

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електромеханіки

(повна назва кафедри)

Робота виконана на замовлення

ТОВ "УКРМЕГА ІМПЕКС"

_____ Директор Пономарьов О.І.
підпис ініціали, прізвище

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.В. Чумак
підпис ініціали, прізвище

“ 10 ” червня 2024 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

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

освітньої програми Електричні машини і апарати
(назва)

на тему: Співставлення характеристик асинхронних машин з різними марками електротехнічної сталі

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕМ-01

_____ Ковалевич Андрій Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ Асистент, д.ф., Ігнатюк Є. С.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____ Доцент, к.т.н. Чумак В. В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____ Доцент, д.т.н., Шаповал І. А.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 року

$$M_{\text{ПУСК}} = 1.2 \text{ в.о.}, h = 160.$$

4. Зміст дипломної роботи (перелік завдань, які потрібно розробити): Огляд існуючих технічних засобів і методів, що застосовуються для характеризувати властивостей сталей. Розрахунок та дослідження асинхронного трифазного двигуна з короткозамкненим ротором загального призначення (серії АИ160М6У3), який зазнав аварію в результаті руйнування підшипникового вузла. Розрахунок двигуна на базі нових електротехнічних сталей (перечислити сталі), порівняння вихідних даних і параметрів двигуна при застосуванні різних марок сталі. Висновки та рекомендації по роботі.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація за матеріалами дипломної роботи (слайдів).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
3	к. т. н., доц., Гераскін О. А.		

7. Дата видачі завдання

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення стану проблеми	31.12.2023-15.01.2024	
2	Огляд літературних джерел та постановка задачі	16.01.2024-26.02.2024	
3	Дослідження асинхронних машин, конструкції та принцип дії	27.02.2024-20.03.2024	
4	Огляд наявних технічних засобів	21.03.2024-07.04.2024	
5	Розрахунок двигуна по заданим параметрами	08.04.2024-10.05.2024	
6	Порівняння сталей та роботи двигуна	11.05.2024-28.05.2024	
7	Оформлення роботи та подача на захист	29.05.2024-10.06.2024	

Студент

(підпис)

Ковалевич А. С.

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Ігнатюк Є. С.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота акцентується на актуальній темі: порівнянні магнітних втрат в електричних машинах загального призначення при зміні вітчизняних марок сталі на сталі європейського стандарту.

В роботі досліджуються властивості сталей, які використовуються в електричних двигунах. Їх види та методи виробництва на різних підприємствах світу. Проведена робота з порівнянням сталей українського та європейського виробництва, що дає розуміння характеристик асинхронної машини в різних типах роботи. Проаналізовано властивості обмотувальних дротів для перемотування та ремонту електродвигунів, матеріали ізоляції обмотувальних проводів. Також не менш важливою є якість ізоляції електричних машин, де значення мають також механічна міцність, вологонепроникність, маслостійкість та інші властивості ізоляції.

Проводився розрахунок та дослідження асинхронного трифазного двигуна з короткозамкненим ротором загального призначення (серії АИ160М6У3).

Проведенні дослідження свідчать про важливість характеристик використаних технічних сталей в магнітопроводі. Це дає змогу співставити та зрозуміти які види закордонних сталей є найбільш підходящими до асинхронних двигунів українського виробництва.

Робота містить три розділи, 67 сторінок та 15 рисунків.

Ключові слова: Властивості електротехнічних сталей; індукція насичення; електромагнітні установки; міжлистова ізоляція магнітопроводу; повні та питомі втрати.

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on a topical topic: comparison of magnetic losses in general-purpose electric machines when changing domestic steel grades to European standard steel.

The work examines the properties of steels used in electric motors. Their types and methods of production in different enterprises of the world. Work was carried out comparing steels of Ukrainian and European production, which gives an understanding of the characteristics of an asynchronous machine in different types of work. The properties of winding wires for rewinding and repairing electric motors, insulation materials of winding wires were analyzed. Equally important is the quality of insulation of electric machines, where mechanical strength, moisture resistance, oil resistance and other insulation properties are also important.

The calculation and research of the asynchronous three-phase motor with a short-circuited rotor of general purpose (AИ160M6Y3 series) was carried out.

The conducted research shows the importance of the characteristics of the technical steels used in the magnetic circuit. This makes it possible to compare and understand which types of foreign steels are most suitable for Ukrainian-made asynchronous motors.

The work contains three sections, 67 pages and 15 figures.

Keywords: Properties of electrical steels; electromagnetic installations; winding wires; insulation of the windings of the electromagnet; total and specific losses.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів	8
Вступ.....	9
Розділ 1 Дослідження Асинхронних машин, їх конструкція та принцип дії.	10
1.1 Створення магнітного поля, що обертається.	10
1.2 Конструкція та принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна.	13
1.3 Українські виробники електричних машин.	15
1.3.1 Властивості та переваги вітчизняних електродвигунів.....	19
1.4 Європейські виробники електродвигунів.	20
1.4.1 Провідні виробники та їх асинхронні машини	20
1.4.2 Ефективність та продуктивність закордонних електричних машин.....	23
1.5 Висновок до розділу 1	25
Розділ 2 Огляд наявних технічних засобів, які використовуються для визначення стану та розрахунку втрат електротехнічної сталі.	26
2.1 Електротехнічна сталь: види, властивості та застосування	26
2.1.1 Магнітна проникність	27
2.1.2 Коерцитивна сила	27
2.1.3 Питомий електричний опір	28
2.2 Види електротехнічної сталі.....	28
2.2.1 Холоднокатана ЕТС	29
2.2.2 Гарячекатаний метал	29
2.3 Виробництво електротехнічних сталей та їх цілі	30
2.3.1 Генератори	30
2.3.2 Високо- і низьковольтна апаратура	31
2.3.3 Трансформатори	31
2.4 Обмотувальні дроти статора асинхронного двигуна	31

2.4.1 Класифікація дротів.....	34
2.4.2 Марки обмотувальних дротів.....	36
2.4.3 Вимоги до обмотувальних дротів.....	37
2.5 Ізоляція обмоток статора	38
2.5.1 Види ізоляційних матеріалів.....	39
2.6 Висновок до розділу 2	41
Розділ 3 Розрахункова частина.....	43
3.1 Основні параметри асинхронної машини загального призначення	43
3.2 Розрахунок втрат асинхронного двигуна за допомогою програмного забезпечення MathCad.....	43
3.2.1 Розрахунок робочих характеристик	45
3.2.2 Тепловий Розрахунок	56
3.3 Розрахунок втрат асинхронного двигуна при використанні сталей європейського зразка	58
3.4 Розрахунок втрат асинхронного двигуна при використанні вітчизняних сталей	59
3.5 Співставлення найбільш відповідних марок сталей.....	60
3.6 Розрахунок коефіцієнту корисної дії та $\cos\phi$ для європейських сталей	61
3.6.1 Моделювання магнітопроводу в програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics.....	65
3.7 Висновки до розділу 3	66
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	67
Перелік посилань	68

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

АМ – асинхронна машина ;

АД – асинхронний двигун ;

ЕД – електродвигун ;

ЕМ – електрична машина ;

ЕМП – електромагнітне поле ;

ЕТС – електротехнічна сталь ;

ЕРС – електрорушійна сила ;

ККД – коефіцієнт корисної дії ;

КТ – коефіцієнт трансформації ;

МП – магнітне поле ;

ЧС – частота струму .

ВСТУП

Електротехнічна сталь є важливим матеріалом в електротехнічній промисловості, зокрема при виробництві асинхронних двигунів. Завдяки своїм магнітним властивостям, ця сталь використовується для виготовлення осердь електричних машин, що суттєво впливає на їх ефективність та енергозбереження. В даному дослідженні розглядаються особливості використання електротехнічних сталей європейського зразка в українських асинхронних двигунах, а також їх переваги та вплив на продуктивність.

Актуальність цієї теми важко переоцінити, оскільки через ситуацію в країні виробництво української електротехнічної сталі різко зменшилось. Використання сталей європейського зразка може змінити ситуацію та допомогти виробникам вийти на попередній та навіть більший рівень виробництва. Це, у свою чергу, сприяє розвитку промисловості та економіки України в цілому.

Електротехнічні сталі, вироблені в Європі, відповідають високим стандартам якості. Основні виробники забезпечують високу чистоту матеріалу, однорідність структури та точність хімічного складу. Це дозволяє досягати оптимальних магнітних характеристик і знижувати втрати енергії в процесі експлуатації електричних машин.

Метою роботи є встановлення відповідності властивостей електротехнічних сталей вітчизняного та зарубіжного виробництва на прикладі розрахунку серійного асинхронного двигуна (серії АИ160М6У3).

Предметом дослідження слугують параметри магнітної системи асинхронного двигуна з кз ротором серійного виробництва при різних марках електротехнічної сталі.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН, ЇХ КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ.

Асинхронні мотори збуджуються змінним струмом і можуть бути безколекторними (основний тип) або колекторними. Безколекторні асинхронні мотори доступні у двох основних виконаннях: з короткозамкненим ротором та з фазним ротором (з контактними кільцями). Незалежно від типу, будь-який змінного струму мотор складається з двох частин: нерухомої частини (відомої як статор) і рухомої (обертової) частини (відомої як ротор).

Мотори змінного струму поділяються за числом фаз на трифазні, двофазні та однофазні. Позитивні характеристики асинхронних моторів включають простоту та вигідність, надійність у роботі, а також досить високий коефіцієнт корисної дії (ККД).

Однак у таких моторів є й недоліки: споживання індуктивного струму, який, магнетизуючи статор, призводить до зниження косинуса кута зсуву фаз мережі; неможливість плавного регулювання частоти обертання вала в широких межах (можна скористатися електронними засобами для регулювання частоти обертання вала мотора шляхом зміни частоти змінного струму, але це досить складно й дорого); погані пускові характеристики у моторів із короткозамкненим ротором.

1.1 Створення магнітного поля, що обертається.

Однією із переваг трифазного струму є його здатність створювати магнітне поле, що обертається. Нехай три однакові нерухомі котушки AX , BY , CZ розташовані на внутрішній поверхні сталевго циліндра (статора) і з'єднані зіркою (рис. 1.1).

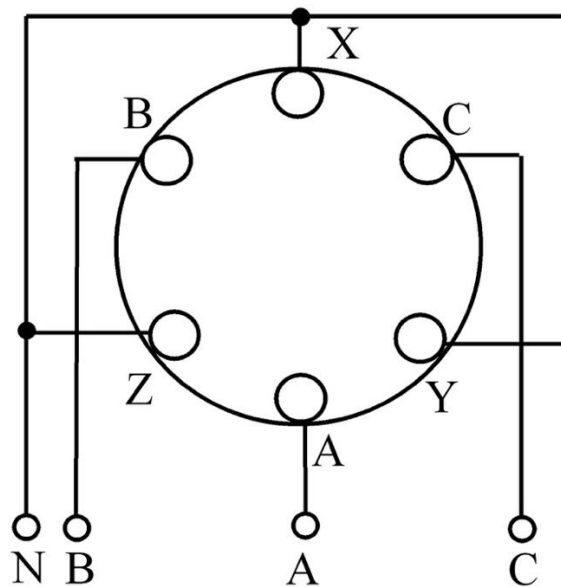


Рис. 1.1 – З'єднання обмоток статора "зіркою"

Струми трифазної системи протікають через котушки, графіки яких показані на рис. 1.2. Ми визначимо дійсні напрямки струмів у кожній котушці для деяких моментів часу а, б, в, г, д, е, ж, прийнявши вектор струму від початку до кінця котушки як позитивний. Наприклад, у момент (а) струм у другій котушці відсутній; струм у першій котушці має позитивний напрямок і тому на початку котушки (А) спрямований від спостерігача; струм у третій котушці має негативний напрямок і на початку котушки (С) спрямований до спостерігача.

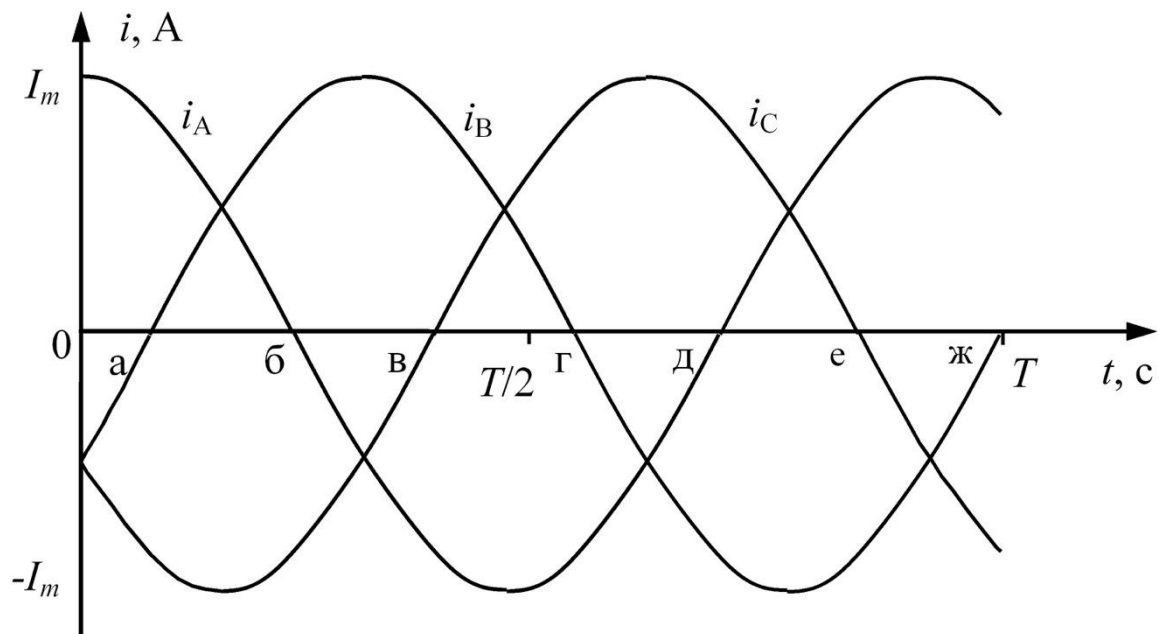


Рис. 1.2 – Струми обмоток статора при з'єднанні їх "зіркою"

Побудувавши лінії магнітної індукції для однаково спрямованих струмів в усі обрані моменти часу, можна побачити, що напрямок сумарного магнітного потоку змінюється.

Сумарний магнітний потік обертається за напрямком годинникової стрілки й здійснює одне обертання за період.

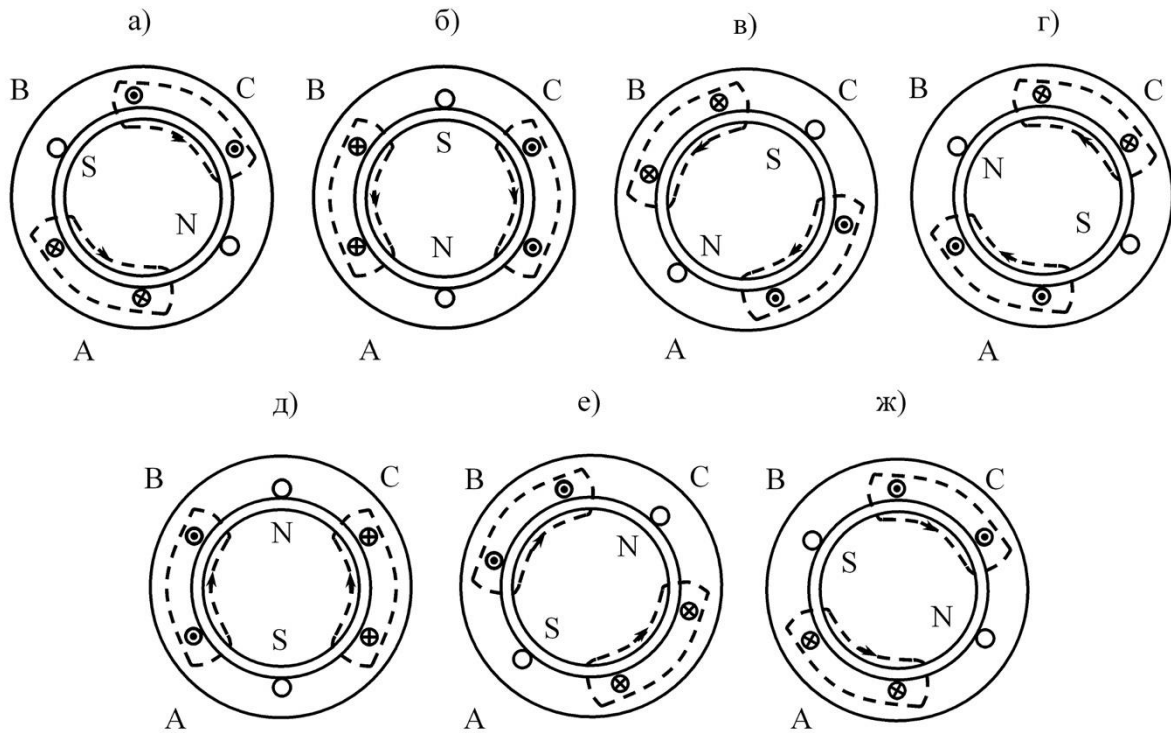


Рис. 1.3 – Створення магнітного поля, що обертається, у різні моменти часу

Якщо змінити порядок приєднання будь-яких двох котушок трифазної мережі, напрямок обертання магнітного поля зміниться на протилежний.

