

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електричних машин

«На правах рукопису»

УДК 621.313

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

 **Вадим ЧУМАК**

«19» 12 2021 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Діагностика асинхронних двигунів швидкоплинними напругами»

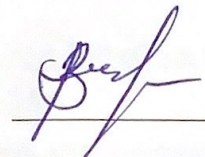
Виконав:

Студент VI курсу, групи ЕМ-01мп
Ігнат'єв Владислав Олександрович



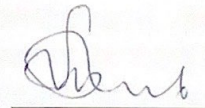
Науковий керівник:

Доцент, кандидат технічних наук,
Чумак Вадим Володимирович



Рецензент:

Доцент, кандидат технічних наук,
Теряєв Віталій Іванович



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

Студент 

Київ – 2021 рік

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електричних машин

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Василь ШИНКАРЕНКО

«01» 10 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Ігнат'єв Владислав Олександрович

1. Тема дисертації «Діагностика асинхронних двигунів швидкоплинними напругами», науковий керівник дисертації Чумак В.В., доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «02»_11_2021 р. № 3655-с

2. Термін подання студентом дисертації – до 10.12.2021

3. Об'єкт дослідження: асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серії 4А потужністю 30 кВт, обмотка яких виготовлена з різних матеріалів, які безпосередньо впливають на перехідні процеси в обмотках.

4. Вихідні дані: $P_2 = 30$ кВт; $h = 225$ мм; $U = 220$ В; $m = 3$ в.о.; $n_1 = 750$ об/хв; $S = 2$ %; $\eta = 90.5$ %; $\cos\phi = 0.81$ в.о.; $I_{\Pi} = 5.5$ в.о.; $M_{\Pi} = 1.4$ в.о.; $M_K = 2.3$ в.о..

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Аналіз пошкоджень електричних машин та методів їх діагностики. 2. Вибір та опис конструкції асинхронного двигуна за короткозамкненим ротором. 3. Розрахунок АД з короткозамкненим ротором обмотка якого виготовлена з алюмінію та міді. 4. Розрахунок АД з подвійною білячою кліткою яка виготовлена з алюмінію. 5. Створити програмний модуль для обчислення імпульсних процесів в ізоляції обмоток за допомогою ланкових схем заміщення. 6. Моделювати імпульсні процеси в обмотках електричних машин. 7. Порівняльний аналіз розрахунку впливових процесів з метою визначення дефектів ізоляції різного ступеню. 8. Висновки по завершеній роботі.

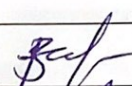
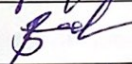
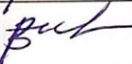
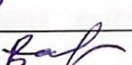
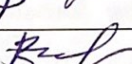
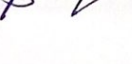
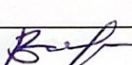
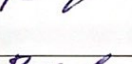
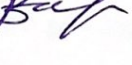
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: мультимедійна презентація для доповіді за результатами досліджень, креслення асинхронного двигуна.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1. Чумак В.В., Стульніченко А.С., Цивінський С.С., Ігнат'єв В.О. Діагностика ізоляції електричних машин з використанням комутацій-

них процесів // «Енергетика: економіка, технології, екологія». – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021 р. - № 4. – С. 56-64. 2. Чумак В.В., Ігнат'єв В.О. Діагностика асинхронних двигунів швидкоплинними напругами // «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». - Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 204-209.

8. Дата видачі завдання 01.10.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літератури за темою магістерської дисертації	02.10.2020-01.12.2020	
2	Вибір та опис конструкції асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором	02.12.2020-02.01.2021	
3	Розрахунок АД з короткозамкненим ротором, обмотка якого виготовлена з алюмінію та міді	03.01.2021-03.04.2021	
4	Розрахунок АД з подвійною білячою кліткою, яка виготовлена з алюмінію	04.04.2021-04.06.2021	
5	Створення програмного модулю для обчислення імпульсних процесів в ізоляції обмоток за допомогою ланкових схем заміщення	05.06.2021-05.08.2021	
6	Моделювання імпульсних процесів в обмотках асинхронних двигунів обмотка яких виготовлена з різних матеріалів	06.08.2021-06.09.2021	
7	Порівняльний аналіз розрахунку впливових процесів з метою визначення дефектів ізоляції різного ступеню	07.09.2021-07.10.2021	
8	Оформлення графічної частини магістерської дисертації	08.10.2021-08.11.2021	
9	Висновки по завершеній роботі	09.11.2021-10.12.2021	

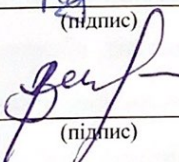
Студент


(підпис)

Владислав ІГНАТЬЄВ

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи


(підпис)

Вадим ЧУМАК

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи. Магістерська дисертація складається зі вступу, 5 розділів включно зі стартап-проектом, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 129 сторінки основного тексту, в тому числі 33 рисунки, 22 таблиці та 31 бібліографічне найменування за переліком посилань.

В даній магістерській дисертації проведений аналіз пошкоджень електричних машин та методів їх діагностики. Проведений опис і вибір конструкції асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором серії 4А. Проведено розрахунок асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, обмотка якого виготовлена з алюмінію та міді та подвійної білячої клітки виготовленої з алюмінію. Створено програмний модуль для обчислення імпульсних процесів в ізоляції обмоток за допомогою ланкових схем заміщення. Модульовано імпульсні процеси в обмотках асинхронних двигунів обмотка яких виготовлена з різних матеріалів. Проведено порівняльний аналіз розрахунку впливових процесів з метою визначення дефектів ізоляції різного ступеню. Зроблено висновки по завершній роботі.

Актуальність теми. У електродвигунів після ремонту з розбиранням та заміною деталей надійність роботи часто знижується. Під час ремонту проблематично виявити приховані дефекти, такі, як дефекти стрижнів короткозамкненого ротора або порушення ізоляції обмотки статора.

Вибір стратегії та методів діагностування асинхронних двигунів визначається низкою факторів. Першорядне значення має кінцева мета діагностування, яка залежить від того, на якому етапі життєвого циклу визначається технічний стан двигуна: на етапі виробництва, експлуатації чи ремонту.

В даний час існує потреба діагностики стану асинхронних електродвигунів у процесі їх роботи. Своєчасно виявлене пошкодження дозволить уникнути подальшого розвитку процесу, зменшити час відновлення, скоротити витрати на обслуговування, уникнути простоїв обладнання, підвищити ефективність роботи двигунів та виробничих механізмів. Тому діагностика асинхронних двигунів є дуже важливим науково-практичним завданням [4].

Метою магістерської дисертації є дослідження процесів в обмотках електричних машин, що впливають на надійність та відмово стійкість роботи електричних машин.

Об'єктом дослідження є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серії 4А потужністю 30 кВт, обмотка яких виготовлена з різних матеріалів, які безпосередньо впливають на перехідні процеси в обмотках.

Предметом дослідження є комутаційні процеси в обмотках асинхронних двигунів.

Методологія досліджень в магістерській дисертації ґрунтується на використанні програмно системного модулю MATLAB Simulink для вирішення фізичних задач ланкових схем заміщення обмоток електричних машин, з моделюванням дефектів повздовжньої та поперечної ізоляції.

Наукова новизна отриманих результатів:

1) Вперше отримано математичну модель комутаційних процесів в обмотках електричних машин на основі багатоланкової схеми заміщення.

2) Розроблена математична модель в програмному модулі MATLAB з розширенням Simulink дозволяє моделювати різні види дефектів в ізоляції обмоток і оцінювати ступінь їх складності.

Публікації за тематикою досліджень: 1.Чумак В.В., Стульніченко А.С., Цивінський С.С., Ігнат'єв В.О. Діагностика ізоляції електричних машин з використанням комутаційних процесів // «Енергетика: економіка, технології, екологія». – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021 р. - № 4. – С. 56-64. 2. Чумак В.В., Ігнат'єв В.О. Діагностика асинхронних двигунів швидкоплинними напругами // «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». - Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 204-209.

Ключові слова: асинхронний двигун, діагностування, виткова ізоляція, міжвиткова ізоляція, відмовостійкість, статистика відмов, короткозамкнений ротор, біляча клітка, статор.

ABSTRACT

Structure and scope of work. The master's dissertation consists of an introduction, 5 sections including a startup project, conclusions, list of sources and applications used. The total volume of the work is 129 pages of the main text, including 33 figures, 22 tables and 31 bibliographic titles according to the list of references.

In this master's dissertation the analysis of damages of electric machines and methods of their diagnostics is carried out. The description and selection of the design of an induction motor with a short-circuited rotor series 4A. The calculation of an induction motor with a short-circuited rotor, the winding of which is made of aluminum and copper and a double bleaching cage made of aluminum. A software module for calculating pulse processes in the insulation of windings using link substitution circuits has been created. Pulse processes in the windings of induction motors are modulated, the winding of which is made of different materials. The comparative analysis of calculation of influential processes for the purpose of definition of isolation defects of various degree is carried out. Conclusions are made on the completed work.

Relevance of the topic. The reliability of electric motors is often reduced after repair with disassembly and replacement of parts. During repairs, it is problematic to detect hidden defects, such as defects in the short-circuited rotor rods or violations of the stator winding insulation.

The choice of strategy and methods for diagnosing induction motors is determined by a number of factors. Of paramount importance is the ultimate goal of diagnosis, which depends on at what stage of the life cycle the technical condition of the engine is determined: at the stage of production, operation or repair.

Currently, there is a need to diagnose the state of induction motors in the process of their operation. Timely detection of damage will avoid further development of the process, reduce recovery time, reduce maintenance costs, avoid equipment downtime, increase the efficiency of engines and production mechanisms. Therefore, the diagnosis of induction motors is a very important scientific and practical task [4].

The purpose of the master's thesis is to study the processes in the windings of electric machines that affect the reliability and failure stability of electric machines.

The object of research is asynchronous motors with a short-circuited rotor series 4A with a capacity of 30 kW, the winding of which is made of different materials that directly affect the transients in the windings.

The subject of research is switching processes in the windings of induction motors.

The research methodology in the master's thesis is based on the use of software and system module MATLAB Simulink to solve physical problems of circuit circuits for replacement of windings of electric machines, with modeling of defects of longitudinal and transverse insulation.

The scientific novelty of the obtained results:

1) For the first time a mathematical model of switching processes in the windings of electric machines based on a multi-link substitution scheme is obtained.

2) The developed mathematical model in the MATLAB software module with Simulink extension allows to model various types of defects in insulation of windings and to estimate degree of their complexity.

Research publications: 1. Chumak V.V., Stulnichenko A.S., Tsyvinsky S.S., **Ihnatiev V.O.** Diagnosis of insulation of electric machines using switching processes // "Energy: Economics, Technology, Ecology". - Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 2021 - № 4. - P. 56-64. 2. Chumak V.V., **Ihnatiev V.O.** Diagnosis of asynchronous motors by high-voltage voltages // "Modern problems of electrical engineering and automation". - Kyiv: FEA KPI them. Igor Sikorsky, 2021. - P. 204-209.

Keywords: induction motor, diagnostics, coil isolation, inter coil isolation, fault tolerance, failure statistics, short - circuited rotor, bleaching cage, stator.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун;

АМ – асинхронна машина;

ЕМ – електрична машина;

ЕМПЕ – електромеханічний перетворювач енергії;

КЗ – коротке замикання;

ЗО – запам'ятовуючий осцилограф.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБРУНТУВАННЯ ТЕМИ РОБОТИ ТА ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	14
1.1 Статистика відмов та аналіз пошкоджень електричних машин.....	15
1.2 Конструктивні елементи ЕМПЕ, що впливають на надійність.....	21
1.3 Методи діагностики асинхронних електродвигунів.....	27
1.4 Фізичні принципи імпульсних перенапруг.....	30
1.5 Імпульсні методи контролю.....	32
1.6 Фізичні процеси в обмотці за імпульсних впливів.....	33
1.7 Огляд та аналіз конструкції асинхронного двигуна з коротко- замкненим ротором.....	35
1.8 Вибір та опис конструкції асинхронного двигуна.....	40
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКО- ЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ТА З ПОДВІЙНОЮ БІЛЯЧОЮ КЛІТКОЮ.....	44
2.1 Розрахунок асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, обмотка якого виготовлена з алюмінію.....	44
2.2 Розрахунок асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, обмотка якого виготовлена з міді.....	61
2.3 Розрахунок асинхронного двигуна з подвійною білячою кліткою, яка виготовлена з алюмінію.....	79
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЇ СХЕМИ ПЕРЕВІРКИ ЯКІСНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ОБМОТКА ЯКИХ ВИГОТОВЛЕНА З РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	98
3.1 Дослідження перехідних процесів у головній обмотці якоря асинхронного електродвигуна 4А225М8.....	98
3.2 Дослідження перехідних процесів в першій секції обмотки статора асинхронного електродвигуна серії 4А225М8.....	106
3.3 Дослідження перехідних процесів в обмотці статора з урахуванням матеріалу та положення ротору.....	110
РОЗДІЛ 4 СТАРТАП ПРОЕКТ.....	116
4.1 Маркетинговий аналіз.....	116

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	118
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	119
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	123
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	125
ВИСНОВКИ.....	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	127

ВСТУП

В процесі розвитку виробництва з'явилася необхідність у різних двигунах, які склали основну масу електричних машин, що обертаються, на різних підприємствах. Процес їх роботи та параметри від початку експлуатації та до чергового ремонту необхідно постійно контролювати доступними та сучасними засобами діагностики, і чим раніше буде здійснюватися така діагностика, тим більше шансів визначати потенційні поломки, що насуваються в процесі роботи.

Частка асинхронних двигунів у загальній кількості електродвигунів, що працюють на змінному струмі стандартної частоти, становить менше ніж 30%. Справа в тому, що основну масу (близько 50%) складають малопотужні двигуни постійного струму (наприклад, мікродвигуни, що приводяться у обертання за допомогою батарей). Проте досить великі асинхронні двигуни широко використовуються в промисловості [7].

Якщо взяти будь-яку галузь, то там можна зустріти різноманітні типи асинхронних електродвигунів. Вони користуються широким попитом через їх досить високі технічні та електричні характеристики: високий ККД, досить великий коефіцієнт активної потужності, прості конструктивні особливості, тощо. Двигуни постійного струму витрачають більше електроенергії, вартість їх дуже висока, особливо великих електричних машин. Тому асинхронні двигуни, незважаючи на те, що вони не можуть так плавно регулюватися, як двигуни постійного струму, мають свої переваги, особливо на виробництві [12].

Будь-який двигун, синхронний, асинхронний або постійного струму – всі вони можуть ламатися в процесі експлуатації за рахунок різних негативних чинників, тому необхідна профілактика їх технічного стану. І якщо вчасно не вжити заходів, це може призвести до великих матеріальних збитків.

У зв'язку з цим діагностична система контролю різних параметрів електродвигунів змінного струму має здійснювати виявлення несправностей на ранніх етапах їх виникнення та розвитку. Необхідність таких обстежень та тестів особливо викликано великою кількістю дорогих асинхронних електродвигунів, у тому числі дуже великої потужності, і для цього існують спеціальні компанії, що

займаються контролем та обслуговуванням не тільки електродвигунів, а й іншого електроустаткування.

Досвід експлуатації асинхронних двигунів в Україні та інших розвинених країнах дав знати, що легше у межах планово-попереджувальної системи їх технічного обслуговування дбати про контроль їх параметрів, здійснювати вчасно діагностику всіх їх систем та вузлів, ніж після закінчення певного часу усувати наслідки не виявлених несправностей та зазнавати великих фінансових втрат. Важливим етапом тут є прогнозування їх технічного стану за допомогою найсучасніших засобів діагностування. Особливо це стосується дефектів прихованого характеру та найуразливіших частин машини (обмоток) [8].

Актуальність теми. У електродвигунів після ремонту з розбиранням та заміною деталей надійність роботи часто знижується. Під час ремонту проблематично виявити приховані дефекти, такі, як дефекти стрижнів короткозамкненого ротора або порушення ізоляції обмотки статора.

Вибір стратегії та методів діагностування асинхронних двигунів визначається низкою факторів. Першорядне значення має кінцева мета діагностування, яка залежить від того, на якому етапі життєвого циклу визначається технічний стан двигуна: на етапі виробництва, експлуатації чи ремонту.

В даний час існує потреба діагностики стану асинхронних електродвигунів у процесі їх роботи. Своєчасно виявлене пошкодження дозволить уникнути подальшого розвитку процесу, зменшити час відновлення, скоротити витрати на обслуговування, уникнути простоїв обладнання, підвищити ефективність роботи двигунів та виробничих механізмів. Тому діагностика асинхронних двигунів є дуже важливим науково-практичним завданням [4].

Метою магістерської дисертації є дослідження процесів в обмотках електричних машин, що впливають на надійність та відмово стійкість роботи електричних машин. Для досягнення поставленої цілі були вирішені наступні **задачі**:

- Аналіз літератури за тематикою пошкоджень електричних машин та методів їх діагностики.
- Вибір та опис конструкції асинхронного двигуна за короткозамкненим ротором.

- Розрахунок АД з короткозамкненим ротором обмотка якого виготовлена з алюмінію та міді.
- Розрахунок АД з подвійною білячою кліткою яка виготовлена з алюмінію.
- Створено програмний модуль для обчислення імпульсних процесів в ізоляції обмоток за допомогою ланкових схем заміщення.
- Модельовано імпульсні процеси в обмотках електричних машин.
- Зроблено порівняльний аналіз розрахунку впливових процесів з метою визначення дефектів ізоляції різного ступеню.

Об'єктом дослідження є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серії 4А потужністю 30 кВт, обмотка яких виготовлена з різних матеріалів, які безпосередньо впливають на перехідні процеси в обмотках.

РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБРУНТУВАННЯ ТЕМИ РОБОТИ ТА ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

З давніх часів при виготовленні виробів для забезпечення надійності закладався певний запас міцності, чим і гарантувалася довговічність роботи. Однак це призводило до зайвих витрат матеріалів, збільшення габаритів, маси і вартості виробів.

З розвитком електрифікації, завдання забезпечення надійного постачання об'єктів електроенергією вирішувалося, в основному, шляхом резервування (паралельна робота трансформаторів та електричних генераторів, об'єднання розрізнених енергетичних об'єктів у єдину енергетичну систему тощо) [7].

Нові проблеми надійності виникли з розвитком авіації, далекого плавання, ракетної та космічної техніки. Спочатку завдання надійності тут вирішувалися традиційними методами. Однак цей шлях незабаром став малоефективним, оскільки призводив до різкого збільшення габаритів та маси, що для авіаційної та космічної техніки є неприйнятним. Тому для підвищення надійності стали використовувати нові методи, засновані на теорії ймовірностей і математичної статистики.

Протягом кількох попередніх десятиліть електромашинобудування розвивалося в напрямку підвищення використання машин, збільшення навантажень активних матеріалів і зниження маси машини на одиницю потужності. Паралельно з цим розроблялися та впроваджувалися нові типи активних, конструкційних та ізоляційних матеріалів, покращувалася вентиляція, з'явилися більш інтенсивні методи охолодження машин. Однак запас міцності, а разом з тим і стійкість до перевантажень поступово знижались. В результаті з'явилася тенденція загального зниження надійності електричних машин.

Проблема надійності технічних систем за останні два-три десятиліття різко загострилася, що пояснюється такими об'єктивними причинами:

- різким збільшенням складності технічних систем, що включають сотні тисяч і навіть мільйони окремих вузлів та елементів;
- екстремальністю умов, у яких експлуатується виріб (високі швидкості, значні прискорення, високі температури та тиски, вібрація, підвищена радіація тощо);

- інтенсивністю режимів роботи системи або окремих вузлів (при високих температурах, частотах обертання, тисках, щільності струму тощо);
- підвищенням вимог до якості роботи (висока точність, ефективність тощо);
- збільшенням відповідальності функцій, що виконуються системою, високою економічною та технічною ціною відмови;
- повною чи частковою автоматизацією і, як наслідок, виключенням безпосереднього контролю людиною функціонування системи та її елементів [9].

1.1 Статистика відмов та аналіз пошкоджень електричних машин

Традиційний шлях дослідження надійності електричних машин - дослідження статистичних даних про відмови, тобто порушення працездатності виробу. При початковому вивченні статистики відмов та аналізі пошкодження базуватимемося на диференціації відмов за типами електричних машин, «слабким» вузлом і причинами відмов.

При дослідженні надійності систем або окремих технічних виробів користуються наступним прийомом: система розбивається на блоки, потім визначаються надійність кожного блоку і надійність, що є результатом всієї системи. Система розбивається на блоки на підставі аналізу функціонального призначення та фізичних процесів, що відбуваються в системі та блоках, проте немає сенсу досліджувати всі блоки, що входять до системи, тому що їх надійність зазвичай сильно відрізняється. Відмови деяких із блоків практично неможливі та їх облік щодо результуючої надійності лише ускладнює експерименти і розрахунки, мало змінюючи остаточний результат. Тому при складанні структурних схем користуються методом «слабких ланок», виділяючи ті блоки, надійність яких в даних умовах мінімальна [5].

У цьому аспекті розглянемо основні типи електричних машин. В асинхронних двигунах при дослідженні на надійність слід виділяти «слабкі ланки»: обмотку статора і підшипниковий вузол. У синхронних машинах слід виділяти обмотки статора та ротора, щітковий апарат та контактні кільця, підшипники (або підп'ятники), системи охолодження та пожежогасіння. Машину постійного струму, з точки зору її надійності, представляють таку, що складається з наступних вузлів: колекторно-

щітковий і підшипниковий вузли, обмотки якоря, збудження, додаткових полюсів та компенсаційну обмотку.

Підхід до вивчення надійності електромашинних агрегатів аналогічний. При оцінці надійності електричної машини, що працює в будь-якій системі, необхідно враховувати надійність пуско-регулюючої апаратури.

Відмови електричних машин можна розділити на конструкційні, технологічні (виробничі) та експлуатаційні. Конструкційні відмови виникають через недосконалість (незнання) або порушення правил проектування та конструювання електричної машини, технологічні - через порушення процесу виробництва або ремонту, експлуатаційні - через неправильне застосування, відсутність захисту, порушення умов експлуатації електричних машин. Відмови електричних машин можуть бути обумовлені старінням матеріалів та зносом вузлів, а також випадковою концентрацією навантаження, передбачати яку практично неможливо [6].

Довга та кропітка праця зі збору статистичних даних про відмови та їх аналіз необхідна для розробки та уточнення методик розрахунку надійності електричних машин, забезпечення та підвищення надійності, удосконалення технології виготовлення, розробки методик вибору електричних машин, створення та покращення систем захисту та правил технічної експлуатації.

Нижче наведено статистичний аналіз надійності роботи асинхронних машин.

Відмови асинхронних двигунів відбуваються через пошкодження обмоток і розподіляються таким чином: перевантаження або перегрів статора електродвигуна - 31%, міжвиткове замикання - 15%, пошкодження підшипників - 12%, пошкодження обмоток статора чи ізоляції - 11%, нерівномірний повітряний зазор між статором і ротором - 9% та ін [4].



Рисунок 1.1 Джерела розвитку пошкоджень в електричних машинах

Електричні несправності двигуна.

Електричні несправності двигуна завжди пов'язані з обмоткою.

1. Міжвиткове замикання може виникнути при погіршенні ізоляції в межах однієї обмотки. Можливі причини: перегрів обмотки, неякісна ізоляція, зношування ізоляції внаслідок вібрації. Основний метод діагностики - порівняння опору та робочого струму всіх трьох обмоток. Перші симптоми міжвиткового замикання - підвищене нагрівання двигуна та падіння моменту на валу. При цьому по одній із фаз струм більше, ніж по двох інших.

2. Замикання між обмотками відбувається через зміщення обмоток, механічної вібрації та ударів. За відсутності належного електричного захисту може виникнути коротке замикання та пожежа.

3. Замикання обмотки на корпус. При несправності електродвигун може продовжувати працювати, якщо неправильно виконані заземлення та захист від короткого замикання. Однак в роботі він буде смертельно небезпечний, оскільки його потенціал перебуватиме під фазною напругою.

4. Обрив обмотки. Ця несправність рівнозначна зникненню фази. Якщо обрив відбувається в роботі, то двигун різко втрачає потужність і починає перегріватися. При правильно виконаному захисті двигун відключиться, оскільки струм інших фаз буде підвищений [3].

Механічні несправності електродвигуна.

Механічні несправності електродвигуна пов'язані з його конструкцією.

1. Зношування та тертя в підшипниках. Проявляється у підвищенні механічної вібрації та шуму при роботі. В цьому випадку потрібна заміна підшипників, інакше несправність призведе до перегріву та падіння продуктивності двигуна.

2. Прокручування ротора на валу. Ротор може обертатися в магнітному полі статора, а вал буде нерухомий. Потрібна механічна фіксація ротора на валу.

3. Зачеплення ротора за статор. Ця проблема пов'язана з механічною поломкою підшипників, їх посадкових місць або корпусу двигуна. Крім того, подібна несправність призводить до пошкодження статора обмотки. Майже не підлягає ремонту.

4. Пошкодження корпусу двигуна. Може відбуватися через удари, підвищене навантаження, неправильне кріплення або низьку якість двигуна. Ремонт є трудомістким через труднощі співвісної установки переднього та заднього підшипників.

5. Прокручування або пошкодження крильчатки обдуву. Незважаючи на те, що двигун продовжить працювати, він перегріватиметься, що суттєво скоротить термін його служби. Крильчатку необхідно закріпити (для цього використовується шпонка або стопорне кільце) або замінити [3].

Причини відмов можна диференціювати так: технологічні - близько 35%; експлуатаційні (головним чином незадовільний захист електродвигунів) - 50% і конструкційні 15%.

Ушкодження асинхронних двигунів в залежності від потужності показують, що в двигунах:

- невеликої потужності (0,75-50 кВт) найчастіше відбуваються дефекти ротора та підшипників;
- середньої потужності (понад 50 і до 200 кВт) – дефекти статора та ротора;
- для всіх асинхронних двигунів потужністю більше 200 кВт пошкодження статора становлять у середньому 45-55% всіх ушкоджень [7].

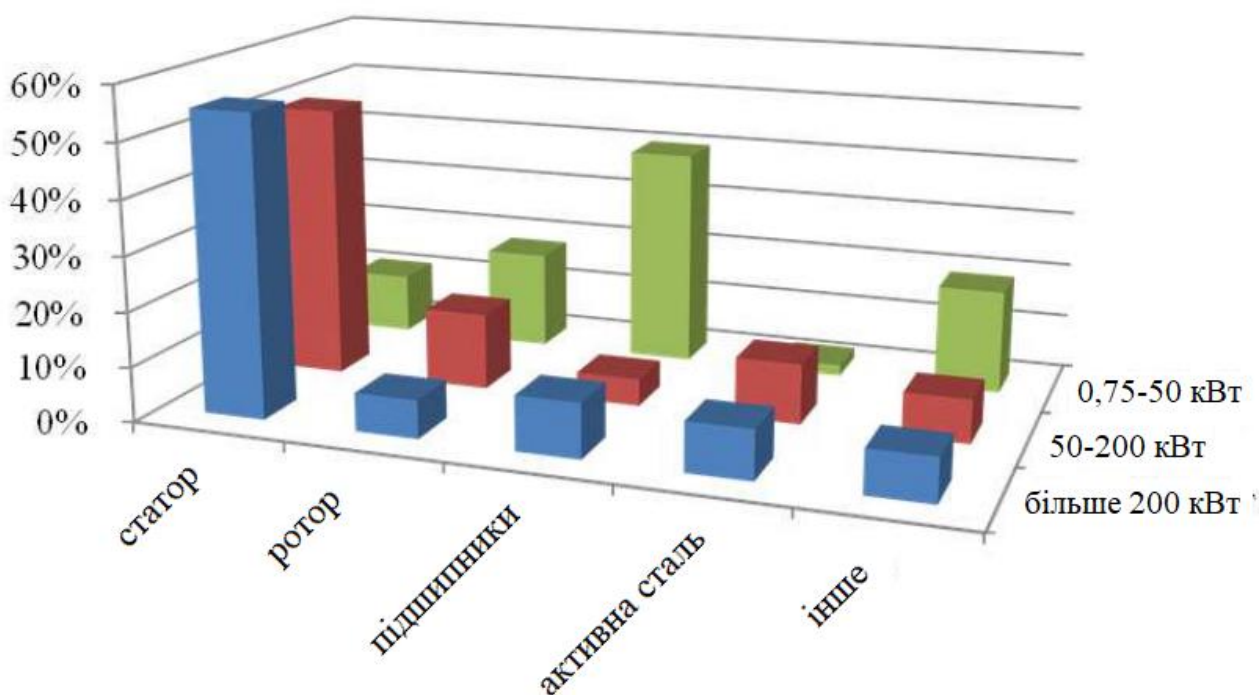


Рисунок 1.2 Пошкодження асинхронних двигунів залежно від потужності

Якість обмоток асинхронних двигунів залежить від властивостей обмотувальних проводів та ізоляційних матеріалів, від сумісності обмотувальних проводів та просочувальних складів. Застосовувані на заводах методи контролю міжвиткової ізоляції, недостатні для запобігання відмов при експлуатації.

Під незадовільним захистом слід розуміти відсутність теплового захисту або його відмову. Дослідження показали, що розкид часу спрацьовування теплового захисту, навіть неналаштований, практично не впливає на аварійність. При захисті електродвигунів плавкими вставками, що має місце у більшості випадків, вони

відмовляють внаслідок роботи на двох фазах. Матеріали експлуатації свідчать, що 80 % аварій (внаслідок роботи на двох фазах) відбувається через відсутність теплового захисту і лише 20% від її несправності [6].

Одна з найпоширеніших причин підвищеної інтенсивності відмов електродвигунів - вібрація агрегату, яка тягне за собою відмови підшипників, обмотки, а іноді й тріщини в чавунній оболонці електродвигуна та в лапах. Підвищена вібрація пояснюється незадовільним з'єднанням електродвигуна і виконавчого механізму, залишковою неврівноваженістю мас, що обертаються, підвищеним зазором між тілами кочення і кільцями шарикопідшипника, спотворенням форми посадкових місць під установку підшипника або їх не співвісності, овальністю кілець шарикопідшипника та інші.

У ряді випадків до відмови призводить невідповідність конструктивного виконання електродвигунів та умов експлуатації, наприклад застосування електродвигунів захищеного виконання в цехах з підвищеним вмістом чавунного пилу. Це істотно збільшує кількість відмов порівняно із застосуванням в тих же умовах електродвигунів закритого виконання, що обдувається.

Рівномірне нагрівання всього двигуна вище допустимої норми може вийти в результаті тривалого перевантаження та погіршення умов охолодження. Підвищений нагрів викликає передчасне зношування ізоляції обмоток.

Нагрів обмотки статора, який зазвичай супроводжується сильним гудінням, зменшенням швидкості обертання двигуна та нерівномірними струмами в його фазах, а також запахом перегрітої ізоляції. Ця несправність може виникнути в результаті неправильного з'єднання між собою котушок в одній фазі, замикання обмотки на корпус у двох місцях, замикання між двома фазами, короткого замикання між витками в одній з фаз обмотки статора [10].

При замиканні в обмотках двигуна магнітного поля, що обертається, в короткозамкненому контурі буде наводитися ЕРС, яка створить струм великої величини, що залежить від опору замкнутого контуру. Пошкоджена обмотка може бути знайдена за величиною виміряного опору, при цьому пошкоджена фаза матиме менший опір ніж справні. Ушкоджену фазу можна також визначити методом вимірювання струму у фазах, якщо до двигуна підвести знижену напругу.

При з'єднанні обмоток у зірку струм у пошкодженій фазі буде більшим, ніж в інших. Якщо обмотки з'єднані в трикутник, лінійний струм у двох дротах, до яких приєднана пошкоджена фаза, буде більшим, ніж у третьому дроті. При визначенні зазначеного пошкодження двигуна з короткозамкненим ротором останній може бути загальмованим або обертатися, а у двигунів з фазним ротором обмотка ротора може бути розімкнена. Пошкоджені котушки визначають за падінням напруги на їх кінцях: на пошкоджених котушках падіння напруги буде менше, ніж на справних.

Нагрів активної сталі статора відбувається через вигоряння та оплавлення сталі при коротких замиканнях в обмотці статора, а також при замиканні листів сталі внаслідок зачеплення ротора об статор під час роботи двигуна або внаслідок руйнування ізоляції між окремими листами сталі. Ознаками зачеплення ротора об статор є дим, іскри та запах гару; активна сталь у місцях зачеплення набуває вигляду полірованої поверхні; з'являється гудіння, що супроводжується вібрацією двигуна. Причиною зачеплення є порушення нормального зазору між ротором і статором в результаті їх неправильної установки, великого вигину валу, деформації сталі статора або ротора, сильної вібрації [14].

Ушкодження ізоляції обмоток можуть відбутися в результаті тривалого перегріву двигуна, зволоження та забруднення обмоток, попадання на них металевого пилу, стружок, а також внаслідок природного старіння ізоляції. Пошкодження ізоляції можуть спричинити замикання між фазами та витками окремих котушок обмоток, а також замикання обмоток на корпус двигуна.

Зволоження обмоток відбувається у разі тривалих перерв у роботі двигуна, при безпосередньому попаданні в нього води або пари внаслідок зберігання двигуна у сирому неопалювальному приміщенні тощо. Необхідно суворо дотримуватись термінів оглядів та планово-попереджувальних ремонтів двигунів.

1.2 Конструктивні елементи ЕМПЕ, що впливають на надійність

Незважаючи на різноманітність призначення, конструкційних форм, матеріалів, навантажень, умов експлуатації та інших факторів, до процесу зносу схильні практично всі конструктивні вузли ЕМПЕ.

Одним з основних заходів визначення несправності деталі або вузла є встановлення граничних значень зносу чи інших параметрів, що характеризують їхню працездатність. Якщо знос та інші параметри ще не вийшли за свої граничні значення, вважається, що деталь або вузол працює задовільно. В ЕМПЕ можна виділити ряд конструктивних елементів, які найчастіше схильні до прояву несправностей або дефектів.

До явищ ушкоджень таких елементів відносяться:

1. Старіння, дефекти та пошкодження ізоляції обмоток електричних машин;
2. Пошкодження та дефекти обмоток роторів електричних машин;
3. Зноси та пошкодження підшипників електричних машин;
4. Зноси та пошкодження активної сталі електричних машин ;
5. Зноси та пошкодження колекторів, контактних кілець та щіткового механізму електричних машин;
6. Зноси та пошкодження апаратів управління та захисту електричних машин [7].

З наведених вище даних випливає, що стан обмоток роторів і якорів необхідно контролювати в процесі експлуатації електричних машин через певний період часу.

Необхідно підкреслити, що вихід з ладу ЕМПЕ через старіння, дефект чи пошкодження ізоляції обмоток трапляється у 85% несправностей.

1.2.1 Старіння, дефекти та пошкодження ізоляції обмоток електричних машин.

Обмотки є найбільш важливою та складною за умовами роботи частиною електричних машин та апаратів. Вихід обмоток з ладу здебільшого обумовлений ушкодженнями ізоляції. Визначенням причин виходу з ладу обмоток електричних машин та апаратів у різних галузях народного господарства займалися багато дослідників.

На обмотки і особливо на їх ізоляцію у процесі експлуатації діють електромагнітні сили, вібрація, температура довкілля та інші чинники. Спільна дія перерахованих вище факторів призводить до незворотних процесів зміни структури та хімічного складу ізоляції, тобто до старіння ізоляції. Крім того, в ізоляції можуть бути дефекти, що виникають як у процесі виготовлення матеріалів, з яких складається ізоляційна конструкція електричної машини або апарату (наприклад, шпилькові отвори або сторонні включення в шарі ізоляційного покриття обмотувальних

проводів), так і при виготовленні самої ізоляційної конструкції. Особливо часто при укладанні обмоток ушкоджується виткова ізоляція, що значно скорочує термін їх служби. Використання при укладанні обмоток металевих інструментів часто призводить до продавлювання та прорізання ізоляційного шару проводів. Різкі перегини обмотувального дроту при намотуванні також сприяють утворенню в ізоляції значної механічної напруги, внаслідок чого виникають тріщини [13].

Розвиток дефектів зазвичай призводить до пошкоджень ізоляційних конструкцій в перший період роботи після введення електричних машин в експлуатацію. Як правило, такі ушкодження виникають у вигляді пробоя міжвиткової ізоляції. На надійність роботи обмоток негативно впливає розтяг проводів при намотуванні котушкових груп на намотувальних верстатах. Цей розтяг може досягати 5-7% довжини проводу.

У процесі роботи на обмотки електричних машин впливають електродинамічні та механічні зусилля, що досягають великих значень при пусках та реверсуванні. Так, пускові струми коротко замкнутих електродвигунів перевищують номінальні в 5-7 разів, в зв'язку з чим на обмотки діють значні електродинамічні сили, значення яких пропорційні квадрату струмів. Під впливом цих зусиль в ізоляції виникають тріщини, і навіть механічні ушкодження.

Особливо небезпечною для ізоляції обмоток електричних машин є вібрація, що виникає у зв'язку з невірноваженістю частин, що обертаються, вигином валу, при зносі підшипників, при обриві стрижнів коротко замкнутих обмоток роторів і з інших причин. Вібрація може передаватися на електричні машини з боку механізмів, приводом яких вони є. Викликані вібрацією сили діють протягом усього періоду роботи електричних машин і призводять до втрати механічної та електричної міцності ізоляції обмотувальних дротів та компаунду, яким просочують обмотку для її цементації. Все це може призвести до пошкодження ізоляції. Вібрація може скоротити термін служби ізоляції кілька разів [9].

До зносу виткової ізоляції може призводити тертя між витками і витками об корпусну ізоляцію, що виникає в електричних машинах через різні коефіцієнти теплового розширення міді в обмотках і активної сталі сердечників. Зазвичай таке тертя відбувається під час пуску і роботи, а також при охолодженні після зняття навантаження.

Певний вплив на технічний стан електричних машин оказує тепловий стан ізоляції. Важливими характеристиками ізоляційних конструкцій електричних машин та апаратів є теплостійкість і нагрівостійкість. Теплостійкість характеризує здатність ізоляційних матеріалів зберігати свої властивості при короточасних нагріваннях, а нагрівостійкість - зберігати властивості без істотного погіршення в тривалий період, якщо температура не перевищує допустимих значень, встановлених для даного класу ізоляції. Нагрівостійкість переважно визначається швидкістю старіння ізоляції.

