

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

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В. В. Чума к
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2024 р.

.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Електромашинний підсилювач поперечного поля»

Виконав:

студент III курсу, групи ЕМ-п11

Чамлай Геннадій Юрійович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н., доцент

Реуцький М.О. _____

Рецензент:

Доцент, к.т.н.

Красношарпа Н.Д. _____

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

Студент _____

Київ – 2024 року

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Напрямок підготовки (програма професійного спрямування)-6.050702 -
«Електромеханіка» («Електричні машини і апарати»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.В. Чумак

«10» червня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту

Чамлаю Геннадію Юрійовичу

1. Тема роботи « Електромашинний підсилювач поперечного поля »

керівник роботи Реуцький М.О., доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «28» 05 2024 р. № 2128-С

2. Термін подання студентом роботи 10.06.2024

3. Вихідні дані до роботи: Номінальна потужність – 2,0 кВт; номінальна напруга – 95 В; номінальний струм – 21,5 А; номінальна частота обертання - 6000±600 об/хв; номінальний ККД – 52%.

4. Зміст роботи:

- Технічні вимоги;
- Опис конструкції ЕМП;
- Основні розрахунки модернізованого ЕМП

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Загальний вид

Опис конструкції

Основні розрахунки

6. Дата видачі завдання 10.09.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення з технічною документацією та кресленнями. Технічні вимоги.	15.12.23	
2	Опис конструкції.	29.02.24	
3	Розрахунок модернізованого ЕМП	19.05.24	
4	Висновок	01.06.24	

Студент

(підпис)

Г.Ю. Чамлай

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

М.О. Реуцький

(ініціали, прізвище)

*Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи

РЕФЕРАТ

Електромашинний підсилювач призначено для роботи разом з електродвигуном постійного струму в системах автоматизованого електроприводу механізмів горизонтального повороту.

В склад підсилювача входять електромашинний підсилювач поперечного поля (генератор) та привідний електродвигун постійного струму.

Основні параметри та характеристики генератора і двигуна повинні відповідати:

Назва параметра	Значення і характеристика
1. Номінальна потужність генератора, кВт, не менше	2,0
2. Номінальна вхідна потужність обмоток керування генератора, Вт, не більше	4,0
3. Номінальна вихідна напруга генератора, В	95,0
4. Номінальний струм навантаження генератора, А	21,5
5. Номінальна напруга двигуна, В	27
6. Номінальний споживаний струм двигуна, А, не більше	145
7. Номінальна частота обертання двигуна, об/хв, не більше	6000±600

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

THE ABSTRACT

The electromagnetic amplifier is designed to operate together with a DC electric motor in automated electric drive systems for horizontal rotation mechanisms.

The amplifier consists of an electromagnetic transverse field amplifier (generator) and a DC drive motor.

The main parameters and characteristics of the generator and the motor must match:

Name of parameter	Meaning and characteristics
1. Rated power of the generator, kW, not less than	2,0
2. Rated input power of generator control windings, W, not more than	4,0
3. Rated output voltage of the generator, V	95,0
4. Rated load current of the generator, A	21,5
5. Rated motor voltage, V	27
6. Rated motor current consumption, A, not more than	145
7. Rated motor speed, rpm, not more than	6000±600
8. Engine efficiency, %, not less than	52
9. Output voltage in generator forcing mode, V	131,5
10. Load current in output voltage boost mode, A	21

Continuation of the table

Name of parameter	Meaning and characteristics
11.Input power of the control windings in the motor output voltage boost mode, W, not more than	30
12.Amplifier operation mode	Long, S1 on ДСТУ 183-74
13.Amplifier design	Protected, the degree of protection IP20 on ДСТУ 17494-96
14.Cooling method	Air forced IC01 on ДСТУ 20459-87
15.Operating position of the amplifier	Any (with the fan facing downwards)
16.Weight of the amplifier, kg, not more than	64
17.Overall dimensions of the amplifier, mm	Ø192×619

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕРС – електрорушійна сила;

Х.Х. – холостий хід;

К.З. – коротке замикання;

МРС – магніторушійна сила;

ЕМП – електромашинний підсилювач;

МПС – машина постійного струму;

ТУ – Технічні умови;

ДСТУ – Державні стандарти України

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1.ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ.....	13
1.1. Технічні вимоги	13
1.2. Конструктивно-технічні вимоги	15
1.3. Вимоги до надійності	18
1.4. Комплектність.....	18
1.5. Маркування та пакування	18
1.6. Вимоги безпеки.....	18
1.7. Правила приймання.....	19
1.8. Методи контролю	20
1.9. Транспортування та збереження	22
1.10. Вказівки по експлуатації.....	22
1.11. Гарантії виробника	22
2.ОПИС КОНСТРУКЦІЇ	24
2.1. Загальна конструктивна схема	24
2.2. Конструкція статора.....	27
2.3. Конструкція якоря	29
2.4. Конструкція колектора.....	29
3.РОЗРАХУНОК МОДЕРНІЗОВАНОГО ЕМП	34
3.1. Вибір основних розмірів.....	34
3.2. Вибір обмотки якоря. Колектор	36
3.3. Геометрія зубцевої зони якоря. Діаметр вала	40
3.4. Геометрія статора. Компенсаційна обмотка	41
3.5. Комутація по повздовжній осі. Обмотка додаткових полюсів	47
3.6. Визначення коефіцієнта форми поля α_v	48
3.7. Поперечна підмагнічувальна обмотка.....	52
3.8. Розрахунок магнітного кола по поперечній осі. Характеристика холостого ходу вихідної ступені	56

3.9. Опір обмотки вихідної ступені	61
3.10. Комутація по поперечній осі.....	61
3.11. Характеристика холостого ходу вхідної ступені.....	63
3.12. Обмотка керування.....	67
3.13. Результируюча характеристика холостого ходу	72
3.14. Розрахунок ступені компенсації. Зовнішня характеристика	75
3.15. Втрати та К.К.Д. при номінальному навантаженні	79
3.16. Індуктивності та постійні часу обмоток та ланцюгів	82
3.17. Перевірка нагріву	84
ВИСНОВОК	85
ЛІТЕРАТУРА	87
Перелік графічного матеріалу, що виноситься на захист дипломної роботи	88

ВСТУП

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

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

Вперше електричну машину для цілей автоматичного регулювання застосував у 1871 році вчений В.Н. Чікольников. Він запропонував і реалізував у своїх автоматично діючих дугових лампах принцип регулювання, який широко використовують в сучасній електромашинній автоматизації.

Машина поперечного поля була запропонована в 1940 році німецьким інженером Е. Розенбергом як саморегулюючий генератор для освітлення залізничних вагонів. Ця машина забезпечувала майже постійний струм при значних змінах швидкості обертання, зберігаючи полярність незалежно від напрямку руху залізничного складу.

Надалі принцип дії машини поперечного поля був використаний у метадині, який знайшов застосування в електричній тязі та кранових установках. Метадин був запропонований у 1929 році видатним вченим-

електромашинобудівником акад.. К.І. Шенфером, а згодом розроблений і впроваджений у практику італійським інженером Дж. Пестаріні.

Наступний розвиток машина поперечного поля отримала у рекомендаціях інженера Л.Рашковського, що застосував у ній в 1927р. компенсаційну обмотку. Машина виробляла постійну по величині та за знаком напругу при змінній та реверсивній швидкості обертання.

У 1938 році американські інженери М.А. Едвардс та Е.Ф. Александерсон запропонували машину поперечного поля з розподіленою компенсаційною обмоткою як електромашинний підсилювач (амплідин). Особливо великого розвитку набули електромашинні підсилювачі поперечного поля під час воєнного та повоєнного періодів.

Внесок у розробку теорії та проектування електромашинних підсилювачів поперечного поля зробили вітчизняні вчені та інженери. Значний вклад у цю справу внесли академіки М.П. Костенко і В.С. Кулебакін, професори А.Г. Іосіф'ян, Є.В. Нітусов, М.І. Романов, кандидати технічних наук Ф.А. Горяїнов, Г.К. Салгус, Я.С. Епштейн та інші.

Наразі електромашинні підсилювачі поперечного поля виготовляють на багатьох вітчизняних заводах електромашинобудування як у загальнопромисловому, так і в спеціальному виконанні.

У 1950 році англійська компанія Макфарлайн Інжиніринг (м. Глазго) запропонувала електромашинний підсилювач поперечного поля з напівдіаметральним кроком обмотки якоря та вбудованими нелінійними елементами (магнікон). Цей підсилювач набув широкого застосування як збудник-регулятор напруги синхронних генераторів.

Паралельно з розвитком електромашинних підсилювачів поперечного поля продовжували розвиватися електромашинні підсилювачі поздовжнього поля. Одноступеневий самозбуджуючийся підсилювач (рототрол) був

запропонований у 1942 році американською компанією Вестингауз для широкого використання в ряді промислових автоматизованих електроприводів.

У 1945 році американська компанія Алліс Чалмерс застосувала каскадний двомашинний підсилювач-регулятор з насиченою магнітною системою для регулювання потужних реверсивних станів (регулекс).

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

Задачі роботи: Розібратися в технології виготовлення обмоток, вкладання обмоток у пази, участь у процесі збирання машини та в процедурі випробування електромашинного підсилювача. Зрозуміти принцип роботи та конструкцію електромашинного підсилювача, виконати розрахунки параметрів та побудувати характеристики.

Предмет дослідження: Генератор, як частина електромашинного підсилювача, його електромеханічні характеристики та параметри.

Шляхи реалізації: Безпосередня участь у процесі виготовлення та укладання обмоток, збирання колектора з мідних пластин, приймання участі у збиральних роботах та випробуваннях. Аналіз конструкторської та технічної документації, ознайомлення з будовою ЕМП наживо, виконання електромагнітного розрахунку та побудова електромеханічних характеристик в комп'ютерній програмі Mathcad.

1. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ.

Ці технічні умови (ТУ) стосуються електромашинного підсилювача поперечного поля (далі – підсилювач). Підсилювач складається з електромашинного підсилювача поперечного поля (далі – генератор) і приводного електродвигуна постійного струму з збудженням від постійних магнітів (далі – двигун).

Підсилювач призначений для роботи разом з електродвигунами ІУС-1,5, ІУС-1,5М1 і блоком керування БУ-КІМІ в системі автоматизованого електроприводу виробу «Лев» в умовах групи 1.10 кліматичного виконання УХЛ, ДСТУ 20.39.304-76.

1.1. Технічні вимоги

1.1. Основні характеристики та параметри

1.1.1. Основні характеристики та параметри генератора повинні відповідати значенням, що наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Назва параметра	Значення і характеристика
1. Номінальна потужність генератора, кВт, не менше	2,0
2. Номінальна вхідна потужність обмоток керування генератора, Вт, не більше	4,0

Назва параметра	Значення і характеристика
3. Номінальна вихідна напруга генератора, В	95,0
4. Номінальний струм навантаження генератора, А	21,5
5. Номінальна напруга двигуна, В	27
6. Номінальний споживаний струм двигуна, А, не більше	145
7. Номінальна частота обертання двигуна, об/хв, не більше	6000±600
8. Коефіцієнт корисної дії (К.К.Д.) двигуна, %, не менше	52
9. Вихідна напруга в режимі форсування генератора, В	131,5
10. Струм навантаження в режимі форсування вихідної напруги, А	21
11. Вхідна потужність обмоток керування в режимі форсування вихідної напруги двигуна, Вт, не більше	30
12. Режим роботи підсилювача	Тривалий, S1 по ДСТУ 183-74
13. Виконання підсилювача	Захищений, ступінь захисту IP20 по ДСТУ 17494-96

Назва параметра	Значення і характеристика
14.Спосіб охолодження	Повітряне примусове – ІС01 по ДСТУ 20459-87
15. Робоче положення підсилювача	Будь-яке (при вертикальному положенні вентилятором вниз)
16. Маса підсилювача, кг, не більше	64
17. Габаритні розміри підсилювача, мм	Ø192×619

1.2. Конструктивно-технічні вимоги.

1.2.1. Підсилювач повинен відповідати вимогам дійсних ТУ комплекту документації

1.2.2. Габаритні, установчі та приєднувальні розміри підсилювача повинні відповідати даним, вказаним на кресленні.

1.2.3. Щітки підсилювача повинні бути притерті по радіусах колекторів не менше чим на 90% робочої поверхні.

1.2.4. Маса підсилювача повинна бути не більше 64 кг.

1.2.5. Опори обмоток підсилювача практично в холодному стані повинні відповідати даним, що наведені в таблиці 1.2.

1.2.6. Електричні опори ізоляції обмоток підсилювача відносно корпусу та між обмотками у неробочому стані повинні відповідати величинам, що указані в таблиці 1.3.

Таблиця 1.2

Перевіряючий ланцюг	Точка вимірювання	Величина опору, Ом			Примітки
		$R_{\min}$	$R_{\text{ном}}$	$R_{\max}$	
1	2	3	4	5	6
Обмотки керування: -ОУ1 -ОУ2	Контакти з'єднувачів: X1:4, X2:1 X1:4, X2:2	22,5 22,5	25,0 25,0	27,5 27,5	
Поперечна обмотка (ПО)	На траверсах з двома щітками	0,31	0,34	0,37	Підняти щітки ПО генератора на траверсах з двома щітками

Таблиця 1.3

Вимоги по експлуатації або стан ізоляції підсилювача	Опір ізоляції, МОм, не менше
1. В нормальних кліматичних умовах та практично холодному стані підсилювача	20,0 (50,0)
2. При підвищенні робочої температури оточуючого середовища або в установленому тепловому режимі за нормальних кліматичних умов та після витримки в умовах підвищеної температури у неробочому стані	5,0 (7,0)
3. При підвищеній вологості повітря та практично холодному стані підсилювача	0,5

1.2.7. Ізоляція обмоток підсилювача відносно корпусу та між обмотками повинна витримувати без пробою та поверхневого перекриття в нормальних кліматичних умовах або при досягненні встановленого теплового режиму протягом 1 хв. дію випробувальної напруги частотою (50 ± 1) Гц:

- обмотки генератора – 1500 В;
- обмотки двигуна – 1050 В;
- між обмотками двигуна та генератора – 1050 В.

Примітка – при випробуванні на вологостійкість випробувальна напруга повинна складати 50% від вищезгаданих значень.

1.2.8. Ізоляція обмоток ланцюга якоря генератора між суміжними витками повинна витримувати випробування напругою 173 В при холостому ході протягом 5 хв. Виткова ізоляція обмотки якоря двигуна перевіряється за спеціальною методикою до збирання підсилювача.

1.2.9. Напруга рушіння підсилювача повинна бути не більше 10 В.

1.2.10. Напрявлення обертання вала підсилювача – праве (якщо дивитися зі сторони вентилятора) при подачі «+» напруги на контакт з'єднувача X1:6 та «-» на корпус. Полярність вихідної напруги генератора повинна бути «+» на контакті з'єднувача X1:1 при подачі «-» джерела живлення на обмотку керування ОУ1 (контакт X2:1). Полярність вихідної напруги генератора повинна бути «+» на контакті X1:2 при подачі «-» джерела живлення на обмотку ОУ2 (контакт X2:2).

1.2.11. Основні номінальні параметри підсилювача при напрузі двигуна 27 В, генератора 95 В і струму 21,5 А повинні бути наступними:

- струм споживання двигуна – не більше 55 А;
- частота обертання двигуна може перевищувати частоту обертання при номінальному навантаженні не більше чим 15 %.

1.3. Вимоги до надійності.

1.3.1. Гарантійне напрацювання підсилювача до відмови повинна бути не менше 500 год.

1.3.2. Призначений ресурс підсилювача повинен складати 1000 год, тривалого режиму без обслуговування.

1.4. Комплектність.

1.4.1. В комплект поставки підсилювача входять:

- підсилювач – 1 шт.;
- паспорт – 1 шт.

1.5. Маркування та пакування.

1.5.1. Маркування та пакування, його зміст та місце нанесення повинні відповідати вимогам комплексу документації.

1.5.2. Маркувальні написи повинні бути чіткими, без розривів в буквах та цифрах

1.5.3. Підсилювач повинен пакуватися у відповідності до вимог конструкторської документації на нього.

1.5.4. Транспортувальна тара, її маркування і службові написи на ній повинні відповідати вимогам комплексу документації.

1.6. Вимоги безпеки.

1.6.1. При роботі з підсилювачем необхідно дотримуватися правила техніки безпеки, що поширюються на електроустановки з напругою до 1000 В.

1.6.2. Апаратура на робочому місці для перевірки підсилювача повинна бути заземлена. Заземлення повинно бути виконано неізолюваним гнучким мідним багатожильним проводом перерізом не менше 10 мм².

1.6.3. Перед підключенням пульта до джерела електроживлення, тумблери вмикання повинні бути у вимкненому стані.

1.6.4. Щоб уникнути виникнення випадкового короткого замикання забороняється виконувати монтажні та налагоджувальні роботи при увімкненому пульті.

1.6.5. Забороняється користуватися незаземленими паяльниками, частота і напруга електроживлення яких перевищує 50 Гц. 36 В.

1.6.6. Забороняється вмикати підсилювач при знятому кожусі вентилятора та знятих хомутах, так як відкриваються струмоведучі та обертаючі частини.

1.7. Правила приймання.

1.7.1. Загальні положення.

1.7.2. Приймання підсилювачів повинна виконуватися у відповідності з правилами, що викладені в справжніх ТУ.

1.7.3. Для перевірки підсилювачів на відповідність вимог справжніх ТУ та для їх приймання на підприємстві – виробника представником ВТК та представником замовника проводяться випробування:

- приймально - давальні;
- періодичні;
- типові.

1.7.4. Підсилювачі що витримали випробування вважаються при відповідності результатів випробувань по кожному пункту вимог справжніх ТУ.

1.7.5. Випробування підсилювачів на стійкість при дії синусоїдальної вібрації на одній частоті (технологічна тряска) проводить бюро цехового контролю по методиці п.4.2.3. справжніх ТУ в процесі виготовлення до пред'яви на

приймально-здавальні випробування та роблять позначку на відповідному документі.

1.7.6. Всі випробування ЕМП проводяться в нормальних кліматичних умовах, окрім тих, де кліматичні випробування обговорені особливо.

Нормальні кліматичні умови характеризуються:

- Температурою оточуючого повітря від +15 до +35°C;
- Відносною вологістю повітря від 45 до 80%;
- Атмосферним тиском від $8 \cdot 10^4$ до $10,7 \cdot 10^4$ Па. (від 600 до 800 мм. рт.ст.).

Примітка – При температурі повітря вище +36°C відносна вологість не повинна перевищувати 70%.

1.8. Методи контролю.

1.8.1. Перевірка конструктивно-технічних вимог.

1.8.2. Відповідність підсилювача вимогам, викладеним в п.1.2.1, 1.2.2. та підп.1.5,1.6. справжніх ТУ, перевіряти зовнішнім оглядом та звіренням зі складальними кресленнями, документами із застосуванням вимірювального інструмента, що забезпечує точність вимірювання в межах допусків, вказаних на кресленнях та документах.

Якість притирання щіток (п.1.2.3. справжніх ТУ) перевіряється візуально.

1.8.3. Маса підсилювача (п.1.2.4. справжніх ТУ) перевіряти на вагах РП-100Ш13

1.8.4. Перевірка опору обмоток підсилювача (п.1.2.5. справжніх ТУ) виконувати мостом постійного струму типу УПП-60М (або методом амперметра-вольтметра), приєднуючи за допомоги щупів провідники вимірюючого прибору до точок, вказаних в таблиці 1.2, графа 2. При вимірюванні опору поперечної обмотки, щітки на траверсах з двома щітками генератора повинні бути піднятими.

1.8.5. Вимірювання електричного опору ізоляції обмоток підсилювача відносно корпусу та між обмотками (п.1.2.6. справжніх ТУ) в нормальних кліматичних умовах та при підвищеній робочій температурі оточуючого середовища виконувати мегомметрами: М4100 з напругою 500 В. та М4100 з напругою 100 В. – при підвищеній вологості.

1.8.6. При випробуваннях по п.2 таблиці 1.3. справжніх ТУ опір ізоляції перевіряти не пізніше чим через 3 хв. після відключення напруги.

1.8.7. При випробуваннях по п.3 таблиці 1.3. справжніх ТУ опору ізоляції перевіряти після дії вологи, не виймаючи електродвигун, або не пізніше чим через 15 хв. після виймання його з камери.

1.8.8. Вимірювання електричного опору ізоляції підсилювача виконувати шляхом під'єднання мегомметра до контактів X1:1, X1:4, X1:6 з'єднувача і до корпусу підсилювача, між контактами X1:1 та X1:4 з'єднувача, при цьому мінусові щітки двигуна повинні бути підняті.

1.8.9. Перевірку електричної міцності ізоляції обмоток підсилювача відносно корпусу та між обмотками (п.1.2.7. справжніх ТУ) виконувати на установці УПУ-1М у відповідності з ДСТУ 14000.0-78.

Випробувальну напругу слід піднімати з нуля або зі значення, що не перевищує робочої, плавно або рівномірно ступенями, що не перевищують 10 % від значення випробувальної напруги. Випробувальну напругу витримують протягом однієї хвилини, після чого плавно або ступенями знижують до нуля, і установку вимикають. При цьому здійснюються такі під'єднання:

- випробувальна напруга 1500 В прикладається до контактів X1:1-КОРПУС; X1:4-КОРПУС;

- випробувальна напруга 1050 В прикладається до контактів X1:6-КОРПУС; X1:1-X1:4, при цьому мінусові щітки двигуна мають бути підняті.