Отже, трифазний струм, що протікає через три котушки статора, зсунуті у просторі на кут 120° , створює постійне за величиною, але обертове магнітне поле. Протягом одного періоду магнітний потік робить одне обертання, а за f_1 періодів магнітний потік зробить n_1 обертів у секунду (або $f_1 \cdot 60$ періодів у хвилину):

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, [\text{об/хв}],$$

де n_1 – синхронна швидкість (швидкість обертання магнітного поля статора), [об/хв]; f_1 – частота струму в обмотці статора, [Гц]; p – число пар полюсів статора.

Швидкість обертання магнітного поля статора обернено пропорційна числу пар полюсів. Наприклад, при $f_1 = 50$ Гц, $p = 1$: $n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000$ об/хв; при $f_1 = 50$ Гц, $p = 2$: $n_1 = 1500$ об/хв.

1.2 Конструкція та принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна.

Трифазний асинхронний електродвигун складається з двох основних частин (рис. 1.4): ротора, що обертається, та статора, який залишається нерухомим. Зазор між ротором і статором робиться максимально малим, зазвичай 0,3-0,5 мм для двигунів малої потужності та 1-1,5 мм для потужніших двигунів. Це необхідно для покращення електромагнітного зв'язку між ротором і статором, що підвищує ефективність двигуна. Статор включає корпус 1, в який встановлене осердя з пазами 2, де розміщена трифазна обмотка. Кінці обмотки виведені в клемну коробку, що дозволяє підключати їх до живлення за схемою "зірка" або "трикутник". Максимальний обертальний момент двигун досягає при з'єднанні обмоток за схемою "трикутник". Ротор складається з осердя 3, насадженого на вал, та обмоток 4, які укладаються в пази осердя. Залежно від конструкції обмотки, ротори поділяються на короткозамкнені та з фазною обмоткою. Короткозамкнені ротори більш поширені: їхні обмотки утворюють клітку зі стрижнів, замкнених мідними або алюмінієвими кільцями на торцях, утворюючи "біляче колесо" (рис. 1.5, а). Фазний ротор (рис. 1.5, б) має трифазні обмотки, кінці яких з'єднані, а початки приєднані до ізольованих мідних кілець на валу. Щітки притискаються до цих кілець, що дозволяє розмикати коло ротора, замикати його накоротко і підключати пусковий реостат. Деякі двигуни з пусковим реостатом обладнані пристроями для підйому щіток та автоматичного замикання обмоток ротора після запуску, що зменшує знос і втрати на тертя.

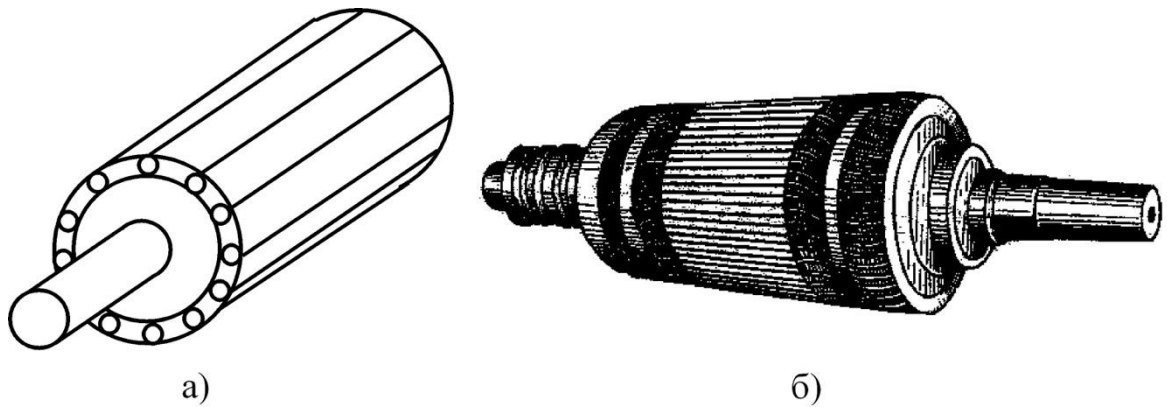


Рис. 1.5 – Конструкція роторів трифазних асинхронних двигунів:

а – короткозамкненого, б – фазного

Принцип дії трифазного асинхронного електродвигуна ґрунтується на обертовому магнітному полі (рис. 1.6).

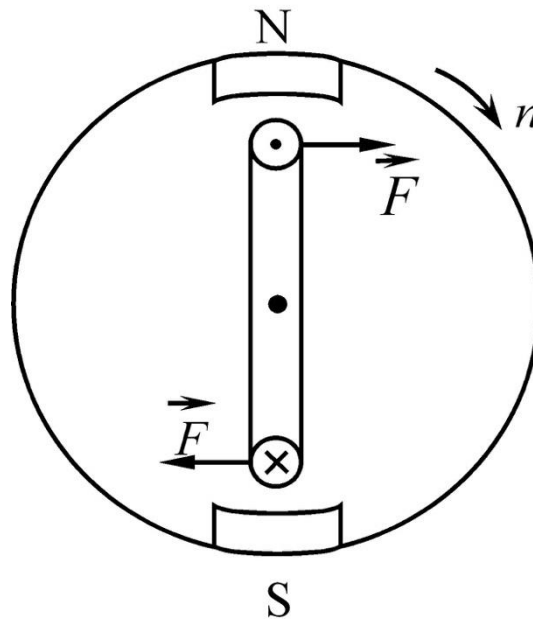


Рис. 1.6 – Принцип дії трифазного асинхронного двигуна

Обертове магнітне поле статора перехресщує провідники обмотки ротора, що наводить у них електрорушійну силу (ЕРС). Оскільки провідники замкнуті, в них з'являється струм. Цей струм створює власне магнітне поле в обмотці ротора, яке взаємодіє з обертовим магнітним полем статора, змушуючи ротор обертатися слідом за цим полем. Коли швидкість обертання ротора збільшується, зменшується швидкість перетинання провідників ротора магнітними лініями поля статора. Якби ротор обертася з тією ж швидкістю, що й магнітне поле

статора, перетинання провідників не відбувалося б, і струм у роторі зник би. Однак за відсутності струму в роторі не було б і обертального моменту. Тому, через наявність гальмівного моменту, магнітне поле і ротор не можуть обертатися з однаковою швидкістю (синхронно). Швидкість обертання ротора завжди менша за швидкість обертання магнітного поля статора. Через це такі двигуни називаються "асинхронними" (несинхронними).

1.3 Українські виробники електричних машин.

Українська електротехнічна галузь має багату історію та пропонує широкий асортимент електричних двигунів, які відповідають міжнародним стандартам якості та ефективності. Виробництво електродвигунів в Україні здійснюється із застосуванням передових технологій та високоякісних матеріалів. Нижче наведено декілька прикладів українських виробників електричних двигунів та їх продукції:

- ВАТ "Електроважмаш" (м. Харків)

Завод «Електроважмаш» є провідним державним підприємством України, що спеціалізується на розробці та виробництві турбо- і гідрогенераторів і електричних машин постійного струму для різних галузей економіки. Це найбільший в Україні постачальник комплексного електрообладнання для залізничного і міського електротранспорту.

Завод «Електроважмаш» відіграє ключову роль у забезпеченні енергетичної системи України, входячи до числа стратегічно важливих для економіки та безпеки країни підприємств. Турбогенератори виробництва заводу становлять 73% потужностей теплових електростанцій (ТЕС) України, а гідрогенератори – 78% встановленої потужності гідроелектростанцій (ГЕС). Станом на 2010 рік завод виготовив електрообладнання для понад 40 тисяч вантажних, пасажирських і маневрових тепловозів, що працюють не тільки в Україні, але й в інших країнах.

Підприємство випускає широкий спектр електричних машин, включаючи тягові електродвигуни, генератори та двигуни постійного і змінного струму для різних галузей промисловості, особливо для залізничного транспорту. Прикладом продукції є тягові електродвигуни серії ДТ-73, які використовуються в електровозах і відомі своєю надійністю та довговічністю.

- АТ "Завод "Южкабель" (м. Харків)

Завод випускає електродвигуни для промислового використання, включаючи асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, а також спеціальні двигуни для експлуатації у вибухонебезпечних середовищах.

Наприклад, асинхронні двигуни серії АІР широко використовуються в різних промислових установках завдяки своїй ефективності та надійності. Ці загальнопромислові електродвигуни з короткозамкненим ротором призначені для роботи від мережі трифазного змінного струму з частотою 50 Гц і 60 Гц.

Лінійка двигунів серії АІР включає типорозміри 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400 і 450, з кількістю полюсів 2, 4, 6, 8 і 10. Установчо-приєднувальні розміри та технічні характеристики електродвигунів зазначені в каталозі.

Кліматичні умови експлуатації електродвигунів визначені технічними умовами підприємства для виробів типу У, УХЛ і Т. При перевищенні температури навколишнього середовища понад +40 °С номінальна потужність електродвигунів знижується на 5 % за кожні додаткові 5 °С. Максимальна допустима температура навколишнього середовища для експлуатації становить 60 °С. Номінальна потужність забезпечується при тривалому режимі роботи при температурі 40 °С і висоті до 1000 м над рівнем моря. Двигуни здатні працювати і на висоті до 4300 м над рівнем моря, але з пониженням потужності.

Електродвигуни серії АІР виробляються у чавунному корпусі з рівнем захисту IP55 за ДСТУ EN 60034-5:2015 (вентилятор - IP20). Вони оснащені термісторами РТС для захисту статора від перегріву або, за погодженням із

замовником, можуть бути оснащені датчиками РТ-100 для захисту статора і підшипникових вузлів.

Двигуни мають ізоляційну систему класу нагрівостійкості F (температурний індекс 155 °C). Перевищення температури обмоток статора над температурою навколишнього середовища для двигунів з сервіс-фактором 1,15 – не більше 83 °C, для двигунів з сервіс-фактором 1,1 – не більше 90 °C. За погодженням із замовником двигуни можуть бути виготовлені з класом нагрівостійкості H.

Монтажні виконання двигунів відповідають ДСТУ EN 60034-7:2015:

1. на лапах – IM1081 (B3) для двигунів до 250 габариту включно, IM1001 (B3) для двигунів від 280 габариту включно;
2. на лапах з фланцем – IM2081 (B35) для двигунів до 250 габариту включно, IM2001 (B35) для двигунів від 280 габариту включно;
3. без лап з фланцем – IM3081 (B5) для двигунів до 250 габариту включно, IM3001 (B5) для двигунів від 280 габариту включно. Електродвигуни допускають як правий, так і лівий напрямок обертання. Зміна напрямку обертання повинна здійснюватися лише зі стану спокою ротора. Двигуни відповідають групі умов експлуатації М6, з вібраційними навантаженнями, що відповідають ступеню жорсткості 10a (частотний діапазон 1-100 Гц, максимальне прискорення 1 g за ГОСТ 17516.1-90).

- ПАТ "Сумський завод "Насосенергомаш" (м. Суми)

Завод є провідним виробником насосного обладнання, яке використовується для видобутку та транспортування нафти і нафтопродуктів, а також у тепловій та атомній енергетиці, житлово-комунальному господарстві, системах водопостачання та водовідведення. Завод оснащений сучасною конструкторською базою, передовим технологічним обладнанням та випробувальними стендами. Загальна площа підприємства становить 116 993 м², з яких 100 780 м² займають виробничі приміщення.

Завод виробляє електродвигуни для насосів і компресорів, що застосовуються в нафтогазовій, хімічній та енергетичній промисловості. Особливо виділяються електродвигуни для насосів типу КМП, які характеризуються високою енергоефективністю та стійкістю до агресивних середовищ.

- ТОВ "Запорізький електромашинобудівний завод" (м. Запоріжжя)

Завод випускає двигуни для металургійної та гірничодобувної промисловості, включаючи спеціальні двигуни для прокатних станів і підйомного обладнання. Двигуни серії ДАЗО, що застосовуються в металургійних станах, забезпечують високу продуктивність і надійність в умовах важких експлуатаційних навантажень.

Високовольтні електродвигуни серій А4 і ДАЗО призначені для приводу механізмів, які не потребують регулювання частоти обертання. Вони працюють від мережі змінного струму частотою 50 Гц з напругою 3000 В, 6000 В і 10000 В. Електродвигуни серій А4 і ДАЗО з напругою 3000 В розробляються в габаритах двигунів з напругою 6000 В, зберігаючи потужність, проте струм статора в них удвічі більший.

Електродвигуни серій ДАЗО і А4 з напругою 3000 В і 6000 В випускаються у кліматичному виконанні УЗ і ТЗ, а з напругою 10000 В – у кліматичному виконанні УЗ.

- ПАТ "Укрелектроапарат" (м. Хмельницький)

На підприємстві налагоджено повний технологічний цикл виробництва електротехнічної продукції, який включає металообробку, виготовлення металоконструкцій і завершуючи випуском готових до реалізації трансформаторів та комплектних трансформаторних підстанцій потужністю від 10 до 4000 кВ·А. Також виробляються сухі трансформатори, реактори для електровозів і електропоїздів, спеціальні трансформатори малої потужності, камери збірні та щити одностороннього обслуговування, газорегуляторні пункти та інша продукція.

Завдяки міжнародній співпраці підприємство може виробляти обладнання з покращеними характеристиками, використовуючи комплектуючі від провідних світових компаній. Сучасна виробнича база, передові технології та високий технічний рівень організації виробництва дозволяють освоювати нові види продукції, вдосконалювати процес виробництва трансформаторів, розширювати їх асортимент та сфери застосування.

Підприємство спеціалізується на виробництві електродвигунів для різних галузей промисловості, зокрема для харчової та деревообробної промисловості. Асинхронні двигуни серії 4А відзначаються надійністю та високою енергоефективністю і широко використовуються в промисловому обладнанні. Це трифазні двигуни з короткозамкнутим ротором, охоплюють потужності від 0,06 до 400 кВт, з частотою 50 Гц. Вони мають типи виконання з захистом IP44 або IP23. Ці двигуни, розроблені ще в радянські часи, відомі своїм міцним корпусом, товстими мідними обмотками та великим сервіс-фактором.

1.3.1 Властивості та переваги вітчизняних електродвигунів

Завдяки використанню високоякісних матеріалів та сучасних технологій, українські електродвигуни забезпечують високу енергоефективність, що дозволяє знижувати витрати на електроенергію. Виробники приділяють значну увагу якості продукції, що гарантує довговічність та стабільну роботу електродвигунів навіть у важких умовах експлуатації. Відповідність міжнародним стандартам робить українські електродвигуни конкурентоспроможними на світовому ринку. Широкий асортимент електродвигунів, пропонований українськими виробниками, дозволяє задовольнити потреби різних галузей промисловості, що забезпечує індивідуальний підхід до кожного клієнта. Українські електродвигуни відомі своєю високою якістю та надійністю, і вони активно використовуються в різних промислових сферах як в Україні, так і за її межами.

1.4 Європейські виробники електродвигунів.

Європейські електродвигуни відзначаються високою якістю, інноваційними технологіями та відповідністю міжнародним стандартам. Виробники з Європи пропонують широкий спектр двигунів для різноманітних галузей промисловості. Нижче наведено детальний огляд продукції деяких провідних європейських виробників електродвигунів та їхніх продуктів.

1.4.1 Провідні виробники та їх асинхронні машини

- Siemens AG (Німеччина)

Серед компаній у сфері електротехніки, електроніки, енергетики та інших галузей, Siemens, другий у світі та найбільший у Європі, відомий своїми інноваційними технологіями та високою якістю продукції. Заснована в Німеччині, ця компанія має штаб-квартири в Берліні та Мюнхені. У 2011 році Forbes визнав Siemens 50-м серед найбільших публічних компаній світу.

Спектр продукції Siemens включає різноманітні електричні двигуни, такі як асинхронні, синхронні, серводвигуни та спеціальні моделі для різних промислових потреб. Наприклад, асинхронні двигуни з серії SIMOTICS GP відомі своєю ефективністю та надійністю, і застосовуються у промислових установках, транспорті та будівельній техніці.

Серія двигунів 1LE1 вирізняється компактним дизайном, що досягнуто завдяки використанню передових технологій. Матеріали високої провідності у роторі мінімізують втрати енергії, забезпечуючи оптимальну ефективність. Конструкція 1LE1 також максимізує гнучкість та спрощує монтаж за рахунок інтегрованих елементів, таких як рим-болти, лапи та поворотні клемні коробки.