Найважливішим показником, який використовується при експлуатації, діагностуванні та прогнозуванні працездатності ізоляції є термін її служби. Особливу увагу з боку дослідників було приділено встановленню залежності терміну служби ізоляції від температури, при якій вона працює. В результаті було сформульовано «правило восьми градусів». Відповідно до цього правила підвищення температури на кожні вісім градусів призводить до скорочення терміну служби ізоляції вдвічі. Аналітично «правило восьми градусів» записується наступним виразом:

$$T = T_0 * \epsilon^{-\vartheta/\Delta\vartheta} = T_0 * \epsilon^{-0,0866\vartheta} \quad (1.1)$$

де ϑ - температура нагріву ізоляції; T - термін служби ізоляції, років; T_0 - термін служби ізоляції при температурі $\vartheta = 0$, років, $\Delta\vartheta$ - підвищення температури, при якій термін служби скорочується в два рази [8].

У логарифмічній формі попереднє рівняння набуває вигляду:

$$\ln T = \ln T_0 - k\vartheta \quad (1.2)$$

де $k = \ln 2 / \Delta\vartheta = 0,693 / \Delta\vartheta$.

З цього рівняння видно, що логарифм терміну служби ізоляції має лінійну залежність від температури.

Незважаючи на те, що вираз встановлено на підставі великого обсягу експериментального матеріалу, його використання при прогнозуванні ресурсу роботи електрообладнання у багатьох випадках не призводить до отримання достатньо достовірних результатів.

Іншим шляхом визначення терміну служби ізоляції з урахуванням впливу температури є використання загальних законів кінетики хімічних реакцій, встановлених Вант Гоффом і Арреніусом.

Вант Гофф та Арреніус встановили наступну залежність швидкості хімічних реакцій від температури:

$$\ln k = B/\Theta + A \quad (1.3)$$

де k - постійна швидкості реакції; Θ - абсолютна температура; A , B - постійні коефіцієнти.

Окислювальні процеси, що відбуваються в ізоляції, відносяться до мономолекулярних реакцій, для яких постійну швидкості реакції k можна визначити з рівняння

$$k = 1/(t * \ln(C_0/C)) \quad (1.4)$$

де C_0 - початкова концентрація молекул, що не прореагували;

C - концентрація молекул, що не прореагували в аналізований момент часу;

t – час, ч.

Коефіцієнти A і B пов'язані з постійними, що характеризують хімічний склад і структуру речовини, що бере участь в реакції, наступними співвідношеннями:

$$B = -E_a/R; A = \ln(PZ) \quad (1.5)$$

де R - універсальна газова постійна (8,317 Дж/(град-моль); E_a - енергія активації (надлишкова кількість енергії, котрою повинна володіти молекула для подолання енергетичного бар'єру, щоб бути здатною до цієї хімічної взаємодії); Z - число зіткнень між реагуючими молекулами за одиницю часу; P - фактор ймовірності належної орієнтації молекул під час зіткнення [5].

Величину P визначають з виразу:

$$P = e^{\Delta S/R} \quad (1.6)$$

де ΔS - ентропія активації (величина, що характеризує частку загальної кількості зіткнень, у яких молекули орієнтовані належним чином).

З наведених вище залежностей рівняння Гоффа - Арреніуса записується наступним чином:

$$k = A * e^{-E_a/R\Theta} \quad (1.7)$$

У цьому виразі постійна швидкості реакції є величиною, що визначає відносне число ефективних зіткнень частинок, що завершуються хімічною взаємодією. При використанні рівняння Вант Гоффа - Арреніуса з ціллю встановлення часу, протягом якого ізоляція досягає своєї мети граничного стану (терміну служби), після відповідних перетворень та спільного вирішення рівнянь отримаємо вираз для терміну служби ізоляції:

$$\ln T = E_a/R\Theta - G \quad (1.8)$$

$$G = \ln A - \ln C_0 / C \quad (1.9)$$

У таблиці 1 наведено середні значення постійних E_a , G та B для ізоляційних матеріалів різних класів нагрівостійкості ізоляції.

Якщо відомий термін служби ізоляції T_1 при температурі Θ_1 то термін служби T_2 при температурі Θ_2 можна визначити за формулою:

$$T_2 = T_1 * e^{(E_a/R) * (1/\Theta_2 - 1/\Theta_1)} \quad (1.10)$$

До електричного старіння під дією електричних полів схильна ізоляція високовольтних машин, причому практичний вплив полів виявляється в ізоляції обмоток електричних машин напругою 6 кВ і вище. Особливу загрозу для пропрацювавших певний час електричних машин, ізоляція котрих має певний ступінь старіння, мають комутаційні перенапруги, так як електрична міцність їх ізоляції знижена. Комутаційні перенапруги можуть перевищувати амплітудне значення напруги живлення в 7 разів [19].

Таблиця 1.1 Значення постійних при визначенні терміну служби ізоляції

Клас ізоляції	E_a , Дж/моль	G	$B \cdot 10^{-4}, ^\circ\text{C}$
A	7,90	15,3	0,95
E	8,19	15,1	0,98
B	8,48	15,5	1,02
F	10,55	19,7	1,27
H	12,89	24,2	1,55
C	12,89	21,8	1,55

Великий вплив на прискорення процесу старіння ізоляції дає волога. Зазвичай проникнення води в ізоляцію обмоток електричних машин відбувається в неробочі періоди, особливо при охолодженні машин, коли тиск у порах та капілярах ізоляції трохи нижче атмосферного. Проникнення води викликає гідролітичне руйнування ізоляційних матеріалів, особливо тих що мають волокнисту структуру. Періодичне проникнення води в ізоляцію та її видалення підсушуванням під час роботи електричних машин сприяє розвитку пор в ізоляції. При цьому просочення обмоток компаундуєними лаками лише уповільнює процес зволоження та підсушування ізоляції, а не виключає його. Зволоження є однією з головних причин пробою ізоляції

обмоток електричних машин, особливо намотаних дротами з бавовняним обплетенням. Волога, що проникає в пори і тріщини, значно знижує електричну міцність ізоляції. небезпечним є також зволоження забруднених обмоток. При зволоженні різко знижується напруга пробою в місцях дефектів і цим самим створюються умови виникнення дугових розрядів при порівняно низьких значеннях перенапруг. Експериментальні дослідження показали, що при зволоженні обмоток з дефектами в ізоляції, опір ізоляції знижується в кілька десятків разів і при цьому різко збільшуються струми витoku через ізоляцію. У цих випадках через дефекти в ізоляції під дією напруги проходить струм, що руйнує ізоляцію, внаслідок чого виникає коротке замикання між витками обмоток або замикання обмоток на землю. Електричні машини, що мають такі дефекти ізоляції, вимагають заміни обмоток, тобто, капітального ремонту [23].

Якщо ізоляція не має технологічних дефектів, то під дією температури, вібрації, зволоження, зовнішнього середовища та інших факторів, протягом часу відбувається поступове старіння ізоляції, що виражається в її усиханні, випаровуванні летючих компонентів, втраті еластичності, виникненні пор та тріщин. У найбільш «слабких» місцях ізоляції виникають дефекти, що мають низьке значення напруги пробою. У моменти перенапруг (атмосферних або комутаційних) у місці дефекту виникають іскрові розряди, які повторюються при кожній наступній перенапрузі, значення якої перевищує напругу пробою місця дефекту. Внаслідок дії розрядів пробивна напруга поступово зменшується до того часу, коли у місці дефекту починає виникати дуговий розряд від робочої напруги між витками. У цьому випадку відбувається повне міжвиткове замикання та обмотка електродвигуна виходить з ладу [16].

У зв'язку з тим, що пробивна напруга в місці дефекту після першого пробою досить велика, а перенапруги в витках обмоток досягають значення пробивної напруги не часто, з моменту виникнення дефекту в ізоляції до повного виткового замикання проходить певний час.

1.3 Методи діагностики асинхронних електродвигунів

Електродвигуни в господарстві іноді працюють в умовах агресивного навколишнього середовища, при низькій якості напруги живлення. Середній термін

служби такого асинхронного електродвигуна не перевищує 3 роки, причому до 90% відмов відбувається через пошкодження обмоток статора. На ізоляцію обмоток діють: хімічно активне середовище, зволоження, теплові дії при перевантаженні АД, вібрації. Процесам старіння ізоляції сприяють імпульсні комутаційні та атмосферні перенапруги. Іншими причинами відмов та пошкоджень АД є неповно фазні режими, знос підшипників, пошкодження в короткозамкнених обмотках ротора, нерівномірний повітряний проміжок між ротором і магнітопроводом статора [27].

Відомо багато методів діагностики АД, які застосовуються як у статичних, так і в робочих режимах. Необхідний універсальний та простий у практичному застосуванні метод безперервного контролю технічного стану електродвигунів, що дозволяє знизити шкоду від пошкоджень за рахунок раннього виявлення та прогнозування дефектів різного характеру.

Відомо ряд методів діагностики асинхронних електродвигунів, заснованих на оцінці різних параметрів електродвигунів, ланцюгів їх живлення та механічної частини електроприводів:

1. Вібродіагностикою оцінюють стан підшипників, виявляють ексцентриситет ротора та дефекти його обмоток. Вібраційний метод дозволяє реєструвати та аналізувати акустичні коливання робочої машини та електродвигуна, перетворені на електричний сигнал п'єзоелектричними, оптичними або індукційними перетворювачами. Перевагами цього методу є можливість зміни та аналізу вібропереміщень, віброшвидкостей та віброприскорень у різних точках агрегату та електродвигуна. Необхідність встановлення численних віброакустичних датчиків, складність інтерпретації результатів вимірювань роблять цей метод дорогим і трудомістким [30].

2. Вимірюванням та аналізом зовнішнього магнітного поля електродвигуна, магнітного потоку в зазорі можна оцінювати ексцентриситет ротора, стан підшипників, виявляти міжвиткові замикання обмоток статора. Метод частіше застосовується при діагностиці електричних машин з номінальною напругою 3-6 кВ, що забезпечує високу точність вимірювань під час використання датчиків Холла. Недоліки методу полягають у малій чутливості для низьковольтних двигунів, особливо при реєстрації зовнішніх магнітних полів, також потрібне встановлення

датчиків магнітного поля, що можливе лише при ремонті або виготовленні електродвигуна [11].

3. Методом тепловізійного контролю визначають несправності підшипників, обмоток статора. За допомогою тепловізорів контролюється випромінювання в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра (0,9-14) заданої області термограми. Переваги методу у тому, що виміри проводяться на діючому електродвигуні дистанційно. Не потрібне встановлення датчиків, забезпечується моніторинг обладнання шляхом порівняння термограм, отриманих на різних режимах при справному обладнанні. Однак цей метод непридатний для контролю внутрішніх пошкоджень ізоляції машини та потрібне спеціальне програмне забезпечення для інтерпретації результатів вимірювань.

4. Методом аналізу електричного струму, напруги та потужності діагностують несправності електродвигуна та приводного обладнання, такі як дисбаланс, не співвісність, дефекти підшипників, а також пошкодження ізоляції. Для безперервного контролю параметрів напруги живлення, завантаження електродвигуна використовується інтегрована система контролю, яка відстежує не симетрію та гармонійний склад струмів та напруг. Перевагами методу є одночасний контроль струмів та напруг у трьох фазах електродвигуна та безперервна реєстрація параметрів. Недоліки методу полягають у тому, що для отримання інформації про гармонійний склад струмів та напруг потрібно застосування пристроїв та програмного забезпечення, здатних проводити аналіз результатів вимірювань та їх інтерпретацію для визначення видів пошкоджень [17].

Найбільш складним технічним завданням є діагностика стану ізоляції обмоток у робочому режимі ЕД, особливо виявлення дефектів міжвіткової ізоляції. Для електродвигунів застосовується метод часткових розрядів, заснований на реєстрації оборотних часткових розрядів, які при робочому або близькому до нього напрузі найбільш достовірно характеризують стан обмотки як перед пробійний. Як недоліки необхідно відзначити, що вплив у десятки кіловольт може призвести до пошкодження міжвіткової ізоляції.

Контроль струму в трьох фазних проводах статора, лінійних напруг живлення і споживаної з мережі потужності в режимі, а також при пуску АД дозволяє на ранній стадії виявляти пошкодження в обмотках статора і ротора.

1.4 Фізичні принципи імпульсних перенапруг

1.4.1 Комутаційні перенапруги

Імпульсні процеси можуть виникати через раптові зміни умов в системі, що викликані навмисними або ненавмисними операціями. Вони пропорційні робочій напрузі, саме її миттєвій величині безпосередньо перед комутацією, коли відбувається зміна ємнісного навантаження. Це одна з причин, через яку зі зростанням напруги системи збільшується відносна важливість комутаційних перенапруг у порівнянні з атмосферними. Комутаційна перенапруга виникає на затискачах вимикачів, встановлених на підстанціях, і у разі малої крутизни фронту напруги його амплітуда повільно знижується в міру пересування по лінії [12].

Кожен із цих комутаційних процесів викликає стрибкоподібний підйом напруги. Якщо знехтувати згасанням, то перша амплітуда перенапруги дає стрибок, рівний величині напруги, що відключається, досягаючи в результаті його подвійного призначення.

При відключенні ненавантажених трансформаторів, реактивних котушок і всіх індуктивних струмів перенапруги виникають у тих випадках, коли в процесі відключення струм обривається, перш ніж він досягне свого природного переходу через нуль.

Перенапруги можуть виникнути на стороні живлення, якщо величина індуктивності цієї ділянки має той же порядок, що і індуктивність зони, що відключається.

При раптовому підключенні лінії до шин підстанції можуть виникати рухомі уздовж лінії перенапруги з тривалістю фронту хвилі менше 1 мкс. Більшість комутацій проводить до перенапруження дуже складної форми. Частота цих коливань може змінюватися від мегагерц до кількох десятків герц [28].

Високоякісні вентиляльні розрядники мають певний захисний рівень, що характеризується номінальною напругою, що залишається, і напругою спрацьовування. Вони спрацьовують автоматично, не викликаючи відключення лінії. Їх недоліком є обмежена зона захисту, але їх спрацьовування і створює зрізані хвилі і не викликає коротких замикань на лінії.

У зв'язку з численними недоліками іскрових проміжків, дороге обладнання підстанцій повинно бути захищене вентильними розрядниками.

1.4.2 Експериментальне дослідження хвильових явищ в електричних машинах

Аналітичне дослідження всіх видів перенапруг в принципі можливе. Однак виявляється необхідним враховувати багато факторів випадкового характеру.

При вивченні хвильових явищ в електричних машинах основним засобом спостереження служить імпульсний осцилограф з очікуваючою розгорткою.

При дослідженнях швидкопротікаючих неперіодичних процесів дуже зручно спостерігати ці явища на екрані осцилографа як нерухомих зображень.

Осцилографування імпульсних струмів-складне завдання. Найбільш простим способом слід вважати осцилографування падіння напруги в безіндукційному шунті, один кінець якого заземлений. Однак у багатьох випадках кінець шунта заземлювати не можна і є неможливим. Використання симетричного неспотворювального діляника напруги в принципі дозволяє зняти осцилограму падіння напруги в незаземленому шунті. У цьому випадку падіння напруги між кінцями шунта має становити щонайменше 10% напруги корпусу. Недотримання цієї умови може погіршити фокусування зображення. Тому в багатьох випадках виявляється необхідним включення до досліджуваного ланцюга шунтів із значним опором, що також далеко не завжди припустимо [12].

Одне з можливих рішень задачі осцилографування імпульсних струмів за допомогою безіндукційних шунтів з малим опором. Цей метод полягає в застосуванні імпульсних трансформаторів струму, що включаються за схемою.

Опір шунта вибирається з умови

$$r_{ш} \leq (0,05-0,075)z_v \quad (1.11)$$

Первинні хвильові параметрів обмоток електричних машин – хвильовий опір та середня швидкість поширення – можуть бути знайдені як аналітично, так і експериментально.

Необхідно виявити засоби тестування стану ізоляції статорних обмоток електричних машин:

а) знаходження способу контролю електричної міцності ізоляції обмоток, як кінцевого так і найбільш об'єктивного показника її стану;

- б) спосіб контролю має бути неруйнівним, тобто вплив на ізоляцію має бути «слабким», насамперед у енергетичному відношенні;
- в) вимірювальна система апаратури повинна бути високочутливою та видавати інформацію у найпростішому вигляді;
- г) реалізувати використання цього способу у простій та надійній переносній апаратурі, яка може бути використана безпосередньо на місцях установки машин;
- д) необхідно забезпечити перевірку як поперечної (основної – міжфазної та корпусної), так і поздовжньої (міжвиткової та міжкатушкової) ізоляції обмоток;
- е) відпрацювати методику та допомогти в організації системи контролю [8].

1.5 Імпульсні методи контролю

Великі можливості надає використання імпульсних методів. При використанні відповідних накопичувачів енергії можливе подання на обмотку імпульсу випробувальної напруги необхідної амплітуди від малопотужної установки. У той же час, уздовж обмотки може бути забезпечений порівняно високий градієнт електричного потенціалу, тобто забезпечений контроль поздовжньої ізоляції.

Саме тому імпульсні методи контролю набули широкого поширення останнім часом, особливо у зв'язку з розвитком елементної бази. Існуюча апаратура застосовується для машин малої потужності насамперед через обмеження за рівнем напруг та рівнем енергії об'єктів, які швидко зростають із зростанням потужності та напруги машин. В основному, ця апаратура використовується для контролю поздовжньої ізоляції. На основі імпульсних методів створено низку установок контролю стану ізоляції обмоток багаторукових спеціальних систем на основі американських та японських патентів. Однак методика проведення випробувань, що використовується у цих системах, обмежує можливості методу. Суть використовуваної методики полягає в тому, що від джерела енергії (зазвичай ємнісного накопичувача) на машину подається серія імпульсів напруги амплітуди, що поступово зростає, і фіксується відгук на ці обурення. При відхиленні процесу від вихідної форми можна вважати, що в даній машині є певні якісні зміни в ізоляційній конструкції і вона підлягає заміні та повнішій ревізії. Таким чином, за базу приймаються початкові імпульсні параметри даної машини, які у виробничих умовах

зазвичай відсутні. Використання накопичувача енергії викликає розвиток будь-якого первинного розряду, який може виникнути у процесі випробування, тобто прискорити вихід конструкції з ладу [12].

Однак у самій ідеї імпульсних впливів амплітуди, що поступово наростає, є багато вірного – хвильовий процес, що виникає в обмотці може дати істотну інформацію про стан конструкції та ідентичність цих процесів при зростанні напруги до заданої межі є об'єктивним свідченням збереження електричної міцності конструкції.

Крім того, імпульсний вплив на ізоляцію значною мірою наближається до експлуатаційних впливів і має таку ж підвищену вибірковість до слабких місць ізоляції, як і комутаційні перенапруги.

Тому для вирішення поставленого завдання необхідно використовувати всі позитивні моменти імпульсного методу, забезпечивши в той же час мінімальну енергію впливу для запобігання ізоляції від додаткових руйнувань при випробуванні та підвищити чутливість вимірювальної системи для виявлення нерозвинених дефектів [20].

1.6 Фізичні процеси в обмотці за імпульсних впливів

При подачі на обмотку імпульсу (хвилі) напруги в обмотці з'являється електромагнітна хвиля, що розповсюджується вздовж обмотки.

Розглядаючи обмотку як довгу лінію або як найпростішу ланцюгову систему з достатньою кількістю елементів за рисунком 1.3, використовують рівняння рівноваги на елементарних ділянках [16].

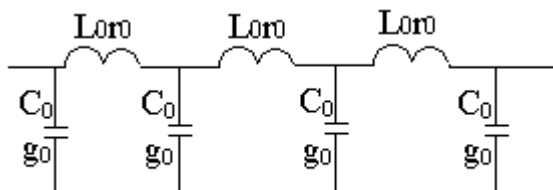


Рисунок 1.3 Найпростіша ланцюгова система

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1.12)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 U + C_0 \frac{\partial U}{\partial t} \quad (1.13)$$

Загальне зазвичай представляється у вигляді хвиль, що біжать (при нехтуванні втратами $r_0 \rightarrow 0, g_0 \rightarrow 0$)

$$u = f_1(x - Vt) + f_2(x + Vt) = u_{np} + u_{обр} \quad (1.14)$$

$$i = \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} [f_1(x - Vt) - f_2(x + Vt)] = i_{np} - i_{обр} \quad (1.15)$$

Де $V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ – хвильова швидкість;

$\sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = z_\epsilon$ – хвильовий характеристичний опір обмотки

За рахунок втрат ці хвилі поступово згасають, внаслідок чого в обмотці виникають загасаючі коливання [24]. При обліку позовжньої ємності диференціальне рівняння для лінії (без загасання) має вигляд:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + LK \frac{\partial U}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (1.16)$$

Аналогічне рівняння відповідає розподілу струму. Рішення такого рівняння можна подати у комплексній формі:

$$u = U e^{j\omega t} \cdot e^{j\alpha x} \quad (1.17)$$

де ω – тимчасова частота, α – просторова частота. Зв'язок між ними можна знайти з характеристичного рівняння:

$$\alpha^2 - \alpha C \omega^2 - LK \alpha^2 \omega^2 = 0 \quad (1.18)$$

$$\omega = \frac{\alpha}{\sqrt{LC \left(1 + \frac{K}{C} \alpha^2 \right)}} \quad (1.19)$$

Подавши рішення у вигляді:

$$u = U e^{j(\omega t + \alpha x)} \quad (1.20)$$

можна отримати швидкість хвилі, що біжить:

$$V = -\frac{\omega}{\alpha} = \pm \frac{1}{\sqrt{LC \left(1 + \frac{K}{C} \alpha^2 \right)}} \quad (1.21)$$

Повне рішення подається у вигляді суми гармонійних складових:

$$u = \sum (a_k e^{j\alpha_k x} + b_k e^{-j\alpha_k x}) \cdot e^{j\omega_k t} \quad (1.22)$$

Під час руху хвилі вздовж обмотки вона деформується і згасає. При подачі напруги на обмотку в перший момент напруга розподіляється в обмотці за ємностями дуже швидко і відповідає закону:

$$\frac{d^2 u_0}{dt^2} = \frac{C}{K} u_0 \quad (1.23)$$

На початку обмотки $x=0; u_0=1$ при заземленому кінці: $x=L; u_0=0$. У цьому випадку рішення має вигляд:

$$u_0 = \frac{\text{sh} \gamma (L-x)}{\text{sh} \gamma L}, \quad (1.24)$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{C}{K}}$

Гradient потенціалу обмотки

$$g = -\frac{\partial u_0}{\partial x} = \frac{\gamma \text{ch} (L-x)}{\text{sh} \gamma L} \quad (1.25)$$

Максимальний gradient відповідає початку обмотки:

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ g_{\max} &= \gamma \text{th} \gamma L \end{aligned} \quad (1.26)$$

При $\gamma L > 3$ приблизно $g_{\max} \approx \gamma$

Тобто. потенціал вздовж обмотки розподіляється нерівномірно. При рівномірному розподілі $u_\infty = 1$

$$g_{cp} = \frac{1}{L} \quad (1.27)$$

1.7 Огляд та аналіз конструкції асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Електродвигун - механізм, що перетворює енергію електричного струму в кінетичну енергію. Сучасне виробництво і побут складно уявити без машин з електроприводом. Вони використовуються в насосному обладнанні, системах вентиляції і кондиціонування, в електротранспорті, промислових верстатах різних типів ті інших.

За конструктивним принципом асинхронні двигуни підрозділяються на двигуни з короткозамкненим і фазним ротором. При цьому більшість використовуваних електродвигунів є асинхронними з короткозамкненим ротором.

Таке широке застосування обумовлене простотою їх конструкції, обслуговування і експлуатації, високою надійністю, відносно низькою вартістю. Недоліками таких двигунів є великий пусковий струм, відносно малий пусковий момент, чутливість до змін параметрів мережі, та для плавного регулювання швидкості потрібний перетворювач частоти. Крім того, асинхронні двигуни споживають реактивну потужність з мережі. Межа застосування асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором визначається потужністю системи електропостачання конкретного підприємства, оскільки великі пускові струми при малій потужності системи створюють великі пониження напруги. Основне застосування - насоси, компресори, вентиляторні установки [26].

Використання асинхронних двигунів з фазним ротором допомагає понизити пусковий струм і істотно збільшити пусковий момент, завдяки вступу в ланцюг ротора пускових реостатів. Проте, зважаючи на ускладнення їх конструкції, і як наслідок, збільшення вартості їх застосування обмежене. Основне застосування - приводи механізмів з особливо важкими умовами пуску. Для зменшення пускових струмів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором може бути використаний пристрій плавного пуску або перетворювач частоти.

В системах, де потрібна ступінчаста зміна швидкості (наприклад, ліфти) використовують багатошвидкісні асинхронні двигуни. У механізмах, що вимагають зупинки за певний час і фіксації валу при зникненні напруги живлення, застосовуються асинхронні двигуни з електромагнітним гальмом (металообробні верстати, лебідки). Існують також асинхронні двигуни з підвищеним ковзанням, які призначені для роботи в повторно-короткочасних режимах, а також режимах з пульсуючим навантаженням.

Асинхронні електродвигуни широко застосовується в усіх сферах народного господарства та в побуті. За різними даними до 70% всієї електричної енергії, що перетворюється в механічну енергію обертового або поступального руху, споживається асинхронним двигуном. Електричну енергію в механічну енергію поступального руху перетворюють лінійні асинхронні електродвигуни, які широко

використовуються в електричній тязі, для виконання технологічних операцій. Широке застосування АД пов'язані з рядом їх переваг [1].

Асинхронні двигуни - це найпростіші в конструктивному відношенні і у виготовленні, надійні і найдешевші з усіх типів електричних двигунів. Вони не мають щіткового вузла або вузла змінного струмознімання, що крім високої надійності забезпечує мінімальні експлуатаційні витрати. Залежно від числа що живлять фаз розрізняють трифазні і однофазні асинхронні двигуни.

Трифазний асинхронний двигун при певних умовах може успішно виконувати свої функції і при живленні від однофазної мережі тому широко застосовуються не тільки в промисловості, будівництві, сільському господарстві, а й в приватному секторі, в побуті, в домашніх майстернях, на садових ділянках.

Однофазні асинхронні двигуни приводять в обертання пральні машини, вентилятори, невеликі деревообробні верстати, електричні інструменти, насоси для подачі води.

Однофазний асинхронний двигун містить на статорі лише одну робочу обмотку, на яку в процесі роботи двигуна подається змінний струм. Але для пуску двигуна на його статорі є і додаткова обмотка, яка короткочасно підключається до мережі через конденсатор або індуктивність, або замикається накоротко. Це необхідно для створення початкового зсуву фаз, щоб ротор почав обертатися, інакше пульсуюче магнітне поле статора зрушило б ротор з місця [12].

Ротор такого двигуна, як і будь-якого іншого асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, являє собою циліндричний сердечник з залитими алюмінієм пазами, з одночасно відлитими вентиляційними лопатями. Такий ротор, типу «біляча клітина» і називається короткозамкненим ротором. Однофазні двигуни застосовуються в малопотужних приладах, таких як кімнатні вентилятори або невеликі насоси [3].

Двофазні асинхронні двигуни найбільш ефективні при роботі від однофазної мережі змінного струму. Вони містять на статорі дві робочі обмотки, розташовані перпендикулярно, причому одна з обмоток підключається до мережі змінного струму безпосередньо, а друга - через фазо зсувний конденсатор, так виходить обертове магнітне поле, а без конденсатора ротор б сам не зрушив з місця.

Ці двигуни також мають короткозамкнений ротор, а їх застосування набагато ширше, ніж у однофазних. Тут вже і пральні машини, і різні верстати. Двофазні двигуни для живлення від однофазних мереж називають конденсаторними двигунами, так як фазо зсувний конденсатор є часто невід'ємною їх частиною.

Трифазний асинхронний двигун містить на статорі три робочі обмотки, зсунуті відносно один одного так, що при включенні в трифазну мережу, їх магнітні поля виходять зміщеними в просторі відносно один одного на 120 градусів. При підключенні трифазного двигуна до трифазної мережі змінного струму, виникає обертове магнітне поле, що приводить в рух короткозамкнений ротор [21].

Обмотки статора трифазного двигуна можна з'єднати за схемою «зірка» або «трикутник», причому для живлення двигуна за схемою «зірка» потрібна напруга вище, ніж для схеми «трикутник», і на двигуні, тому, вказуються два напруги, наприклад: 127/220 або 220/380. Трифазні двигуни незамінні для приведення в дію різних верстатів, лебідок, циркулярних пил, підйомних кранів, та інших.

Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором має статор аналогічний описаним вище типам двигунів, - шихтований магнітопровід з трьома укладеними в його пази обмотками, проте в фазний ротор не залита алюмінієві стрижні, а покладена вже повноцінна трифазна обмотка, в з'єднанні «зірка». Кінці зірки обмотки фазного ротора виведені на три контактних кільця, насаджених на вал ротора, і електрично ізольованих від нього [18].

За допомогою щіток, на кільця також подається трифазне змінну напругу, і підключення може бути здійснено як безпосередньо, так і через реостати. Безумовно, двигуни з фазним ротором коштують дорожче, але їх пусковий момент під навантаженням значно вище, ніж у типів двигунів з короткозамкненим ротором. Саме в силу підвищеної потужності і великого пускового моменту, цей тип двигунів знайшов застосування в приводах ліфтів і підйомних кранів, тобто там, де пристрій запускається під навантаженням, а не вхолосту.

Саме асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором через своїх перерахованих вище достоїнств є основним видом двигунів в промисловому електроприводі, застосування інших видів двигунів незначно і носить вузькоспеціалізований характер.

1.3.1 Режими роботи двигуна.

Навантаження електродвигуна в процесі роботи може змінюватися по-різному. Передбачено вісім режимів роботи.

1. Тривалий S1 - режим роботи при постійному навантаженні протягом часу, за який температура двигуна досягає сталого значення. Потужність двигуна, що працює в цьому режимі, розраховується виходячи із споживаної механізмом потужності. Формули розрахунку потужності деяких механізмів (насос, вентилятор, компресор) приведені вище.

2. Короткочасний S2 - режим, при якому за час включення на постійне навантаження температура двигуна не устигає досягти сталого значення, а за час відключення двигун охолоджується до температури довкілля. У разі використання двигуна S1 для роботи в режимі S2 необхідно перевірити його тільки по перевантажувальній здатності, оскільки температура не устигає досягти допустимого значення.

3. Повторно-короткочасний S3 - режим з періодичним відключенням двигуна, при якому за час включення температура не устигає досягти сталого значення, а за час відключення - температури довкілля. Розрахунок потужності електродвигуна звичайного виконання для роботи в режимі S3 виробляється по методах еквівалентних величин з урахуванням пауз і втрат в перехідних режимах. Крім того, двигун необхідно перевірити на допустиме число включень в годині. У разі великого числа включень в годину рекомендується використовувати двигуни з підвищеним ковзанням. Ці електродвигуни мають підвищений опір обмотки ротора, а, отже, меншими пусковими і гальмівними втратами.

4. Повторно-короткочасний з частими пусками S4 і повторно-короткочасний з частими пусками і електричним гальмуванням S5. Ці режими розглядаються аналогічно режиму S3.

5. S6, що переважається, - режим, при якому робота двигуна під навантаженням, періодично замінюється роботою на неодруженому ході. Більшість двигунів, що працюють в тривалому режимі, мають графік навантаження, що міняється [3].

При цьому для обґрунтованого вибору двигуна з метою оптимального його використання рекомендується застосовувати методи еквівалентних величин.

1.3.2 Міра захисту IP, види кліматичних умов і категорій розміщення.

ДСТУ Р МЕК 60034-5 - 2007 встановлює класифікацію мір захисту, забезпечуваних оболонками машин. Позначення міри захисту складається з букв латинського алфавіту IP і наступних двох цифр (наприклад, IP44).

Більшість електродвигунів, що випускаються нині, мають міри захисту IP44, IP54 і IP55.

Категорія розміщення позначається цифрою: 1 - на відкритому повітрі; 2 - під навісом за відсутності прямої сонячної дії і атмосферних опадів; 3 - в закритих приміщеннях без штучного регулювання кліматичних умов; 4 - в закритих приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами, 5-вибохозахищені.

Кліматичні умови: П - помірний клімат; ПХЛ - помірно холодний клімат; ХЛ - холодний клімат; Т - тропічний клімат. Наприклад, використання електродвигуна з типом кліматичного виконання і категорією розміщення У3 на відкритому повітрі є неприпустимим [1].

Враховуючи всі вище розглянуті умови та фактори по вибору електродвигуна, сферу його призначення і умови роботи, з метою економічної доцільності приймаємо загальнопромисловий двигун серії 4А, виконання IP44.

1.8 Вибір та опис конструкції асинхронного двигуна

Як прототип асинхронного двигуна (АД) обраний серійний двигун типу 4А225М8У3. Проектований двигун закритого обдуваемого виконання з короткозамкненим ротором, настановний розмір по довжині станини (М) середній, чотирьох полюсний, кліматичного виконання У, категорії розташування 3. На рисунку 1.4 показана загальна конструкція цієї машини [3].

Станина 1 і торцеві щити 2 відлили з чавуну. Зовнішній вентилятор 3 кріпиться на виступаючому кінці вала 4, протилежний вихідного.

Вентилятор закритий кожухом з листової сталі. Зовнішнє повітря засмоктується вентилятором через жалюзі кожуха 5 і рухається уздовж ребер станини 1. На станині закріплена коробка висновків 6. При установці вона може бути повернута в зручному для підводки кабелю живлення напрямку.

Внизу станини ребра розташовані більш рідко і вкорочено в порівнянні з іншими, що дає можливість дещо зменшити висоту осі обертання. Сердечник статора

7 виконаний з листів електротехнічної сталі 2013 і після опресування скріплений скобами 8. Сердечник закріплений в станині стопорними гвинтами 9, що оберігають його від провертання при різких поштовхах навантаження. Пази сердечника - напівзакриті. Обмотка 10 всипні з круглого обмотувального проводу марки ПЕТ -155 або ПЕТ 155М, що застосовується при машинної намотування. Сердечник ротора 11 виконується з тієї ж сталі, що і статор, опресовується і в спресованості стані заливається алюмінієм. Одночасно з заливкою пазів відливається замикають кільця 12 і вентиляційні лопатки. На замикаючих кільцях з обох торців ротора при балансуванні кріпляться балансувальні вантажі 13. Вал ротора 4 виконується зі сталі ст. 45. Вентилятор 3 литий з алюмінію. При литві вентилятора в нього вставляється вставна втулка 14, яка служить для кріплення вентилятора на валу за допомогою шпонки [2].

Підшипникові щити кріпляться до станини за допомогою болтів 15. У центрі щита є отвори, розточені під посадку зовнішніх обойм підшипників 16 і 17. Точність положення осі ротора щодо внутрішньої осі ротора щодо внутрішньої поверхні станини забезпечується обробкою поверхні посадки підшипникових щитів на станину і зовнішніх обойм підшипників при одній установці щитів на верстаті, а поверхонь станини під посадку щитів і сердечника статора при одній установці на розточувальному верстаті. Кожен з підшипників закритий з обох сторін підшипниковими дахів-ками 18 і 19, що перешкоджає витіканню мастилі при роботі машині. Підшипникові кришки мають розвинені поверхні старанності до валу з лабіринтними ущільненнями [1].

У двигуні встановлюється два підшипника 16 і 17 кульковий і роликовий відповідно.

Станина кріпитися до фундаменту за допомогою лап, що мають отвори під кріпильні болти. Лапи відлиті за одне ціле із станиною. Зверху станина має прилив з різьбою в який угвинчується рим-болт 20 для пересування двигуна при монтажі. На лапах виконані отвори з різьбленням в які вгвинчуються болти 21 для приєднання шин заземлення [3].

Конструктивне виконання двигуна ІМ 1081, машина на лапах з двома підшипниковими щитами і горизонтальним валом; кінець вала циліндричний.

Система охолодження ІС 0141.

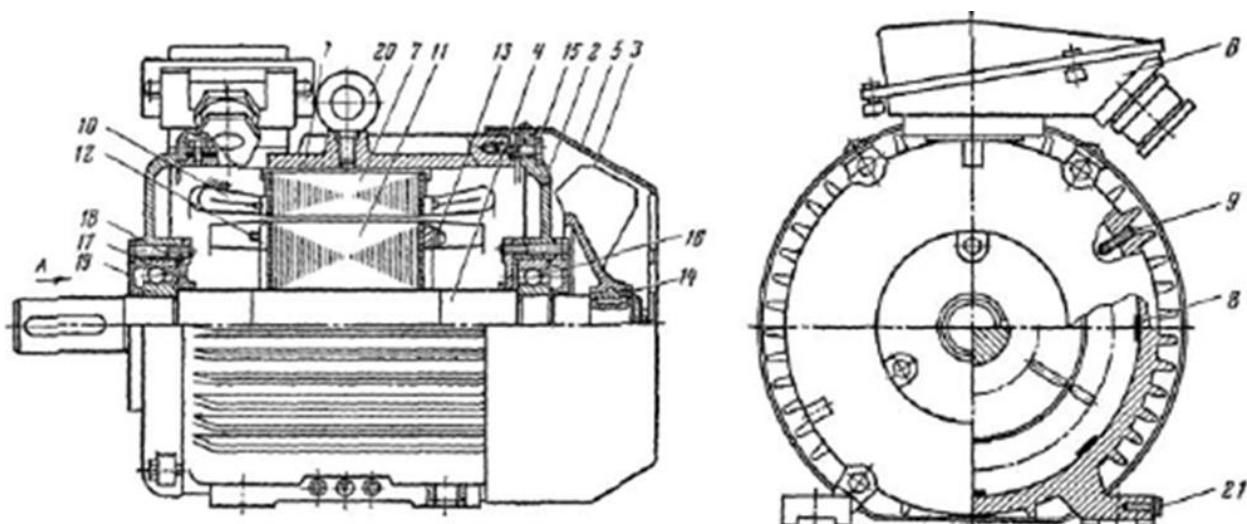


Рисунок 1.4 Конструкція асинхронного двигуна серії 4А із типовим захистом IP 44

У короткозамкненим роторі несправності можуть бути пов'язані з поганим контактом або обривом в стрижнях білячої клітини з короткозамкненими кільцями. У цих випадках мідні або латунні стрижні, обірвані в пазах, замінюють, а порушені контакти в кільцях - запаюють. Білячу клітку з алюмінію пере.

Ремонт роторів з мідною кліткою зводиться до зварювання тріщин в кільці і заміні тріснутого стрижня з наступною впайкою його по торцях в кільце. Пайка проводиться мідно-фосфористим припоєм. Нагрівання місця пайки проводиться за допомогою автогенного пальника. На рисунку 1.5 показаний загальний вигляд білячої клітини і короткозамкненого ротора [1].