1.9. Транспортування та збереження.

1.9.1. Транспортування підсилювачів в упаковці підприємства-виробника має здійснюватися будь-яким видом критого транспорту на будь-які відстані зі швидкостями, припустимими для цього виду транспорту, у тому числі й авіатранспортом. Умови транспортування додатково характеризуються :

- температурою навколишнього середовища (нижнє значення) мінус 60°C ;
- циклічною схемою температури навколишнього середовища від + 70°C до мінус 60°C і назад;
- зниженим атмосферним тиском до $2,1 \cdot 10^4$ Па (90 мм рт. ст.).

1.9.2. Під час транспортування установка підсилювача повинна бути захищена від безпосереднього впливу атмосферних опадів.

1.9.3. Зберігання підсилювачів (в пакуванні постачальника, у складі ЗІП) повинно здійснюватися згідно з вимогами ДСТУ 9.003-80 і ДСТУ 9.008-90.

1.10. Вказівки по експлуатації.

1.10.1. Підсилювач повинен експлуатуватися в умовах і режимах, які відповідають вимогам цих технічних умов.

1.10.2. Застосування підсилювача в інших виробках і режимах (умовах), крім зазначеного в цих ТУ, має бути погоджено з підприємством-виробником.

1.10.3. Під час експлуатації підсилювача у складі об'єкта забороняється перевищувати частоту обертання 7200 об/хв..

1.11. Гарантії виробника.

1.11.1. Підприємство-виготовлювач гарантує відповідність якості підсилювача вимогам цих технічних умов у разі дотримання споживачем умов експлуатації, зберігання і транспортування, встановлених ТУ.

1.11.2. Гарантійне напрацювання підсилювачів встановлюється 500 год. В тривалому режимі.

1.11.3. Гарантійний термін зберігання підсилювача, законсервованого з урахуванням вимог ДСТУ 3 - 9.008-90 мастилом К-17 ДСТУ 10877-84, на складах генерального замовника не повинен перевищувати 5 років або під час установлення в герметизований чохол - не більше 8 років.

1.11.4. Протягом гарантійного терміну зберігання та експлуатації підприємство-виробник безоплатно своїми силами і засобами в найкоротший технічно можливий термін усуває відмови і несправності, що виникли в підсилювачі, або здійснює заміну підсилювача, який вийшов з ладу, якщо це сталося з вини підприємства-виробника.

Після усунення дефектів гарантійний термін продовжується на час, що витрачається на виклик представника підприємства-виготовлювача та усунення дефектів, про що робиться запис у паспорті, завіреному представником підприємства-виготовлювача.

Після припинення або зміни гарантійного терміну підприємство - виробник забезпечує в узгоджені терміни відповідність підсилювача вимогам цих ТУ коштом замовника та усуває відмови і несправності протягом терміну служби підсилювача, що залишився.

2. ОПИС КОНСТРУКЦІЇ.

2.1. Загальна конструктивна схема.

ЕМП поперечного поля являє собою одноякірний двохступінчатий підсилювач. В розглянутому підсилювачі магнітний потік вихідної ступені створюється в основному якірною обмоткою, а саме, дією поперечної реакції якоря вхідної ступені. Останнім і пояснюється його найменування. В конструктивному відношенні ЕМП поперечного поля являє собою генератор постійного струму з розщепленими полюсами та додатковим комплектом щіток на колекторі. Обмотка якоря виконується з діаметральним чи трохи скороченим кроком. На рис.2.1. наведено загальний вид ЕМП, а на рис.2.2. показано електрична принципова схема, на рис.2.3 – штамп жесті статора та розташуванням обмоток статора, на рис.2.4 – ескіз паза якоря, на рис.2.5 – схема обмотки якоря. При розціплені системі полюсів кожен північний полюс поділяється на два часткових північних $N, N (n, n)$, кожен південний – на два часткових південних $S, S (s, s)$ (рис.2.2). Така система полюсів забезпечує однакову магнітну провідність як по повздовжній, так і по поперечним осях машини. На рис.2.2. відображено принципова схема ЕМП. Перша ступінь підсилювача представляє собою генератор постійного струму, що має обмотки керування – збудження (ОУ) по повздовжній осі d та вихідне якірне коло з «поперечними» щітками $q-q$, що замкнуті накоротко. Так як остання працює в режимі КЗ, то обмотка керування, що створює повздовжній магнітний потік Φ_d , потребує досить невелику н.с. та відповідно малу потужність керування. Потік керування Φ_q другої ступені створюється обмоткою якоря за рахунок дії н.с. поперечної дії якоря від вихідного струму короткого замикання першого ступеня. Під час обертання якоря поперечне поле індукує на повздовжніх щітках $d-d$ е.р.с., під дією якої виникає струм навантаження вихідного кола ЕМП. Послідовно з повздовжніми щітками якоря вмикається компенсаційна обмотка КО, яка використовується для компенсації реакції якоря, що створюється вихідним струмом навантаження ЕМП. Для регулювання ступені компенсації реакції якоря КО забезпечується шунтом що регулює опір.

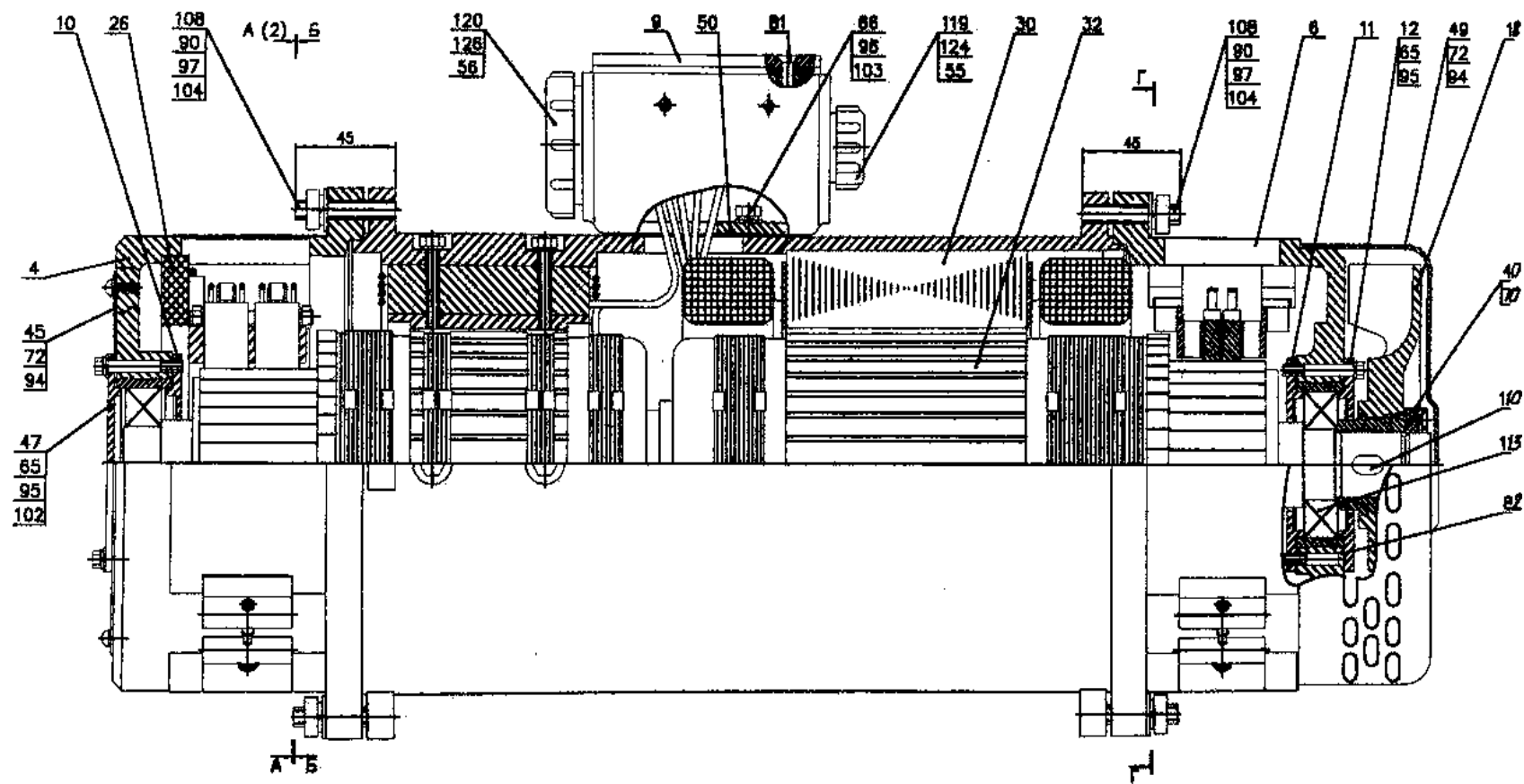


Рис.2.1 – Електромашинний підсилювач поперечного поля

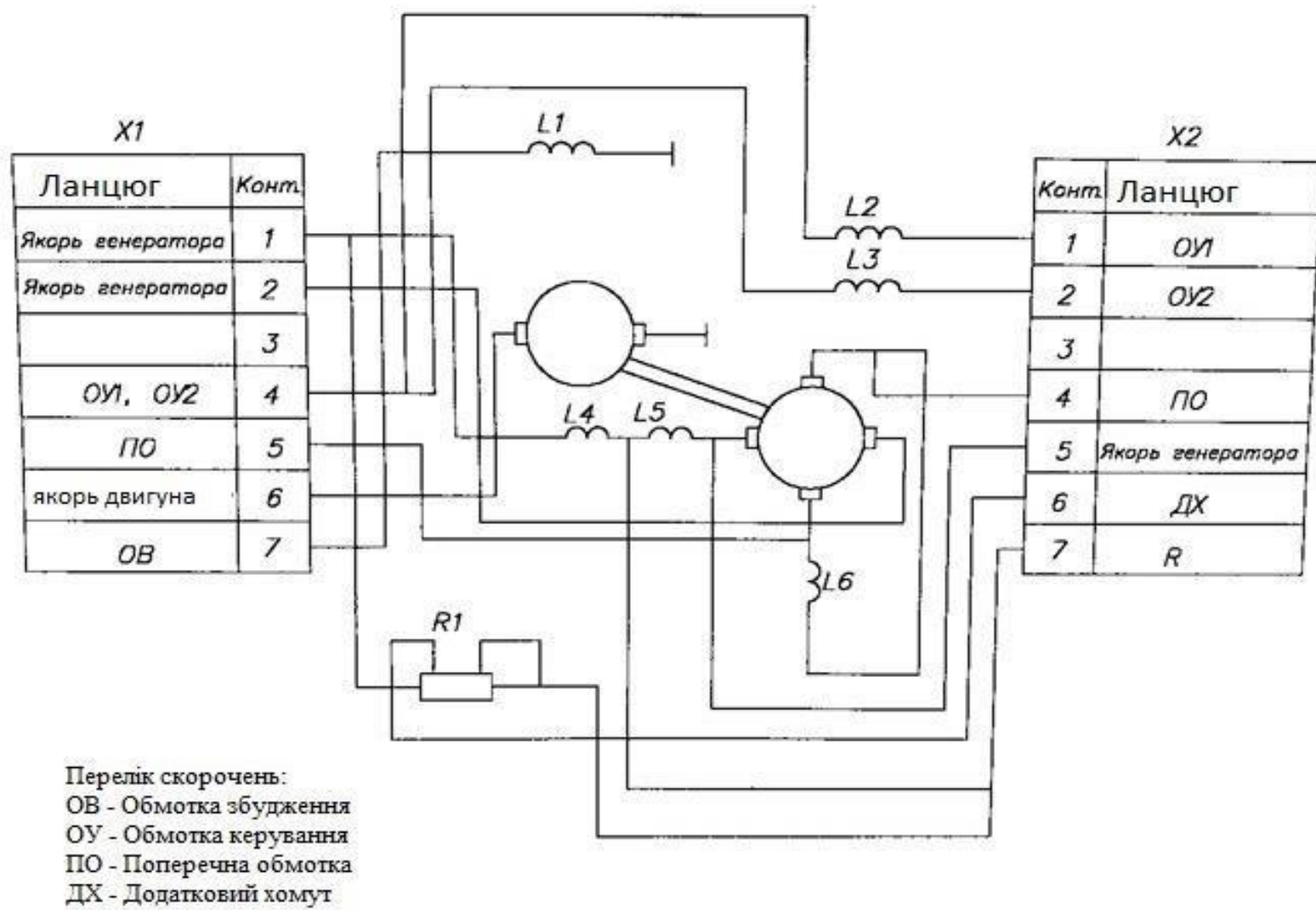


Рис.2.2 – Схема електрична принципова

2.2. Конструкція статора.

З конструктивних міркувань магнітопровід ЕМУ з неявновираженими полюсами, як це показано на рис.2.3. виготовляють зі штампованих листів електротехнічної сталі подібно до магнітопроводу асинхронного двигуна. На статорі ЕМУ поперечного поля розташовуються дві обмотки керування, компенсаційна обмотка, обмотки додаткових полюсів. Прилеглі з обох боків додаткових полюсів пази мають досить великі розміри, щоб розмістити в них витки обмотки додаткового полюса і поперечної обмотки підмагнічування.

Решта пазів полюсів виконані для розміщення спеціальної компенсаційної обмотки. Окремі секції її мають різну ширину, але осі всіх секцій збігаються з поздовжньою віссю ЕМУ. Пази статора виконуються напівзакритими.

Сердечник запресовується в станину, що виконується зі сталі. Між внутрішнім діаметром корпусу (сталеві труби) і зовнішнім діаметром пакета статора передбачені аксіальні вентиляційні канали, висота каналу дорівнює 19,7 мм.

ЕМУ поперечного поля виготовляються з двома обмотками керування. Число обмоток і їхні параметри визначаються тими конкретними вимогами систем електромашинного керування, де як підсилювач застосовується ЕМП. Обмотки керування підсилювача виконуються багатовитковими з емальпроводів малих перетинів. Потужність на вході кожної з обмоток управління за інших відключених обмоток і номінальної потужності на виході підсилювача за двох обмоток становить $P_{у.ном.} = 0,4 - 0,5$ Вт. Наявність декількох обмоток керування дає можливість підсумовувати сигнали, що є перевагою ЕМП. Напрямок струмів у цих обмотках може бути різним, а отже, результуюча намагнічувальна сила визначиться у вигляді суми намагнічувальних сил усіх обмоток керування. Обмотка керування розраховується і виготовляється з урахуванням тривалої роботи за струму, що досягає $5 - 9 i_{ном.}$; цей струм називається тривало допустимим струмом обмотки керування.

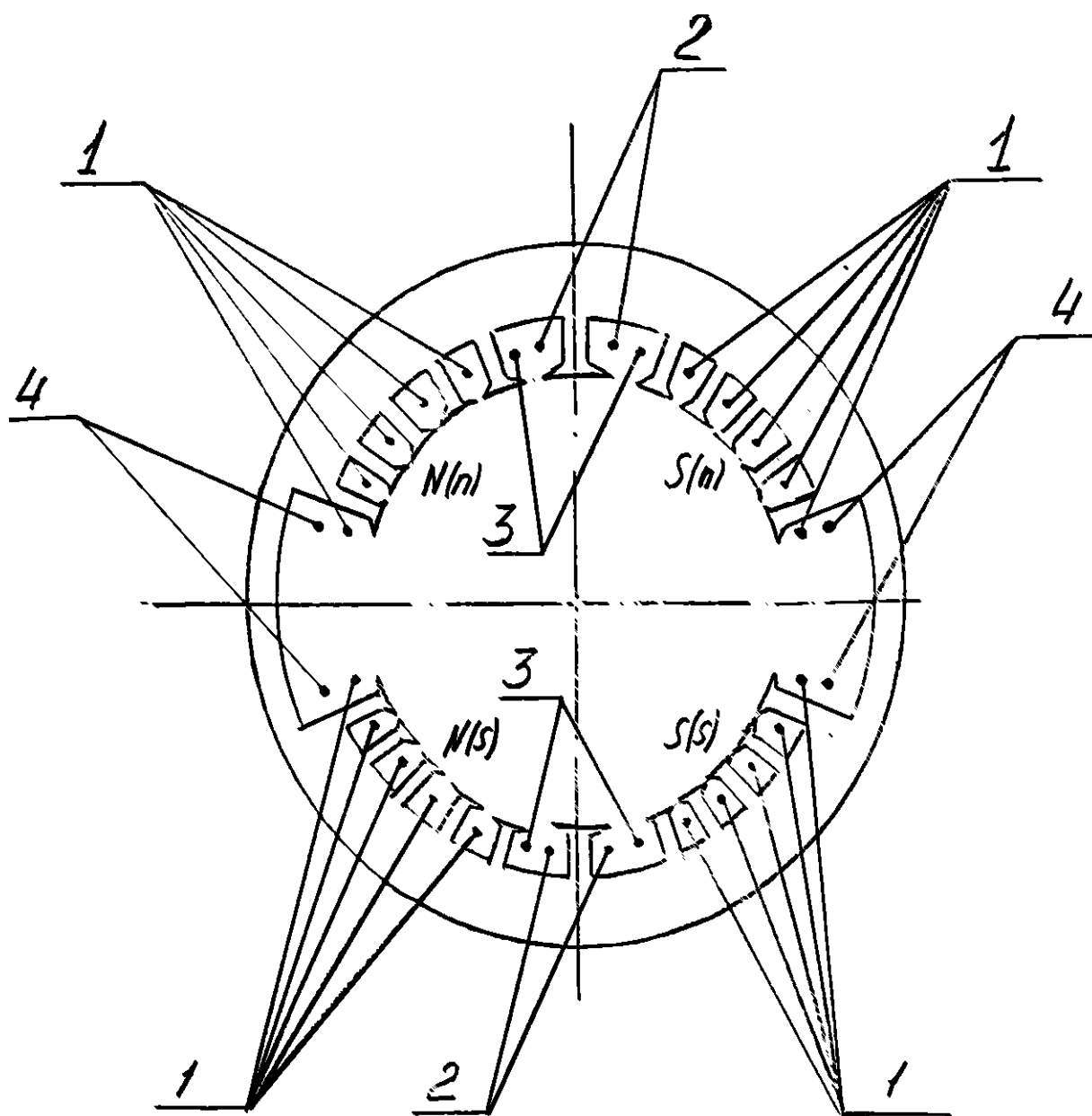


Рис.2.3 – Ескіз магнітопровода з вказівками на розташування обмоток.
 1 – Компенсаційна обмотка; 2 – Обмотка додаткових полюсів; 3 – Поперечна обмотка; 4 – Обмотка керування.

2.3. Конструкція якоря.

Сердечник якоря набирається зі штампованих дисків електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. Диски насаджуються безпосередньо на вал. У пази на зовнішній поверхні якоря укладаються котушки обмотки якоря. Лобові частини обмотки, які виступають з кожного боку з сердечника якоря, мають вигляд циліндричного кільця і своїми внутрішніми поверхнями спираються на обмоткотримачі, а на зовнішній поверхні кріпляться бандажами. Якір зображений на рис. 2.6. Під час роботи ЕМП під навантаженням обмоткою якоря протікають струми, які створюють електричну е.р.с. поперечного і поздовжнього ланцюгів. Обмотка якоря створює робочий (корисний) потік і одночасно передає енергію в ланцюг навантаження. Струм, що визначає втрати енергії в обмотці якоря, становить: $I_{\text{я}} = \sqrt{I_q^2 + I_d^2}$ і за ним розраховується перетин провідників обмотки якоря. Для зменшення довжини комутаційної зони якір виконується з великим числом напівзакритих пазів. Якірна обмотка є простою петльовою, вона показана на рис. 2.5.

2.4. Конструкція колектора.

Обмотка якоря приєднується до колектора. Він складається з мідних пластин, ізолюваних одна від одної міканітовими прокладками товщиною близько 1 мм. Пластини мають трапецеїдальний переріз і разом із прокладками складають кільце, яке скріплюється за допомогою натискних фланців, стягнутих стяжними болтами. Від натискних фланців пластини колектора ізолюються міканітовими колекторними манжетами. Зібраний колектор кріпиться на валу за допомогою шпонки. До кожної пластини колектора приєднуються з'єднувальні провідники - «півники» - від обмотки якоря. Щітковий апарат виконується з двома парами щіток, встановленими на одній траверсі під кутом 90°. Щіткотримач показаний на рис. 2.7. Конструкція щіткотримача забезпечує постійне і достатнє натискання на щітку. Застосовуються щітки марки ЕГ-8 $b_{\text{щ}} \times L_{\text{щ}} = 7,8 \times 8$ мм.