Електродвигуни з алюмінієвим корпусом, такі як SIMOTICS GP 1LE1/1PC1, придатні для різних завдань у промисловому секторі. Їх легка вага робить їх ідеальними для вентиляційних систем, насосів та компресорів, а також для приводу конвеєрів та підйомно-транспортного обладнання.

- ABB Group (Швейцарія/Швеція)

ABB пропонує широкий асортимент електричних двигунів, включаючи асинхронні, синхронні, серводвигуни та високооборотні моделі, призначені для різних промислових потреб. Наприклад, асинхронні двигуни з серії M2QA, які широко використовуються у насосах, вентиляторах, компресорах та іншому обладнанні.

Серія M2QA є основною лінійкою продуктів у серії 2000 від ABB та відповідає європейським стандартам ефективності класу. Ці двигуни розроблені та виготовлені відповідно до таких стандартів, як IEC 60034, IEC 60072, DIN 42673, BS 4999, GB 755, GB 10069 та Q/JBQS 27. Мотори з серії M2QA мають високі електричні та механічні характеристики, забезпечуючи значну ефективність.

Двигуни серії M2QA від 1,1 кВт до 90 кВт з 2 полюсами або 4 полюсами призначені для тривалої роботи за стандартною системою S1. Ця серія відповідає стандарту ефективності CEMEP-EU рівня II, що гарантує значну економію енергії. Їх можна використовувати при широкому діапазоні напруги до 690 В і для роботи на частотах 50 Гц і 60 Гц.

Для забезпечення тривалого терміну служби обмотки двигунів, використовуються нові імпортовані ізоляційні матеріали, які дозволяють досягти рівня ізоляції класу F (при підвищенні температури В-80К). Крім того, конструкція двигунів спроектована таким чином, щоб вони могли протистояти корозії навколишнього середовища, що забезпечує їх довге функціонування.

- WEG Electric Motors (Бразилія/Європейські підрозділи)

Компанія спеціалізується на розробці та виробництві електричних машин, приводної та редукторної техніки, а також електрощитового обладнання. Компанія представлена у більш ніж 120 країнах світу, має 52 виробничі підприємства та налічує понад 40 000 співробітників. Штаб-квартира WEG знаходиться у Бразилії.

Вони виробляють асинхронні двигуни, синхронні двигуни, серводвигуни та двигуни для вибухонебезпечних середовищ. Наприклад, асинхронні двигуни

серії W22, які відзначаються високою енергоефективністю та надійністю, застосовуються в промислових і комерційних сферах.

Двигуни WEG мають корпус з чавуну FC-200, що забезпечує максимальну зносостійкість і опір агресивному середовищу. Охолоджуючі ребра спроектовані для мінімізації скупчення вологи і пилу на двигуні, а цільні лапи забезпечують максимальну міцність і спрощують процес монтажу. Підшипникові щити з приводного боку мають ребра для кращого тепловідведення і зниження температури підшипників, що дозволяє збільшити інтервал зміни мастила. У підшипникових щитах передбачені отвори для відведення вологи, яка може конденсуватися всередині корпусу, і вони закриті гумовими зливними пробками. Кожух вентилятора виготовлений з чавуну і має аеродинамічні характеристики для зниження рівня шуму і оптимізації теплообміну.

Вал стандартних двигунів виконаний зі сталі і має відкритий шпонковий паз та різьбовий центровий отвір. Для компенсації осьового зсуву застосовують попередньо навантажені шайби. Ущільнення вала використовує ущільнення WSeal®, що складається з V-образних кілець ущільнювачів з двома крайками і металевого кільця. Ці двигуни можуть витримувати перевантаження у 1,5 рази вище номінального крутного моменту протягом 2 хвилин.

- **Leroy-Somer (Франція)**

Leroy-Somer (LS) - це французька компанія з двома основними підрозділами: "Електричні генератори", яка виготовляє генератори змінного струму від 10 до 25 МВт, і "Двигуни та приводи", яка спеціалізується на виробництві спеціальних електродвигунів, мотор-редукторів та приводів для різних умов експлуатації, таких як високі температури, підвищена вологість, робота з перетворювачами частоти, без незалежного охолодження та інші. У компанії є 27 виробничих підрозділів і 470 центрів експертизи та сервісного обслуговування.

Leroy-Somer, яка є частиною Nidec Corporation, виробляє асинхронні двигуни, серводвигуни, синхронні двигуни та генератори. Асинхронні двигуни

серії IMfinity від LS, які відзначаються високою енергоефективністю та надійністю, використовуються у різних галузях промисловості.

Двигуни нової конструкції IMfinity® були розроблені для максимальної ефективності і можуть працювати з основними параметрами напруги і частоти, що застосовуються у більшості електроенергії, що генерується в світі. Вони відповідають класам енергоефективності ie2, ie3, ie4.

- SEW-Eurodrive (Німеччина)

Німецький міжнародний концерн електроприводної техніки, який є одним з гігантів у цій галузі на світовому ринку. Süddeutsche Elektromotoren Werke (SEW) заснована у 1931 році і й досі залишається родинним бізнесом. Головний офіс компанії знаходиться у місті Брухзаль, Німеччина. У SEW-Eurodrive працює понад 18000 співробітників по всьому світу, а річний оборот перевищує 3 млрд євро. Компанія має офіси в понад 430 місцях світу, включаючи 16 виробничих підприємств і 80 складальних центрів у понад 50 країнах.

SEW-Eurodrive спеціалізується на приводних технологіях, таких як асинхронні та серводвигуни, а також спеціальні двигуни для промислових застосувань. Асинхронні двигуни серії DRN використовуються у конвеєрах, підйомниках і транспортних системах через свою ефективність та надійність.

Нові двигуни відповідають всім головним світовим стандартам, таким як IEC 60034, NEMA MG1, UL 1004-1, CSA C22.2-100, ABNT 17094-1 і GB 12350 (CCC). Вони також відповідають майбутнім нормам енергозбереження, будь то в Європі, Індії, Бразилії, США, Канаді, Китаї чи інших країнах.

1.4.2 Ефективність та продуктивність закордонних електричних машин

Європейські електродвигуни створюються з фокусом на високу енергоефективність, сприяючи зниженню витрат та негативного впливу на довкілля. Використання високоякісних матеріалів та передових технологій гарантує тривалу роботу двигунів під великими навантаженнями. Європейські виробники активно впроваджують новітні інновації для підвищення

продуктивності та ефективності своїх двигунів. Усі електродвигуни відповідають міжнародним стандартам безпеки та якості, що забезпечує їхню надійність. Ці двигуни широко використовуються у виробництві, транспорті, енергетиці, будівництві та інших галузях промисловості, завдяки їхній відмінній якості та надійності.

1.5 Висновок до розділу 1

У цьому розділі розглядаються асинхронні двигуни змінного струму широко використовуються завдяки своїм перевагам, таким як простота конструкції, надійність і висока енергоефективність. Основні типи таких двигунів включають безколекторні (основний тип) та колекторні, з двома основними виконаннями: двигуни із короткозамкненим ротором та двигуни із фазним ротором. Конструкція асинхронного двигуна складається зі статора (нерухома частина) і ротора (обертова частина). Статор створює обертове магнітне поле за допомогою трифазного струму, яке індукуює струм у роторі, змушуючи його обертатися. Однак асинхронні двигуни мають і недоліки, такі як споживання індуктивного струму, що знижує коефіцієнт потужності мережі, і обмеження в регулюванні частоти обертання вала. Українські та європейські електродвигуни мають високу якість та енергоефективність завдяки використанню сучасних технологій і матеріалів. Вони відповідають міжнародним стандартам і є конкурентоспроможними на світовому ринку. Виробники пропонують широкий вибір моделей для різних галузей промисловості, забезпечуючи надійність і довговічність роботи двигунів. Таким чином, асинхронні двигуни залишаються важливим компонентом у промисловості завдяки своїм технічним характеристикам, доступності та ефективності, що робить їх придатними для широкого спектра застосувань.

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД НАЯВНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ТА РОЗРАХУНКУ ВТАР ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ СТАЛІ.

2.1 Електротехнічна сталь: види, властивості та застосування

Електротехнічна сталь (ЕТС) відноситься до групи феромагнітних сплавів, спеціально налаштованих для визначених магнітних властивостей. Це специфічний тип чорних металів, який включає тонколистову сталь з високою магнітною м'якістю, що містить підвищений рівень кремнію (від 0,8% до 5%). Вміст кремнію впливає на магнітні характеристики матеріалу. Вітчизняні види ЕТС розрізняються за вмістом кремнію, методом виробництва, а також магнітними та електричними властивостями. Їх класифікація представлена у вигляді числових кодів з 4-5 цифр і можливою додатковою комбінацією з 1-2 букв. Наприклад, можна розглянути маркування M110-23S. Кожен символ має своє значення:

Таблиця 2.1 - Класифікація представлена у вигляді числових кодів з 4-5 цифр

Цифра	Значення	Примітка
1	Вид прокатки	Тип сталі
2	Група сталі в залежності від %Si	
3	Вид металу з базовими характеристиками магнітних властивостей	
4	Ступінь основних нормативних властивостей: - Нормальна - Підвищена - Висока - >4-вищі рівні	Крім релейних нелегованих ізотопних сталей

2.1.1 Магнітна проникність

В різноманітних електричних пристроях широко використовується низьковуглецева електротехнічна сталь (ЕТС). Магнітна проникність (μ) визначає ступінь, до якої матеріал може відповідати магнітному полю при певній напруженості. У ЕТС μ висока, а коерцитивна сила, що показує ступінь магнітного насичення матеріалу, невелика. Додавання кремнію сприяє зменшенню вуглецю у сплаві, що призводить до підвищення магнітної проникності. Числове значення μ вказує на те, у скільки разів магнітна індукція перевищує магнітну константу. Велике значення характерне для крупнокристалічних структур, тоді як дрібнокристалічні матеріали мають менше значення. Сталь підсилює магнітне поле та визначає його напрямок. Температурний коефіцієнт магнітної проникності відображає, наскільки змінюється магнітна проникність матеріалу при зміні температури сплаву.



Рис. 2.1 – магнітний сердечник

2.1.2 Коерцитивна сила

Коефіцієнт коерцитивної сили визначає здатність електричного поля, згенерованого електричним струмом, до змагнічування. Це показник

напруженості магнітного поля на петлі гістерезису, коли індукція в матеріалі зводиться до мінімуму. Вимірюється в амперах на метр. У випадку електротехнічної сталі (ЕТС) як коерцитивна сила, так і втрати на гістерезис є невеликими. Інтенсивність змагнічування залежить від типу пристроїв. Додавання кремнію до ЕТС підвищує її специфічний опір і зменшує втрати на гістерезис, що призводить до зниження коерцитивної сили. Якщо співвідношення $Si \geq 5\%$, то спостерігається різке збільшення твердості та крихкості, що робить трансформаторну сталь несумісною з процесом штампування.

2.1.3 Питомий електричний опір

Цей параметр описує здатність матеріалу ставити опір перед проходженням електричного струму. Його вплив безпосередньо залежить від вмісту кремнію у матеріалі - цей елемент впливає на стійкість сталі до старіння. Опір зростає із збільшенням температури. Чим більше кремнію у складі, тим вище середнє значення R і менше втрати на вихрові струми. Використання електротехнічної сталі дозволяє сконцентрувати електричну напругу всередині провідника і забезпечити направлену доставку електричних зарядів до кінцевої точки розподілу. Це робить електротехнічну сталь ідеальним матеріалом для виготовлення основних компонентів електродвигунів, які працюють на частоті до 20 000 Гц.

2.2 Види електротехнічної сталі

Електротехнічна сталь доступна як з захищеним верхнім шаром, так і з ізоляційним покриттям. Хоча точного хімічного складу, що визначає її властивості, немає, масова частка основного елемента - кремнію (Si) або сполук $Si + Al$ (на рівні 0,5%) - розподіляє її на категорії:

Трансформаторна - з вмістом 3,0-4,5% легуючих елементів;

Динамна - з вмістом 0,8-2,5% легуючих елементів. Ще одним фактором, що впливає на властивості матеріалів, є їх внутрішня структура та розмір зерен. Тут виявляється основна різниця між сплавами, що були оброблені холодно або гаряче. Термічна обробка та механічні впливи допомагають досягти потрібного

розміру зерна. Залежно від типу виробництва та магнітних характеристик, є такі типи:

Високопроникна трансформаторна сталь - з В800 (випрямленням відпалу) $\geq 1,90$ (Тл);

Сплави підвищеної проникності - $1,85 \text{ Тл} \leq \text{В800} \leq 1,89$ (Тл);

Сплави з обмеженою проникністю - $\text{В800} \leq 1,85$ (Тл.).

2.2.1 Холоднокатана ЕТС

Прокатка сталевих заготовок холодним методом вздовж осі підвищує магнітні та інші механічні властивості, поліпшує якість поверхні, але також призводить до подвоєння вартості металу порівняно з гарячим методом обробки. Текстурована холоднокатана електротехнічна сталь виготовляється у вигляді стрічок, змотаних у рулони. Завдяки вмісту кремнію (3,3%) та кристалографічній структурі, вона добре піддається штампуванню. Магнітна проникність (μ) цієї сталі вища, ніж у високотемпературного аналога. Залежно від термообробки та товщини листа (від 0,5 до 3,9 мм), ступеня його обтиску, ЕТС поділяється на різні категорії. На ринку існують два типи металопродукту цієї специфікації:

ЕТС ізотропна тонколистова (динамна), яка відповідає стандартам ГОСТ 21427.2 та EN 10106. Це марки 2011-2013, 2111, 2112, 2211-2216, 2312, 2411-2414, 2421.

Анізотропна тонколистова сталь електротехнічна трансформаторна, яка регулюється ГОСТ 21427.1.

2.2.2 Гарячекатаний метал

Гаряча прокатка створює в структурі сталі безладну орієнтацію зерен, що формує незалежні магнітні властивості, незалежні від вектора. Кількість кремнію в гарячекатаній ЕТС залежить від стандартів. Ізотропний метал містить 4,5% Si. Повторне деформування на прокатному стані листів товщиною від 2,0 до 3,9 мм включно збільшує їх обтискування й створює текстурований продукт з підвищеним магнетизмом. Порівняно з холодною термообробкою, тут менше виражається ефект насичення, а кут нахилу похилих ділянок головної кривої намагнічування більший. Тому гарячекатана сталь застосовується у

ферорезонансних стабілізаторах як матеріал для насичуваного сердечника, де не потрібні суворі вимоги до якості стабілізації і ваги. ЕТС має високу магнітну проникність та мінімальні втрати в змінному магнітному полі. Вимірювання магнітної індукції проводяться в ЕМП і виражаються в Тл або Гс. Завдяки відносно невеликій магнітній індукції, електротехнічна сталь використовується для виготовлення потужних (понад 400 кВт) установок, забезпечуючи їм мінімальні магнітні втрати. При потужностях 20-40 кВт домінує магнітна індукція з помірними питомими магнітними втратами.

2.3 Виробництво електротехнічних сталей та їх цілі

Метал виплавляють у мартенівських або дугових електричних печах за методом повного окислення. Після цього отримуються злитки або сляби при безперервному розливанні. Трансформаторна сталь містить домішки у межах 3-4,5% і доступна у вигляді рулонів, стрічок або листів зі стандартною товщиною. Листи можуть бути катані у холодному або гарячому стані. Крем'янистий сплав отримують шляхом електрошлакового переплаву. У виробництві електромашин використовуються три види матеріалів: конструкційні, ізоляційні і активні. Тонколистова електротехнічна сталь є незамінним активним матеріалом для будь-якої електричної машини. Крем'яністе залізо застосовується в електромагнітах, пружинах, підвісках, ресорах, торсійних валах, стрічкових сердечниках, магнітних ланцюгах на частотах 50-400 Гц. Профілі з релейного сплаву та листова електротехнічна сталь популярні для магнітопроводів у пристроях з принципом "включити/відключити".

2.3.1 Генератори

Перетворювачі механічної енергії на електричну працюють за допомогою електромагнітної індукції, отриманої від зовнішнього джерела. Якість сердечників з листової електротехнічної сталі має прямий вплив на їх магнітні властивості. Використання сердечника з листової електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм допомагає зменшити магнітне розсіювання додаткових

полюсів та послабити реакцію якоря на розмагнічування. Для головних полюсів застосовується анізотропний холоднокатаний метал марки 3411 товщиною 1 мм.

2.3.2 Високо- і низьковольтна апаратура

Прилади, які можуть працювати під високою (понад 1 кВ) та низькою (до 1 кВ) напругою, використовуються для виконання операцій з тестування електрообладнання та проведення вимірювань в промисловій енергетиці та енергопостачанні різних об'єктів. Популярність використання електротехнічної сталі з низьким рівнем магнітних втрат обумовлена зростанням вимог до надійності, безпеки та якості обладнання. Оскільки аморфна електротехнічна сталь допомагає значно зменшити витоки в розподільних мережах, то в логіці речей, втрати у холостому ході мінімізуються у однофазних розподільних трансформаторах з таким сердечником.

