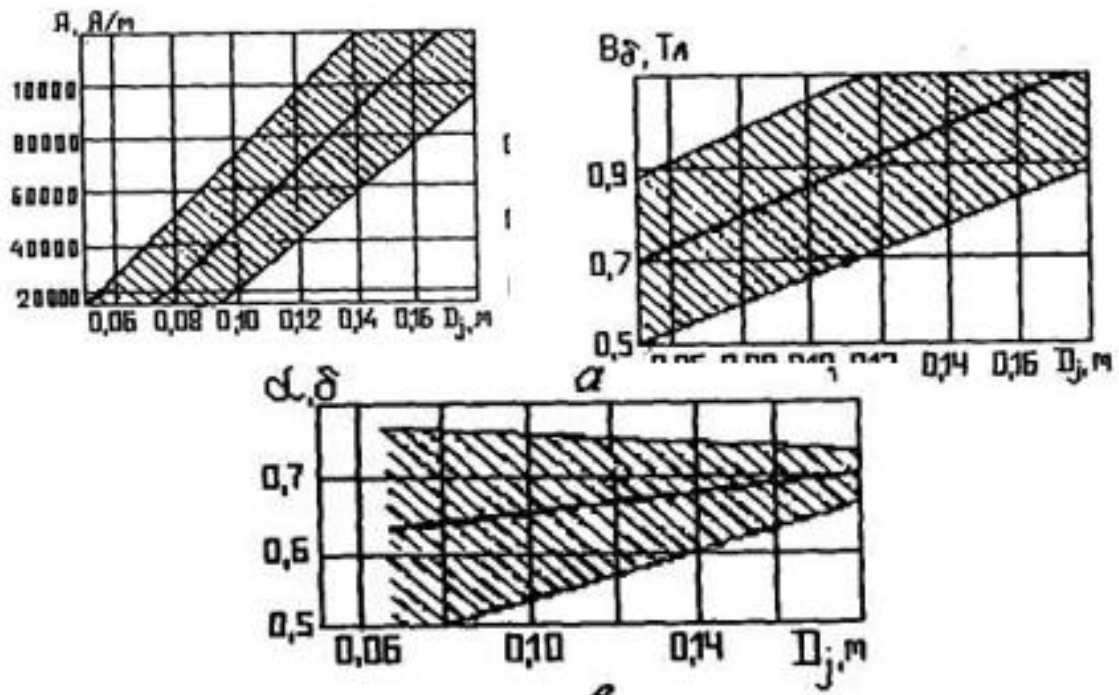


Рис.1.4 - Залежність електромагнітних навантажень від діаметра корпусу.

Залежність електромагнітних навантажень стартерного електродвигуна від діаметра корпусу за рис.1.4.

Лінійне навантаження якоря складає, А/м:

$$A := 50000$$

Магнітна індукція в повітряному зазорі, Тл.

$$B_{\delta} := 0.9$$

Коефіцієнт полюсного перекриття:

$$\alpha_{\delta} := 0.66$$

Довжина пакету якоря:

$$l_a := \frac{6.1 \cdot P_{\Sigma \max}}{A \cdot B_{\delta} \cdot \alpha_{\delta} \cdot n_H \cdot D_a^2} \quad l_a := \frac{6.1 \cdot 1.8644 \times 10^3}{50000 \cdot 0.9 \cdot 0.66 \cdot 1500 \cdot 0.073^2} \quad l_a = 0.0479$$

Полюсний поділ, м:

$$\tau := \frac{\pi \cdot D_a}{2 \cdot p} \quad \tau := \frac{\pi \cdot 0.073}{2 \cdot 3} \quad \tau = 0.0382$$

Основний магнітний потік, Вб:

$$\Phi := \alpha_\delta \cdot \tau \cdot B_\delta \cdot l_a \quad \Phi := 0.66 \cdot 0.038 \cdot 0.9 \cdot 0.0479 \quad \Phi = 0.00108$$

1.4. Обмотка якоря

Число активних провідників:

$$N := \frac{60 \cdot a_y \cdot E_a}{p \cdot n \cdot \Phi} \quad N := \frac{60 \cdot 1 \cdot 5.25}{3 \cdot 1500 \cdot 0.00108} \quad N = 65$$

Число пазів пакета якоря:

$$Z := 25 \quad K := 25 \quad S := 25$$

Число витків у секції обмотки:

$$W_{cp} := \frac{N}{2 \cdot Z} \quad W_{cp} := \frac{65}{2 \cdot 25} \quad W_{cp} = 1.3$$

$$W_c := 1$$

Уточнена кількість активних провідників:

$$N_{yT} := 2 \cdot W_c \cdot Z \quad N_{yT} := 2 \cdot 1 \cdot 25 \quad N_{yT} = 50$$

Уточнене лінійне навантаження якоря, А/м:

$$A_{yT} := \frac{I_a \cdot N_{yT}}{2 \cdot a_y \cdot 3.14 \cdot D_a} \quad A_{yT} := \frac{314 \cdot 50}{2 \cdot 1 \cdot 3.14 \cdot 0.073} \quad A_{yT} = 34247$$

Уточнена довжина пакету якоря, м:

$$l_{ayT} := \frac{6.1 \cdot P_{\text{эmax}}}{A_{yT} \cdot B_\delta \cdot \alpha_\delta \cdot n \cdot D_a^2} \quad l_{ayT} := \frac{6.1 \cdot 1.8644 \times 10^3}{34247 \cdot 0.9 \cdot 0.66 \cdot 1500 \cdot 0.073^2} \quad l_{ayT} = 0.0699$$

Ставлення

$$\lambda := \frac{l_{ayT}}{D_a} \quad \lambda := \frac{0.0699}{0.073} \quad \lambda = 0.9581 \quad \text{знаходиться в межах } 0.75 \dots 1.25$$

Уточнений основний магнітний потік, Вб:

$$\Phi_{yT} := \alpha_\delta \cdot \tau \cdot B_\delta \cdot l_{ayT} \quad \Phi_{yT} := 0.66 \cdot 0.038 \cdot 0.9 \cdot 0.0699 \quad \Phi_{yT} = 1.5778 \times 10^{-3}$$

Крок обмотки по колектору та результуючий крок:

$$Y_k := \frac{K-1}{p} \quad Y_k := \frac{25-1}{3} \quad Y_k = 8$$

$$Y := Y_k$$

Перший частковий крок:

$$y_1 := \left(\frac{Z}{2 \cdot p} \right) - \frac{1}{6} \quad y_1 := \left(\frac{25}{2 \cdot 3} \right) - \frac{1}{6} \quad y_1 = 4$$

Другий частковий крок:

$$y_2 := Y - y_1 \quad y_2 := 8 - 4 \quad y_2 = 4$$

Сумарний опір обмоток якоря та збудження, Ом:

$$R_{CT} := \Sigma R_a - R_\delta \quad R_{CT} := 0.0167 - 0.006 \quad R_{CT} = 0.0107$$

Опір обмотки якоря, Ом:

$$R_a := 0.55 \cdot R_{CT} \quad R_a := 0.55 \cdot 0.0107 \quad R_a = 5.885 \times 10^{-3}$$

Середня довжина провідника, м:

$$L_{acp} := l_{ayT} + 1.3 \cdot \tau \quad L_{acp} := 0.0699 + 1.3 \cdot 0.038 \quad L_{acp} = 0.1193$$

Площа перерізу провідника розрахункова:

$$K_t := 1.2$$

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

$$S_{арасч} := \frac{K_t \cdot \rho \cdot L_{acp} \cdot N_{yT}}{(2 \cdot a_j)^2 \cdot R_a} \quad S_{арасч} := \frac{1.2 \cdot 17.83 \cdot 10^{-9} \cdot 0.1193 \cdot 50}{(2 \cdot 1)^2 \cdot 5.885 \cdot 10^{-3}} \quad S_{арасч} = 5.4217 \times 10^{-6} \text{ м}^2$$

Ширина дроту, м:

$$b_{расч} := \sqrt{\frac{S_{арасч}}{0.49}} \quad b_{расч} := \sqrt{\frac{5.4217 \cdot 10^{-6}}{0.49}} \quad b_{расч} = 3.3264 \times 10^{-3}$$

$$\frac{a}{b} := \left[\left(\frac{14}{25^2} \right) + \left(\frac{10.4}{25} \right) + 0.05 \right] = 0.4884$$

$$K_{tyT} := \frac{\Sigma R_a}{\left(\frac{R_{CT}}{K_t} \right) + a_\delta \cdot \frac{U_H}{C_{20}}} \quad K_{tyT} := \frac{0.0167}{\left(\frac{0.0107}{1.2} \right) + 0.05 \cdot \frac{12}{93.2}} \quad K_{tyT} = 1.0889$$

Обираємо провід товщиною 0.00181м шириною 0.00328м та перетином $5.73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Відношення $a/b=0.55$ знаходиться в межах 0.33...0.73

$$S_a := 5.73 \cdot 10^{-6}$$

$$a := 0.00181$$

$$b := 0.00328$$

$$\frac{a}{b} = 0.55$$

Щільність струму в обмотці якоря вбирається у допустимій

(28....30)*10⁶ А/м²:

$$j_{\text{ан}} := \frac{K_{\text{туГ}} I_a}{4 \cdot k \cdot a_{\text{я}} \cdot S_a} \quad j_{\text{ан}} := \frac{1.0889 \cdot 314}{4 \cdot 0.5 \cdot 1.5 \cdot 73 \cdot 10^{-6}} \quad j_{\text{ан}} = 2.9836 \times 10^7$$

Уточнений опір обмотки якоря, Ом:

$$R_{\text{ауГ}} := \frac{K_{\text{туГ}} \rho \cdot L_{\text{аср}} \cdot N_{\text{уГ}}}{(2 \cdot a_{\text{я}})^2 \cdot S_a} \quad R_{\text{ауГ}} := \frac{1.0889 \cdot 1.783 \cdot 10^{-8} \cdot 50}{2^2 \cdot 5.73 \cdot 10^{-6}} \quad R_{\text{ауГ}} = 5.0529 \times 10^{-3}$$

Ставлення

$$r_a := \frac{R_{\text{ауГ}}}{R_{\text{ст}}} \quad r_a := \frac{0.005}{0.0107} \quad r_a = 0.467 \quad \text{не виходить за рекомендовані межі 0.45....0.65}$$

Маса міді обмотки якоря, кг:

$$\gamma_a := 8900$$

$$M_{\text{ма}} := \gamma_a \cdot L_{\text{аср}} \cdot N_{\text{уГ}} \cdot S_a \quad M_{\text{ма}} := 8900 \cdot 0.1193 \cdot 50 \cdot 5.73 \cdot 10^{-6} \quad M_{\text{ма}} = 0.304$$

1.5. Розміри напівзакритого паза прямокутної форми

Радіус закруглення дроту, м:

$$r_{\text{прб}} := 1.08 \cdot \sqrt{a \cdot b - S_a} \quad r_{\text{прб}} := 1.08 \cdot \sqrt{0.0018 \cdot 0.0033 - 5.73 \cdot 10^{-6}} \quad r_{\text{прб}} = 4.9113 \times 10^{-4}$$

Ширина паза, м:

$$\Delta a := 0.0003$$

$$b_{\text{пз}} := a + 2 \cdot (\Delta a + 0.0003) \quad b_{\text{пз}} := 0.0018 + 2 \cdot (0.0003 + 0.0003) \quad b_{\text{пз}} = 3.01 \times 10^{-3}$$

Ширина прорізу паза, м:

$$a_{\text{пр}} := 0.6 \cdot a \quad a_{\text{пр}} := 0.6 \cdot 0.0018 \quad a_{\text{пр}} = 1.086 \times 10^{-3}$$

Максимальний діаметр другої ділянки зубцевої зони, м:

$$D_{2\text{max}} := D_a - 2 \cdot \left(h_{\text{пр}} + 0.5 \cdot \sqrt{b_{\text{пз}}^2 - a_{\text{пр}}^2} \right)$$

$$D_{2\max} := 0.073 - 2 \cdot \left(0.001 + 0.5 \cdot \sqrt{0.003^2 - 0.00109^2} \right) \quad D_{2\max} = 0.06821$$

Висота другої ділянки зубцевої зони, м:

$$h_2 := b_{\text{пз}} + 2 \cdot b - 4 \cdot r_{\text{прб}} - 0.0003 - 0.0566 \cdot \sqrt{b_{\text{пз}} - 2 \cdot r_{\text{прб}} - 0.001}$$

$$h_2 := 0.003 + 2 \cdot 0.00328 - 4 \cdot 0.0005 - 0.0003 - 0.0566 \cdot \sqrt{0.003 - 2 \cdot 0.0005 - 0.001}$$

$$h_2 = 5.4702 \times 10^{-3}$$

Мінімальний діаметр другої ділянки зубцевої зони, м:

$$D_{2\min} := D_{2\max} - 2 \cdot h_2 \quad D_{2\min} := 0.06821 - 2 \cdot 0.005 \quad D_{2\min} = 0.0582$$

Відстань між провідниками в пазу, м:

$$ON := 0.5 \cdot a - r_{\text{прб}} \quad ON := 0.5 \cdot 0.00181 - 0.0005 \quad ON = 0.000405$$

$$OK := 0.5 \cdot b_{\text{пз}} - \Delta a - r_{\text{прб}} \quad OK := 0.5 \cdot 0.00301 - 0.0003 - 0.0005 \quad OK = 0.000705$$

$$KN := \sqrt{OK^2 - ON^2} \quad KN := \sqrt{0.000705^2 - 0.000405^2} \quad KN = 0.0005771$$

$$KF := r_{\text{прб}}$$

$$KF = 0.0005$$

$$OX := KN + KF \quad OX := 0.0005771 + 0.0005 \quad OX = 0.001077$$

$$l := h_2 - 2 \cdot (b - OX) \quad l := 0.005 - 2 \cdot (0.00328 - 0.001077) \quad l = 0.000594$$

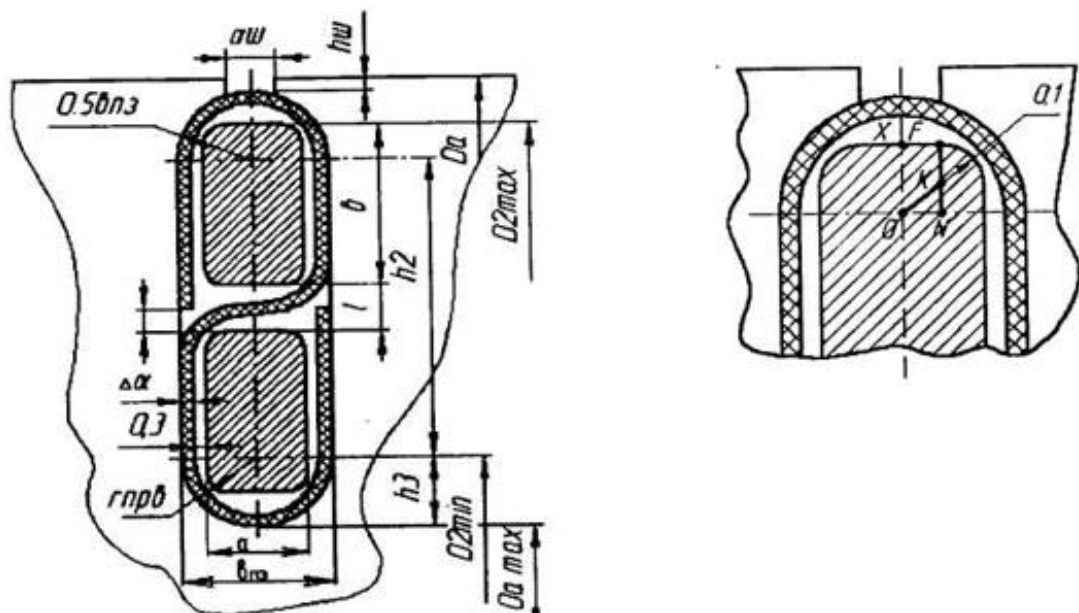


Рис 1.5 - Напівзакритий паз та його розміри з урахуванням технологічних вимог

Мінімальний діаметр зубцевої зони, м:

$$D_{\text{amin}} := D_{2\min} - b_{\text{пз}} \quad D_{\text{amin}} := 0.0582 - 0.003 \quad D_{\text{amin}} = 0.0552$$

1.6. Магнітна система електродвигуна

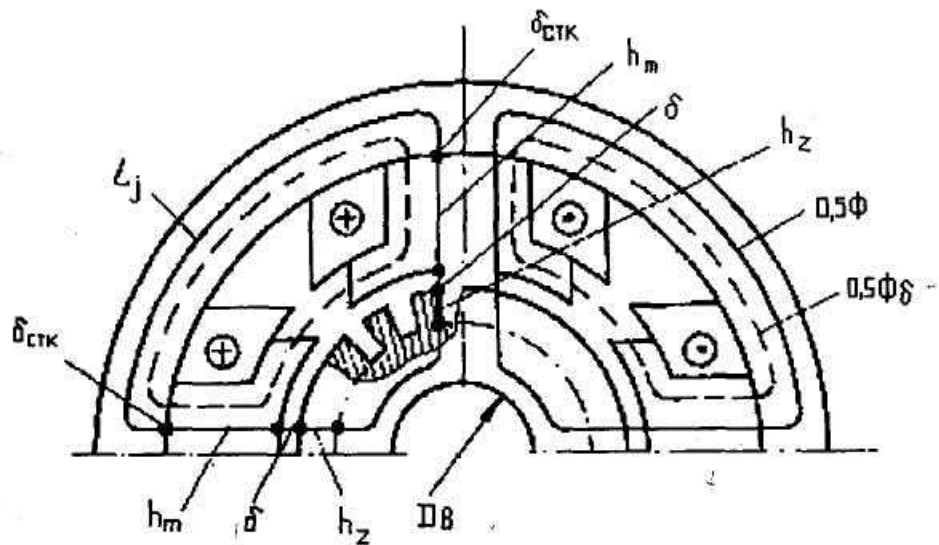


Рис 1.6 Магнітна система стартерного електродвигуна.

1.6.1. Зубцева зона

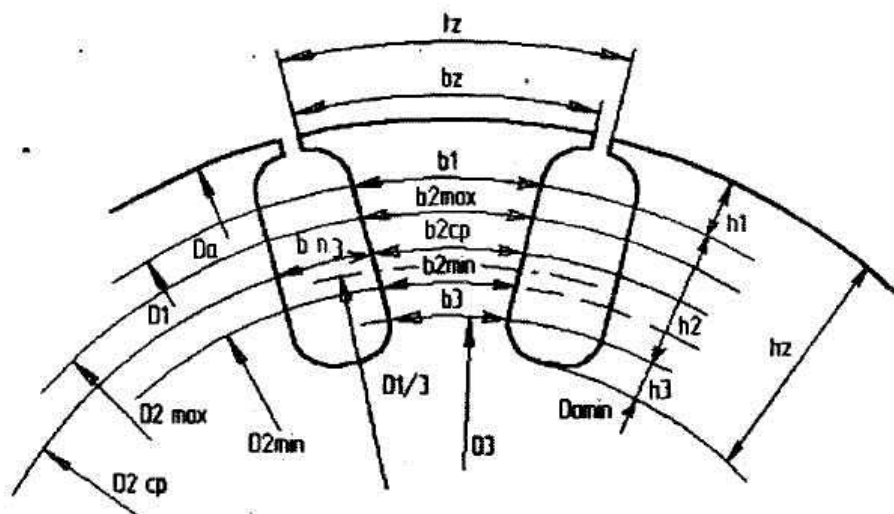


Рис 1.7 - Напівзакритий паз прямокутної форми, його форма та розміри.