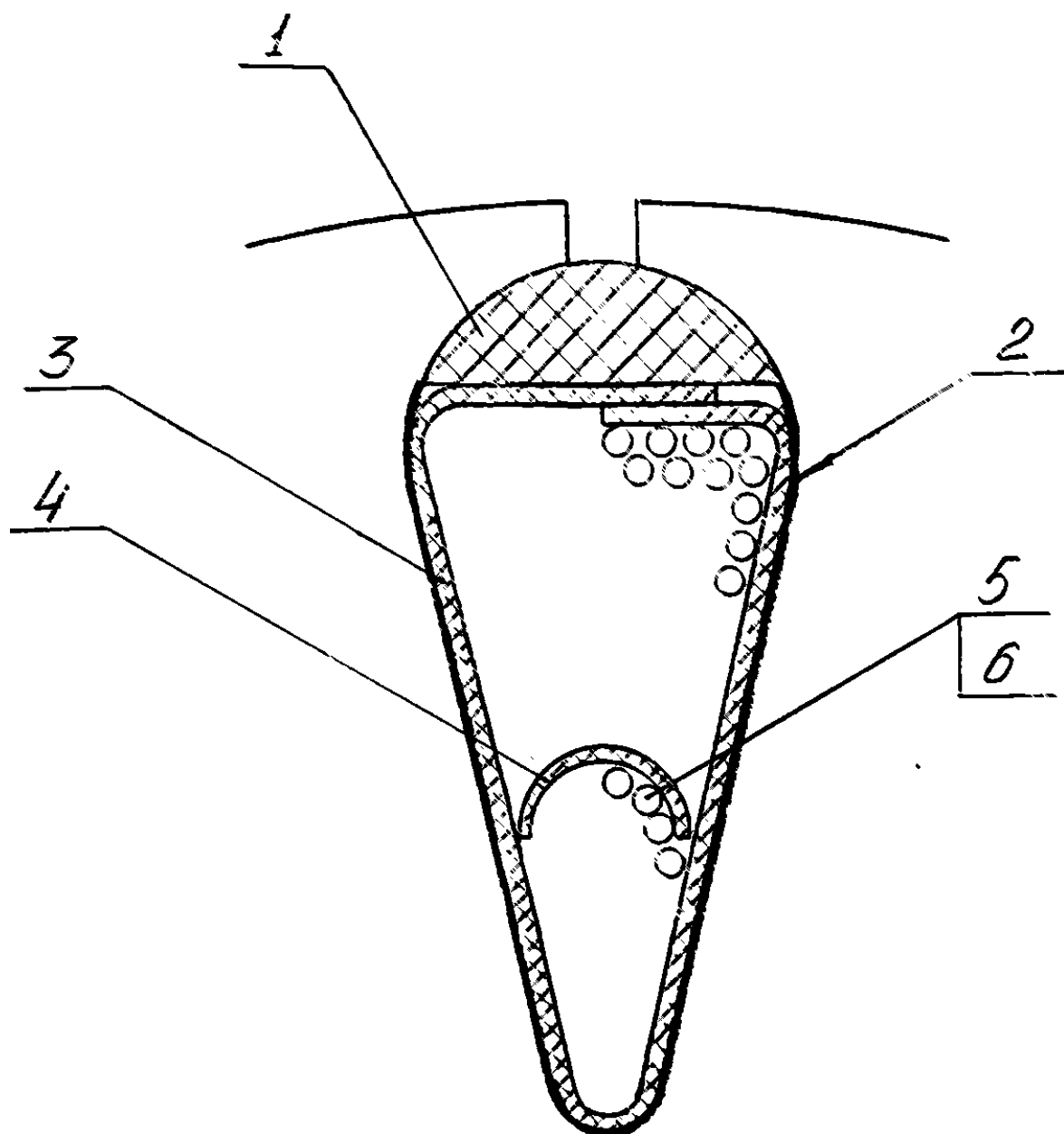


Рис.2.4 – Ескіз паза генератора ЕМП

1 – клин; 2 – пазова ізоляція; 3 – коробка; 4 – міжшарова ізоляція; 5 – секція з двох витків; 6 – секція з трьох витків.

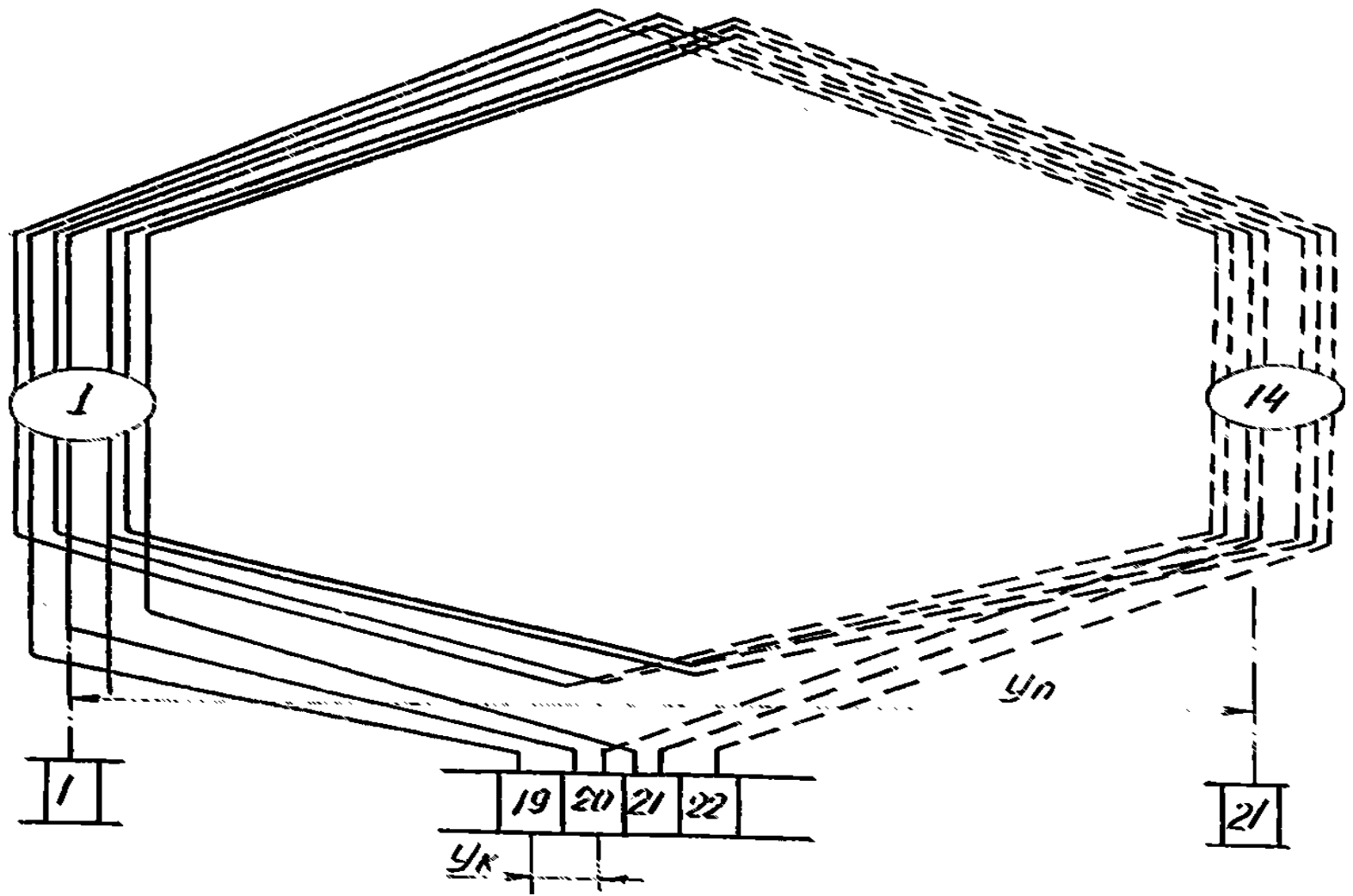


Рис.2.5 – Схема обмотки якоря генератора

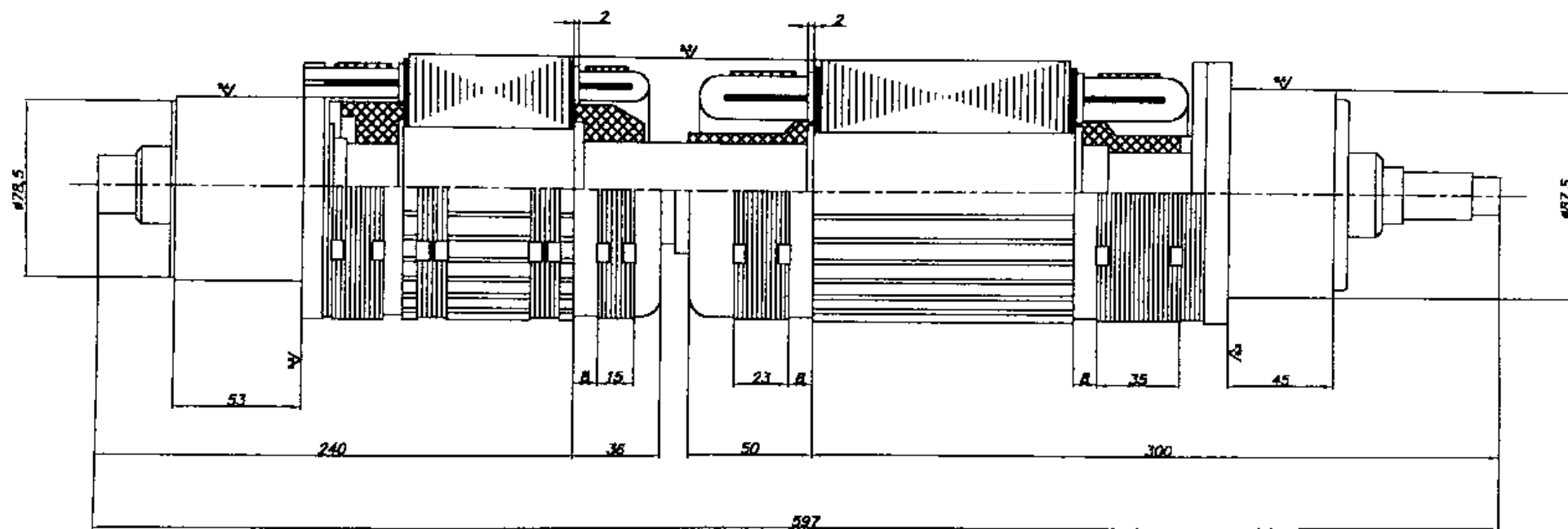


Рис.2.6 – Якір електромашинного підсилювача

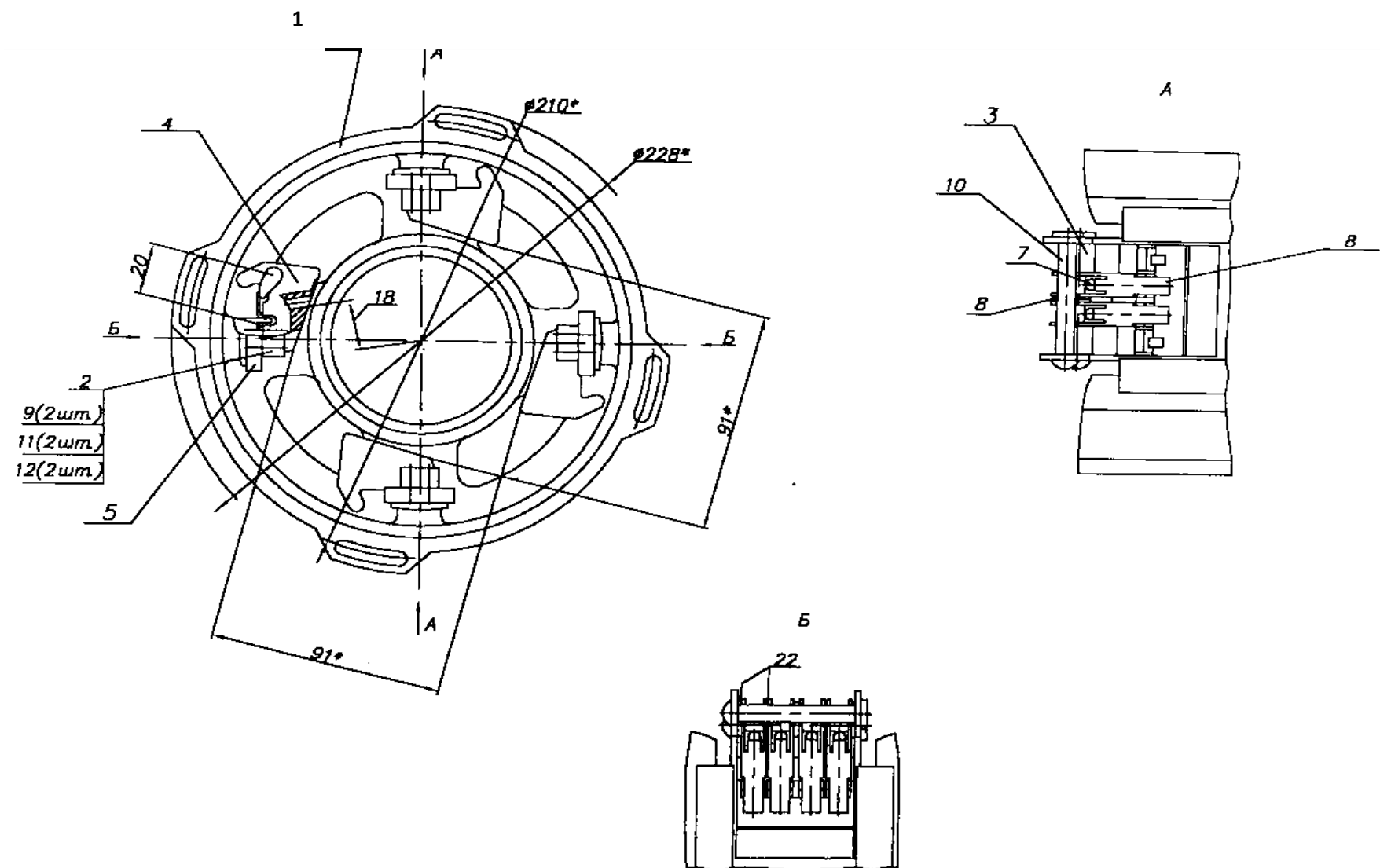


Рис.2.7 – Корпус. Щіткотримачі

3. РОЗРАХУНОК МОДЕРНІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОМАШИННОГО ПІДСИЛЮВАЧА ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ.

Технічні характеристики ЕМП поперечного поля.

Параметри	Одиниця вимірювання	Величина
1. Номінальна напруга приводного двигуна.	В	27,0
2. Номінальний споживаний струм приводного двигуна, не більше.	А	145
3. Номінальна частота обертання.	об/хв	6000
4. Номінальна потужність ЕМП.	кВт	2,0
5. Номінальна вихідна напруга.	В	95,0
6. Номінальний струм навантаження.	А	21,5
7. Номінальна потужність обмоток керування, не більше.	Вт	4
8. Номінальний ККД, не менше.	%	52
9. Кількість обмоток керування.		2
10. Коефіцієнт форсування по напрузі та струму навантаження $\varphi_i = \varphi_a$		2

3.1. Вибір основних розмірів

1. Зовнішній діаметр якоря:

$$D = 0,862 \sqrt[3]{\frac{C_A P'}{\lambda n_H}} = 0,862 \sqrt[3]{\frac{2938835,9 \cdot 2,3}{0,654 \cdot 6000}} = 10,33 \text{ см.}$$

де $C_A = 22938835,9$ з кривої на рис.3.1

$P' = P_H \cdot k_E = 2,0 \cdot 1,15 = 2,3$ кВт; ($k_E = 1,15$ з табл.3.1); $\lambda = 0,654$

(попередньо) для ЕМП малої потужності. Приймаємо значення $D = 11$ см.

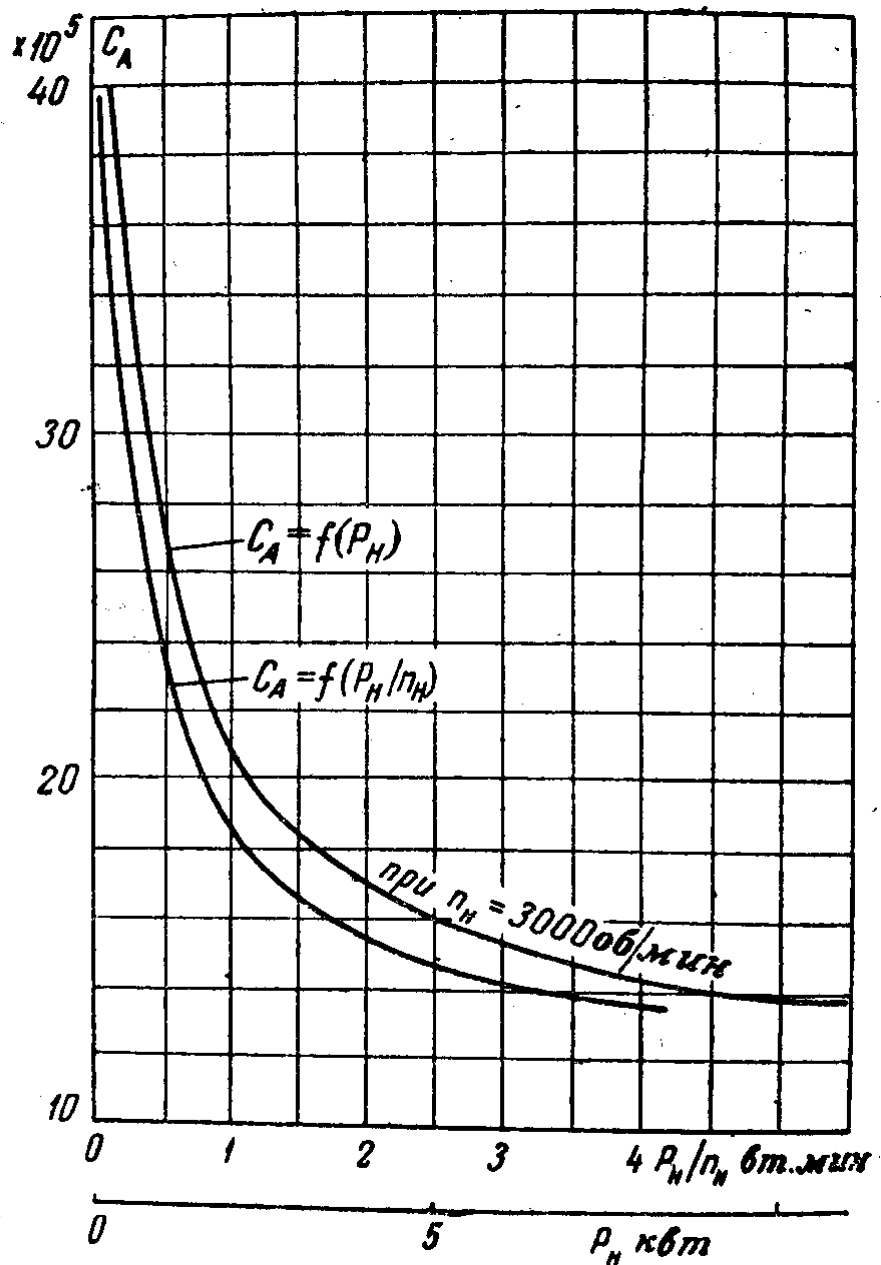


Рис.3.1 - Залежність машинної постійної C_A в функції номінальної потужності ЕМП поперечного поля при 3000 об/хв.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта k_E

P_H , кВт	0,2-1,0	1,0-5,0	5,0-10,0
k_E	1,3-1,2	1,2-1,1	1,1-1,07

2. Розрахункова довжина пакетів якоря і статора:

$$l_i = l = \lambda \tau = 0,654 \cdot 172,788 = 113,003 \text{ мм},$$

де

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi 110}{2} = 172,788 \text{ мм},$$

$l_i = l$, так як машина виконується без вентиляційних каналів.

Матеріал магнітної системи сталь 2412 товщиною 0,5 мм. З урахуванням міжлистової ізоляції пакети мають заповнення сталлю 94% ($k_c = 0,94$).

3. Окружна швидкість якоря:

$$v_{\text{я}} = \frac{\pi D n_{\text{н}}}{6000} = \frac{\pi \cdot 0,11 \cdot 6000}{60} = 34,558 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

3.2. Вибір обмотки якоря. Колектор.

4. Електрорушійна сила вихідної ступені при номінальному навантаженні (попередньо):

$$E_3 = k_E \cdot U_{\text{н}} = 1,150 \cdot 131,50 = 151,2 \text{ В}.$$

5. Поперечний потік та попереднє число провідників якоря:

$$\Phi q = B_{\delta} \cdot \tau \cdot l i = 2135 \cdot 17,2788 \cdot 11,3 = 416940,9 \text{ Мкс}.$$

де $B_{\delta} = 2135 \text{ Гс}$ за кривою на рис.3.2

$$N = \frac{60 a E_3 \cdot 10}{p n_{\text{н}} \Phi} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 151,2 \cdot 10^8}{1 \cdot 6000 \cdot 416940,9} = 363$$

де $a = 1$ (прийнята проста петльова обмотка).