2.3.3 Трансформатори

Статичні електромагнітні системи призначені для трансформації напруги та струму наявних параметрів у задані величини. Ці пристрої мають різні функціональні призначення. Для трансформаторів використовується нержавіюча, електротехнічна сталь з високим коефіцієнтом магнітної проникності. Це призводить до підвищення питомого електричного опору та зменшення втрат потужності, які спричиняються вихровими струмами та впливають на сердечник трансформатора. У результаті, при мінімальному нагріванні сердечника ефективність роботи системи збільшується. Використання текстурованої сталі у потужних агрегатах: зменшує витрати металу до 20%; знижує втрати енергії на 1/3; зменшує масу системи на 10%.

2.4 Обмотувальні дроти статора асинхронного двигуна

Якщо поглянути на обмотку статора асинхронного електродвигуна, то легко виявити, що вона аж ніяк не просто три покладені під 120 градусів одиночні котушки. На кожен фазу трифазної обмотки припадає зазвичай по

кілька секцій. Ці секції віддалено нагадують секції обмотки ротора колекторного двигуна, проте в асинхронному двигуні вони виконують зовсім інші функції.

Така секція займає на статорі щонайменше два пази. Але секцію в принципі можна розбити ще навпіл — ось уже чотири пази. Тоді дві частини секції необхідно буде з'єднати послідовно, щоб ЕРС у них підсумовувалися.

Оскільки весь набір ізольованих один від одного проводів у секції (або умовно - у частині секції) укладається в один паз, то і позначити на схемі пучок проводів можна у вигляді одного витка, навіть якщо витків в одному пазі лежить кілька. Активні провідники кожної секції можуть укладатися в пази одним шаром або двома шарами, як на роторі колекторного двигуна.



Рис. 2.2 - Статор із обмотками трифазного асинхронного двигуна

Допустимо, трифазний асинхронний двигун має одну пару полюсів ($2p=2$). Тоді для кожної фази обмотки на кожен полюс буде припадати кілька пазів статора: як правило від 1 до 5 (q). У процесі проектування машини вибирають найбільш потрібне значення цього числа q . В результаті загальна кількість пазів буде рівна - число полюсів * число фаз * пазів на полюс фази ($Z = 2pmq$).

Наприклад є: одна пара полюсів, три фази, два пази на полюс фази. Отже, загальна кількість пазів: $Z = 2 * 3 * 2 = 12$ пазів. На малюнку нижче наведена

саме така обмотка, де на кожен фазу припадає по 4 секції, причому кожна секція складається з двох частин (по дві котушки в частині) - кожна частина знаходиться у сфері дії свого полюса (у двох полюсних поділах тау, один полюсний поділ - 180 градусів, всі пази - 360 градусів).

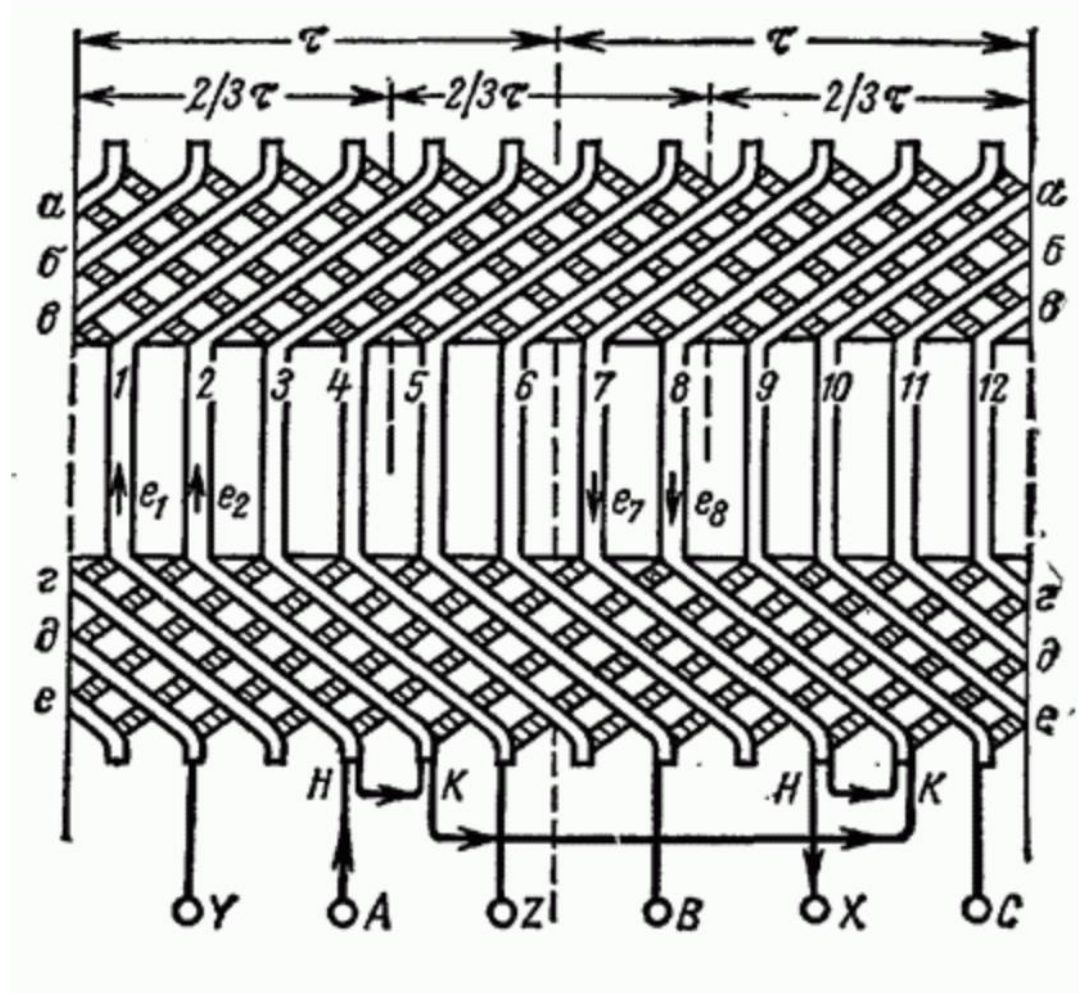


Рис. 2.3 - Обмотка асинхронного двигуна

Пази поділяються по фазах так: нехай у двигуна два пази на полюс на фазу, тоді на першому полюсному поділі для фази А передбачаються пази 1 і 2, а на другому полюсному поділі - 7 і 8, оскільки $Z/2 = 6$ і $\tau_u = 6$ зубців.

Друга фаза (В) зсунута щодо першої в просторі на 120 градусів або на $2/3 \tau_u$, тобто на 4 зубці, і означає займає пази 5 і 6 на першому полюсному поділі і пази 11 і 12 - на другому полюсному поділу.

І нарешті третя фаза (З) розташовується в пазах 8 і 9 другого полюсного поділу і в пазах 3 і 4 першого полюсного поділу. Розмітка обмотки завжди ведеться із зовнішнього шару активних провідників.

Як ви вже зрозуміли, з метою складання ЕРС кожної фази, секції всередині котушок з'єднують послідовно, а самі котушки (у протилежних полюсних поділах) зустрічно: кінець першої з кінцем другої. До трифазної мережі обмотки статора традиційно приєднуються за однією із двох схем: зірка або трикутник. Трикутник – для 220 вольт, зірка – для 380 вольт.

На малюнку показано статор без обмотки. Статор встановлюється в алюмінієвий, чавунний або сталевий корпус двигуна шляхом запресування сердечника всередину. Сердечник тут набирається з окремих листів сталі, кожен із яких ізолюваний особливим електротехнічним лаком.

Зовні корпус має ребра, завдяки яким збільшується площа теплообміну з навколишнім повітрям і підвищується ефективність активного охолодження — пластмасовий вентилятор, насаджений на ротор ззаду (під задньою кришкою з перфорацією), обдуває ребра і таким чином охолоджує двигун у процесі його роботи, так оберігає обмотки від перегріву.

2.4.1 Класифікація дротів

Провідникові вироби можна класифікувати по ряду ознак. По призначенню розрізняють обмотувальні, монтажні, установочні дроти, а також силові, телефонні і радіочастотні кабелі. По матеріалу струмоведучої частини дроти і кабелі можна розділити на мідні, алюмінієві, сталеві, комбіновані. Кожен вид провідникових виробів можна класифікувати також по матеріалу ізоляції, нагрівостійкості, електричної міцності, гнучкості та т.ін.

Обмотувальні дроти можуть мати емалеву, емалево-волокнисту, волокнисту, плівкову й оксидну ізоляцію.

Монтажні дроти застосовують для з'єднання різних приладів і частин в електричних машинах і апаратах. Вони можуть мати покриття з електроізоляційної гуми або поліхлорвінілового пластикату, а також з бавовняної, шовкової або капронової пряжі і із синтетичних волокон.

Настановні дроти і шнури застосовують для розподілу електричної енергії, а також для приєднання до мережі електродвигунів, світильників і інших споживачів струму. Струмоведуча частина покривається електроізоляційною

гумою або поліхлорвініловим пластиком. Поверх ізоляції іноді накладають захисний покрив у виді оплітки з бавовняної або шовкової пряжі. У деяких дротів захисний покрив просочують протигнільним складом. Шнури випускають двожильними.

Силові кабелі служать для передачі електричної енергії. Вони можуть бути одножильними і багатожильними. Кожна жила ізолюється гумою, поліхлорвініловим пластиком або кабельним папером, просоченим складом з мінеральної олії і розчиненої в ній каніфолі. Ізольовані жили полягають в оболонку, що виготовлена зі свинцю, поліхлорвінілового пластику, світлостійкої гуми або алюмінію. Для захисту броньового покриття від корозії на нього накладають шар кабельного папера або пряжі, просоченої протигнільним бітумінозним складом. Ізоляція високовольтних кабелів просочується маслов'язкою легкорухомою олією, що знаходиться усередині кабелю під підвищеним тиском. Крім маслозаповнених кабелів, у високовольтній техніці знаходять застосування газонаповнені кабелі.

Обмотувальні дроти для перемотування та ремонту електродвигунів виготовляються круглого та прямокутного перерізів і залежно від матеріалу дроту (струмової жили), виду та способу накладання ізоляції поділяються на марки. Найбільш поширеними є обмотувальні дроти з мідним дротом.

Обмотувальні дроти виконуються з волокнистою, емалевою та комбінованою ізоляцією.

Матеріалами для волокнистої ізоляції обмотувальних проводів для перемотування електродвигунів є: папір (кабельний або телефонний), бавовняна пряжа; натуральний та штучний шовк - капрон, лавсан; азбестові та скляні волокна.

Ці матеріали можуть накладатися в один, два або кілька шарів, у вигляді обмотки та у вигляді обплетення (панчохи). статор електродвигуна ремонт. Основними матеріалами для емалевої ізоляції є: емаль на полівінілацеталевій основі (вініфлекс), емаль на поліаміднорезольному лаку, емаль на лаку металвін, поліуретанова емаль, емаль на основі поліефірів терефталевої кислоти, кремнійорганічна емаль.

Марки обмотувальних дротів мають умовні літерні позначення. Деякі марки після літерного позначення мають цифрові позначення 1 або 2. Цифра 1 вказує на нормальну товщину ізоляції обмотувального дроту, а цифра 2 - на посилену товщину.

2.4.2 Марки обмотувальних дротів

Позначення марок обмотувальних дротів починається з літери П (провід). Волокниста ізоляція має позначення: Б - бавовняна пряжа, Ш - натуральний шовк, ШК або К - штучний шовк - капрон, С - скловолокно, А - азбестове волокно, Про або Д - відповідно вказують на один або два шари ізоляції обмотувального дроту. Наприклад, марка ПБД позначає: обмотувальний провід, мідний, що має ізоляцію з двох шарів бавовняної пряжі.

Емалева ізоляція обмотувальних проводів має позначення: ЕЛ – емаль лакостійка, ЕВ – емаль високоміцна (вініфлекс), ЕТ – емаль теплостійка поліефірна, ЕВТЛ – емаль поліуретанова, ЕЛР – емаль поліаміднорезольна.

Наприклад, марка ПЕЛ позначає: провід обмотувальний мідний, покритий лакостійкою емаллю, ПЕВ-1 - провід обмотувальний мідний, ізольований одним шаром емалі вініфлекс, ПЕТВ - провід обмотувальний мідний, ізольований емаллю на основі поліефірів трефталевий ізольований кремнійорганічною емаллю, ПБ - провід обмотувальний мідний, ізольований кількома шарами кабельного паперу, ПБО - провід обмотувальний мідний, ізольований одним шаром бавовняної пряжі.

Комбінована ізоляція складається з емалевої ізоляції, поверх якої накладено ізоляцію з волокнистих матеріалів. Наприклад, марка ПЕЛБО позначає: провід обмотувальний мідний, покритий лакостійкою емаллю і потім бавовняною пряжею в один шар, ПЕЛШО - провід обмотувальний мідний, ізольований лакостійкою емаллю та одним шаром натурального шовку.

Марки обмотувальних проводів, ізольованих скловолокном і просочених у теплостійкому лаку, мають у своєму позначенні букву К. Наприклад, провід марки ПСДК.

2.4.3 Вимоги до обмотувальних дротів

Обмотковий провід має бути покритий рівномірним шаром ізоляції. Обплетення обмотувального дроту має бути накладено на провід щільними рядами, без ребристості, просвітів та потовщень. В окремих точках допускаються напливи емалі чи потовщення обплетення у межах допусків, встановлених кожної марки розміру проводу.

Обмотувальні дроти в залежності від марки та розмірів поставляються в котушках, барабанах та бухтах. Намотування дроту в котушках і барабанах має бути щільним і рівним, без переплутування витків. Кількість окремих відрізків обмотувального дроту в котушці, барабані або бухті строго обмежується залежно від марки та розмірів дроту.

Котушка та барабани з обмотувальним дротом повинні бути обгорнуті папером, що забезпечує збереження ізоляції дроту під час транспортування. Котушки повинні бути покладені в ящик. Гранична вага ящика з обмотувальним дротом – 80 кг. Провід у бухтах повинен бути перев'язаний і потім обгорнутий мішковиною, папером або рогожею.

До кожної котушки, барабана або бухти дроту повинен бути доданий ярлик із зазначенням найменування заводу-виробника, марки, розміру та ваги обмотувального дроту та інших характеризуючих даних.

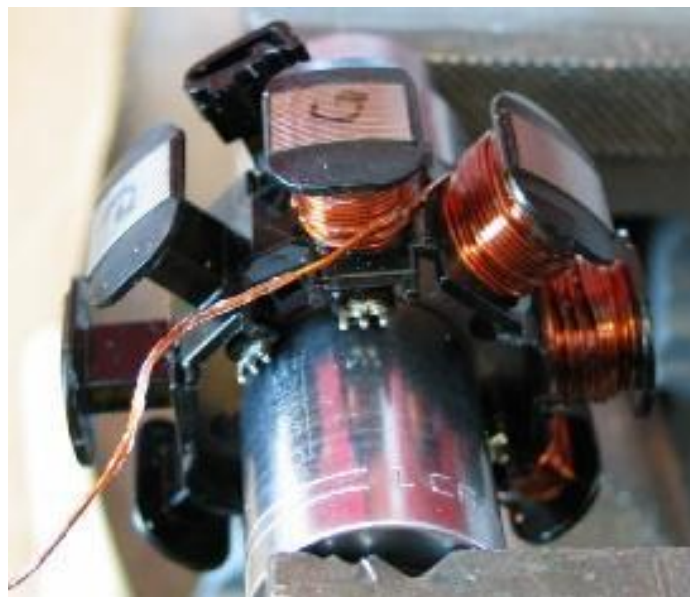


Рис. 2.5 - Обмотувальний провід для перемотування та ремонту електродвигунів

2.5 Ізоляція обмоток статора

Якість ізоляції електричних машин визначає їх надійність в експлуатації, тому вибору ізоляції та її виготовлення надають великого значення.

Основною вимогою до ізоляції є не лише її діелектрична міцність. Оскільки втрати, що розвиваються в міді, зазвичай відводяться через ізоляцію в навколишнє середовище, то нарівні з діелектричною міцністю і нагрівальностійкістю ізоляція повинна мати хорошу теплопровідність, що значною мірою досягається просоченням і компаундуванням.

Велике значення мають також механічна міцність, вологонепроникність, маслостійкість та інші властивості ізоляції.



Рис. 2.6 - Перемотування обмотки асинхронного електродвигуна

Є чотири основні області, в яких використовуються ізоляція:

Між провідниками (котушками) та землею (фаза – земля);

Між провідниками (котушками) різних фаз (фаза – фаза);

Між витками однієї котушки;

Між котушками однієї фази.