Розрахункові діаметри на трьох ділянках зубцевої зони, м:

$$D_1 := 0.5 \cdot (D_a + D_{2max}) \quad D_1 := 0.5 \cdot (0.073 + 0.0682) \quad D_1 = 0.0706$$

$$D_{2cp} := 0.5 \cdot (D_{2max} + D_{2min}) \quad D_{2cp} := 0.5 \cdot (0.0682 + 0.0582) \quad D_{2cp} = 0.0632$$

$$D_3 := D_{2min} - 0.5 \cdot b_{пз} \quad D_3 := 0.0582 - 0.5 \cdot 0.003 \quad D_3 = 0.0567$$

Висота першої ділянки зубцевої зони, м:

$$h_1 := 0.5 \cdot (D_a - D_{2max}) \quad h_1 := 0.5 \cdot (0.073 - 0.0682) \quad h_1 = 0.002397$$

Висота третьої ділянки зубцевої зони, м:

$$h_3 := 0.5 \cdot b_{\text{ПЗ}} \quad h_3 := 0.5 \cdot 0.003 \quad h_3 = 0.001505$$

Висота зубця, м:

$$h_z := h_1 + h_2 + h_3 \quad h_z := 0.002397 + 0.003 + 0.001505 \quad h_z = 0.008902$$

Зубцеві кроки по зовнішньому діаметру якоря та в розрахункових перерізах зубця, м:

$$t_z := \frac{\pi \cdot D_a}{Z} \quad t_z := \pi \cdot \frac{0.073}{25} \quad t_z = 9.1735 \times 10^{-3}$$

$$t_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{Z} \quad t_1 := \pi \cdot \frac{0.0706}{25} \quad t_1 = 8.8722 \times 10^{-3}$$

$$t_{2\text{max}} := \frac{\pi \cdot D_{2\text{max}}}{Z} \quad t_{2\text{max}} := \pi \cdot \frac{0.0682}{25} \quad t_{2\text{max}} = 8.5709 \times 10^{-3}$$

$$t_{2\text{cp}} := \frac{\pi \cdot D_{2\text{cp}}}{Z} \quad t_{2\text{cp}} := \pi \cdot \frac{0.0632}{25} \quad t_{2\text{cp}} = 7.9429 \times 10^{-3}$$

$$t_{2\text{min}} := \frac{\pi \cdot D_{2\text{min}}}{Z} \quad t_{2\text{min}} := \pi \cdot \frac{0.0582}{25} \quad t_{2\text{min}} = 7.3149 \times 10^{-3}$$

$$t_3 := \frac{\pi \cdot D_3}{Z} \quad t_3 := \pi \cdot \frac{0.0567}{25} \quad t_3 = 7.1258 \times 10^{-3}$$

Ширина зубця, м:

$$b_z := t_z - a_{\text{ПЗ}} \quad b_z := 0.00917 - 0.00109 \quad b_z = 8.0835 \times 10^{-3}$$

$$b_1 := t_1 - \sqrt{b_{\text{ПЗ}}^2 - h_1^2} \quad b_1 := 0.00887 - \sqrt{0.003^2 - 0.002397^2} \quad b_1 = 7.0522 \times 10^{-3}$$

$$b_{2\text{max}} := t_{2\text{max}} - b_{\text{ПЗ}} \quad b_{2\text{max}} := 8.5709 \cdot 10^{-3} - 0.003 \quad b_{2\text{max}} = 5.5609 \times 10^{-3}$$

$$b_{2\text{cp}} := t_{2\text{cp}} - b_{\text{ПЗ}} \quad b_{2\text{cp}} := 7.9426 \cdot 10^{-3} - 0.003 \quad b_{2\text{cp}} = 4.9329 \times 10^{-3}$$

$$b_{2\text{min}} := t_{2\text{min}} - b_{\text{ПЗ}} \quad b_{2\text{min}} := 7.3149 \cdot 10^{-3} - 0.003 \quad b_{2\text{min}} = 4.3049 \times 10^{-3}$$

$$b_3 := t_3 - 0.866 \cdot b_{\text{ПЗ}} \quad b_3 := 7.1258 \cdot 10^{-3} - 0.866 \cdot 0.003 \quad b_3 = 4.5191 \times 10^{-3}$$

$$K_c := 0.95$$

Магнітні індукції в розрахункових перерізах зубця, Тл:

$$B_1 := \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_1} \quad B_1 := \frac{0.00917 \cdot 0.9}{0.95 \cdot 7.0522 \cdot 10^{-3}} \quad B_1 = 1.2323$$

$$B_{zmin} := \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_{2max}} \quad B_{zmin} := \frac{0.00917 \cdot 0.9}{0.95 \cdot 5.5609 \cdot 10^{-3}} \quad B_{zmin} = 1.5628$$

$$B_{zmax} := \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_{2min}} \quad B_{zmax} := \frac{0.00917 \cdot 0.9}{0.95 \cdot 4.3049 \cdot 10^{-3}} \quad B_{zmax} = 2.0188$$

$$B_{2cp} := \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_{2cp}} \quad B_{2cp} := \frac{0.00917 \cdot 0.9}{0.95 \cdot 4.9329 \cdot 10^{-3}} \quad B_{2cp} = 1.7618$$

$$B_3 := \frac{t_z \cdot B_\delta}{K_c \cdot b_3} \quad B_3 := \frac{0.00917 \cdot 0.9}{0.95 \cdot 4.5191 \cdot 10^{-3}} \quad B_3 = 1.9231$$

Зубцеві коефіцієнти:

$$K_{z1} := \left(\frac{t_1}{K_c \cdot b_1} \right) - 1 \quad K_{z1} := \left(\frac{8.8722 \cdot 10^{-3}}{0.95 \cdot 7.0522 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \quad K_{z1} = 0.3243$$

$$K_{2min} := \left(\frac{t_{2max}}{K_c \cdot b_{2max}} \right) - 1 \quad K_{2min} := \left(\frac{8.5709 \cdot 10^{-3}}{0.95 \cdot 5.5609 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \quad K_{2min} = 0.6224$$

$$K_{2cp} := \left(\frac{t_{2cp}}{K_c \cdot b_{2cp}} \right) - 1 \quad K_{2cp} := \left(\frac{7.9429 \cdot 10^{-3}}{0.95 \cdot 4.9329 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \quad K_{2cp} = 0.6949$$

$$K_{2max} := \left(\frac{t_{2min}}{K_c \cdot b_{2min}} \right) - 1 \quad K_{2max} := \left(\frac{7.3149 \cdot 10^{-3}}{0.95 \cdot 4.3049 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \quad K_{2max} = 0.7886$$

$$K_3 := \left(\frac{t_3}{K_c \cdot b_3} \right) - 1 \quad K_3 := \left(\frac{7.1258 \cdot 10^{-3}}{0.95 \cdot 4.5191 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \quad K_3 = 0.6598$$

Напруженості магнітного поля в розрахункових перерізах зубцевої зони визначаються за графіками на рис.1.8 та 1.9.

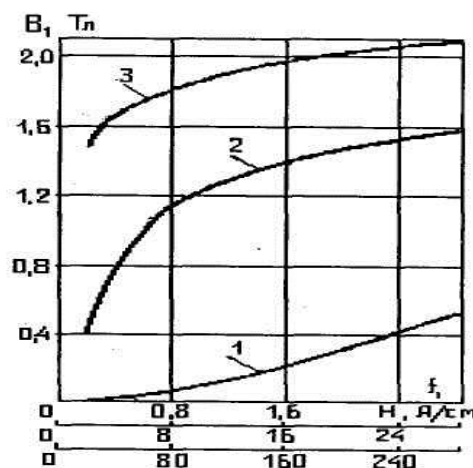


Рис. 1.8 - Основна крива намагнічування.

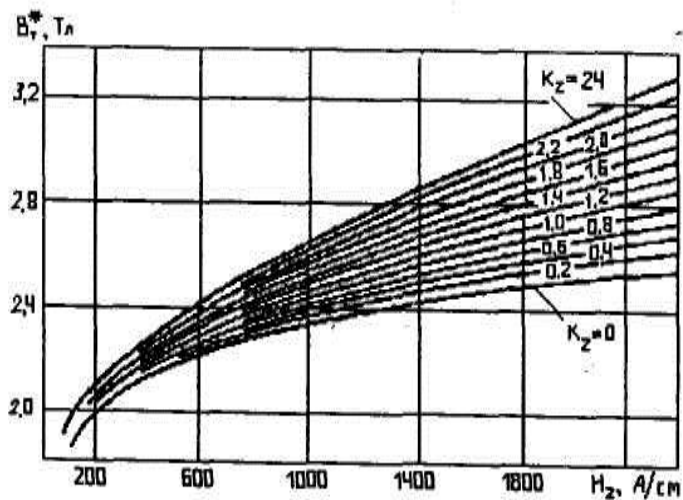


Рис.1.9 - Характеристика намагнічування зубців.

$$H_{2\min} := 2700$$

$$H_{2\text{cp}} := 11100$$

$$H_{2\max} := 43200$$

Середня напруженість на другій ділянці, А/м:

$$H_2 := \frac{1}{6}(H_{2\min} + 4 \cdot H_{2\text{cp}} + H_{2\max}) \quad H_2 := \frac{1}{6}(2700 + 4 \cdot 11100 + 43200) \quad H_2 = 15050$$

$$H_1 := 430$$

$$H_3 := 23700$$

МДС для першої ділянки, А:

$$F_{z1} := 2 \cdot h_1 \cdot H_1 \quad F_{z1} := 2 \cdot 0.0024 \cdot 430 \quad F_{z1} = 2.0618$$

МДС для другої ділянки, А:

$$F_{z2} := 2 \cdot h_2 \cdot H_2 \quad F_{z2} := 2 \cdot 0.005 \cdot 15050 \quad F_{z2} = 150.5$$

МДС для третьої ділянки, А:

$$F_{z3} := 2 \cdot h_3 \cdot H_3 \quad F_{z3} := 2 \cdot 0.0015 \cdot 23700 \quad F_{z3} = 71.337$$

МДС зубцевої зони, А:

$$F_z := F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} \quad F_z := 2.0618 + 150.5 + 71.337 \quad F_z = 223.8988$$

1.6.2. Повітряний проміжок

$$\text{Приймаємо } \delta := 0.0005_{\text{м}}$$

Коефіцієнт повітряного зазору:

$$K_{\delta} := \frac{t_z + 10 \cdot \delta}{b_z + 10 \cdot \delta} \quad K_{\delta} := \frac{0.00917 + 10 \cdot 0.0005}{0.00808 + 10 \cdot 0.0005} \quad K_{\delta} = 1.0833$$

МДС для повітряного зазору, А:

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

$$F_{\delta} := \frac{2 \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot B_{\delta}}{\mu_0} \quad F_{\delta} := \frac{2 \cdot 1.0833 \cdot 0.0005 \cdot 0.9}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \quad F_{\delta} = 775.8646$$

1.6.3. Корпус, полюс, осердя якоря

Зовнішній діаметр корпусу, м:

$$D_j := 1.5 \cdot D_a \quad D_j := 1.5 \cdot 0.073 \quad D_j = 0.11$$

Приймаємо діаметр корпусу рівним 0.11м, що відповідає номінальному ряду діаметрів

Довжина корпусу, м:

$$l_j := 1.8 \cdot l_{ay1} \quad l_j := 1.8 \cdot 0.0699 \quad l_j = 0.1259$$

Площа розрахункового перерізу корпусу, м²:

$$B_j := 1.3$$

$$\sigma := 1.15$$

$$S_j := \frac{\sigma \cdot \Phi_{yT}}{2 \cdot B_j} \quad S_j := \frac{1.15 \cdot 1.578 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1.3} \quad S_j = 6.9796 \times 10^{-4}$$

Товщина корпусу, м:

$$h_j := \frac{S_j}{l_j} \quad h_j := \frac{6.9796 \cdot 10^{-4}}{0.1259} \quad h_j = 0.0055$$

Діаметр розточування полюсів, м:

$$D_i := D_a + 2 \cdot \delta \quad D_i := 0.073 + 2 \cdot 0.0005 \quad D_i = 0.074$$

Довжина розточування полюсів, м:

$$l_1 := \alpha_{\delta} \cdot \tau + 2 \cdot \delta \quad l_1 := 0.66 \cdot 0.038 + 2 \cdot 0.0005 \quad l_1 = 0.0261$$

Центральний кут полюсної дуги, радий:

$$\beta := \frac{2 \cdot l_1}{D_a} \quad \beta := \frac{2 \cdot 0.0261}{0.073} \quad \beta = 0.7145 \quad (41^{\circ})$$

Довжина полюса, м:

$$l_m := l_{\text{ауТ}} - 0.002 \quad l_m := 0.0699 - 0.002 \quad l_m = 0.0679$$

Площа перерізу полюса, м²:

$$B_m := 1.5$$

$$S_m := \frac{\sigma \cdot \Phi_{\text{уТ}}}{B_m} \quad S_m := \frac{1.15 \cdot 1.578 \cdot 10^{-3}}{1.5} \quad S_m = 1.2098 \times 10^{-3}$$

Висота полюса, м:

$$h_m := 0.5 \cdot (D_j - D_i - 2 \cdot h_j) \quad h_m := 0.5 \cdot (0.1095 - 0.074 - 2 \cdot 0.0055) \quad h_m = 0.01$$

Висота наконечника полюса, м:

$$h_{\text{НК}} := 0.3 \cdot h_m \quad h_{\text{НК}} := 0.3 \cdot 0.01 \quad h_{\text{НК}} = 0.003$$

Довжина наконечника полюса, м:

$$b_{\text{НК}} := 0.5 \cdot (\alpha_{\delta} \cdot \tau - h_m) \quad b_{\text{НК}} := 0.5 \cdot (0.66 \cdot 0.038 - 0.01) \quad b_{\text{НК}} = 7.54 \times 10^{-3}$$

Діаметр валу якоря, м:

$$D_b := 0.3 \cdot D_a \quad D_b := 0.3 \cdot 0.073 \quad D_b = 0.0219$$

Висота осердя якоря, м:

$$h_a := 0.5 \cdot (D_a - 2 \cdot h_z - D_b) \quad h_a := 0.5 \cdot (0.073 - 2 \cdot 8.9025 \cdot 10^{-3} - 0.0219) \quad h_a = 0.0166$$

Магнітна індукція в осерді якоря, м:

$$B_a := \frac{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot B_{\delta}}{2 \cdot K_c \cdot h_a} \quad B_a := \frac{0.66 \cdot 0.038 \cdot 0.9}{2 \cdot 0.95 \cdot 0.0166} \quad B_a = 0.7136$$

$$b_m := \frac{\sigma \cdot \Phi_{\text{уТ}}}{B_m \cdot l_m} \quad b_m := \frac{1.15 \cdot 1.578 \cdot 10^{-3}}{1.5 \cdot 0.0679} \quad b_m = 0.0178$$

Магнітна індукція у полюсі залежно від величини B_{δ} , Тл:

$$B_{\text{муТ}} := \frac{\sigma \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\text{ауТ}} \cdot B_{\delta}}{l_m \cdot b_m} \quad B_{\text{муТ}} := \frac{1.15 \cdot 0.66 \cdot 0.038 \cdot 0.0699 \cdot 0.9}{0.0679 \cdot 0.0178} \quad B_{\text{муТ}} = 1.5007$$

Магнітна індукція у корпусі залежно від величини B_{δ} , Тл:

$$B_{\text{жуТ}} := \frac{\sigma \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_a \cdot B_{\delta}}{2 \cdot l_j \cdot h_j} \quad B_{\text{жуТ}} := \frac{1.15 \cdot 0.66 \cdot 0.038 \cdot 0.0699 \cdot 0.9}{2 \cdot 0.1259 \cdot 0.006} \quad B_{\text{жуТ}} = 0.8231$$

Довжина середньої магнітної силової лінії в осерді якоря, м:

$$L_a := \left[\frac{\pi \cdot (D_b + h_a)}{2 \cdot p} \right] + h_a - 0.5 \cdot b_m \quad L_a := \left[\frac{\pi \cdot (0.0219 + 0.0166)}{2 \cdot 3} \right] + 0.0166 - 0.5 \cdot 0.0178$$

$$L_a = 0.0279$$

Довжина середньої магнітної силової лінії в корпусі, м:

$$L_j := \left[\frac{\pi \cdot (D_j - h_j)}{2 \cdot p} \right] + h_j - 0.5 \cdot b_m \quad L_j := \left[\frac{\pi \cdot (0.1095 - 0.006)}{2 \cdot 3} \right] + 0.006 - 0.5 \cdot 0.0178$$

$$L_j = 0.0513$$

Напруженість магнітного поля визначаємо за графіком

$$H_a := 324$$

МДС у осерді якоря, А:

$$F_a := L_a \cdot H_a \quad F_a := 0.0279 \cdot 324 \quad F_a = 9.0396$$

$$H_j := 262$$

МДС для корпусу, А:

$$F_j := L_j \cdot H_j \quad F_j := 0.0513 \cdot 262 \quad F_j = 13.4377$$

$$H_m := 1600$$

МДС для полюса, А:

$$F_m := 2 \cdot h_m \cdot H_m \quad F_m := 2 \cdot 0.01 \cdot 1600 \quad F_m = 32$$

1.6.4. МДС для повітряного зазору у стику полюса з корпусом

$$\delta_{ст} := 0.00005$$

$$F_{ст} := \frac{2 \cdot \sigma \cdot \alpha_{\delta} \cdot l_{аут} \cdot \delta_{ст} \cdot B_{\delta}}{\mu_0 \cdot l_m \cdot b_m} \quad F_{ст} := \frac{2 \cdot 1.15 \cdot 0.66 \cdot 0.0699 \cdot 0.00005 \cdot 0.9}{1.2566 \cdot 10^{-6} \cdot 0.0679 \cdot 0.0178} \quad F_{ст} = 3142.6121$$

1.6.5. Характеристики намагнічування електродвигуна

Сумарна МДС для полюса у розрахунковому робочому режимі:

$$F_{\Sigma} := F_z + F_{\delta} + F_a + F_m + F_j + F_{ст}$$

$$F_{\Sigma} := 223.8988 + 775.8646 + 9.0396 + 32 + 13.4377 + 3142.6121$$

$$F_{\Sigma} = 4196.8528$$

Результати розрахунку МДС зведені у табл.1.1.

1.7. Обмотка збудження

Необхідна МДС збудження з урахуванням розмагнічує дії реакції якоря, А:

$$F_B := 1.3 \cdot F_{\Sigma} \quad F_B := 1.3 \cdot 4196.8528 \quad F_B = 5455.9086$$

Таблиця 1.1 - Характеристики намагнічування.