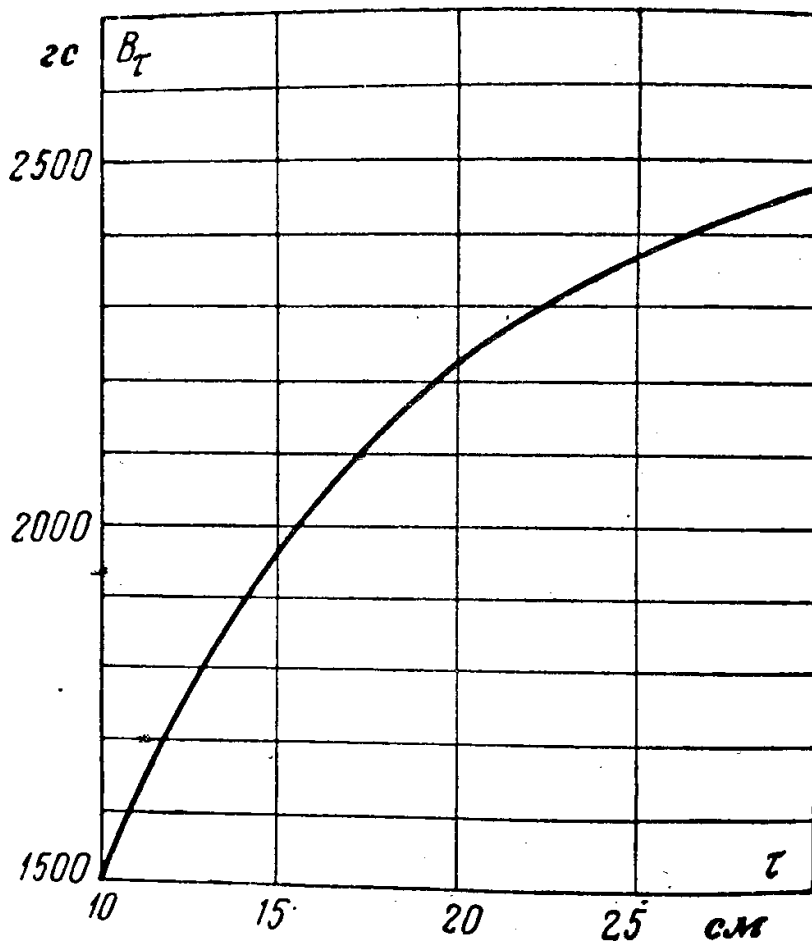


Рис.3.2 - Залежність $B_\tau = f(\tau)$

6. Число пазов якоря:

$$Z_{\text{я}} = 27$$

Зубцева поділка:

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_{\text{я}}} = \frac{\pi \cdot 110}{27} = 12,8 \text{ мм.}$$

Зубцевий крок якірної обмотки:

$$y_z = \frac{Z_{\text{я}}}{2p} = \frac{27}{2} = 13 \text{ (з 1 в 14 паз)}$$

Скорочення в зубцевих поділках:

$$\varepsilon_z = \frac{z_{\text{я}}}{2p} - y_z = \frac{27}{2} - 13 = 0,5$$

7. Число провідників (ефективних у пазу):

$$Nn = \frac{N}{Z_{\text{я}}} = \frac{362}{27} = 13,44$$

Приймаємо $Nn = 16$

Остаточна кількість провідників якоря:

$$N = Nn \cdot Z_{\text{я}} = 16 \cdot 27 = 432$$

8. Кількість послідовних витків якоря на полюс:

$$W_{\text{я}} = \frac{N}{8ap} = \frac{432}{8 \cdot 1 \cdot 1} = 54,0$$

9. Діаметр колектора:

$$D_{\text{к}} = 0,79 \cdot D = 0,79 \cdot 110 = 87 \text{ мм.}$$

10. Кількість колекторних пластин:

$$K = 81$$

тоді:

$$Un = \frac{K}{Z_{\text{я}}} = \frac{81}{27} = 3$$

11. Число витків в секції:

$$W_{\text{с}} = \frac{N}{2K} = \frac{432}{2 \cdot 81} = 2,667$$

$$\frac{Nn}{2} = 3 \cdot 2,333 = 7 \text{ (2 секції по 2 витка = 4)}$$

$$\text{(1 секція по 3 витка = 3)}$$

12. Переріз провідника обмотки якоря:

$$\frac{I_H}{2a\Delta_3} = \frac{15,2}{2 \cdot 1 \cdot 2,9} = 2,62 \text{ мм}^2.$$

де:

$$I_H = \frac{\rho_n}{U_H} = \frac{2000}{131,5} = 15,2 \text{ А.}$$

Щільність струму в обмотці якоря: $\Delta_3 = 2,9 \text{ А/мм}^2$

13. Провідник обмотки у відповідності з діючим стандартом на круглу обмотувальну мідь обираємо з двох паралельних дротів ($n_{\text{ел}} = 2$) діаметром $d = 1,4 \text{ мм}$. Ізоляція провідників обмотки якоря, так як і у всіх інших обмоток ЕМП, беремо марки ПЕТ-155; діаметр ізольованого проводу

$$d_{\text{із}} = 1,485 \text{ мм}; S_{\text{п}} = 1,539 \text{ мм}^2; S_{\text{вих}} = 1,539 \cdot 2 = 3,078 \text{ мм}^2.$$

Щільність струму в обмотці якоря:

$$\Delta_3 = \frac{15,2}{2 \cdot 2 \cdot 1,539} = 2,5 \text{ А/мм}^2.$$

14. Лінійне навантаження якоря:

$$A_3 = \frac{N \cdot I_H}{2a\pi D} = \frac{15,2 \cdot 432}{2 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 11} = 95,1 \text{ А/см.}$$

15. Теплове навантаження якоря:

$$A_3\Delta_3 = 95,1 \cdot 2,5 = 234,8$$

Допустима для тривалого режиму роботи

$A_3\Delta_3 = 41V_{\text{я}} - 270 = 41 \cdot 34,56 - 234,8 = 1182,0$ Відповідно, нагрівання якоря від втрат в обмотці не перевищує допустимих границь.

3.3. Геометрія зубцевої зони якоря. Діаметр вала.

16. Необхідна площа паза якоря у світлі:

$$S_{ня} = \frac{N_n n_{ел} d_{из}^2 + S_{из}}{k_3} = \frac{27 \cdot 1,24 \cdot 1,485^2 + 30}{0,75} \geq 134,09 \text{ мм}^2.$$

де: $S_{из}$ – площа, займана ізоляцією паза, прокладками та клином;

$$S_{из} = 30 \text{ мм}^2$$

k_3 - коефіцієнт заповнення паза:

$$k_3 \leq 0,75.$$

17. Геометрія паза якоря визначається числом пазів $z_{я}$, величиною $S_{п.я.}$ та допустимими індукціями в зубцях. Пази напівзакриті грушоподібні при паралельних стінках зубців. Ширина зубця в найтоншій його частині при індукції $B_{з\text{я}} = 14000 \text{ Гс}$, становитиме:

$$b_{з\text{я}} = \frac{B_{\delta} t_1}{B_{з\text{я}} k_c} = \frac{3882,6 \cdot 12,8}{14000 \cdot 0,94} = 3,776 \text{ мм}$$

де:

$$B_{\delta} = \frac{B_{\tau}}{\alpha} = \frac{2135,4}{0,55} = 3882,6 [\alpha = 0,55 (\alpha = 0,5 \div 0,6)]$$

На рис.3.3. представлено ескіз паза якоря.

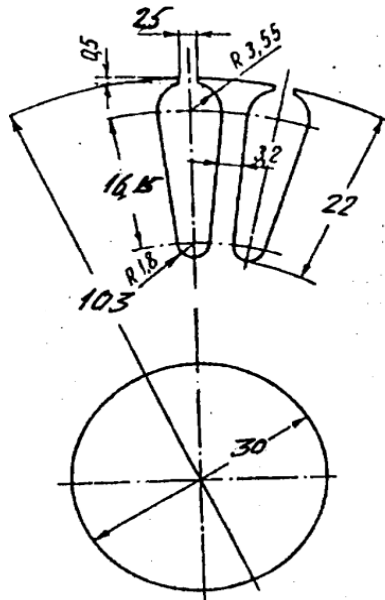


Рис.3.3 - Поперечна геометрія пакета якоря.

18. Діаметр вала:

$$d_b = 0,364D = 0,364 \cdot 110 = 40 \text{ мм.}$$

19. Індукція в спинці якоря:

$$B_A = \frac{\Phi_q}{2S_{\text{я}}} = \frac{416940,9}{2 \cdot 12,7} = 16355,2 \text{ Гс.}$$

де: $S_{\text{я}}$ - поперечний переріз спинки якоря;

$$S_{\text{я}} = h_{\text{я}} \cdot l \cdot k_c = 1,2 \cdot 11,3 \cdot 0,94 = 12,7 \text{ см}^2$$

$$h_{\text{я}} - \text{висота спинки: } h_{\text{я}} = \frac{D - \alpha_b - 2h_n}{2} = \frac{11 - 4 - 2 \cdot 2,3}{2} = 1,2 \text{ см.}$$

3.4. Геометрія статора. Компенсаційна обмотка.

Геометричні розміри (діаметри) пакету статора визначається зовнішнім діаметром якоря, величиною повітряного проміжку під головними полюсами та об'ємом, що займаються статорними обмотками (компенсаційною, поперечною та обмоткою додаткових полюсів).

Попередньо зовнішній діаметр статора приймаємо:

$$D_c = 170 \text{ мм.}$$

20. Повітряний проміжок під головними полюсами:

$$\delta = 0,12 + 0,21\sqrt{Dl} = 0,12 + 0,21\sqrt{0,11 \cdot 1,13} = 0,194 \text{ мм.}$$

де D, L – в дм; приймаємо $\delta = 0,5 \text{ мм.}$

21. Внутрішній діаметр статора:

$$D' = D + 2\delta = 110 + 2 \cdot 0,5 = 111 \text{ мм.}$$

22. Ширина комутаційної зони:

$$b_{кз} = b'_{щ} + t_1 \left(\varepsilon_z + 1 - \frac{\alpha}{U_n \cdot P} \right) = 9,862 + 12,8 \left(0,5 + 1 - \frac{1}{3} \right) = 24,8 \text{ мм.}$$

де: $b_{щ}$ – приведена до діаметру якоря ширина щітки

$$b'_{щ} = b_{щ} \frac{D}{D_k} = 7,8 \frac{110}{87} = 9,862 \text{ мм.}$$

$$b_{щ} = 7,8 \text{ мм.}$$

Щільність струму під щітками:

$$\Delta_{щ} = \frac{I_n}{S'_{щ}} = \frac{15,2}{1,248} = 12,187 \text{ А/см}^2.$$

де: $S'_{щ} = n_{щ} b_{щ} l_{щ} = 2 \cdot 7,8 \cdot 8 = 124,8 \text{ мм}^2 = 1,248 \text{ см}^2.$

23. Ширина між полюсної зони (розкриття великого поперечного паза):

$$b_q = 1,297 b_{кз} = 1,29 \cdot 24,8 = 31,985 \text{ мм.}$$

24. Коефіцієнт полюсного перекриття:

$$d_i = \frac{b_i}{\tau} = \frac{108,8}{172,8} = 0,63$$

де: $b_i \approx b_p = 108,8$ мм.

25. Довжина полюсної дуги:

а) часткового полюса:

$$b'_p = \frac{\tau}{2} - b_q = \frac{172,8}{2} - 32 = 54,4 \text{ мм.}$$

б) повна довжина:

$$b_p = 2b'_p = 2 \cdot 54,4 = 108,8 \text{ мм.}$$

26. Крок еквівалентних пазів статора, рівний зубцевій поділіці малих пазів, приймаємо завчасно:

$$t_2 = t_{к.о.} = 0,9t_1 = 0,9 \cdot 12,8 = 11,5 \text{ мм.}$$

27. Число еквівалентних пазів статора:

$$Z_e = \frac{\pi D'}{t_2} = \frac{\pi \cdot 111}{11,5} = 30,32$$

Обираємо найближче ціле число, кратне 4 при ($2p=2$)

$$Z_e = 32$$

тоді:

$$t_2 = \frac{\pi D'}{Z_e} = \frac{\pi \cdot 111}{32} = 10,9 \text{ мм.}$$

28. Число малих пазів на частковий полюс:

$$Z_M = \frac{b_p}{t_2} - 1 = \frac{54,4}{10,9} - 1 = 3,99 \approx 4$$

29. Число еквівалентних пазових поділок на середній паз:

$$Z_c = \frac{1}{2} \left[\frac{Z_e}{4p} - Z_m \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{32}{4} - 4 \right] = 2$$

30. Число еквівалентних пазових поділок на великий паз:

$$Z_B = 2Z_c = 2 \cdot 2 = 4$$

31. Число дійсних провідників компенсаційної обмотки в пазах статора:

а) у малому пазу:

$$N_{к.м} = N_{к.01} = k_T \frac{N \alpha_{KO}}{2 \alpha Z_e} = 1,06 \frac{432 \cdot 1}{2 \cdot 32} = 7,155 \text{ витків}$$

б) у середньому пазу :

$$N_{к.с} = Z_c N_{к.01} = 2 \cdot 7,155 = 14,336 \text{ витків}$$

в) у великому пазу:

$$N_{к.в} = Z_B N_{к.01} = 4 \cdot 7,155 = 28,671 \text{ витків}$$

Приймаємо:

$$N_{к.м} = 8; N_{к.с} = 15; N_{к.в} = 29$$

32. Розрахункове число витків компенсаційної обмотки на полюс:

$$W_{к.о} = N_{к.с} + N_{к.м} \cdot Z_m = 15 + 8 \cdot 3,99 = 46,944$$

33. Коефіцієнт трансформації витків:

$$h_t = \frac{W_{к.о}}{W_{я}} = \frac{43}{54} = 0,796$$

34.Провід для компенсаційної обмотки використовуємо марки ПЕТ-155; $d = 1,32$ мм, $d_{із} = 1,405$ мм, з поперечним перерізом $S_{к.о} = 1,368$ мм² у чотири паралельних провода ($n_{ел} = 4$); щільність струму при номінальному навантаженні.

$$\Delta_{к.о} = \frac{I_H}{\alpha_{к.о} \cdot n_{ел} \cdot S_{к.о}} = \frac{15,2}{1 \cdot 4 \cdot 1,368} = 2,779 \frac{А}{мм^2}$$

35.Площа пазів статора:

а) для малого паза:

$$S_{к.м} \geq \frac{N_{к.м} n_{ел} d_{із}^2 + S_{із}}{k_3} = \frac{8 \cdot 4 \cdot 1,405^2 + 14}{0,75} = 102,892 \text{ мм}^2.$$

б) для середнього паза:

$$S_{к.с} = 2N_{к.с} n_{ел} d_{із}^2 = 2 \cdot 15 \cdot 4 \cdot 1,405^2 = 236,883 \text{ мм}^2.$$

де: коефіцієнт 2 враховує необхідне місце для поперечної обмотки що підмагнічує, додаткових витків, створюючих комутаційне поле додаткового полюса та ізоляції паза з клином

в) для великого паза:

$$S_{к.б} = (4,5 \div 5,5)N_{к.с} n_{ел} d_{із}^2 = (4,5 \div 5,5) \cdot 25 \cdot 4 \cdot 1,405^2 = 888 \div 1085 \text{ мм}^2.$$

де: коефіцієнт (4.5-5.5) враховує необхідне місце для обмоток керування, ізоляції паза та аксіального вентиляційного каналу.

36. Ширина полюсної дуги додаткового полюса:

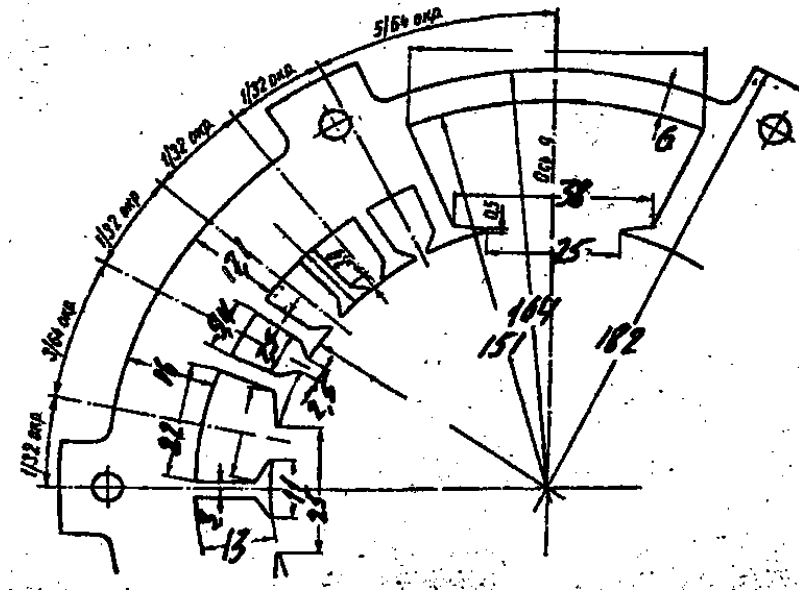
$$b_{\omega} = (0,6 \div 0,7)b_{к3} = (0,6 \div 0,7) \cdot 24,8 = 14,88 \div 17,36 \text{ мм}.$$

Приймаємо значення $b_{\omega} = 15.60$ мм

37. Повітряний проміжок під додатковим полюсом:

$$\delta_w = (1,2 \div 1,5)\delta = (1,2 \div 1,5) \cdot 0,5 = 0,6 \div 0,75 \text{ мм}.$$

39. Наведені вище розрахунки дозволяють представити поперечну геометрію пакету статора на рис. 3.4 , враховуючи можливість розміщення в середніх пазах поперечної обмотки що підмагнічує, а у великому пазу - двох обмоток керування.



40. Магнітна індукція в зубцях статора:

$$B_{zC} = \frac{B_{\delta} t_{K0}}{k_C b_{zC}} = \frac{3882,6 \cdot 11,5}{0,94 \cdot 3,5} = 12860 \text{ Гс.}$$

41. Зовнішній діаметр пакета статора (розрахунковий) при обраній геометрії пазів визначається висотою спинки статора (над середніми пазами)

$$h_c = \frac{\Phi_q}{2B_c l k_c} = \frac{3,323 \cdot 10^5}{2 \cdot 7500 \cdot 11,3 \cdot 0,94} = 2,617 \text{ cm.}$$

Зовнішній діаметр пакету статора:

$$D_c = D' + 2(h_{zc} + h_c) = 111 + 2(13 + 26,17) = 189,74 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр статора $D_c = 189,74$

Приймаємо значення $D_c = 170,00$ мм.

Прийнято зовнішній діаметр статора з таблиці нормальних діаметрів електричних машин.

Між внутрішнім діаметром корпуса (сталеві труби), рівним D_c та зовнішнім діаметром пакета статора передбачені аксіальні вентиляційні канали.

Висота каналу дорівнюватиме:

$$\frac{1}{2}(D'_c - D_c) = \frac{1}{2}(189,74 - 170) = 19,7 \text{ мм.}$$

3.5. Комутація по повздовжній осі. Обмотка додаткових полюсів.

42. Реактивна е.р.с. в комутаційній секції:

$$\beta_{\text{щ}} = \frac{b_{\text{щ}}}{t_K} = \frac{7,8}{3,3} = 2,36 t_K = 3,3 \text{ мм.}$$

при $\varepsilon_K = U_{\text{II}} \cdot \varepsilon_Z = 3 \cdot 0,5 = 1,5$

τ' - полюсна поділка на діаметрі $D_n=83$ мм центру тяжіння поперечного перерізу пазів якоря:

$$\tau' = \frac{\pi D_n}{2p} = \frac{\pi \cdot 83}{2} = 139,8 \text{ мм; } D_n = 83 \text{ мм.}$$

$$L_l = 1,35 \cdot \tau' = 1,35 \cdot 139,8 = 188,73 \text{ мм.}$$

$$\lambda_l = 0,75 \frac{l_l}{l} = 0,75 \frac{188,73}{113} = 1,25$$

$$h_{\delta} = \frac{t_1 + 10\delta}{\xi_1 - \alpha + 10\delta} = \frac{12,8 + 10 \cdot 0,5}{(12,8 - 3) + 10 \cdot 0,5} = \frac{17,8}{14,8} = 1,2$$

$$\alpha_{\text{я}} = 3 \text{ мм}; \lambda_z = 0,15 \frac{b_W}{h_{\delta W} \cdot \delta_W} = 0,15 \frac{15,6}{1,2 \cdot 0,75} = 2,6$$

геометрія паза якоря:

$$h_1 = 16,5 \text{ мм}, d_1 = 7,1 \text{ мм}, d_2 = 3,6 \text{ мм}, h_4 = 0,5 \text{ мм}, \alpha_{\text{я}} = 2,5 \text{ мм}.$$

$$\lambda_n = 0,62 + \frac{2h_1}{3(d_1 + d_2)} + \frac{h_4}{\alpha_{\Omega}} = 0,62 + \frac{2 \cdot 16,15}{3(7,1 + 3,6)} + \frac{0,5}{2,5} = 1,79$$

$$\xi = 0,4\pi \left[\lambda_n \frac{h_{\beta}}{2\beta_{\text{is}}} + \lambda_z \frac{h_{\beta}}{2\beta_{\text{is}}} + \lambda_{\text{л}} \right] = 0,4\pi \left[1,79 \cdot \frac{6,04}{2 \cdot 2,36} + 2,6 \frac{6,04}{2 \cdot 2,36} + 1,25 \right] = 8,8$$

$$e_R = 2W_C A_3 V_{\text{я}} \zeta l_1 \cdot 10^{-6} \text{ Кс} = 2 \cdot 2,9 \cdot 95,16 \cdot 34,56 \cdot 8,8 \cdot 11,3 \cdot 0,94 \cdot 10^{-6} = 1,76 \text{ В}.$$

43. Намагнічувальна сила додаткового полюса для створення комутуючого поля:

$$F_{WK} = 1,05 \cdot 0,8 \cdot B_K \cdot h_{\delta W} \cdot \delta_W = 1,05 \cdot 0,8 \cdot 843,8 \cdot 1,2 \cdot 0,075 = 63,9 \text{ А}.$$

$$\text{де: } B_K = \zeta \cdot A_3 = 8,8 \cdot 95,16 = 843,8 \text{ Гс}.$$

44. Число витків додаткового полюса:

$$W_W = \frac{F_{WK}}{I_H} + N_{KC} = \frac{64}{15,2} + 15 = 19$$

Приймаємо число витків $W_W = 13$

3.6. Визначення коефіцієнта форми поля $\alpha_{\text{в}}$

45. Коефіцієнт форми поля за відсутності насичення:

$$\alpha_{Bo} = \frac{1 + 2\beta_{\text{по}}}{1 + \alpha_i + 2\beta_{\text{по}}} = \frac{1 + 2 \cdot 0,3}{1 + 0,63 + 2 \cdot 0,3} = 0,72$$

де попередньо:

$$\beta_{\text{по}} = \frac{W_{\text{по}}}{W_{\text{я}}} = \frac{16}{54} = 0,3$$

46. Коефіцієнт форми поля з урахуванням насичення:

а) Магнітна напруга повітряного проміжку:

$$h_{\delta 1} = \frac{t_1 + 10\delta}{(t_1 - \alpha_{\text{я}}) + 10\delta} = \frac{12,8 + 10 \cdot 0,5}{(12,8 - 3) + 10 \cdot 0,5} = 1,2$$

$$h_{\delta 1} = \frac{t_{KO} + 10\delta}{(t_{KO} - \alpha_c) + 10\delta} = \frac{10,897 + 10 \cdot 0,5}{(10,897 - 3) + 10 \cdot 0,5} = 1,223$$

$$h_{\delta} = h_{\delta 1} \cdot h_{\delta 2} = 1,2 \cdot 1,223 = 1,482$$

α_c - з рис.3.3, $\alpha_{\text{я}}$ - з рис.3.4.