2.5.1 Види ізоляційних матеріалів

Ізоляційні матеріали для ізоляції обмоток статора електродвигунів доступні у різних формах та розмірах, у тому числі: стрічки, рулони, рукави, підкладки, папір та тканина.

Ізоляційні стрічки використовуються для покриття обмоток (котушок) у виступаючій частині сердечника. На це покриття нанесений шелак або лак для запобігання поглинанню вологи та підвищення діелектричної міцності. Стрічки продаються у рулонах необхідної довжини.

Доступні різні типи стрічок: бавовняна стрічка, ПВХ-стрічка, шовкова стрічка, поліефірна стрічка, азбестова стрічка, скловолоконна стрічка, тканинна стрічка, слюдяні стрічки.

Ізоляційні втулки використовуються для закриття зварних швів між кінцем котушки та висновками проводів. Це дає їм фізичний захист, а також покращує ізоляцію. Вони бувають як жорсткими, і гнучкими. Вони постачаються для стандартних розмірів дротів.

Ізоляційний папір: існує широкий вибір паперу, спеціально призначеного для ізоляції електричних кіл. У двигунах вони використовуються для ізоляції пазів статора та між котушками.



Рис. 2.7 - Паперова ізоляція при перемотуванні електродвигуна

Приклад сучасного ізоляційного матеріалу для електродвигунів: ізоляційний папір Nomex mylar nomex (NMN) - це м'який композитний матеріал, що складається з проміжного шару поліефірної плівки та паперу Nomex з обох боків, класом термостійкості F (155оC). Вона має хороші механічні властивості, такі як висока міцність на розрив, опір розриву кромки і хороший електричний опір.

Ізоляційні тканини: вони вставляють між котушками після того, як вони були вставлені в свої пази.

2.6 Висновок до розділу 2

У цьому розділі обговорюються основні положення та характеристики вітчизняних електротехнічних сталей (ЕТС). ЕТС належить до феромагнітних сплавів, спеціально адаптованих для досягнення певних магнітних властивостей. Це тонколистовий магніто-м'який чормет із підвищеним електромагнетизмом, частка кремнію в якому може варіюватися від 0,8% до 5%. Вміст кремнію значно впливає на магнітні властивості сталі.

ЕТС розрізняють за складом кремнію, способом виробництва, магнітними та електричними показниками. Маркування сталі складається з 4-5 цифр та можливих 1-2 букв. Наприклад, у маркуванні M110-23S кожен символ має своє значення, що вказує на вид прокатки, групу сталі залежно від вмісту кремнію, базові характеристики магнітних властивостей, а також ступінь основних нормативних властивостей.

Магнітна проникність (μ) у різних електричних агрегатах ЕТС висока, тоді як коерцитивна сила невелика. Кремній викликає знеуглецювання сплаву, що підвищує магнітну проникність. Магнітна проникність в числовому вираженні показує, у скільки разів абсолютний її показник перевищує магнітну константу, і більше значення притаманне крупнокристалічним структурам.

Коерцитивна сила характеризує здатність силового поля до розмагнічування, вимірюється в амперах на метр. У ЕТС коерцитивна сила, як і втрати на гістерезис, невеликі. Кремній збільшує питомий опір ЕТС і знижує втрати на гістерезис, що призводить до зменшення коерцитивної сили. Проте при вмісті $Si \geq 5\%$ спостерігається різке підвищення твердості й крихкості, що робить трансформаторне залізо непридатним для штампування.

Також розглядаються конструктивні особливості обмоток статора асинхронного двигуна. Обмотка складається з кількох секцій, кожна з яких виконує специфічні функції. Описано, як секції з'єднуються для забезпечення ефективної роботи двигуна. Згадується спосіб розташування проводів у пазах статора і методи підключення обмоток до трифазної мережі (за схемами "зірка" або "трикутник").

Окремо розглянуто обмотувальні проводи для перемотування та ремонту електродвигунів. Проводів може бути різний переріз (круглий чи прямокутний) і виготовлені вони з різних матеріалів з різними ізоляціями. Волокниста ізоляція може бути з паперу, бавовняної пряжі, натурального та штучного шовку, азбестових та скляних волокон. Емалева ізоляція може бути виконана з різних матеріалів, таких як полівінілацеталева основа, поліаміднорезольний лак, поліуретанова емаль тощо.

Комбінована ізоляція об'єднує емалеву та волокнисту ізоляції. Марки обмотувальних проводів мають літерні та цифрові позначення, що вказують на тип ізоляції та її товщину. Наприклад, ПЕЛБО означає провід обмотувальний мідний, покритий лакостійкою емаллю і бавовняною пряжею в один шар.

Таким чином, розділ детально висвітлює особливості вітчизняних електротехнічних сталей, їх класифікацію, маркування, фізичні властивості, а також конструкцію і матеріали для обмоток електродвигунів.

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОВА ЧАСТИНА

3.1 Основні параметри асинхронної машини загального призначення

У цьому розділі наведені технічні умови та розрахунки асинхронного трифазного двигуна з короткозамкненим ротором загального призначення, серії **АИ160М6УЗ**, що має наступні параметри:

Таблиця 3.1 - Основні параметри асинхронної машини загального призначення

Параметр	Одиниця виміру	Чисельна величина
Потужність на валу, P_2	кВт	15
Висота осі обертання, h	мм	160
Номінальна напруга, U	В	220/380
Кількість фаз, m	—	3
Синхронна частота обертання, n_1	об/хв	1500
Номінальне ковзання, S	%	2,6
Коефіцієнт корисної дії, η	%	88
Коефіцієнт потужності, $\cos\phi$	—	0,88
Кратність пускового моменту, $M_{п}$	—	1,2
Ступінь захисту	—	IP54
Режим роботи	—	S1
Система охолодження	—	IC0141
Конструктивне виконання	—	IM1081

3.2 Розрахунок втрат асинхронного двигуна за допомогою програмного забезпечення MathCad

Питома маса сталі, кг/м³

$$\gamma_c = 7.8 \cdot 10^3$$

Маса сталі ярма та зубців статора, кг

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a \cdot 10^{-3}) \cdot h_a \cdot 10^{-3} \cdot l_g \cdot k_c \cdot \gamma_c = \pi \cdot (0.272 - 22.3 \cdot 10^{-3}) \cdot 22.3 \cdot 10^{-3} \cdot 0.139 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 18.39731$$

$$m_{Z1} = h_{Z1} \cdot 10^{-3} \cdot b_{Z1} \cdot 10^{-3} \cdot Z_1 \cdot l_g \cdot k_c \cdot \gamma_c = 21.2 \cdot 10^{-3} \cdot 4.9 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 0.139 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 5.2439$$

Коефіцієнти, що враховують вплив на втрати в сталі нерівномірність розподілу потоку та технологічні чинники

$$k_{да} := 1.6$$

$$k_{дз} := 1.8$$

Питомі втрати в сталі, Вт/кг

$$p_{1,0/5,0} = 2.5$$

$$\beta = 1.5$$

Основні втрати в сталі, Вт

$$p_{ст.осн} = p_{1,0/5,0} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot (k_{да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{дз} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = 2.5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1.5} \cdot (1.6 \cdot 1.6127018363077634^2 \cdot 18.39731 + 1.8 \cdot 1.9^2 \cdot 5.2439) = 276.58$$

$$\beta_{02} = 0.37$$

$$\frac{b_{ш}}{\delta} = \frac{3.7}{0.5} = 7.4$$

Амплітуда пульсацій індукції в повітряному проміжку над коронками зубців ротора, Тл

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0.37 \cdot 1.2229932238728172 \cdot 0.75425629018752938 = 0.34$$

Коефіцієнт, що враховує вплив обробки поверхні зубців на питомі втрати

$$k_{02} = 1.5$$

Питомі поверхневі втрати в сталі ротора, Вт/кг

$$p_{пов_2} = 0.5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10000}\right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_1 \cdot 10^3)^2 = 0.5 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{10000}\right)^{1.5} \cdot (0.34130662282623514 \cdot 0.01211 \cdot 10^3)^2 = 247.54$$

Поверхневі втрати в роторі, Вт

$$p_{пов2} = p_{пов_2} \cdot (t_2 - b_{шр} \cdot 10^{-3}) \cdot Z_2 \cdot l_{\delta} = 247.53563330823522 \cdot (0.01521 - 1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot 38 \cdot 0.139 = 17.93$$

Маса сталі зубців ротора, кг

$$m_{Z2} = Z_2 \cdot h_{Z2} \cdot 10^{-3} \cdot b_{Z2} \cdot 10^{-3} \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 38 \cdot 29.08 \cdot 10^{-3} \cdot 6.5 \cdot 10^{-3} \cdot 0.139 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 7.55$$

Амплітуда пульсацій індукції в середньому перетині зубців ротора, Тл

$$B_{пул2} = \frac{\gamma \cdot \delta \cdot 10^{-3}}{2 \cdot t_2} \cdot B_{Z2} = \frac{4.4161290322580644 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.01521} \cdot 1.8195461021018748 = 0.13$$

Пульсаційні втрати в роторі, Вт

$$p_{пул2} = 0.11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{1000} \cdot B_{пул2}\right)^2 \cdot m_{Z2} = 0.11 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{1000} \cdot 0.13207347743300602\right)^2 \cdot 7.5539219402399995 = 75.14$$

Сума додаткових втрат в сталі, Вт

$$p_{ст.дод} = p_{пов2} + p_{пул2} = 17.925594879488493 + 75.138305407268447 = 93.06$$

Повні втрати в сталі, Вт

$$p_{ст} = p_{ст.осн} + p_{ст.дод} = 276.57858167870978 + 93.063900286756933 = 369.64$$

Механічні втрати, Вт

$$K_m = 1.3 \cdot (1 - D_a) = 1.3 \cdot (1 - 0.272) = 0.95$$

$$P_{\text{мех}} = K_m \cdot \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 = 0.9464 \cdot \left(\frac{1500}{10}\right)^2 \cdot 0.272^4 = 116.56$$

Додаткові втрати в номінальному режимі, Вт

$$P_{\text{дод.н}} = 0.005 \cdot \frac{P_{2\text{н}}}{\eta_3} = 0.005 \cdot \frac{15000}{0.88} = 85.23$$

Електричні втрати в обмотці статора при неробочому ході, Вт

$$P_{\text{ел.н.х}} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 7.9662729213877439^2 \cdot 0.35365180517944866 = 67.33$$

Активна складова струму неробочого ходу, А

$$I_{\text{н.х.а}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{ел.н.х}}}{m \cdot U_{1\text{н}}} = \frac{369.64248196546669 + 116.55552525926403 + 67.329826620772693}{3 \cdot 220} = 0.84$$

Струм неробочого ходу, А

$$I_{\text{н.х}} = \sqrt{I_{\text{н.х.а}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0.83867853612955068^2 + 7.9662729213877439^2} = 8.01$$

Коефіцієнт потужності при неробочому ході, Вт

$$\cos \varphi_{\text{н.х}} = \frac{I_{\text{н.х.а}}}{I_{\text{н.х}}} = \frac{0.83867853612955068}{8.0102987425563619} = 0.1$$

3.2.1 Розрахунок робочих характеристик

Активний опір кола намагнічування, Ом

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{276.57858167870978}{3 \cdot 7.9662729213877439^2} = 1.45$$

Індуктивний опір кола намагнічування, Ом

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{н}}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{7.9662729213877439} - 0.66855318345920023 = 26.95$$

Коефіцієнт схеми заміщення

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0.66855318345920023}{26.94787449495324} = 1.02$$

Реактивна складова струму синхронного неробочого ходу, А

$$I_{0\text{р}} = I_{\mu} = 7.97$$

Активна складова струму синхронного неробочого ходу, А

$$I_{0\text{а}} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_{1\text{н}}} = \frac{276.57858167870978 + 3 \cdot 7.9662729213877439^2 \cdot 0.35365180517944866}{3 \cdot 220} = 0.52$$

Величини, що не залежать від ковзання

$$a' = c_1^2 = 1.05$$

$$b' = 0$$

$$a = c_1 \cdot r_1 = 1.0248091248749287 \cdot 0.35365180517944866 = 0.36$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x'_2) = 1.0248091248749287 \cdot (0.66855318345920023 + 1.0248091248749287 \cdot 0.90385851338947232) = 1.63$$

Втрати, що не залежать від ковзання, Δ

$$P_{CT} + P_{Mex} = 369.64248196546669 + 116.55552525926403 = 486.2$$

Задаємось ковзанням

$$s_{\text{поб}} := 0, 0.0001 \dots 0.03$$

$$R(s_{\text{поб}}) = a + a' \cdot \frac{r'_2}{s_{\text{поб}}}$$

$$R(0.01) = 19.82$$

$$X(s_{\text{поб}}) = b + b' \cdot \frac{r'_2}{s_{\text{поб}}}$$

$$X(0.01) = 1.63$$

$$Z(s_{\text{поб}}) = \sqrt{R(s_{\text{поб}})^2 + X(s_{\text{поб}})^2}$$

$$Z(0.01) = 19.88$$

$$I''_2(s_{\text{поб}}) = \frac{U_{1H}}{Z(s_{\text{поб}})}$$

$$I''_2(0.01) = 11.06$$

$$\cos \varphi'_2(s_{\text{поб}}) = \frac{R(s_{\text{поб}})}{Z(s_{\text{поб}})}$$

$$\cos \varphi'_2(0.01) = 1$$

$$\sin \varphi'_2(s_{\text{поб}}) = \frac{X(s_{\text{поб}})}{Z(s_{\text{поб}})}$$

$$\sin \varphi'_2(0.01) = 0.08$$

$$I_{1a}(s_{\text{поб}}) = I_{0a} + I''_2(s_{\text{поб}}) \cdot \cos \varphi'_2(s_{\text{поб}})$$

$$I_{1a}(0.01) = 11.55$$

$$I_{1p}(s_{\text{поб}}) = I_{0p} + I''_2(s_{\text{поб}}) \cdot \sin \varphi'_2(s_{\text{поб}})$$

$$I_{1p}(0.01) = 8.88$$

$$I_1(s_{\text{поб}}) = \sqrt{I_{1a}(s_{\text{поб}})^2 + I_{1p}(s_{\text{поб}})^2}$$

$$I_1(0.01) = 14.56$$

$$I'_2(s_{\text{поб}}) = c_1 \cdot I''_2(s_{\text{поб}})$$

$$I'_2(0.01) = 11.34$$

$$P_1(s_{\text{поб}}) = 3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1a}(s_{\text{поб}}) \cdot 10^{-3}$$

$$P_1(0.01) = 7.62$$

$$p_{e1}(s_{\text{поб}}) = 3 \cdot I_1(s_{\text{поб}})^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$$

$$p_{e2}(s_{\text{поб}}) = 3 \cdot I'_2(s_{\text{поб}})^2 \cdot r'_2 \cdot 10^{-3}$$

$$p_{e1}(0.024) = 0.87$$

$$p_{\text{дод}}(s_{\text{поб}}) = p_{\text{дод.н}} \cdot \left(\frac{I_1(s_{\text{поб}})}{I_{1H}} \right)^2 \cdot 10^{-3}$$

$$\Sigma p(s_{\text{поб}}) = p_{\text{ст}} \cdot 10^{-3} + p_{\text{мех}} \cdot 10^{-3} + p_{e1}(s_{\text{поб}}) + p_{e2}(s_{\text{поб}}) + p_{\text{дод}}(s_{\text{поб}})$$

$$P_2(s_{\text{поб}}) = P_1(s_{\text{поб}}) - \Sigma p(s_{\text{поб}})$$

$$P_2(0.01) = 6.82$$

$$\Sigma p(0.024) = 1.81$$

$$\eta(s_{\text{поб}}) = 1 - \frac{\Sigma p(s_{\text{поб}})}{P_1(s_{\text{поб}})}$$

$$\eta(0.01) = 0.89$$

$$\cos \varphi(s_{\text{поб}}) = \frac{I_{1a}(s_{\text{поб}})}{I_1(s_{\text{поб}})}$$

$$\cos \varphi(0.01) = 0.79$$

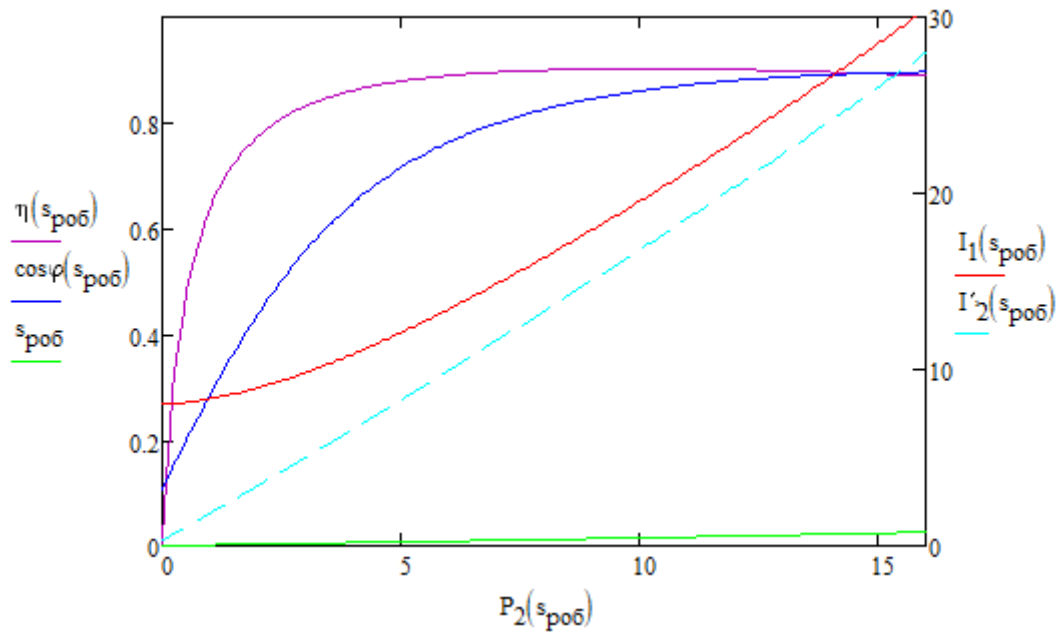


Рис 3.1 - Робочі характеристики спроектованого двигуна потужністю 15 кВт

З графіку уточнюємо номінальні значення:

$$s_{\text{НОМ}} = 0.024$$

$$I_{1\text{НОМ}} = 28.44$$

$$I'_{2\text{НОМ}} = 26$$

Розрахунок пускових характеристик

Задаємось ковзанням

$$s_n = \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0.8 \\ 0.5 \\ 0.2 \\ 0.1 \end{pmatrix}$$