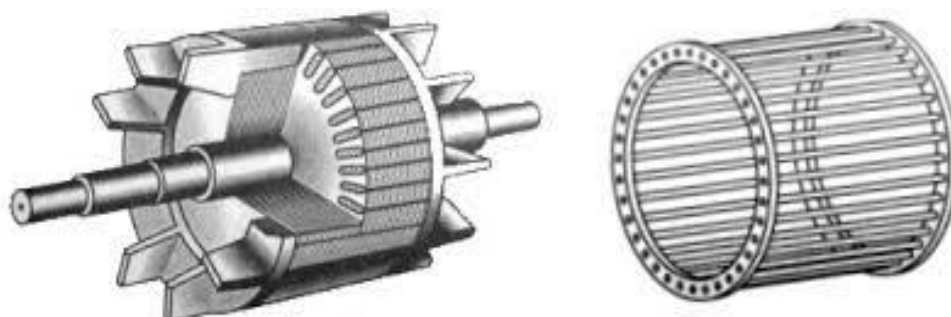


Рисунок 1.5 Загальний вид короткозамкненого ротора і білячої клітки.

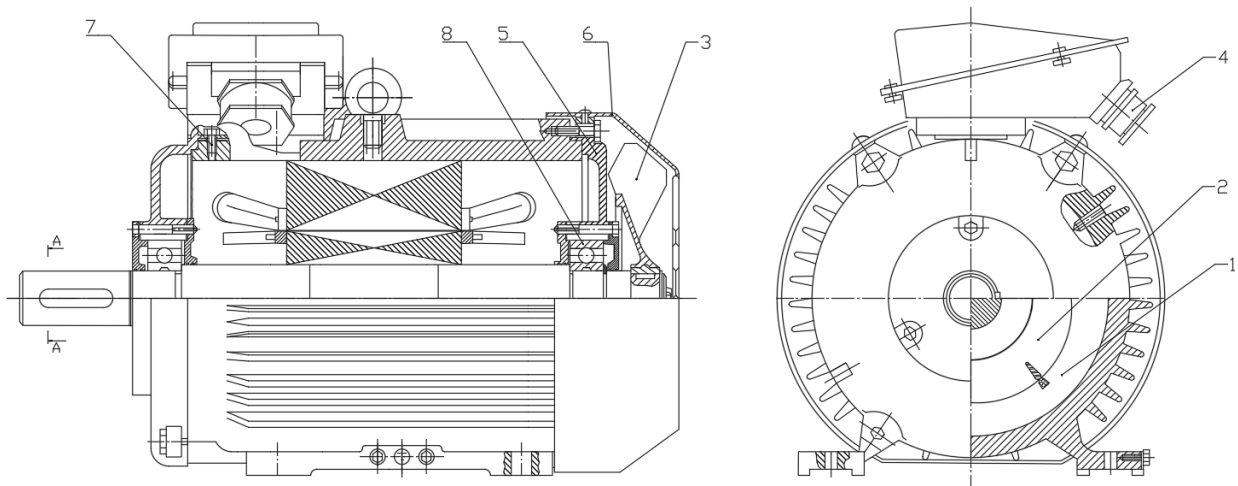


Рисунок 1.6 Конструкція обраного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором серії 4A225M8 потужністю 30 кВт

РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ТА З ПОДВІЙНОЮ БІЛЯЧОЮ КЛІТКОЮ

2.1 Розрахунок асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, обмотка якого виготовлена з алюмінію

Вихідні данні:

Номінальна потужність, Вт

$$P_H = 30000$$

Число фаз

$$m = 3$$

Число пар полюсів

$$p = 4$$

Номінальний ККД

$$\eta = 0.905$$

Коефіцієнт навантаження

$$\cos \varphi = 0.81$$

Номінальне ковзання

$$s = 0.02$$

Пусковий струм, в.о.

$$I_{\text{пуск}} = 5.5$$

Пусковий момент, в.о.

$$M_{\text{пуск}} = 1.4$$

Максимальний момент, в.о.

$$M_{\text{макс}} = 2.3$$

Висота осі обертання, м

$$h = 0.225$$

Номінальна напруга, В

$$U_{1\text{ном}} = 220$$

$$U_y = 380$$

Розрахунки проведено за методикою [1] в середовищі Mathcad.

Вибір основних розмірів.

1. Висота осі обертання (рис.8.17 а) [1], м

$$h = 0.225$$

2. Внутрішній діаметр статора (табл 9.8) [1], м

$$D_c = 0.392 \quad k_d = 0.725$$

за табл 9.9 [1]

$$D = k_d \cdot D_c = 0.725 \cdot 0.392 = 0.2842$$

3. Полюсна поділка, м

$$\tau = \frac{D \pi}{2 \cdot p} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{2 \cdot 4} = 0.11161$$

4. Розрахункова потужність (за 9.4) [1], ВА

$$k_e = 0.96$$

за рис. 9.20

$$P' = \frac{P_H \cdot k_e}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{30000 \cdot 0.96}{0.905 \cdot 0.81} = 39287.90669$$

5. Електромагнітні навантаження (попередньо за рис. 9.22 б) [1]

$$A = 34 \cdot 10^3$$

$$B_\delta = 0.8$$

6. Обмотувальний коефіцієнт (попередньо для одношарової обмотки)

$$k_{o61} = 0.95$$

7. Розрахункова довжина магнітопровода (за 9.6) [1], м

$$f = 50 \text{ Гц}$$

$$\Omega = \frac{2 \cdot f \cdot \pi}{p} = \frac{2 \cdot 50 \cdot \pi}{4} = 78.53982 \text{ рад/с}$$

$$k_b = 1.11$$

$$l_\delta = \frac{P'}{k_b \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{o61} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{39287.90669}{1.11 \cdot 0.2842^2 \cdot 78.53982 \cdot 0.95 \cdot 34 \cdot 10^3 \cdot 0.8} = 0.21593$$

8. Відношення в допустимих межах (рис 9.25) [1]

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0.21593}{0.11161} = 1.93473$$

9. Визначення значення (за рис 9.26) [1]

$$t_{z1\max} = 0.013$$

$$t_{z1\min} = 0.011$$

10. Число пазів статора (8.16) [1]

$$Z_{1\min} = \frac{D \cdot \pi}{t_{z1\max}} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{0.013} = 68.68005$$

$$Z_{1\max} = \frac{D \cdot \pi}{t_{z1\min}} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{0.011} = 81.16733$$

Приймаємо $Z_1 = 72$, тоді

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{72}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 3$$

11. Зубцева поділка

$$t_{z1} = \frac{D \cdot \pi}{2 \cdot p \cdot m \cdot q_1} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3} = 0.0124$$

12. Число ефективних провідників в пазу (попередньо при умові що $a=1$ за 9.17) [1]

$$^2_{1\text{III}} = \frac{P'}{m \cdot U_{1\text{III}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{39287.90669}{3 \cdot 220 \cdot 0.905 \cdot 0.81} = 81.20474$$

$$u'_I = \frac{A \cdot D \cdot \pi}{^2_{1\text{III}} \cdot Z_1} = \frac{34 \cdot 10^3 \cdot 0.2842 \cdot \pi}{81.20474 \cdot 72} = 5.19205$$

13. Приймаємо $a = 2$ (8.17) [1], тоді

$$u_{II} = u'_I \cdot a = 10.3841$$

$$u_{II} = 12$$

14. Кінцеве значення числа витків по фазі (9.20) [1]

$$w_1 = u_i \cdot \frac{Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = 10 \cdot \frac{72}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 60$$

Лінійне навантаження, А/м (8.21) [1]

$$A = \frac{2 \cdot 2 \cdot 111 \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 81 \cdot 20474 \cdot 60 \cdot 3}{\pi \cdot 0.2842} = 32742.35482$$

Магнітний потік (8.22) [1], Вб

$$\Phi = \frac{k_e \cdot U_{1\text{ном}}}{4 \cdot k_b \cdot w_1 \cdot k_{o61} \cdot f} = \frac{0.96 \cdot 220}{4 \cdot 1.11 \cdot 60 \cdot 0.95 \cdot 50} = 0.01669$$

Індукція в повітряному проміжку, Тл (8.23) [1]

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = \frac{4 \cdot 0.01669}{0.2842 \cdot 0.21593} = 1.08792$$

Значення A і B_δ знаходяться в допустимих межах (рис 9.22) [1]

15. Густина струму обмотки статора (8.25) [1]

за рис 9.27 $AJ_1 = 210 \cdot 10^9$

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A} = \frac{210 \cdot 10^9}{34052.04901} = 6.16703 \times 10^6$$

16. Площа поперечного перерізу ефективного провідника, м² (8.24) [1]

$$q_{\text{еф}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot J_1} = \frac{81.20474}{2 \cdot 6.16703 \times 10^6} = 6.58378 \times 10^{-6}$$

17. Переріз ефективного провідника: приймаємо $n_{\text{ел}} = 3$, тоді . Приймаємо звичайний провід марки ПЕТВ (додаток 3) [1]

$$q_{\text{ел}} = \frac{q_{\text{еф}}}{n_{\text{ел}}} = \frac{6.58378 \times 10^{-6}}{3} = 2.19459 \times 10^{-6}$$

$$d = 1.5$$

$$q_{\text{ел}} = 2.2$$

$$d_{i3} = 1.58$$

$$q_{\text{е.ср}} = n_{\text{ел}} \cdot q_{\text{ел}} = 3 \cdot 2.2 = 6.6$$

18. Густина струму обмотки статора (за 9.27), А/мм²

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot q_{\text{ел}} \cdot n_{\text{ел}}} = \frac{81.20474}{2 \cdot 2.2 \cdot 3} = 6.15187$$

Розрахунок розмірів зубцевої зони статора і повітряного проміжку

Паз статора визначаємо за рис 9.29 [1], а із співвідношенням розмірів, що забезпечують паралельність бокових граней зубців.

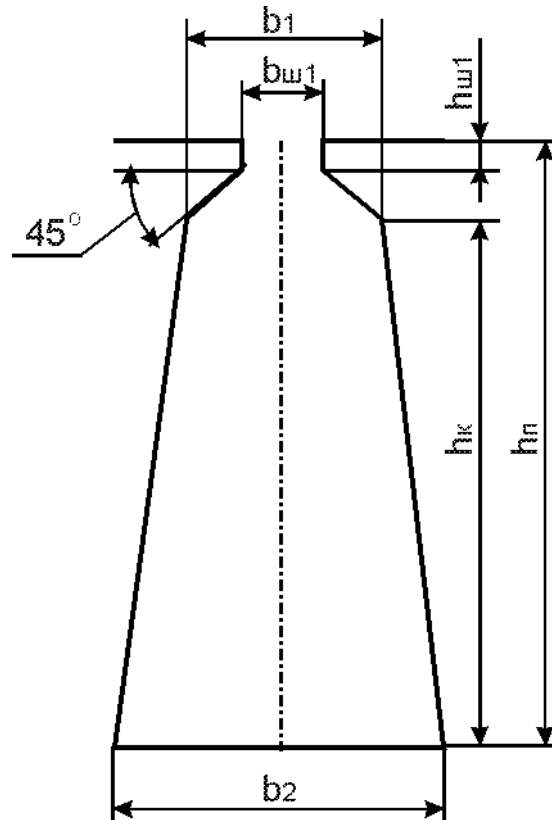


Рисунок 2.1 Паз статора

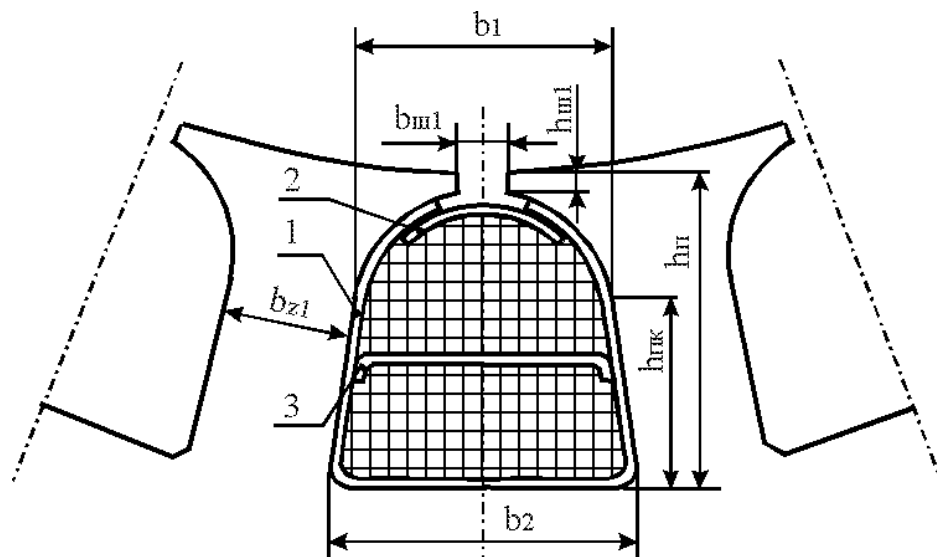


Рисунок 2.2 Паз статора

19. Приймаємо попередньо по табл 9.12 $B_{z1} = 1.9$ Тл, $B_a = 1.25$ Тл;

за табл 9.13 [1] для окисованої сталі 2013: $k_c = 0.97$

Ширина пазу, м (табл. 8.10) [1]

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{B_{z1} \cdot k_c} = \frac{1.04608 \cdot 0.0124}{1.9 \cdot 0.97} = 0.00704$$

Висота пазу, м

$$h_{z1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{\delta} \cdot k_c \cdot l_{\delta}} = \frac{0.01605}{2 \cdot 1.04608 \cdot 0.97 \cdot 0.21593} = 0.03662$$

20. Розміри паза в штампі, м (8.38) [1]

$$b_{\text{ш}} = 3.7 \text{ мм}$$

$$h_{\text{ш}} = 1$$

$$h_{\text{в}} = \frac{D_{\text{с}} - D}{2} - h_{\text{з1}} = \frac{0.392 - 0.2842}{2} - 0.03662 = 0.01728$$

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{\text{ш}} \cdot 10^{-3} - b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}) - Z_1 \cdot b_{\text{з1}}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (0.2842 + 2 \cdot 10^{-3} - 3.7 \cdot 10^{-3}) - 72 \cdot 0.00704}{72 - \pi} = 0.00553$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{\text{в}})}{Z_1} - b_{\text{з1}} = \frac{\pi \cdot (0.2842 + 2 \cdot 0.01728)}{72} - 0.00704 = 0.00687$$

$$h_{\text{шп}} = h_{\text{в}} - \left(h_{\text{ш}} \cdot 10^{-3} + \frac{b_1 - b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 0.01728 - \left(10^{-3} + \frac{0.00553 - 3.7 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 0.01536$$

21. Розміри пазу на світлі з урахуванням допуску на складання. М (табл. 8.17) [1]

$$b'_1 = b_1 - 0.0002 = 0.00553 - 0.0002 = 0.00533$$

$$b'_2 = b_2 - 0.0002 = 0.00687 - 0.0002 = 0.00667$$

$$h'_{\text{шп}} = h_{\text{шп}} - 0.0002 = 0.01536 - 0.0002 = 0.01516$$

Площа поперечного перерізу ізоляції корпусу в пазі, м² (табл. 3.1) [1]

$$S_{\text{із}} = 0.0004 \cdot (2 \cdot h_{\text{шп}} + b_1 + b_2) = 0.0004 \cdot (2 \cdot 0.01536 + 0.00553 + 0.00687) = 1.72489 \times 10^{-5}$$

Площа поперечного перерізу прокладок, м²

$$S_{\text{пр}} = 0$$

Площа поперечного перерізу паза для розміщення провідників обмотки за (9.48) [1], м²

$$S'_{\text{п}} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{\text{шп}} - (S_{\text{із}} + S_{\text{пр}}) = \frac{0.00533 + 0.00667}{2} \cdot 0.01516 - (1.72489 \times 10^{-5} + 0) = 7.37128 \times 10^{-5}$$

22. Коефіцієнт заповнення паза

$$k_z = \frac{(d \cdot 10^{-3})^2 \cdot u_{\text{п}}}{S'_{\text{п}}} = \frac{(1.5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10.4}{7.37128 \times 10^{-5}} = 0.31745$$

Розрахунок ротора

23. Повітряний проміжок, м (рис 8.31) [1]

$$\delta = 0.7 \cdot 10^{-3}$$

24. Число пазів ротора (табл 8.16) [1]

$$Z_2 = 56$$

25. Зовнішній діаметр ротора, м

$$D_2 = D - 2\delta = 0.2842 - 2 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} = 0.2828$$

26. Довжина магнітопроводу ротора, м

$$l_2 = l_{\delta} = 0.21593$$

27. Зубцева поділка ротора, м

$$t_{\text{з2}} = \pi \cdot \frac{D_2}{Z_2} = \pi \cdot \frac{0.2828}{56} = 0.01587$$

28. Внутрішній діаметр ротора дорівнює діаметру вала, оскільки сердечник ротора насаджується на вал, м (8.17) [1]

$$\kappa_B = 0.23$$

$$D_B = \kappa_B \cdot D_2 = 0.23 \cdot 0.2828 = 0.06504$$

29. Струм в обмотці ротора (8.57) [1]

$$\cos \varphi = 0.81$$

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos \varphi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.81 = 0.848$$

$$k = 0.85$$

$$v_i = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 62.4 \cdot 0.85}{56} = 5.68286$$

$$I_{2\text{НОМ}} = v_i \cdot I_{1\text{НОМ}} \cdot k_i = 5.68286 \cdot 81.20474 \cdot 0.848 = 391.33072$$

30. Площа поперечного перерізу стрижня (попередньо), м^2 (8.68) [1]

$$J_2 = 2.5 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

$$q_n = \frac{I_{2\text{НОМ}}}{J_2} = \frac{391.33072}{2.5 \cdot 10^6} = 0.00016$$

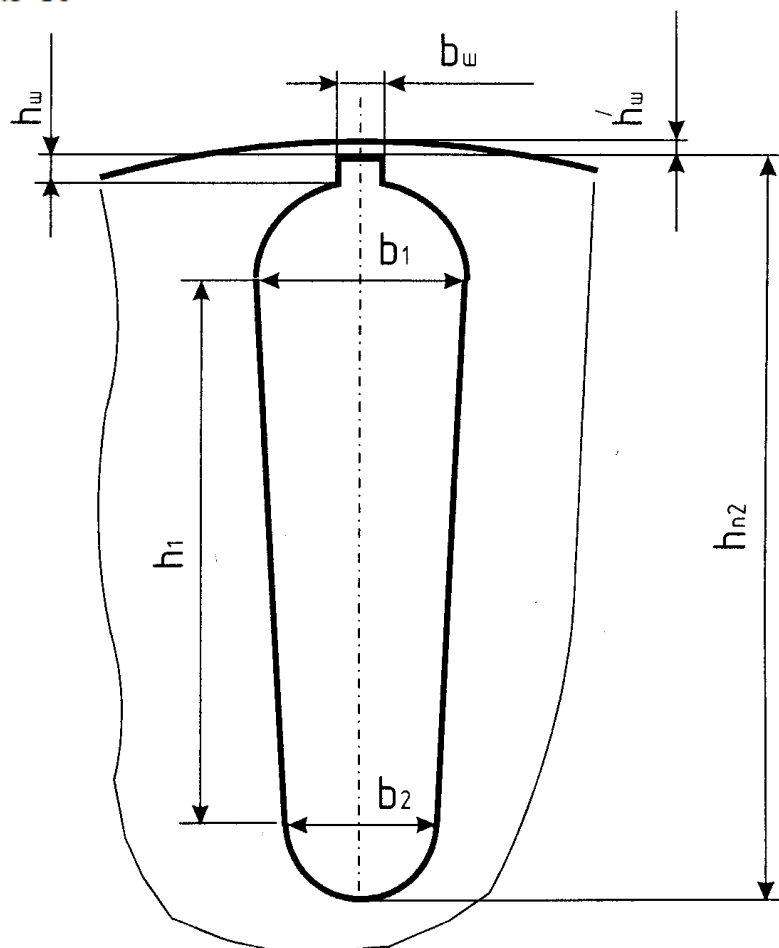


Рисунок 2.3 Паз ротора

31. Паз ротора (рис. 3.3) [1]

$$b'_{\text{III}} = 1.5 \cdot 10^{-3}$$

м

$$h'_{\text{ш}} = 0.7 \cdot 10^{-3}$$

м

$$B_{z2} = 1.85$$

Допустима ширина зубця (8.10) [1]

$$b_{z2} = B_{\delta} \cdot \frac{t_{z2}}{B_{z2} \cdot 0.97} = 1.04608 \cdot \frac{0.01587}{1.85 \cdot 0.97} = 0.00925$$

Розміри пазу, м (8.77) [1]

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h'_{\text{ш}}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} = \frac{\pi \cdot (0.2828 - 2 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}) - 56 \cdot 0.00925}{\pi + 56} = 0.00619$$

$$b_2 = \left| \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot q_n}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} \right| = \left| \sqrt{\frac{0.00619^2 \cdot \left(\frac{56}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot 0.00016}{\frac{56}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} \right| = 0.00246$$

$$h_2 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (0.00619 - 0.00246) \cdot \frac{56}{2 \cdot \pi} = 0.03326$$

32. Уточнюємо ширину зубців, м (8.78) [1]

$$b'_{z2} = \frac{\pi \cdot [D_2 - 2 \cdot (h_{\text{ш}} \cdot 10^{-3} + h'_{\text{ш}}) \cdot b_1]}{Z_2} - b_1 = \frac{\pi \cdot [0.2828 - 2 \cdot (10^{-3} + 0.7 \cdot 10^{-3}) \cdot 0.00619]}{56} - 0.00619 = 0.00967$$

Повна висота паза, м (8.79) [1]

$$h_{\text{п2}} = h'_{\text{ш}} + h_{\text{ш}} \cdot 10^{-3} + \frac{b_1}{2} + h_2 + \frac{b_2}{2} = 0.7 \cdot 10^{-3} + 10^{-3} + \frac{0.00619}{2} + 0.03326 + \frac{0.00246}{2} = 0.03929$$

33. Площа поперечного перерізу стрижня, м² (8.68) [1]

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_2 = \frac{\pi}{8} \cdot (0.00619^2 + 0.00246^2) + \frac{1}{2} \cdot (0.00619 + 0.00246) \cdot 0.03326 = 0.00016$$

Густина струму в стрижні, А/м²

$$J_2 = \frac{I_{2\text{ном}}}{q_c} = \frac{391.33072}{0.00016} = 2.42639 \times 10^6$$

34. Короткозамкнені кільця.

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 4}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 4}{56}\right) = 0.44504$$

Струм у кільцях, А

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_{2\text{ном}}}{\Delta} = \frac{391.33072}{0.44504} = 879.31216$$

Густина струму в кільцях, А/м²

$$J_{\text{кл}} = 0.8 \cdot J_2 = 0.8 \cdot 2.42639 \times 10^6 = 1.94111 \times 10^6$$

Площа поперечного перерізу кільця, м² (8.72) [1]

$$q_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}} = \frac{879.31216}{1.94111 \times 10^6} = 0.00045$$

Розміри короткозамкнених кілець

висота, м (рис. 8.37) [1]

$$h_{\text{кл}} = 1.25 \cdot h_{\text{п2}} = 1.25 \cdot 0.03929 = 0.04911$$

$$h_{\text{кл}} = 0.050$$

ширина, м

$$b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}} = \frac{0.00045}{0.05} = 0.00906$$

$$b_{\text{кл}} = 0.009$$

Уточнена площа перерізу кілець, м² (8.73) [1]

$$q_{\text{кл}} = b_{\text{кл}} \cdot h_{\text{кл}} = 0.009 \cdot 0.05 = 0.00045$$

Середній діаметр кільця, м

$$D_{\text{с.кл}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 0.2828 - 0.05 = 0.2328$$

Розрахунок магнітного кола

Магнітопровід зі сталі 2013; товщина листів 0,5 мм.

35. Магнітна напруга повітряного проміжку, А (4.15) [1]

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3.7 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right)^2}{5 + \frac{3.7 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}}} = 2.71627$$

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0.0124}{0.0124 - 2.71627 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}} = 1.1811$$

$$F_{\delta} = 1.59 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 1.59 \cdot 10^6 \cdot 1.04608 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.1811 = 1375.13302$$

36. Магнітна напруга зубцевої зони статора, А (8.103) [1]

$$H_{i1} = h_{z1}$$

$$H_{z1} = 2250 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

$$F_{z1} = 2 \cdot H_{z1} \cdot H_{i1} = 2 \cdot 2250 \cdot 0.03662 = 164.8067$$

Розрахункова індукція в зубцях, Тл (8.105) [1]

$$B'_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{b_{z1} \cdot k_c} = \frac{1.04608 \cdot 0.0124}{0.00704 \cdot 0.97} = 1.9$$

37. Магнітна напруга зубцевої зони ротора, А (П 1.7) [1]

$$H_{z2} = 1620$$

$$F_{z2} = 2h_{\text{п2}} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0.04193 \cdot 1620 = 135.84511$$

38. Коефіцієнт насичення зубцевої зони

$$k'_z = 1 + \frac{F_{z2} + F_{z1}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{135.84511 + 164.8067}{1430.13834} = 1.21023$$

Магнітна напруга ярма статора, А (8.124) [1]

$$h_a = \frac{D_c - D}{2} - h'_{\text{шп}} = \frac{0.392 - 0.2842}{2} - 0.01516 = 0.03874$$

Довжина ділянки ярма, м

$$L_a = \pi \cdot \frac{D - h_a}{2 \cdot p} = \pi \cdot \frac{0.2842 - 0.03874}{2 \cdot 4} = 0.09639$$

Індукція ярма статора, Тл (8.122) [1]

$$B_a = 1.25$$

Напруженість ярма статора, А/м (П 1.7) [1]

$$H_a = 272$$

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.09639 \cdot 272 = 26.21878$$

40. Магнітна напруга ярма ротора, А

$$h_j = \frac{D_2 - D_B}{2} - h_{п2} = \frac{0.2828 - 0.06504}{2} - 0.03929 = 0.06959$$

Індукція в ярмі ротора, Тл (П 1.6) [1]

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot k_c \cdot l_\delta} = \frac{0.01605}{2 \cdot 0.06959 \cdot 0.97 \cdot 0.21593} = 0.55052$$

Напруженість в ярмі ротора, А/м (П 1.6) [1]

$$H_j = 66$$

Довжина ділянки ярма, м (8.119) [1]

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_B + h_j)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.06504 + 0.06959)}{2 \cdot 4} = 0.05287$$

$$F_j = H_j \cdot L_j = 66 \cdot 0.05287 = 3.48949$$

41. Магнітна напруга на пару полюсів, А

$$F_\delta = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 1430.13834 + 164.8067 + 135.84511 + 26.23451 + 3.42105 = 1760.44571$$

42. Коефіцієнт насичення магнітного кола.

$$k_\mu = \frac{F_\delta}{F_\delta} = \frac{1760.44571}{1430.13834} = 1.23096$$

43. Струм намагнічування, А

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_\mu}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{o61}} = 39.99497$$

Струм намагнічування, в.о.

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_\delta}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot \hat{e}_{\mu 1}} = 45.75557$$

Параметри робочого режиму

44. Активний опір обмотки статора, Ом

$$\beta = 1$$

$$h_{п1} = h_B = 0.01728$$

$$b_{kt} = \frac{\pi \cdot (D + h_{п1}) \cdot \beta}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.2842 + 0.01728)}{2 \cdot 4} = 0.11839$$

Довжина вильоту лобової частини, м (стор. 334) [1]

$$k_{вил} = 0.5$$

$$B = 0.01$$

$$l_{вил} = b_{kt} \cdot k_{вил} + B = 0.11839 \cdot 0.5 + 0.01 = 0.06919$$

$$l_{п1} = l_\delta = 0.21593$$

$$l_{л1} = 1.4 \cdot b_{kt} + 2 \cdot B = 1.4 \cdot 0.11839 + 2 \cdot 0.01 = 0.18575$$

$$l_{cp} = 2 \cdot (l_{п1} + l_{л1}) = 2 \cdot (0.21593 + 0.18575) = 0.80334$$

$$L_1 = l_{cp} \cdot w_1 = 0.80334 \cdot 62.4 = 50.1286$$

$$r_1 = \frac{10^{-6} \cdot L_1}{41 \cdot q_{ef} \cdot a} = \frac{10^{-6} \cdot 50.1286}{41 \cdot 6.58378 \times 10^{-6} \cdot 2} = 0.09285$$

Відносне значення опору, в.о.

$$r'_1 = r_1 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0.039207$$

45. Активний опір фази кз обмотки ротора (8.170) [1]

$$l_r = l_\delta$$

$$\rho_{al} = \frac{10^{-6}}{20.5}$$

$$r_c = \frac{l_r \cdot \rho_{al}}{q_c} = 6.53083 \times 10^{-5}$$

$$r_{кл} = \frac{\pi D_{с.кл} \cdot \rho_{al}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = \frac{\pi \cdot 0.2328 \cdot \frac{10^{-6}}{20.5}}{56 \cdot 0.00045} = 1.41572 \times 10^{-6}$$

$$r_2 = r_c + 2 \cdot \frac{r_{кл}}{\Delta^2} = 6.53083 \times 10^{-5} + 2 \cdot \frac{1.41572 \times 10^{-6}}{0.44504^2} = 7.9604 \times 10^{-5}$$

Приводимо опір до числа витків обмотки статора, Ом

$$r''_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot \kappa_{об1})^2}{Z_2} = 7.9604 \times 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (62.4 \cdot 0.95)^2}{56} = 0.05994$$

Значення опору в в.о.

$$r'_2 = r''_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0.027312$$

46. Індуктивний опір фази обмотки статора (8.24) [1]

$$\xi = 2 \cdot 1.25 - \kappa_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 = 2 \cdot 1.25 - 0.95^2 \cdot \left(\frac{0.01587}{0.0124} \right)^2 = 1.02277$$

$$\lambda_{д1} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{0.0124}{12 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.1811} \cdot 1.02277 = 1.27837$$

$$\lambda_{л1} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_\delta} \cdot (l_{п1} - 0.64 \cdot \tau) = 0.34 \cdot \frac{3}{0.21593} \cdot (0.21593 - 0.64 \cdot 0.11161) = 0.68259$$

$$h_k = 0.5 \cdot (b_1 - b_{ш} \cdot 10^{-3}) = 0.5 \cdot (0.00619 - 3.7 \cdot 10^{-3}) = 0.00125$$

$$h_1 = h_{ш} - 2 \cdot 0.0004 = 0.01456$$

$$\lambda_{п.1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_1} + \left(\frac{h_1}{b_1} + 3 \cdot \frac{h_k}{b_1 + 2 \cdot b_{ш} \cdot 10^{-3}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) = \frac{0.01456}{3 \cdot 0.00619} + \frac{0.01456}{0.00619} + 3 \cdot \frac{0.00125}{0.00619 + 2 \cdot 3.7 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{3.7} = 3.68133$$

$$x_1 = 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{п.1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}) = 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{62.4}{100} \right)^2 \cdot \frac{0.21593}{4 \cdot 3} \cdot (3.68133 + 1.27837 + 0.68259) = 0.3123$$

Значення в в.о.

$$x'_1 = x_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 0.127237$$

47. Індуктивний опір фази обмотки ротора

$$h_0 = h_2 + 0.4 \cdot b_2 = 0.03326 + 0.4 \cdot 0.00246 = 0.03425$$

$$\xi = 1.0$$

$$\lambda_{д2} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot 1.22} \cdot \xi = \frac{0.01587}{12 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.22} \cdot 1 = 1.54811$$

$$\lambda_{л2} = 2.3 \cdot \frac{D_{с.кл}}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \log \left(\frac{4.7 \cdot D_{с.кл}}{h_{кл} + 2 \cdot b_{кл}} \right) = 2.3 \cdot \frac{0.2328}{56 \cdot 0.21593 \cdot 0.44504^2} \cdot \log \left(\frac{4.7 \cdot 0.2328}{0.05 + 2 \cdot 0.009} \right) = 0.26975$$

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b'_{ш} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot b_1} \right] + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} + 1.12 \cdot \frac{h_{ш} \cdot 10^{-3}}{l_2} = \frac{0.03425}{3 \cdot 0.00619} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 0.00619^2}{8 \cdot 0.00016} \right)^2 + 0.66 - \frac{1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.00619} + \frac{1}{3.7} + 1.12 \cdot \frac{10^{-3}}{0.21593} = 2.45111$$

$$x_2 = 7.9 \cdot f \cdot l_\delta \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}) \cdot 10^{-6} = 0.00036$$

Приводимо до числа витків статора (8.152) [1]

$$x''_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 0.00036 \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (62.4 \cdot 0.95)^2}{56} = 0.27418$$

Значення в в.о.

$$x'_2 = x''_2 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 0.175283$$

Розрахунок втрат

48. Основні втрати

$$\gamma_c = 7 \cdot 10^3$$

$$m_a = \pi \cdot (D - h) \cdot h \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c = \pi \cdot (0.2842 - 0.225) \cdot 0.225 \cdot 0.21593 \cdot 0.97 \cdot 7 \cdot 10^3 = 61.35207$$

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot (k_c \cdot \gamma_c) \cdot \frac{(b_{z2} + b_{z1})}{2} = 0.03662 \cdot 72 \cdot 0.21593 \cdot 0.97 \cdot 7 \cdot 10^3 \cdot \frac{0.00925 + 0.00704}{2} = 31.48292$$

$$P_{ст} = 2.5 \cdot (1.8 \cdot B_a^2 \cdot m_a + 1.8 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = 2.5 \cdot (1.8 \cdot 1.25^2 \cdot 61.35207 + 1.8 \cdot 1.9^2 \cdot 31.48292) = 942.82178$$

49. Поверхневі втрати в роторі, Вт

$$B_{02} = 0.37 \cdot k_\delta \cdot B_\delta = 0.37 \cdot 1.1811 \cdot 1.04608 = 0.45714$$

$$P_{пов} = 0.5 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{Z_1}{10000} \cdot n \right)^{1.3} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 = 305.61372$$

$$P_{пов} = P_{пов} \cdot (t_{z2} - b'_{ш}) \cdot Z_2 \cdot l_\delta = 305.61372 \cdot (0.01587 - 1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot 56 \cdot 0.21593 = 53.08517$$

50. Пульсуючі втрати в зубцях, Вт

$$h_{z2} = h_{п2}$$

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b'_{z2} \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c = 31.20115$$

$$B_{пуль} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B_{z2} = \frac{2.71627 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.01587} \cdot 1.85 = 0.11086$$

$$P_{\text{пул}} = 0.11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пул}} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0.11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 980}{1000} \cdot 0.11086 \right)^2 \cdot 31.20115 = 210.00194$$

51. Сума додаткових втрат, Вт

$$P_{\text{стдод}} = P_{\text{пов}} + P_{\text{пул}} = 53.08517 + 210.00194 = 263.0871$$

52. Повні втрати в сталі, Вт

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{стдод}} = 942.82178 + 263.0871 = 1205.90888$$

52. Механічні втрати, Вт

$$K_T = 1.3 \cdot (1 - D) = 1.3 \cdot (1 - 0.2842) = 0.93054$$

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D^4 = 0.93054 \cdot \left(\frac{980}{10} \right)^2 \cdot 0.2842^4 = 58.30201$$

53. Неробочий хід двигуна

$$P_{1\text{HX}} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 39.99497^2 \cdot 0.09285 = 445.5828$$

$$I_{\text{Hxa}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{1\text{HX}}}{m \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{1205.90888 + 58.30201 + 445.5828}{3 \cdot 220} = 2.5906$$

$$I_{\text{HX}} = \sqrt{I_{\text{Hxa}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{2.5906^2 + 39.99497^2} = 40.07878$$

$$\cos \varphi_{\text{HX}} = \frac{I_{\text{Hxa}}}{I_{\text{HX}}} = \frac{2.5906}{40.07878} = 0.06464$$

Розрахунок робочих характеристик

55. Параметри

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{942.82178}{3 \cdot 39.99497^2} = 0.19647$$

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{\mu}} = \frac{220}{39.99497} = 5.50069$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0.3123}{5.50069} = 1.05678$$

$$\gamma = \text{atan} \left[\frac{r_{12} \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})} \right] = \text{atan} \left[\frac{0.09285 \cdot 5.50069 - 0.19647 \cdot 0.3123}{0.19647 \cdot (0.09285 + 0.19647) + 5.50069 \cdot (0.3123 + 5.50069)} \right] = 0.01403$$

Активна складова струму синхронного неробочого ходу, А

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст}} \cdot 3 \cdot I_{\mu} \cdot r_1}{3 \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{1205.90888 \cdot 3 \cdot 39.99497 \cdot 0.09285}{3 \cdot 220} = 20.35605$$

$$a' = c_1^2$$

$$b' = 0$$

$$a_x = c_1 \cdot r'_1 = 1.05678 \cdot 0.03427 = 0.03622$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x''_2) = 1.05678 \cdot (0.3123 + 1.05678 \cdot 0.27418) = 0.63623$$

$$s = 0.02$$

$$a' \cdot \frac{r''_2}{s} = 3.26584$$

Активний опір, Ом

$$\underline{R} = a + a' \cdot \frac{r''_2}{s} = 5.26584$$

Індуктивний опір, Ом

$$X = b + b' \cdot \frac{r''_2}{s} = 0.61953$$

Повний опір, Ом

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 5.30216$$

$$I'_2 = \frac{U_{1\text{ном}}}{Z} = 41.49252$$

$$\sin \varphi'_2 = \frac{X}{Z} = 0.11684$$

$$\cos \varphi'_2 = \frac{R}{Z} = 0.99315$$

Активна складова струму статора, А

$$I_{1a} = I_{0a} + I'_2 \cdot \cos \varphi'_2 = 63.22062$$

Реактивна складова струму ротора, Ом

$$I_{0p} = I_{\mu}$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I'_2 \cdot \sin \varphi'_2 = 50.60372$$

Струм обмотки статора, А

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = 80.97891$$

Струм обмотки ротора, А

$$I''_2 = c_1 \cdot I'_2 = 44.06784$$

Потужність що споживається з мережі, кВт

$$P_1 = 3 \cdot U_{1\text{ном}} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3} = 35.7$$

Втрати потужності, кВт

$$P_{e1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3} = 1.82668$$

$$P_{e2} = 3 \cdot I''_2{}^2 \cdot r''_2 \cdot 10^{-3} = 0.00766$$

$$P_{\text{дод}} = 0.005 \cdot P_1 = 0.20863$$

$$\Sigma P = P_{\text{ст}} \cdot 10^{-3} + P_{\text{мех}} \cdot 10^{-3} + P_{e1} + P_{e2} + P_{\text{дод}} = 3.21696$$