Bб	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1
B1	0,2736	0,5472	0,8208	0,9576	1,0944	1,2312	1,368
Bzmin	0,348	0,696	1,044	1,218	1,392	1,566	1,74
B2cp	0,392	0,784	1,176	1,372	1,568	1,764	1,96
Bzmax	0,448	0,896	1,344	1,568	1,792	2,016	2,24
B3	0,43	0,86	1,29	1,505	1,72	1,935	2,15
Ba	0,1586	0,3172	0,4758	0,5551	0,6344	0,7137	0,793
Bm	0,334	0,668	1,002	1,169	1,336	1,503	1,67
Bj	0,182	0,364	0,546	0,637	0,728	0,819	0,91
			Напряженности магнитного поля				
H1	46	81	150	220	300	430	830
Hzmin	56	96	264	420	490	2700	10000
H2cp	68	131	380	830	2700	11100	30000
Hzmax	73	190	690	2700	12800	43200	176000
H2	66,83333	135	412,3333	1073,333	4015	15050	51000
H3	71	170	520	1750	8900	25700	104000
Ha	37	58	75	82	90	103	140
Hm	56	90	170	260	420	700	1700
Hj	144	288	443	525	613	703	810
			МДС ,А				
F1	0,22126	0,38961	0,7215	1,0582	1,443	2,0683	3,9923
F2	0,668333	1,35	4,123333	10,73333	40,15	150,5	510
F3	0,213	0,51	1,56	5,25	26,7	77,1	312
Fz	1,102593	2,24961	6,404833	17,04153	68,293	229,6683	825,9923
Fa	0,888	1,392	1,8	1,968	2,16	2,472	3,36
Fm	1,12	1,8	3,4	5,2	8,4	14	34
Fj	7,344	14,688	22,593	26,775	31,263	35,853	41,31
Fб	172,4	344,8	517,2	603,4	689,6	775,8	862
Fбс	698,4	1396,8	2095,2	2444,4	2793,6	3142,8	3492
Fбза	174,3906	348,4416	525,4048	622,4095	760,053	1007,94	1691,352
F	881,2546	1761,73	2646,598	3098,785	3593,316	4200,593	5258,662

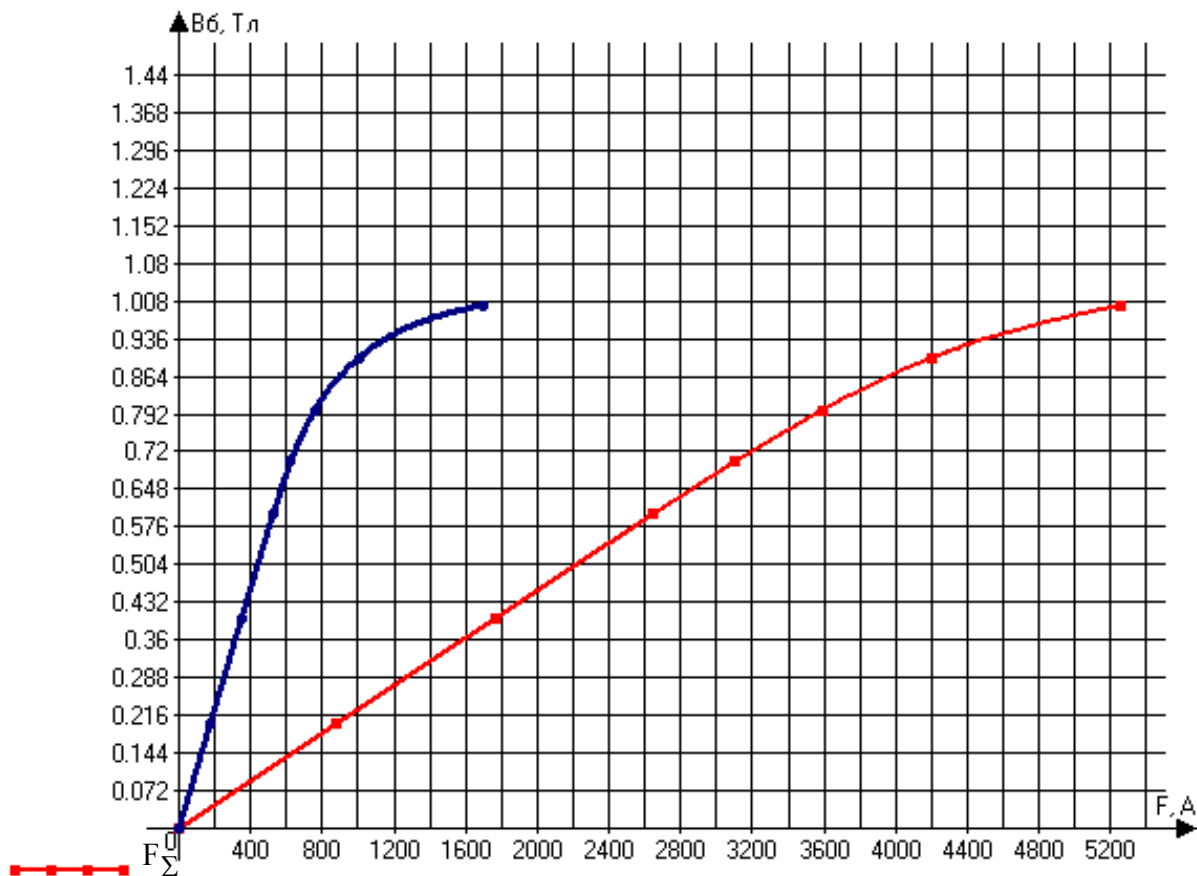


Рис.1.10 Характеристики намагнічування стартерних електродвигунів при послідовному збудженні

Вибираємо схему із послідовним з'єднанням котушок ($a_c=1$), наведену на рис.1.2.

Число витків у котушці:

$$W_{kc} := \frac{F_B \cdot a_c}{2 \cdot I_a} \quad W_{kc} := \frac{5455.9086 \cdot 1}{2 \cdot 314} \quad W_{kc} = 8.6878$$

Опір обмотки, Ом:

$$R_c := R_{ст} - R_{ay1} \quad R_c := 0.0107 - 0.005 \quad R_c = 0.0057$$

Опір котушки, Ом:

$$R_{kc} := \frac{a_c^2 \cdot R_c}{Z_c} \quad R_{kc} := \frac{1^2 \cdot 0.0057}{3} \quad R_{kc} = 0.0019$$

Середня довжина витка котушки, м:

$$b_k := 0.0375$$

$$L_{kcp} := 2 \cdot (l_m + b_m) + \pi \cdot b_k \quad L_{kcp} := 2 \cdot (0.0679 + 0.0178) + \pi \cdot 0.0375 \quad L_{kcp} = 0.2893$$

Площа перерізу дроту котушки:

$$S_c := \frac{K_t \cdot \rho \cdot L_{\text{ксп}} \cdot W_{\text{кк}}}{R_{\text{кк}}} \quad S_c := \frac{1.2 \cdot 1.783 \cdot 10^{-8} \cdot 0.2893 \cdot 8.7}{0.0019} \quad S_c = 2.8343 \times 10^{-5} \text{ м}^2$$

Висота котушки та дроту, м:

$$h_k := h_m - h_{\text{нк}} \quad h_k := 0.01 - 0.003 \quad h_k = 7 \times 10^{-3}$$

$$\Delta b_H := 0.0011$$

Висота дроту, м:

$$b_{\text{пр}} := h_k - 2 \cdot \Delta b_H \quad b_{\text{пр}} := 0.007 - 2 \cdot 0.0011 \quad b_{\text{пр}} = 0.0048$$

Дійсна ширина котушки менше 0.0375

$$\Delta c := 0.0003$$

$$a_{\text{кт}} := 2.5 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{\text{ct}} := 28.45 \cdot 10^{-6}$$

$$b_{\text{кт}} := 10 \cdot 10^{-3}$$

$$b_{\text{кут}} := a_{\text{кт}} \cdot W_{\text{кк}} + \Delta c \cdot (W_{\text{кк}} - 1) + 2 \cdot \Delta b_H \quad b_{\text{кут}} := 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot 8.7 + 0.0003 \cdot (8.7 - 1) + 2 \cdot 0.0011$$

$$b_{\text{кут}} = 0.0263$$

Уточнена середня довжина витка (уточнення), м:

$$L_{\text{ксп}} := 2 \cdot (l_m + b_m) + \pi \cdot b_{\text{кут}} \quad L_{\text{ксп}} := 2 \cdot (0.0679 + 0.0178) + \pi \cdot 0.0263 \quad L_{\text{ксп}} = 0.254$$

Опір котушки (уточнення), Ом:

$$R_{\text{кк}} := \frac{K_t \cdot \rho \cdot L_{\text{ксп}} \cdot W_{\text{кк}}}{S_{\text{ct}}} \quad R_{\text{кк}} := \frac{1.2 \cdot 1.783 \cdot 10^{-8} \cdot 8.7}{2.845 \cdot 10^{-5}} \quad R_{\text{кк}} = 0.0017$$

Опір обмотки (уточнення), Ом:

$$R_c := \frac{Z_c \cdot R_{\text{кк}}}{a_c^2} \quad R_c := \frac{3 \cdot 0.0017}{1^2} \quad R_c = 0.005$$

Маса міді обмотки якоря, кг:

$$\gamma_c := 8900$$

$$M_{\text{вс}} := \gamma_c \cdot L_{\text{ксп}} \cdot W_{\text{кк}} \cdot S_{\text{ct}} \cdot Z_c \quad M_{\text{вс}} := 8900 \cdot 0.254 \cdot 8.7 \cdot 2.845 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \quad M_{\text{вс}} = 1.6786$$

Щільність струму в обмотці при R_n менша за допустиму:

$$j_{\text{сн}} := \frac{K_t \cdot I_a}{2 \cdot k \cdot a_c \cdot S_{\text{ct}}} \quad j_{\text{сн}} := \frac{1.2 \cdot 314}{2 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 2.845 \cdot 10^{-5}} \quad j_{\text{сн}} = 1.3244 \times 10^7 \text{ А/м}^2$$

Сумарний уточнений опір якоря стартера, Ом:

$$R_{ct} := R_a + R_c \quad R_{ct} := 0.0059 + 0.005 \quad R_{ct} = 0.0109$$

Сумарний опір ланцюга якоря (уточнення), Ом:

$$\Sigma R_{ayT} := R_{ct} + R_{\delta} \quad \Sigma R_{ayT} := 0.0109 + 0.006 \quad \Sigma R_{ayT} = 0.0169$$

1.8. Колектор та щітки

Діаметр робочої поверхні колектора, м:

$$D_k := 0.6 \cdot D_a \quad D_k := 0.6 \cdot 0.073 \quad D_k = 0.0438$$

$$D_k := 0.05$$

Зовнішній діаметр по півнях, м:

$$D_{\Pi} := D_k + 2 \cdot b + 0.002 \quad D_{\Pi} := 0.05 + 2 \cdot 0.00328 + 0.002 \quad D_{\Pi} = 0.0586$$

Колекторний поділ, м:

$$\beta_k := \frac{\pi \cdot D_k}{K} \quad \beta_k := \frac{\pi \cdot 0.05}{25} \quad \beta_k = 0.0063$$

$$\Delta_{\text{иЭК}} := 0.0006$$

Ширина колекторної пластини, м:

$$b_k := \beta_k - \Delta_{\text{иЭК}} \quad b_k := 0.0063 - 0.0006 \quad b_k = 0.0057$$

Ширина щітки, м:

$$b_{\text{щ}} := 1.6 \cdot \beta_k \quad b_{\text{щ}} := 1.6 \cdot 0.0063 \quad b_{\text{щ}} = 0.0101$$

Площа перерізу щітки, м:

$$r_t := 1$$

$$j_{\text{щк}} := 85 \cdot 10^4$$

$$S_{\text{щ}} := \frac{r_t \cdot I_a}{2 \cdot k \cdot p \cdot j_{\text{щк}}} \quad S_{\text{щ}} := \frac{1 \cdot 314}{2 \cdot 0.5 \cdot 3 \cdot 85 \cdot 10^4} \quad S_{\text{щ}} = 0.000123$$

Довжина щітки, м:

$$L_{\text{щ}} := \frac{S_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}} \quad L_{\text{щ}} := \frac{0.000123}{0.0101} \quad L_{\text{щ}} = 0.0122$$

Обираємо щітка шириною 0.0088 м та довжиною 0.0192 м.

$$b_{\text{щ}} := 0.0088$$

$$l_{\text{щ}} := 0.0192$$

Уточнена щільність струму в щітці:

$$j_{\text{щ}} := \frac{r_t \cdot I_a}{2 \cdot k \cdot p \cdot b_{\text{щ}} \cdot l_{\text{щ}}} \quad j_{\text{щ}} := \frac{1.314}{2 \cdot 0.5 \cdot 3 \cdot 0.0088 \cdot 0.0192} \quad j_{\text{щ}} = 6.1948 \times 10^5 \text{ A/m}^2$$

Перекриття пластин (уточнення):

$$\frac{b_{\text{щ}}}{b_k} := \frac{0.0088}{0.0057} \quad \frac{b_{\text{щ}}}{b_k} = 1.5484 \quad \frac{b_{\text{щ}}}{b_k} < 2$$

Довжина робочої поверхні колектора, м:

$$N_{\text{щ}} := 1$$

$$l_{ka} := l_{\text{щ}} \cdot N_{\text{щ}} + 0.006 \quad l_{ka} := 0.0192 \cdot 1 + 0.006 \quad l_{ka} = 0.0252$$

Довжина півня, м:

$$q := 1.6 \cdot b \quad q := 1.6 \cdot 0.00328 \quad q = 0.0052$$

Повна довжина колектора, м:

$$l_k := l_{ka} + q \quad l_k := 0.0252 + 0.0052 \quad l_k = 0.0304$$

Окружна швидкість обертання колектора, м/с:

$$v_k := \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60} \quad v_k := \frac{\pi \cdot 0.05 \cdot 1500}{60} \quad v_k = 3.927$$

1.9. Робочі характеристики

1.9.1. Електродвигун послідовного збудження

Сила струму в режимі гальмування, А:

$$I_{\text{кст}} := \frac{(U_H - \Delta U_{\text{щ}})}{\Sigma R_a} \quad I_{\text{кст}} := \frac{(12 - 1.5)}{0.0167} \quad I_{\text{кст}} = 628$$

Сила струму при P_{mn} (уточнення), А:

$$I_{\text{амн}} := \frac{I_{\text{кст}}}{2} \quad I_{\text{амн}} := \frac{628}{2} \quad I_{\text{амн}} = 314$$

Максимальна електромагнітна потужність, Вт:

$$P_{\text{mn}} := \frac{(U_H - \Delta U_{\text{щ}})^2}{4 \cdot \Sigma R_a} \quad P_{\text{mn}} := \frac{(12 - 1.5)^2}{4 \cdot 0.0167} \quad P_{\text{mn}} = 1648.5$$

Результати розрахунку параметрів робочих характеристик для кількох значень струму стартера вносимо до табл. 1.2.

Напруга на клеммах стартера, В:

$$U_{CT} := U_H - R_{\delta} \cdot I_a \quad U_{CT} := 12 - 0.006 \cdot 314 \quad U_{CT} = 10.116$$

МДС збудження на два полюси, А:

$$F_B := 2 \cdot W_{kc} \cdot \frac{I_a}{a_c} \quad F_B := 2 \cdot 8.7 \cdot \frac{314}{1} \quad F_B = 5463.6$$

Лінійне навантаження якоря, А/м:

$$a_e := 1$$

$$A_{л} := \frac{N_{yT} \cdot I_a}{2 \cdot a_e \cdot \pi \cdot D_a} \quad A_{л} := \frac{50 \cdot 314}{2 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0.073} \quad A_{л} = 34229$$

МДС поперечної реакції якоря, А:

$$F_q := \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot A_{л} \quad F_q := 0.66 \cdot 0.038 \cdot 34229 \quad F_q = 858$$

Магнітна індукція в повітряному зазорі з урахуванням дії реакції якоря, що розмагнічує, Тл:

$$B_{\delta \max i} := 1.4$$

$$7I_{amn} = 2.198 \times 10^3$$

$$B_{\delta i} := 1.2$$

$$B_{\delta \min i} := 0.95$$

$$B'_{\delta i} := \frac{1}{6} \cdot (B_{\delta \max i} + 4 \cdot B_{\delta i} + B_{\delta \min i}) \quad B'_{\delta i} := \frac{1}{6} \cdot (1.4 + 4 \cdot 1.2 + 0.95) \quad B'_{\delta i} = 1.1917$$

Магнітний потік, Вб:

$$\Phi' := \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{ayT} \cdot B'_{\delta i} \quad \Phi' := 0.66 \cdot 0.038 \cdot 0.0699 \cdot 1.1917 \quad \Phi' = 0.0021$$

ЕРС в обмотці якоря, В:

$$E'_a := U_H - \Delta U_{щ} - \Sigma R_a \cdot I_a \quad E'_a := 12 - 1.5 - 0.0167 \cdot 314 \quad E'_a = 5.25$$

Частота обертання якоря, об/хв:

$$n' := \frac{60 \cdot a_y \cdot E_a}{p \cdot N_{yT} \cdot \Phi'} \quad n' := \frac{60 \cdot 1 \cdot 5.25}{3 \cdot 50 \cdot 0.0021} \quad n' = 1000 \quad \frac{60}{p \cdot N_{yT}} = 0.4$$

Електромагнітна потужність, Вт:

$$P'_{\text{эmax}} := E'_a \cdot I_a \quad P'_{\text{эmax}} := 5.25 \cdot 314 \quad P'_{\text{эmax}} = 1648.5$$

Втрати потужності в підшипниках, Вт:

$$\Delta P_{\Pi} := 0.03 \cdot P'_{\text{эmax}} \cdot \frac{n'}{n} \quad \Delta P_{\Pi} := 0.03 \cdot 1648.5 \cdot \frac{1000}{1500} \quad \Delta P_{\Pi} = 32.97$$

Втрати потужності на терті між щітками та колектором, Вт:

$$\phi := 0.25$$

$$p_{\text{щ}} := 20 \cdot 10^3$$

$$\Sigma S_{\text{щ}} := 2 \cdot p \cdot N_{\text{щ}} \cdot S_{\text{щ}} \quad \Sigma S_{\text{щ}} := 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 1.231 \cdot 10^{-4} \quad \Sigma S_{\text{щ}} = 7.3882 \times 10^{-4}$$

$$\Delta P_{\text{щ}} := \Sigma S_{\text{щ}} \cdot p_{\text{щ}} \cdot \phi \cdot v_k \quad \Delta P_{\text{щ}} := 7.3882 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0.25 \cdot 3.927 \quad \Delta P_{\text{щ}} = 14.5067$$

Сумарні механічні втрати, Вт:

$$\Delta P_{\text{мех}} := \Delta P_{\Pi} + \Delta P_{\text{щ}} \quad \Delta P_{\text{мех}} := 32.97 + 14.5067 \quad \Delta P_{\text{мех}} = 47.4767$$

Частота перемагнічування сталі, Гц:

$$f := \frac{p \cdot n}{60} \quad f := 3 \cdot \frac{1000}{60} \quad f = 50$$

Діаметр на 1/3 висоти трапецеїдальної ділянки зубця від основи, м:

$$D_{1/3} := D_{2\text{min}} + 2 \cdot \frac{h_2}{3} \quad D_{1/3} := 0.0582 + 2 \cdot \frac{0.005}{3} \quad D_{1/3} = 0.0615$$

Зубцевий крок по діаметру D1/3, м:

$$t_{1/3} := \pi \cdot \frac{D_{1/3}}{Z} \quad t_{1/3} := \pi \cdot \frac{0.0615}{25} \quad t_{1/3} = 7.7283 \times 10^{-3}$$