Висота стрижня у пазу ротора, м

$$h_c = (h_{n2} - h'_{ш2} - h_{ш2}) \cdot 10^{-3} = (29.5 - 0.3 - 0.7) \cdot 10^{-3} = 0.03$$

Приведена висота стрижня у пазу ротора

$$\xi = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_n} = \begin{pmatrix} 1.81 \\ 1.62 \\ 1.28 \\ 0.81 \\ 0.57 \end{pmatrix}$$

Значення функції

$$\varphi = \begin{pmatrix} 0.66 \\ 0.45 \\ 0.19 \\ 0.04 \\ 0.01 \end{pmatrix}$$

Глибина проникнення струму, мм

$$h_r = \frac{h_c \cdot 10^3}{1 + \varphi} = \begin{pmatrix} 17.17 \\ 19.66 \\ 23.95 \\ 27.4 \\ 28.22 \end{pmatrix}$$

Розмір, мм

$$b_r = b_{12} - \frac{b_{12} - b_{22}}{h_{12}} \cdot \left(h_r - \frac{b_{12}}{2} \right) = \begin{pmatrix} 5.72 \\ 5.31 \\ 4.6 \\ 4.03 \\ 3.89 \end{pmatrix}$$

Площа, мм²

$$q_r = \left[\frac{\pi \cdot b_{12}^2}{8} + \frac{b_{12} + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_{12}}{2} \right) \right] = \begin{pmatrix} 114.5 \\ 128.21 \\ 149.47 \\ 164.36 \\ 167.59 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт збільшення активного опору

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \begin{pmatrix} 1.46 \\ 1.3 \\ 1.12 \\ 1.02 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт збільшення активного опору усієї обмотки

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = \begin{pmatrix} 1.31 \\ 1.21 \\ 1.08 \\ 1.01 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Приведений активний опір ротора з урахуванням ефекту витіснення струму, Ом

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2 = \begin{pmatrix} 0.24 \\ 0.22 \\ 0.2 \\ 0.19 \\ 0.18 \end{pmatrix}$$

Значення функції

$$\varphi' = \begin{pmatrix} 0.75 \\ 0.82 \\ 0.91 \\ 0.97 \\ 1.00 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт збільшення реактивного опору

$$k_d = \varphi' = \begin{pmatrix} 0.75 \\ 0.82 \\ 0.91 \\ 0.97 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт магнітної провідності ділянки паза ротора

$$\Delta\lambda_{n2\xi} = \left[\frac{h_{0p}}{3 \cdot b_{1p}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_{1p}^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{шp}}{2 \cdot b_{1p}} \right] \cdot (1 - k_d) = \begin{pmatrix} 0.33 \\ 0.23 \\ 0.12 \\ 0.04 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{n2\xi} = \lambda_{n2} - \Delta\lambda_{n2\xi} = \begin{pmatrix} 2.25 \\ 2.34 \\ 2.46 \\ 2.54 \\ 2.58 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт зміни індуктивного опору фази обмотки ротора від дії ефекту витіснення струму

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{п2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{п2} + \lambda_{д2}} = \begin{pmatrix} 0.94 \\ 0.96 \\ 0.98 \\ 0.99 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Приведений індуктивний опір ротора з урахуванням ефекту витіснення струму, Ом

$$x'_{2\xi} = K_x \cdot x'_2 = \begin{pmatrix} 0.85 \\ 0.86 \\ 0.88 \\ 0.9 \\ 0.9 \end{pmatrix}$$

Індуктивний опір намагнічування з урахуванням ефекту витіснення струму, Ом

$$x_{12n} = k_\mu \cdot x_{12} = 1.4596752309075554 \cdot 26.94787449495324 = 39.34$$

коефіцієнт схеми заміщення

$$c_{1n} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}} = 1 + \frac{0.66855318345920023}{39.335144925888692} = 1.02$$

Струм ротора без впливу насичення, А

$$R_n = r_1 + \frac{c_{1n} \cdot r'_{2\xi}}{s_n} = \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.64 \\ 0.76 \\ 1.31 \\ 2.23 \end{pmatrix}$$

$$X_n = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi} = \begin{pmatrix} 1.53 \\ 1.55 \\ 1.57 \\ 1.58 \\ 1.59 \end{pmatrix}$$

$$I'_{2n} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}} = \begin{pmatrix} 133.77 \\ 131.49 \\ 126.28 \\ 107.29 \\ 80.3 \end{pmatrix}$$

Струм статора без впливу насичення, А

$$I_{1n} = \left[\overrightarrow{I'_{2n} \cdot \sqrt{R_n^2 + (X_n + x_{12n})^2}} \right] \cdot \frac{1}{c_{1n} \cdot x_{12n}} = \begin{pmatrix} 136.67 \\ 134.39 \\ 129.14 \\ 109.79 \\ 82.27 \end{pmatrix}$$

Розрахунок пускових характеристик з урахуванням впливу витіснення струму та насичення від полів розсіювання. Приймаємо коефіцієнт насичення при пуску

$$k_{\text{нас}} = \begin{pmatrix} 1.35 \\ 1.3 \\ 1.2 \\ 1.1 \\ 1.05 \end{pmatrix}$$

Середня МРС обмотки, відносно одного пазу обмотки статора, А

$$F_{\text{н.ср}} = \left[\overrightarrow{0.7 \cdot \frac{k_{\text{нас}} \cdot I_{1n} \cdot u_n}{a} \cdot \left(1 + 1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)} \right] = \begin{pmatrix} 3.71 \times 10^3 \\ 3.51 \times 10^3 \\ 3.12 \times 10^3 \\ 2.43 \times 10^3 \\ 1.74 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт

$$C_N = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{(t_1 + t_2) \cdot 10^3}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{0.5}{(0.01211 + 0.01521) \cdot 10^3}} = 0.98$$

Фіктивна індукція потоку розсіювання у повітряному проміжку, Тл

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n.c.p}}{1.6 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot C_N} \cdot 10^{-6} = \begin{pmatrix} 4.74 \\ 4.49 \\ 3.98 \\ 3.1 \\ 2.22 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт відношення потоку розсіювання при насиченні до потоку розсіювання ненасиченої машини

$$X_{\delta} = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.53 \\ 0.61 \\ 0.72 \\ 0.84 \end{pmatrix}$$

Додаткове розкриття пазів статора, мм

$$c_{e1} = (t_1 \cdot 10^3 - b_{ш}) \cdot (1 - X_{\delta}) = \begin{pmatrix} 4.21 \\ 3.95 \\ 3.28 \\ 2.35 \\ 1.35 \end{pmatrix}$$

Розмір, мм

$$h_k = \frac{b_1 - b_{ш}}{2} = \frac{7.6 - 3.7}{2} = 1.95$$

Зменшення коефіцієнту магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора викликане насиченням

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{h_{ш} + 0.58 \cdot h_k}{b_{ш}} \cdot \frac{c_{e1}}{c_{e1} + 1.5 \cdot b_{ш}} = \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.24 \\ 0.21 \\ 0.17 \\ 0.11 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора з врахуванням насичення

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас} = \begin{pmatrix} 1.17 \\ 1.18 \\ 1.21 \\ 1.25 \\ 1.31 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання обмотки статора з урахуванням насичення

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot X_{\delta} = \begin{pmatrix} 0.87 \\ 0.92 \\ 1.06 \\ 1.25 \\ 1.46 \end{pmatrix}$$

Індуктивний опір фази обмотки статора з урахуванням насичення, Ом

$$x_{1\text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1\text{нас}} + \lambda_{d1\text{нас}} + \lambda_{л1}}{\lambda_{n1} + \lambda_{d1} + \lambda_{л1}} = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.51 \\ 0.54 \\ 0.57 \\ 0.61 \end{pmatrix}$$

Додаткове розкриття пазів ротора, мм

$$c_{e2} = (t_2 \cdot 10^3 - b_{\text{шр}}) \cdot (1 - X_\delta) = \begin{pmatrix} 6.85 \\ 6.44 \\ 5.35 \\ 3.84 \\ 2.19 \end{pmatrix}$$

Зменшення коефіцієнту магнітної провідності пазового розсіювання обмотки ротора викликане насиченням

$$\Delta\lambda_{n2\text{нас}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{шр}}} \cdot \frac{c_{e2}}{b_{\text{шр}} + c_{e2}} = \begin{pmatrix} 0.38 \\ 0.38 \\ 0.36 \\ 0.34 \\ 0.28 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки ротора з врахуванням витіснення та насичення

$$\lambda_{n2\xi\text{нас}} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2\text{нас}} = \begin{pmatrix} 1.87 \\ 1.96 \\ 2.09 \\ 2.2 \\ 2.3 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання обмотки ротора з врахуванням насичення

$$\lambda_{d2\text{нас}} = \lambda_{d2} \cdot X_\delta = \begin{pmatrix} 1.04 \\ 1.1 \\ 1.27 \\ 1.5 \\ 1.75 \end{pmatrix}$$

Приведений індуктивний опір фази обмотки ротора з врахуванням витіснення та насичення, Ом

$$x'_{2\xi\text{нас}} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{n2\xi\text{нас}} + \lambda_{d2\text{нас}} + \lambda_{л2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{d2} + \lambda_{л2}} = \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.63 \\ 0.68 \\ 0.74 \\ 0.8 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнт схеми заміщення

$$c_{1n.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12n}} = \begin{pmatrix} 1.01 \\ 1.01 \\ 1.01 \\ 1.01 \\ 1.02 \end{pmatrix}$$

Розрахунок струмів та моментів

$$R_{n.нас} = \left(r_1 + c_{1n.нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s_n} \right) = \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.64 \\ 0.76 \\ 1.3 \\ 2.23 \end{pmatrix}$$

$$X_{n.нас} = (x_{1нас} + c_{1n.нас} \cdot x'_{2\xi.нас}) = \begin{pmatrix} 1.11 \\ 1.15 \\ 1.23 \\ 1.32 \\ 1.42 \end{pmatrix}$$

Струми в обмотці ротора, А

$$I'_{2n.нас} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{R_{n.нас}^2 + X_{n.нас}^2}} = \begin{pmatrix} 173.98 \\ 167.38 \\ 152.5 \\ 118.56 \\ 83.19 \end{pmatrix}$$

Струм в обмотці статора, А

$$I_{1n.нас} = \left[I'_{2n.нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{n.нас}^2 + (X_{n.нас} + x_{12n})^2}}{c_{1n.нас} \cdot x_{12n}} \right] = \begin{pmatrix} 176.66 \\ 170.08 \\ 155.17 \\ 120.85 \\ 85 \end{pmatrix}$$

Кратність струму в обмотці статора з урахуванням витіснення та насичення

$$I_{n*} = \frac{I_{1n.нас}}{I_{1ном}} = \begin{pmatrix} 6.21 \\ 5.98 \\ 5.46 \\ 4.25 \\ 2.99 \end{pmatrix}$$

Відносне значення моменту

$$M_{n*} = \left[\left(\frac{I'_{2n.нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s_n} \right] = \begin{pmatrix} 1.41 \\ 1.5 \\ 1.78 \\ 2.52 \\ 2.45 \end{pmatrix}$$

$$s_g = \text{stack}(s_n, 0)$$

$$I_{n*g} = \text{stack}(I_{n*}, I_{\mu*})$$

$$M_{n*g} = \text{stack}(M_{n*}, 0)$$

$$s = 0,001 \dots s_{g1}$$

$$I_{n*}(s) = \text{interp}(\text{cspline}(\text{rotate}(s_g, 180), \text{rotate}(I_{n*g}, 180)), \text{rotate}(s_g, 180), \text{rotate}(I_{n*g}, 180), s)$$

$$M_{n*}(s) = \text{interp}(\text{cspline}(\text{rotate}(s_g, 180), \text{rotate}(M_{n*g}, 180)), \text{rotate}(s_g, 180), \text{rotate}(M_{n*g}, 180), s)$$

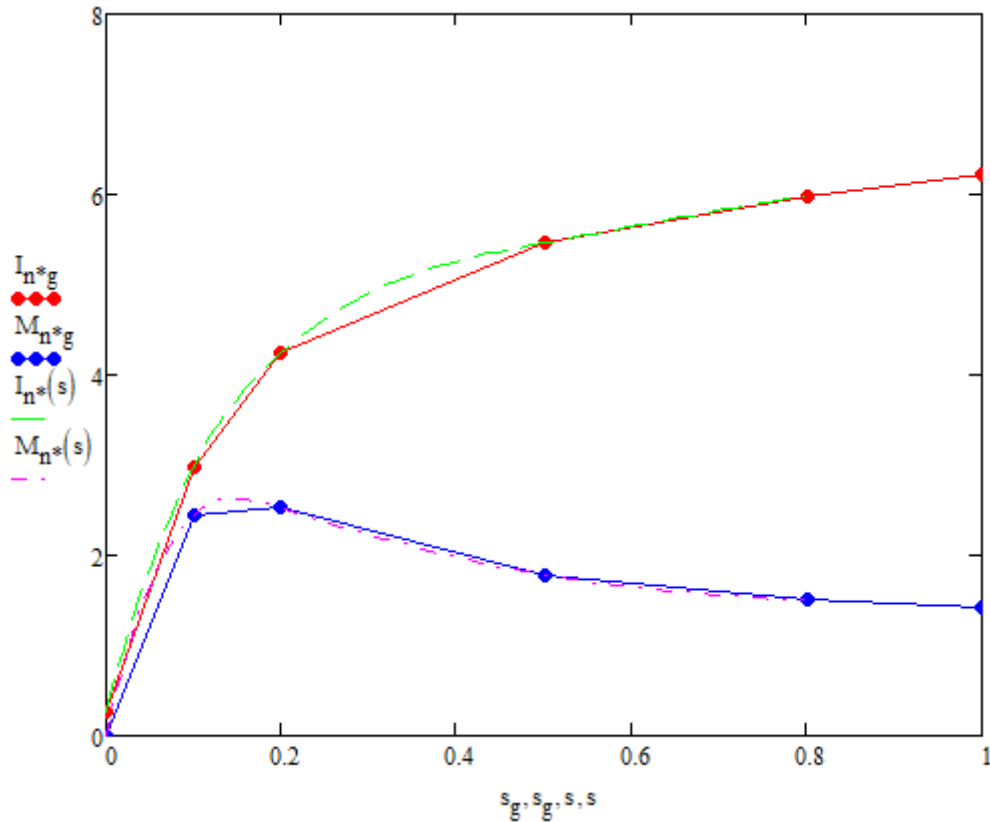


Рис 3.2 - Пускові характеристики спроектованого двигуна потужністю 15 кВт

Середнє значення індуктивного опору фази обмотки статора з урахуванням насичення для ковзань 0.1 і 0.2, Ом

$$x_{1нас(ср)} = \frac{x_{1нас3} + x_{1нас4}}{2} = 0.59$$

Середнє значення приведенного індуктивного опору фази обмотки ротора з врахуванням витіснення та насичення для ковзань 0.1 і 0.2, Ом

$$x'_{2\xi нас(ср)} = \frac{x'_{2\xi нас3} + x'_{2\xi нас4}}{2} = 0.77$$

Середнє значення коефіцієнту схеми заміщення для ковзань 0.1 і 0.2

$$c_{1нас(ср)} = \frac{c_{1п.нас3} + c_{1п.нас4}}{2} = 1.02$$

Критичне ковзання

$$s_{кр} = \frac{r_2'}{\frac{x_{1нас(ср)}}{c_{1нас(ср)}} + x_2' \xi_{нас(ср)}} = \frac{0.18524308216474189}{\frac{0.59075663320287652}{1.0150185447216713} + 0.76885040214215916} = 0.14$$