Потужність на валу, кВт

$$P_2 = P_1 - \Sigma P = 32.6$$

ККД

$$\eta' = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = 0.9229$$

$$\underline{\cos \varphi} = \frac{I_{1a}}{I_1} = 0.7807$$

Номінальні значення

Струм обмотки статора, А

$$I_{1\text{ном}} = 81$$

Струм обмотки ротора, А

$$I_{2\text{ном}} = 44$$

Потужність що споживається, кВт

$$P_1 = 35.7$$

Втрати потужності

$$P_{\text{с1}} = 1.83$$

$$P_{\text{с2}} = 0.0076$$

$$P_{\text{доп}} = 0.2$$

$$\Sigma P = 3.2$$

ККД

$$\eta = 0.92$$

Коефіцієнт наваначення

$$\cos \varphi = 0.82$$

Ковзання

$$s = 0.02$$

Розрахунок пускових характеристик

57. Активний опір обмотки ротора з урахуванням ефекту витіснення

$$n \cdot (1 - s) = 735$$

$$h_c = h_{\text{п2}} - 0.001 = 0.04193 - 0.001 = 0.04093$$

$$s = 1$$

$$\xi = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s} = 2.6034$$

$$\varphi = 1.5$$

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = 0.01637$$

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_{\text{п2}}} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 0.00453$$

$$q_r = \frac{\pi \cdot (b_1)^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 8.31376 \times 10^{-5}$$

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = 1.83943$$

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1.69515$$

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r''_2 = 0.09816$$

58. Індуктивні опори обмотки ротора з урахуванням ефекту витіснення

$$\varphi' = 0.9$$

$$\Delta \lambda_{\text{п2}\xi} = \lambda_{\text{п2}} \cdot (1 - \varphi') = 0.26995$$

$$\lambda_{\text{п2}\xi} = \lambda_{\text{п2}} - \Delta \lambda_{\text{п2}\xi} = 2.42954$$

$$K_x = \frac{\lambda_{п2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0.94024$$

$$x'_{2\xi} = x''_2 \cdot K_x = 0.25221$$

59. Пускові параметри

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 1.23096 \cdot 4.80816 = 5.91866$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1 + \frac{0.29843}{5.91866} = 1.05042$$

60. Розрахунок струмів з урахуванням ефекту витіснення струму

Активний опір, Ом

$$R_{п} = r_1 + c_{1п} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0.19596$$

Індуктивний опір, Ом

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x'_{2\xi} = 0.56336$$

Струм обмотки статора, А

$$I'_{2п} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = 379.3$$

Розрахунок пускових характеристик з урахуванням ефекту витіснення струму і насичення від полів розсіювання.

$$k_{нас} = 1.5$$

$$C_{п} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{0.7 \cdot 10^{-3}}{0.0124 + 0.01587}} = 1.03342$$

$$F_{п.ср} = 0.7 \cdot I_{1п} \cdot k_{нас} \cdot u_{п} \cdot \left(1 + 0.95 \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 2360.49$$

Індукція, Тл

$$B_{Фб} = \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_{п}} = 2.03942$$

$$k'_{\delta} = 0.85$$

Коефіцієнт магнітної проникності пазового розсіювання обмотки з урахуванням насичення

$$c'_1 = (t_{z1} - b_{ш} \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - k'_{\delta}) = 0.00131$$

$$\Delta \lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш} + 0.58 \cdot h_k}{b_{ш}} \cdot \frac{c'_1}{c'_1 + 1.5 \cdot b_{ш}} = 6.35787 \times 10^{-5}$$

$$\Delta \lambda_{п1нас} = 0.076$$

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п.1} - \Delta \lambda_{п1нас} = 3.79461$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки статора з урахуванням впливу насичення

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot k'_{\delta} = 1.08661$$

Індуктивний опір фази обмотки статора з урахуванням впливу насичення, Ом

$$x_{1\text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п1нас}} + \lambda_{\text{д1нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п.1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}} = 0.28473$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки ротора з урахуванням впливу насичення і витіснення струму

$$c_{e2} = (t_{z2} - b'_{\text{ш}}) \cdot (1 - k'_{\delta}) = 0.00215$$

$$\Delta\lambda_{\text{п2нас}} = \frac{h'_{\text{ш}}}{b'_{\text{ш}}} \cdot \frac{c_{e2}}{c_{e2} + b'_{\text{ш}}} = 0.27514$$

$$\Delta\lambda_{\text{п2нас}} = 0.65$$

$$\lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{п2}} - \Delta\lambda_{\text{п2нас}} = 2.04949$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання з урахуванням впливу насичення

$$\lambda_{\text{д2нас}} = \lambda_{\text{д2}} \cdot k'_{\delta} = 1.31589$$

Приведений індуктивний опір фази обмотки ротора з урахуванням насичення та ефекту витіснення струму, Ом

$$x'_{2\xi\text{нас}} = x''_2 \cdot \frac{\lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}} + \Delta\lambda_{\text{п2нас}} + \lambda_{\text{д2нас}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}}} = 0.23844$$

$$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{п}}} = 1.04811$$

62. Розрахунок струмів і моментів

Активний опір при пуску, Ом

$$s_{\text{п}} = 1$$

$$R_{\text{п.нас}} = r_1 + c_{1\text{пнас}} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s_{\text{п}}} = 0.19573$$

Індуктивний опір при пуску, Ом

$$X_{\text{п.нас}} = x_{1\text{нас}} + c_{1\text{пнас}} \cdot x'_{2\xi\text{нас}} = 0.53463$$

Струм обмотки ротора, А

$$I'_{2\text{нас}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + X_{\text{п.нас}}^2}} = 440$$

Струм обмотки статора, А

$$I_{1\text{нас}} = I'_{2\text{нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + (X_{\text{п.нас}} + x_{12\text{п}})^2}}{x_{12\text{п}} \cdot c_{1\text{пнас}}} = 475.526$$

Кратність пускового струму з урахуванням впливу ефекту витіснення струму та насичення

$$I_{\text{п}} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I_{1\text{ном}}} = 5.846$$

Кратність пускового моменту з урахуванням впливу витіснення струму і насичення

$$M_{\Pi} = \left(\frac{I'_{2\text{нас}}}{I_{2\text{ном}}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s}{s_{\Pi}} = 1.423$$

$$k''_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I'_{2\Pi}} = 1.25$$

63. Критичне ковзання

$$s_{\text{кр}} = \frac{r'_{2\xi}}{\frac{x_{1\text{нас}}}{c_{1\Pi\text{нас}}} + x'_{2\xi\text{нас}}} = 0.0891$$

Тепловий розрахунок

64. Перевищення температури внутрішньої поверхні сердечника статора над температурою повітря всередині двигуна.

$$K = 0.2$$

$$k_p = 1.07$$

$$\alpha_1 = 100$$

$$P'_{e1} = k_p \cdot P_{e1} \cdot 10^3 \cdot 2 \frac{l_{\delta}}{l_{cp}} = 1.07 \cdot 1.83 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \frac{0.21593}{0.80334} = 1052.61429$$

$$\Delta\nu_{\text{пов}1} = K \cdot \frac{P'_{e1} + P_{ct}}{\pi \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_1} = 0.2 \cdot \frac{1052.61429 + 963.27938}{\pi \cdot 0.2842 \cdot 0.21593 \cdot 100} = 20.91309$$

65. Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора, С

$$\Pi_{\Pi 1} = 2 \cdot h'_{\Pi\Pi} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0.01531 + 0.00584 + 0.00175 = 0.03821$$

$$\lambda_{\text{екв}} = 0.16$$

$$\lambda'_e = 1.4$$

$$\frac{d}{d_{i3}} = 0.94937$$

$$\Delta\nu_{i3,\Pi 1} = \frac{P'_{e1}}{Z_1 \cdot \Pi_{\Pi 1} \cdot l_{\delta}} \cdot \left(\frac{0.4}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_e} \right) \cdot 10^{-3} = \frac{1052.61429}{72 \cdot 0.03821 \cdot 0.21593} \cdot \left(\frac{0.4}{0.16} + \frac{0.00584 + 0.00175}{16 \cdot 1.4} \right) \cdot 10^{-3} = 4.43032$$

66. Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин, С

$$P'_{e1} = k_p \cdot P_{e1} \cdot 10^3 \cdot 2 \frac{l_{\Pi 1}}{l_{cp}} = 1.07 \cdot 1.83 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \frac{0.18575}{0.80334} = 905.48571$$

$$\Delta\nu_{i3,\Pi 1} = \frac{P'_{e1}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\Pi 1} \cdot l_{\Pi 1}} \cdot \left(\frac{0.4}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{h'_{\Pi\Pi}}{12 \cdot \lambda'_e} \right) \cdot 10^{-3} = \frac{905.48571}{2 \cdot 72 \cdot 0.03821 \cdot 0.18575} \cdot \left(\frac{0.4}{0.16} + \frac{0.01531}{12 \cdot 1.4} \right) \cdot 10^{-3} = 2.21567$$

67. Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над температурою повітря всередині двигуна, С

$$\Delta\nu_{\text{пов},\Pi 1} = \frac{K \cdot P'_{e1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{вил}} \cdot \alpha_1} = \frac{0.2 \cdot 905.48571}{2 \cdot \pi \cdot 0.2842 \cdot 0.06919 \cdot 100} = 14.65665$$

68. Перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині двигуна, С

$$\Delta\nu'_1 = \frac{(\Delta\nu_{\text{пов}1} + \Delta\nu_{i3,\Pi 1}) \cdot 2 \cdot l_{\delta} + (\Delta\nu_{i3,\Pi 1} + \Delta\nu_{\text{пов},\Pi 1}) \cdot 2 \cdot l_{\delta}}{l_{cp}} = \frac{(20.91309 + 4.43032) \cdot 2 \cdot 0.21593 + (2.21567 + 14.65665) \cdot 2 \cdot 0.21593}{0.80334} = 22.69388$$

69. Перевищення температури повітря всередині двигуна над температурою навколишнього середовища, С

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1) \cdot (P_{e1} + P_{e2}) = 3.2 + (1.07 - 1) \cdot (1.83 + 0.0076) = 3.32863$$

$$\Sigma P'_B = \Sigma P' \cdot 10^3 - (1 - K) \cdot (P'_{e1} + P_{ct}) - 0.9 \cdot P_{Mex} = 3.32863 \cdot 10^3 - (1 - 0.2) \cdot (905.48571 + 963.27938) - 0.9 \cdot 34.1471 = 1802.88754$$

$$s_{кор} = (\pi \cdot D + 8 \cdot 0.32) (l_\delta + 2 \cdot l_{вил}) = (\pi \cdot 0.2842 + 8 \cdot 0.32) \cdot (0.21593 + 2 \cdot 0.06919) = 1.2234$$

$$\Delta \nu_B = \frac{\Sigma P'_B}{s_{кор} \cdot 20} = \frac{1802.88754}{1.2234 \cdot 20} = 73.68375$$

70. Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища, С

$$\Delta \nu_1 = \Delta \nu'_1 + \Delta \nu_B = 22.69388 + 73.68375 = 96.37763$$

71. Перевірка умов охолодження двигуна, м³/с

$$k_m = 2.5 \cdot \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_c} = 2.5 \cdot \sqrt{\frac{750}{100} \cdot 0.392} = 4.28661$$

$$Q_B = \frac{k_m \cdot \Sigma P'_B}{1100 \cdot \Delta \nu_B} = \frac{4.28661 \cdot 1802.88754}{1100 \cdot 73.68375} = 0.09535$$

Витрати повітря що забезпечуються вентилятором, м³/с

$$\Theta'_B = 0.6 \cdot D_c^3 \cdot \frac{n}{100} = 0.6 \cdot 0.392^3 \cdot \frac{750}{100} = 0.27106$$

2.2 Розрахунок асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, обмотка якого виготовлена з міді

Вихідні данні:

Номінальна потужність, Вт

$$P_H = 30000$$

Число фаз

$$m = 3$$

Число пар полюсів

$$p = 4$$

Номінальний ККД

$$\eta = 0.905$$

Коефіцієнт навантаження

$$\cos \varphi = 0.81$$

Номінальне ковзання

$$s = 0.02$$

Пусковий струм, в.о.

$$I_{пуск} = 5.5$$

Пусковий момент, в.о.

$$M_{пуск} = 1.4$$

Максимальний момент, в.о.

$$M_{макс} = 2.3$$

Висота осі обертання, м

$$h = 0.225$$

Номінальна напруга, В

$$U_{1\text{ном}} = 220$$

$$U_y = 380$$

Вибір основних розмірів.

1. Висота осі обертання (рис.8.17 а) [1], м

$$h = 0.225$$

2. Внутрішній діаметр статора (табл 9.8) [1], м

$$D_c = 0.392 \quad k_d = 0.725$$

за табл 9.9 [1]

$$D = k_d \cdot D_c = 0.725 \cdot 0.392 = 0.2842$$

3. Поліусна поділка, м

$$\tau = \frac{D \pi}{2 \cdot p} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{2 \cdot 4} = 0.11161$$

4. Розрахункова потужність (за 9.4) [1], ВА

$$k_e = 0.96$$

за рис. 9.20

$$P' = \frac{P_n \cdot k_e}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{30000 \cdot 0.96}{0.905 \cdot 0.81} = 39287.90669$$

5. Електромагнітні навантаження (попередньо за рис. 9.22 б) [1]

$$A = 34 \cdot 10^3$$

$$B_\delta = 0.8$$

6. Обмотувальний коефіцієнт (попередньо для одношарової обмотки)

$$k_{o61} = 0.95$$

7. Розрахункова довжина магнітопровода (за 9.6) [1], м

$$f = 50 \text{ Гц}$$

$$\Omega = \frac{2 \cdot f \cdot \pi}{p} = \frac{2 \cdot 50 \cdot \pi}{4} = 78.53982 \text{ рад/с}$$

$$k_b = 1.11$$

$$l_\delta = \frac{P'}{k_b \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{o61} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{39287.90669}{1.11 \cdot 0.2842^2 \cdot 78.53982 \cdot 0.95 \cdot 34 \cdot 10^3 \cdot 0.8} = 0.21593$$

8. Відношення в допустимих межах (рис 9.25) [1]

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0.21593}{0.11161} = 1.93473$$

9. Визначення значення (за рис 9.26) [1]

$$t_{z1\text{max}} = 0.013$$

$$t_{z1\text{min}} = 0.011$$

10. Число пазів статора (8.16) [1]

$$Z_{1\text{min}} = \frac{D \cdot \pi}{t_{z1\text{max}}} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{0.013} = 68.68005$$

$$Z_{1\text{max}} = \frac{D \cdot \pi}{t_{z1\text{min}}} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{0.011} = 81.16733$$

Приймаємо $Z_1 = 72$, тоді

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{72}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 3$$

11. Зубцева поділка

$$t_{z1} = \frac{D \cdot \pi}{2 \cdot p \cdot m \cdot q_1} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3} = 0.0124$$

12. Число ефективних провідників в пазу (попередньо при умові що $a=1$ за 9.17) [1]

$$^2_{1\hat{\Pi}} = \frac{P'}{m \cdot U_{1\hat{\Pi}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{39287.90669}{3 \cdot 220 \cdot 0.905 \cdot 0.81} = 81.20474$$

$$u'_i = \frac{A \cdot D \cdot \pi}{^2_{1\hat{\Pi}} \cdot Z_1} = \frac{34 \cdot 10^3 \cdot 0.2842 \cdot \pi}{81.20474 \cdot 72} = 5.19205$$

13. Приймаємо $a = 2$ (8.17) [1], тоді

$$u_{\Pi} = u'_i \cdot a = 10.3841$$

$$u_{\hat{\Pi}} = 12$$

14. Кінцеве значення числа витків по фазі (9.20) [1]

$$w_1 = u_i \cdot \frac{Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = 10 \cdot \frac{72}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 60$$

Лінійне навантаження, А/м (8.21) [1]

$$A = \frac{^2_{1\hat{\Pi}} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 81.20474 \cdot 60 \cdot 3}{\pi \cdot 0.2842} = 32742.35482$$

Магнітний потік (8.22) [1], Вб

$$\Phi = \frac{k_e \cdot U_{1\text{ном}}}{4 \cdot k_b \cdot w_1 \cdot k_{o61} \cdot f} = \frac{0.96 \cdot 220}{4 \cdot 1.11 \cdot 60 \cdot 0.95 \cdot 50} = 0.01669$$

Індукція в повітряному проміжку, Тл (8.23) [1]

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_{\delta}} = \frac{4 \cdot 0.01669}{0.2842 \cdot 0.21593} = 1.08792$$

Значення A і B_{δ} знаходяться в допустимих межах (рис 9.22) [1]

15. Густина струму обмотки статора (8.25) [1]

за рис 9.27 $AJ_1 = 210 \cdot 10^9$

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A} = \frac{210 \cdot 10^9}{34052.04901} = 6.16703 \times 10^6$$

16. Площа поперечного перерізу ефективного провідника, м² (8.24) [1]

$$q_{e\Phi} = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot J_1} = \frac{81.20474}{2 \cdot 6.16703 \times 10^6} = 6.58378 \times 10^{-6}$$

17. Переріз ефективного провідника: приймаємо $n_{e\pi} = 3$, тоді . Приймаємо звичайний провід марки ПЕТВ (додаток 3) [1]

$$q_{e\pi} = \frac{q_{e\Phi}}{n_{e\pi}} = \frac{6.58378 \times 10^{-6}}{3} = 2.19459 \times 10^{-6}$$

$$d = 1.5$$

$$q_{\text{ед}} = 2.2$$

$$d_{i3} = 1.58$$

$$q_{\text{е.ср}} = n_{\text{ед}} \cdot q_{\text{ед}} = 3 \cdot 2.2 = 6.6$$

18. Густина струму обмотки статора (за 9.27), А/мм²

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot q_{\text{ед}} \cdot n_{\text{ед}}} = \frac{81.20474}{2 \cdot 2.2 \cdot 3} = 6.15187$$

Розрахунок розмірів зубцевої зони статора і повітряного проміжку
Паз статора визначаємо за рис 9.29 [1], а із співвідношенням розмірів, що забезпечують паралельність бокових граней зубців.

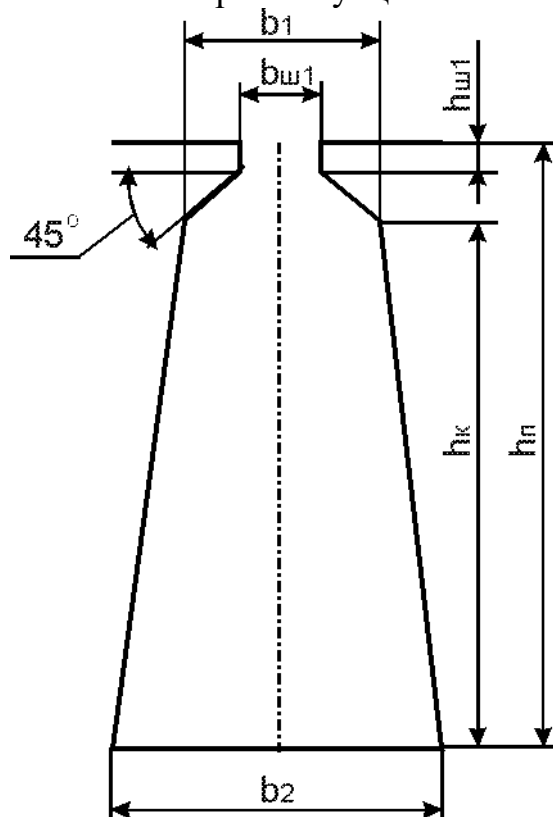


Рисунок 2.4 Паз статора

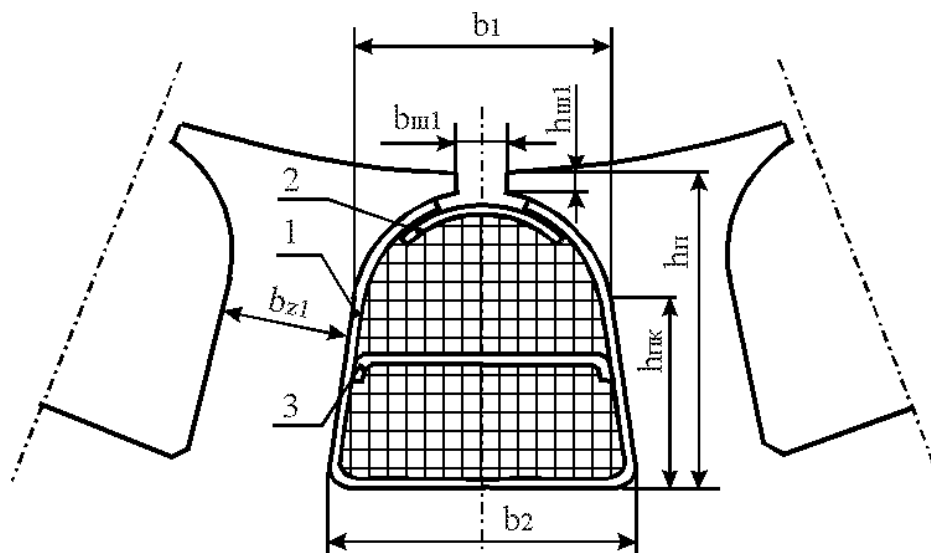


Рисунок 2.5 Паз статора

19. Приймаємо попередньо по табл 9.12 $B_{z1} = 1.9_{ТЛ}$, $B_a = 1.25_{ТЛ}$;
за табл 9.13 для окисованої сталі 2013: $k_c = 0.97$
Ширина пазу, м (табл. 8.10) [1]

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{B_{z1} \cdot k_c} = \frac{1.04608 \cdot 0.0124}{1.9 \cdot 0.97} = 0.00704$$

Висота пазу, м

$$h_{z1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{\delta} \cdot k_c \cdot l_{\delta}} = \frac{0.01605}{2 \cdot 1.04608 \cdot 0.97 \cdot 0.21593} = 0.03662$$

20. Розміри паза в штампі, м (8.38) [1]

$$b_{III} = 3.7_{мм}$$

$$h_{III} = 1$$

$$h_B = \frac{D_c - D}{2} - h_{z1} = \frac{0.392 - 0.2842}{2} - 0.03662 = 0.01728$$

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{III} \cdot 10^{-3} - b_{III} \cdot 10^{-3}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (0.2842 + 2 \cdot 10^{-3} - 3.7 \cdot 10^{-3}) - 72 \cdot 0.00704}{72 - \pi} = 0.00553$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_B)}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0.2842 + 2 \cdot 0.01728)}{72} - 0.00704 = 0.00687$$

$$h_{III} = h_B - \left(h_{III} \cdot 10^{-3} + \frac{b_1 - b_{III} \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 0.01728 - \left(10^{-3} + \frac{0.00553 - 3.7 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 0.01536$$

21. Розміри пазу на світлі з урахуванням допуску на складання. М (табл. 8.17) [1]

$$b'_1 = b_1 - 0.0002 = 0.00553 - 0.0002 = 0.00533$$

$$b'_2 = b_2 - 0.0002 = 0.00687 - 0.0002 = 0.00667$$

$$h'_{III} = h_{III} - 0.0002 = 0.01536 - 0.0002 = 0.01516$$

Площа поперечного перерізу ізоляції корпусу в пазі, м² (табл. 3.1) [1]

$$S_{iz} = 0.0004 \cdot (2 \cdot h_{III} + b_1 + b_2) = 0.0004 \cdot (2 \cdot 0.01536 + 0.00553 + 0.00687) = 1.72489 \times 10^{-5}$$

Площа поперечного перерізу прокладок, м²

$$S_{пр} = 0$$

Площа поперечного перерізу паза для розміщення провідників обмотки за (9.48) [1], м²

$$S'_{\Pi} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{III} - (S_{iz} + S_{пр}) = \frac{0.00533 + 0.00667}{2} \cdot 0.01516 - (1.72489 \times 10^{-5} + 0) = 7.37128 \times 10^{-5}$$

22. Коефіцієнт заповнення паза

$$k_z = \frac{(d \cdot 10^{-3})^2 \cdot u_{\Pi}}{S'_{\Pi}} = \frac{(1.5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10.4}{7.37128 \times 10^{-5}} = 0.31745$$

Розрахунок ротора

23. Повітряний проміжок, м (рис 8.31) [1]

$$\delta = 0.7 \cdot 10^{-3}$$

24. Число пазів ротора (табл 8.16) [1]

$$Z_2 = 56$$

25. Зовнішній діаметр ротора, м

$$D_2 = D - 2\delta = 0.2842 - 2 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} = 0.2828$$

26. Довжина магнітопроводу ротора, м

$$l_2 = l_\delta = 0.21593$$

27. Зубцева поділка ротора, м

$$t_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2}{Z_2} = \pi \cdot \frac{0.2828}{56} = 0.01587$$

28. Внутрішній діаметр ротора дорівнює діаметру вала, оскільки сердечник ротора насаджується на вал, м (8.17) [1]

$$\kappa_B = 0.23$$

$$D_B = \kappa_B \cdot D_2 = 0.23 \cdot 0.2828 = 0.06504$$

29. Струм в обмотці ротора (8.57) [1]

$$\cos\varphi = 0.81$$

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos\varphi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.81 = 0.848$$

$$k = 0.85$$

$$v_i = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 62.4 \cdot 0.85}{56} = 5.68286$$

$$I_{2\text{НОМ}} = v_i \cdot I_{1\text{НОМ}} \cdot k_i = 5.68286 \cdot 81.20474 \cdot 0.848 = 391.33072$$

30. Площа поперечного перерізу стрижня (попередньо), м² (8.68) [1]

$$J_2 = 4 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

$$q_n = \frac{I_{2\text{НОМ}}}{J_2} = \frac{376.27954}{4 \cdot 10^6} = 9.40699 \times 10^{-5}$$

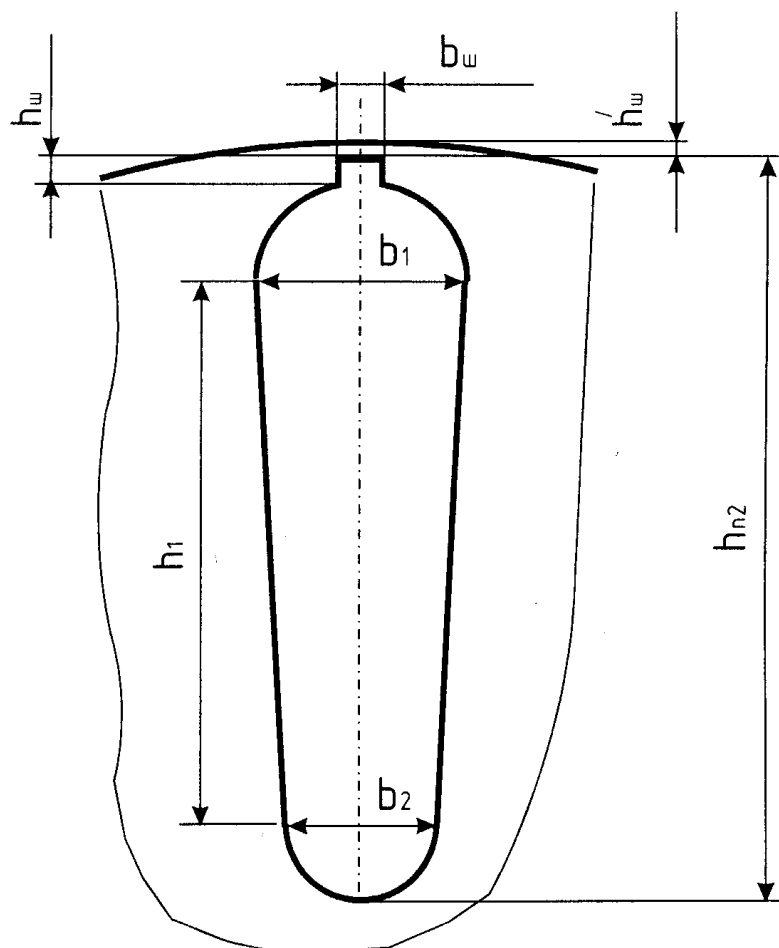


Рисунок 2.6 Паз ротора

31. Паз ротора

$$b'_{\text{III}} = 1.5 \cdot 10^{-3}$$

м

$$h'_{\text{III}} = 0.7 \cdot 10^{-3}$$

м

$$B_{Z2} = 1.85$$

Допустима ширина зубця

$$b_{Z2} = B_{\delta} \cdot \frac{t_{Z2}}{B_{Z2} \cdot 0.97} = 1.08792 \cdot \frac{0.01587}{1.85 \cdot 0.97} = 0.00962$$

Розміри пазу, м

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h'_{\text{III}}) - Z_2 \cdot b_{Z2}}{\pi + Z_2} = \frac{\pi \cdot (0.2828 - 2 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}) - 56 \cdot 0.00962}{\pi + 56} = 0.00584$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot q_n}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{0.00584^2 \cdot \left(\frac{56}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot 9.40699 \times 10^{-5}}{\frac{56}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = 0.00384$$

$$h_2 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (0.00584 - 0.00384) \cdot \frac{56}{2 \cdot \pi} = 0.01787$$

32. Уточнюємо ширину зубців, м

$$b'_{z2} = \frac{\pi \cdot [D_2 - 2 \cdot (h_{ш} \cdot 10^{-3} + h'_{ш}) \cdot b_1]}{Z_2} - b_1 = \frac{\pi \cdot [0.2828 - 2 \cdot (10^{-3} + 0.7 \cdot 10^{-3}) \cdot 0.00584]}{56} - 0.00584 = 0.01002$$

Повна висота паза, м

$$h_{п2} = h'_{ш} + h_{ш} \cdot 10^{-3} + \frac{b_1}{2} + h_2 + \frac{b_2}{2} = 0.7 \cdot 10^{-3} + 10^{-3} + \frac{0.00584}{2} + 0.01787 + \frac{0.00384}{2} = 0.02441$$

33. Площа поперечного перерізу стрижня, м²

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_2 = \frac{\pi}{8} \cdot (0.00584^2 + 0.00384^2) + \frac{1}{2} \cdot (0.00584 + 0.00384) \cdot 0.01787 = 0.00011$$

Густина струму в стрижні, А/м²

$$J_2 = \frac{I_{2ном}}{q_c} = \frac{376.27954}{0.00011} = 3.56239 \times 10^6$$

34. Короткозамкнені кільця.

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 4}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 4}{56}\right) = 0.44504$$

Струм у кільцях, А

$$I_{кл} = \frac{I_{2ном}}{\Delta} = \frac{376.27954}{0.44504} = 845.49246$$

Густина струму в кільцях, А/м²

$$J_{кл} = 0.8 \cdot J_2 = 0.8 \cdot 3.56239 \times 10^6 = 2.84991 \times 10^6$$

Площа поперечного перерізу кільця, м²

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{845.49246}{2.84991 \times 10^6} = 0.0003$$

Розміри короткозамкнених кілець

висота, м

$$h_{кл} = 1.25 \cdot h_{п2} = 1.25 \cdot 0.02441 = 0.03051$$

$$h_{кл} = 0.05$$

ширина, м

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = \frac{0.0003}{0.05} = 0.00593$$

$$b_{кл} = 0.009$$

Уточнена площа перерізу кілець, м²

$$q_{кл} = b_{кл} \cdot h_{кл} = 0.009 \cdot 0.05 = 0.00045$$

Середній діаметр кільця, м

$$D_{с.кл} = D_2 - h_{кл} = 0.2828 - 0.05 = 0.2328$$

Розрахунок магнітного кола

Магнітопровід зі сталі 2013; товщина листів 0,5 мм.

35. Магнітна напруга повітряного проміжку, А

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3.7 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}}\right)^2}{5 + \frac{3.7 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}}} = 2.71627$$

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0.0124}{0.0124 - 2.71627 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}} = 1.1811$$

$$F_{\delta} = 1.59 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 1.59 \cdot 10^6 \cdot 1.08792 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.1811 = 1430.13834$$

36. Магнітна напруга зубцевої зони статора, А

$$H_{\text{п1}} = h_{z1}$$

$$H_{z1} = 2250 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

$$F_{z1} = 2 \cdot H_{z1} \cdot H_{\text{п1}} = 2 \cdot 2250 \cdot 0.03662 = 164.8067$$

Розрахункова індукція в зубцях, Тл

$$B'_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{b_{z1} \cdot k_c} = \frac{1.08792 \cdot 0.0124}{0.00732 \cdot 0.97} = 1.9$$

37. Магнітна напруга зубцевої зони ротора, А

$$H_{z2} = 1620$$

$$F_{z2} = 2 \cdot H_{z2} \cdot h_{\text{п2}} = 79.0778$$

38. Коефіцієнт насичення зубцевої зони

$$k'_z = 1 + \frac{F_{z2} + F_{z1}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{79.0778 + 164.8067}{1430.13834} = 1.17053$$

Магнітна напруга ярма статора, А

$$h_a = \frac{D_c - D}{2} - h'_{\text{пп}} = \frac{0.392 - 0.2842}{2} - 0.01531 = 0.03859$$

Довжина ділянки ярма, м

$$L_a = \pi \cdot \frac{D - h_a}{2 \cdot p} = \pi \cdot \frac{0.2842 - 0.03859}{2 \cdot 4} = 0.09645$$

Індукція ярма статора, Тл

$$B_a = 1.25$$

Напруженість ярма статора, А/м

$$H_a = 272$$

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.09645 \cdot 272 = 26.23451$$

40. Магнітна напруга ярма ротора, А

$$h_j = \frac{D_2 - D_B}{2} - h_{\text{п2}} = \frac{0.2828 - 0.06504}{2} - 0.02441 = 0.08447$$

Індукція в ярмі ротора, Тл

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot k_c \cdot l_\delta} = \frac{0.01669}{2 \cdot 0.08447 \cdot 0.97 \cdot 0.21593} = 0.47168$$

Напруженість в ярмі ротора, А/м

$$H_j = 66$$

Довжина ділянки ярма, м

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_B + h_j)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.06504 + 0.08447)}{2 \cdot 4} = 0.05871$$

$$F_j = H_j \cdot L_j = 66 \cdot 0.05871 = 3.87516$$

41. Магнітна напруга на пару полюсів, А

$$F_\Sigma = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 1430.13834 + 164.8067 + 79.0778 + 26.23451 + 3.87516 = 1704.13251$$

42. Коефіцієнт насичення магнітного кола.

$$k_\mu = \frac{F_\Sigma}{F_\delta} = \frac{1704.13251}{1430.13834} = 1.19159$$

43. Струм намагнічування, А

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_\Sigma}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об1}} = 44.29194$$

Струм намагнічування, в.о.

$$\Gamma'_\mu = \frac{I_\mu}{I_{1ном}} = 0.54544$$

Параметри робочого режиму

44. Активний опір обмотки статора, Ом

$$\beta = 1$$

$$h_{\pi 1} = h_B = 0.01728$$

$$b_{kt} = \frac{\pi \cdot (D + h_{\pi 1}) \cdot \beta}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.2842 + 0.01728)}{2 \cdot 4} = 0.11839$$

Довжина вильоту лобової частини, м

$$k_{вил} = 0.5$$

$$B = 0.01$$

$$l_{вил} = b_{kt} \cdot k_{вил} + B = 0.11839 \cdot 0.5 + 0.01 = 0.06919$$

$$l_{\pi 1} = l_\delta = 0.21593$$

$$l_{л1} = 1.4 \cdot b_{kt} + 2 \cdot B = 1.4 \cdot 0.11839 + 2 \cdot 0.01 = 0.18575$$

$$l_{ср} = 2 \cdot (l_{\pi 1} + l_{л1}) = 2 \cdot (0.21593 + 0.18575) = 0.80334$$

$$L_1 = l_{ср} \cdot w_1 = 0.80334 \cdot 60 = 48.20058$$

$$r_1 = \frac{10^{-6} \cdot L_1}{41 \cdot q_{\phi} \cdot a} = \frac{10^{-6} \cdot 48.20058}{41 \cdot 6.33056 \times 10^{-6} \cdot 2} = 0.09285$$

Відносне значення опору, в.о.

$$r'_{.1} := r_{.1} \cdot \frac{I_{.1ном}}{U_{.1ном}} = 0.027013$$

45. Активний опір фази кз обмотки ротора

$$l_r = l_\delta$$

$$\rho_{al} = \frac{10^{-6}}{41}$$

$$r_c = \frac{l_r \cdot \rho_{al}}{q_c} = 4.986 \times 10^{-5}$$

$$r_{кл} = \frac{\pi D_{с.кл} \cdot \rho_{al}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = \frac{\pi \cdot 0.2328 \cdot \frac{10^{-6}}{41}}{56 \cdot 0.00045} = 7.07862 \times 10^{-7}$$

$$r_2 = r_c + 2 \cdot \frac{r_{кл}}{\Delta^2} = 4.986 \times 10^{-5} + 2 \cdot \frac{7.07862 \times 10^{-7}}{0.44504^2} = 5.70078 \times 10^{-5}$$

Приводимо опір до числа витків обмотки статора, Ом

$$r''_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 5.70078 \times 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (60 \cdot 0.95)^2}{56} = 0.03969$$

Значення опору в в.о.

$$r'_2 = r''_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0.03969 \cdot \frac{81.20474}{220} = 0.027194$$

46. Індуктивний опір фази обмотки статора

$$\xi = 2 \cdot 1.25 - k_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 = 2 \cdot 1.25 - 0.95^2 \cdot \left(\frac{0.01587}{0.0124} \right)^2 = 1.02277$$

$$\lambda_{д1} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{0.0124}{12 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.1811} \cdot 1.02277 = 1.27837$$

$$\lambda_{л1} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_\delta} \cdot (l_{п1} - 0.64 \cdot \tau) = 0.34 \cdot \frac{3}{0.21593} \cdot (0.21593 - 0.64 \cdot 0.11161) = 0.68259$$

$$h_k = 0.5 \cdot (b_1 - b_{ш} \cdot 10^{-3}) = 0.5 \cdot (0.00584 - 3.7 \cdot 10^{-3}) = 0.00107$$

$$h_1 = h_{ш} - 2 \cdot 0.0004 = 0.01471$$

$$\lambda_{п.1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_1} + \left(\frac{h_1}{b_1} + 3 \cdot \frac{h_k}{b_1 + 2 \cdot b_{ш} \cdot 10^{-3}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) = \frac{0.01471}{3 \cdot 0.00584} + \frac{0.01471}{0.00584} + 3 \cdot \frac{0.00107}{0.00584 + 2 \cdot 3.7 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{3.7} = 3.87061$$

$$x_1 = 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{п.1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}) = 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{60}{100} \right)^2 \cdot \frac{0.21593}{4 \cdot 3} \cdot (3.87061 + 1.27837 + 0.68259) = 0.29843$$

Значення в в.о.

$$x'_1 = x_1 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0.29843 \cdot \frac{81.20474}{220} = 0.131023$$

47. Індуктивний опір фази обмотки ротора

$$h_0 = h_2 + 0.4 \cdot b_2 = 0.01787 + 0.4 \cdot 0.00384 = 0.0194$$

$$\xi = 1.0$$

$$\lambda_{д2} = \frac{t_{з2}}{12 \cdot \delta \cdot 1.22} \cdot \xi = \frac{0.01587}{12 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.22} \cdot 1 = 1.54811$$

$$\lambda_{п2} = 2.3 \cdot \frac{D_{с.кл}}{Z_2 \cdot l_{\delta} \cdot \Delta^2} \cdot \log \left(\frac{4.7 \cdot D_{с.кл}}{h_{кл} + 2 \cdot b_{кл}} \right) = 2.3 \cdot \frac{0.2328}{56 \cdot 0.21593 \cdot 0.44504^2} \cdot \log \left(\frac{4.7 \cdot 0.2328}{0.05 + 2 \cdot 0.009} \right) = 0.26975$$