Ширина зубця по діаметру D1/3, м:

$$b_{1/3} := t_{1/3} - b_{\text{пз}} \quad b_{1/3} := 7.7283 \cdot 10^{-3} - 0.00301 \quad b_{1/3} = 4.7183 \times 10^{-3}$$

Магнітна індукція в перерізі зубця діаметром D1/3, Тл:

$$B_{1/3} := \frac{t_z \cdot B'_{\delta i}}{K_c \cdot b_{1/3}} \quad B_{1/3} := \frac{0.009173 \cdot 1.1917}{0.95 \cdot 4.7183 \cdot 10^{-3}} \quad B_{1/3} = 2.4388$$

$$\frac{B_{1/3}}{B'_{\delta i}} = 2.0466$$

Магнітна індукція в осерді якоря, Тл:

$$B'_a := \frac{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot B'_{\delta i}}{2 \cdot K_c \cdot h_a} \quad B'_a := \frac{0.66 \cdot 0.038 \cdot 1.1917}{2 \cdot 0.95 \cdot 0.0166} \quad B'_a = 0.9449$$

$$\frac{B'_a}{B'_{\delta i}} = 0.7929$$

Маса зубцевого шару, кг:

$$\gamma_{CT} := 7850$$

$$M_Z := \gamma_{CT} \cdot K_c \cdot l_{ayT} \left[0.25 \cdot \pi \cdot (D_a^2 - D_{amin}^2) - Z \cdot (b_{пз} \cdot h_Z + 0.25 \cdot \pi \cdot b_{пз}^2 \cdot a_{пп}) \right]$$

$$M_Z := 7850 \cdot 0.95 \cdot 0.0699 \left[0.25 \cdot \pi \cdot (0.073^2 - 0.0552^2) - 25 \cdot (0.00301 \cdot 0.0089 + 0.25 \cdot \pi \cdot 0.00301^2 \cdot 0.00109) \right]$$

$$M_Z = 0.585$$

Магнітні втрати в зубцевому шарі, Вт:

$$\Delta := 0.0012$$

$$\Delta P_Z := 2 \cdot (B_{1'3})^2 \cdot M_Z \cdot (0.044 \cdot f + 2240 \cdot \Delta^2 \cdot f^2)$$

$$\Delta P_Z := 2 \cdot 2.4388^2 \cdot 0.585 \cdot (0.044 \cdot 50 + 2240 \cdot 0.0012^2 \cdot 50^2)$$

$$\Delta P_Z = 71.4258$$

Маса осердя якоря, кг:

$$M_a := 0.25 \cdot \pi \cdot \gamma_{CT} \cdot K_c \cdot l_{ayT} \cdot (D_{amin}^2 - D_b^2)$$

$$M_a := 0.25 \cdot \pi \cdot 7850 \cdot 0.95 \cdot 0.0699 \cdot (0.0552^2 - 0.0219^2)$$

$$M_a = 1.0511$$

Магнітні втрати в осерді якоря, Вт:

$$\Delta P_a := 2 \cdot B'_a{}^2 \cdot M_a \cdot (0.044f + 2240 \cdot \Delta^2 f^2)$$

$$\Delta P_a := 2 \cdot 0.9449^2 \cdot 1.0511 \cdot (0.044 \cdot 50 + 2240 \cdot 0.0012^2 \cdot 50^2)$$

$$\Delta P_a = 19.2647$$

Сумарні магнітні втрати, Вт:

$$\Delta P_{Mag} := \Delta P_Z + \Delta P_a \quad \Delta P_{Mag} := 149.2258 + 19.2647 \quad \Delta P_{Mag} = 90.6905$$

$$\Delta P_M := \Delta P_{Mex} + \Delta P_{Mag} \quad \Delta P_M := 47.4767 + 90.6905 \quad \Delta P_M = 138.1672$$

Корисна потужність, Вт:

$$P_2 := P'_{\text{эmax}} - \Delta P_M \quad P_2 := 1648.5 - 138.1672 \quad P_2 = 1510.3328$$

Електромагнітний момент, Нм:

$$M := \frac{9.55 \cdot P'_{\text{эmax}}}{n'} \quad M := \frac{9.55 \cdot 1648.5}{1000} \quad M = 15.7432$$

Корисний момент на валу, Нм:

$$M_c := \frac{9.55 \cdot P_2}{n'} \quad M_c := \frac{9.55 \cdot 1510.3328}{1000} \quad M_c = 14.4237$$

Потужність, що підводиться до стартерного електродвигуна, Вт:

$$P_1 := U_{\text{ст}} \cdot I_a \quad P_1 := 10.116 \cdot 314 \quad P_1 = 3176.424$$

Електромагнітний ККД:

$$\eta_{\text{эм}} := \frac{P_2}{P'_{\text{эmax}}} \quad \eta_{\text{эм}} := \frac{1510.3328}{1648.5} \quad \eta_{\text{эм}} = 0.9162$$

ККД стартерного електродвигуна:

$$\eta := \frac{P_2}{P_1} \quad \eta := \frac{1510.3328}{3176.424} \quad \eta = 0.4755$$

За даними табл. 1.2 побудовано робочі характеристики стартерного електродвигуна послідовного збудження (рис. 1.11).

Таблиця 1.2 - Результати розрахунку робочих показників.

$I = I_a$, А	100	200	300	314	400	500
$U_{ст} = 12 - 0,006 * I_a$, В	11,4	10,8	10,2	10,116	9,6	9
$F_B = 17,4 * I_a$, А	1740	3480	5220	5463,6	6960	8700
$A = 109,01 * I_a$, А/м	10901	21802	32703	34229,14	43604	54505
$F_q = 0,025 * A$, А	272,525	545,05	817,575	855,7285	1090,1	1362,625
F_{min} , А	95	200	870	1240		
F_{max} , А	600	1290	2500	2950		
B_{bmax} , Тл	0,67	0,96	1,3	1,4		
B_{bmin} , Тл	0,011	0,25	0,84	0,95		
B_b , Тл	0,4	0,78	1	1,2	1,4	1,6
$\Phi = 0,00175 * B_b$, Вб	0,0007	0,001365	0,00175	0,0021	0,00245	0,0028
$E_a = 10,5 - 0,0167 * I_a$, В	8,83	7,16	5,49	5,2562	3,82	2,15
$n = 0,4 * (E_a / \Phi)$, об/мин	5045,714	2098,168	1254,857	1001,181	623,6735	307,1429
$P_{эmax} = E_a * I_a$, Вт	883	1432	1647	1650,447	1528	1075
$\Delta P_{п} = 0,02 * P_{эmax}$, Вт	17,66	28,64	32,94	33,00894	30,56	21,5
$\Delta P_{щ} = 0,0145 * n$, Вт	73,16286	30,42344	18,19543	14,51712	9,043265	4,453571
$\Delta P_{мех} = \Delta P_{п} + \Delta P_{щ}$, Вт	90,82286	59,06344	51,13543	47,52606	39,60327	25,95357
$f = 0,05 * n$, Гц	252,2857	104,9084	62,74286	50,05905	31,18367	15,35714
$B_{1/3} = 2,05 * B_b$, Тл	0,82	1,599	2,05	2,46	2,87	3,28
$V_a = 0,793 * B_b$, Тл	0,3172	0,61854	0,793	0,9516	1,1102	1,2688
ΔP_z , Вт	170,2466	120,0059	76,00974	72,82627	43,45136	18,08101
ΔP_a , Вт	45,77257	32,26484	20,43601	19,5801	11,68235	4,861268
$\Delta P_{mag} = \Delta P_a + \Delta P_z$, Вт	216,0192	152,2708	96,44575	92,40637	55,13371	22,94228
$\Delta P_m = \Delta P_{мех} + \Delta P_{mag}$, Вт	306,842	211,3342	147,5812	139,9324	94,73697	48,89585
$P_2 = P_{эmax} - \Delta P_m$, Вт	576,158	1220,666	1499,419	1510,514	1433,263	1026,104
$M = 9,55 * (P_2 / n)$, Н*м	1,67125	6,517875	12,53438	15,74318	23,3975	33,425
$M_2 = 9,55 * (P_2 / n)$, Н*м	1,090491	5,555969	11,41122	14,4084	21,94684	31,90468
$P_1 = U_{ст} * I_a$	1140	2160	3060	3176,424	3840	4500
$KПД_{эм} = P_2 / P_э$	0,652501	0,85242	0,910394	0,915215	0,937999	0,954515
$KПД = P_2 / P_1$	0,505402	0,565123	0,490006	0,475539	0,373246	0,228023
$KПД_{сэп} = P_2 / (U_n * I_a)$	0,480132	0,508611	0,416505	0,40088	0,298596	0,171017

Таблиця 1.3 - Переклад даних в о.

M2	U _{ст}	n	P2
0,031157	0,95	0,989356	0,360099
0,158742	0,9	0,411405	0,762916
0,326035	0,85	0,24605	0,937137
0,411669	0,843	0,19631	0,944071
0,627053	0,8	0,122289	0,895789
0,911562	0,75	0,060224	0,641315

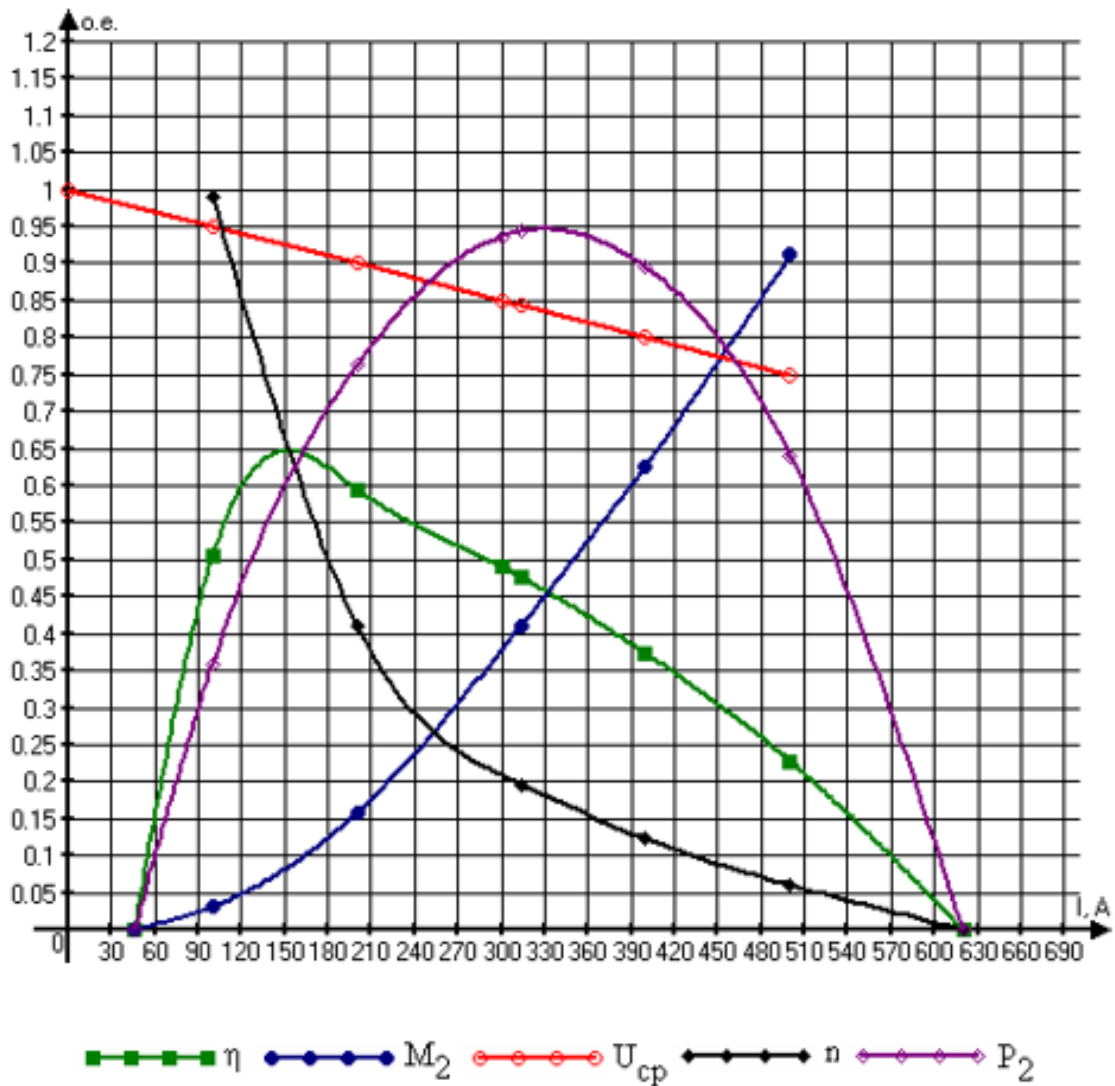


Рис. 1.11 - Робочі характеристики стартерного електродвигуна послідовного збудження.

1.10. Тепловий розрахунок

Опір обмотки якоря при $\vartheta = 75^0\text{C}$:

$$R_{AH} = 1,22 \cdot R_A = 1,22 \cdot 0,005 = 0,0061 \text{ Ом},$$

де R_A - Опір обмотки якоря при робочій температурі.

Опір паралельної обмотки збудження при $\vartheta = 75^0\text{C}$:

$$R_{SH} = 1,22 \cdot R_S = 1,22 \cdot 0,005 = 0,0061 \text{ Ом},$$

де R_S - опір паралельної обмотки збудження за робочої температури.

Опір послідовної обмотки збудження при $\vartheta = 75^0\text{C}$:

$$R_{CH} = 1,22 \cdot R_C = 1,22 \cdot 0,0057 = 0,007 \text{ Ом},$$

де R_c - Опір послідовної обмотки збудження при робочій температурі.

Розрахункові опори обмоток:

Розрахунковий опір обмотки якоря:

$$R_{AT} = R_{AH} \cdot k_t = 0,0061 \cdot 1,15 = 0,007 \text{ Ом},$$

де k_t - поправочний коефіцієнт, за допомогою якого наводяться температури обмоток до граничних припустимих температур, при класі стійкості до нагрівання В.

Розрахунковий опір паралельної обмотки збудження:

$$R_{ST} = R_{SH} \cdot k_t = 0,0061 \cdot 1,15 = 0,007 \text{ Ом},$$

Розрахунковий опір послідовної обмотки збудження:

$$R_{CT} = R_{CH} \cdot k_t = 0,007 \cdot 1,15 = 0,0081 \text{ Ом},$$

Втрати в обмотках:

Втрати в обмотці якоря:

$$P_{AT} = I_A^2 \cdot R_{AT} = 314^2 \cdot 0,007 = 690,172 \text{ Вт},$$

де I_A - Сила струму якоря в розрахунковому режимі роботи.

Втрати в паралельній обмотці збудження:

$$P_{ST} = I_S^2 \cdot R_{ST} = 2023,2 \cdot 0,007 = 14,16 \text{ Вт},$$

де R_{ST} - Розрахунковий опір паралельної обмотки збудження;

I_S - Сила струму паралельної обмотки збудження в розрахунковому режимі роботи.

Втрати у послідовній обмотці збудження:

$$P_{CT} = I_A^2 \cdot R_{CT} = 314^2 \cdot 0,0081 = 798,6 \text{ Вт},$$

де R_{CT} - Розрахунковий опір послідовної обмотки збудження;

Коефіцієнт тепловіддачі із зовнішньої поверхні якоря:

$$\alpha_A = 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C})$$

Перевищення температури охолоджуваної обмотки якоря:

$$\Delta \vartheta_A = \frac{P_{AT} \cdot (l_\delta / L_{Acp}) + \Delta P_{МАГ}}{\pi \cdot D_A \cdot l_\delta \cdot \alpha_A} = \frac{690,172 \cdot (0,0699 / 0,1193) + 92,41}{3,14 \cdot 0,073 \cdot 0,0699 \cdot 70} = 44,3^\circ \text{C},$$

Перепад температури охолоджуваної поверхні якоря:

$$\Delta \vartheta_{\text{ИЗ.П}} = \frac{P_{AT} \cdot (l_{\delta} / L_{\text{Асп}})}{Z \cdot \Pi_{\text{П}} \cdot l_{\delta}} \cdot \left(\frac{b_{\text{ПЗ}}}{8\lambda'_{\text{ЭКВ}}} + \frac{\Delta_A}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} \right) = \frac{690,172(0,0699/0,1193)}{25 \cdot 0,011 \cdot 0,0699} \cdot \left(\frac{0,003}{8 \cdot 1,4} + \frac{0,0003}{0,16} \right) = 45^{\circ} \text{C}$$

де P_{AT} - Втрати в обмотці якоря;

Δ_A - Товщина ізоляції паза;

Z – число пазів якоря;

$\lambda'_{\text{ЭКВ}} = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ} \text{C})$ - еквівалентна теплопровідність внутрішньої ізоляції;

$\lambda_{\text{ЭКВ}} = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ} \text{C})$ - Еквівалентна теплопровідність ізоляції для класів ізоляції В, F, H.

Коефіцієнт тепловіддачі з лобових поверхонь якоря[8]:

$$\alpha_L = 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ} \text{C})$$

Перевищення температури охолоджуваної поверхні лобових частин обмотки якоря:

$$\Delta \vartheta_{\text{ПОВ.Л}} = \frac{P_{AT} \cdot (1 - l_{\delta} / L_{\text{Асп}})}{\pi \cdot D_A \cdot 2 \cdot l_B \cdot \alpha_L} = \frac{690,172(1 - 0,0699/0,1193)}{3,14 \cdot 0,73 \cdot 2 \cdot 0,015 \cdot 70} = 59,37^{\circ} \text{C}$$

$$\text{де } l_B = 0,4 \cdot \tau = 0,4 \cdot 0,038 = 0,015 \text{ м}$$

τ - полюсний поділ

Периметр поперечного перерізу паза якоря:

$$\Pi_L = (1 + \pi / 2)b_{\text{ПЗ}} + h_2 = (1 + 3,14 / 2)0,003 + 0,003 = 0,011 \text{ м};$$

де $b_{\text{ПЗ}}$ - ширина паза

h_2 - Висота другої ділянки зубцевої зони.

Довжина лобової частини витка обмотки якоря:

$$l_L = 1,3 \cdot \tau = 1,3 \cdot 0,038 = 0,0494 \text{ м}$$

Перепад температури в ізоляції лобової частини обмотки якоря:

$$\Delta \vartheta_{\text{ИЗ.Л}} = \frac{P_{AT} \cdot (1 - l_{\delta} / L_{\text{Асп}})}{2 \cdot Z \cdot \Pi_L \cdot l_L} \cdot \left(\frac{h_Z}{8 \cdot \lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right) = \frac{690,172(1 - 0,0699/0,1193)}{2 \cdot 25 \cdot 0,013 \cdot 0,0494} \cdot \left(\frac{0,009}{8 \cdot 1,4} \right) = 7,15^{\circ} \text{C}$$

де Z - Число пазів якоря;

h_Z - Висота зубця;

$\lambda'_{\text{ЭКВ}} = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ} \text{C})$ - Еквівалентна теплопровідність внутрішньої ізоляції

секції.