Значення струму в обмотці ротора для критичного ковзання, А

$$I'_{n2(кр)} = \text{interp}(\text{regress}(s_n, I'_{2н.нас}, \text{length}(s_n) - 1), s_n, I'_{2н.нас}, s_{кр}) = 98.71$$

Значення коефіцієнту збільшення активного опору обмотки для критичного ковзання

$$K_{R(кр)} = \text{interp}(\text{regress}(s_n, K_R, \text{length}(s_n) - 1), s_n, K_R, s_{кр}) = 1$$

Відносне значення максимального моменту

$$M_{\max*} = \left(\frac{I'_{n2(кр)}}{I'_{2ном}} \right)^2 \cdot K_{R(кр)} \cdot \frac{s_{ном}}{s_{кр}} = \left(\frac{98.71169955541086}{26} \right)^2 \cdot 1.0020708159925267 \cdot \frac{0.024}{0.13712913129492396} = 2.53$$

3.2.2 Тепловий Розрахунок

Електричні втрати в обмотці статора у пазовій частині

$$k_p = 1.07$$

- Для класу нагрівостійкості F

$$P'_{e.п1} = k_p \cdot \left(P_{e1}(0.024) \cdot 10^3 \right) \cdot \frac{2 \cdot I_1}{I_{cp1}} = 1.07 \cdot 0.86731267699400583085 \cdot 10^3 \cdot \frac{2 \cdot 0.139}{0.73906766336063989} = 349.08$$

Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря всередині двигуна

$$K = 0.2$$

$$\alpha_1 = 108$$

$$\Delta v_{пов1} = K \cdot \frac{P'_{e.п1} + P_{ст.осн}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} \cdot \pi = 0.2 \cdot \frac{349.07606121680129 + 276.57858167870978}{\pi \cdot 0.185 \cdot 0.139 \cdot 108} \cdot \pi = 14.47$$

Розрахунковий периметр поперечного перетину пазу статора

$$\Pi_{п1} = 2 \cdot h_{нк} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 18.3 + 7.6 + 10.0 = 54.2$$

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора

$$\lambda_{екв} = 0.16$$

- Для ізоляції класу нагрівостійкості F

$$\lambda'_{екв} = 1.4$$

$$\Delta v_{із.п1} = \frac{P'_{e.п1}}{Z_1 \cdot \Pi_{п1} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{із}}{\lambda_{екв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{екв}} \right) = \frac{349.07606121680129}{48 \cdot 54.2 \cdot 0.139} \cdot \left(\frac{0.4}{0.16} + \frac{7.6 + 10.0}{16 \cdot 1.4} \right) = 3.17172 = 3.17$$

Електричні втрати в обмотці статора у пазовій частині

$$P'_{e.п1} = k_p \cdot \left(P_{e1}(0.024) \cdot 10^3 \right) \cdot \frac{2 \cdot I_{п1}}{I_{cp1}} = 1.07 \cdot 0.86731267699400583085 \cdot 10^3 \cdot \frac{2 \cdot 0.23053383168031996}{0.73906766336063989} = 578.95$$

Розрахунковий периметр поперечного перетину пазу статора

$$\Pi_{л1} = \Pi_{п1} = 54.2$$

Перепад температури за товщиною ізоляції лобових частин

$$b_{із.л} = 0.05$$

$$\Delta v_{із.л1} = \frac{P'_{ел1}}{2Z_1 \cdot \Pi_{л1} \cdot l_{л1}} \left(\frac{b_{із.л}}{\lambda_{екв}} + \frac{h_{пк}}{12 \cdot \lambda'_{екв}} \right) = \frac{578.94850316678514}{2 \cdot 48 \cdot 54.2 \cdot 0.23053383168031996} \left(\frac{0.05}{0.16} + \frac{18.3}{12 \cdot 1.4} \right) = 0.676576 = 0.68$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над температурою повітря всередині двигуна

$$\Delta v_{пов.л1} = \frac{K \cdot P'_{ел1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{вип} \cdot \alpha_1} = \frac{0.2 \cdot 578.94850316678514}{2 \cdot \pi \cdot 0.185 \cdot 0.074779640517021531 \cdot 108} = 12.33421 = 12.33$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині двигуна

$$\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{пов1} + \Delta v_{із.л1}) \cdot 2 \cdot l_1 + (\Delta v_{із.л1} + \Delta v_{пов.л1}) \cdot 2 \cdot l_{л1}}{l_{ср1}} = \frac{(45.05618 + 3.17172) \cdot 2 \cdot 0.139 + (0.676576 + 12.33421) \cdot 2 \cdot 0.23053383168031996}{0.73906766336063989} = 14.67$$

Сума втрат у двигуні та електричних втрат у саторі та роторі

$$\Sigma P = \Sigma p(0.024) \cdot 10^3 = 1.81 \times 10^3$$

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1) \cdot (p_{e1}(0.024) + p_{e2}(0.024)) \cdot 10^3 = 1814.141470507622 + (1.07 - 1) \cdot (0.86731267699400583085 + 0.37974109217599646265) \cdot 10^3 = 1.9 \times 10^3$$

Сума втрат, що відводяться у повітря всередині двигуна

$$\Sigma P'_в = \Sigma P' - (1 - K) \cdot (P'_{ел1} + P_{ст.осн}) - 0.9 \cdot P_{мех} = 1.3 \times 10^3$$

Еквівалента поверхня охолодження корпусу

$$\Pi_p = 0.32$$

- Для $h = 160$ мм

$$s_{кор} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{вип}) = 0.99$$

Перевищення температури повітря всередині двигуна над температурою навколишнього середовища

$$\alpha_в = 20$$

- Для $D_a = 0,272$ м

$$\Delta v_в = \frac{\Sigma P'_в}{s_{кор} \cdot \alpha_в} = \frac{1296.0115472997759}{0.9852894745858325 \cdot 20} = 65.77$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища

$$\Delta v_1 = \Delta v'_1 + \Delta v_в = 26.257689060921287 + 65.768060084297986 = 92.03$$

Перевірка умов охолодження двигуна

Так як за технічними умовами максимальна допустима температура навколишнього повітря складає 40°C , то температура обмотки статора

$$t_{обм.ст.} = \Delta v_1 + 40 = 132.03$$

3.3 Розрахунок втрат асинхронного двигуна при використанні сталей європейського зразка

Таблиця 3.2 – Втрати та тепловий розрахунок при використанні сталей європейського зразка

Дані європейський сталей, Вт/кг			Розрахунок втрат, Вт		Тепловий розрахунок, °C	
Назва сталі	питомі втрати для сталі P1.5/50	питомі втрати для сталі P1.0/50	основні втрати для сталі	Повні втрати в сталі	Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря всередині двигуна	Середнє перевищення темп обмотки статора над темп середовища
50PN250	2,5	1,11	119,32	210,86	10,52	13,01
50PN270	2,7	1,20	129	220,53	10,74	13,11
50PN290	2,9	1,29	138,67	230,21	10,97	13,24
50PN310	3,1	1,38	149,32	241,34	11,22	13,32
50PN350	3,5	1,56	168,8	260,82	11,68	13,58
50PN400	4	1,78	192,61	284,62	12,25	13,73
50PN470	4,7	2,09	227,63	320,13	13,07	14,08
50PN600	6	2,67	292,69	385,68	14,61	14,72
50PN700	7	3,11	343,12	436,6	15,8	15,22

3.4 Розрахунок втрат асинхронного двигуна при використанні вітчизняних сталей

Таблиця 3.3 - Втрати та тепловий розрахунок при використанні вітчизняних сталей

Дані вітчизняних сталей, Вт/кг		Розрахунок втрат, Вт		Тепловий розрахунок, °C	
Назва сталі	питомі втрати для сталі Р1.0/50	основні втрати для сталі	Повні втрати в сталі	Перевищення температури внутрішньої поверхні осерддя статора над температурою повітря всередині двигуна	Середнє перевищення темп обмотки статора над темп середовища
2012	2,9	319,95	413,43	15,25	14,99
2013	2,5	276,58	369,64	14,47	14,67
2212	2,2	242,72	336,2	13,43	14,23
2214	2	220,65	314,13	12,91	14,01
2312	1,75	193,07	286,55	12,26	13,74
2412	1,15	126,87	220,35	10,7	13,08

З наведених вище даних з таблиці 3.2 та 3.3 можемо зробити висновок про те що, зі зменшенням питомих втрат основні та повні втрати для сталі також зменшуються. Відповідно зменшується перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря всередині двигуна та середнє перевищення температури обмотки статора над температурою середовища.

З таблиці 3.4 можемо бачити сталі вітчизняного стандарту які є найбільш підходящими та європейських сталей.

3.5 Співставлення найбільш відповідних марок сталей

Таблиця 3.4 – Відповідність між характеристиками сталей

Назва сталі	Основні втрати для сталі	Повні втрати в сталі
2412	126,87	220,35
50PN250	119,32	210,86

Назва сталі	Основні втрати для сталі	Повні втрати в сталі
2312	193,07	286,55
50PN400	192,61	284,62

Назва сталі	Основні втрати для сталі	Повні втрати в сталі
2214	202,65	314,13
50PN400	192,61	284,62

Назва сталі	Основні втрати для сталі	Повні втрати в сталі
2212	242,72	336,2
50PN470	227,69	320,13

Назва сталі	Основні втрати для сталі	Повні втрати в сталі
2013	276,58	369,64
50PN600	292,69	385,68

Назва сталі	Основні втрати для сталі	Повні втрати в сталі
2012	319,95	413,43
50PN700	343,12	436,6

3.6 Розрахунок коефіцієнту корисної дії та $\cos\phi$ для європейських сталей

Таблиця 3.5 – ККД та $\cos\phi$ для європейських сталей

Назва сталі	Потужність, кВт	ККД	$\cos\phi$	ККД* $\cos\phi$
50PN250	3,85	0,88	0,58	0,510
	7,42	0,914	0,78	0,713
	10,86	0,916	0,85	0,779
	14,13	0,909	0,88	0,800
	17,24	0,899	0,893	0,803
	20,15	0,888	0,895	0,795
50PN270	3,86	0,877	0,583	0,511
	7,43	0,913	0,787	0,719
	10,87	0,915	0,856	0,783
	14,15	0,908	0,883	0,802
	17,25	0,899	0,893	0,803
	20,15	0,888	0,95	0,844
50PN290	3,87	0,875	0,584	0,511
	7,44	0,911	0,787	0,717
	10,88	0,914	0,857	0,783
	14,16	0,908	0,883	0,802
	17,26	0,898	0,893	0,802
	20,17	0,887	0,895	0,794
50PN310	3,88	0,872	0,585	0,510
	7,45	0,91	0,787	0,716
	10,89	0,913	0,857	0,782
	14,17	0,907	0,884	0,802

	17,27	0,897	0,893	0,801
	20,18	0,887	0,896	0,795
50PN350	3,9	0,868	0,587	0,510
	7,47	0,907	0,788	0,715
	10,91	0,911	0,857	0,781
	14,19	0,905	0,884	0,800
	17,29	0,896	0,894	0,801
	20,2	0,886	0,896	0,794
50PN400	3,93	0,863	0,589	0,508
	7,5	0,904	0,789	0,713
	10,93	0,909	0,858	0,780
	14,21	0,904	0,884	0,799
	17,31	0,895	0,894	0,800
	20,22	0,884	0,896	0,792
50PN470	3,96	0,855	0,593	0,507
	7,53	0,9	0,79	0,711
	10,97	0,9	0,858	0,772
	14,24	0,901	0,885	0,797
	17,34	0,893	0,894	0,798
	20,25	0,883	0,896	0,791
50PN600	4,03	0,84	0,599	0,503
	7,6	0,892	0,793	0,707
	11,03	0,9	0,86	0,774
	14,31	0,897	0,885	0,794
	17,41	0,889	0,895	0,796
	20,32	0,879	0,897	0,788
50PN700	4,08	0,83	0,6	0,498
	7,65	0,886	0,795	0,704
	11,08	0,896	0,861	0,771
	14,36	0,893	0,886	0,791
	17,46	0,886	0,895	0,793
	20,37	0,877	0,897	0,787