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b'_{ш} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot b_1} \right] + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} + 1.12 \cdot \frac{h_{ш} \cdot 10^{-3}}{l_2} = \frac{0.0194}{3 \cdot 0.00584} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 0.00584^2}{8 \cdot 0.00011} \right)^2 + 0.66 - \frac{1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.00584} + \frac{1}{3.7} + 1.12 \cdot \frac{10^{-3}}{0.21593} = 1.77961$$

$$x_2 = 7.9 \cdot f \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}) \cdot 10^{-6} = 0.00031$$

Приводимо до числа витків статора

$$x''_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 0.00031 \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (60 \cdot 0.95)^2}{56} = 0.21362$$

Значення в в.о.

$$x'_2 = x''_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0.21362 \cdot \frac{81.20474}{220} = 0.181246$$

Розрахунок втрат

48. Основні втрати

$$\gamma_c = 7 \cdot 10^3$$

$$m_a = \pi \cdot (D - h) \cdot h \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c = \pi \cdot (0.2842 - 0.225) \cdot 0.225 \cdot 0.21593 \cdot 0.97 \cdot 7 \cdot 10^3 = 61.35207$$

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_{\delta} \cdot (k_c \cdot \gamma_c) \cdot \frac{(b_{z2} + b_{z1})}{2} = 0.03662 \cdot 72 \cdot 0.21593 \cdot 0.97 \cdot 7 \cdot 10^3 \cdot \frac{0.00962 + 0.00732}{2} = 32.74224$$

$$P_{ст} = 2.5 \cdot (1.8 \cdot B_a^2 \cdot m_a + 1.8 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = 2.5 \cdot (1.8 \cdot 1.25^2 \cdot 61.35207 + 1.8 \cdot 1.9^2 \cdot 32.74224) = 963.27938$$

49. Поверхневі втрати в роторі, Вт

$$B_{02} = 0.37 \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0.37 \cdot 1.1811 \cdot 1.08792 = 0.47543$$

$$P_{пов} = 0.5 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{Z_1}{10000} \cdot n \right)^{1.3} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 = 233.46687$$

$$P_{пов} = P_{пов} \cdot (t_{з2} - b'_{ш}) \cdot Z_2 \cdot l_{\delta} = 233.46687 \cdot (0.01587 - 1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot 56 \cdot 0.21593 = 40.55324$$

50. Пульсуючі втрати в зубцях, Вт

$$h_{z2} = h_{п2}$$

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b'_{z2} \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 20.08554$$

$$B_{пул} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B_{z2} = \frac{2.71627 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.01587} \cdot 1.85 = 0.11086$$

$$P_{пул} = 0.11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{пул} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0.11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{1000} \cdot 0.11086 \right)^2 \cdot 20.08554 = 79.17836$$

51. Сума додаткових втрат, Вт

$$P_{стдод} = P_{пов} + P_{пул} = 40.55324 + 79.17836 = 119.7316$$

52. Повні втрати в сталі, Вт

$$P_{\text{сг}} = P_{\text{сг}} + P_{\text{сгдоп}} = 963.27938 + 119.7316 = 1083.01098$$

52. Механічні втрати, Вт

$$K_T = 1.3 \cdot (1 - D) = 1.3 \cdot (1 - 0.2842) = 0.93054$$

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D^4 = 0.93054 \cdot \left(\frac{750}{10}\right)^2 \cdot 0.2842^4 = 34.1471$$

53. Неробочий хід двигуна

$$P_{1\text{нх}} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 44.29194^2 \cdot 0.09285 = 546.47099$$

$$I_{\text{нха}} = \frac{P_{\text{сг}} + P_{\text{мех}} + P_{1\text{нх}}}{m \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{1083.01098 + 34.1471 + 546.47099}{3 \cdot 220} = 2.52065$$

$$I_{\text{нх}} = \sqrt{I_{\text{нха}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{2.52065^2 + 44.29194^2} = 44.36361$$

$$\cos \varphi_{\text{нх}} = \frac{I_{\text{нха}}}{I_{\text{нх}}} = \frac{2.52065}{44.36361} = 0.05682$$

Розрахунок робочих характеристик

55. Параметри

$$r_{12} = \frac{P_{\text{сг}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{963.27938}{3 \cdot 44.29194^2} = 0.16367$$

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{\mu}} = \frac{220}{44.29194} = 4.96704$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0.29843}{4.96704} = 1.06008$$

Активна складова струму синхронного неробочого ходу, А

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{сг}} \cdot 3 \cdot I_{\mu} \cdot r_1}{3 \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{1083.01098 \cdot 3 \cdot 44.29194 \cdot 0.09285}{3 \cdot 220} = 20.24563$$

$$a' = c_1^2$$

$$b' = 0$$

$$a_x = c_1 \cdot r'_1 = 1.06008 \cdot 0.03427 = 0.03633$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x''_2) = 1.06008 \cdot (0.29843 + 1.06008 \cdot 0.21362) = 0.55642$$

$$s = 0.02$$

$$a' \cdot \frac{r''_2}{s} = 2.23011$$

Активний опір, Ом

$$R = a + a' \cdot \frac{r''_2}{s} = 4.23011$$

Індуктивний опір, Ом

$$X = b + b' \cdot \frac{r''_2}{s} = 0.55642$$

Повний опір, Ом

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 4.26655$$

$$I'_2 = \frac{U_{1\text{ном}}}{Z} = 51.56394$$

$$\sin\varphi'_2 = \frac{X}{Z} = 0.13041$$

$$\cos\varphi'_2 = \frac{R}{Z} = 0.99146$$

Активна складова струму статора, А

$$I_{1a} = I_{0a} + I'_2 \cdot \cos\varphi'_2 = 71.3692$$

Реактивна складова струму ротора, Ом

$$I_{0p} = I_{\mu}$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I'_2 \cdot \sin\varphi'_2 = 51.01662$$

Струм обмотки статора, А

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = 87.72831$$

Струм обмотки ротора, А

$$I''_2 = c_1 \cdot I'_2 = 54.66198$$

Потужність що споживається з мережі, кВт

$$P_1 = 3 \cdot U_{1\text{ном}} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3} = 35.8$$

Втрати потужності, кВт

$$P_{e1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3} = 2.14386$$

$$P_{e2} = 3 \cdot I''_2^2 \cdot r'_2 \cdot 10^{-3} = 0.00651$$

$$P_{\text{дод}} = 0.005 \cdot P_1 = 0.23552$$

$$\Sigma P = P_{\text{ст}} \cdot 10^{-3} + P_{\text{мех}} \cdot 10^{-3} + P_{e1} + P_{e2} + P_{\text{дод}} = 3.50305$$

Потужність на валу, кВт

$$P_2 = P_1 - \Sigma P = 32.2$$

ККД

$$\eta' = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = 0.92563$$

$$\cos\varphi = \frac{I_{1a}}{I_1} = 0.81813$$

Номинальні значення

Струм обмотки статора, А

$$I_{1\text{ном}} = 87.7$$

Струм обмотки ротора, А

$$I_{2\text{ном}} = 54.6$$

Потужність що споживається, кВт

$$P_1 = 35.8$$

Втрати потужності

$$P_{e1} = 2.1$$

$$P_{e2} = 0.0065$$

$$P_{доп} = 0.235$$

$$\Sigma P = 3.5$$

ККД

$$\eta = 0.93$$

Коефіцієнт наваначення

$$\cos \varphi = 0.818$$

Ковзання

$$s = 0.02$$

Розрахунок пускових характеристик

57. Активний опір обмотки ротора з урахуванням ефекту витіснення

$$n \cdot (1 - s) = 735$$

$$h_c = h_{п2} - 0.001 = 0.02441 - 0.001 = 0.02341$$

$$s = 1$$

$$\xi = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s} = 1.4889$$

$$\varphi = 0.6$$

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = 0.01463$$

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_{п2}} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 0.00488$$

$$q_r = \frac{\pi \cdot (b_1)^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 7.61526 \times 10^{-5}$$

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = 1.38703$$

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1.3385$$

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r''_2 = 0.05312$$

58. Індуктивні опори обмотки ротора з урахуванням ефекту витіснення

$$\varphi' = 0.9$$

$$\Delta \lambda_{п2\xi} = \lambda_{п2} \cdot (1 - \varphi') = 0.17796$$

$$\lambda_{п2\xi} = \lambda_{п2} - \Delta \lambda_{п2\xi} = 1.60165$$

$$K_x = \frac{\lambda_{п2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0.95053$$

$$x'_{2\xi} = x''_2 \cdot K_x = 0.20305$$

59. Пускові параметри

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 1.19159 \cdot 4.96704 = 5.91866$$

$$c_{1\Pi} = 1 + \frac{x_1}{x_{12\Pi}} = 1 + \frac{0.29843}{5.91866} = 1.05042$$

60. Розрахунок струмів з урахуванням ефекту витіснення струму

Активний опір, Ом

$$R_{\Pi} = r_1 + c_{1\Pi} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0.14866$$

Індуктивний опір, Ом

$$X_{\Pi} = x_1 + c_{1\Pi} \cdot x'_{2\xi} = 0.51172$$

Струм обмотки статора, А

$$I'_{2\Pi} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{\Pi}^2 + X_{\Pi}^2}} = 423$$

Струм статора, А

Розрахунок пускових характеристик з урахуванням ефекту витіснення струму і насичення від полів розсіювання.

$$\kappa_{нас} = 1.5$$

$$C_{\Pi} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{0.7 \cdot 10^{-3}}{0.0124 + 0.01587}} = 1.03342$$

$$F_{\Pi.ср} = 0.7 \cdot I_{1\Pi} \cdot \kappa_{нас} \cdot u_{\Pi} \cdot \left(1 + 0.95 \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 2568.0825$$

Індукція, Тл

$$B_{Фб} = \frac{F_{\Pi.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_{\Pi}} = 2.21877$$

$$k'_{\delta} = 0.85$$

Коефіцієнт магнітної проникності пазового розсіювання обмотки з урахуванням насичення

$$c'_1 = (t_{z1} - b_{ш} \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - k'_{\delta}) = 0.00131$$

$$\Delta\lambda_{\Pi 1 нас} = \frac{h_{ш} + 0.58 \cdot h_k}{b_{ш}} \cdot \frac{c'_1}{c'_1 + 1.5 \cdot b_{ш}} = 6.35787 \times 10^{-5}$$

$$\Delta\lambda_{\Pi 1 нас} = 0.076$$

$$\lambda_{\Pi 1 нас} = \lambda_{\Pi.1} - \Delta\lambda_{\Pi 1 нас} = 3.79461$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки статора з урахуванням впливу насичення

$$\lambda_{д1 нас} = \lambda_{д1} \cdot k'_{\delta} = 1.08661$$

Індуктивний опір фази обмотки статора з урахуванням впливу насичення, Ом

$$x_{1 нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\Pi 1 нас} + \lambda_{д1 нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{\Pi.1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}} = 0.28473$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки ротора з урахуванням впливу насичення і витіснення струму

$$c_{e2} = (t_{z2} - b'_{ш}) \cdot (1 - k'_{\delta}) = 0.00215$$

$$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h'_{ш}}{b'_{ш}} \cdot \frac{c_{e2}}{c_{e2} + b'_{ш}} = 0.27514$$

$$\Delta\lambda_{п2нас} = 0.65$$

$$\lambda_{п2\xi нас} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2нас} = 1.12961$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання з урахуванням впливу насичення

$$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2} \cdot k'_{\delta} = 1.31589$$

Приведений індуктивний опір фази обмотки ротора з урахуванням насичення та ефекту витіснення струму, Ом

$$x'_{2\xi нас} = x''_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\xi нас} + \Delta\lambda_{п2нас} + \lambda_{д2нас}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}} = 0.18381$$

$$c_{1пнас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}} = 1.04811$$

62. Розрахунок струмів і моментів

Активний опір при пуску, Ом

$$s_{п} = 1$$

$$R_{п.нас} = r_1 + c_{1пнас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s_{п}} = 0.14853$$

Індуктивний опір при пуску, Ом

$$X_{п.нас} = x_{1нас} + c_{1пнас} \cdot x'_{2\xi нас} = 0.47738$$

Струм обмотки ротора, А

$$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}} = 440$$

Струм обмотки статора, А

$$I_{1нас} = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{x_{12п} \cdot c_{1пнас}} = 454.2$$

Кратність пускового струму з урахуванням впливу ефекту витіснення струму та насичення

$$I_{п} = \frac{I_{1нас}}{I_{1ном}} = 6.24216$$

Кратність пускового моменту з урахуванням впливу витіснення струму і насичення

$$s_{п} = 1$$

$$M_{п} = \left(\frac{I'_{2нас}}{I_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s}{s_{п}} = 1.28321$$

$$k''_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I'_{2\text{п}}} = 1.07$$

63. Критичне ковзання

$$s_{\text{кр}} = \frac{r'_{2\xi}}{\frac{x_{1\text{нас}}}{c_{1\text{пнас}}} + x'_{2\xi\text{нас}}} = 0.08843$$

Тепловий розрахунок

64. Перевищення температури внутрішньої поверхні сердечника статора над температурою повітря всередині двигуна.

$$K = 0.2$$

$$k_p = 1.07$$

$$\alpha_1 = 100$$

$$P'_{e1} = k_p \cdot P_{e1} \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \frac{l_\delta}{l_{\text{ср}}} = 1.07 \cdot 2.1 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \frac{0.21593}{0.80334} = 1207.91804$$

$$\Delta\nu_{\text{пов}1} = K \cdot \frac{P'_{e1} + P_{\text{ст}}}{\pi \cdot D \cdot l_\delta \cdot \alpha_1} = 0.2 \cdot \frac{1207.91804 + 963.27938}{\pi \cdot 0.2842 \cdot 0.21593 \cdot 100} = 22.52423$$

65. Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора, С

$$\Pi_{\text{п}1} = 2 \cdot h'_{\text{пп}} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0.01531 + 0.00584 + 0.00384 = 0.04029$$

$$\lambda_{\text{екв}} = 0.16$$

$$\lambda'_e = 1.4$$

$$\frac{d}{d_{i3}} = 0.94937$$

$$\Delta\nu_{i3,\text{п}1} = \frac{P'_{e1}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{п}1} \cdot l_\delta} \cdot \left(\frac{0.4}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_e} \right) \cdot 10^{-3} = \frac{1207.91804}{72 \cdot 0.04029 \cdot 0.21593} \cdot \left(\frac{0.4}{0.16} + \frac{0.00584 + 0.00384}{16 \cdot 1.4} \right) \cdot 10^{-3} = 4.82139$$

66. Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин, С

$$P'_{e1} = k_p \cdot P_{e1} \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \frac{l_{\text{л}1}}{l_{\text{ср}}} = 1.07 \cdot 2.1 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \frac{0.18575}{0.80334} = 1039.08196$$

$$\Delta\nu_{i3,\text{л}1} = \frac{P'_{e1}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{п}1} \cdot l_{\text{л}1}} \cdot \left(\frac{0.4}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{h'_{\text{пп}}}{12 \cdot \lambda'_e} \right) \cdot 10^{-3} = \frac{1039.08196}{2 \cdot 72 \cdot 0.04029 \cdot 0.18575} \cdot \left(\frac{0.4}{0.16} + \frac{0.01531}{12 \cdot 1.4} \right) \cdot 10^{-3} = 2.41115$$

67. Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над температурою повітря всередині двигуна, С

$$\Delta\nu_{\text{пов.л}1} = \frac{K \cdot P'_{e1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{вил}} \cdot \alpha_1} = \frac{0.2 \cdot 1039.08196}{2 \cdot \pi \cdot 0.2842 \cdot 0.06919 \cdot 100} = 16.8191$$

68. Перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині двигуна, С

$$\Delta\nu'_1 = \frac{(\Delta\nu_{\text{пов}1} + \Delta\nu_{i3,\text{п}1}) \cdot 2 \cdot l_\delta + (\Delta\nu_{i3,\text{л}1} + \Delta\nu_{\text{пов.л}1}) \cdot 2 \cdot l_\delta}{l_{\text{ср}}} = \frac{(22.52423 + 4.82139) \cdot 2 \cdot 0.21593 + (2.41115 + 16.8191) \cdot 2 \cdot 0.21593}{0.80334} = 25.03776$$

69. Перевищення температури повітря всередині двигуна над температурою навколишнього середовища, С

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1) \cdot (P_{e1} + P_{e2}) = 3.5 + (1.07 - 1) \cdot (2.1 + 0.0065) = 3.64746$$

$$\Sigma P'_B = \Sigma P' \cdot 10^3 - (1 - K) \cdot (P'_{e1} + P_{ct}) - 0.9 \cdot P_{мех} = 3.64746 \cdot 10^3 - (1 - 0.2) \cdot (1039.08196 + 963.27938) - 0.9 \cdot 34.1471 = 2014.83354$$

$$s_{кор} = (\pi \cdot D + 8 \cdot 0.32) (l_{\delta} + 2 \cdot l_{вил}) = (\pi \cdot 0.2842 + 8 \cdot 0.32) \cdot (0.21593 + 2 \cdot 0.06919) = 1.2234$$

$$\Delta \nu_B = \frac{\Sigma P'_B}{s_{кор} \cdot 20} = \frac{2014.83354}{1.2234 \cdot 20} = 82.34596$$

70. Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища, С

$$\Delta \nu_1 = \Delta \nu'_1 + \Delta \nu_B = 25.03776 + 82.34596 = 107.38371$$

71. Перевірка умов охолодження двигуна, м³/с

$$k_m = 2.5 \cdot \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_c} = 2.5 \cdot \sqrt{\frac{750}{100} \cdot 0.392} = 4.28661$$

$$Q_B = \frac{k_m \cdot \Sigma P'_B}{1100 \cdot \Delta \nu_B} = \frac{4.28661 \cdot 2014.83354}{1100 \cdot 82.34596} = 0.09535$$

Витрати повітря що забезпечуються вентилятором, м³/с

$$\Theta'_B = 0.6 \cdot D_c^3 \cdot \frac{n}{100} = 0.6 \cdot 0.392^3 \cdot \frac{750}{100} = 0.27106$$

2.3 Розрахунок асинхронного двигуна з подвійною білячою кліткою, яка виготовлена з алюмінію

Вихідні данні:

Номінальна потужність, Вт

$$P_H = 30000$$

Число фаз

$$m = 3$$

Число пар полюсів

$$p = 4$$

Номінальний ККД

$$\eta = 0.905$$

Коефіцієнт навантаження

$$\cos \varphi = 0.81$$

Номінальне ковзання

$$s = 0.02$$

Пусковий струм, в.о.

$$I_{пуск} = 5.5$$

Пусковий момент, в.о.

$$M_{пуск} = 1.4$$

Максимальний момент, в.о.

$$M_{макс} = 2.3$$

Висота осі обертання, м

$$h = 0.225$$

Номінальна напруга, В

$$U_{1ном} = 220$$

$$U_y = 380$$

Вибір основних розмірів.

1. Висота осі обертання (рис.8.17 а) [1], м

$$h = 0.225$$

2. Внутрішній діаметр статора (табл 9.8) [1], м

$$D_c = 0.392 \quad k_d = 0.725$$

за табл 9.9 [1]

$$D = k_d \cdot D_c = 0.725 \cdot 0.392 = 0.2842$$

3. Полісна поділка, м

$$\tau = \frac{D \pi}{2 \cdot p} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{2 \cdot 4} = 0.11161$$

4. Розрахункова потужність (за 9.4) [1], ВА

$$k_e = 0.96$$

за рис. 9.20

$$P' = \frac{P_H \cdot k_e}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{30000 \cdot 0.96}{0.905 \cdot 0.81} = 39287.90669$$

5. Електромагнітні навантаження (попередньо за рис. 9.22 б) [1]

$$A = 34 \cdot 10^3$$

$$B_\delta = 0.8$$

6. Обмотувальний коефіцієнт (попередньо для одношарової обмотки)

$$k_{o61} = 0.95$$

7. Розрахункова довжина магнітопровода (за 9.6) [1], м

$$f = 50 \text{ Гц}$$

$$\Omega = \frac{2 \cdot f \cdot \pi}{p} = \frac{2 \cdot 50 \cdot \pi}{4} = 78.53982 \text{ рад/с}$$

$$k_b = 1.11$$

$$l_\delta = \frac{P'}{k_b \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{o61} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{39287.90669}{1.11 \cdot 0.2842^2 \cdot 78.53982 \cdot 0.95 \cdot 34 \cdot 10^3 \cdot 0.8} = 0.21593$$

8. Відношення в допустимих межах (рис 9.25) [1]

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0.21593}{0.11161} = 1.93473$$

9. Визначення значення (за рис 9.26) [1]

$$t_{z1\max} = 0.013$$

$$t_{z1\min} = 0.011$$

10. Число пазів статора (8.16) [1]

$$Z_{1\min} = \frac{D \cdot \pi}{t_{z1\max}} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{0.013} = 68.68005$$

$$Z_{1\max} = \frac{D \cdot \pi}{t_{z1\min}} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{0.011} = 81.16733$$

Приймаємо $Z_1 = 72$, тоді

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{72}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 3$$

11. Зубцева поділка

$$t_{z1} = \frac{D \cdot \pi}{2 \cdot p \cdot m \cdot q_1} = \frac{0.2842 \cdot \pi}{2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3} = 0.0124$$

12. Число ефективних провідників в пазу (попередньо при умові що $a=1$ за 9.17) [1]

$$^2_{1\hat{\Pi}} = \frac{P'}{m \cdot U_{1\hat{\Pi}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{39287.90669}{3 \cdot 220 \cdot 0.905 \cdot 0.81} = 81.20474$$

$$u'_i = \frac{A \cdot D \cdot \pi}{^2_{1\hat{\Pi}} \cdot Z_1} = \frac{34 \cdot 10^3 \cdot 0.2842 \cdot \pi}{81.20474 \cdot 72} = 5.19205$$

13. Приймаємо $a = 2$ (8.17) [1], тоді

$$u_{\Pi} = u'_i \cdot a = 10.3841$$

$$u_i = 12$$

14. Кінцеве значення числа витків по фазі (9.20) [1]

$$w_1 = u_i \cdot \frac{Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = 10 \cdot \frac{72}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 60$$

Лінійне навантаження, А/м (8.21) [1]

$$A = \frac{^2_{1\hat{\Pi}} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 81.20474 \cdot 60 \cdot 3}{\pi \cdot 0.2842} = 32742.35482$$

Магнітний потік (8.22) [1], Вб

$$\Phi = \frac{k_e \cdot U_{1\text{ном}}}{4 \cdot k_b \cdot w_1 \cdot k_{o61} \cdot f} = \frac{0.96 \cdot 220}{4 \cdot 1.11 \cdot 60 \cdot 0.95 \cdot 50} = 0.01669$$

Індукція в повітряному проміжку, Тл (8.23) [1]

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_{\delta}} = \frac{4 \cdot 0.01669}{0.2842 \cdot 0.21593} = 1.08792$$

Значення A і B_{δ} знаходяться в допустимих межах (рис 9.22) [1]

15. Густина струму обмотки статора (8.25) [1]

за рис 9.27 $AJ_1 = 210 \cdot 10^9$

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A} = \frac{210 \cdot 10^9}{34052.04901} = 6.16703 \times 10^6$$

16. Площа поперечного перерізу ефективного провідника, м² (8.24) [1]

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot J_1} = \frac{81.20474}{2 \cdot 6.16703 \times 10^6} = 6.58378 \times 10^{-6}$$

17. Переріз ефективного провідника: приймаємо $n_{\text{ел}} = 3$, тоді . Приймаємо звичайний провід марки ПЕТВ (додаток 3) [1]

$$q_{\text{ел}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{ел}}} = \frac{6.58378 \times 10^{-6}}{3} = 2.19459 \times 10^{-6}$$

$$d = 1.5$$

$$q_{\text{ел}} = 2.2$$

$$d_{i3} = 1.58$$

$$q_{e,ср} = n_{eЛ} \cdot q_{eЛ} = 3 \cdot 2.2 = 6.6$$

18. Густина струму обмотки статора (за 9.27), А/мм²

$$J_{1w} = \frac{I_{1ном}}{a \cdot q_{eЛ} \cdot n_{eЛ}} = \frac{81.20474}{2 \cdot 2.2 \cdot 3} = 6.15187$$

Розрахунок розмірів зубцевої зони статора і повітряного проміжку

Розрахунок розмірів зубцевої зони статора і повітряного проміжку

Паз статора визначаємо за рис 9.29[1], а із співвідношенням розмірів, що забезпечують паралельність бокових граней зубців.

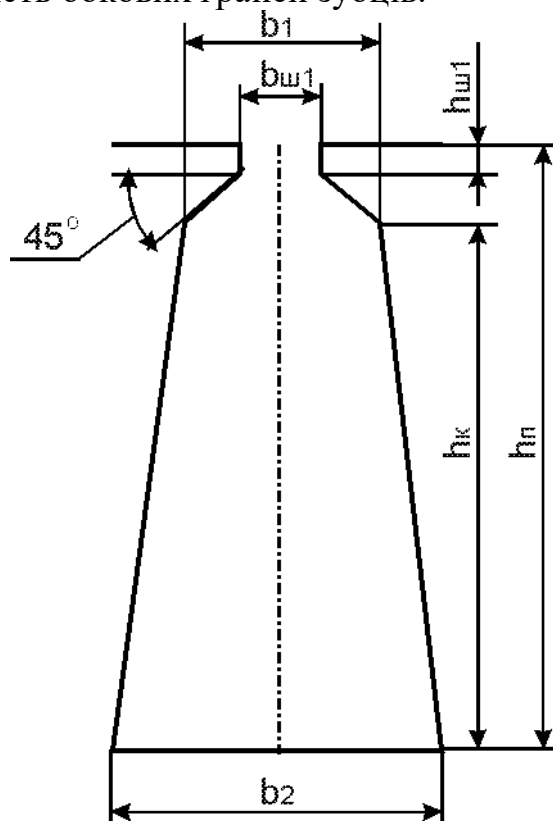


Рисунок 2.7 Паз статора

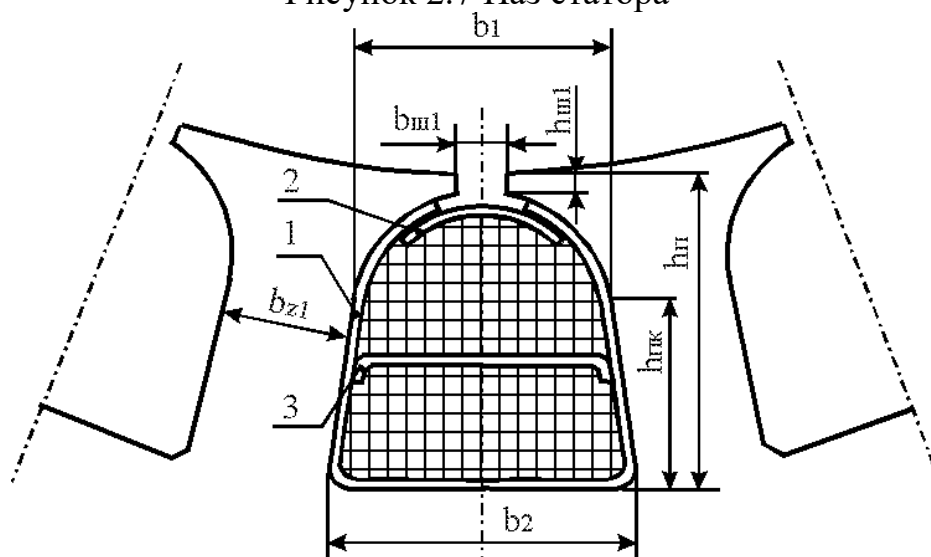


Рисунок 2.8 Паз статора

19. Приймаємо попередньо по табл 9.12 $B_{z1} = 1.9$ Тл, $B_a = 1.25$ Тл;

за табл 9.13 для окисованої сталі 2013: $k_c = 0.97$

Ширина пазу, м (табл. 8.10) [1]

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{B_{z1} \cdot k_c} = \frac{1.04608 \cdot 0.0124}{1.9 \cdot 0.97} = 0.00704$$

Висота пазу, м

$$h_{z1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{\delta} \cdot k_c \cdot l_{\delta}} = \frac{0.01605}{2 \cdot 1.04608 \cdot 0.97 \cdot 0.21593} = 0.03662$$

20. Розміри паза в штампі, м (8.38) [1]

$$b_{\text{ш}} = 3.7 \text{ мм}$$

$$h_{\text{ш}} = 1$$

$$h_B = \frac{D_c - D}{2} - h_{z1} = \frac{0.392 - 0.2842}{2} - 0.03662 = 0.01728$$

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{\text{ш}} \cdot 10^{-3} - b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (0.2842 + 2 \cdot 10^{-3} - 3.7 \cdot 10^{-3}) - 72 \cdot 0.00704}{72 - \pi} = 0.00553$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_B)}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0.2842 + 2 \cdot 0.01728)}{72} - 0.00704 = 0.00687$$

$$h_{\text{шш}} = h_B - \left(h_{\text{ш}} \cdot 10^{-3} + \frac{b_1 - b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 0.01728 - \left(10^{-3} + \frac{0.00553 - 3.7 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 0.01536$$

21. Розміри пазу на світлі з урахуванням допуску на складання. М (табл. 8.17) [1]

$$b'_1 = b_1 - 0.0002 = 0.00553 - 0.0002 = 0.00533$$

$$b'_2 = b_2 - 0.0002 = 0.00687 - 0.0002 = 0.00667$$

$$h'_{\text{шш}} = h_{\text{шш}} - 0.0002 = 0.01536 - 0.0002 = 0.01516$$

Площа поперечного перерізу ізоляції корпусу в пазі, м^2 (табл. 3.1) [1]

$$S_{iz} = 0.0004 \cdot (2 \cdot h_{\text{шш}} + b_1 + b_2) = 0.0004 \cdot (2 \cdot 0.01536 + 0.00553 + 0.00687) = 1.72489 \times 10^{-5}$$

Площа поперечного перерізу прокладок, м^2

$$S_{\text{пр}} = 0$$

Площа поперечного перерізу паза для розміщення провідників обмотки за (9.48) [1], м^2

$$S'_{\pi} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{\text{шш}} - (S_{iz} + S_{\text{пр}}) = \frac{0.00533 + 0.00667}{2} \cdot 0.01516 - (1.72489 \times 10^{-5} + 0) = 7.37128 \times 10^{-5}$$

22. Коефіцієнт заповнення паза

$$k_z = \frac{(d \cdot 10^{-3})^2 \cdot u_{\pi}}{S'_{\pi}} = \frac{(1.5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10.4}{7.37128 \times 10^{-5}} = 0.31745$$

Розрахунок ротора

23. Повітряний проміжок, м (рис 8.31) [1]

$$\delta = 0.7 \cdot 10^{-3}$$

24. Число пазів ротора (табл 8.16) [1]

$$Z_2 = 56$$

25. Зовнішній діаметр ротора, м

$$D_2 = D - 2\delta = 0.2842 - 2 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} = 0.2828$$

26. Довжина магнітопроводу ротора, м

$$l_2 = l_\delta = 0.21593$$

27. Зубцева поділка ротора, м

$$t_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2}{Z_2} = \pi \cdot \frac{0.2828}{56} = 0.01587$$

28. Внутрішній діаметр ротора дорівнює діаметру вала, оскільки сердечник ротора насаджується на вал, м (8.17) [1]

$$\kappa_B = 0.23$$

$$D_B = \kappa_B \cdot D_2 = 0.23 \cdot 0.2828 = 0.06504$$

29. Струм в обмотці ротора (8.57) [1]

$$\cos\varphi = 0.81$$

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos\varphi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.81 = 0.848$$

$$k = 0.85$$

$$v_i = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 62.4 \cdot 0.85}{56} = 5.68286$$

$$I_{2\text{ном}} = v_i \cdot I_{1\text{ном}} \cdot k_i = 5.68286 \cdot 81.20474 \cdot 0.848 = 391.33072$$

30. Площа поперечного перерізу стрижня (попередньо), м² (8.68) [1]

$$J_2 = 2.5 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{м}^2}$$

$$q_n = \frac{I_{2\text{ном}}}{J_2} = \frac{391.33072}{2.5 \cdot 10^6} = 0.00016$$

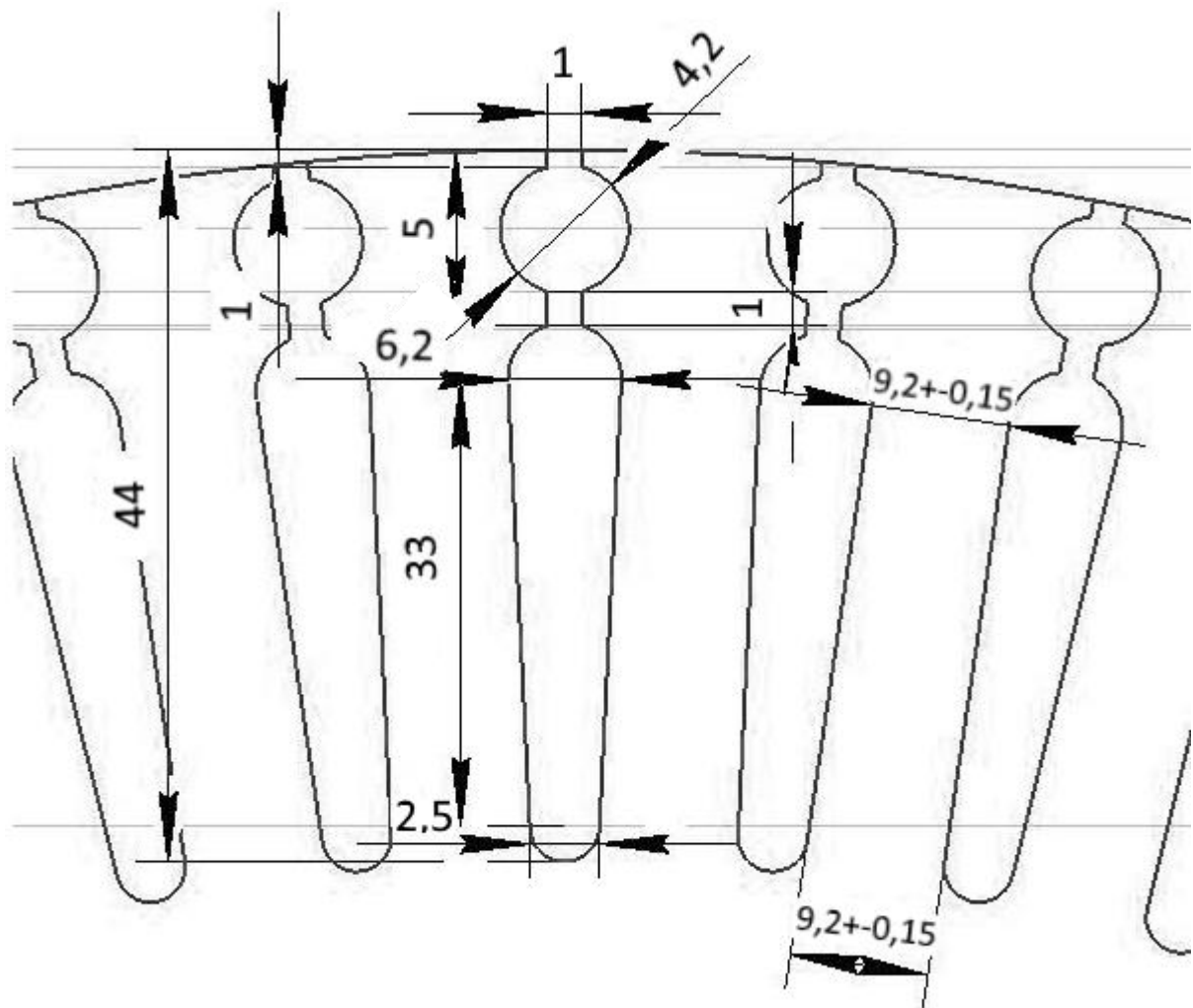


Рисунок 2.9 Паз ротора

31. Паз ротора (рис. 3.3) [1]

$$b'_{\text{ш}} = 1.5 \cdot 10^{-3}$$

м

$$h'_{\text{ш}} = 0.7 \cdot 10^{-3}$$

м

$$B_{z2} = 1.85$$

Допустима ширина зубця (8.10) [1]

$$b_{z2} = B_{\delta} \cdot \frac{t_{z2}}{B_{z2} \cdot 0.97} = 1.04608 \cdot \frac{0.01587}{1.85 \cdot 0.97} = 0.00925$$

Розміри пазу, м (8.77) [1]

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h'_{\text{ш}}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} = \frac{\pi \cdot (0.2828 - 2 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}) - 56 \cdot 0.00925}{\pi + 56} = 0.00619$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot q_n}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{0.00619^2 \cdot \left(\frac{56}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot 0.00016}{\frac{56}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = 0.00246$$

$$h_{21} = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (0.00584 - 0.00384) \cdot \frac{56}{2 \cdot \pi} = 0.03326$$

$$b_B = 4.2 \text{ мм}$$

$$h_{ш} = 1 \text{ мм}$$

$$h_{22} = 0.9 \cdot b_B + h_{ш} = 5 \text{ мм}$$

$$h_H = 39 \text{ мм}$$

$$h_0 = 1 \text{ мм}$$

$$b_{H1} = 6.2 \text{ мм}$$

32. Уточнюємо ширину зубців, м (8.78) [1]

$$b'_{z2} = \frac{\pi \cdot [D_2 - 2 \cdot (h_{ш} \cdot 10^{-3} + h'_{ш}) \cdot b_1]}{Z_2} - b_1 = \frac{\pi \cdot [0.2828 - 2 \cdot (10^{-3} + 0.7 \cdot 10^{-3}) \cdot 0.00619]}{56} - 0.00619 = 0.00967$$

Повна висота паза, м (8.79) [1]

$$h_{f2} = h'_{ш} + h_{ш} \cdot 10^{-3} + \frac{b_1}{2} + h_{21} + h_{22} + \frac{b_2}{2} = 0.7 \cdot 10^{-3} + 10^{-3} + \frac{0.00584}{2} + 0.03326 + 0.005 + \frac{0.00384}{2} = 0.0448$$

33. Площа поперечного перерізу стрижня, м² (8.68) [1]

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_2 = \frac{\pi}{8} \cdot (0.00619^2 + 0.00246^2) + \frac{1}{2} \cdot (0.00619 + 0.00246) \cdot 0.03326 = 0.00016$$

Густина струму в стрижні, А/м²

$$J_2 = \frac{I_{2ном}}{q_c} = \frac{391.33072}{0.00016} = 2.42639 \times 10^6$$

34. Короткозамкнені кільця.