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta = 0,8 B_{\delta} \cdot 1,482 \cdot 0,05 = 0,0593 B_{\delta}$$

б) Магнітна індукція в зубцях якоря:

$$B_{\text{зя}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{k_c \cdot b_{\text{зя}}} = \frac{11,71}{0,94 \cdot 4} B_{\delta} = 3,4 B_{\delta}$$

де: $k_c = 0,94$; $b_{\text{зя}} = 4$ мм.

в) Магнітна напруга зубцевого шару якоря:

$$F_{\text{зя}} = H_{\text{зя}} \cdot L_{\text{зя}} = 2,3 H_{\text{зя}}$$

де $H_{\text{зя}} = f(B_{\text{зя}})$; $L_{\text{зя}} = h'_{\text{зя}} = 2,3$ см.

г) Магнітна індукція в зубцях статора (зубцях часткового полюса):

$$B_{\text{zc}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{K0}}{k_c \cdot b_{\text{zc}}} = \frac{10,897}{0,94 \cdot 3,5} B_{\delta} = 3,31 B_{\delta}$$

де: $b_{\text{zc}} = 3,5$ мм.

д) Магнітна напруга зубцевого шару статора:

$$F_{zc} = H_{zc} \cdot L_{zc} = 1,25 \cdot H_{zc}$$

де $H_{zc} = f(B_{zc}) L_{zc} = h'_{zc} = 1,25 \text{ см.}$

е) Сумарна магнітна напруга:

$$F_{zc} = F_{\delta} + F_{z\gamma} + F_{zc}$$

Визначення коефіцієнта α_{β}

а) Мінімальне значення абсциси:

$$F_{oa} = \frac{1 - \alpha_i + 2\beta_{\text{по}}}{1 + \alpha_i + 2\beta_{\text{по}}} \cdot F_{oc} = \frac{1 - 0,63 + 20,3}{1 + 0,63 + 2 \cdot 0,3} \cdot F_{oc} = 0,435 F_{oc}$$

де $F_{oc} = F_{\delta z}$ - максимальне значення абсциси див. рис.3.5

б) Середнє значення абсциси:

$$F_{ov} = \frac{1}{2} (F_{oa} + F_{oc})$$

в) Індукція B_1 , відповідна абсцисі F_{oa} за перехідною характеристикою.

г) Індукція B_2 , відповідна абсцисі F_{ov} за перехідною характеристикою.

д) Середня індукція під частковим полюсом

$$B_{cp} = \frac{1}{6} (B_1 + 4B_2 + B_3)$$

де: $B_3 = B_{\delta}$

е) Коефіцієнт форми поля:

$$\alpha_{\beta} = B_{cp} / B_{\delta}$$

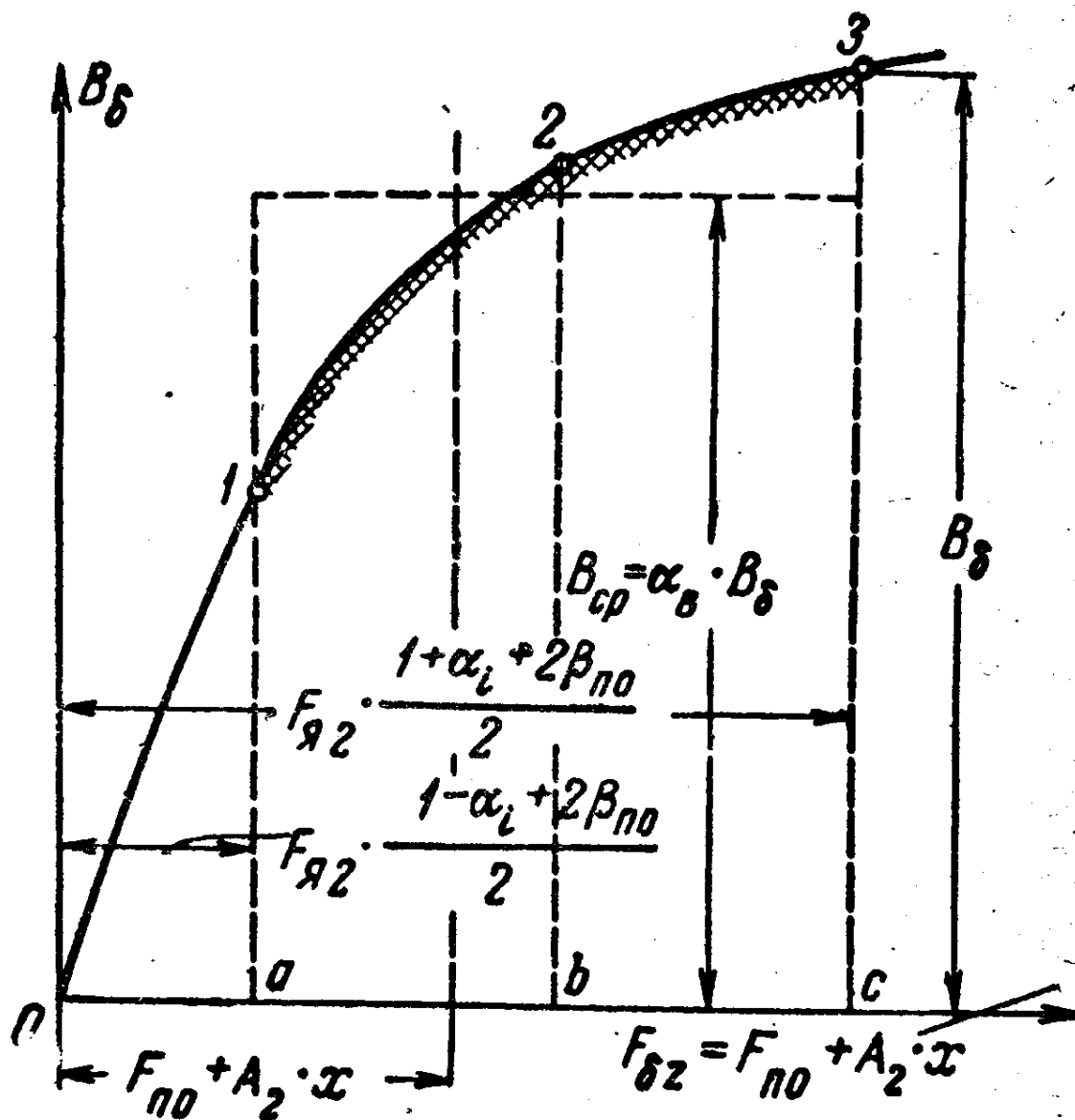


Рис.3.5 - До визначення коефіцієнта форми поля α_β при $\beta_{no} \neq 0$

Дані розрахунку перехідної характеристики наведено в таблиці 3.2. Перехідну характеристику побудовано на рис.3.6. Крива α_β зображена на рис.3.7.

Таблиця 3.2 – Дані розрахунку перехідної характеристики

№	Величина	1	2	3	4	5	6	7
1	$B_\delta(\Gamma c)$	1000	2000	3000	3200	4500	4700	5000
2	$F_\delta(A)$	59,3	118,6	177,9	189,8	266,8	278,7	296,5
3	$B_{z\pi}(\Gamma c)$	3404	6808	10212	10892,8	15318	15998,9	17020,1
4	$H_{z\pi}(A)$	1,547	3,094	4,641	4,951	33,562	51,889	88,802
5	$F_{z\pi}(A)$	3,558	7,117	10,675	11,387	77,192	119,345	204,245
6	$B_{zc}(\Gamma c)$	3312,3	6624,6	9936,8	10599,3	14905,3	15567,7	16561,4
7	$H_{zc}\left(\frac{A}{cm}\right)$	1,505	3,011	4,516	4,817	23,038	40,283	70,456
8	$F_{zc}(A)$	1,882	3,764	5,645	6,022	28,797	50,354	88,070
9	$F_{\delta z}(A)$	64,7	129,5	194,2	207,2	372,8	448,4	588,8
10	$F_{0A}(A)$	28,2	56,3	84,5	90,1	162,2	195,1	256,2
11	$F_{0b}(A)$	46,5	92,9	139,4	148,7	267,5	321,8	422,5
12	$B_1(\Gamma c)$	458,9	960,0	1427,7	1517,3	2550,5	2954,4	3597,7
13	$B_2(\Gamma c)$	788,0	1560,8	2245,1	2371,7	3702,2	4140,9	4699,7
14	$B_{cp}(\Gamma c)$	768,5	1533,9	2234,7	2367,3	3643,2	4036,3	4566,1
15	α_β	0,768	0,767	0,745	0,740	0,810	0,859	0,913

3.7. Поперечна підмагнічувальна обмотка

47. Число витків поперечної обмотки на полюс:

$$W_{по} = \beta_{по} W_{я} = 0,3 \cdot 54 = 16,20$$

де: $\beta_{по} = 0,3$ обрано згідно §7 – 15 [1]

Приймаємо $W_{\text{по}} = 16$

48. Струм в поперечному контурі якоря з х.х.х. вихідної ступені:

$$I_2 = 3,950 \text{ А.}$$

49. Поперечний переріз проводу:

$$S_{\text{по}} = \frac{I_2}{\Delta_{\text{по}}} = \frac{3,950}{3,5} = 1,129 \text{ мм}^2.$$

де: $\Delta_{\text{по}} = 3,5 \text{ А/мм}^2$ (передчасно).

Обираємо провід марки ПЕТ - 155 діаметром $d = 1,25 \text{ мм}$, $d_{\text{із}} = 1,33 \text{ мм}$,
переріз $S_{\text{по}} = 1,227 \text{ мм}^2$.

50. Коефіцієнт заповнення середнього паза з урахуванням обмотки додаткового полюса:

$$h_3 = \frac{W_W \cdot n_{\text{ел}} \cdot d_{\text{із}}^2 + W_{\text{по}} \cdot d_{\text{із}}^2}{S_{\text{КС}} - S_{\text{ІЗ}}} = \frac{13 \cdot 2 \cdot 1,33^2 + 16 \cdot 1,33^2}{258 - 35} = 0,333 < 0,75$$

де $S_{\text{хс}} = 258 \text{ мм}^2$ - площа у світлі середнього паза (див. рис. 3.4)

$S_{\text{із}} = 258 \text{ мм}^2$ - поперечний переріз ізоляції і клина.

51. Опір поперечної обмотки при 75°C :

$$l_{\text{по}} = 2(l + 1,3\tau_{\text{по}}) = 2(11,3 + 1,3 \cdot 19,509) = 73,324 \text{ см.}$$

$$\tau_{\text{по}} = \frac{\pi}{2}(D' + h_{\text{ЗС}}) = \frac{\pi}{2}(11,1 + 1,32) = 19,509 \text{ см.}$$

$$h_{\text{ЗС}} = 1,32 \text{ см.}$$

$$R_{\text{по}} = \frac{1,24 \cdot 2 \cdot P \cdot W_{\text{по}} \cdot l_{\text{по}}}{5700 S_{\text{по}}} = \frac{1,24 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 73,324}{5700 \cdot 1,227} = 0,416 \text{ Ом.}$$

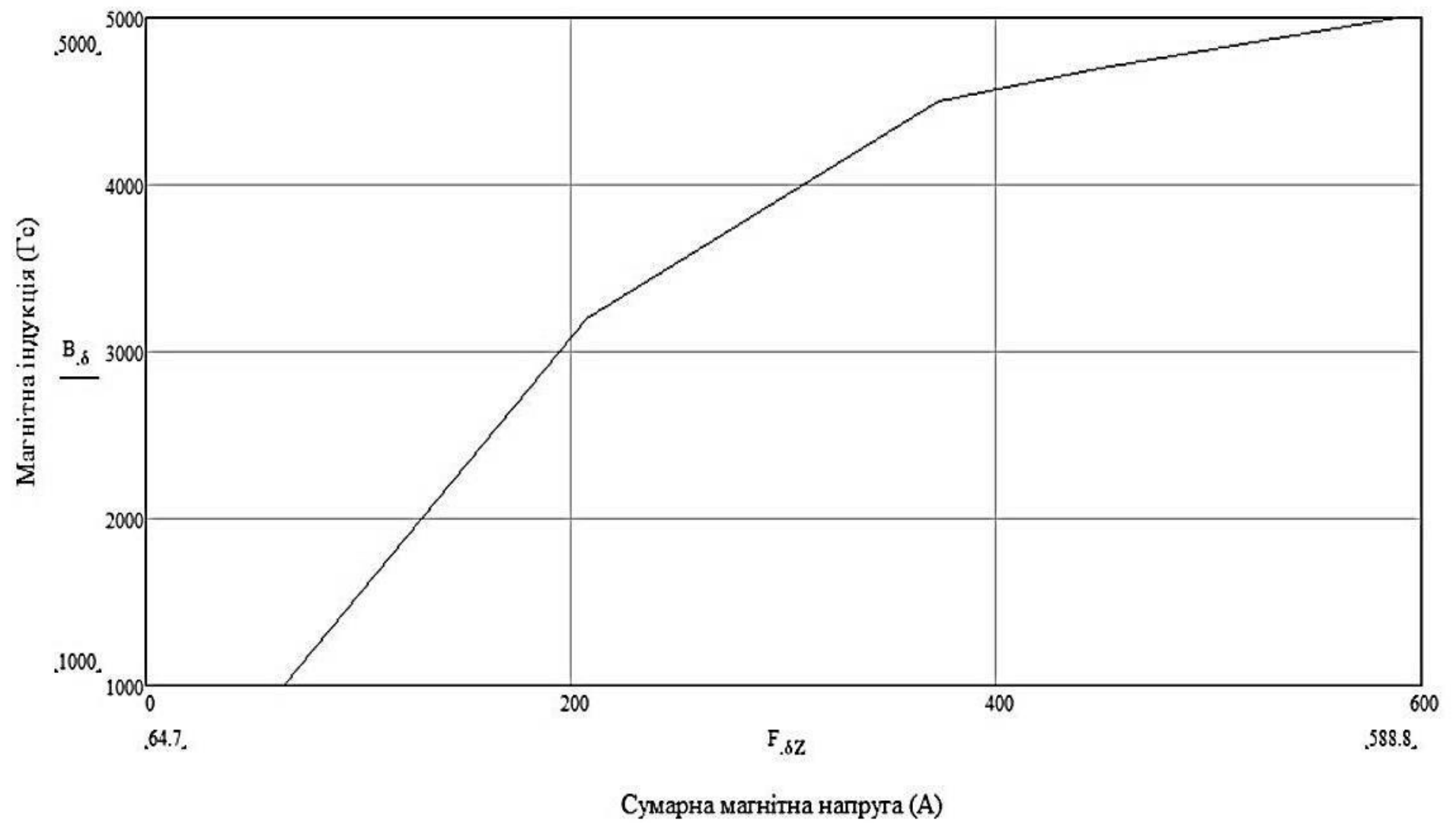


Рис.3.6 – Перехідна характеристика ЕМП

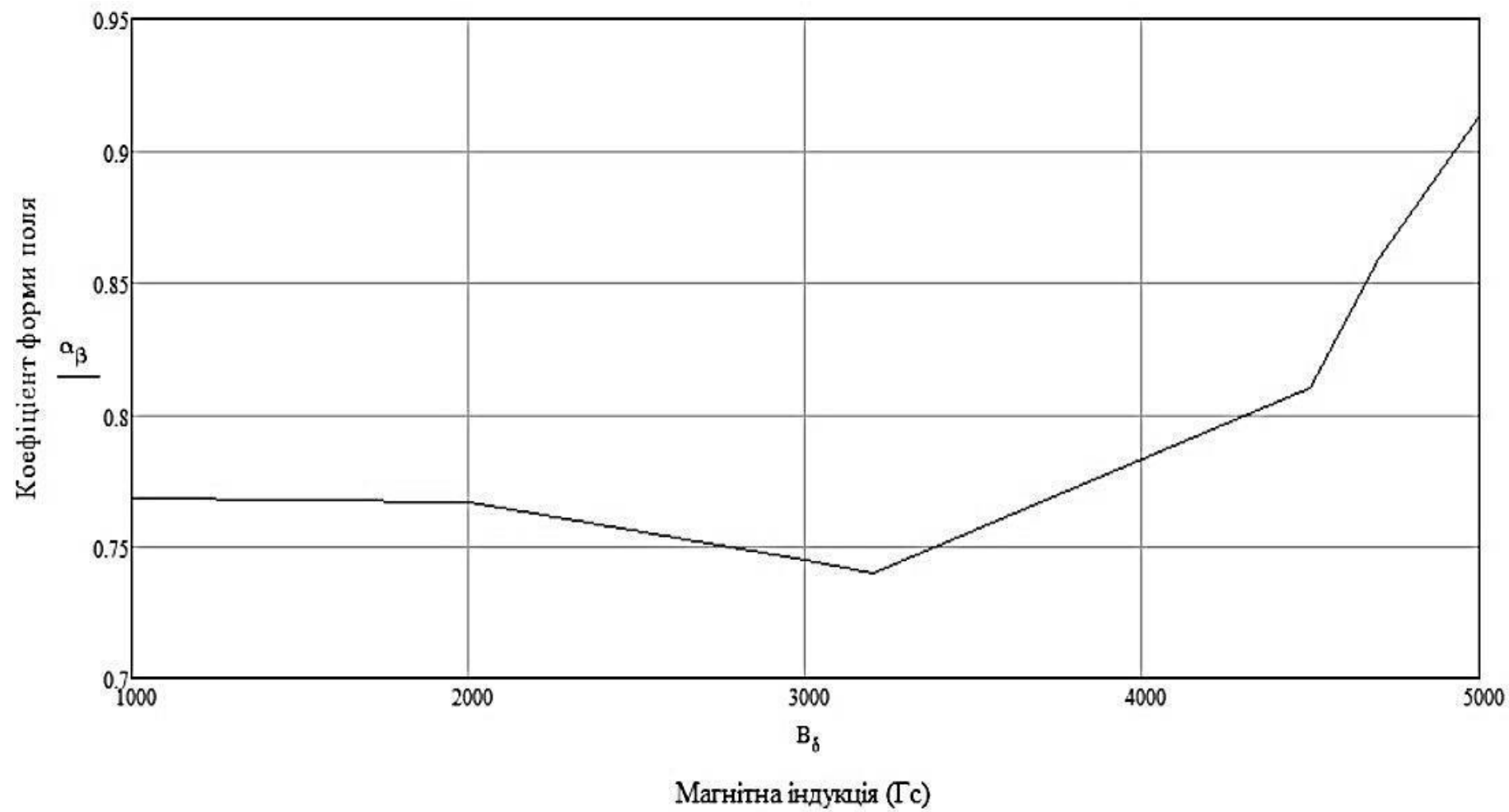


Рис.3.7 – Крива коефіцієнта форми поля

3.8. Розрахунок магнітного кола по поперечній осі.

Характеристика холостого ходу вихідної ступені.

52. Поперечний потік.

$$\Phi q = \alpha \cdot B_{\delta} \cdot \tau \cdot l_i = \alpha_i \cdot \alpha_{\beta} \cdot \sigma_q \cdot B_{\delta} \cdot \tau \cdot l_i = 0,63 \cdot 1,15 \cdot \alpha_{\beta} \cdot B_{\delta} \cdot 17,28 \cdot 11,3 = 141,4 \alpha_{\beta} \cdot B_{\delta}$$

де $\sigma_q \approx 1,15$ (по табл. 3.3.)

53. Е.Р.С. вихідної ступені:

$$E_3 = 4fW\Phi_q \cdot 10^{-8} = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot \Phi_q \cdot 10^{-8} = 43200\Phi_q \cdot 10^{-8} \text{ В.}$$

54. Намагнічуюча сила $F_{\delta z}$ повітряного проміжку та зубцевого шару якоря та статора (з табл.3.2.).