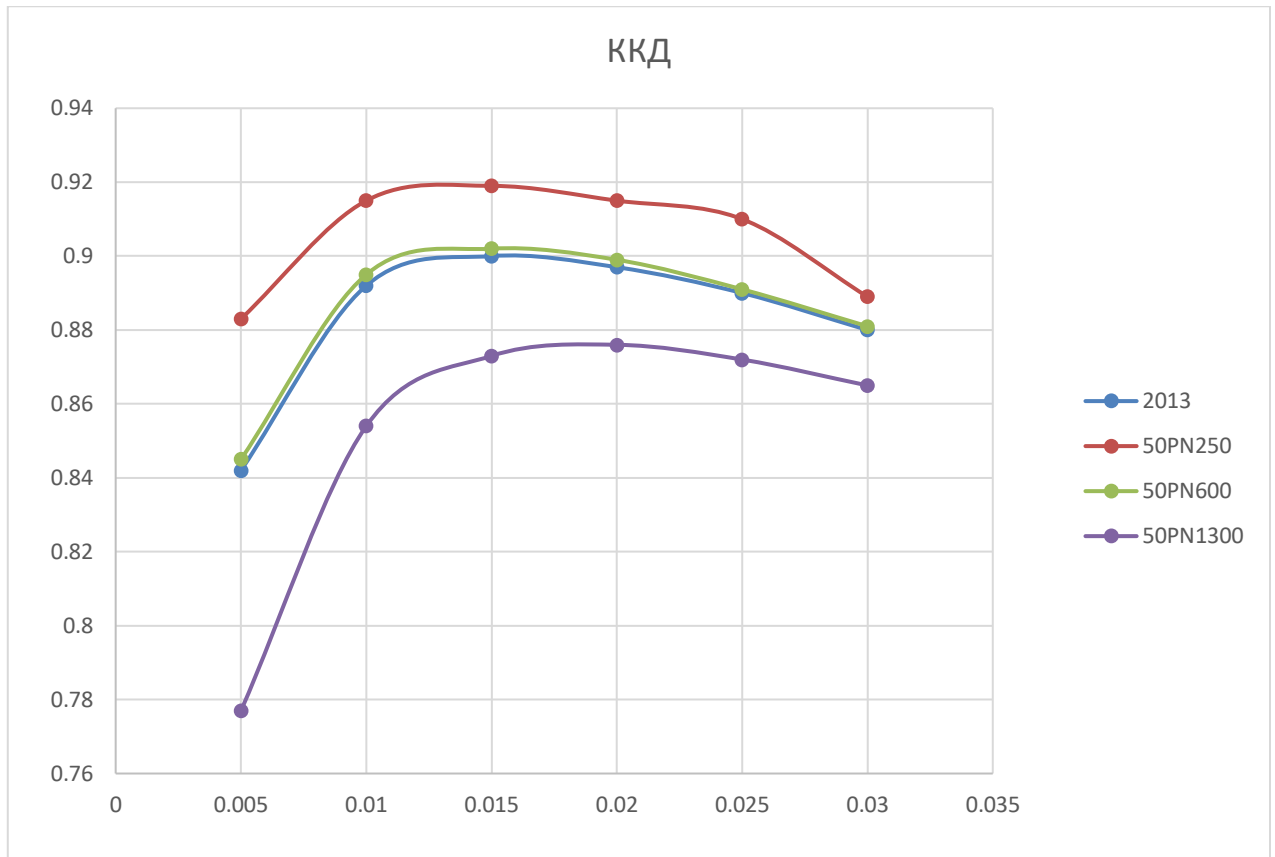


Рис 3.3 – порівняння коефіцієнту корисної дії між сталями

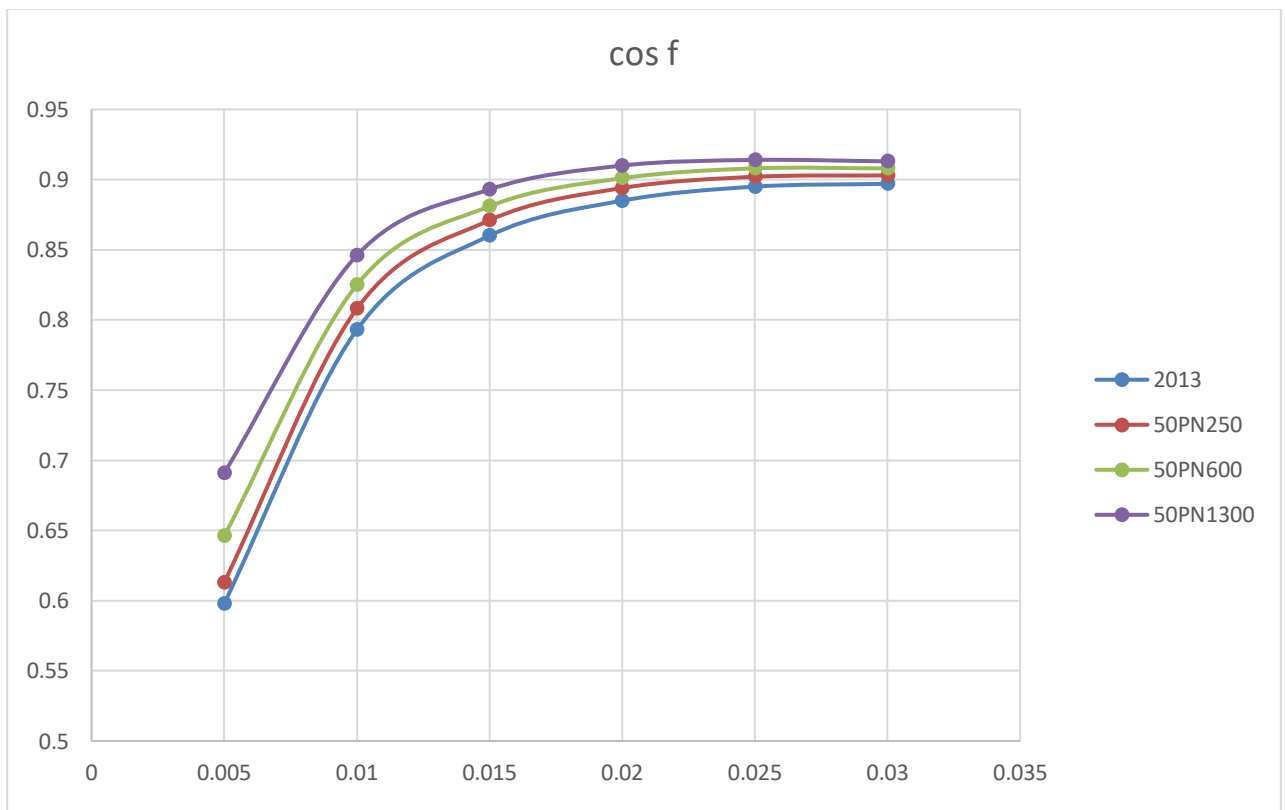


Рис 3.4 - порівняння $\cos f$ між сталями

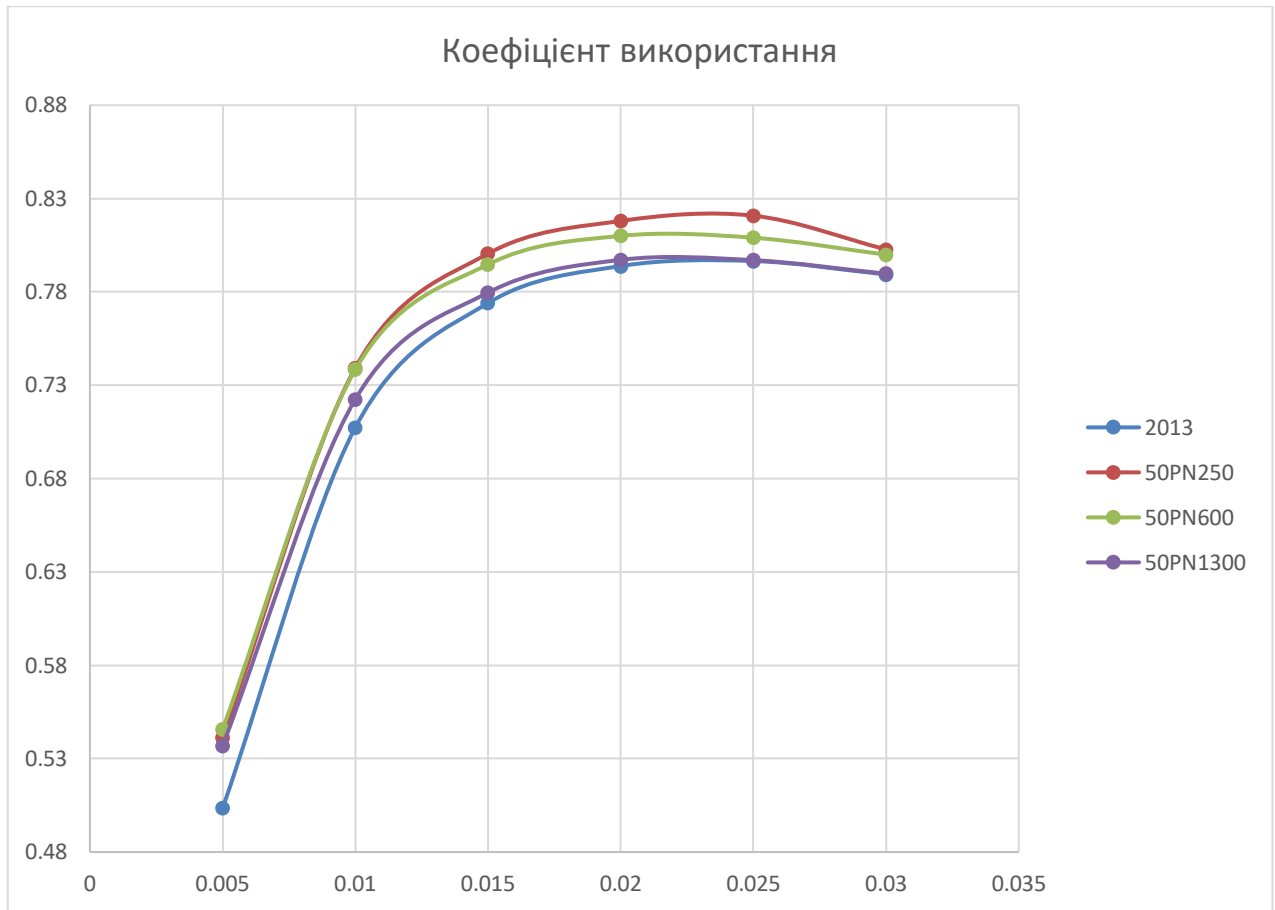


Рис 3.5 – порівняння коефіцієнту використання

Відповідно до таблиці та наведених вище рисунків можемо побачити, що властивості сталей є важливими значеннями для побудови будь якого двигуна, від чого будуть залежати показники коефіцієнт корисної дії та інших параметрів.

Також, можемо зауважити, що сталі європейського стандарту є співставними із вітчизняними сталями. Це дає змогу покращити параметри асинхронних двигунів, використавши та впровадивши їх у виробництво з відповідним електротехнічними сталями.

3.6.1 Моделювання магнітопроводу в програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics

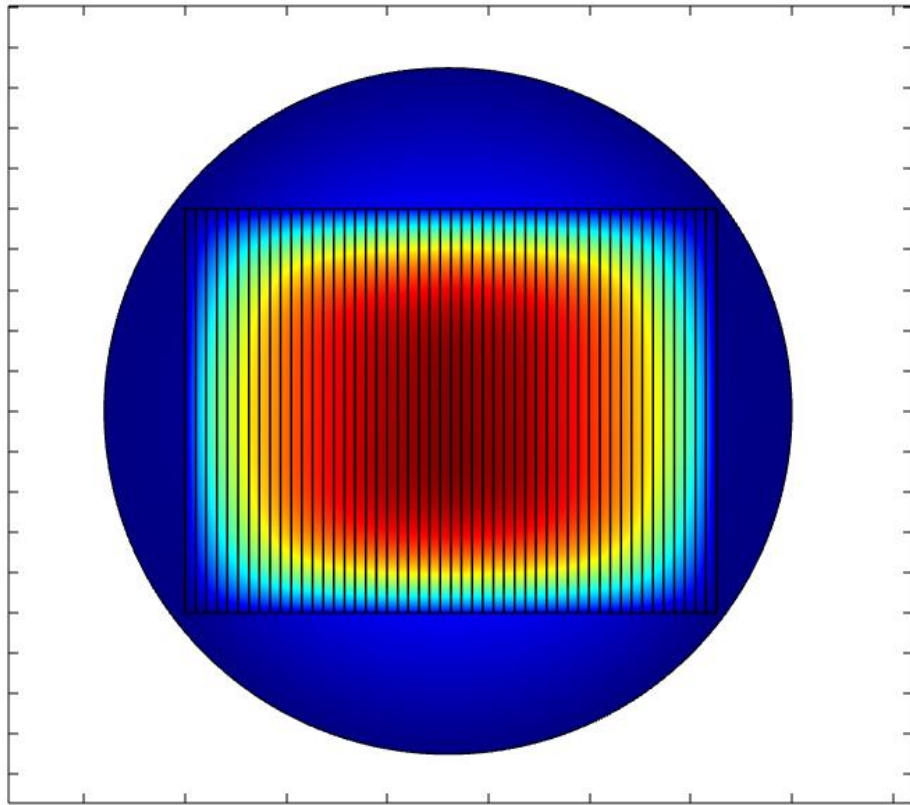


Рис 3.6 – модель магнітопроводу зі сталлю 50PN250 при частоті 50 Гц

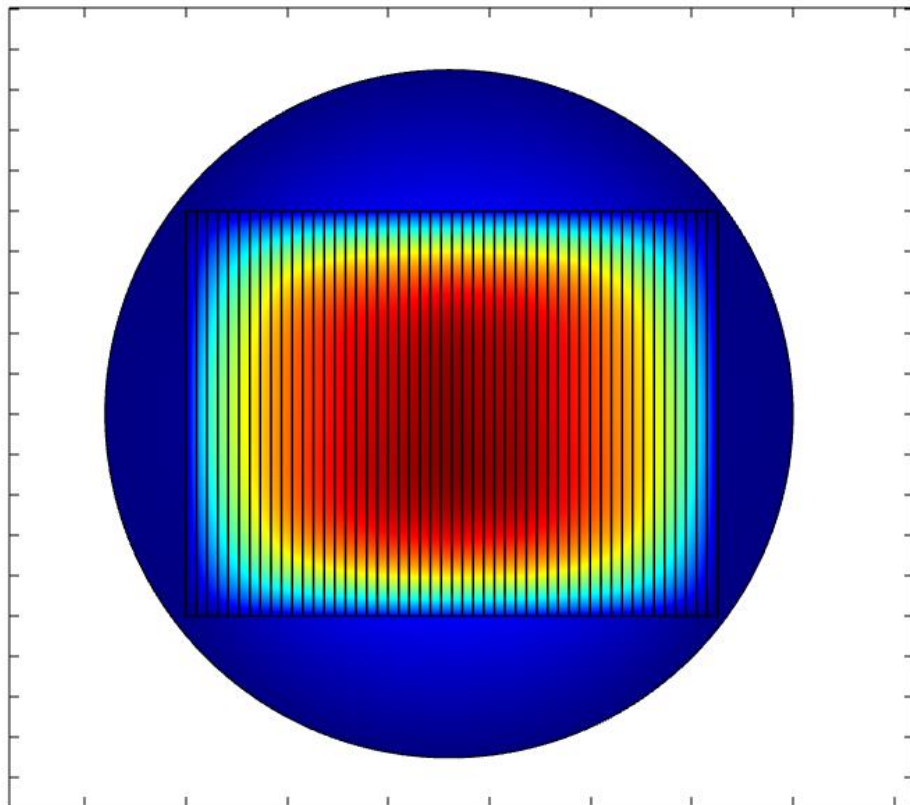


Рис 3.7 - модель магнітопроводу зі сталлю 2412 при частоті 50 Гц

3.7 Висновки до розділу 3

Дослідження в цьому розділі показують, що європейські та вітчизняні сталі є співставними. Тобто, за деяких умов європейські сталі можна використовувати у двигунах українського виробництва.

Використання електротехнічної сталі європейського стандарту в українських асинхронних двигунах має декілька ключових аспектів, що позитивно впливають на їхню ефективність та довговічність. Електротехнічна сталь, яка відповідає європейським стандартам забезпечує високі магнітні властивості, знижені втрати на вихрові струми і підвищену стійкість до механічних навантажень.

Менші втрати на вихрові струми і гістерезис призводять до меншого нагрівання двигуна, що дозволяє працювати при вищих навантаженнях без ризику перегріву.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

В даній бакалаврській дипломній роботі було досліджено співставлення характеристик асинхронних машин з різними марками електротехнічної сталі. Для досягнення цієї мети були вивчені наукові джерела, проведено експериментальні дослідження та розроблено відповідні алгоритми та програмне забезпечення.

Українські виробники асинхронних двигунів можуть використовувати електротехнічну сталь європейського стандарту для створення високоефективних промислових двигунів, що застосовуються в різних галузях. Впровадження таких стандартів підвищує конкурентоспроможність українських двигунів на міжнародному ринку завдяки покращеним технічним характеристикам та відповідності європейським нормам якості.

Використання європейської електротехнічної сталі дозволяє виготовляти сердечники статора та ротора з тонколистової сталі з мінімальними втратами на гістерезис та вихрові струми. Це забезпечує ефективну роботу магнітної системи двигуна.

Тонкі пластини, штамповані з високоякісної сталі, забезпечують кращу збірку ротора і зменшують механічні втрати. Це сприяє підвищенню ефективності і точності роботи двигуна. Високоякісна поверхня сталі дозволяє застосовувати більш ефективні ізоляційні покриття, що підвищує надійність та безпеку двигуна. Це зменшує ризик пробоїв і збоїв у роботі.

Загалом, використання електротехнічної сталі європейського стандарту в українських асинхронних двигунах сприяє підвищенню їхньої ефективності, надійності та довговічності, що є важливим для забезпечення стабільної роботи та зменшення експлуатаційних витрат.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. "The Induction Machines Design Handbook. CRC Press авторства Boldea, I. (2006).
2. Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives: Application of Fuzzy, Neural, Fuzzy-Neural, and Genetic-Algorithm-Based Techniques. Oxford University Press авторства Vas, P. (1999).
3. Electric Machinery Fundamentals (5th Edition) авторства McGraw-HillChapman, S. J. (2011).
4. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems (3rd Edition). Wiley-IEEE Press, авторства Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2013).
5. Magnetic Materials—Part 4: Part 4: Methods of measurement of D.C. magnetic properties of magnetically soft materials, IEC 60404-4, 2008.
6. C. Steinmetz, "On the law of hysteresis (originally published in 1892)," Proceedings of the IEEE, vol. 72, no. 2, pp. 197–221, 1984..
7. Таран В.П. Діагностування електроустаткування. – Київ: Техніка, 1983.
8. P. Beckley, Electrical steels for rotating machines. IEE power and energy series, Institution of Electrical Engineers, 2002.
9. T. Nakata, M. Nakano, and K. Kawahara, "Effects of stress due to cutting on magnetic characteristics of silicon steel," IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan, vol. 7, no. 6, pp. 453 –457, 1992.
10. A. J. Moses, N. Derebasi, G. Loisos, and A. Schoppa, "Aspects of the cut-edge effect stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 215-216, pp. 690 – 692, 2000.
11. A. Kedous-Lebouc, B. Cornut, J. C. Perrier, P. ManfA~c , and T. Chevalier, "Punching influence on magnetic properties of the stator teeth of an induction motor," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 254-255, pp. 124 – 126, 2003.

- 12.Y. Kurosaki, H. Mogi, H. Fujii, T. Kubota, and M. Shiozaki, “Importance of punching and workability in non-oriented electrical steel sheets,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, no. 20, pp. 2474 – 2480, 2008. Proceedings of the 18th International Symposium on Soft Magnetic Materials.
- 13.W. Arshad, T. Ryckebusch, F. Magnussen, H. Lendenmann, B. Eriksson, J. Soulard, and B. Malmros, “Incorporating lamination processing and component manufacturing in electrical machine design tools,” in *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, pp. 94 –102, 2007.
- 14.A. Moses and H. Rahmatizadeh, “Effects of stress on iron loss and flux distribution of an induction motor stator core,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, pp. 4003 –4005, Sept. 1989.
- 15.Ю.А. Рунов, О.Г. Широков, Д.І. Залізний, Д.М. Лось Енергетика. Звітка вищих навчальних закладів та енергетичних об'єднань, *Журнал Енергетика*. 2018.01.31.
16. О.Г. Широков, Д.І. Залізний Теплові схеми заміщення електроенергетичних пристроїв , *Наукоємні технології*, 2008
17. Залізний Д.І. Адаптивне моделювання теплових процесів електроенергетичного обладнання в реальному часі Текст наукової статті за фахом «Електротехніка, електронна техніка, інформаційні технології» базується, 2008