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 4}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 4}{56}\right) = 0.44504$$

Струм у кільцях, А

$$I_{кл} = \frac{I_{2ном}}{\Delta} = \frac{391.33072}{0.44504} = 879.31216$$

Густина струму в кільцях, А/м²

$$J_{кл} = 0.8 \cdot J_2 = 0.8 \cdot 2.42639 \times 10^6 = 1.94111 \times 10^6$$

Площа поперечного перерізу кільця, м² (8.72) [1]

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{879.31216}{1.94111 \times 10^6} = 0.00045$$

Розміри короткозамкнених кілець

висота, м (рис. 8.37) [1]

$$h_{кл} = 1.25 \cdot h_{п2} = 1.25 \cdot 0.03929 = 0.04911$$

$$h_{кл} = 0.050$$

ширина, м

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = \frac{0.00045}{0.05} = 0.00906$$

$$b_{кл} = 0.009$$

Уточнена площа перерізу кілець, м² (8.73) [1]

$$q_{кл} = b_{кл} \cdot h_{кл} = 0.009 \cdot 0.05 = 0.00045$$

Середній діаметр кільця, м

$$D_{с.кл} = D_2 - h_{кл} = 0.2828 - 0.05 = 0.2328$$

Розрахунок магнітного кола

Магнітопровід зі сталі 2013; товщина листів 0,5 мм.

35. Магнітна напруга повітряного проміжку, А

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{\text{ш}} \cdot 10^{-3}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3.7 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}}\right)^2}{5 + \frac{3.7 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}}} = 2.71627$$

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0.0124}{0.0124 - 2.71627 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}} = 1.1811$$

$$F_{\delta} = 1.59 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 1.59 \cdot 10^6 \cdot 1.08792 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.1811 = 1430.13834$$

36. Магнітна напруга зубцевої зони статора, А

$$H_{\text{п1}} = h_{z1}$$

$$H_{z1} = 2250 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

$$F_{z1} = 2 \cdot H_{z1} \cdot H_{\text{п1}} = 2 \cdot 2250 \cdot 0.03662 = 164.8067$$

Розрахункова індукція в зубцях, Тл

$$B'_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{b_{z1} \cdot k_c} = \frac{1.08792 \cdot 0.0124}{0.00732 \cdot 0.97} = 1.9$$

37. Магнітна напруга зубцевої зони ротора, А

$$H_{z2} = 1620$$

$$F_{z21} = 8.91$$

$$F_{z22} = 50.382$$

$$F_{z2} = 2 \cdot (F_{z21} + F_{z22}) = 118.584$$

38. Коефіцієнт насичення зубцевої зони

$$k'_z = 1 + \frac{F_{z2} + F_{z1}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{118.584 + 164.8067}{1430.13834} = 1.19816$$

Магнітна напруга ярма статора, А

$$h_a = \frac{D_c - D}{2} - h'_{\text{пш}} = \frac{0.392 - 0.2842}{2} - 0.01531 = 0.03859$$

Довжина ділянки ярма, м

$$L_a = \pi \cdot \frac{D - h_a}{2 \cdot p} = \pi \cdot \frac{0.2842 - 0.03859}{2 \cdot 4} = 0.09645$$

Індукція ярма статора, Тл

$$B_a = 1.25$$

Напруженість ярма статора, А/м

$$H_a = 272$$

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.09645 \cdot 272 = 26.23451$$

40. Магнітна напруга ярма ротора, А

$$h_j = \frac{D_2 - D_B}{2} - h_{п2} = \frac{0.2828 - 0.06504}{2} - 0.04193 = 0.06695$$

Індукція в ярмі ротора, Тл

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot k_c \cdot l_\delta} = \frac{0.01669}{2 \cdot 0.06695 \cdot 0.97 \cdot 0.21593} = 0.59512$$

Напруженість в ярмі ротора, А/м

$$H_j = 66$$

Довжина ділянки ярма, м

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_B + h_j)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.06504 + 0.06695)}{2 \cdot 4} = 0.05183$$

$$F_j = H_j \cdot L_j = 66 \cdot 0.05183 = 3.42105$$

41. Магнітна напруга на пару полюсів, А

$$F_{ц} = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 1430.13834 + 164.8067 + 118.584 + 26.23451 + 3.42105 = 1743.1846$$

42. Коефіцієнт насичення магнітного кола.

$$k_\mu = \frac{F_{ц}}{F_\delta} = \frac{1743.1846}{1430.13834} = 1.21889$$

43. Струм намагнічування, А

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_{ц}}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об1}} = 45.30694$$

Струм намагнічування, в.о.

$$\Gamma'_\mu = \frac{I_\mu}{I_{1ном}} = 0.55793$$

Параметри робочого режиму

44. Активний опір обмотки статора, Ом

$$\beta = 1$$

$$h_{п1} = h_B = 0.01728$$

$$b_{kt} = \frac{\pi \cdot (D + h_{п1}) \cdot \beta}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.2842 + 0.01728)}{2 \cdot 4} = 0.11839$$

Довжина вильону лобової частини, м

$$k_{вил} = 0.5$$

$$B = 0.01$$

$$l_{вил} = b_{kt} \cdot k_{вил} + B = 0.11839 \cdot 0.5 + 0.01 = 0.06919$$

$$l_{п1} = l_\delta = 0.21593$$

$$l_{л1} = 1.4 \cdot b_{kt} + 2 \cdot B = 1.4 \cdot 0.11839 + 2 \cdot 0.01 = 0.18575$$

$$l_{ср} = 2 \cdot (l_{п1} + l_{л1}) = 2 \cdot (0.21593 + 0.18575) = 0.80334$$

$$L_1 = l_{ср} \cdot w_1 = 0.80334 \cdot 60 = 48.20058$$

$$r_1 = \frac{10^{-6} \cdot L_1}{41 \cdot q_{ef} \cdot a} = \frac{10^{-6} \cdot 48.20058}{41 \cdot 6.33056 \times 10^{-6} \cdot 2} = 0.09285$$

Відносне значення опору, в.о.

$$r'_1 = r_1 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0.03427$$

45. Активний опір фази кз обмотки ротора

$$l_r = l_\delta$$

$$\rho_{al} = \frac{10^{-6}}{20.5}$$

$$r_c = \frac{l_r \cdot \rho_{al}}{q_c} = 6.88765 \times 10^{-5}$$

$$r_{кл} = \frac{\pi D_{с.кл} \cdot \rho_{al}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = \frac{\pi \cdot 0.2328 \cdot \frac{10^{-6}}{20.5}}{56 \cdot 0.00045} = 1.41572 \times 10^{-6}$$

$$r_2 = r_c + 2 \cdot \frac{r_{кл}}{\Delta^2} = 6.88765 \times 10^{-5} + 2 \cdot \frac{1.41572 \times 10^{-6}}{0.44504^2} = 8.31722 \times 10^{-5}$$

Приводимо опір до числа витків обмотки статора, Ом

$$r''_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 8.31722 \times 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (60 \cdot 0.95)^2}{56} = 0.05791$$

Значення опору в в.о.

$$r'_2 = r''_2 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0.05791 \cdot \frac{81.20474}{220} = 0.027194$$

46. Індуктивний опір фази обмотки статора

$$\xi = 2 \cdot 1.25 - k_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 = 2 \cdot 1.25 - 0.95^2 \cdot \left(\frac{0.01587}{0.0124} \right)^2 = 1.02277$$

$$\lambda_{д1} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{0.0124}{12 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.1811} \cdot 1.02277 = 1.27837$$

$$\lambda_{л1} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_\delta} \cdot (l_{п1} - 0.64 \cdot \tau) = 0.34 \cdot \frac{3}{0.21593} \cdot (0.21593 - 0.64 \cdot 0.11161) = 0.68259$$

$$h_k = 0.5 \cdot (b_1 - b_{ш} \cdot 10^{-3}) = 0.5 \cdot (0.00584 - 3.7 \cdot 10^{-3}) = 0.00107$$

$$h_1 = h_{пш} - 2 \cdot 0.0004 = 0.01471$$

$$\lambda_{п.1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_1} + \left(\frac{h_1}{b_1} + 3 \cdot \frac{h_k}{b_1 + 2 \cdot b_{ш} \cdot 10^{-3}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) = \frac{0.01471}{3 \cdot 0.00584} + \frac{0.01471}{0.00584} + 3 \cdot \frac{0.00107}{0.00584 + 2 \cdot 3.7 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{3.7} = 3.87061$$

$$x_1 = 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{п.1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}) = 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{60}{100} \right)^2 \cdot \frac{0.21593}{4 \cdot 3} \cdot (3.87061 + 1.27837 + 0.68259) = 0.29843$$

Значення в в.о.

$$x'_1 = x_1 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0.29843 \cdot \frac{81.20474}{220} = 0.132631$$

47. Індуктивний опір фази обмотки ротора

$$h_0 = h_2 + 0.4 \cdot b_2 = 0.03643 + 0.4 \cdot 0.00175 = 0.03713$$

$$\xi = 1.0$$

$$\lambda_{д2} = \frac{t_{з2}}{12 \cdot \delta \cdot 1.22} \cdot \xi = \frac{0.01587}{12 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.22} \cdot 1 = 1.54811$$

$$\lambda_{л2} = 2.3 \cdot \frac{D_{с.кл}}{Z_2 \cdot l_{\delta} \cdot \Delta^2} \cdot \log \left(\frac{4.7 \cdot D_{с.кл}}{h_{кл} + 2 \cdot b_{кл}} \right) = 2.3 \cdot \frac{0.2328}{56 \cdot 0.21593 \cdot 0.44504^2} \cdot \log \left(\frac{4.7 \cdot 0.2328}{0.05 + 2 \cdot 0.009} \right) = 0.26975$$

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b'_{ш} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot b_1} \right] + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} + 1.12 \cdot \frac{h_{ш} \cdot 10^{-3}}{l_2} = \frac{0.03713}{3 \cdot 0.00584} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 0.00584^2}{8 \cdot 0.00015} \right)^2 + 0.66 - \frac{1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.00584} + \frac{1}{3.7} + 1.12 \cdot \frac{10^{-3}}{0.21593} = 2.69949$$

$$x_2 = 7.9 \cdot f \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}) \cdot 10^{-6} = 0.00039$$

Приводимо до числа витків статора

$$x''_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 0.00039 \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (60 \cdot 0.95)^2}{56} = 0.26824$$

Значення в в.о.

$$x'_2 = x''_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0.26824 \cdot \frac{81.20474}{220} = 0.182948$$

Розрахунок втрат

48. Основні втрати

$$\gamma_c = 7 \cdot 10^3$$

$$m_a = \pi \cdot (D - h) \cdot h \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c = \pi \cdot (0.2842 - 0.225) \cdot 0.225 \cdot 0.21593 \cdot 0.97 \cdot 7 \cdot 10^3 = 61.35207$$

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_{\delta} \cdot (k_c \cdot \gamma_c) \cdot \frac{(b_{z2} + b_{z1})}{2} = 0.03662 \cdot 72 \cdot 0.21593 \cdot 0.97 \cdot 7 \cdot 10^3 \cdot \frac{0.00962 + 0.00732}{2} = 32.74224$$

$$P_{ст} = 2.5 \cdot (1.8 \cdot B_a^2 \cdot m_a + 1.8 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = 2.5 \cdot (1.8 \cdot 1.25^2 \cdot 61.35207 + 1.8 \cdot 1.9^2 \cdot 32.74224) = 963.27938$$

49. Поверхневі втрати в роторі, Вт

$$B_{02} = 0.37 \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0.37 \cdot 1.1811 \cdot 1.08792 = 0.47543$$

$$P_{пов} = 0.5 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{Z_1}{10000} \cdot n \right)^{1.3} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 = 233.46687$$

$$P_{пов} = P_{пов} \cdot (t_{з2} - b'_{ш}) \cdot Z_2 \cdot l_{\delta} = 233.46687 \cdot (0.01587 - 1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot 56 \cdot 0.21593 = 40.55324$$

50. Пульсуючі втрати в зубцях, Вт

$$h_{z2} = h_{п2}$$

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b'_{z2} \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 34.50427$$

$$B_{пул} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B_{z2} = \frac{2.71627 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.01587} \cdot 1.85 = 0.11086$$

$$P_{пул} = 0.11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{пул} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0.11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{1000} \cdot 0.11086 \right)^2 \cdot 34.50427 = 136.01784$$

51. Сума додаткових втрат, Вт

$$P_{\text{стдод}} = P_{\text{пов}} + P_{\text{пул}} = 40.55324 + 136.01784 = 176.57109$$

52. Повні втрати в сталі, Вт

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{стдод}} = 963.27938 + 176.57109 = 1139.85046$$

52. Механічні втрати, Вт

$$K_T = 1.3 \cdot (1 - D) = 1.3 \cdot (1 - 0.2842) = 0.93054$$

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D^4 = 0.93054 \cdot \left(\frac{750}{10}\right)^2 \cdot 0.2842^4 = 34.1471$$

53. Неробочий хід двигуна

$$P_{1\text{нх}} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 45.30694^2 \cdot 0.09285 = 571.80395$$

$$I_{\text{нха}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{1\text{нх}}}{m \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{1139.85046 + 34.1471 + 571.80395}{3 \cdot 220} = 2.64515$$

$$I_{\text{нх}} = \sqrt{I_{\text{нха}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{2.64515^2 + 45.30694^2} = 45.38409$$

$$\cos \varphi_{\text{нх}} = \frac{I_{\text{нха}}}{I_{\text{нх}}} = \frac{2.64515}{45.38409} = 0.05828$$

Розрахунок робочих характеристик

55. Параметри

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{963.27938}{3 \cdot 45.30694^2} = 0.15642$$

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{\mu}} = \frac{220}{45.30694} = 4.85577$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0.29843}{4.85577} = 1.06146$$

Активна складова струму синхронного неробочого ходу, А

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст}} \cdot 3 \cdot I_{\mu} \cdot r_1}{3 \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{1139.85046 \cdot 3 \cdot 45.30694 \cdot 0.09285}{3 \cdot 220} = 21.79648$$

$$a' = c_1^2$$

$$b' = 0$$

$$a_x = c_1 \cdot r'_1 = 1.06146 \cdot 0.03427 = 0.03638$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x''_2) = 1.06146 \cdot (0.29843 + 1.06146 \cdot 0.26824) = 0.619$$

$$s = 0.02$$

$$a' \cdot \frac{r''_2}{s} = 3.2621$$

Активний опір, Ом

$$R = a + a' \cdot \frac{r''_2}{s} = 5.2621$$

Індуктивний опір, Ом

$$X = b + b' \cdot \frac{r''_2}{s} = 0.619$$

Повний опір, Ом

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 5.29838$$

$$I'_2 = \frac{U_{1\text{ном}}}{Z} = 41.52211$$

$$\sin\varphi'_2 = \frac{X}{Z} = 0.11683$$

$$\cos\varphi'_2 = \frac{R}{Z} = 0.99315$$

Активна складова струму статора, А

$$I_{1a} = I_{0a} + I'_2 \cdot \cos\varphi'_2 = 63.03425$$

Реактивна складова струму ротора, Ом

$$I_{0p} = I_\mu$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I'_2 \cdot \sin\varphi'_2 = 50.15787$$

Струм обмотки статора, А

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = 80.55513$$

Струм обмотки ротора, А

$$I''_2 = c_1 \cdot I'_2 = 44.07399$$

Потужність що споживається з мережі, кВт

$$P_1 = 3 \cdot U_{1\text{ном}} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3} = 37.4$$

Втрати потужності, кВт

$$P_{e1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3} = 1.80761$$

$$P_{e2} = 3 \cdot I''_2{}^2 \cdot r''_2 \cdot 10^{-3} = 0.00766$$

$$P_{\text{дод}} = 0.005 \cdot P_1 = 0.20801$$

$$\Sigma P = P_{\text{ст}} \cdot 10^{-3} + P_{\text{мех}} \cdot 10^{-3} + P_{e1} + P_{e2} + P_{\text{дод}} = 3.19727$$

Потужність на валу, кВт

$$P_2 = P_1 - \Sigma P = 32.5$$

ККД

$$\eta' = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = 0.92315$$

$$\cos\varphi = \frac{I_{1a}}{I_1} = 0.7893$$

Номінальні значення

Струм обмотки статора, А

$$I_{1\text{ном}} = 80.5$$

Струм обмотки ротора, А

$$I_{2\text{ном}} = 44$$

Потужність що споживається, кВт

$$P_1 = 37.4$$

Втрати потужності

$$P_{\text{с1}} = 1.8$$

$$P_{\text{с2}} = 0.0076$$

$$P_{\text{дод}} = 0.2$$

$$\Sigma P = 3.2$$

ККД

$$\eta = 0.92$$

Коефіцієнт наванання

$$\cos \varphi = 0.79$$

Ковзання

$$s = 0.02$$

Розрахунок пускових характеристик

57. Активний опір обмотки ротора з урахуванням ефекту витіснення

$$n \cdot (1 - s) = 735$$

$$h_c = h_{\text{п2}} - 0.001 = 0.04193 - 0.001 = 0.04093$$

$$s = 1$$

$$\xi = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s} = 2.6034$$

$$\varphi = 1.4$$

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = 0.01705$$

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_{\text{п2}}} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 0.00446$$

$$q_r = \frac{\pi \cdot (b_1)^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 8.62045 \times 10^{-5}$$

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = 1.77399$$

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1.64095$$

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r''_2 = 0.09502$$

58. Індуктивні опори обмотки ротора з урахуванням ефекту витіснення

$$\varphi' = 0.9$$

$$\Delta \lambda_{\text{п2}\xi} = \lambda_{\text{п2}} \cdot (1 - \varphi') = 0.26995$$

$$\lambda_{\text{п2}\xi} = \lambda_{\text{п2}} - \Delta \lambda_{\text{п2}\xi} = 2.42954$$

$$K_x = \frac{\lambda_{\text{п2}\xi} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}}} = 0.94024$$

$$x'_{2\xi} = x''_2 \cdot K_x = 0.25221$$

59. Пускові параметри

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 1.21889 \cdot 4.85577 = 5.91866$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1 + \frac{0.29843}{5.91866} = 1.05042$$

60. Розрахунок струмів з урахуванням ефекту витіснення струму

Активний опір, Ом

$$R_{п} = r_1 + c_{1п} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0.19266$$

Індуктивний опір, Ом

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x'_{2\xi} = 0.56336$$

Струм обмотки статора, А

$$I'_{2п} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = 367$$

Струм статора, А

Розрахунок пускових характеристик з урахуванням ефекту витіснення струму і насичення від полів розсіювання.

$$k_{нас} = 1.5$$

$$C_{п} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{0.7 \cdot 10^{-3}}{0.0124 + 0.01587}} = 1.03342$$

$$F_{п.ср} = 0.7 \cdot I_{1п} \cdot k_{нас} \cdot u_{п} \cdot \left(1 + 0.95 \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 2358.1575$$

Індукція, Тл

$$B_{Фб} = \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_{п}} = 2.0374$$

$$k'_{\delta} = 0.85$$

Коефіцієнт магнітної проникності пазового розсіювання обмотки з урахуванням насичення

$$c'_1 = (t_{z1} - b_{ш} \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - k'_{\delta}) = 0.00131$$

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш} + 0.58 \cdot h_k}{b_{ш}} \cdot \frac{c'_1}{c'_1 + 1.5 \cdot b_{ш}} = 6.35787 \times 10^{-5}$$

$$\Delta\lambda_{п1нас} = 0.076$$

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п.1} - \Delta\lambda_{п1нас} = 3.79461$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки статора з урахуванням впливу насичення

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot k'_{\delta} = 1.08661$$

Індуктивний опір фази обмотки статора з урахуванням впливу насичення, Ом

$$x_{1\text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п1нас}} + \lambda_{\text{д1нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п.1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}} = 0.28473$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки ротора з урахуванням впливу насичення і витіснення струму

$$c_{e2} = (t_{z2} - b'_{\text{ш}}) \cdot (1 - k'_{\delta}) = 0.00215$$

$$\Delta\lambda_{\text{п2нас}} = \frac{h'_{\text{ш}}}{b'_{\text{ш}}} \cdot \frac{c_{e2}}{c_{e2} + b'_{\text{ш}}} = 0.27514$$

$$\Delta\lambda_{\text{п2нас}} = 0.65$$

$$\lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{п2}} - \Delta\lambda_{\text{п2нас}} = 2.04949$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання з урахуванням впливу насичення

$$\lambda_{\text{д2нас}} = \lambda_{\text{д2}} \cdot k'_{\delta} = 1.31589$$

Приведений індуктивний опір фази обмотки ротора з урахуванням насичення та ефекту витіснення струму, Ом

$$x'_{2\xi\text{нас}} = x''_2 \cdot \frac{\lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}} + \Delta\lambda_{\text{п2нас}} + \lambda_{\text{д2нас}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}}} = 0.23844$$

$$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{п}}} = 1.04811$$

62. Розрахунок струмів і моментів

Активний опір при пуску, Ом

$$s_{\text{п}} = 1$$

$$R_{\text{п.нас}} = r_1 + c_{1\text{пнас}} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s_{\text{п}}} = 0.19244$$

Індуктивний опір при пуску, Ом

$$X_{\text{п.нас}} = x_{1\text{нас}} + c_{1\text{пнас}} \cdot x'_{2\xi\text{нас}} = 0.53463$$

Струм обмотки ротора, А

$$I'_{2\text{нас}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + X_{\text{п.нас}}^2}} = 392.8$$

Струм обмотки статора, А

$$I_{1\text{нас}} = I'_{2\text{нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + (X_{\text{п.нас}} + x_{12\text{п}})^2}}{x_{12\text{п}} \cdot c_{1\text{пнас}}} = 408.6$$

Кратність пускового струму з урахуванням впливу ефекту витіснення струму та насичення

$$I_{\text{п}} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I_{1\text{ном}}} = 5.59213$$

Кратність пускового моменту з урахуванням впливу витіснення струму і насичення

$$s_{\text{п}} = 1$$

$$M_{\Pi} = \left(\frac{I'_{2\text{нас}}}{I_{2\text{ном}}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s}{s_{\Pi}} = 1.69017$$

$$k''_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I'_{2\Pi}} = 1.11$$

63. Критичне ковзання

$$s_{\text{кр}} = \frac{r'_{2\xi}}{\frac{x_{1\text{нас}}}{c_{1\text{пнас}}} + x'_{2\xi\text{нас}}} = 0.08854$$

Тепловий розрахунок

64. Перевищення температури внутрішньої поверхні сердечника статора над температурою повітря всередині двигуна.

$$K = 0.2$$

$$k_p = 1.07$$

$$\alpha_1 = 100$$

$$P'_{e1} = k_p \cdot P_{e1} \cdot 10^3 \cdot 2 \frac{l_{\delta}}{l_{cp}} = 1.07 \cdot 1.8 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \frac{0.21593}{0.80334} = 1035.35832$$

$$\Delta\nu_{\text{пов}1} = K \cdot \frac{P'_{e1} + P_{ct}}{\pi \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_1} = 0.2 \cdot \frac{1035.35832 + 963.27938}{\pi \cdot 0.2842 \cdot 0.21593 \cdot 100} = 20.73408$$

65. Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора, С

$$\Pi_{\text{п}1} = 2 \cdot h'_{\text{пп}} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0.01531 + 0.00584 + 0.00175 = 0.03821$$

$$\lambda_{\text{екв}} = 0.16$$

$$\lambda'_e = 1.4$$

$$\frac{d}{d_{i3}} = 0.94937$$

$$\Delta\nu_{i3.\text{п}1} = \frac{P'_{e1}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{п}1} \cdot l_{\delta}} \cdot \left(\frac{0.4}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_e} \right) \cdot 10^{-3} = \frac{1035.35832}{72 \cdot 0.03821 \cdot 0.21593} \cdot \left(\frac{0.4}{0.16} + \frac{0.00584 + 0.00175}{16 \cdot 1.4} \right) \cdot 10^{-3} = 4.3577$$

66. Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин, С

$$P'_{e1} = k_p \cdot P_{e1} \cdot 10^3 \cdot 2 \frac{l_{\text{л}1}}{l_{cp}} = 1.07 \cdot 1.8 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \frac{0.18575}{0.80334} = 890.64168$$

$$\Delta\nu_{i3.\text{л}1} = \frac{P'_{e1}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{п}1} \cdot l_{\text{л}1}} \cdot \left(\frac{0.4}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{h'_{\text{пп}}}{12 \cdot \lambda'_e} \right) \cdot 10^{-3} = \frac{890.64168}{2 \cdot 72 \cdot 0.03821 \cdot 0.18575} \cdot \left(\frac{0.4}{0.16} + \frac{0.01531}{12 \cdot 1.4} \right) \cdot 10^{-3} = 2.17935$$

67. Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над температурою повітря всередині двигуна, С

$$\Delta\nu_{\text{пов.л}1} = \frac{K \cdot P'_{e1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{вил}} \cdot \alpha_1} = \frac{0.2 \cdot 890.64168}{2 \cdot \pi \cdot 0.2842 \cdot 0.06919 \cdot 100} = 14.41637$$

68. Перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині двигуна, С

$$\Delta\nu'_1 = \frac{(\Delta\nu_{\text{пов}1} + \Delta\nu_{i3.\text{п}1}) \cdot 2 \cdot l_{\delta} + (\Delta\nu_{i3.\text{л}1} + \Delta\nu_{\text{пов.л}1}) \cdot 2 \cdot l_{\delta}}{l_{cp}} = \frac{(20.73408 + 4.3577) \cdot 2 \cdot 0.21593 + (2.17935 + 14.41637) \cdot 2 \cdot 0.21593}{0.80334} = 22.40991$$

69. Перевищення температури повітря всередині двигуна над температурою навколишнього середовища, С

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1) \cdot (P_{e1} + P_{e2}) = 3.2 + (1.07 - 1) \cdot (1.8 + 0.0076) = 3.32653$$

$$\Sigma P'_B = \Sigma P' \cdot 10^3 - (1 - K) \cdot (P'_{e1} + P_{ct}) - 0.9 \cdot P_{мех} = 3.32653 \cdot 10^3 - (1 - 0.2) \cdot (890.64168 + 963.27938) - 0.9 \cdot 34.1471 = 1812.66276$$

$$s_{кор} = (\pi \cdot D + 8 \cdot 0.32) (l_{\delta} + 2 \cdot l_{вил}) = (\pi \cdot 0.2842 + 8 \cdot 0.32) \cdot (0.21593 + 2 \cdot 0.06919) = 1.2234$$

$$\Delta \nu_B = \frac{\Sigma P'_B}{s_{кор} \cdot 20} = \frac{1812.66276}{1.2234 \cdot 20} = 74.08327$$

70. Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища, С

$$\Delta \nu_1 = \Delta \nu'_1 + \Delta \nu_B = 22.40991 + 74.08327 = 96.49318$$

71. Перевірка умов охолодження двигуна, м³/с

$$k_m = 2.5 \cdot \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_c} = 2.5 \cdot \sqrt{\frac{750}{100} \cdot 0.392} = 4.28661$$

$$Q_B = \frac{k_m \cdot \Sigma P'_B}{1100 \cdot \Delta \nu_B} = \frac{4.28661 \cdot 1812.66276}{1100 \cdot 74.08327} = 0.09535$$

Витрати повітря що забезпечуються вентилятором, м³/с

$$\Theta'_B = 0.6 \cdot D_c^3 \cdot \frac{n}{100} = 0.6 \cdot 0.392^3 \cdot \frac{750}{100} = 0.27106$$

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЇ СХЕМИ ПЕРЕВІРКИ ЯКІСНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ОБМОТКА ЯКИХ ВИГОТОВЛЕНА З РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Дослідження перехідних процесів у головній обмотці статора асинхронного електродвигуна 4A225M8

Для аналізу стану ізоляції практично застосовуються методи діагностики, які мають на увазі пропускання хвиль струму або напруги вздовж обмотки. Для ефективного застосування цього методу діагностики в житті необхідно виділення для кожної серії певного типу машин еталонних параметрів перехідного процесу під час проходження через обмотку. Відхилення від цих параметрів і буде характеризувати реальний стан ізоляції. При математичному моделюванні фізичні процеси описуються математичними висловлюваннями, в яких багато параметрів прийнято з певними припущеннями. Тому для практичного застосування теорії необхідно проведення лабораторних досліджень і порівняння їх з теоретичними даними [22].

У цій роботі було проведено ряд дослідів, пов'язаних з отриманням графічних зображень форми перехідного процесу в обмотці асинхронного електродвигуна при подачі прямокутної форми сигналу напруги.

При проведенні дослідів була використана випробувальна установка, схематичне зображення основних вузлів якої зображено на рисунку 3.1. Нижче наводиться опис та призначення основних вузлів випробувальної установки.

Установка живиться від мережі змінного струму 220В.

Для подачі постійної напруги під час заряду розрядної ємності використовується випрямляч з корекцією вихідного коефіцієнта потужності.

Блок з розрядною ємністю вмикає ключі F1 і F2, які дозволяють замикати-розмикати ланцюг для заряду-розряду конденсатора $C_{\text{вип}}$ на випробувальну обмотку електричної машини.

Магазин опорів включає опори R1, R2, R3, R4, R5, що мають значення 300 Ом, 1 кОм, 16 кОм, 100 кОм і 200 кОм. Він дозволяє вибірково підключати будь-який опір у схему для моделювання процесів.

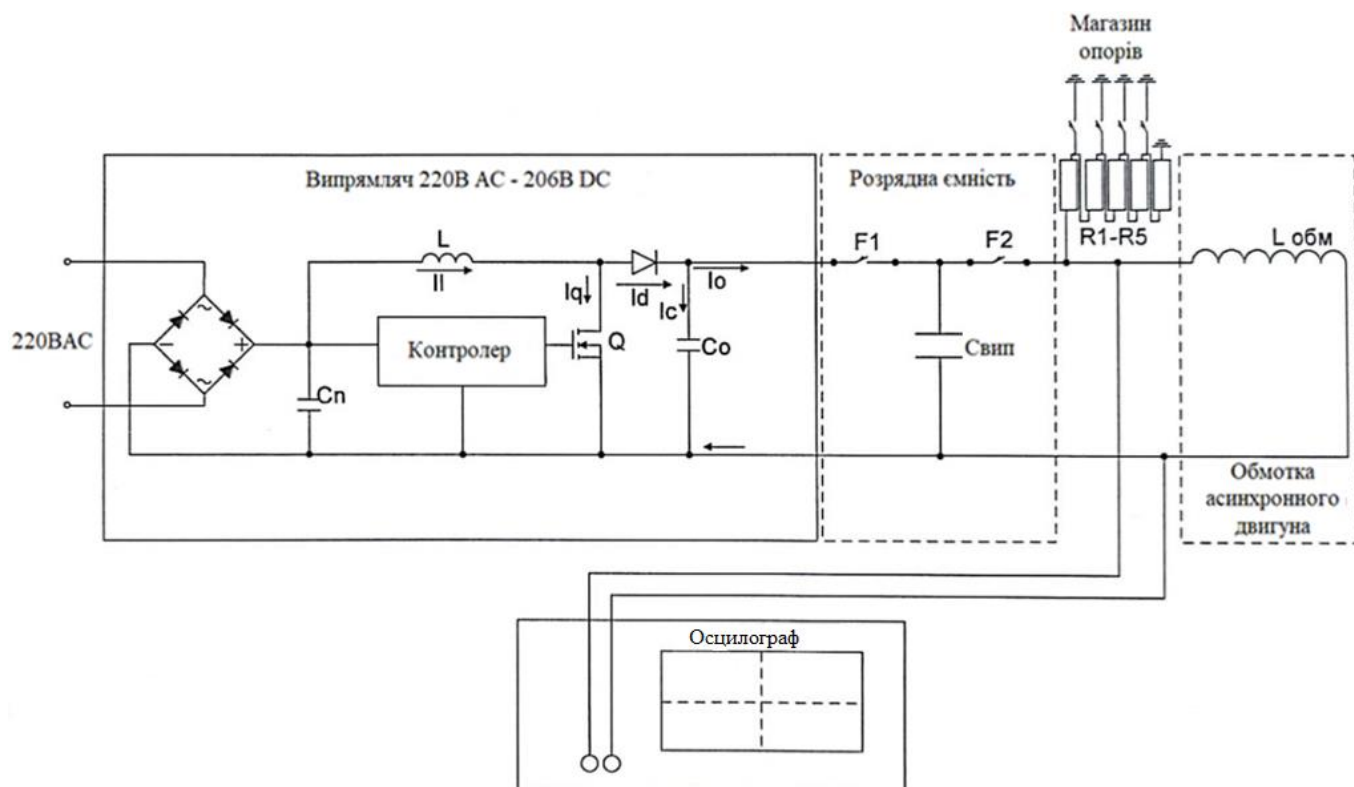


Рисунок 3.1 Схема випробувальної установки для проведення дослідів

L - індуктивність; C_n - ємність;

Q -перемикач контролера;

C_o -силова ємність;

$C_{вип}$ - випробувальна розрядна ємність;

$F1$ - ключ 1; $F2$ - ключ 2;

$R1 - R5$ - магазин опорів 300 Ом - 200 кОм;

$L_{обм}$ - обмотка синхронного генератора;

Цифровий запам'ятовуючий осцилограф з максимальною частотою вхідного сигналу 100Гц.

Отримані в результаті дослідів діаграми із зображенням перехідних процесів представлені на рисунках 3.2 – 3.8.

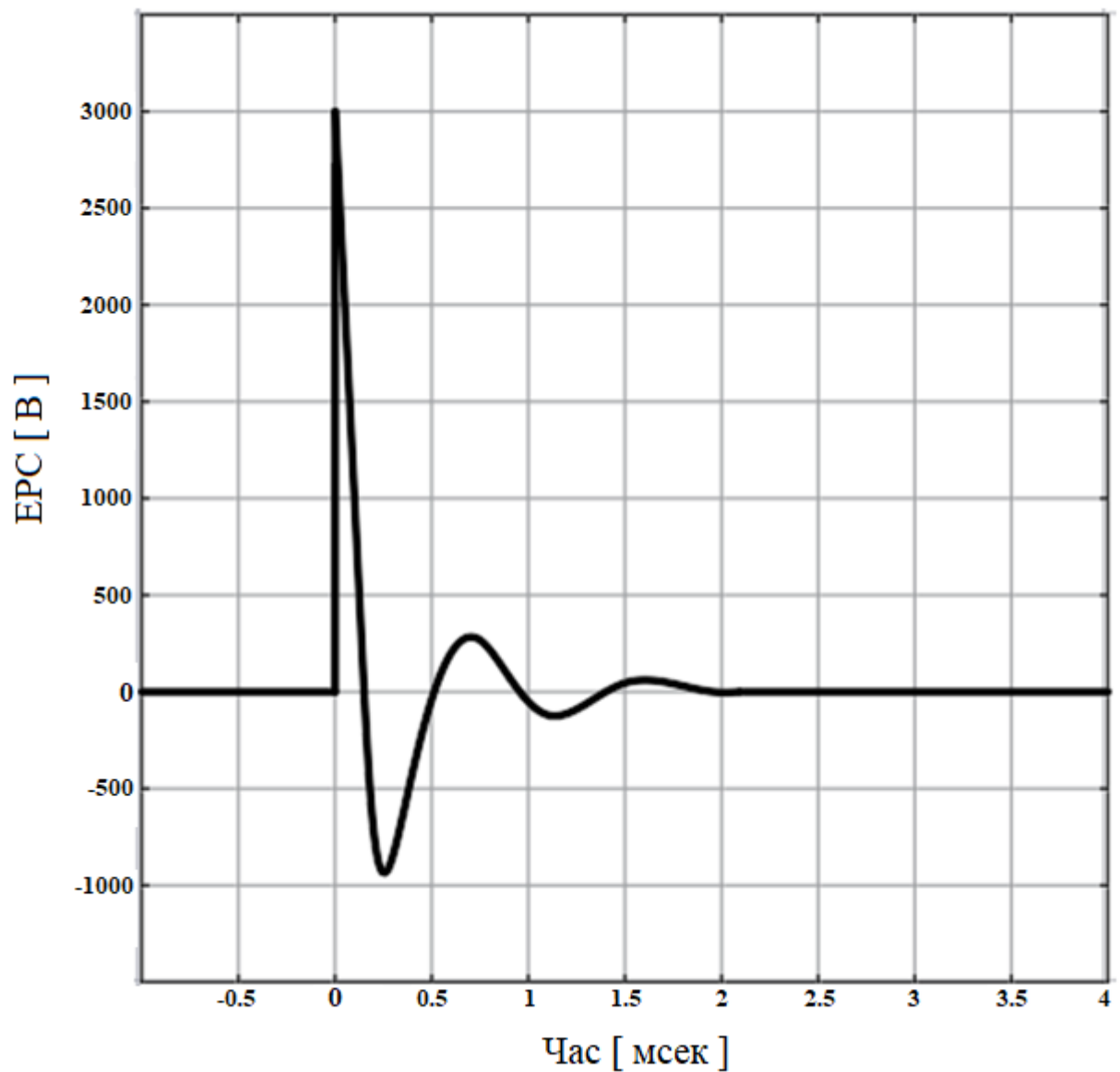


Рисунок 3.2 Перехідний процес при опорі ізоляції на початку обмотки
понад 550 кОм

Аналіз першої діаграми показує, що перехідний опір ізоляції на корпус машини понад 550 кОм відповідає тому ж результату, коли опір нескінченний. Це вказує на те, що чутливість системи обмежується виявленням дефектної ділянки, що відповідає опору близько 500 кОм.