55. Магнітна індукція в спинці якоря:

$$B_{\text{я}} = \frac{\Phi_q}{2S_{\text{я}}} = \frac{\Phi_q}{2 \cdot 12,7} = 0,039\Phi_q \text{ Гс.}$$

56. Магнітна індукція в спинці статора:

$$B_c = \frac{\Phi_q}{2S_c} = \frac{\Phi_q}{2 \cdot 17,664} = 0,028\Phi_q \text{ Гс.}$$

де:

$$h_c = 0,7 \cdot h'_c + 0,3 \cdot h''_c = 0,7 \cdot 16,3 + 0,3 \cdot 17,4 = 16,63 \text{ мм.}$$

$$S_c = k_c l h_c = 0,94 \cdot 11,3 \cdot 1,62 = 17,664 \text{ см}^2.$$

57. Магнітна напруга в спинці якоря:

$$L_{\text{я}} = \frac{\pi \cdot (D - 2h_{z\text{я}} - h_{\text{я}})}{4p} \cdot \frac{1 + \alpha_i}{2} = \frac{\pi(11,1 - 2 \cdot 2,36 - 1,15)}{4} \cdot \frac{1 + 0,63}{2} = 3,28 \text{ см.}$$
$$F_{\text{я}} = \zeta_{\text{я}} \cdot H_{\text{я}} \cdot L_{\text{я}} = 3,28 \cdot \zeta_{\text{я}} \cdot H_{\text{я}}$$

де: $\zeta_{\text{я}} = f(B_{\text{я}})$ по рис.3.8

58. Магнітна напруга в спинці статора:

$$L_c = \frac{\pi \cdot (D' + 2h_{zc} + h'_c)}{4p} \cdot \frac{1 + \alpha_i}{2} = \frac{\pi(11,1 + 2 \cdot 1,25 + 1,74)}{4} \cdot \frac{1 + 0,63}{2} = 9,907 \text{ см.}$$

$$F_c = \zeta_c \cdot L_c \cdot B_c = 9,8 \cdot \zeta_c \cdot H_c$$

де: $\zeta_c = f(B_c)$ по рис.3.8

59. Повна Н.С. на полюс:

$$F_{02} = F_{\delta z} + F_{\text{я}} + F_c [\text{A}]$$

60. Струм поперечного кола якоря:

$$I_2 = \frac{F_{02}}{W_2} = \frac{F_{02}}{52,7} \text{ А.}$$

$$\text{де: } W_2 = W_{\text{я}} \frac{1 + \alpha_i + 2\beta_{\text{по}}}{2} = 54 \frac{1 + 0,63 + 2 \cdot 0,3}{2} = 60,204$$

61. Лінійне навантаження якоря в поперечному колі:

$$A_2 = A_3 \frac{I_2}{I_3} = 95,16 \frac{I_2}{15,2} = 6,250 I_2 [\text{A/см}].$$

62. Магнітна індукція в поперечній осі:

$$B_q = 2,5 A_2 \frac{1 + \beta_{\text{по}}}{1 - \alpha_i} = 2,5 A_2 \frac{1 + 0,3}{1 - 0,63} = 8,8 A_2 \text{ Гс.}$$

63. Коефіцієнт врахування потоку великого пазу:

$$\sigma_q = 1 + \frac{1 - \alpha_i}{6\alpha_i\alpha_\beta} \left(1 + \frac{2B_q}{B_\delta} \right) = 1 + \frac{1 - 0,63}{6 \cdot 0,63\alpha_\beta} \left(1 + \frac{2B_q}{B_\delta} \right) = 1 + 0,098 \frac{1 + 2 \frac{B_q}{B_\delta}}{\alpha_\beta}$$

Дані розрахунку характеристики холостого ходу вихідної ступені зводимо в таблицю 3.3. Характеристика зображена на рис.3.10.

64. Вихідна Е.Р.С. у номінальному режимі:

$$E_{3H} = U_H + I(R_{\text{я}} + R_{\text{ко}}) + 2\Delta U_{\text{щ}} = 131,5 + 15,2(0,23 + 0,182) + 2,8 = 140,57 \text{ В.}$$

де: $R_{\text{я}} = 0,23 \text{ ом}$; $R_{\text{ко}} = 0,182 \text{ ом}$; $2\Delta U_{\text{щ}} = 2,8 \text{ В.}$ (див. рис.3.9)

65. Струм поперечного кола в номінальному режимі:

$$I_{2H} = 3,950 \text{ А.}$$

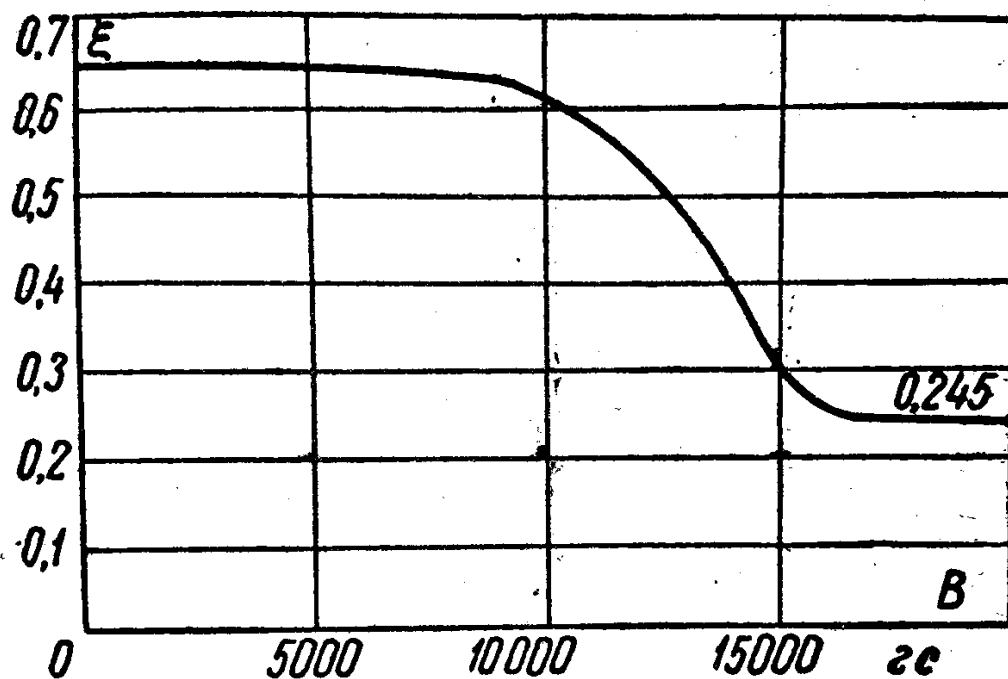


Рис.3.8 – Залежність $\zeta = f(B)$

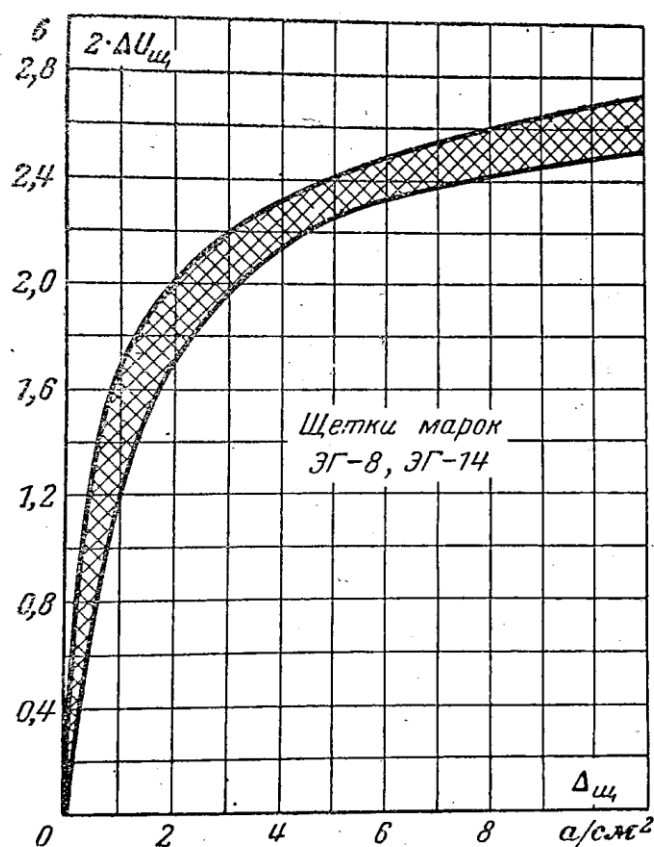


Рис.3.9 - Падіння напруги під щітками

Таблиця 3.3 - Дані розрахунку характеристики холостого ходу

№	Величина	1	2	3	4	5	6
1	$B_{\delta}(\Gamma c)$	1000	2000	3000	3200	4500	4700
2	α_B	0,768	0,768	0,743	0,741	0,816	0,850
3	σ_q	1,150	1,150	1,150	1,150	1,150	1,150
4	$\Phi_q \cdot 10^{-6} \text{Mkc}$	0,109	0,217	0,315	0,335	0,519	0,565
5	$E_3 = E_{03}(B)$	46,9	93,8	136,2	144,8	224,4	244,0
6	$B_{\pi}(\Gamma c)$	4262,2	8515,0	12363,5	13150,1	13380,1	14548,1
7	$B_C(\Gamma c)$	3075,6	6144,3	8921,3	9489,0	14704,7	15988,3
8	$H_{\pi}(A/cm)$	1,94	3,87	7,73	9,30	9,76	17,55
9	ξ_{π}	0,650	0,627	0,454	0,418	0,408	0,355
10	$F_{\pi}(A)$	4,13	7,96	11,51	12,77	13,07	20,47
11	$H_C(A/cm)$	1,40	2,79	4,04	4,31	19,62	51,60
12	ξ_c	0,650	0,627	0,454	0,418	0,408	0,355
13	$F_C(A)$	9,00	17,34	18,22	17,87	79,29	181,67
14	$F_{02}(A)$	77,88	154,79	223,95	237,81	465,20	650,55
15	$I_2(A)$	1,29	2,57	3,72	3,95	7,73	10,81
16	$A_2(A/cm)$	8,1	16,1	23,3	24,7	48,3	67,5
17	$B_q(\Gamma c)$	71,0	141,1	204,1	216,7	424,0	592,9
18	α_q	1,146	1,146	1,150	1,150	1,143	1,144

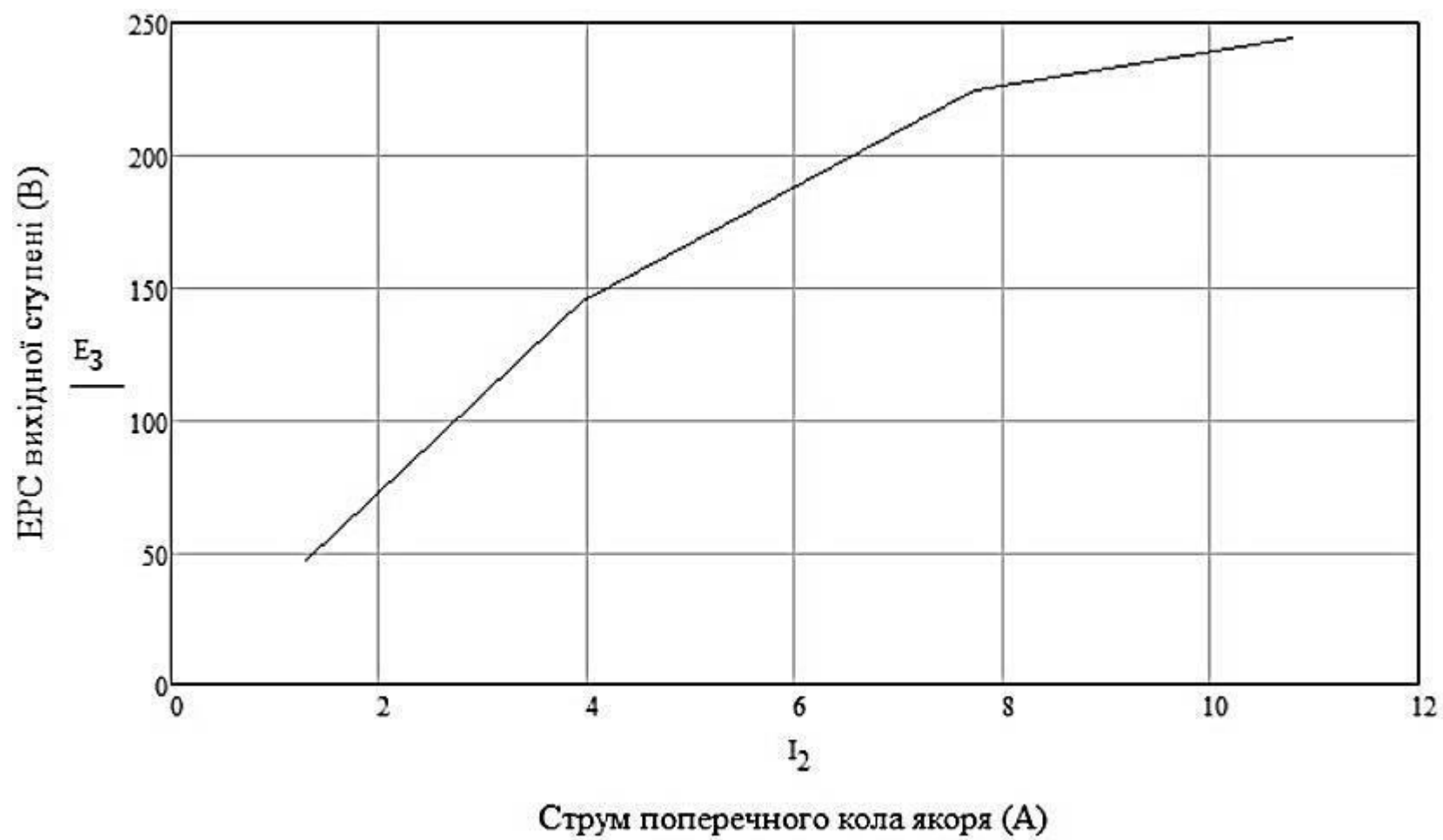


Рис.3.10 – Характеристика холостого ходу вихідної ступені

3.9. Опір обмотки вихідної ступені.

66. Опір обмотки якоря при температурі 75°C :

$$R_{\text{я}} = 0,959 \frac{N + L_{\text{ср}}}{5700 \cdot 2a^2 S_{\text{я}} n_{\text{ел}}} = 0,959 \frac{363 + 30,872}{5700 \cdot 2^2 \cdot 0,785 \cdot 2} = 0,229 \text{ Ом.}$$

де

$$L_{\text{ср}} = L + L_{\text{л}} = 11,3 + 19,572 = 30,872 \text{ см.}$$

$$L_{\text{л}} = 1,4 \cdot \tau' = 1,4 \cdot 13,980 \text{ см.}$$

$$\tau' = \frac{\pi \cdot (D' - h_{\text{пя}})}{2p} = \frac{\pi \cdot (11,1 - 2,3)}{2} = 13,980 \text{ см.}$$

Приймаємо значення $R_{\text{я}} = 0,229$

67. Опір компенсаційної обмотки, разом з обмоткою додаткових полюсів:

$$R_{\text{ко}} = \frac{0,526 \cdot 2p \cdot (W_{\text{ко}} + W'_W) L_{\text{ко}}}{5700 \cdot n_{\text{ел}} \cdot S_{\text{ко}} \cdot a_{\text{ко}}} = \frac{0,526 \cdot 2 \cdot (43 + 5) \cdot 58,692}{5700 \cdot 2 \cdot 1,368 \cdot 1^2} = 0,2 \text{ ом.}$$

де

$$L_{\text{ко}} = 2(L + L_{\text{лк}}) = 2 \cdot (11,3 + 18,046) = 58,692 \text{ см.}$$

$$\tau' = \frac{\pi \cdot (D' + h_{\text{зс}})}{4p} = \frac{\pi \cdot (11,1 + 1,32)}{4} = 9,755 \text{ см.}$$

Приймаємо значення $R_{\text{ко}} = 0,182$

3.10. Комутація по поперечній осі.

68. Питома провідність потоків розсіювання комутованої секції в поперечній осі:

λ_z - питома провідність потоків розсіювання по коронках зубців за відсутності поперечної осі додаткових полюсів:

$$\lambda_z = 0,92 \text{Lg} \frac{\pi t_1}{\alpha_{\text{я}}} = 0,92 \text{Lg} \frac{\pi \cdot 12,8}{2,5} = 1,037$$

$$\begin{aligned} \zeta &= 0,4\pi \left(\lambda_{\text{п}} \frac{h_{\beta}}{2\beta_{\text{щ}}} + \lambda_z \frac{h_{\beta}}{2\beta_{\text{щ}}} + \lambda_{\text{л}} \right) = \\ &= 0,4\pi \left(1,787 \frac{6,270}{2 \cdot 2,36} + 1,037 \frac{6,270}{2 \cdot 2,36} + 1,25 \right) = 6,280 \end{aligned}$$

69. Реактивна Е.Р.С. у номінальному режимі:

$$\begin{aligned} E_R &= 2 \cdot W_C \cdot U_{\text{я}} \cdot A_2 \cdot \zeta \cdot l_i \cdot 10^{-6} = \\ &= 2 \cdot 2,9 \cdot 34,558 \cdot 24,689 \cdot 6,280 \cdot 11,3 \cdot 10^{-6} = 0,323 \text{ В.} \end{aligned}$$

70. Е.Р.С. від зовнішнього поля комутуючої секції у поперечній осі:

$$\begin{aligned} E_B &= 2 \cdot W_C \cdot B_q \cdot l_i \cdot \zeta \cdot U_{\text{я}} \cdot 10^{-6} = \\ &= 2 \cdot 2,9 \cdot 216,7 \cdot 11,3 \cdot 6,280 \cdot 34,56 \cdot 10^{-6} = 0,451 \text{ В.} \end{aligned}$$

де $B_g = 233,5$ Гс. при $E_{\text{зН}} = 264,5$ В.

71. Комутуюча Е.Р.С.

$$E_K = E_R + E_B = 0,323 + 0,451 = 0,774 \text{ В.}$$

72. Додаткова Е.Р.С. ΔE_3 індукуюча потоком розсіювання обмотки якоря при номінальному струмі поперечної осі:

$$\Delta E_3 = E_R \left[U_{\text{п}} \frac{b_{K3}}{t_1} - \beta_{\text{щ}} \right] = 0,29 \left[3 \frac{24,794}{12,8} - 2,36 \right] = 1,11 \text{ В.}$$

Внаслідок незначної даної Е.Р.С. при подальшому розрахунку її не враховуємо в значенні вихідної Е.Р.С. E_3 .

73. Е.Р.С. вихідної ступені при одночасному форсуванні напруги та струму навантаження (по задачі $\varphi_u = \varphi_A = 1,7$)

$$E_{з\varphi} = \varphi_u U_H + \varphi_A I_H [R_{Я} + R_{к.о.}] + 2\Delta U_{щ} \\ = 1,7 \cdot 131,5 + 1,7 \cdot 15,2 \cdot [0,229 + 0,222] + 2,8 = 278,3 \text{ В.}$$

де: $2\Delta U_{щ} = 2,8 \text{ В.}$

74. Струм поперечної осі при форсуванні (див. рис. 3.7.)

$$I_{2\varphi} = 21,0 \text{ А.}$$

75. Комуруюча Е.Р.С. у форсуючому режимі.

$$E_{к\varphi} = E_K \frac{I_{2\varphi}}{I_2} = 0,774 \frac{21}{3,950} = 4,117 \text{ В.}$$

Отримане значення дозволить отримати задовільну комутацію.

3.11. Характеристика холостого ходу вхідної ступені.