Середнє перевищення температури обмотки якоря над температурою повітря, що охолоджує:

$$\begin{aligned}\Delta \vartheta_{Acp} &= (\Delta \vartheta_A + \Delta \vartheta_{ИЗ..Л}) \cdot \frac{l_{\delta}}{l_{Acc}} + (\Delta \vartheta_{ПОВ..Л} + \Delta \vartheta_{ИЗ..л}) \left(1 - \frac{l_{\delta}}{l_{Acp}}\right) = \\ &= (44,3 + 45) \cdot \frac{0,0699}{0,1193} + (59,37 + 7,15) \cdot \left(1 - \frac{0,0699}{0,1193}\right) = 28,6 + 2,7 = 31,3^{\circ} C\end{aligned}$$

Сума втрат, що відводяться повітрям, що охолоджує внутрішній об'єм двигуна:

$$\Sigma P = \Delta P_M - P_{BH} = \Delta P_M - 0,1(P_{ST} + P_{CT}) = 138 - 0,1(14,16 + 798,6) = 57,124 \text{ Вт}$$

Умовна поверхня охолодження двигуна:

$$S_{охл} = \pi \cdot D_j \cdot (l_{\delta} + 2 \cdot l_n) = 3,14 \cdot 0,11(0,0699 + 2 \cdot 0,0494) = 0,058 \text{ м}^2$$

Середнє перевищення температури повітря всередині двигуна:

$$\vartheta_{BOZ} = \Sigma P / (S_{охл} \alpha_A) = 57,124 / (0,058 \cdot 70) = 1,41^{\circ} C,$$

Середнє перевищення температури обмотки якоря над температурою довкілля:

$$\vartheta'_{acp} = \Delta \vartheta_{acp} + \Delta \vartheta_{BOZ} = 31,3 + 1,41 = 32,7^{\circ} C$$

РОЗДІЛ 2.

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ЯКОРЯ СТАРТЕРА

Технологічним процесом називають частину виробничого процесу, що містить дії щодо зміни форми, розмірів, властивостей матеріалів для отримання деталі або виробу відповідно до заданих технічних вимог.

Розглянемо послідовність операцій виготовлення якоря стартера, наведених на рис. 2.1 [6].



Рисунок 2.1- Схема виробництва якоря стартера

2.1. Розкрій та різання електротехнічної сталі

На електромашинобудівні підприємства електротехнічна сталь надходить у вигляді листів чи рулонів. Сталь у листах використовують для ручного або механізованого штампування. Перед штампуванням листи на ножицях ріжуть на мірні смуги або квадрати (мапи). При цьому залишають припуск на встановлення листа – перемичку. Для ручного штампування припуск залишається 5 –7 мм. Так як вручну важко точно встановити заготовку в штамп. Для механізованого штампування припуск може бути зменшений до 2 –3 мм.

Сталь у різаних стрічках штампують лише на автоматичних установках. При цьому подача стрічки в штамп проводиться з великою точністю, що дозволяє штампувати з перемичками 1,5 –2 мм. або без перемичок. Розмір перемички залежить від прийнятої технології штампування, конструкції листа, що штампуються, точності подачі, конструкції штамп.

При штампуванні крім листів якоря виходять відходи, які можна поділити на «внутрішні» та «зовнішні».

Внутрішні відходи утворюються при вирубуванні пазів, вентиляційних отворів, центрального отвору під вал, отворів під шпильки або заклепки. Вони визначаються конструкцією деталей і становлять від 20% до 25% використаної сталі.

Зовнішні відходи – різниця між площею заготовки та загальною площею вирубаних із нього листів (включаючи внутрішні відходи). Вони залежить від конструкції листів, але переважно від прийнятої технології штампування і розкром електротехнічної сталі.

При штампуванні із квадратних карт зовнішні відходи становлять від 23% до 30% сталі.



Рисунок 2.2 - Зовнішні відходи

Про ступінь використання листа судять за коефіцієнтом використання. Коефіцієнт використання аркуша (k_H) – відношення загальної площі вирубаних деталей до площі аркуша:

$$k_H = \frac{FN}{ab};$$

де F - площа деталі, $мм^2$. При визначенні площі листа якоря приймається площа кола з діаметром, що дорівнює зовнішньому діаметру листа $\frac{\pi D^2}{4}$;

N - Число деталей, вирубаних з листа;

a - ширина листа, мм;

b - Довжина листа, мм;

Усі відходи електротехнічної сталі на заводах збираються та пакуються у прес-пакетних пресах. Пресовані пакети вирушають на переплавку на металургійні заводи або використовуються у власних ливарних цехах для отримання модифікованого чавуну[4].

2.2. Штампування листів якоря

При виготовленні деталей електричних машин використовуються всі види холодного штампування. Під холодним штампуванням розуміють штампування без попереднього нагрівання заготівлі при температурі навколишнього середовища.

Холодне штампування можна поділити на об'ємне штампування (сортового металу) та листове штампування (листового матеріалу). Основними різновидами холодного об'ємного штампування є холодне видавлювання, холодне висадження та об'ємне формування.

Холодне штампування є прогресивним технологічним процесом, його переваги у технічному відношенні: можливість отримати деталь складної форми; можливість створити міцні та жорсткі, але легкі конструкції; можливість одержати деталі з високою точністю без подальшої механічної обробки; можливість одержати деталі зі стабільними розмірами.

Для штампування листів використовують 3 методи:

1. Одноопераційний автоматичний виконується у багатопозиційних штампах

послідовної дії;

2.Багатоопераційний у суміщених штампах;

3.Змішаний.

На штампувальних установках проводиться розмотування, правка, подача та мастило матеріалу, що штампується, штампування листів і видача їх в орієнтованому вигляді та видалення відходів.

Контроль якості штампованих листів виконується вимірюванням їх основних розмірів та висоти задирок.

2.3. Термообробка листів магнітопроводу

Внаслідок погіршення фізико-механічних та магнітних властивостей електротехнічна сталь внаслідок її механічної обробки вони мають відновлюватись. Це досягається процесом термообробки, що включає операції: випал, випалювання, оксидування.

Призначення випалу – видалення слідів мастила на листах після операції прокатки та штампування, розкладання олій у нейтральному чи відновлювальному газовому середовищі при випаленні створює осад на поверхні листів. Це призводить до спікання і перешкоджає утворенню рівномірної оксидної ізоляційної плівки при оксидуванні. Температура і час випалу залежить від типу мастила, що застосовується, і знаходиться в межах $t=400^{\circ}\text{З}$; $T=30\text{хв}$.

Відпал необхідний відновлення фізико-механічних і навіть магнітних властивостей електротехнічної сталі. $t=750\dots 850^{\circ}\text{С}$; $T = 14$ годин.

Оксидування створюється ізоляційна плівка на поверхні листів $t=400\dots 600^{\circ}\text{С}$; $T=2$ години. Окислювач повітря або водяна пара.

Процеси термообробки листів магнітопроводу виконують в окремих камерах багато прохідних камерних печей.

2.4. Складання та скріплення магнітопроводу

Основні вимоги до сердечників: щільність, високий коефіцієнт заповнення сталлю, хороша ізоляція між листами, концентричність внутрішніх та зовнішніх діаметрів сердечника, відсутність розпушування крайніх листів, зубців.

Технологія складання сердечників включає операції: дозування, центрування, орієнтування, пресування та скріплення сердечника. Якісне використання кожної технологічної операції впливає якість сердечника, можливість автоматизації подальших технологічних операцій.

Для дозування використовуються способи відліку певної кількості листів по масі та довжині сердечника. При автоматизованому виробництві найбільш застосовний спосіб дозування за довжиною. При цьому способі точність довжини сердечника залежить від співвідношення тиску стиснення осердя при дозуванні та тиску-стиску при скріпленні, а також похибки дозування.

Точність дозування визначається коригувальною дозою, значення якої дорівнює товщині одного листа. При автоматичному виробництві операція дозування проводиться так: від стопи листів відсікається пакет певної довжини, довжина вимірюється при заданому тиску.

Технологічні процеси центрування та орієнтування повинні забезпечити обмеження переміщення в заданих межах аркушів на площині за двома координатами та обертання аркушів навколо осі сердечника.

При складанні сердечників якір центрування проводиться по внутрішній поверхні отвору, а орієнтацію по шпонкових пазах. Така схема прийнята у всіх відомих технологічних процесах і при цьому виконуючи вимоги єдності баз.

При складанні сердечників якорів центрування листів під отвір для валу та орієнтації по шпонковому пазу не виконує вимогу єдності складальної та вимірювальної бази, а точність знижується у 2-3 рази. Однак такий спосіб можна використовувати, якщо існує як мінімум три шпонкові пази.

При збиранні на редагування може відбуватися деформація базових поверхонь листів оправлення, підвищення точності складання без деформації базових поверхонь листів забезпечується застосуванням розтискних оправок. При складанні осердя оправка знаходиться в стислому стані. Після укладання необхідної дози листів оправлення розтискається.

Кращих результатів можна досягти при складанні на оправці, що самоцентрується, з трьома розсувними кулачками.

На якість орієнтації впливає величина задирка після штампування, яка не повинна перевищувати 0,05мм, що не перевищує мікронерівності кожної пари

контактуючої поверхонь листів і дозволяє зробити якісно складання. При великій висоті задирки листи зчіплюються між собою, зміщення їх у горизонтальній площині утруднене, і якість складання не гарантовано. При пресуванні сердечників режими тиску залежить від властивостей електротехнічної сталі, конструкції листів, якості штампування тощо. Зазвичай тиск пресування сердечників якорів становить 1...2 МПа.

На листоправочних установках листи якоря виводяться на оправлення в орієнтовному вигляді, з оправки вони перевантажуються на напівавтоматичні верстати для збирання та скріплення. Верстат має чотири позиційний поворотний стіл, на якому проводяться послідовно операції дозування, пресування, скріплення та винесення готового сердечника.

При складанні сердечника повинно бути розпушування зубців, тобто. Довжина сердечника по дну паза повинна відрізнятись не більше ніж на 0,1 мм від довжини на коронці зубців.

2.5. Складання осердя на валу

Сердечники якір машин постійного струму збирають безпосередньо на вал. Для складання застосовують спеціальні пневматичні преси, що складаються із пневматичного циліндра 5 з порожнистим штоком 6.

З основи преса пересувається візок 4, на робочій поверхні якої є два отвори, які вставляють змінні оправки 1. Хід візка обмежується двостороннім упором 3 і фіксатором 2 в положеннях при яких вісь оправки правої або лівої частини візка збігається з віссю циліндра.

Відстань між торцем змінного наконечника штока 6 і оправкою 1, хід поршня, зусилля преса приймаються конструкції преса в залежності від розмірів сердечників, що збираються на пресі.

Складання сердечника проводиться в наступному порядку. Вал вставляють в оправку 1 так, щоб він спирався на кант, і надягають натискну шайбу. Якщо натискна шайба повинна перебувати на валу, її напресовують на гідравлічному пресі, так як зусилля пневматичного преса недостатньо. Потім у шпонковий паз валу встановлюють шпонку, і візок з валом переміщують у робоче положення -

під пневматичний прес. З попередньо зважених та відібраних по шпонці та шихтованому знаку листів беруть пачку з 50 – 60 шт. і надягають на вал. Потім включають прес і проводять осадження листів до шайби натискної. Таким чином, насаджують решту листів сердечника. Після того як висота сердечника, що збирається, на валу дорівнюватиме 30 - 40мм, в 3 - 4 паза встановлюють пазові клини.

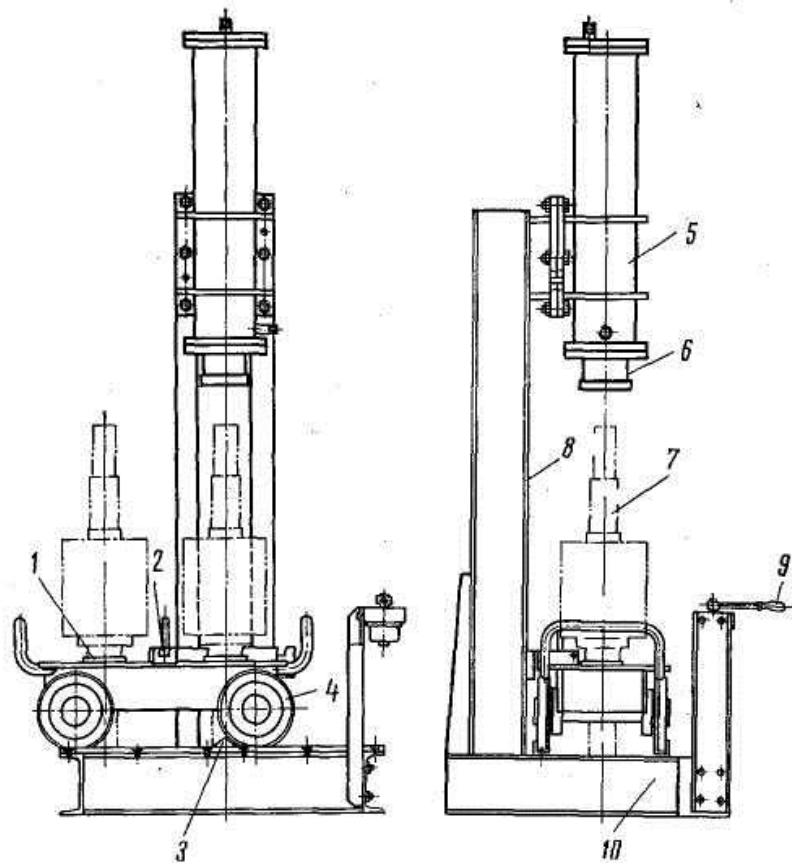


Рис. 2.3 - Пневматичний прес для шихтування пакетів сердечників на вал якоря

Наступні листи при складанні базують не тільки за внутрішнім діаметром, але і за пазами. Після складання всіх листів осердя надягають верхню натискну шайбу і пресують осердя. Потім необхідно зробити кріплення осердя від переміщення в осьовому напрямку. При кріпленні двома напівкруглими шпонками сердечник пресують і, коли натискна шайба опуститься нижче за виточення на валу, у виточку встановлюють дві напівкруглі шпонки. Після того, як тиск буде знято, їх приварюють до валу.

Наступна операція – обробка пазів. Пази можна обпилювати або простягати протяжками. Для протягування вал із сердечником встановлюють у протяжного

верстата на дві стійки, кожна з яких має два ролики, в яких легко може обертатися вал. Сердечник торцем впирають у пристосування, яке сприймає зусилля різання і дозволяє повертати сердечник для обробки кожного паза, поєднуючи при цьому вісь паза та вісь повзуна протяжного верстата.

Протяжка є складним і дорогим інструментом. Зуби протяжки діляться на ріжучі та калібруючі. Перший ріжучий зуб має найменші розміри, кожен наступний зуб більший за попередній на 0,05 – 0,08мм (підйом зуба). Останні 4 - 5 зубів - калібруючі. Зуби, що калібрують, повинні відповідати формі і розмірам готового паза. Розміри першого зуба визначають виходячи з найменшого можливого розміру паза, отриманого при складанні. На зубах, крім трьох останніх, роблять канавки для подрібнення стружки. Після протягування пазів вали з сердечниками продувають у витяжних камерах стисненим повітрям і відправляють на укладання обмотки.

2.6. Напресування колектора на вал

Колектори насаджують на вал із натягом пресової посадки другого класу точності. Така посадка необхідна, тому що під дією відцентрових сил колекторних пластин втулка піддається зусиллям, що розтягують, які дещо зменшують величину натягу. Колектор насаджують на вал на шпонці, щоб фіксувати положення пластин колектора щодо пазів якоря. Це потрібно для розмітки якоря під обмотку.

2.7. Укладання обмотки

Технологічний процес укладання котушок та приєднання вивідних кінців обмотки до пластин колектора є найбільш складним та відповідальним. Якір надходить на укладання з напресованими обмотко тримачами 3 і 6 (рис 2.4) і колектором 1. Колекторні пластини та пази сердечника мають цілком певне положення щодо один одного. Для цього в конструкторській документації вказують положення шпонкової канавки в колекторі щодо колекторних пластин, шпонкової канавки в штампованому листі щодо пазів та розташування шпонкових канавок на валу.

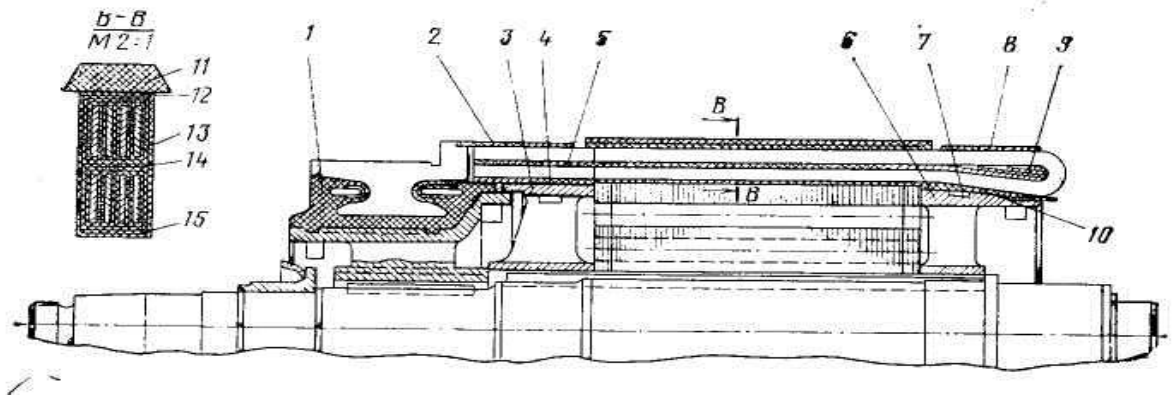


Рис. 2.4 - Якір з обмоткою та колектором

Перед початком укладання проводять огляд якоря та перевірку колектора. При огляді якоря переконуються у відсутності гострих кутів сталі в пазах, кромки задирок тощо. Виявлені дефекти усуваються. Колектор перевіряють контрольною лампою відсутність замикання колекторних пластин між собою. Потім пази якоря та обмоткотримачі покривають лаком. Після висихання лаку виробляють ізолювання обмоткотримачів.

Після ізолювання обмоткотримачів роблять розмітку якоря. Розмітка якоря полягає в нумерації пазів та колекторних пластин. При цьому їхнє взаємне становище однозначно визначено кресленням. У кресленнях вказано розмітку і його слід перенести на якір. Для цього згідно з кресленням знаходять і нумерують перший паз. Інші пази нумеруються так само. Визначають колекторну пластину, що лежить навпроти першого паза, та нумерують її згідно з вказівками креслення. Потім надають номери іншим пластинам.

Укладання починають з установки зрівняльних з'єднань, які розташовують під лобовими частинами котушок на обмоткотримачах. Зрівнювальні з'єднання ізолюють, стягують стрічкою і приєднують до своїх колекторних пластин.