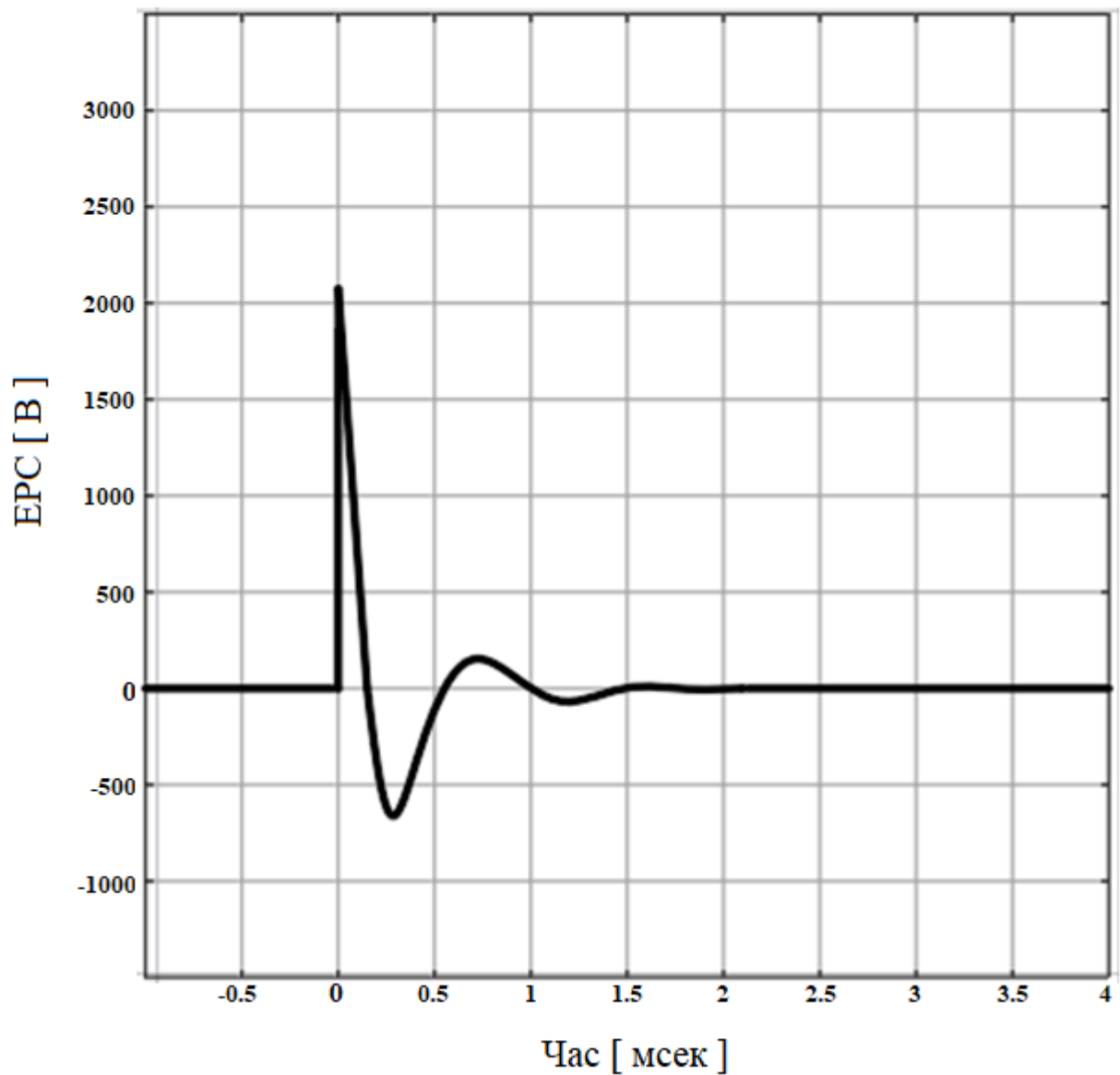


Рисунок 3.3 Перехідний процес при опорі ізоляції на початку обмотки 200 кОм

Аналіз діаграми показує, що при перехідному опорі дефекту 200 кОм зменшується розмах амплітуд перехідного процесу приблизно на 18%. Враховуючи, що опір головної ізоляції в межах від 200 до 500 кОм є сигналом до вибракування машини, така чутливість достатня для використання комутаційного процесу в інтересах діагностики ізоляції.

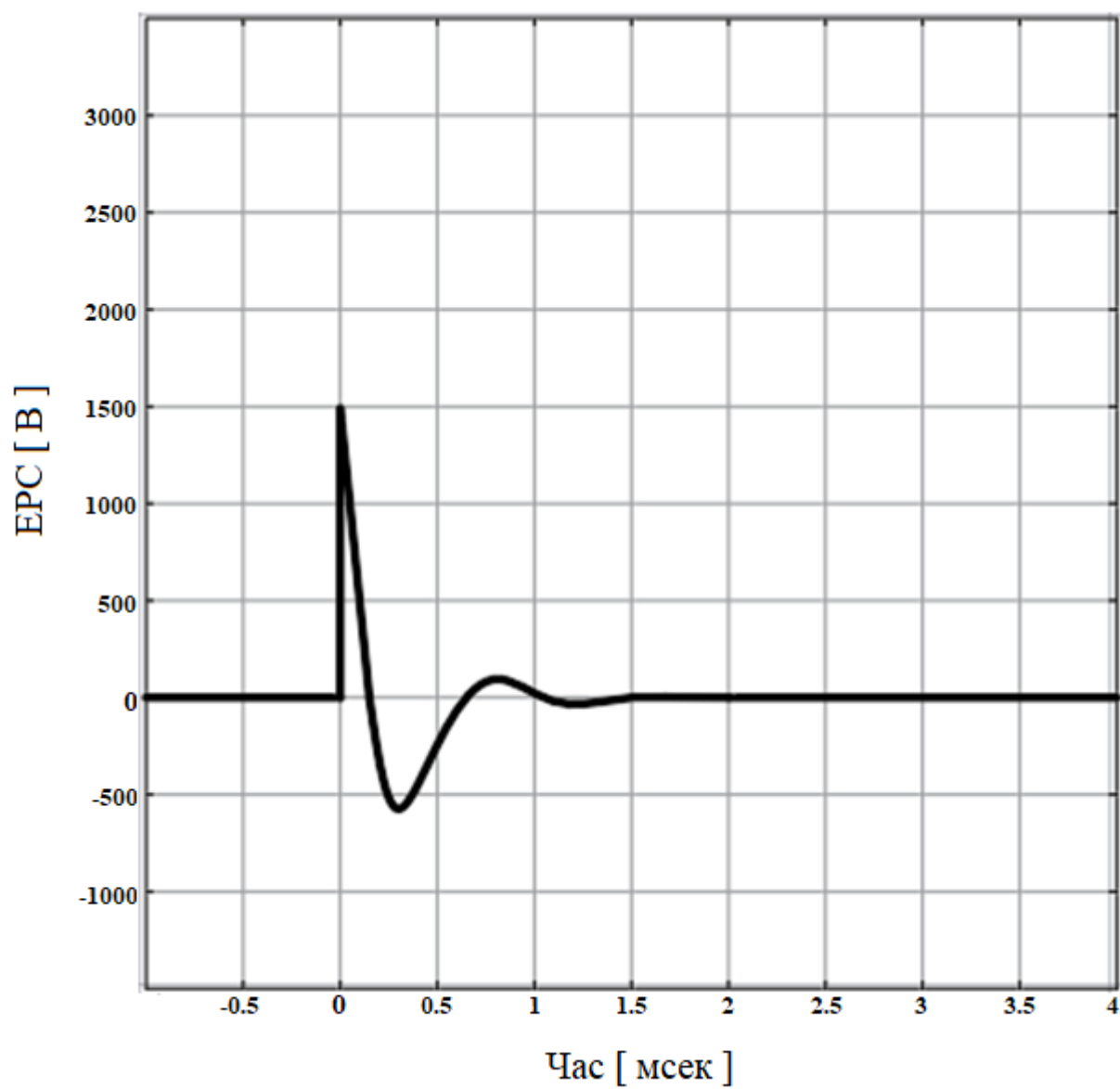


Рисунок 3.4 Перехідний процес при опорі ізоляції на початку обмотки 100 кОм

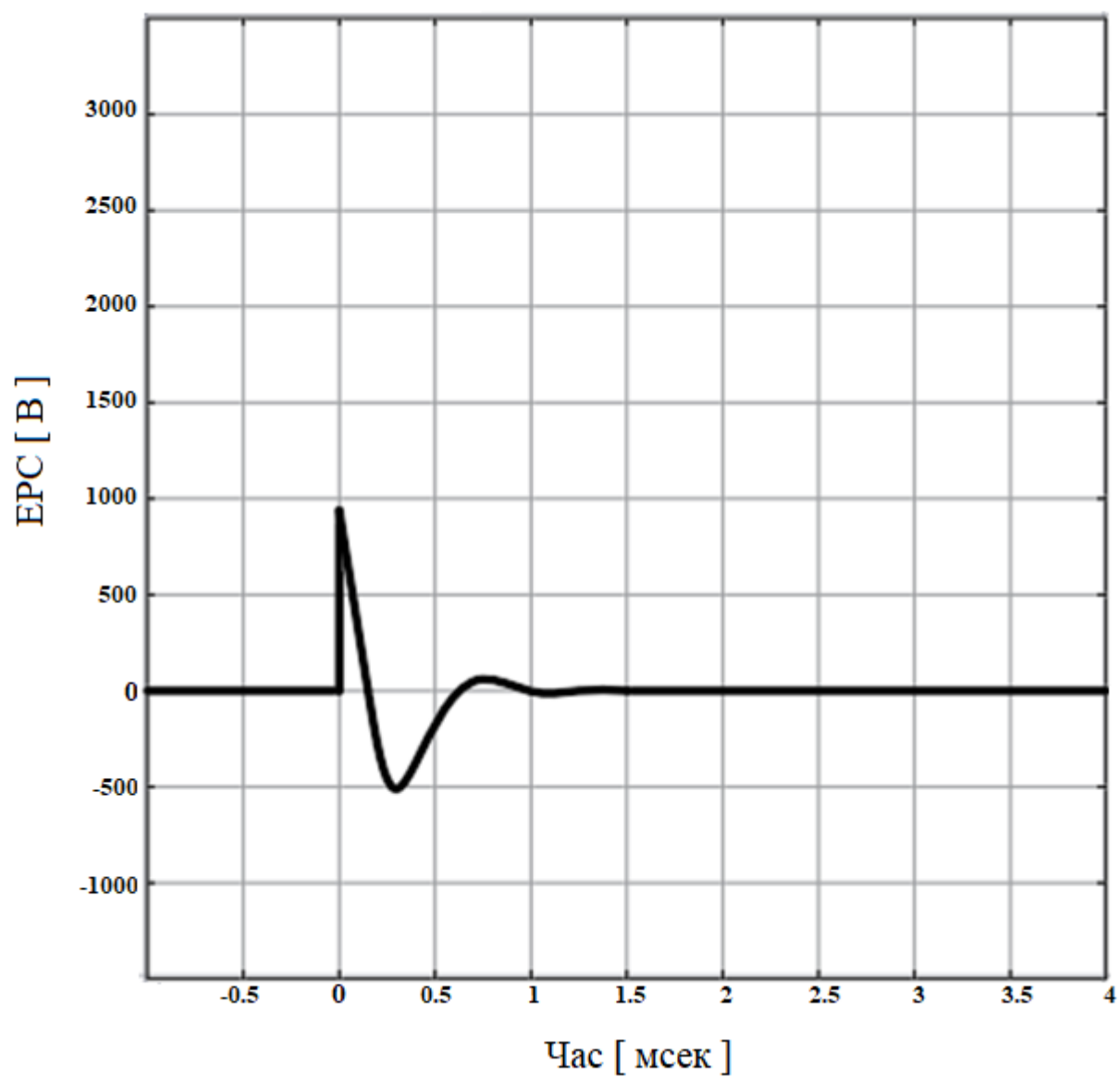


Рисунок 3.5 Перехідний процес при опорі ізоляції на початку обмотки 25 кОм

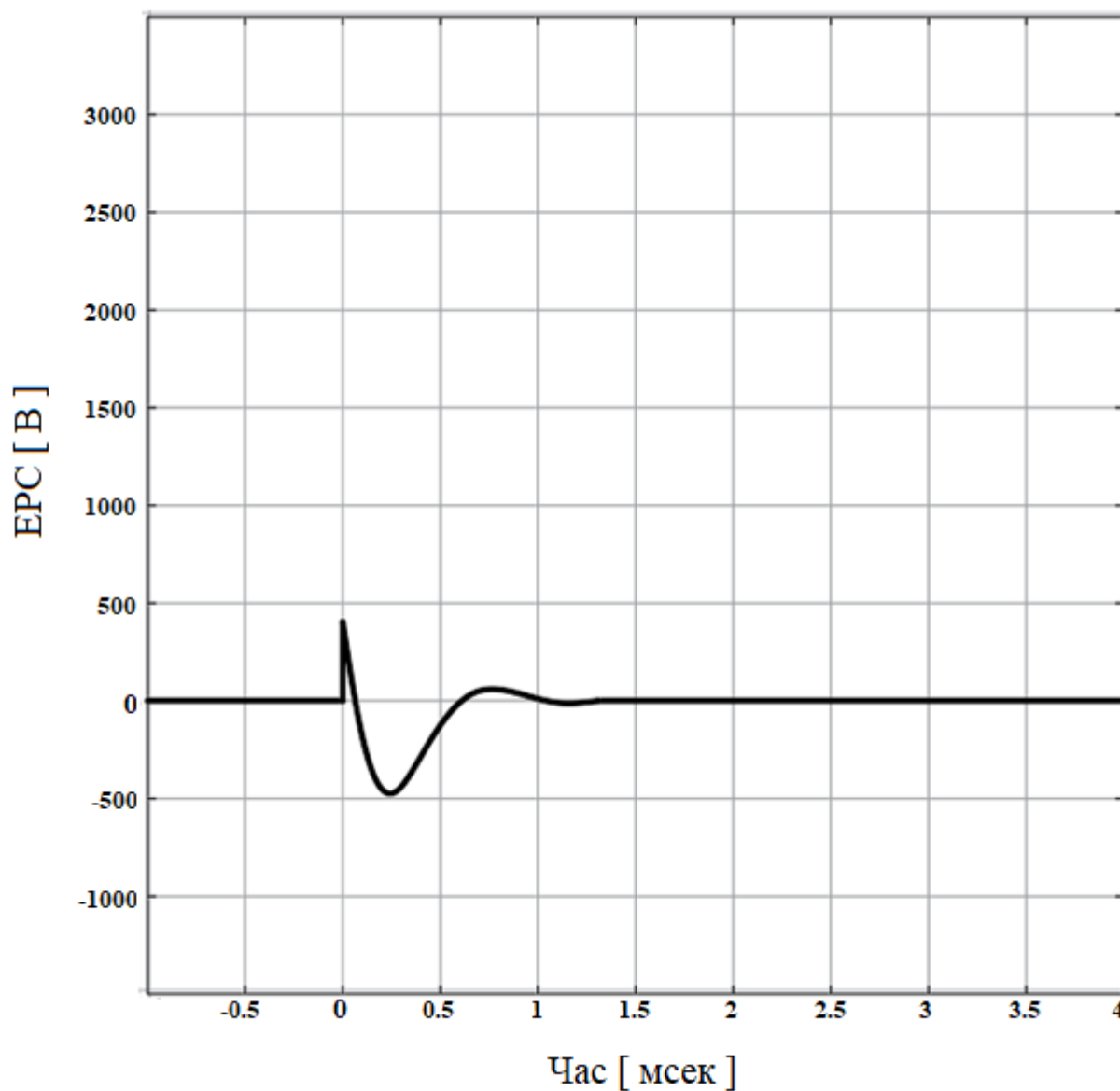


Рисунок 3.6 Перехідний процес при опорі ізоляції на початку обмотки 16 кОм

Аналіз діаграм на рисунках 9, 10 та 11 показує тенденцію до загального зменшення коливального процесу протягом усього часу перехідного процесу при збереженні загального характеру.

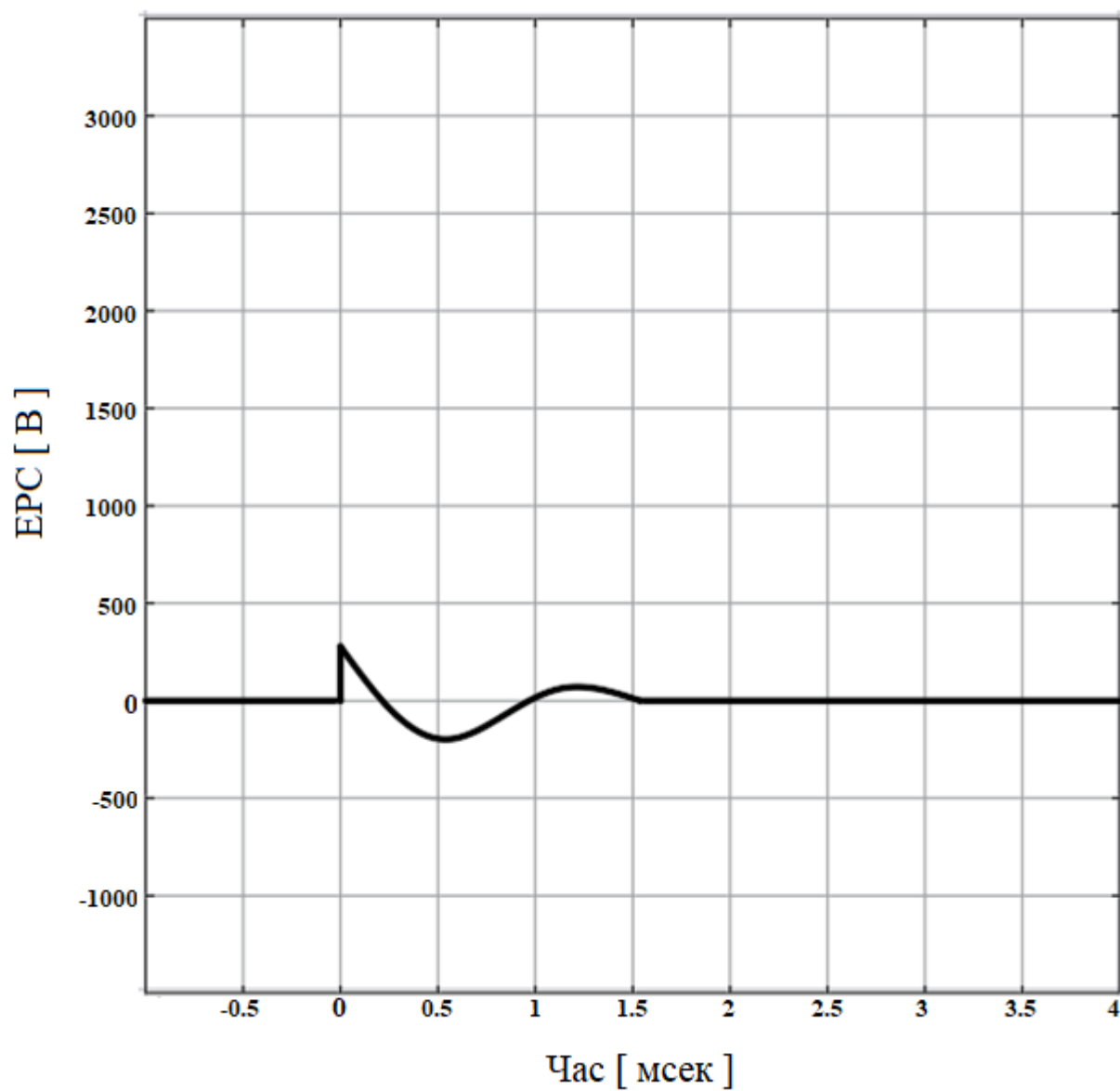


Рисунок 3.7 Перехідний процес при опорі ізоляції на початку обмотки 1 кОм

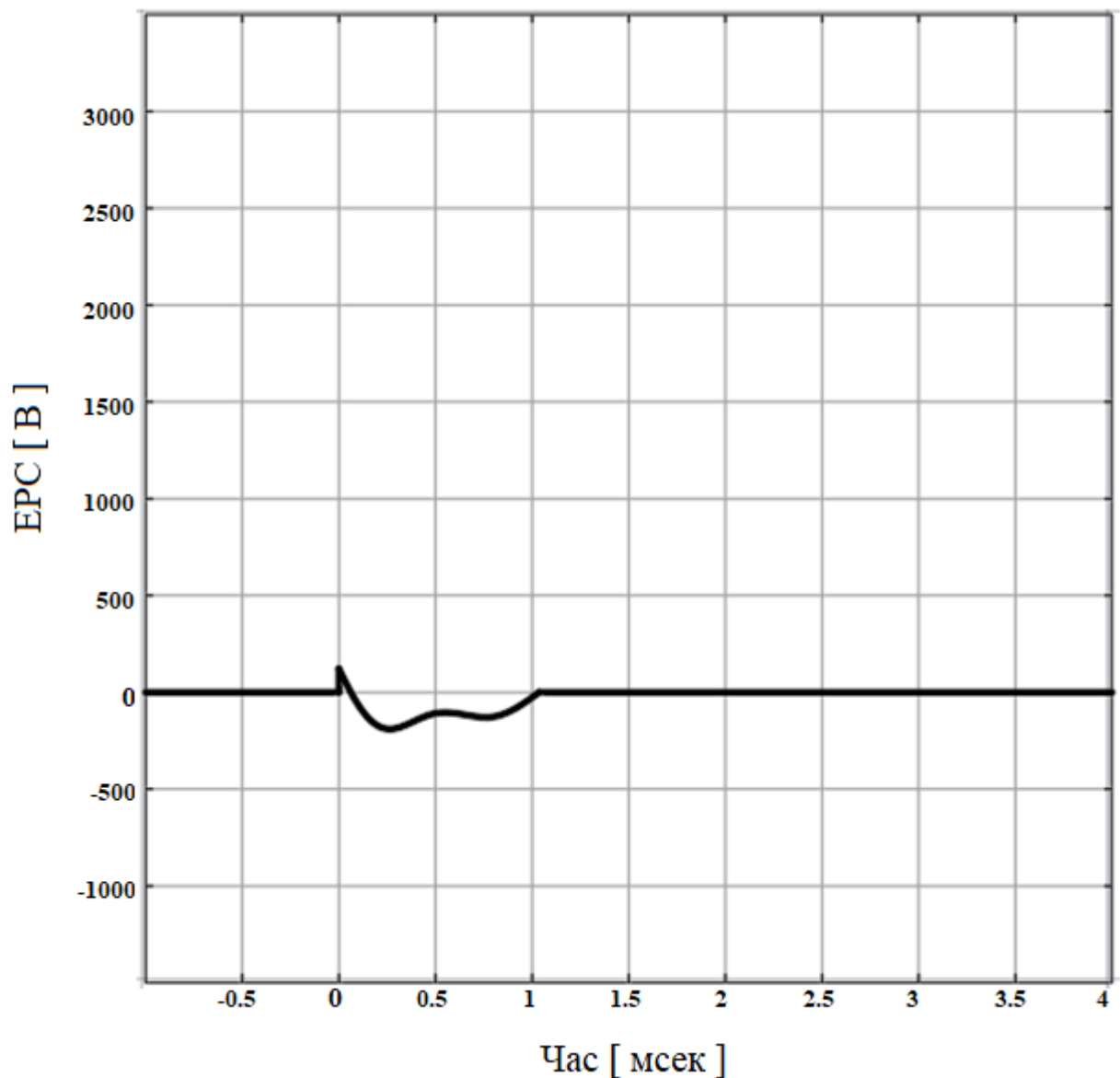


Рисунок 3.8 Перехідний процес при опорі ізоляції на початку обмотки 300 Ом

Аналіз останніх двох діаграм показує, що при різкому зменшенні перехідного опору (тобто фактично у стані пробую) головної ізоляції різко змінюється характер перехідного процесу, що може служити сигналом до негайного виведення машини з експлуатації.

3.2 Дослідження перехідних процесів в першій секції обмотки статора асинхронного електродвигуна 4A225M8

Для дослідження перехідного процесу подачі прямокутного імпульсу напруги на обмотку електричної машини застосовується схема заміщення електричної лінії, що складається з кінцевого числа ланцюгових елементів. Хвиля напруги зустрічає

наприкінці лінії опір своєму поширенню. Хвиля відбивається в залежності від повного опору в кінці лінії. Відбита частина буде поширюватись в протилежному напрямку протягом певного проміжку часу, відповідного частці від подвійної довжини лінії і хвильової швидкості. Процес буде періодичним загасаючим, який являє собою обмін енергії між ємностями і індуктивностями обмотки. Добротність цього контуру можна пов'язати з діагностичними показниками, що характеризують стан ізоляції обмоток: витік струмів на корпус, відповідний дефекту головної (корпусної) ізоляції, збільшення ємності, відповідної зволоженню ізоляції, появі місцевих контурів, відповідних замиканню (корпусної) ізоляції, появі місцевих контурів, відповідних замиканню частини обмотки, тобто, дефект міжвиткової ізоляції [29].

Розміщені в пазах фази обмотки відрізняються від довгої лінії тим, що елементи обмотки пов'язані між собою. Тому при спробі математичного опису поширення хвилі приймаються суттєві спрощення. Були розроблені сучасні пакети програм, які дозволяють з більшою точністю та меншими припущеннями розраховувати перехідні процеси. Цим пакетом є програма MATLAB з пакетом розширення Simulink призначеним для моделювання динамічних систем, моделі яких складаються з окремих блоків (компонентів). В ньому реалізовано принципи візуально-орієнтованого програмування.

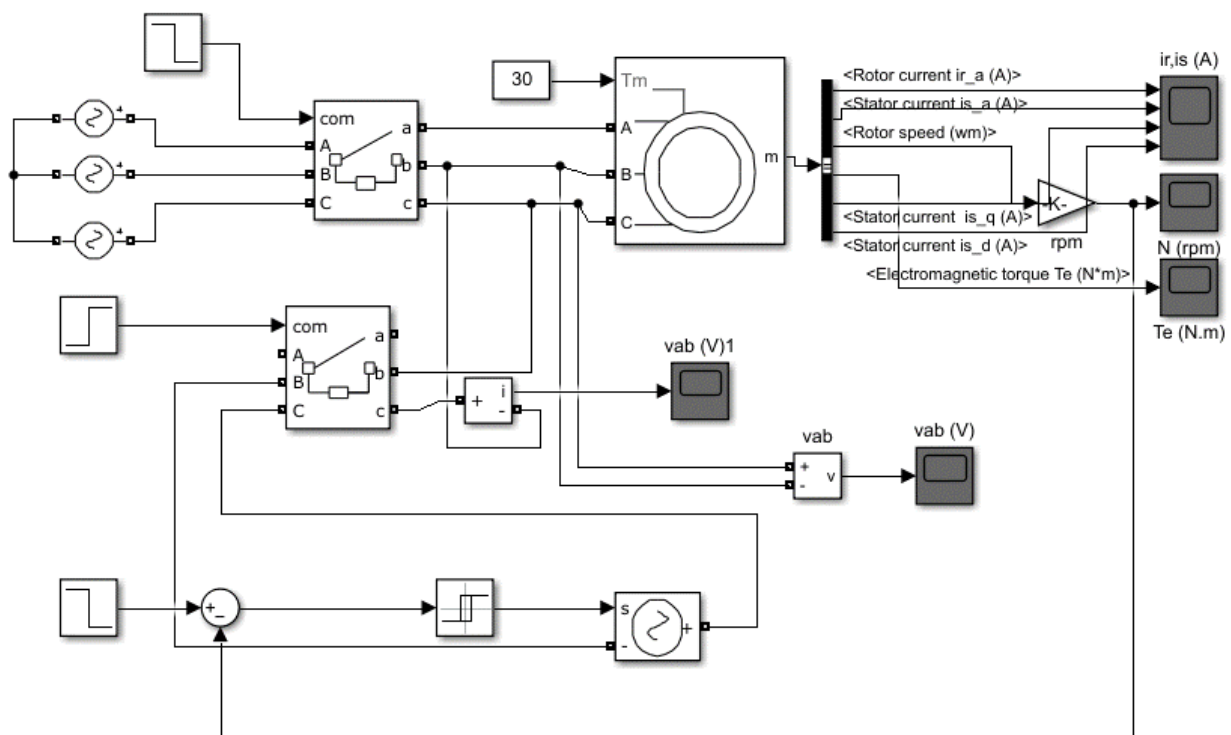


Рисунок 3.9 Схема для математичного моделювання перехідних імпульсних процесів в статорних обмотках асинхронних двигунів

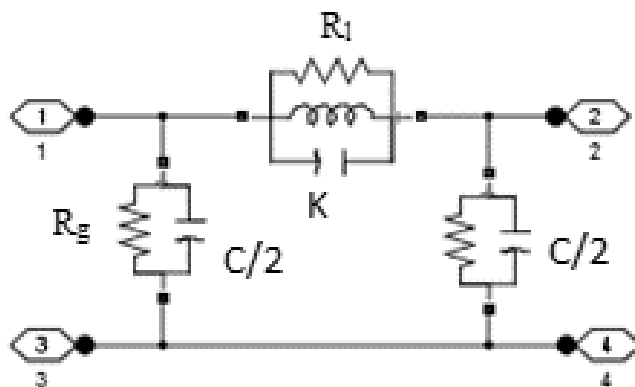


Рисунок 3.10 Структура однієї секції обмотки

Результати дослідження перехідних процесів представлені на рисунках 3.11-3.13.

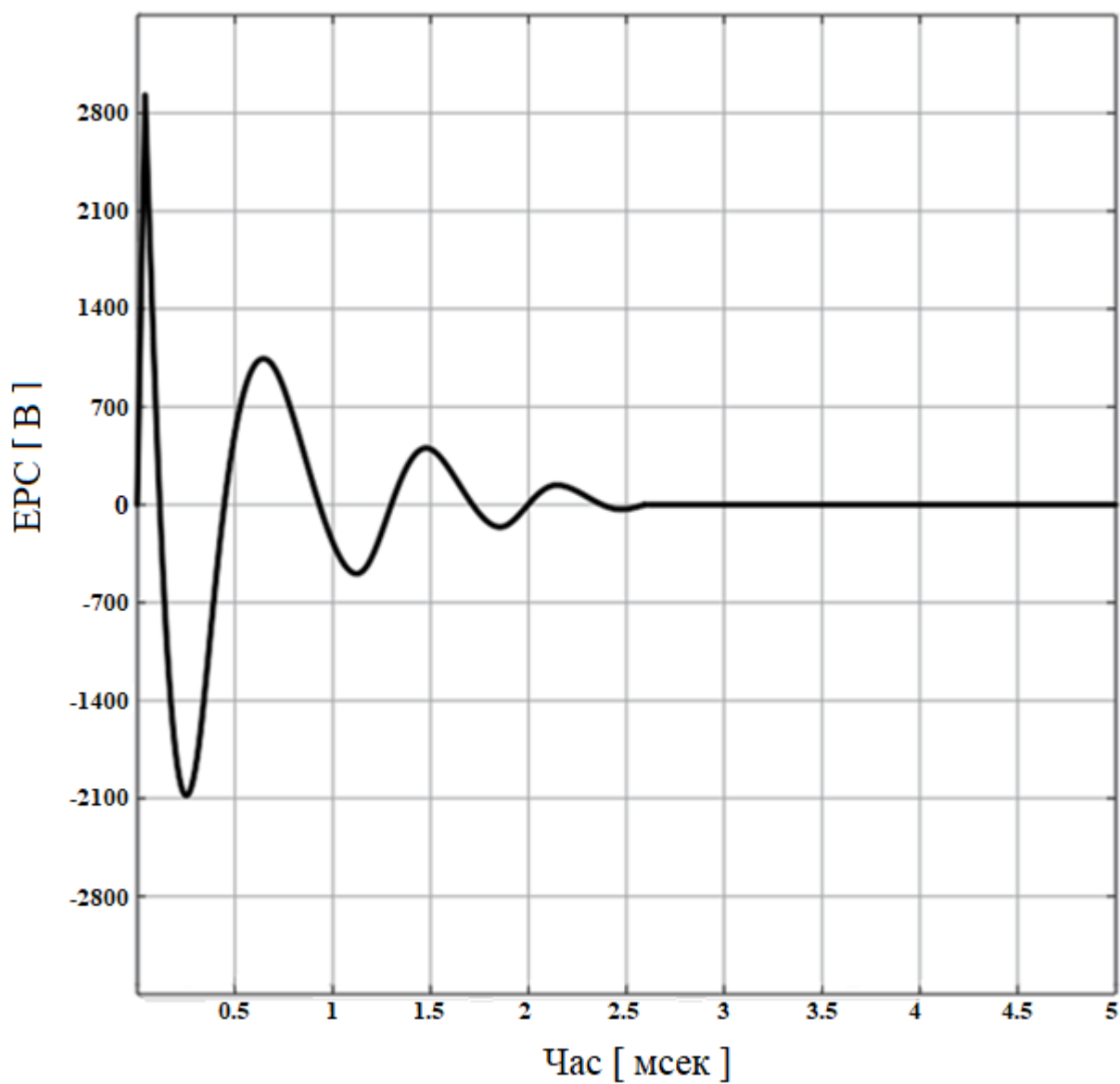


Рисунок 3.11 Нормальний розподіл перехідного комутаційного процесу що характеризує якісний склад стану ізоляції обмотки

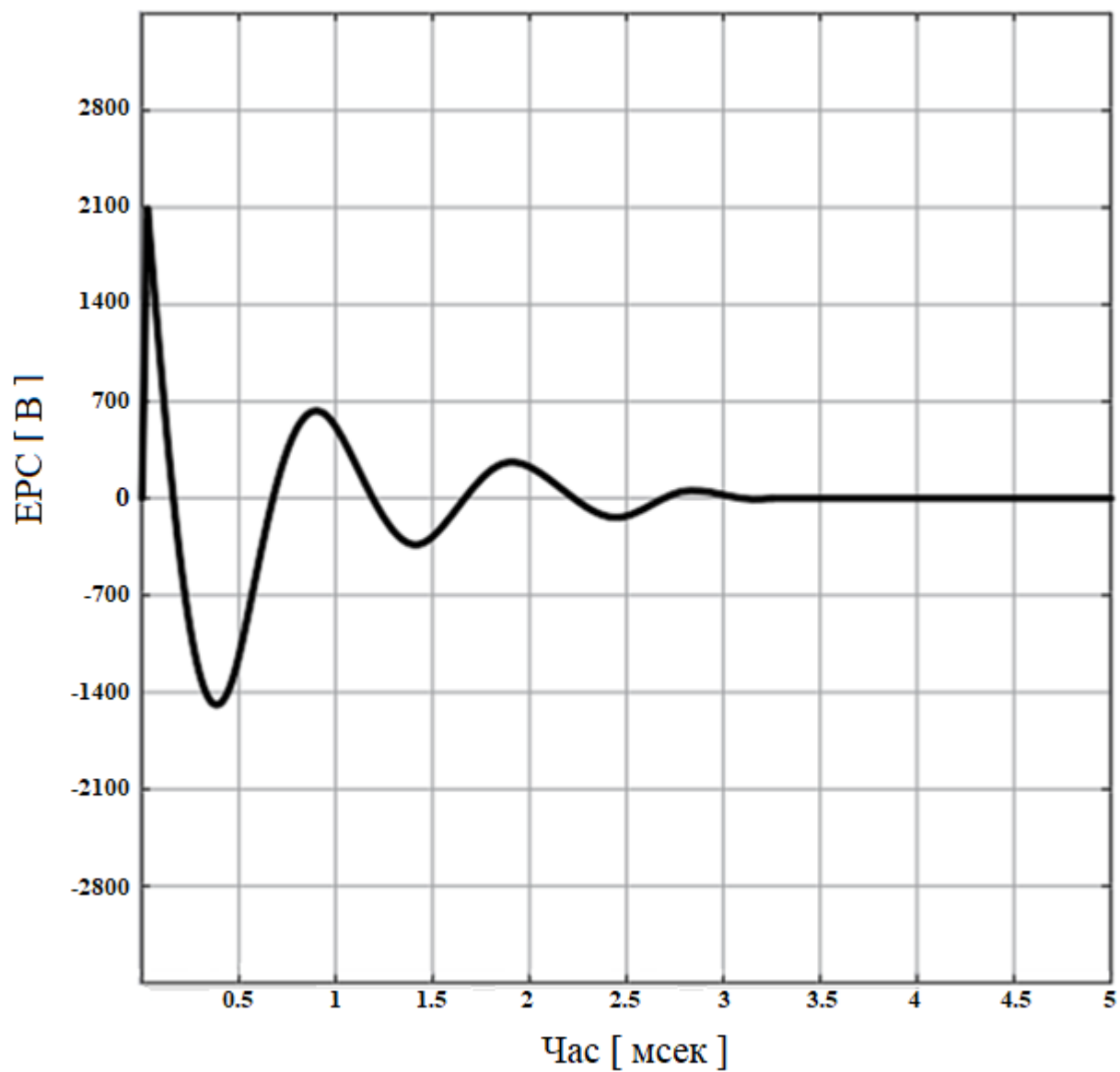


Рисунок 3.12 Дефект першої секції обмотки двигуна пов'язаний з замиканням двох витків між собою

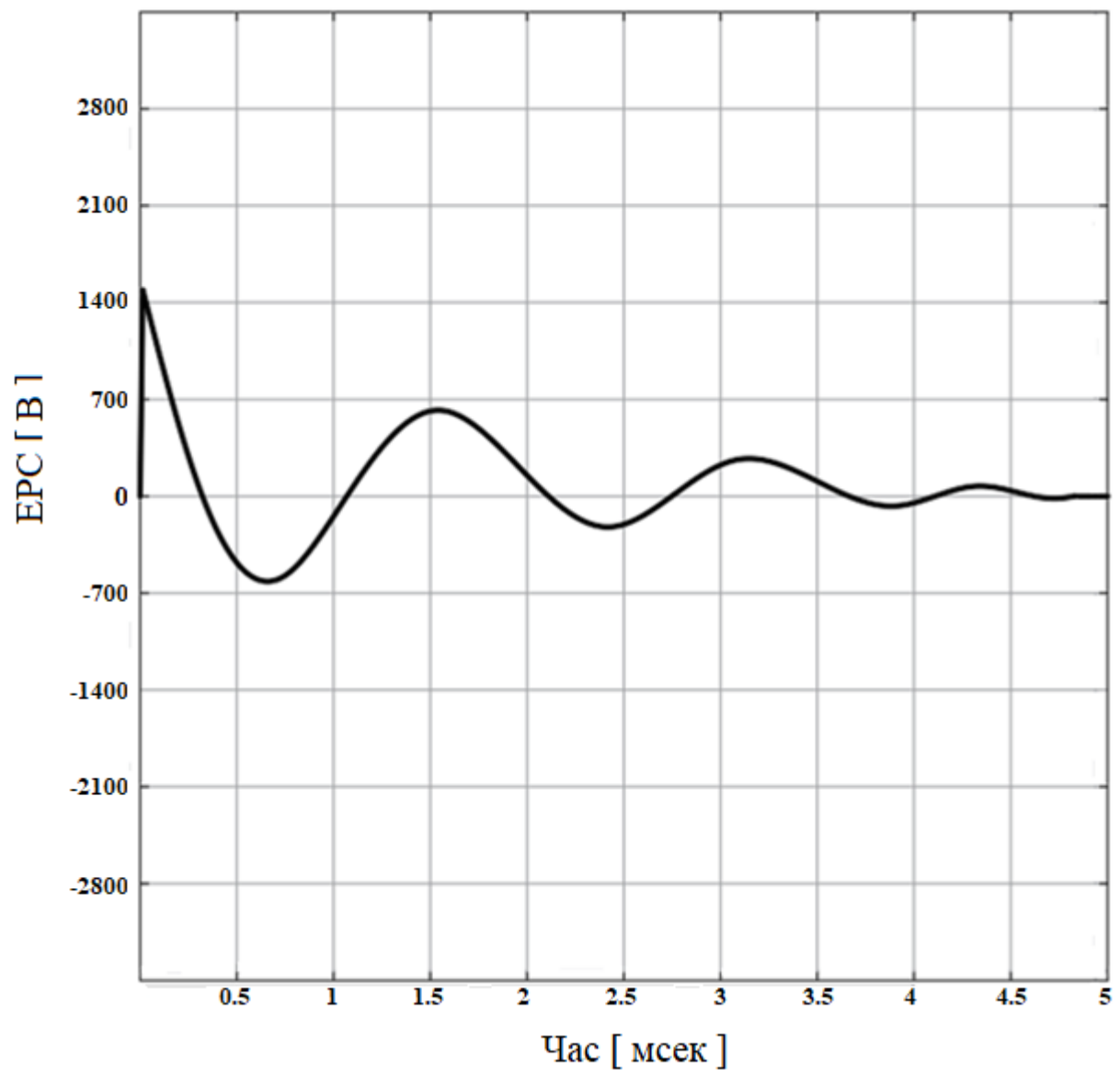


Рисунок 3.13 Дефект ізоляції обмотки пов'язаний з замиканням частини обмотки з залізом статора

3.3 Дослідження перехідних процесів в обмотці статора з урахуванням матеріалу та положення ротора

На рисунку 3.14 показано еквівалентну схему під час імпульсного випробування. Генератор імпульсної напруги включає джерело постійного струму та конденсатор, який заряджається від джерела постійного струму. Накопичений заряд розряджається за допомогою керуючого перемикача генератора імпульсної напруги, напруга, що круто наростає, може бути прикладена до обох кінців обмотки. Імпульсне випробування було проведено на статорній обмотці в асинхронному двигуні.