76. Е.Р.С. поперечного кола у номінальному режимі:

$$E_2 = I_2 [R_{Я} + R_{по}] + 2\Delta U_{щ2} = 3,950 [0,229 + 0,416] + 2,03 = 4,29 \text{ В.}$$

де:

$$\Delta U_{щ2} = 2,03 \text{ В.}$$

$$\Delta_{щ2} = \frac{I_2}{S_{щ}} = \frac{3,950}{1,5} = 2,63 \text{ В.}$$

$$R_{по} = 0,416 \text{ Ом.}$$

77. Повздовжній потік:

$$\Phi_d = \Phi_g \frac{E_2}{E_{03}} = \frac{4,29}{140,6} \cdot 335233,1 = 13168,6 \text{ Мкс.}$$

$$\frac{\Phi_g}{\Phi_d} = \frac{335233,1}{10219,6} = 32,8 > 20 - \text{задовольняє умові обмеження}$$

78. Магнітна індукція у повітряному проміжку:

$$B_{\delta d} = \frac{\Phi_d}{b_d \cdot l_i} = \frac{10219,6}{12,14 \cdot 11,3} = 74,5 \text{ Гс.}$$

Розрахункова полюсна дуга для Φ_g

$$\delta_{iw} = h_{\delta w} \cdot \delta_w = 1,2 \cdot 0,75 = 0,9 \text{ мм.}$$

$$b_{id} = b_i + b_w \frac{\delta_i}{\delta_{iw}} = 10,88 + 1,56 \frac{1,45 \cdot 0,5}{1,2 \cdot 0,75} = 12,14 \text{ см.}$$

79. Магнітна напруга у повітряному проміжку:

$$F_{\delta d} = 0,0587 \cdot 74,5 = 4,375 \text{ А.}$$

80. Магнітна індукція в зубцях якоря:

$$B_{ZЯ} = 3,4 B_{\delta d} = 3,4 \cdot 74,5 = 253,4 \text{ Гс.}$$

81. Магнітна напруга зубцевого шару якоря:

$$F_{ZЯ} = 2,3 H_{ZЯ} = 2,3 \cdot 0,115 = 0,265 \text{ А.}$$

$$\text{для } B_{ZЯ} = 293,4 \text{ Гс.} \quad H_{ZЯ} = 0,115 \frac{\text{А}}{\text{см.}}$$

82. Магнітна індукція в зубцях статора:

$$B_{ZC} = 3,495 B_{\delta d} = 3,495 \cdot 74,5 = 260,5 \text{ Гс.}$$

83. Магнітна напруга зубцевого шару статора.

$$F_{ZC} = 1,25 H_{ZC} = 1,25 \cdot 0,118 = 0,148 \text{ А.}$$

$$\text{для } B_{ZC} = 260,5 \text{ Гс.} \quad H_{ZC} = 0,118 \frac{\text{А}}{\text{см.}}$$

84. Магнітна індукція у спинці якоря:

$$B_{я} = \frac{\Phi_d}{24,4} = \frac{10219,6}{24,4} = 418,8 \text{ Гс.}$$

85. Магнітна напруга у спинці якоря:

$$F_{\text{я}} = \zeta \cdot L_{\text{я}} \cdot H_{\text{я}} = 1 \cdot 3,283 \cdot 0,190 = 0,6 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

$$\text{для } B_{\text{я}} = 418,8 \text{ Гс.} \quad H_{\text{я}} = 0,190 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

86. Магнітна індукція у спинці статора:

$$S_{Cd} = h_c h_{Cd} \cdot l = 0,94 \cdot 0,67 \cdot 11,3 = 7,12 \text{ см}^2.$$

де: $h_{cd} = 6,7 \text{ мм}$ (див. рис. 3.4)

$$B_c = \frac{\Phi_d}{2 \cdot S_d} = \frac{\Phi_d}{2 \cdot 7,12} = \frac{10219,6}{14,23} = 718,0 \text{ Гс}.$$

87. Магнітна напруга у спинці статора:

$$L_{Cd} = \frac{1}{2} b_{ng} = \frac{1}{2} \cdot 5,6 = 2,8 \text{ см}.$$

для

$$B_c = 718,0 \text{ Гс; } H_c = 0,326 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

$$F_c = L_d \cdot H_c = 2,8 \cdot 0,326 = 0,90 \text{ А}.$$

88. Сумарна магнітна напруга для повздовжнього потоку:

$$F_{od} = F_{\delta d} + F_{z\text{я}} + F_{zc} + F_{\text{я}} + F_c = 4,375 + 0,265 + 0,148 + 0,9 + 0,6 = 6,263 \text{ А}.$$

89. Струм керування:

$$I_y = I_{01} = \frac{F_{od}}{W_1} = \frac{6,263}{725} = 8,702 \text{ А.} \quad W_1 = 725 \text{ на полюс}$$

Інші розрахунки зводимо у таблицю 3.4. Характеристика холостого ходу вхідної ступені зображено на рис.3.12.

Таблица 3.4 – Дані розрахунку характеристики х.х. вхідної ступені.

№	Величина	1	2	3	4	5	6
1	I_2, A	1,294	2,571	3,720	3,950	7,727	10,806
2	$\Delta_{\text{ш2}} (A/\text{см})$	0,862	1,714	2,480	2,633	5,151	7,204
3	$2_{\Delta} U_{\text{ш2}} (B)$	1,199	1,770	2,005	2,034	2,290	2,517
4	E_2, B	1,937	3,235	4,125	4,285	6,694	8,676
5	$\Phi_d, \text{Мкс}$	4482,9	7489,3	9549,7	9920,0	15495,3	20084,3
6	$B_{\delta a}, \text{Гс}$	32,691	54,614	69,638	72,339	112,995	146,458
7	$F_{\delta d}, A$	1,919	3,206	4,088	4,246	6,633	8,597
8	$B_{ZЯ}, \text{Гс}$	111,148	185,686	236,770	245,952	384,183	497,958
9	$H_{ZЯ}, A/\text{см}$	0,051	0,084	0,108	0,112	0,175	0,226
10	$B_{ZC}, \text{Гс}$	0,116	0,194	0,248	0,257	0,402	0,521
11	$H_{ZC}, A/\text{см}$	114,253	190,875	243,386	252,824	394,918	511,87
12	$F_{ZЯ}, A$	0,052	0,087	0,111	0,115	0,179	0,233
13	F_{ZC}, A	0,065	0,108	0,138	0,144	0,224	0,291
14	$B_{Я}, \text{Гс}$	183,727	306,939	391,381	406,559	635,055	823,125
15	$H_{Я}, A/\text{см}$	0,084	0,140	0,178	0,185	0,289	0,374
16	$B_C, \text{Гс}$	0,274	0,458	0,583	0,606	0,947	1,227
17	$H_C, A/\text{см}$	314,95	526,176	670,933	696,951	1088,65	1411,05
18	$F_{Я}, A$	0,143	0,239	0,305	0,317	0,495	0,641
19	F_C, A	0,394	0,658	0,839	0,871	1,361	1,764
20	$F_{od} = F_{01}, A$	2,768	4,624	5,896	6,124	9,566	12,399
21	$I_y = I_{01}, \text{мА}$	3,817	6,377	8,132	8,447	13,195	17,102

3.12. Обмотка керування.

90. Розмагнічуюча дія комутаційних секцій поперечної осі при номінальному навантаженні:

$$F_{KC} = \beta_{\text{щ}} \cdot W_c \cdot i_K = 2,36 \cdot 2,9 \cdot 0,63 = 3,9 \text{ А.}$$

де: додатковий струм в комутаційній секції:

$$i_K = 0,145 \frac{l_K}{L_R} \sqrt[3]{T_K \cdot T_R^2} = 0,145 \frac{0,774}{0,239 \cdot 10^{-4}} \sqrt[3]{0,29 \cdot 10^{-3} (0,093 \cdot 10^{-3})^2} = 0,63 \text{ А.}$$

Результуюча індуктивність комутуючої секції:

$$L_R = 2\beta_{\text{щ}} W_c^2 \zeta l_i \cdot 10^{-8} = 2 \cdot 2,36 \cdot 2,9^2 \cdot 6,280 \cdot 11,3 \cdot 10^{-8} = 0,239 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

$$T_K = \frac{b_{\text{щ}}}{U_K} = \frac{7,8 \cdot 10^{-3}}{27,33} = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ сек.}$$

$$U_K = \frac{\pi D_K n_N}{60} = \frac{\pi \cdot 87 \cdot 10^{-3} \cdot 6000}{60} = 27,33 \frac{\text{м}}{\text{сек.}}$$

$$T_R = \frac{L_R}{R_{\text{щк}}} = \frac{0,239 \cdot 10^{-4}}{0,257} = 0,093 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

$$R_{\text{щк}} = \frac{\Delta U_{\text{щ2}}}{I_2} = \frac{1,05}{3,950} = 0,257 \text{ Ом.}$$

$$\Delta U_{\text{щ2}} = \frac{2,1}{2} = 1,05 \text{ В.}$$

91. Розмагнічуюча дія втрат в сталі

При

$$\beta_{\text{по}} = 0,3 \frac{B_{\delta 1}}{B_{\delta}} = 0,761 \text{ (по рис. 3.11)}$$

$$P_{CT} = P_{CTZ} + P_{CTЯ} = 23,6 + 20,7 = 44,3 \text{ Вт при } E_3 = 124 \text{ В.}$$

$$P_{CT1} = 0,5 P_{CT} \left(\frac{B_{\delta 1}}{B_{\delta}} \right)^2 = 0,5 \cdot 44,3 \cdot 0,761^2 = 12,8 \text{ Вт.}$$

$$F_{ПС} = 0,5 \frac{P_{CT1}}{E_3} W_{я} = 0,5 \frac{12,83 \cdot 54}{140,6} = 2,46 \text{ А.}$$

92. Намагнічуюча сила обмотки керування при номінальному навантаженні та повній компенсації ($k_K = 1$):

$$F_y = F_1 = F_{01} + F_{KE} + F_{ПС} = 6,1 + 3,9 + 2,46 = 12,6 \text{ А.}$$

Приймаємо значення $F_y = 71 \text{ А.}$

93. Найбільша допустима щільність струму в обмотці керування:

$$\Delta_y \leq \frac{P_H}{k_y k_R \rho^2 p F_y l_{wy}} = \frac{2000 \cdot 4600}{4504,5 \cdot 2 \cdot 71 \cdot 73,3} = 0,196 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

де

$$k_y = \frac{P_{\text{ном}}}{P_y} = \frac{2000}{0,444} = 4504,5 - \text{номінальний коефіцієнт підсилення}$$

при $k_r = 1$; $P_y = 0,444 \text{ Вт.}$

$p = 1/4600$ при 75°C для мідного проводу.
 $L_{\text{ку}} = L_{\text{по}} = 73,3 \text{ см}$ — середня довжина витка обмотки керування
 приблизно рівна середній довжині витка поперечної підмагнічуючої обмотки.

94. Число витків О.К.:

$$W_y = W_1 = 492 \text{ витків на полюс.}$$

95. Струм керування:

$$I_y = \frac{F_y}{W_1} = \frac{71}{492} = 0,144 \text{ А.}$$

96. Переріз провідника обмотки керування:

$$S_y = \frac{I_y}{\Delta_y} = \frac{0,144}{0,196} = 0,736 \text{ мм}^2.$$

Згідно обраної геометрії пакету статора (рис.1) площа великого пазу у світлі складає $S_{\text{бп}} = 1100 \text{ мм}^2$. Така площа дозволяє укласти дві обмотки керування по дві катушки на полюс проводом марки ПЕТ-2 ($d_{\text{із}} = 1,33$) з поперечним перерізом $S_y = 0,0227 \text{ мм}^2$.

Тоді площа, займаюча чотирма катушками обмотки керування з компенсаційною обмоткою, складе:

$$\frac{4W_y d_{\text{із}}^2 + N_{\text{кб}} n d_{\text{із}}^2}{k_3} = \frac{4 \cdot 492 \cdot 0,133^2 + 28,67 \cdot 4 \cdot 1,405^2}{0,75} = 348,25 \text{ мм}^2.$$

Різниця, рівна $1100 - 348,25 = 751,753 \text{ мм}^2$, залишиться для ізоляції пазу, клина та вентиляційного каналу.

97. Дійсна щільність струму обмотки керування:

$$\Delta_y = \frac{I_y}{S_y} = \frac{0,144}{0,027} = 5,345 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

98. Опір обмотки керування при 75°C :

$$r_y = \frac{2pW_y L_{wy}}{4600S_y} = \frac{2 \cdot 492 \cdot 73}{4600 \cdot 0,027} = 580,9 \text{ Ом}.$$

99. Напруга на обмотці керування:

$$U_y = I_y \cdot r_y = 0,144 \cdot 581 = 83,8 \text{ В}.$$

100. Втрати в обмотці керування:

$$P_y = U_y I_y = 83,8 \cdot 0,144 = 12,098 \text{ Вт}.$$

101. Коефіцієнт підсилення за потужністю:

$$k_y = \frac{P_{\text{НОМ}}}{P_y} = \frac{2000}{12,098} = 165,3$$

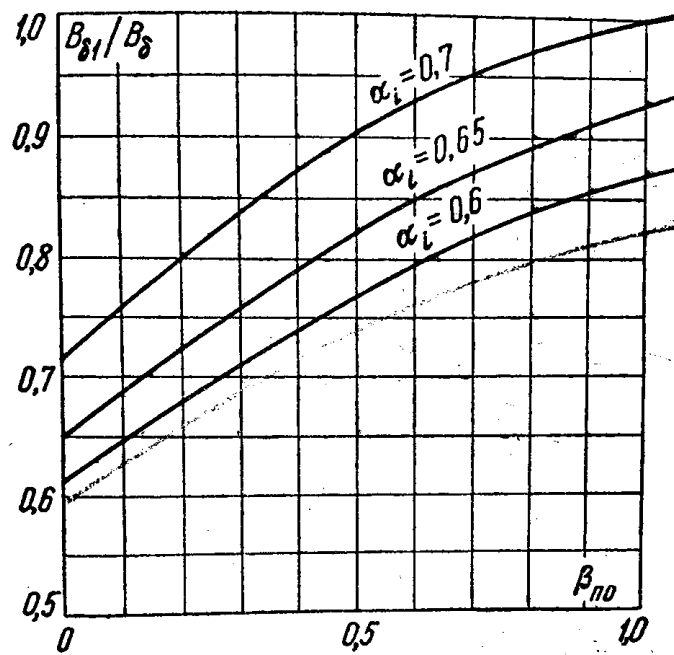


Рис.3.11 - Відносне значення амплітуди першої гармоніки магнітної індукції поперечного поля

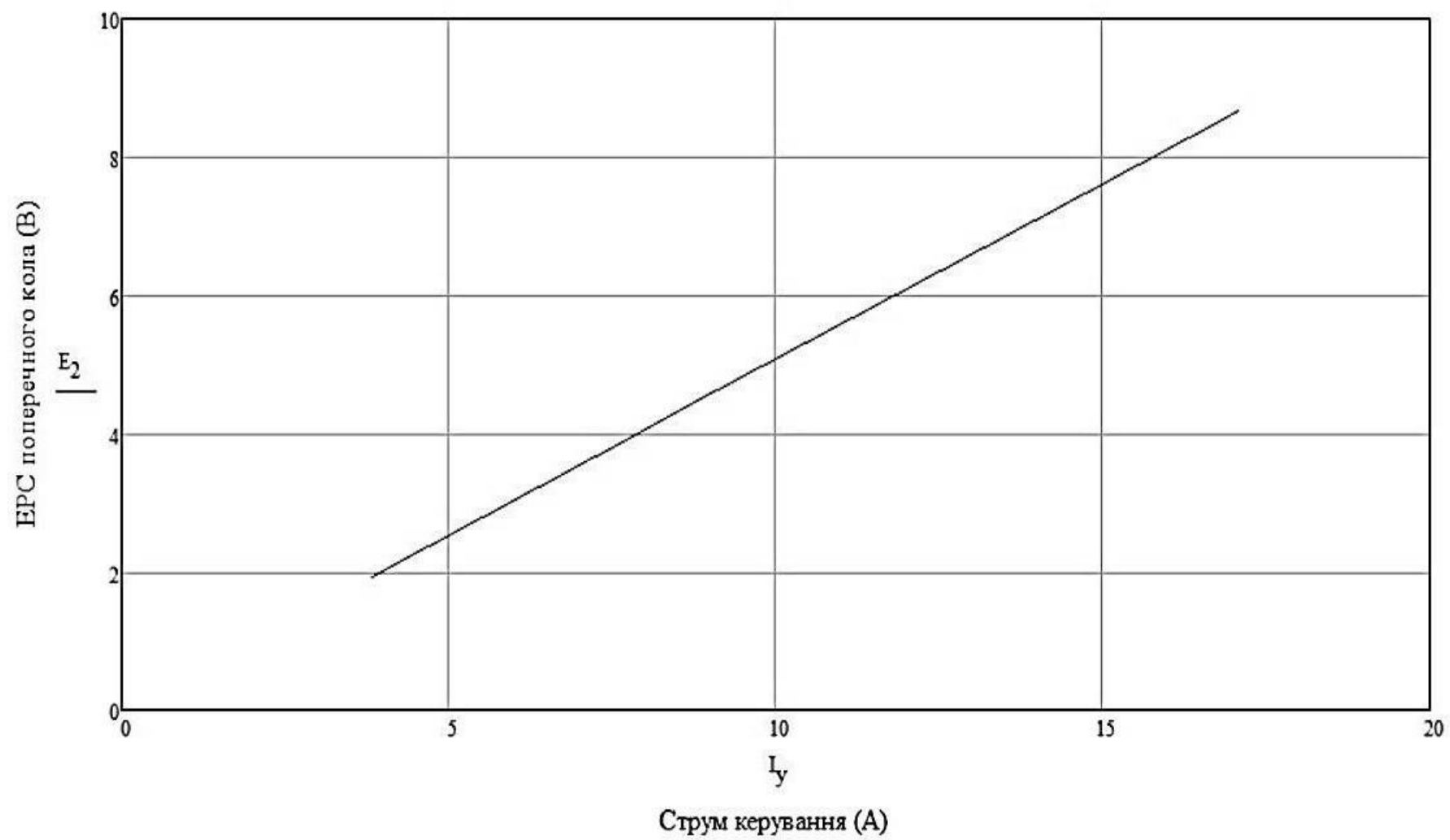


Рис.3.12 – Характеристика холостого ходу вхідної ступені

3.13. Результируюча характеристика холостого ходу.

102. Опір щіткового контакту:

$$R_{\text{щк}} = \frac{\Delta U_{\text{щ2}}}{I_2} = \frac{0,395}{3,950} = 1 \text{ Ом.}$$

103. Умовна постійна часу комутуючої секції:

$$T_R = \frac{L_R}{R_{\text{щк}}} = \frac{0,02386 \cdot 10^{-3}}{0,0886} = 0,26925 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

де: $L_R = 0,00002386 \text{ Гн.}$

104. Комутуюча е.р.с.:

$$e_K = e_{\text{кн}} \frac{I_2}{I_{2H}} = 1,5 \frac{3,950}{7,4} = 0,8 \text{ В.}$$

где: $e_{\text{кн}} = 1,5 \text{ В (з п.3.10.)}$

105. Додатковий струм в комутуючій секції:

$$i_K = 0,145 \frac{e_K}{L_R} \sqrt[3]{T_R T_K^2} = 0,145 \cdot \frac{0,8}{2,386 \cdot 10^{-5}} \cdot \sqrt[3]{0,00028538 \cdot 0,00026925} = 1,29 \text{ А.}$$

де: $T_K = 0,00028538 \text{ сек. (з п. 3.12.)}$

106. Намагнічуюча сила комутуючих секцій:

$$F_{\text{кс}} = \beta_{\text{щ}} W_c i_K = 2,36 \cdot 2,9 \cdot 1,29 = 8,143$$

де: $\beta_{\text{щ}} = 2,36, W_c = 2,9 \cdot 10^7.$

Намагнічуюча сила дії втрат у сталі:

$$F_{\text{ПС}} = F_{\text{Псн}} \frac{E_{03}}{E_{3H}} = 2,46 \cdot \frac{140,8}{140,6} = 2,464 \text{ А.}$$

108. Намагнічуюча сила обмотки керування на один полюс при холостому ході ЕМП:

$$F_y = F_{01} + F_{\text{кк}} + F_{\text{пс}} = 2,464 + 6,1 + 8,16 = 16,737$$

109. Струм керування:

$$I_y = \frac{F_y}{W_y} = \frac{16,731}{492} = 0,034 \text{ А.}$$

де: $W_y = 492$ (із. п. 3.12)

Дані розрахунку результуючої характеристики наведені в таблиці 3.5, характеристика побудована на рис.3.13.

Таблиця 3.5 – Дані розрахунку результуючої характеристики х.х.

№	Величина	1	2	3	4	5	6
1	$E_{03}(\text{В})$	46,940	93,77	136,15	144,82	224,4	244,01
2	$R_{\text{щк}}(\text{Ом})$	0,464	0,344	0,270	0,257	0,148	0,116
3	$T_R \cdot 10^3(\text{Ом})$	0,051	0,069	0,089	0,093	0,161	0,205
4	$e_{\text{к}}(\text{В})$	0,254	0,504	0,729	0,774	1,515	2,118
5	$i_{\text{к}}(\text{А})$	0,140	0,340	0,580	0,634	1,794	2,945
6	$F_{\text{кк}}(\text{А})$	0,885	2,145	3,653	3,999	11,30	18,564
7	$F_{\text{пс}}(\text{А})$	0,823	1,644	2,386	2,538	3,934	4,277
8	$F_y = F_1(\text{А})$	4,475	8,412	11,935	12,662	24,80	35,241
9	$I_y = I_1(\text{мА})$	0,009	0,017	0,024	0,026	0,050	0,072

110. Струм керування I_{oy} при Е.Р.С. холостого ходу, рівний номінальній напрузі $E_{03} = 144,8 \text{ В.}$:

$$I_{oy} = 25,7 \text{ мА.}$$

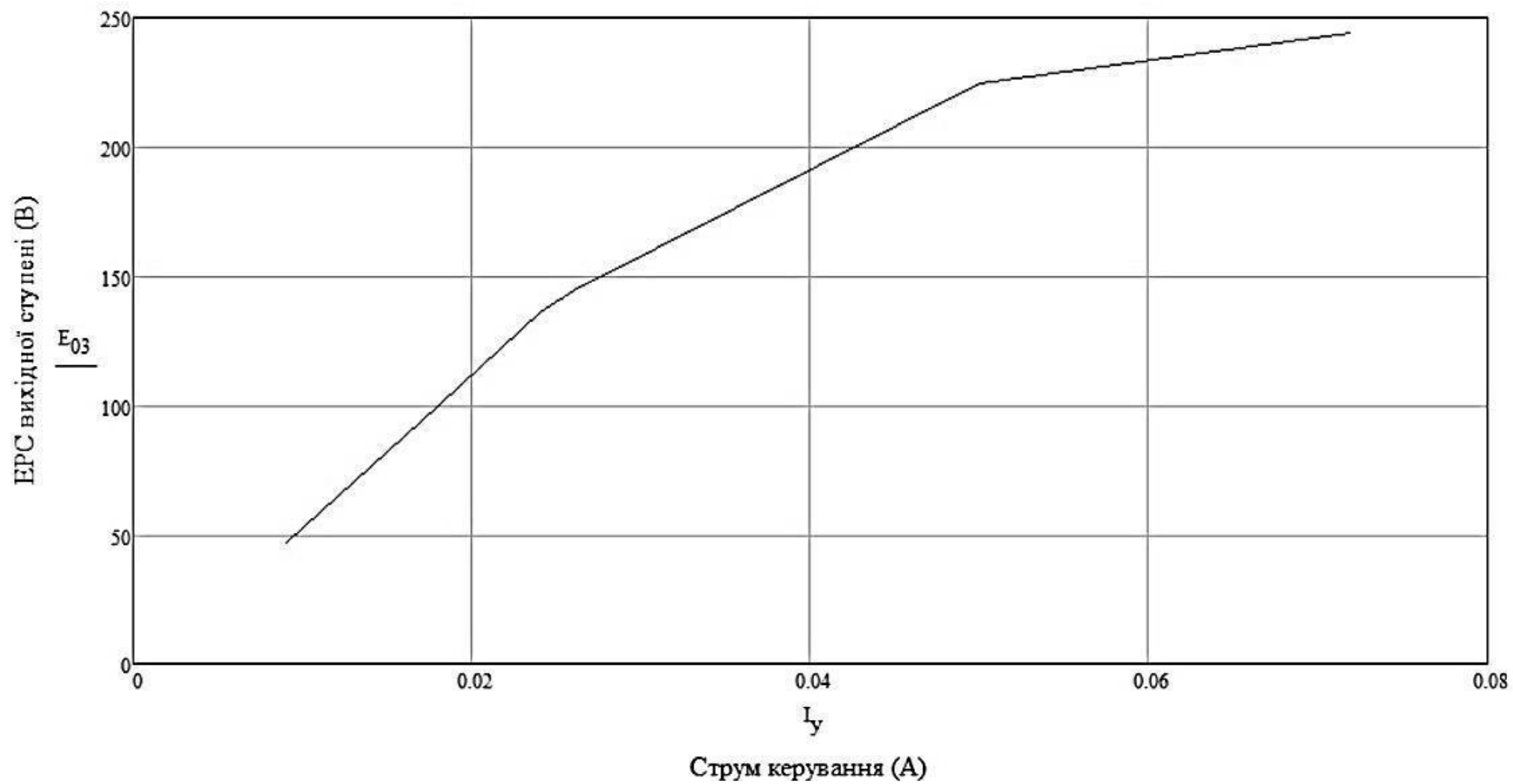


Рис.3.13– Результуюча характеристика холостого ходу

3.14. Розрахунок степені компенсації. Зовнішня характеристика.