Потім на дно пазів встановлюють склотекстолітові прокладку товщиною 15 0,5мм і ізоляцію 13, яка повинна виходити поверх паза на 20 - 25мм з кожного боку, і укладають першу котушку. Однією стороною котушку укладають на дно паза, а друга сторона залишається неукладеною. Вивідні кінці укладеної сторони вкладають у проріз колекторних пластин згідно зі схемою. Потім на дно другого паза укладається одна сторона другої котушки, а друга сторона залишається неукладеною. Вивідні кінці укладеної сторони вкладаються в пази колекторних пластин, які йдуть за тими, які були вкладені кінці першої котушки. Так

проводиться укладання, поки не буде укладено число котушок, що дорівнює кроці обмотки. Наступні котушки однією стороною будуть укладені на дно паза, а другою стороною будуть укладені у верхню частину паза,

Всі наступні котушки укладатимуться однією стороною на дно паза, а другою стороною вгору паза. Між котушками встановлюється між котушкова прокладка товщиною 14 0,5мм. Після укладання останньої котушки проводиться укладання останнього кроку (других сторін котушок, з яких починалося укладання). При укладанні в пази котушки осідають молотком через текстолітову прокладку, ширина якої дорівнює ширині паза. У процесі укладання між верхніми і нижніми сторонами лобових частин котушок для запобігання замиканню поміщають смуги ізоляції 5 і 9. Вивідні кінці котушок укладають у шліци колекторних пластин у міру укладання обмотки. При цьому слідкують, щоб вивідні кінці не перехльостувалися, а приєднувалися до колекторних пластин у тій же послідовності, з якою вони виходять з пазів якоря. При необхідності вивідні кінці з обох боків котушок маркують, одягаючи різнокольорові панчохи. Тоді послідовність укладання кінців у пластини колектора визначається чергуванням кольорів. По закінченню укладання пазову ізоляцію, що виступає з паза, зрізають, а краї, що залишилися, загинають в пази. Переконавшись у правильності укладання обмотки, кінці котушок, що виступають із півників колектора, зрубують.

Якщо кріплення котушок у пазах виробляється клинами, то встановлюють прокладку під клин 12 і забивають клини 11. Потім якір відправляють на бандажування.

При укладанні стрижневих обмоток спочатку укладають у пази та прорізи колекторних пластин усі нижні стрижні, ізолюють їх у пазу та лобових частинах. Після цього також укладають верхні стрижні. На стороні, протилежній колектору, виробляють з'єднання верхніх та нижніх стрижнів хомутиками. Виступаючі з хомутиків кінці стрижнів зрізають. Паяння або зварювання якірних обмоток виробляють після контрольних операцій.

2.8. Бандажування обмоток якір

При обертанні якір розвиваються відцентрові сили, які прагнуть викинути обмотку з пазів і відігнути лобові частини. Відцентрові сили зростають пропорційно квадрату швидкості і багато разів перевищують вагу обмотки. Лобові частини всіх обертових обмоток утримуються від відгинання намотаними бандажами. Обмотки в пазових частинах можуть бути укріплені бандажами чи клинами. Бандажі намотують із натягом. Напруга, створювана бандажем, повинна бути завжди більша за напругу, що створюється відцентровими силами. Накладення бандажів проводиться на спеціальних верстатах бандажування або токарних верстатах, спеціально перероблених. Якір встановлюється одним кінцем валу в патрон, а другий кінець затискається задньою бабкою. На місці супорту токарного верстата встановлюється пристрій для натягу бандажу та його розкладки під час бандажування. Бандажування може здійснюватися сталевим дротом, що бандажує, або нетканою скляною бандажною стрічкою. Бандажі деяких машин виконуються з немагнітного сталевого дроту, інколи ж з бронзового.

Накладення бандажу із сталевого дроту здійснюється наступним чином. Встановивши якір у верстат, накладають вручну перший виток по колу сердечника і закріплюють його петлею. Потім включають верстат і в розбіг за 2 – 3 обороти виводять дріт те місце, де має починатися бандаж. Зазвичай бандаж встановлюють на лобовій частині над обмотку утримувачами. Під дріт підкладають ізоляцію з композиційних матеріалів, яка повинна виступати за межі бандажу не менше ніж на 5 мм з кожного боку. Потім починають накладення бандажу у напрямку від сталі якоря до краю лобових частин для виключення витріщання лобових частин біля торця сердечника. Зверху ізоляції під дріт підкладають скоби для кріплення бандажу. Скоби підкладають рівномірно по всьому колу. Намотавши необхідну кількість витків, доводять дріт до найближчої скоби, загинають її на дріт і припаюють. Потім, не відкушуючи дріт, підводять його до місця накладення наступного бандажу і виробляють намотування. Намотавши всі бандажі, їх пропаюють по всьому колу якоря.

Бандажування стрічками здійснюється на тому самому устаткуванні, на

якому виконується бандажування дротом, але його зазвичай доповнюють натяжним пристроєм для стрічки. Швидкість бандажування стрічкою в кілька разів вища, ніж сталевим дротом. Витки стрічки укладають, число шарів вказують у кресленні. Щоб уникнути розпізнавання бандажа та утворення тріщин при термообробці перед намотуванням на лобові частини по всьому колу, накладають шар скляного полотна товщиною 0,1мм, просоченого епоксидним лаком. Полотно має виступати за межі бандажу з обох боків. Стрічку намотують поверх полотна. Перед намотуванням двох останніх шарів виступаючу частину полотна загортають на бандаж і намотують два останні шари. При товщині скловолокнистого бандажу більше 1,6мм застосовують бічні упори, що перешкоджають зсуву нижніх шарів верхніми. При бандажуванні по краях бандажу прокладають алюмінієві хомути, які знімають після запічки.

В результаті термічної обробки бандаж набуває монолітності, міцності і має гарний товарний вигляд. Порівняно з бандажами зі сталевих дротів бандажі зі скляної стрічки більш економічні та мають ряд переваг при експлуатації.

2.9. Просочення якоря

Просоченням прийнято називати процес заповнення обмотки та її ізолювання спеціальними лаками або складами з наступною запіканням. В процесі просочення повітряні включення та порожнечі в обмотках та ізоляції заповнюються лаками, що наближає її конструкцію до моноліту. Просочення виробляють складами без розчинників або лаками на основі розчинників з вмістом плівкоутворювальних речовин від 35 до 70% залежно від лаку та технології просочення. Просочення значно уповільнює процеси теплового старіння та зволоження електроізоляційних матеріалів, оскільки зменшується площа їхнього дотику з навколишнім середовищем. Підвищується електрична міцність ізоляції внаслідок заповнення пор та капілярів обмотки лаками, що мають більш високу електричну міцність, ніж повітря. Просочення знижує перевищення температури обмоток, так як теплопровідність лаків набагато вища за теплопровідність повітря. Цементуючи витки обмоток, просочення знижує механічне зношування їх ізоляції.

У процесі виготовлення і після укладання пази якорів обмотки просочуються лаками або компаундами з подальшим сушінням.

В результаті просочення та сушіння покращуються такі властивості електричної ізоляції:

1. Підвищується нагрівостійкість;
2. Поліпшується теплопровідність обмоток за рахунок зменшення повітряних прошарків між провідниками та стінками паза сердечника;
3. Підвищується вологостійкість ізоляції, особливо волокнистої, через зменшення гігроскопічності в результаті заповнення пір та створення лакової плівки, що перешкоджає проникненню вологи всередину обмотки;
4. Підвищується електрична міцність ізоляції, оскільки електрична міцність просочувальних матеріалів вища за електричну міцність повітря, що знаходиться між волокнами непросочених матеріалів;
5. Підвищується механічна міцність ізоляції, так як просочена обмотка має добре зцементовані витки, що щільно і міцно сидять у пазах сердечників. Завдяки цьому запобігає переміщенню провідників в результаті вібрації та пов'язане з цим пошкодження ізоляції від стирання.

Зовнішні поверхні обмоток після сушіння фарбують покривними емалями та лаками. Тверда і гладка плівка товщиною 50 – 60мкм, що утворюється в результаті цього, добре захищає ізоляцію від вологи, мастил і скупчення пилу.

Методи просочення:

1. зануренням у лак;
2. на стендах з нижньою подачею лаку;
3. струминним поливом;
4. компаундуванням;
5. вакуумно-нагнітальним способом.

Метод просочення зануренням. Цей метод є найбільш поширеним способом просочення лаками, що містять розчинник обмоток, покладених у пази сердечників. Для кращого проникнення лаку в обмотки, укладені в пази осердя, останні перед зануренням у лак нагріваються до температури 60 - 70⁰З.

Режим просочення залежить від призначення електричної машини, конструкції обмоток та типу лаку. Так, кількість просочень буває від однієї і

більше, а час витримки обмотки в лаку коливається від кількох секунд до години.

Час витримки обмоток у лаку при першому просоченні (15хв – 1ч) значно більше, ніж при наступних зануреннях, так як при першому зануренні відбувається основне заповнення пір та повітряних прошарків в ізоляції.

При будь-якому просоченні обмотка повинна знаходитися в лаку до припинення виділення бульбашок повітря.

Для кращого проникнення лаку в обмотку, у виробів, що занурюються в бак з лаком, пази сердечників повинні бути розташовані вертикально або під невеликим кутом. Якір електричної машини занурюють у лак колектором нагору.

Під час просочення зазвичай буває складно захищати кінці валів і шайб якір, тому відразу після просочення лак з цих поверхонь видаляють, протираючи посадкові поверхні бавовняними серветками, змоченими в розчиннику.

У просочувальному відділенні повинен бути встановлений жорсткий контроль за складом та чистотою лаку. Просочені ванни і котли необхідно періодично очищати від залишків лаку, а вироби, що занурюються в лак, перед просоченням обов'язково продувати чистим стиснутим повітрям для видалення з них пилу і бруду. Щодня та після кожного розведення перевіряти в'язкість лаку, а через два-три дні – вміст основи лаку.

При звичайному методі просочення видалення розчинників у процесі сушіння витрачається значний час 10-12 год.

Метод просочення зануренням має низку недоліків. Метою операції є просочення ізоляції обмоток і паз сердечника, а в лак доводиться занурювати сердечник цілком. Внаслідок цього збільшується витрата лаку за рахунок покриття ним металевих деталей. До того ж цей лак із посадкових поверхонь доводиться змивати у ручну.

Після просочення протягом 20 – 30хв з виробів на піддони стікає лак.

Пари розчинників, що виділяються в цей час, а також випаровування з поверхні лаку просочувальних ванн призводять до загазованості просоченню - сушильних відділень.

При певній концентрації парів розчинників просочувальне відділення стає вибухо- і пожежонебезпечним і шкідливим для здоров'я працівників. Винятки становлять просочувальні відділення з водоемульсійними лаками.

2.10. Механічна обробка

Після укладання обмотки, забивання клинів, накладання бандажів, паяння колектора, просочення необхідно виконати наступні операції: закласти виступаючий край міканітової манжети колектора; проточити та покрити якір емаллю; обточити, відшліфувати та відполірувати робочу поверхню колектора. Ці операції поєднують під загальною назвою - обробка якоря.

Закладення міканітової манжети необхідне з наступних причин. По-перше, виступаючий край манжети може розшаровуватися при обертанні і, по-друге, між пластиною та манжетою може утворитися щілина, в яку може набиватися щітковий пил. Закладення манжет проводиться намотуванням бандажа з кіперної стрічки або шнура з подальшим багаторазовим лакуванням і сушінням бандажу.

Зовнішню поверхню якоря покривають емаллю підвищення вологостійкості обмотки і захисту поверхні якоря від корозії. Емаль закриває всі можливі щілини, стики, переходи тощо, створюючи рівну, гладку та слизьку поверхню. Слизька поверхня необхідна для того, щоб на якорі не затримувався пил лобового складу.

Для проточки колектора якір встановлюють токарний верстат. Іноді на цьому верстаті проточують торці кілець, в які впираються внутрішні обойми підшипників. Якір встановлюють у центрах. Для більшої співвісності бажано установку проводити в люнети. Проточку колектора роблять різцями (рис 2.4).

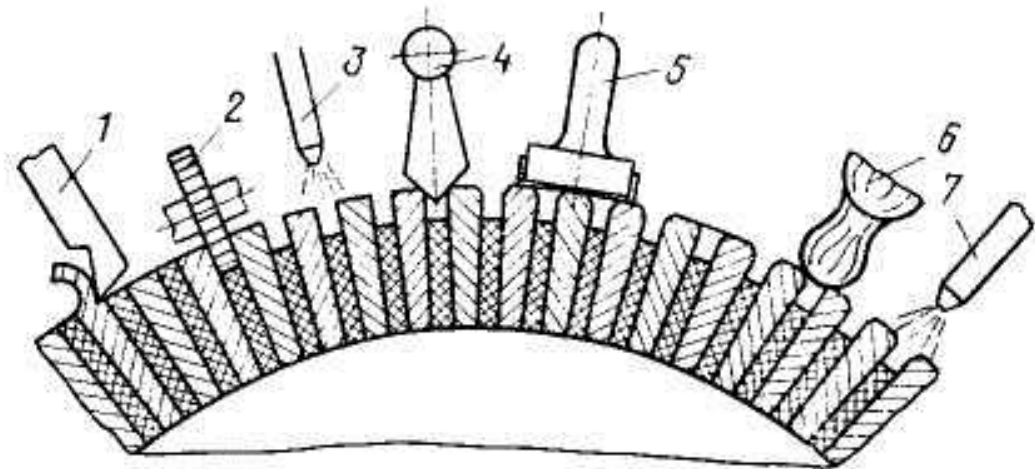


Рис. 2.5 - Обробка поверхні колектора

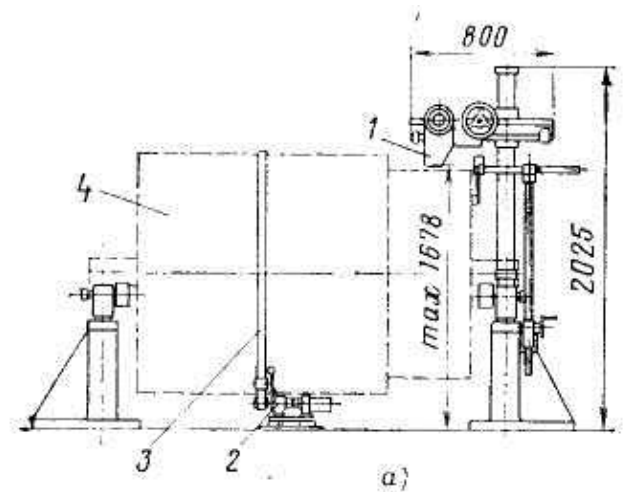
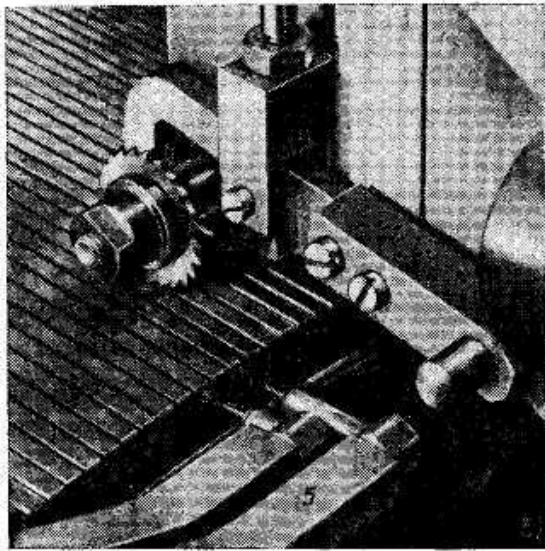


Рис 2.6 - Схема верстата для подорожчання колектора.

Після проточки колектора висота колекторних пластин та ізоляційних прокладок між ними однакова. При цьому щітка не зможе нормально працювати, оскільки порушуватиметься її контакт із мідними пластинами. Необхідно зменшити висоту ізоляційних прокладок. Це виконують фрезою, заглиблюючись на 08-15 мм. Операція називається подорожчанням.

При проточці колектора різцем неможливо отримати необхідну шорсткість поверхні колектора, що забезпечує хорошу роботу. Це досягається шліфуванням та поліруванням, які виробляють спеціальними шліфувальними колами, пемзою, скляним папером дрібних номерів та іншими матеріалами.

РОЗДІЛ 3.

СКЛАДАННЯ МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРОСТАРТЕРА ТА МНЕМОСХЕМИ БЛОКІВ СТЕНДУ ВИПРОБУВАНЬ

3.1. Пристрій та принцип дії електростартера

Електростартер конструктивно поєднує в собі: стартерний електродвигун, тягове електромагнітне реле та приводний механізм.

Стартерний електродвигун - чотириполюсний колекторний двигун постійного струму змішаного збудження з переважанням МДС обмотки послідовного збудження, без додаткових полюсів, основними - конструктивними елементами якого є якір з обмоткою і колектором, корпус з полюсами і котушками обмотки.

Сердечник якоря шихтований, із пластин електротехнічної сталі, напресований на вал, що обертається у двох або трьох опорах з бронзо графітовими підшипниками ковзання.

Обмотка якоря проста хвильова з одно- або двовитковими секціями з прямокутного або круглого мідного дроту. Кінці секцій обмотки якоря кріпляться у півнях пластин колектора.

Колектор, зібраний із пластин колекторної міді, ізолюваних один від одного та валу, має циліндричну або торцеву контактну поверхню. Кріплення пластин міцне на металевій втулці або пластмасою. Контактна поверхня торцевого колектора розташована в площині перпендикулярної до осі валу.

Корпус електростартера є частиною магнітопроводу і тому виготовляється із сталі у вигляді суцільної труби або смуги, згорнутої в трубу та звареної вздовж стику.

Полюси, штамповані зі сталі, суцільні, з одягненими на них котушками обмотки збудження, кріпляться до корпусу гвинтами.

Котушки послідовних і паралельних обмоток збудження встановлюються на окремих полюсах, тому кількість котушок дорівнює кількості полюсів.

Кришки, що закривають корпус електростартера, виконуються литими з алюмінієвого або цинкового сплаву або штампованими зі сталі. У центральних

отворах кришок упресовані вкладиші підшипників ковзання. Кришка з боку приводу має стійку з отворами під болти кріплення стартера на двигуні внутрішнього згорання.

Щіткотримачі кріпляться безпосередньо або за допомогою щіткової траверси до кришки колектора. У чотирьох щіткотримачах, два з яких ізольовані та два не ізольовані від «маси», встановлені мідно графітні електрощітки, що притискаються до контактної поверхні колектора пружинами.

Реле електромагнітне тягове, змонтоване на технологічному припливі кришки з боку приводу, призначене для підключення стартерного електродвигуна до акумуляторної батареї та для введення шестерні стартера в зачеплення з шестернею на вінці маховика двигуна внутрішнього згорання. Основними конструктивними елементами тягового реле є сердечник, що втягує та утримує обмотки, якір, корпус; поворотна пружина та основа реле; рухомий шток з контактним диском, поворотною та демпфуючою пружинами; кришки реле з вмонтованими контактними болтами. Якір, сердечник та корпус реле виконані з феромагнітного матеріалу. Втягує та утримує обмотки, виконані з круглого мідного дроту, розташовані коаксіально на латунній втулці, в якій вільно переміщається якір реле. Обмотка, що втягує, включається послідовно в ланцюг якоря стартерного електродвигуна і паралельно контактним болтам реле. Утримуюча обмотка розрахована на утримання якоря, реле в притягнутому до осердя положенні, намотується поверх, обмотки, що втягує, мідним проводом меншого перерізу має самостійний висновок на «масу». При включенні реле обидві обмотки діють згідно, створюючи необхідну притягує якір коли зазор між ним і сердечником реле, має найбільшу величину. При спрацьовуванні реле контактні болти, підключаючи стартерний електродвигун до акумуляторної батареї і, одночасно, шунтує обмотку, що втягує, вимикаючи її з роботи, що дозволяє знизити витрату електричної енергії батареї в процесі пуску двигуна внутрішнього згорання.