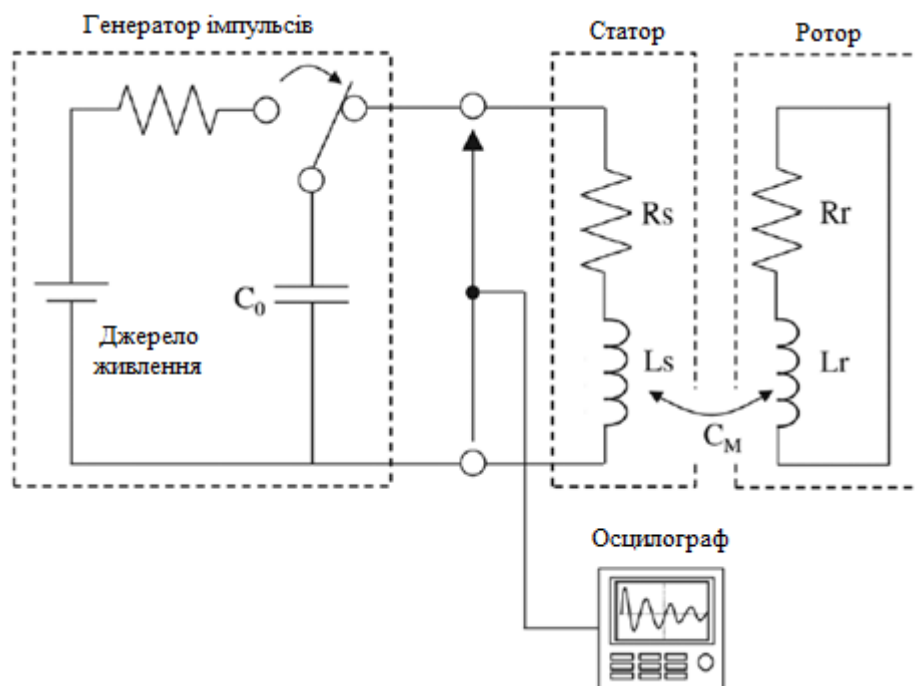


Рисунок 3.14 Схема для імпульсного випробування обмоток асинхронного двигуна з врахуванням взаємозв'язку між статором і ротором

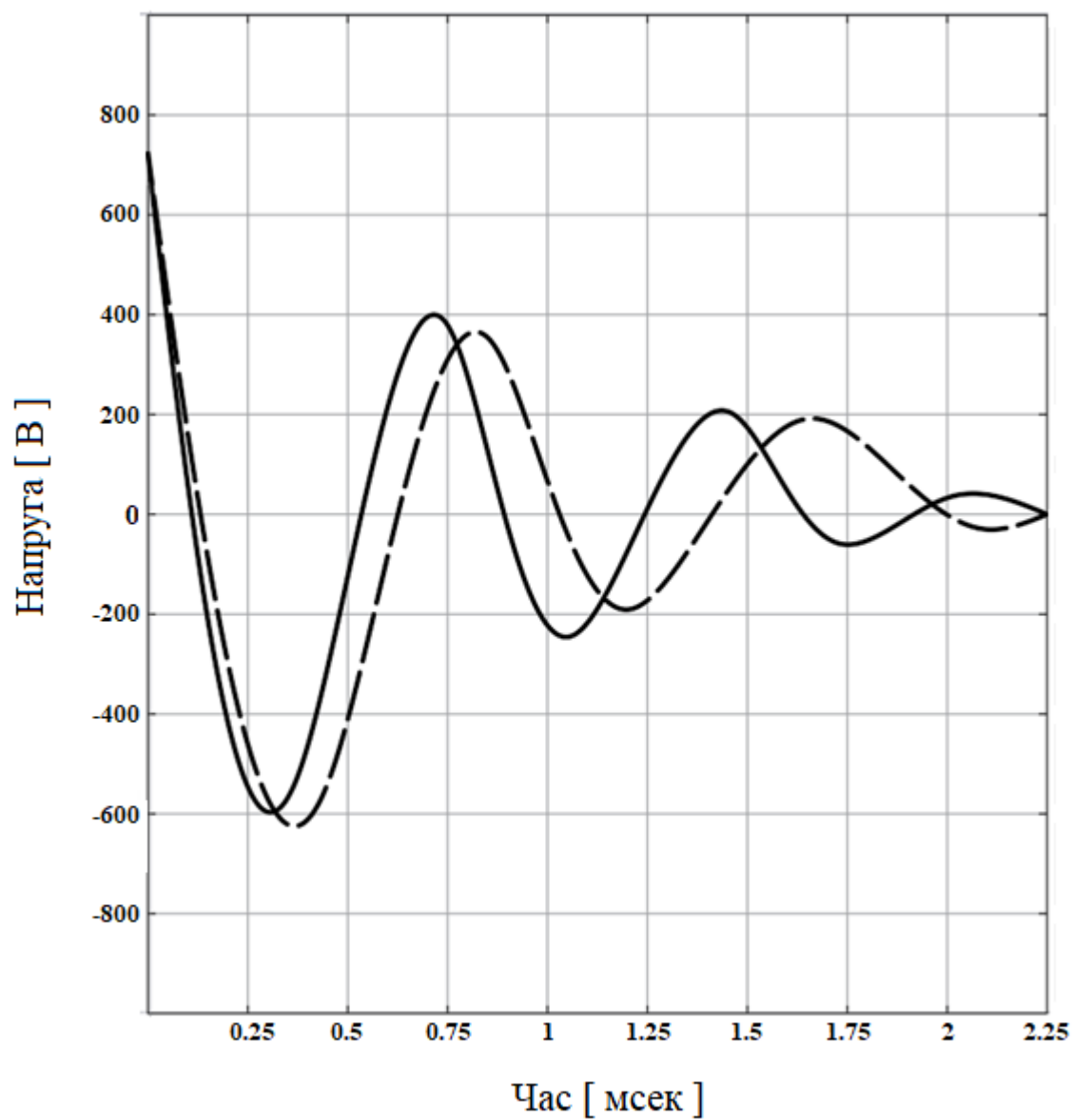


Рисунок 3.15 Форма хвилі імпульсного випробування для справного двигуна ротор якого виготовлений з алюмінію (для 2 положень ротора)

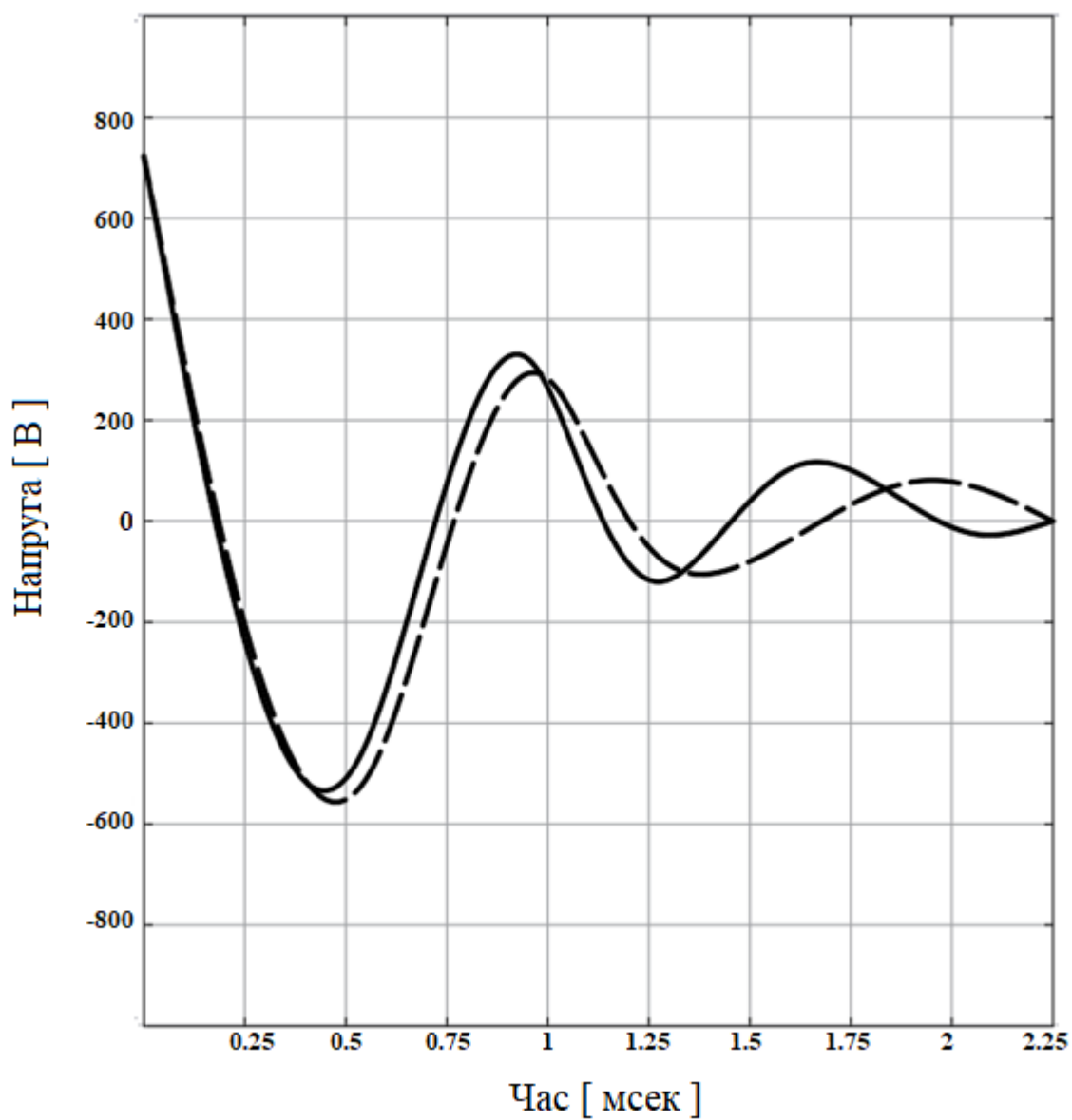


Рисунок 3.16 Форма хвилі імпульсного випробування для справного двигуна ротор якого виготовлений з міді (для 2 положень ротора)

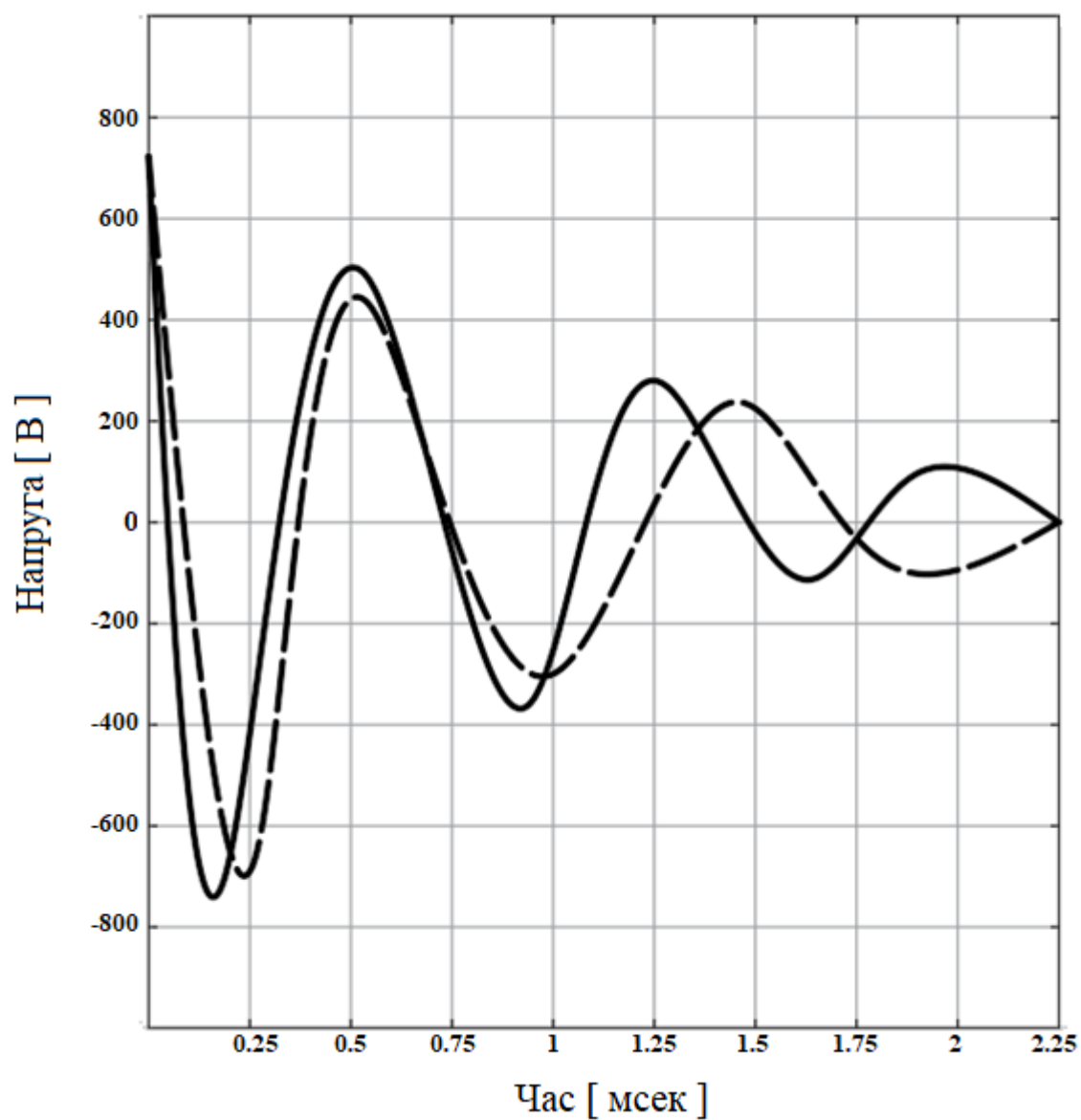


Рисунок 3.17 Форма хвилі імпульсного випробування для справного двигуна з подвійною білячою кліткою виготовленою з алюмінію (для 2 положень ротора)

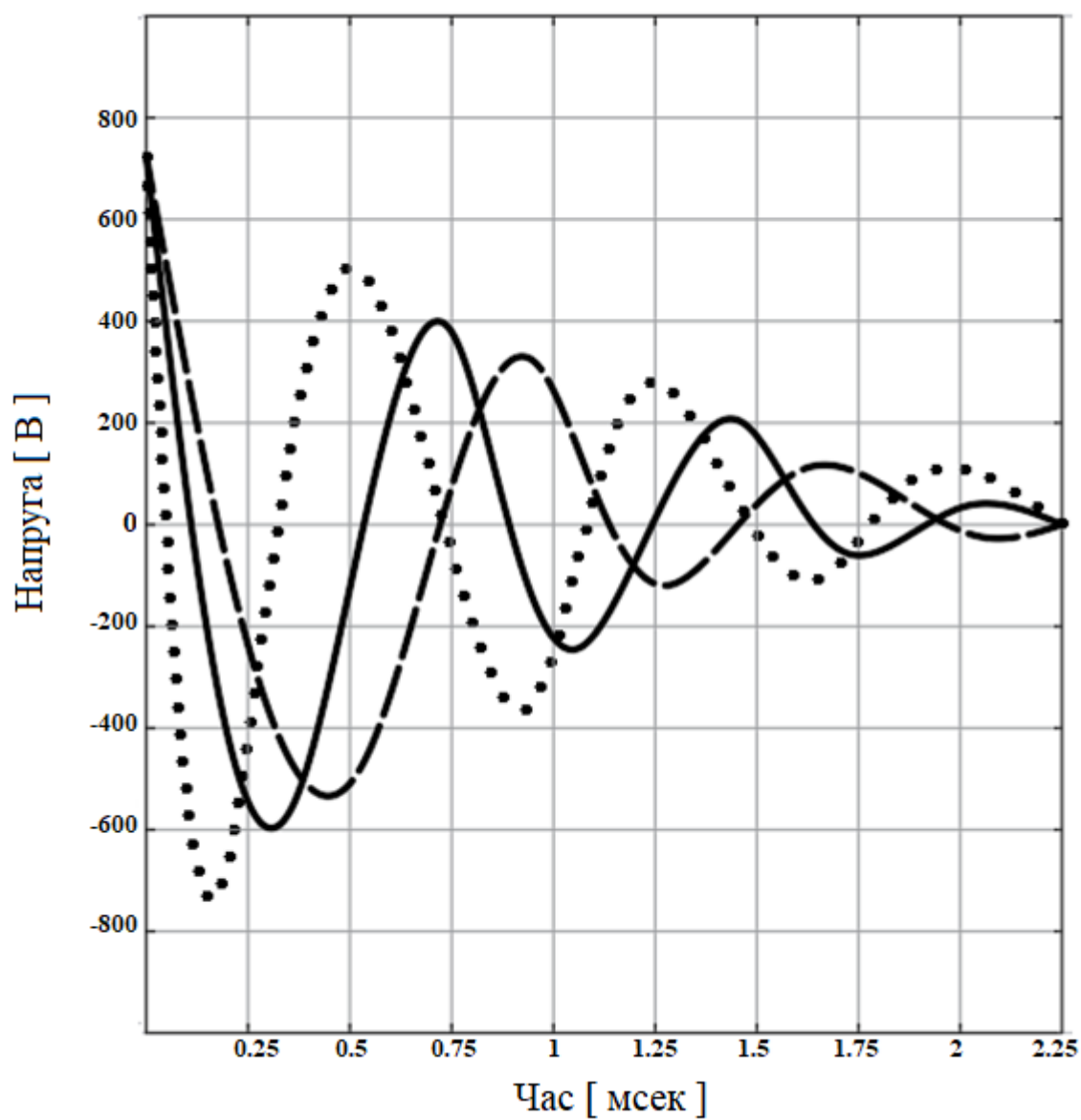


Рисунок 3.18 Порівняння Форми хвилі імпульсного випробування для 3 видів справних двигунів (для 1 положення ротора)

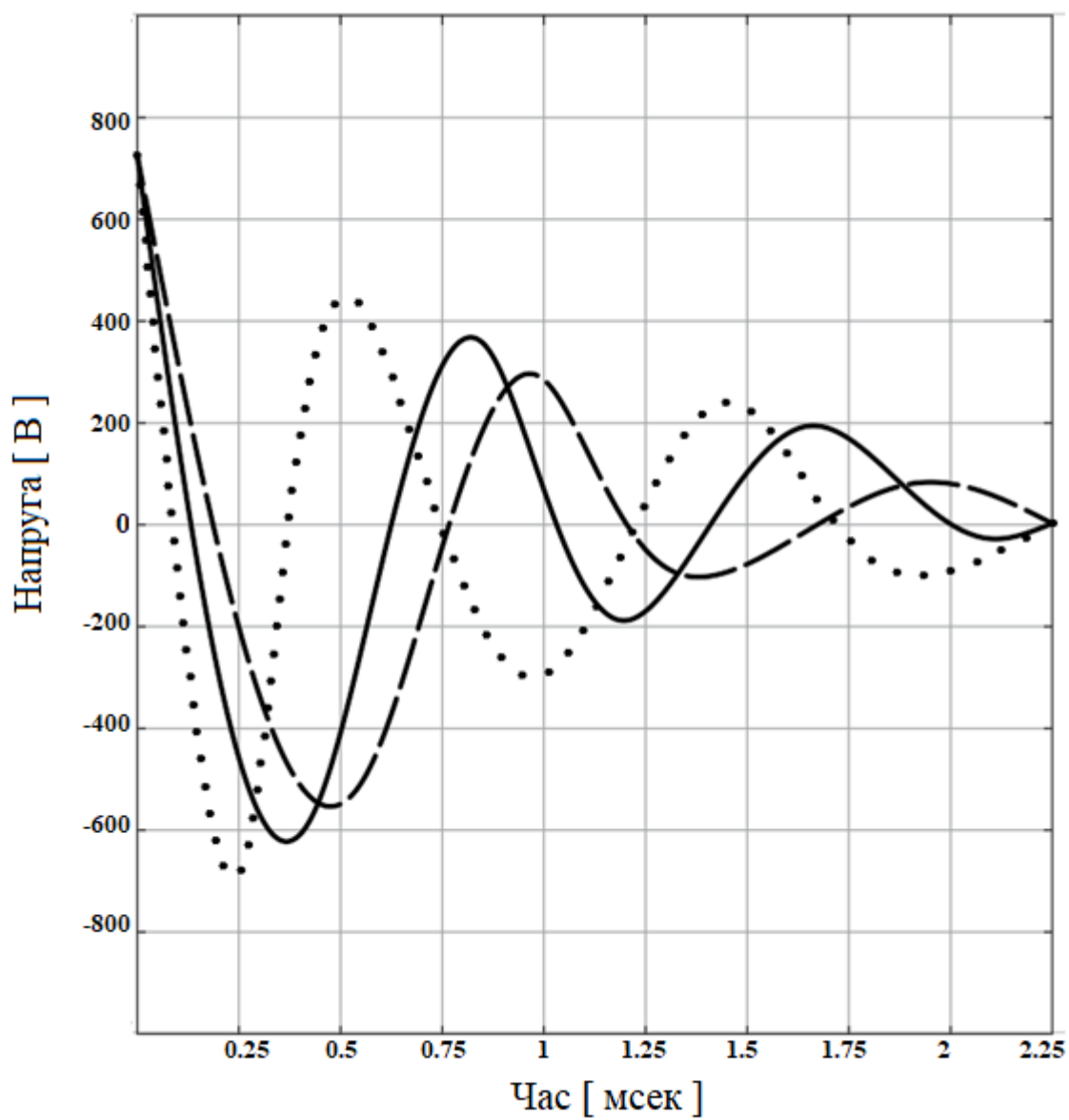


Рисунок 3.19 Порівняння Форми хвилі імпульсного випробування для 3 видів справних двигунів (для 2 положення ротора)

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП ПРОЕКТ

Метою створення стартап проекту є реалізація аналізу основних факторів які можуть впливати на прийняття рішення по впровадженню розробленої технології у межі широкого використання.

Так як впродовж останнього десятиліття стартап проект набув широкого розповсюдження у світі, то такий підхід до бізнесу, як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва через зниження бар'єрів входу в ринок стало розповсюдженим явищем. Із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн. Саме тому стартап проект і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап проектів загальна маса інноваційних ідей зростає [31].

Створення стартап проекту складається з наступних пунктів:

- 1.Маркетинговий аналіз стартап проекту.
- 2.Організація стартап проекту
- 3.Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту
- 4.Заходи з комерціалізації проекту

4.1 Маркетинговий аналіз

Для опису ідеї стартап–проекту необхідно сформулювати чотири основні базові характеристики :

1. Зміст ідеї (що пропонується);
2. Можливі напрямки застосування;
3. Основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування).
4. Чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Таблиця 4.1 Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Програмно-діагностичний комплекс для діагностики асинхронних двигунів. Цей комплекс служить для своєчасного діагностування та виявлення на ранніх етапах пошкодження ізоляції обмоток асинхронних двигунів.	Електроприводи верстатів	Своєчасне діагностування та виявлення пошкодження ізоляції обмоток асинхронних двигунів.
	Системи кондиціювання	
	Насосні станції	
	Ліфтові установки	
	Гірничо-добувні машини	

Для аналізу потенційних техніко–економічних переваг розроблюваного стартап–проекту порівняно із пропозиціями конкурентів які вже є на ринку необхідно проаналізувати наступні пункти:

1. Визначити перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї які уже запропоновані на ринку;
2. Попередньо визначити коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та провести збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
3. Виконати порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) [31].

Таблиця 4.2 Визначення характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	Концепції конкурентів (потенційні)				Переваги і недоліки
	Мій проект	ATN Service	MIGOM Service	УКР МОТОР	
Запровадження ідеї застосування програмно-діагностичного комплексу для діагностування асинхронних двигунів.	Всі конкуренти мають недосконалі технології застосування програмно-діагностичного комплексу для діагностування асинхронних двигунів.				Новизна технології має значні переваги для впровадження у промисловому застосуванні
Інформаційна безпека.	Може бути запатентований	Технології які випускаються та впроваджуються у роботу конкурентами завжди патентуються і мають юридичний захист.			Конкуренти мають більші можливості для захисту своїх інформаційних надбань
Рівень чутливості до змін цін.	Немає прив'язки до ціни товару.	Так як зазвичай технології впроваджуються разом із готовою продукцією, то зміна ціни на продукцію підвищує і ціну на технологію яка використовується .			Мій проект фінансово гнучкий що дозволяє конкурувати в області технологій з великими виробниками.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Сформулювати оптимальне діагностування асинхронних двигунів	Реалізація оптимального діагностування за допомогою програмно-діагностичного комплексу	Сучасна техніка дає можливість діагностувати двигун любого виробництва	Дані технології випускаються іншими компаніями але якість продукту не є досконалою.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.4 Характеристика потенційного ринку для проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Більше 10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Залежить від потужності
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	На одному рівні
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Необхідність сертифікатів для промислового застосування
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідно мати українські або міжнародні сертифікати
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Неможливо відслідкувати

Таблиця 4.5 Характеристика потенційних клієнтів проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільовий сегмент ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	На сьогодні висока ціна на електрообладнання формує потребу у технології яка б дозволила максимально висока ціна на електрообладнання формує потребу у технології яка максимально точно може виявити дефекти в асинхронних двигунах.	Основними споживачами цієї технології є промислові підприємства.	Немає	- Низька ціна - Висока якість - Надійність - Ефективність - Наявність сертифікатів - Апробованість

Таблиця 4.6 Фактори загрози

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Невірне налаштування системи діагностики	Може спричинити неприйнятні перехідні процеси, що у свою чергу може призвести до виходу із ладу обладнання та людському Травмуванню.	Прийняття на стадії розробки усіх можливих запобігань помилок зі сторони майстра по випробуванню.
2	Прийняття на рівні держави нових стандартів до діагностики асинхронних двигунів.	Неможливість застосовувати дану технологію.	Необхідність внесення корективів, що до зміни технології.

Таблиця 4.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Попит на дану технологію серед споживачів	Може зрости попит серед виробників на дану технологію	Необхідність забезпечення технічної і економічної реалізації даної технології на ринку за для забезпечення попиту на ринку
2	Зростання попиту на цю технологію серед виробників	Може зрости попит серед виробників на дану технологію	Необхідність підписання контрактів за для співпраці з різноманітними виробниками і інтеграторами

Таблиця 4.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
--------------------------------------	---	--

1. Тип конкуренції - чиста	Технічні особливості які супроводжують дану галузь не дають можливості створити монополію навіть великим компаніям.	Необхідність постійно шукати канали збуту.
2. За рівнем конкурентної боротьби локальний/національний	Співпраця між компаніями і споживачем може бути реалізована як на локальному рівні так і на національному рівні.	Необхідність розширення компанії для виходу на національний рівень.
3. За галузевою ознакою – міжгалузева.	Дуже багато галузей мають потребу у застосуванні асинхронних двигунів.	Необхідність співпраці з різними галузями та компаніями.
4. За характером конкурентних переваг – нецінова.	Показники якості можуть справляти значний вплив на вибір технології.	Необхідно прагнути до представлення якісної технології.
5. За інтенсивністю - марочна/не марочна	Марка може грати інколи визначальну роль у виборі бренду	Необхідно створювати імідж. Який буде допомагати розвитку компанії

Таблиця 4.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	ATN Service, MIGOM Service, UKR MOTOR	Більш малі компанії	Визначити фактори сили постачальників	Споживачі пром. підпр-ва	Інші програмно-діагностичні комплекси
	Велика конкуренція	Складність входу на ринок	Умови диктують споживачі	Клієнти диктують умови	Недосконалість програмного комплексу

Таблиця 4.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Наявність стартового капіталу	Дана область має великі початкові затрати
2	Велика маркетингова підготовка	Необхідно донести до споживачів свої переваги у порівнянні з іншими виробниками
3	Підписання договорів співпраці	Данну технологію можна впроваджувати тільки маючи досвід використання продукту.
4	Наявність спеціалістів	Технічна область застосування вимагає роботи підготовленого кваліфікованого персоналу

Таблиця 4.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні стартап проектом						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність стартового капіталу	+						
2	Велика маркетингова підготовка		+					
3	Підписання договорів співпраці			+				
4	Наявність спеціалістів			+				

Таблиця 4.12 SWOT - аналіз стартап проекту

Сильні сторони: Іноваційність проекту Недосконалість впроваджених технологій	Слабкі сторони: Початкова відсутність попиту Складність конкурування з іншими компаніями
Можливості: Розвиток технології Співпраця з міжнародними брендами	Загрози: Малий попит на продукцію Не знаходження ринків збуту

Таблиця 4.13 Альтернативи ринкового впровадження сстартап проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Співпраця з великими компаніями	Розподілення прибутку у відповідності до договорів	Короткі
2	Самостійний вхід на ринок	Першочергові великі витрати	Довгострокові

З аналізу таблиці 4.13 можна зробити висновок, що найбільш доцільним з точки зору виходу на ринок по витраченому часу і грошовим ресурсам є співпраця з великою компанією. Також цей підхід дає можливість не брати на свою компанію ризики пов'язані з не реалізацією даного продукту на ринку. До недоліків такого підходу можна віднести маленький прибуток у порівнянні з самостійним виходом на ринок.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Підприємства різного роду	Середня	На різні бренди	Середня	Середня
Необхідно обробляти усі цільові групи.					

Таблиця 4.15 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Співпраця з великими компаніями	Диференціація	Інноваційний підхід	Спеціалізація

Таблиця 4.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Можливий будь-який підхід	Ні	Диференціація або лідерства

Таблиця 4.17 Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Якість	Спеціалізація	Інноваційний підхід	Ефективність, діагностика, Мала ціна.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Середня	Діагностика	Дозволяє своєчасно виявити дефекти асинхронних двигунів

Таблиця 4.19 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	невелика	велика	Середній	Широкий діапазон

Таблиця 4.20 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Визначається від області застосування	Надавати якісну консультацію	Середня і глибока	Через інтеграторів

Таблиця 4.21 Концепція маркетингових комунікацій

№п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Визначається від області застосування	Реклама Рекомендації	Впровадження технології діагностування	Збільшувати кількість клієнтської бази	До виробників на пряму

ВИСНОВКИ

1. Дослідження комутаційних процесів в обмотках асинхронних двигунів проведено в основному по відношенню до головної (корпусної) ізоляції обмоток. Показано, що небезпека комутаційних перенапруг різко зростає при зменшенні опору ізоляції обмоток відносно корпуса менше ніж 0.5 МОм.

2. Для дослідження комутаційних процесів в роботі використовувалися найсучасніші програмні комплекси. Отримано відповідні графіки комутаційних перенапруг для випадків різного ступеня дефектності поперечної ізоляції тобто поступового зменшення від 550 кОм до 300 Ом.

3. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що комутаційні процеси є небезпечним джерелом руйнівних впливів, що знижує надійність роботи досліджуваної серії асинхронних двигунів. За проведеними дослідженнями абсолютні величини перенапруг, що виникають на вході обмоток, можуть досягати до 3000 Вольт, що входить до зони можливості руйнівних процесів в ізоляції у вигляді електричного пробою. Але при цьому комутаційні напруги можуть використовуватися в діагностичних цілях для отримання інформації про стан ізоляції.

4. Розроблено математичну модель на основі ланцюгових схем заміщення, що дозволяє аналізувати комутаційні процеси в машині з достатньою для інженерних цілей точністю.

5. Проведено розрахунок комутаційних процесів у середовищі MathLab Simulink за допомогою авторської схеми. Результати моделювання та порівняння їх з досвідченими даними показують задовільну збіжність перехідних процесів у діапазоні опору у місці дефекту ізоляції від 550 до 0.3 кОм.

6. Проведено дослідження імпульсних процесів в справних асинхронних двигунах з врахуванням зупинки ротора в різних положеннях та врахуванні матеріалу виготовлення ротора, а саме: алюміній та мідь.

7. Дослідження показали що вплив положення ротору з подвійною білячою кліткою найбільш впливає на перехідний процес в обмотці статора при комутаційних перенавантаженнях тому слід враховувати це при розрахунках комутаційних процесів з дефектною та без дефектною ізоляцією обмоток.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов. - В 2-х кн.: кн. 1 /И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин и др; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. -464 с.
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов. - В 2-х кн.: кн.2 /И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин и др; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. - 384 с.
3. А.Э. Кравчик Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др.-М.: Энергоатомиздат,1982.-504 с.
4. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования - К. Техника, 1983 г.
5. NAKAMURA H. Diagnosis of Short-Circuit Faults in Stator Winding Inside Low-Voltage Induction Motor Using Impulse Voltage Test [Электронный ресурс] / HISAHIDE NAKAMURA // Research and Development Division, TOENEC Corp.. – 2015.
6. Tandon N, Yamava GS, Ramakrishna KM. A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defects in induction motor ball bearings. Mech Syst Signal Proc 2007;21(1):244–256.
7. Брызгалов В.Л." Исследование отказов асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100кВт" - Электротех. пром-ть. Электрические машины, 1970 г.
8. Бернштейн Л.И. - Изоляция электрических машин общепромышленного применения - М., Энергия, 1971 г.
9. Гольдберг О.Д. "Качество и надежность асинхронных двигателей" М., Энергия, 1968 г.
10. Filippetti F, Franceschini G, Tassoni C, Vas P. AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect. IEEE Trans Ind Appl 1998;34(1):98–108.
11. Bayindir R, Sefa I, Colak I, Bektas A. Fault detection and protection of induction motors using sensors. IEEE Trans Energy Convers 2008;23(3):734–741.

12. Вакуленко К.Н., Реуцкий Н.А., Бесперстов П.П. - "Повышение качества и надежности электрических машин" - К., О-во Знание, 1979 г.
13. Briz F, Degner MW, Garcia P, Bragado D. Broken rotor bar detection in line-fed induction machines using complex wavelet analysis of startup transients. *IEEE Trans Ind Appl* 2008;44(3):760–768.
14. Perisse F, Werynski P, Roger D. A new method for ac machine turn insulation diagnostic based on high frequency resonances. *IEEE Trans Dielect Elect Insul* 2007;14(5):1308–1315.
15. Nakamura H, Mizuno Y. Probabilistic diagnosis of short-circuit faults and insulation deterioration of stator winding of motor. *IEEJ Trans* 2012-2;132-D(2):258–267. (in Japanese)
16. Cruz SMA, Cardoso AJM. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motor by the extended Parks' vector approach. *IEEE Trans Ind Appl* 2001;37(5):1227–1233.
17. Hsu JS. Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation. *IEEE Trans Ind Appl* 1995;31(5):1016–1021.
18. Горбунов Ю.К. – "Высокочастотная диагностика изоляции обмоток ЭМ" 1996 г. 10. Геллер Б.И.. Веверка А.Н. - "Импульсные процессы в электрических машинах" Перевод с чешского М. <<Энергия>>. 1973 г.
19. Белассел М. Волновые параметры и перенапряжения в различных типах обмоток асинхронных двигателей, питаемых от ШИМ — преобразователей / М. Белассел, В. Я. Беспалов // *Электротехника*. 2006. - №3. - С. 56-63.
20. Воронцов А.Г. Высокочастотные электромагнитные процессы в электрических машинах при широтно-импульсной модуляции напряжения / А.Г. Воронцов, Доан Ань Туан, Ю.П. Коськин и др. // *Электротехника*. 2008. - №3. - С. 36-44.
21. Геллер Б. Импульсные процессы в электрических машинах / Б. Геллер, А. Веверка. -М.: Энергия, 1973. 440 с.

22. Каганов З.Г. Емкостные параметры электрических машин переменного тока / З.Г. Каганов // Труды ЛПИ им. Калинина. Л., 1960. - №209. - С. 227-240.
23. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З.Г. Каганов. М.: Энергоатомиздат, 1990. - 248 с.
24. Козырев Н.А. - Характер дефектов в изоляции ЭМ, и основные причины, вызывающие эти дефекты. Изоляция ЭМ. ЦИНТИ электропромышленности и приборостроения, вып. 6. 1961 г
25. Суворов Н.И. - Исследование КП и их влияние на надежность изоляции низковольтных АД", 1973 г.
26. Hudone C, Amyot N, Lebey T, Castelan P, Kandev N. Testing of low-voltage motor turn insulation intended for pulse-width modulation applications. IEEE Trans Dielect Elect Insul 2000;7(6):783–789.
27. Wiedenbrug E, Frey G, Wilson J. Early intervention. IEEE Ind Appl Mag 2004;10(5):34–40.
28. Huang X, Habetler TG, Harley RG, Wiedenbrug EJ. Using a surge tester to detect rotor eccentricity faults in induction motors. IEEE Trans Ind Appl 2007;43(5):1183–1190.
29. A.Boglietti, E.Carpaneto. An Accurate Induction Motor High-Frequency Model for Electromagnetic Compatibility Analysis. Electric power components and systems, 2001, V. 29, pp.191-209.
30. Moreira A. F. High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives / A.F. Moreira, T.A. Lipo, G. Venkataramanan, S. Bernet // IEEE Trans. Ind. Appl.- 2002. Vol.38. - №5. - P. 1297-1306.
31. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КП», 2016. – 28 с.