Привідний механізм призначений для з'єднання валів і передачі обертового (крутного) моменту стартерного електродвигуна маховику під час пуску двигуна внутрішнього згорання, запобігання якорю стартерного електродвигуна від надмірного, збільшення частоти обертання (рознесення) маховиком двигуна, що

запустився, і роз'єднання валів після пуску. Основними конструктивними елементами приводного механізму є важіль включення приводу, муфта приводна, буферна пружина, муфта вільного ходу і шестерня приводу. Важіль увімкнення приводу підвішений на осі, навколо якої він може повертатися. Верхній кінець важеля з'єднаний з якорем реле тягового. Два пальці нижньої розгалуженої частини важеля з'єднані з повідковою муфтою, здатною вільно переміщатися вздовж стартерного валу електродвигуна.

Буферна пружина розташована між повідковою муфтою та муфтою вільного ходу. Муфта вільного ходу складається із зовнішньої провідної та внутрішньої веденої обойми, розділених клиноподібним повітряним зазором з циліндричними роликками в ньому. Провідна обойма виконана заодно з напрямною втулкою, що має шліцеве з'єднання з стартерним валом електродвигуна. Ведена циліндрична обойма з шестернею приводу забезпечені вкладишем, що виконує роль підшипника ковзання, і вільно насажені на вал. Коли шестерні приводу та маховика знаходяться в зачепленні і якір електродвигуна починає обертатися, ведуча обойма муфти вільного ходу повертається відносно нерухомої веденої обойми. Ролики переміщуються у вузьку частину клиноподібного зазору, муфта заклинюється, і момент стартера, що обертає, передається маховику ДВС. Після пуску двигуна частота обертання шестерні приводу та пов'язаної з нею веденої обойми перевищує частоту обертання провідної обойми. Ролики при цьому переміщуються в широку частину клиноподібного зазору між обоймами, муфта розклинюється і, крутний момент від працюючого ДВС електродвигуна не передається, що оберігає його від «рознесення». Електростартер при пуску ДВЗ працює наступним чином. При включенні тягового реле під дією магнітного потоку, створеного силою, що намагнічує, втягує і утримує обмоток, якір реле переміщається і через важіль включення приводу, вводить, шестерню приводу в зачеплення з шестернею, маховика. Наприкінці ходу якоря контактний диск замикає силові контакти тягового реле, включаючи ланцюг живлення стартерного електродвигуна. Силові контакти замикаються раніше ніж шестерня приводу повністю увійде в зачеплення.

Якщо шестерня приводу упреться торцями зубів у торці зубів маховика, вона зупиняється, а важіль включення приводу продовжує переміщатися, стискаючи

буферну пружину. Коли замкнуться силові контакти реле, якір стартера разом з приводом починає повертатися і, як тільки зуб шестерні приводу встановиться проти западини шестерні маховика, шестерня приводу під дією зусилля буферної пружини і осьового зусилля, що виникає в шліцевому з'єднанні напрямної втулки муфти в зачеплення з шестерні маховика. Шестерні залишаються в зачепленні до тих пір, поки не буде знеструмлено утримуючу обмотку тягового реле стартера. У перший момент часу після розмикання ланцюга живлення тягового реле втягує і утримує обмотки виявляються послідовно підключеними до акумуляторної батареї через замкнуті контактні болти. При цьому напрям струму в утримуючій обмотці зберігається колишнім, а в обмотці, що втягує, - зміниться, на протилежне. Обмотки виявляються включеними зустрічно, а реле магнітопровід швидко розмагнічується. Поворотна пружина реле повертає якір у вихідне положення. При цьому розмикаються контактні болти реле, а гарчать включення приводу, що виводить шестерню стартера із зачеплення з шестернею на вінці маховика. Експлуатаційні властивості стартерного електродвигуна оцінюють за робочою характеристикою, на якій можна виділити три характерні режими: режим повного гальмування, режим холостого ходу та режим максимальної механічної потужності.

Якщо, при заданій силі струму якоря в режимі повного гальмування, пусковий момент, що розвивається електростартером, менший за необхідний, то це свідчить про несправності електричного характеру (замикання обмотки збудження або обмотки якоря на корпус, виткове замикання в пластинах обмотки збудження та замикання).

Якщо в режимі холостого ходу струм електростартера більший, а частота обертання якоря менша за норму, то це свідчить про несправності, механічний характер (перекіс кришок корпусу, вигин валу, надмірне натискання щіток на колектор та ін.).

Режим максимальної механічної потужності, що розвивається стартерним електродвигуном, приймається за розрахунковий режим. Потужність і частота обертання цьому режимі є вихідними даними щодо основних розмірів якоря стартерного електродвигуна.

3.2. Перевірка технічного стану стартера

3.2.1. Перевірка тягового реле стартера

Від'єднайте перемичку від головних контактів реле до електродвигуна.

Встановіть стартер на стенді. Підключіть стартер до стенду. Увімкніть стенд автоматичним вимикачем.

При перевірці обмотки, що втягує, провідники від батареї підключають до клем реле. При справній обмотці якір різко втягується у реле. Для перевірки утримуючої обмотки один провід від батареї підключають до корпусу, а інший до клемми реле. При справній обмотці якір м'яко втягуватиметься в реле.

Справність обмоток, що втягує і утримує, необхідно перевірити за допомогою омметра або замірити опір за допомогою вольтметра і амперметра. Опір обмотки, що втягує, має бути $0,35^{+0,01}$ Ом, а утримує $1,11^{+0,03}_{-0,05}$ Ом. У разі несправності обмоток тягове реле слід замінити. Клемові болти вимикача стартера треба зачистити, а при сильному вигорянні їх повернути на 180° навколо своєї осі. При сильному зносі контактної диска слід повернути незношеною стороною до контактів.

Якір тягового реле в корпусі повинен вільно переміщатися. Після перевірки та заміни всіх деталей, що зносилися або пошкоджені, стартер можна збирати.

Перевірка стартера у режимі холостого ходу.

Робота електростартера за відсутності гальмівного моменту на валу називається холостим ходом електростартера. Випробування електростартера в цьому режимі з метою виявлення несправностей механічного характеру проводиться в наступному порядку.

Вмикається вимикач S1 і PV1 вольтметром вимірюється ЕДС акумуляторної батареї (рис. 3.1).

Вмикається вимикач S2 та запитується котушка додаткового реле стартера. Останнє, спрацювавши, замикає свої контакти K1.1, в ланцюгу живлення тягового реле стартера K2. Тягове реле, під дією МДС втягує і утримує обмоток, спрацьовує та замикає свої контакти K2.1. Електростартер підключається до акумуляторної батареї і пускається.

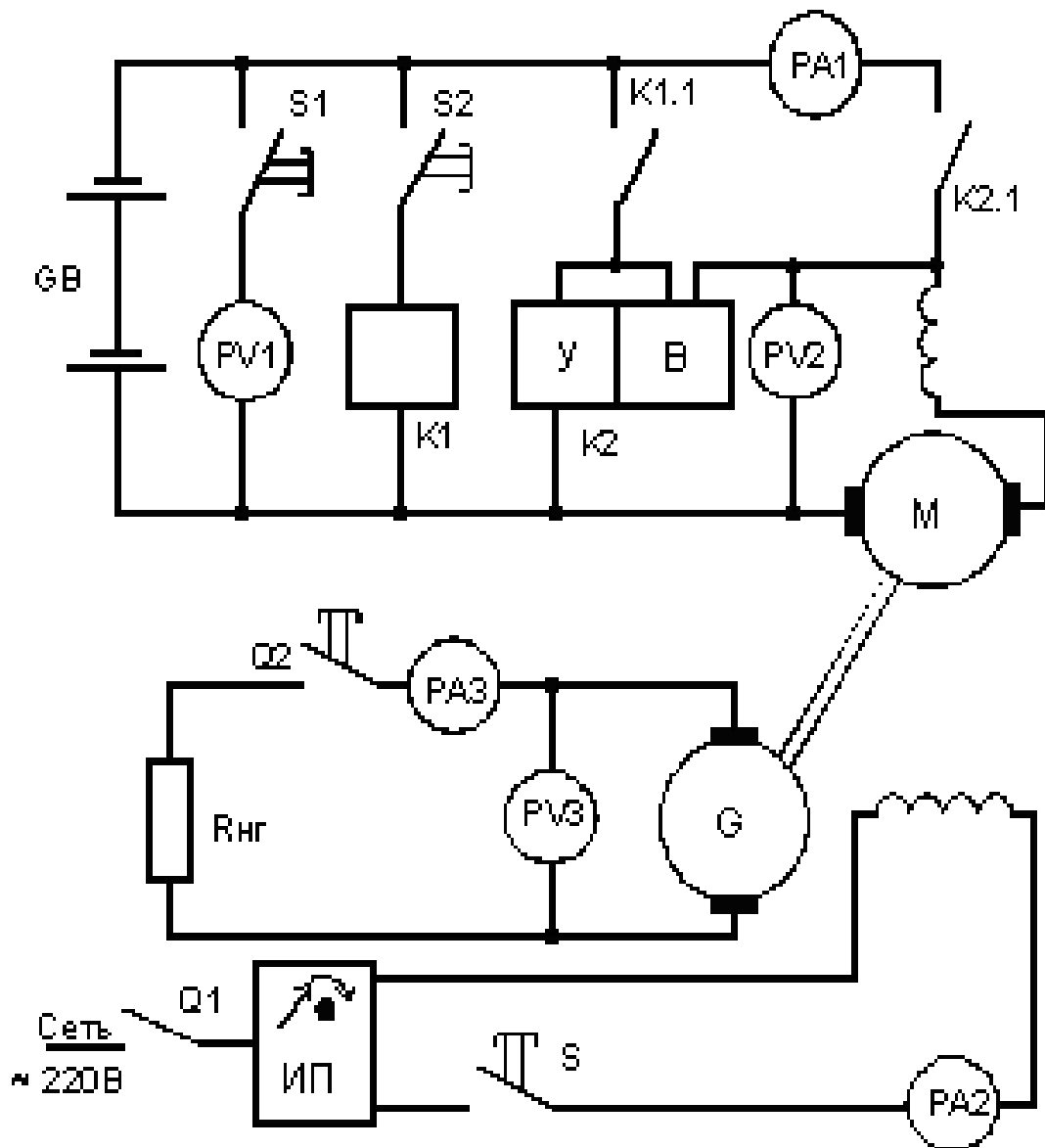


Рис 3.1 - Принципова електрична схема

Одночасно з цим замикається коротко і виводиться з роботи втягувальна обмотка тягового реле. Після пуску електростартера протягом 5-10с знімаються показання амперметра PA1 вольтметрів PV1 та PV2, а переносним тахометром вимірюється частота обертання вала електростартера. Електростартер відключається від . батареї натисканням кнопки вимикача S2.

3.2.2. Режим повного гальмування

Режим роботи електростартера з підключеною акумуляторною батареєю з нерухомим (загальмованим) валом називається режимом повного гальмування.

Випробування електростартера в режимі повного гальмування з метою виявлення несправності електричного характеру проводиться в наступному порядку.

Спеціальним важелем; одним кінцем, що вставляється в отвір сполучної муфти, фіксується (гальмуються) вал стартерного електродвигуна. Кнопочним вимикачем S2 підключається електростартер до акумуляторної батареї і протягом 3-5с знімаються показання амперметра PA1 До вольтметрів PU1 і PU2, вимірюється сила, що діє на важіль гальмування, відтягуванням останнього ручним динамометром за гачок на вільному. Електростартер відключається від батареї натисканням кнопки вимикача S2.

3.3. Контрольна перевірка стартера

Справність стартера, правильність його збирання та регулювання визначають перевіркою регулювання включення стартера, перевіркою стартера на холостому ході, перевіркою стартера при повному гальмуванні.

Для перевірки стартера необхідні: низьковольтне джерело (або добре заряджена акумуляторна батарея), вольтметр постійного струму зі шкалою від 0 до 30 В, амперметр постійного струму зі шунтом до 1000 А, тахометр зі шкалою до 10000 хв. і динамометр[5].

Схема включення стартера під час випробування показано на рис.3.2 . Якщо немає контрольно-випробувального стенду, то стартер затискають у лещата і з'єднують із батареєю. Для з'єднання стартера з батареєю застосовуються дроти перерізом не менше 25-35 мм. Силу струму та частоту обертання валу якоря при випробуваннях на холостому ході вимірюють через 30 с після включення стартера.

Стартер вважається таким, що витримав випробування, якщо при напрузі 12 В він споживає струм не більше 85 А і розвиває частоту обертання не менше 4000 хв^{-1} .

При тугому обертанні якоря, яке зазвичай викликається перекосами внаслідок неправильного складання стартера або зачеплення якоря за полюси, а також при замиканні обмотки якоря на корпус або замиканні між витками, стартер.

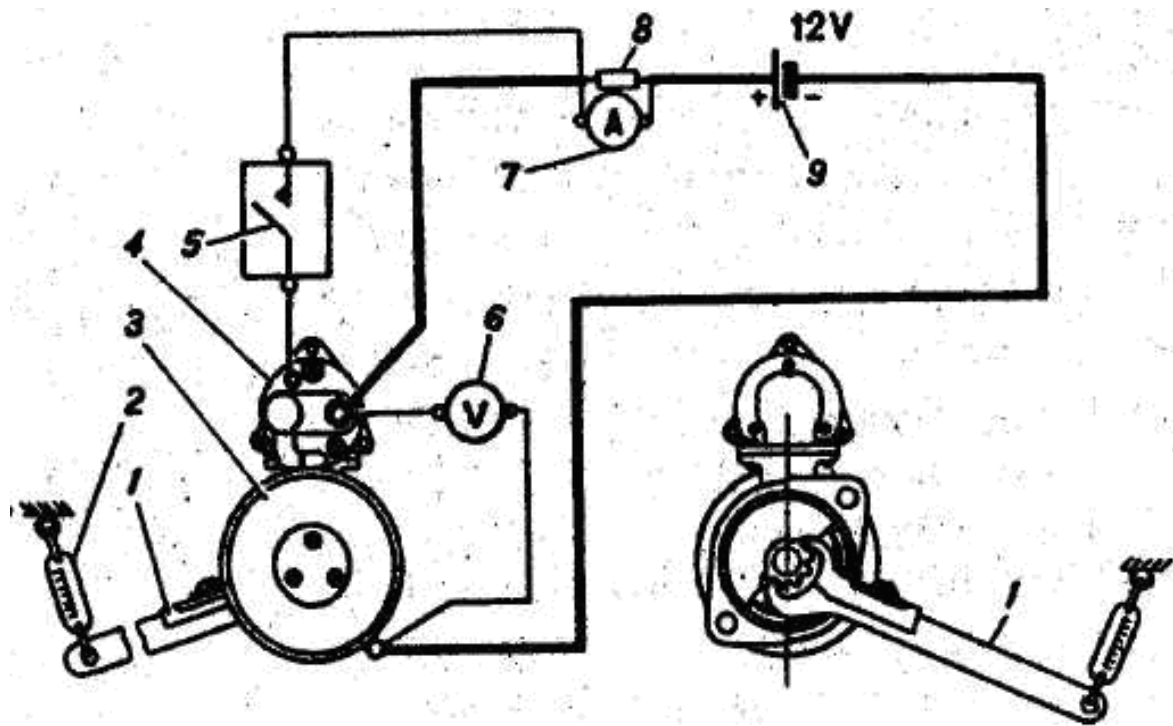


Рис. 3.2 - Схема включення стартера під час випробування.

споживає струм більшої сили при частоті обертання менше вказаної. Мала сила споживаного струму та знижена частота обертання валу якоря при нормальній напрузі на затискачах стартера свідчать про поганий контакт у з'єднаннях проводів усередині стартера або про знижений натяг пружин щіток.

Перевірку стартера при повному гальмуванні необхідно проводити на стенді 532М або E242[4].

Справний стартер при живленні від повністю зарядженої акумуляторної батареї споживає струм не більше 550 А при напругах не менше 8 В і розвиває момент, рівний приблизно 2 кгс. Якщо струм, що споживається, вище 550 А, а гальмівний момент нижче 2 кгс•м, то це вказує на несправність обмотки якоря або обмотки збудження. Якщо величина гальмівного моменту і сила струму, що споживається нижче нормальної, то це при нормальній напрузі на затискачах стартера вказує на погані контакти всередині стартера або на слабе натяг пружин щіток. Знижена напруга на затискачах стартера (менше 8 В) вказує на погані контакти у дротах або на несправність батареї. При навантаженні шестірні гальмівним моментом муфта вільного ходу не повинна пробуксовувати.

РОЗДІЛ 4.

СТАРТАП-ПРОЕКТ

Стартап - це новий вид бізнесу, який раніше не існував. Основна ідея стартапу полягає в тому, щоб принести на ринок щось нове - новий продукт, технологію або концепцію, які раніше не були використані. Основна відмінність стартапу від традиційного бізнесу полягає в тому, що він привертає інвесторів ще до того, як починає приносити прибуток. Інвестори вкладають гроші в ідею та потенційний успіх на етапі зародження проекту. У сучасному світі корпорації в основному використовують вже існуючі технології та продукти, тоді як стартапи активно розвиваються та конкурують, швидко впроваджуючи новаторські ідеї та технології. Їхня адаптивність та швидкість дозволяють їм конкурувати з тими компаніями, які не зосереджені на нововведеннях та розвитку власної інтелектуальної власності.

4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Створення будь-якого стартапу базується на інноваційній ідейній основі. Головна мета даної магістерської дисертації полягає в реалізації вдосконаленої конструкції електростартера для пуску двигуна внутрішнього згорання.

Наступним етапом цього дослідження є впровадження розробленої конструкції та залучення фінансування для проведення рекламної кампанії. Також важливо розповсюджувати ключову інформацію серед користувачів цього типу машин, пояснюючи, чому це важливо та чому саме ваша ініціатива є значущою.

Крім того, потрібно активно шукати потенційних спонсорів та компанії, які могли б підтримати організацію виробництва цих машин і надавати сервісне обслуговування для агрегатів, що його потребують. Важливим кроком буде створення ефективної стратегії маркетингу, спрямованої на підвищення усвідомленості та привертання уваги потенційних користувачів до нововведення.

Для забезпечення успішного запуску та розвитку стартапу, слід активно співпрацювати з інженерами та фахівцями з області електротехніки для вирішення технічних питань та досягнення оптимальної ефективності

розробленого електростартера. Також, важливо встановити партнерські відносини з потенційними споживачами та бізнес-партнерами для стабільного впровадження та поширення нового продукту на ринку.

4.1.1. Опис ідеї стартап-проекту

Таблиця 4.1 - Можливі напрямки застосування

Зміст ідеї	Можливі напрямки застосування	Основні вигоди для користувача	Відмінності від аналогів та замінників
Магнітна система	Електротехнічна індустрія	Підвищена ефективність та надійність магнітної системи.	Використання штампованих ізолюваних листів забезпечує високу якість та мінімізує енергетичні втрати.
Якість матеріалів	Електротехнічна індустрія	Збільшення тривалості служби та стійкості до навантажень.	Використання листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм гарантує оптимальну міцність та ізоляцію.
Обмотка якоря	Автомобільна промисловість	Покращення ефективності та зниження витрат електроенергії.	Використання хвильової обмотки з дроту марки ПЕТ-155 забезпечує високий коефіцієнт перетворення електроенергії.

Ця таблиця надає цілісне уявлення про зміст ідеї стартап-проекту та визначає можливі напрямки застосування, основні вигоди для користувача та відмінності від існуючих аналогів та замінників.

4.1.2. Економічні плюси спроектованого стартера

У моєму випадку в стартері застосовується електродвигун постійного струму з послідовним збудженням, що характеризується високою частотою обертання без навантаження, що підтримує необхідну частоту обертання колінчастого валу двигуна під час його запуску. Даний стартер з якорем, що обертається з вищою швидкістю, але розвиває менший момент, що крутить, мають менші розмір і масу. Діаметр зубчастого вінця маховика не може бути збільшений і тому збільшення цього передавального відношення здійснюється шляхом використання додаткового передавального ступеня (стартери з шестерним редуктором).

Електростартер застосовується для запуску автомобілів. Він простий за своєю конструкцією і легкий в обслуговуванні. Порівняно з базовою моделлю, електродвигун, що проектується, має ряд переваг, у тому числі, більш високий ККД. Це стало можливим завдяки застосуванню нових технічних рішень, найважливішими з яких є застосування нагрівостійкої ізоляції на основі поліамідних матеріалів, що забезпечує краще заповнення пазів якоря, підвищення ефективності охолодження, кращим використанням між полюсного простору.

Таблиця 4.2 – Порівняння спроектованого електростартера з аналогом

Параметр	Спроекований ЕС	Серійний ЕС
Потужність P_{2H} , кВт	1,65	1,65
Частота обертання n_H , об/хв	1500	1500
Номінальна напруга, В	12	12
Максимальний момент, Нм	15,74	15,0
ККД	0,91	0,89

4.2. Потенційні користувачі

Ефективна робота зі спеціалізованим обладнанням вимагає кваліфікованих фахівців, які володіють професійними технологіями та інструментарієм. Важливо враховувати, що виробництво та обслуговування електричних машин є високо витратним та відповідальним процесом. Невірне використання технологій, помилки чи недоліки можуть призвести до втрат характеристик обладнання, що

потенційно загрожує людським життям та завдає значних збитків на виробництві. Стратегія полягає в активному співробітництві з компаніями для впровадження ідей, спрямованих на покращення характеристик їхньої продукції. Крім того, в подальшому розвитку можливі спільні розробки та дослідження з метою досягнення кращих результатів.

4.3. Структура виплат

Однією з найважливіших аспектів стартап-проекту є розробка та чітке визначення структури витрат. Це є ключовим питанням, яке вражає інвесторів, оскільки вони цікавляться тим, на що саме будуть витрачатися їхні кошти. У даній магістерській роботі, орієнтованій на впровадження нових конструкцій машин, особливу увагу слід приділити розрахункам витрат, враховуючи вартість матеріалів та спеціалізованого обладнання.

4.4. Бізнес-модель впровадження

Бізнес-модель впровадження - це компактне та спрощене уявлення про бізнес, спрямоване на повне розуміння та аналіз системи взаємодіючих бізнес-процесів. Ці моделі використовуються для опису та класифікації підприємств, особливо в підприємницькому середовищі. У теорії та практиці термін "бізнес-модель" використовується для представлення різноманітних аспектів бізнесу, включаючи його мету, бізнес-процеси, цільових споживачів, пропозиції, стратегії, інфраструктуру, організаційні структури, джерела фінансування, а також операційні процеси та політики, включаючи культурні аспекти.

ВИСНОВОК

В магістерській дисертації спроектовано конкурентоспроможний електростартер для пуску двигуна внутрішнього згоряння легкового автомобіля, розроблені технологічні процеси виготовлення деталей спроектованого електростартера.

Актуальність даної теми обумовлена потребою вдосконалення технологій та інтеграцією електричних стартерів у сучасні системи транспортних засобів. Особлива увага приділяється важливості ефективної та екологічно чистої роботи системи запуску та зупинки двигуна в сучасних автомобілях.

Розраховано конкурентоздатний електростартер для пуску двигуна внутрішнього згоряння легкового автомобіля. У рамках даного магістерського проекту була проведена модернізація електростартера, включаючи електромагнітні та теплові розрахунки.

Результати розрахунків підтвердили, що підвищення магнітної індукції в магнітних ділянках сприяє більш повному використанню магнітної системи електростартера. Розрахунки обмотки та її теплових параметрів підтвердили задовільні умови для експлуатації, а тепловий аналіз продемонстрував, що температура окремих ділянок не перевищує допустимих меж.

Додатково, у ході дослідження важливо відзначити врахування сучасних вимог до екологічної безпеки у концепції розробки електростартера, що сприяє зниженню викидів та покращенню загального екологічного впливу автотранспорту.

Розглянуто можливість інтеграції розробленого електростартера в реальні автомобільні системи та вивчено його вплив на загальну продуктивність автомобільного двигуна в різних умовах експлуатації. Також в стартап-проекті, розглянуто інші аспекти, такі як впровадження у виробництво електростартера вартість його виробництва та перспективність подальших удосконалень.

Ці результати дають можливість розвивати технології автомобільної промисловості, сприяють вдосконаленню систем пуску двигуна та сприяють створенню більш ефективних та екологічно чистих автомобілів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сажко В.А. Електрообладнання автомобілів і тракторів: Підручник. – К.: Каравела, 2009. – 400 с.
2. Мазепа С.С., Куцик А.С. Електрообладнання автомобілів. – Львів: Львівська політехніка, 2004. – 168 с.
3. Электричне та електронне устаткування автомобілів/ С.В.Акімов, Ю.І.Боровських, Ю.П.Чижков. - М.: Машинобудування, 1988 -280 с.: іл.
4. Ютт В.Є. Електрообладнання автомобілів: Навчальний посібник для вузів. М.: Транспорт, 2000. 320с.
5. Чижков Ю.П., Акімов С.В. Електрообладнання автомобілів. Підручник для вузів. - М.: Видавництво "За рулем", 1999, - 384 с., іл.
6. Проектування електричних машин: Навч. посібник / Ципленков Д.В., Куваєв Ю.В., Іванов О.Б., Бобров О.В. (за ред. проф. Шкрабця Ф.П.) – Дніпро: НТУ "ДП", 2018. – 390 с.
7. Постников И.М. Проектирование электрических машин. - Киев: Гостехиздат УССР, 1960. – 910 с.
8. Проектування електричних машин: Навч. посібник / Ципленков Д.В., Куваєв Ю.В., Іванов О.Б., Бобров О.В. (за ред. проф. Шкрабця Ф.П.) – Дніпро: НТУ "ДП", 2018. – 390 с.
9. Юхимчук В.Д. Технологія виробництва електричних машин: підручник. – Х. Тім Пабліш Груп, 2012. – 740 с.
10. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технологія виробництва електричних машин: Навчальний посібник для вузів. - М.: Энергоиздат, 1982.- 512 с., іл.
11. Виноградов Н.В. Виробництво електричних машин. Навчальний посібник для вузів. Вид. 2-е, перероблене. М., "Энергия", 1970. 288 с. з іл.
12. Осьмаков А.А. Технологія виробництва електричних машин. Підручник для технікумів. М., "Высш. школа", 1971. 344 с. з іл.
13. <https://www.pistonheads.com/news/ph-explains/ph-origins-the-electric-starter/39120>
14. <https://elektrik.info/main/fakty/1714-istoriya-elektrostarter-i-avtomobilnye-akkumulyatory.html>
15. <https://www.autocentre.ua>

- 16.https://en.wikipedia.org/wiki/Start-stop_system
- 17.Integrated generator and starter motor. / General Motors Corporation, Dearborn, Mich. / Filed: Dec. 27, 1993 / Date of Patent: May. 23, 1995.
- 18.<https://www.physik-am-auto.de/generator/startergenerator.html>
- 19.Moeini A., Kamwa I., Brunelle P., Sybille G. Synchronous Machine Stability Model, an Update to IEEE Std 1110-2002 Data Translation Technique. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2018. 5 p.
- 20.Kundur P. Power System Stability and Control. New York, McGrawHill, 1994.
- 21.IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses. IEEE Std 1110-2002. 2003. 72 p.

ДОДАТОК

HISTORY OF ELECTRIC STARTER DEVELOPMENT FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE START-UP

TARASOV R.D., magister, **TSYVINSKYI S.S.**, Ph.D., associate professor,
GERASKIN O.A., Ph.D., associate professor,
NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», electromechanics department

Introduction. In the modern world, the car has become an integral part of our daily lives, but few people think about what technologies have developed to make cars so convenient and affordable. One of the key innovations that made it easier to use a car was the electric starter. This article is devoted to the history of electric starter development from its first prototypes to modern technologies.

Purpose of the work. The aim of the work is to thoroughly study the history of electric starters for internal combustion engines, to reveal the key points of the emergence and improvement of this important technology, as well as to note its impact on the automotive industry.

The beginning of the journey. Today, starting a car by turning a key or pressing a button is already considered commonplace. However, a hundred years ago, starting a car was not so easy. Before the electric starter, it took a lot of physical effort and a little bit of hope to get going. In those days, starting a car with an internal combustion engine was in many ways similar to starting a lawn mower today. It was not only physically difficult, but also dangerous. Then there were cases of injuries and even deaths of people when trying to start a car.

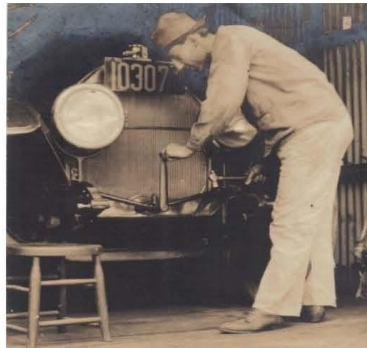


Figure 1 - Internal combustion engine mechanical start

Gradually, cars became more popular, and along with this, there was a need for more convenient and safe engine starting systems. Manual starters were inefficient and unacceptable for many drivers, and these factors prompted engineers to develop new ways to automate this process.

Appearance of the first electric starters. In 1911, Cadillac first introduced a car equipped with an electric starter to the world. This invention simplified the life of drivers by allowing them to start the engine using an electric motor that was activated by pressing a button. This was the first step in the development of automotive technologies aimed at improving the convenience and reliability of driving.



Figure 2-The first electric starter

This was an unusual system that used four six-volt batteries combined together (24 volts) to power the starter. It also had a rotary switch that, once started, allowed the generator to charge each battery at six volts. In the late 1950s, car electrical systems switched from six volts to 12 volts and have remained so ever since.

In the following decades, electric starter technologies have become much more complex. They received improved security systems, a more reliable connection to the power grid and a longer service life. Modern electric starters can start the engine even at the lowest temperatures, ensuring stable operation of the car in various operating conditions.

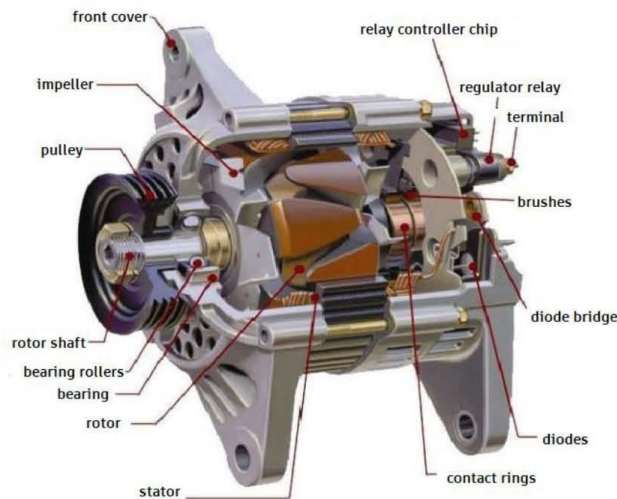


Figure 3-Car starter

The "start-stop" system. This is a system that detects that a car has stopped and turns off its engine. When the driver wants to start again, the engine automatically restarts so that you can continue driving. That is, the engine starts quickly when the clutch pedal is pressed (in a car with a manual transmission) or when the brake pedal is released (in a car with an automatic transmission). This solution allowed you to:

- reduce fuel consumption,
- reduce carbon dioxide and other exhaust gas emissions,
- increase the engine life.

Starting a cold engine causes a heavy load. However, the warmed-up drive unit is properly lubricated, so subsequent starts are not harmful to it. When the engine is not running, it does not consume fuel and does not emit exhaust gases and does not wear out. Thanks to this technology for gasoline and diesel cars (not electric vehicles). Fuel

economy is 5-10 %. The "start-stop" system has an additional task in plug-in hybrid vehicles. In addition to controlling engine operation during shutdown, it is also responsible for the combustion unit when switching drive types between electric and hybrid drive. The system is most effective for vehicles moving around the city, spending a lot of time at traffic lights and in traffic jams.

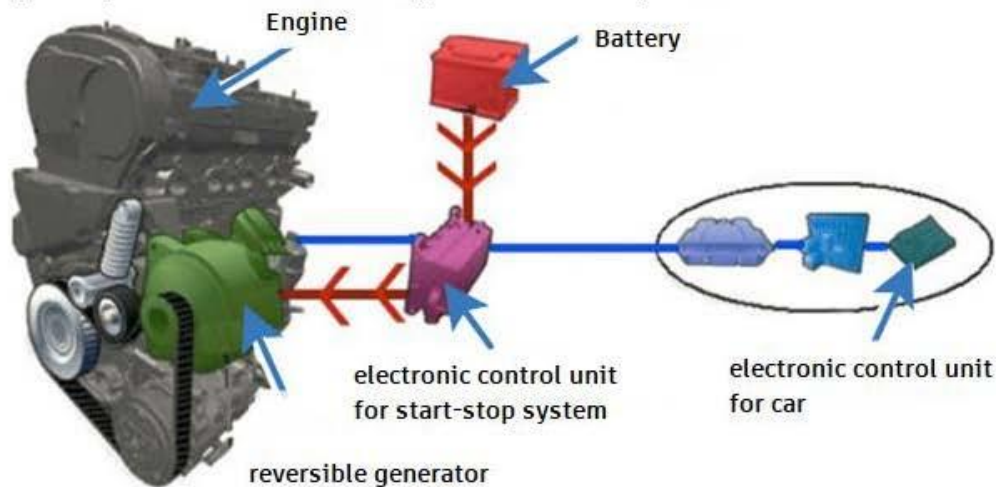


Figure 4-Start-stop system

1. The vehicle is ready to start and the electronic control unit starts the engine. The reverse generator, having received energy from battery A, starts the engine as a starter.

2. In driving mode (the driver does not intend to brake), the reverse generator operates in the mode of a conventional generator, converting mechanical energy into electrical energy and charging the battery.

3. When the vehicle speed drops to 8 km/h during braking, the STARS system control unit shuts down the engine.

4. After the pedal is released, the STARS control unit gives the command to start the engine. The power from the battery goes to the reverse generator, and it starts the engine like a normal starter.

5. The ride is over and the control unit shuts down the engine

Starter-generator sets. Currently, combined electromechanical converters-starter-generators are widely used. The use of starter generators on cars can improve a number of characteristics. Replacing two electric machines-a starter and a generator-reduces the weight and dimensions of the unit and its cost. To reduce the emission of harmful substances into the atmosphere during frequent stops in urban traffic conditions, modern cars are equipped with a STOP-START system. Reducing the size of an electric car and the amount of current in the starter mode of operation is achieved by using a starter generator at a voltage higher than the voltage of the on-board network of the car. In this case, two onboard mains voltages are assumed. Communication between two electric energy storage devices and starter-generator control is carried out by an electronic system.

The 42 V non-geared starter-generator with an asynchronous electric machine and a control semiconductor module, designed by Continental and BMW AG, develops a maximum starting torque of 200 Nm in the starter mode of operation and a maximum power in the generator mode of operation of 2 kW at 14 V and 2.2 kW at 42 V.



Figure 5 - Starter-generator set

The tests carried out confirmed the efficiency of the starter-generator in various modes and operating conditions. Synchronous machines with permanent magnet excitation can be used in gearless starter generators. Two synchronous starter-generator designs with an internal rotor and an external rotor are possible. A synchronous starter-generator with an external rotor has the advantages of easier and more reliable mounting of magnets on the rotor and good cooling.

In the starter mode of operation, the linear load can be increased by 3.5 times compared to the generator mode, and the rotation speed in the generator mode is an order of magnitude higher than the rotation speed in the starter mode. With the same values of other values, the power of the starter-generator in the generator mode of operation will be three times greater than in the starter mode. In an electric car, the starter-generator is calculated for the main mode of operation – the traction motor mode, powered by a battery. When braking the car, the starter-generator is switched to generator mode and recovers electrical energy from the battery. The vehicle can be equipped with several starter generators with a total power of up to 100 kW or more.

Non-contact asynchronous or synchronous machines with permanent magnets, powered by inverters, are used as traction motors and starter generators in hybrid vehicles. In order to reduce the size, they can be made with a built-in gearbox and have water cooling.

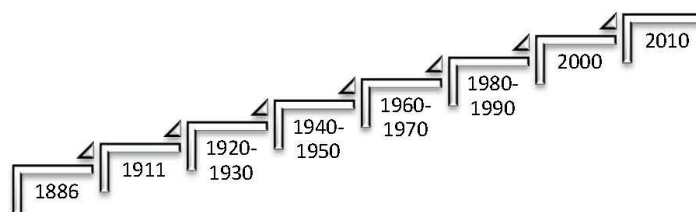


Figure 6-Timeline of electric starter development

Late 19th century:

1886: Karl Benz patented the first automobile powered by an internal combustion

engine. To start it, you had to manually turn the lever.

Early 20th century:

1911: Cadillac introduced the first electric starter motor in mass-produced automobiles, eliminating the need for manual torsion.

1920s-1930s:

1920s: Electric starters became standard on most cars, making it much easier and safer to start the engine.

1930s: The 12-volt electric system became the standard in automotive design, providing more power to electric starters.

1940s-1950s:

1940s: Automobile manufacturers introduced key-operated starting systems, replacing push-button starters. This simplified the process of starting the car.

1950s: Electric starters became more reliable and durable, which led to their widespread adoption in various types of vehicles, including trucks and buses.

1960-1970s:

1960s: Remote start systems were introduced that allowed the engine to be started from a distance, this was implemented as a luxury feature in some premium cars.

1970s: the use of electronic ignition systems became more common, which increased the efficiency of the start-up process.

1980-1990-ies:

1980s: Advances in electronics led to keyless entry systems that combined engine start and door opening functions.

1990s: immobilizers were introduced, which improved the overall safety of the car by requiring an electronically encoded key to start the engine.

2000-present:

2000s: Push-button startup systems became popular, replacing the traditional key. Drivers can start the engine by pressing a button when a non -key remote is nearby.

2010s: Starter-generator sets for passenger cars

Modernity: Continuous improvements are aimed at integrating electric starters with hybrid and electric vehicle systems, ensuring efficient and continuous operation of the engine start and stop system, especially in environmentally friendly vehicles.

Conclusions. In the course of studying the history of electric starters, it is revealed how this technology has come a long and difficult way from manual mechanical systems to modern high-tech devices. Starting with the first cars that required physical effort to start the engine, engineers have continuously improved the starting systems, ensuring reliability and user-friendliness. Consequently, the history of electric starters attests to the continuous progress in automotive technology, which simplifies the lives of drivers and contributes to the creation of environmentally friendly automotive solutions in the future.

References

1. <https://www.pistonheads.com/news/ph-explains/ph-origins-the-electric-starter/39120>
2. <https://elektrik.info/main/fakty/1714-istoriya-elektrostarter-i-avtomobilnye-akkumulyatory.html>
3. <https://www.autocentre.ua>
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Start-stop_system
5. Integrated generator and starter motor. / General Motors Corporation, Dearborn, Mich. / Filed: Dec. 27, 1993 / Date of Patent: May. 23, 1995.
6. <https://www.physik-am-auto.de/generator/startergenerator.html>