111. Опір намагнічування по повздовжній осі:

$$R_{ad} = 4fWW_y \frac{\lambda_{\delta d}}{k_{\mu d}} = 4 \cdot 100 \cdot 108 \cdot 492 \frac{23,2367 \cdot 10^{-6}}{1,442} = 342,438 \text{ Ом.}$$

де

$$\lambda_{\delta d} = \frac{\mu_0 b_{id} l_i}{\delta_i} = \frac{1,2560 \cdot 10^{-8} \cdot 12,136 \cdot 11,3}{0,074} = 23,2367 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

$$\mu_0 = 1,2560 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Гн}}{\text{см.}}$$

$$b_{id} = 12,136 \text{ см (див. п. 3.8.)}$$

$$f = \frac{pn_u}{60} = \frac{1 \cdot 6000}{60} = 100 \text{ Гц.}$$

$$\delta_i = k_{\delta} \delta = 1,46 \cdot 0,05 = 0,074 \text{ см (див.п. 3.4.)}$$

$$k_{\mu d} = \frac{F_{01}}{F_{\delta}} = \frac{7,02}{4,71} = 1,49$$

За параметрами характеристики холостого ходу

$$R_{ad} = \frac{E_{02}}{I_y} = \frac{4,75}{0,01426} = 332,9 \text{ Ом.}$$

112. Опір намагнічування по поперечній осі:

$$R_{aq} = 4fWW_2 \frac{\lambda_{\delta q}}{k_{\mu q}} = 4 \cdot 100 \cdot 108 \cdot 60,204 \cdot \frac{17,7539 \cdot 10^{-6}}{1,323} = 34,9 \text{ Ом.}$$

де:

$$\lambda_{\delta q} = \frac{\mu_0 \alpha \tau l_i}{\delta_i} = \frac{1,258 \cdot 10^{-8} \cdot 0,537 \cdot 172,788 \cdot 11,3}{0,074} = 17,7952 \cdot 10^{-6} \text{ Гн;}$$

$$\alpha = \alpha_i \alpha_B \sigma_q = 0,63 \cdot 0,741 \cdot 1,150 = 0,537$$

$$k_{\mu q} = \frac{F_{02}}{F_{\delta}} = \frac{248,5}{187,84} = 1,323 \text{ см.}$$

За параметрами характеристики холостого ходу

$$R_{aq} = \frac{E_{03}}{I_2} = \frac{140,4}{4,13} = 34 \text{ см.}$$

113. Еквівалентний опір поперечного кола:

$$\Sigma R_2 = R_2 + R_{\rho Я_2} = 1,08492 + 1,15195 = 2,2368 \text{ Ом.}$$

де:

$$R_2 = R_{Я} + R_{ПО} + \frac{2\Delta U_{щ2}}{I_2} = 0,229 + 0,416 + \frac{2,03}{4,13} = 1,084 \text{ Ом.}$$

$$R_{\rho Я_2} = R_{ad} \frac{W_{\rho Я_2}}{W_y} = 342 \frac{1,65506}{492} = 1,15195 \text{ Ом.}$$

$$W_{\rho Я_2} = \frac{F_{\rho Я_2}}{I_2} = \frac{6,538}{3,95} = 1,655$$

$$F_{\rho Я_2} = F_{КС} + F_{ПС} = 2,464 + 3,9 = 6,538 \text{ А (див. табл. 3.5.)}$$

114. Результируючий опір намагнічування:

$$R_a = \frac{R_{ad} R_{aq}}{\Sigma R_2} = \frac{342 \cdot 34,9}{2,23687} = 5335,94 \text{ Ом.}$$

За параметрами характеристики холостого ходу (рис.3.12)

$$R_{\alpha} = \frac{E_{03}}{I_y} = \frac{140,4}{14,268 \cdot 10^{-3}} = 9840,2 \text{ Ом.}$$

115. Рівняння зовнішньої характеристики ЕМП може бути представлено прямою лінією:

$$U_{03} = E_{03} - I_3 \Sigma R_3 = U_{03} - \Delta U_3,$$

де $U_{03} = E_{03}$ – напруга при холостому ході; його значення залежить від струму керування I_y ;

$\Delta U_3 = I_3 \sum R_3$ - зміна напруги при навантаженні; його значення залежить від еквівалентного внутрішнього опору, котрий визначається значеннями k_K або Δk_K .

Розрахуємо k_K для трьох випадків зміни напруги ΔU_3 ;

1. $\Delta U_3 = 30\% U_H = 0,3 \cdot 131,5 = 39,45 \text{ В}$

2. $\Delta U_3 = I_H R_3 = 15,2 \cdot 0,546 = 8,30 \text{ В}$

3. $\Delta U_3 = 0 \text{ В}$

а) Еквівалентний внутрішній опір кола якоря вихідного кола

$$\sum R_3 = \frac{\Delta U_3}{I_H} = \frac{39,45}{15,2} = 2,59 \text{ Ом.}$$

б) Еквівалентний опір реакції якоря вихідного кола ЕМП

$$R_{ЯК} = \sum R_3 - R_3 = 2,59 - 0,587 = 2,003 \text{ Ом.}$$

Де

$$R_3 = R_{я} + R_{ко} + R_{щз} = 0,229 + 0,222 + 0,136 = 0,587 \text{ Ом.}$$

$$R_{щз} = \frac{2\Delta U_{щ}}{I_H} = \frac{2,1}{15,2} = 0,136 \text{ Ом.}$$

в) Степінь недокомпенсації

$$\Delta k_K = -2 \frac{R_{ЯК} W_y}{R_{\alpha} W_{я}} = -2 \frac{2,05 \cdot 492}{5336 \cdot 54} = -7 \cdot 10^{-3}$$

г) Степінь компенсації

$$k_K = 1 + \Delta k_K = 1 - 0,00582 = 0,99418$$

д) Степінь шунтування

$$\Delta k_{\text{ш}} = \frac{k_T - k_K}{k_T} = \frac{1,241 - 0,99418}{0,99418} = 0,24851$$

е) Коефіцієнт шунтування

$$k_{\text{ш}} = 1 - \Delta k_{\text{ш}} = 1 - 0,24851 = 0,75$$

є) Опір шунтуючого реостата

$$R_{\text{шк}} = R_{\text{ко}} \frac{k_{\text{ш}}}{\Delta k_{\text{ш}}} = 0,182 \frac{0,75}{0,24851} = 0,55$$

ж) Струм в шунтуючому реостаті

$$I_{\text{шк}} = \Delta k_{\text{ш}} I_H = 0,24851 \cdot 15,2 = 3,78 \text{ A.}$$

Інші розрахунки наведені в таблиці 3.6. Зовнішні характеристики побудовані на рис.3.14.

Таблиця 3.6 – Дані розрахунку зовнішньої характеристики.

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

3.15. Втрати та К.К.Д. при номінальному навантаженні

116. Електричні втрати по повздовжньому ланцюгу якоря

$$P_{\text{ЕЛ}(3)} = I_H^2(R_{\text{Я}} + R_{\text{КО}}) + 2\Delta U_{\text{щ}} I_H = 15,2^2(0,23 + 0,182) + 15,2 \cdot 2,7 = \\ = 136,5 \text{ Вт.}$$

де

$$2\Delta U_{\text{щ}} = 2,7 \text{ В при } \Delta_{\text{щ}} = \frac{I_H}{S_{\text{щ}}} = \frac{15,2}{1,505} = 10,1 \text{ А/см}^2. \text{ (див. рис. 3.8)}$$

117. Електричні втрати в поперечному ланцюгу якоря

$$P_{\text{ЕЛ}(2)} = I_2^2(R_{\text{Я}} + R_{\text{По}}) + 2\Delta U_{\text{щ}2} I_2 = 3,950^2(0,23 + 0,416) + 3,95 \cdot 2 = 16,9 \text{ Вт.}$$

де $2\Delta U_{\text{щ}2} = 2,0 \text{ В.}$

118. Вага зубців якоря

$$G_{\text{ЗЯ}} = \gamma[\pi(D - h_{\text{ЗЯ}})h_{\text{ЗЯ}} - Z_{\text{Я}}S_{\text{ПЯ}}]k_{\text{СТ}}l \cdot 10^{-3} = 7,8[\pi(11,0 - 2,3) \cdot 2,3 - 27 \cdot 1,3409] \\ \cdot 0,94 \cdot 11,3 \cdot 10^{-3} = 2,3 \text{ Кг.}$$

де $\gamma = 7,8 \text{ Г/см}^3$ - питома вага електротехнічної сталі.

119. Вага спинки якоря

$$G_{\text{Я}} = \gamma[\pi(d_b + h_{\text{Я}})]h_{\text{Я}}k_{\text{СТ}}l \cdot 10^{-3} = \\ = 7,8[\pi(3 + 1,2)] \cdot 1,2 \cdot 0,94 \cdot 11,3 \cdot 10^{-3} = 1,54 \text{ Кг.}$$

120. Основні втрати в сталі зубців якоря

$$P_{\text{СТЗ}} = k_{\text{дод}} P_{10/50} \left(\frac{\alpha_B B_{\text{ЗЯ}}}{15000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{\text{ЗЯ}} = 4 \cdot 3,6 \cdot \left(\frac{0,743 \cdot 10892,8}{15000} \right)^2 \left(\frac{100}{50} \right)^{1,3} \cdot 2,3 = 23,6 \text{ Вт.}$$

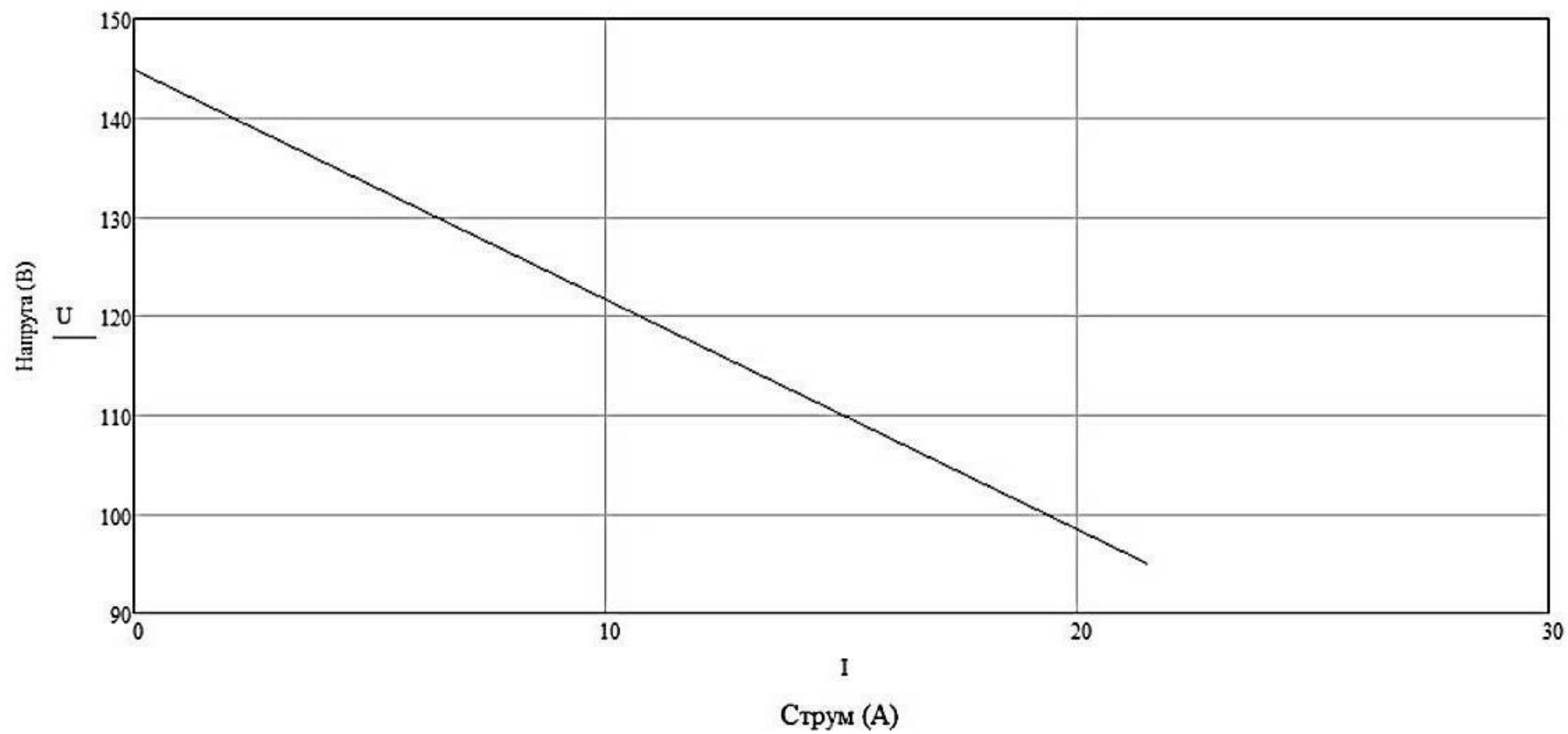


Рис.3.14 – Зовнішня характеристика ЕМП

де $k_{\text{дод}} = 4$ коефіцієнт збільшення втрат для зубцевого шару;

$\alpha_B = 0,743$ з таблиці 3.3.

$P_{10/50} = 3,6$ В/кг — для сталі Е-11 товщиною 0,5 мм (ДСТУ - 80258)

121. Основні втрати в спинці якоря

$$P_{\text{СТЯ}} = k_{\text{дод}} p_{10/50} \left(\frac{\alpha_B B_{\text{Я}}}{15000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{\text{Я}} = 3,6 \cdot 3,6 \cdot \left(\frac{0,743 \cdot 12363}{15000} \right)^2 \left(\frac{100}{50} \right)^{1,3} \cdot 1,54 = 20,7 \text{ Вт.}$$

де $k_{\text{дод}} = 3,6$ - коефіцієнт збільшення втрат для спинки якоря.

122. Пульсаційні втрати

а) в зубцях якоря

$$P_{\text{ПУЛ.Я}} = 0,14 \left[\frac{Z_{\text{Е}} n_{\text{H}} \alpha_B}{10000} \cdot \frac{B_{\text{ПУЛ.Я}}}{1000} \right]^2 \cdot G_{\text{ЗЯ}} \\ = 0,14 \left[\frac{32 \cdot 6000 \cdot 0,743}{1,5 \cdot 10^7} \cdot \frac{696,3}{1,5 \cdot 10^7} \right]^2 \cdot 2,3 = 14,047 \text{ Гс.}$$

$$B_{\text{ПУЛ.,}} = \frac{\gamma_C \delta}{2t_1} B_{\text{ЗЯ}} = \frac{3,27 \cdot 0,5 \cdot 10892,8}{2 \cdot 11,71} = 693$$

$$\gamma_C = \frac{(a_C / \delta)^2}{5 + a_A / \delta} = \frac{(3/0,5)^2}{5 + 3/0,5} = 3,27$$

б) в зубцях статора

$$P_{\text{ПУЛ.С}} = 0,14 \left[\frac{Z_{\text{Я}} n_{\text{H}} \alpha_B}{10000} \cdot \frac{B_{\text{ПУЛ.С}}}{1000} \right]^2 \cdot G_{\text{ЗКК}} = 0,14 \left[\frac{32 \cdot 6000 \cdot 0,74}{1,5 \cdot 10^7} \cdot \frac{795,8}{1,5^7} \right]^2 \cdot 1,4 = 7,9 \text{ Вт.}$$

де

$$B_{\text{ПУЛ.С}} = \frac{\gamma_{\text{Я}} \delta}{2t_{\text{К0}}} B_{\text{ЗС}} = \frac{3,27 \cdot 0,5}{2 \cdot 10,897} \cdot 10607,7 = 795,8$$

$$\gamma_c = \frac{(a_c/\delta)^2}{5 + a_{я}/\delta} = \frac{(3/0,5)^2}{5 + 3/0,5} = 3,27$$

$$G_{ZC} = \gamma[\pi(D' + h_{ZC})h_{ZC}a_i - 4pZ_{я}S_{KM}]k_{CT}l \cdot 10^{-3} =$$

$$= 3,27[\pi(11,1 + 1,25) \cdot 1,25 \cdot 0,63 - 4 \cdot 1 \cdot 27 \cdot 1,05] \cdot 0,94 \cdot 11,3 \cdot 10^{-3} = 1,4 \text{ кг.}$$

123. Механічні втрати в щітковому контакті

$$P_{щ} = 9,81 \cdot k_{тр} p_{щ} S_{щ} v_k = 9,81 \cdot 0,25 \cdot 0,30 \cdot 5 \cdot 27,33 = 100,4 \text{ Вт.}$$

де $k_{тр} = 0,25$ – коефіцієнт тертя щіток на колекторі;

$p_{щ} = 0,30 \text{ кг/см}^2$ - питомий тиск щіток;

$$S_{щ} = 4 \cdot S_{щ} = 4 \cdot 1,25 = 5 \text{ см}^2.$$

124. Механічні втрати у підшипниках і на вентиляцію

$$P_{мех} = 50 \text{ Вт.}$$

125. Додаткові втрати

$$P_{дод} = 0,01 P_H = 0,01 \cdot 2000 = 20 \text{ Вт.}$$

126. Сумарні втрати

$$\Sigma P = P_{ЕЛ3} + P_{ЕЛ2} + P_{ЯЗ} P_{СТ.Я} + P_{ПУЛ.Я} + P_{щ} + P_{мех} + P_{дод} = 136,5 + 16,9 +$$

$$+ 23,6 + 20,7 + 14,047 + 100,4 + 50 + 20 = 382,1 \text{ Вт.}$$

127. Коефіцієнт корисної дії при $P_H = 2000 \text{ Вт.}$

$$\eta = \left[1 - \frac{\Sigma P}{P_H + \Sigma P} \right] \cdot 100\% = \left[1 - \frac{382,1}{2000 + 382,1} \right] \cdot 100\% = 84\%$$

3.16. Індуктивності та постійні часу обмоток та ланцюгів

128. Індуктивність обмотки керування;

а) без урахування насичення

$$L_y = L_1 = 2p(W_y)^2 \Delta_y = 2 \cdot 492^2 \cdot 0,24 \cdot 10^{-4} = 11,81 \text{ Гн.}$$

б) з урахуванням насичення

$$L_{y\mu} = \frac{L_y}{k_{\mu d}} = \frac{11,8}{1,442} = 8,19 \text{ Гн.}$$

де

$$\Delta_y = \sigma_y \Delta_{\delta d} = 1,034 \cdot 23,2367 \cdot 10^{-6} = 0,000024 \text{ Гн.}$$

129. Індуктивність поперечного кола якоря:

а) без урахування насичення

$$L_2 = 2pW_2^2 \Delta_{\delta q} = 2 \cdot 60,204^2 \cdot 17,7952 \cdot 10^{-6} = 0,13 \text{ Гн.}$$

б) з урахуванням насичення

$$L_{2\mu} = L_2/k_{\mu q} = 0,13/1,253 = 0,1 \text{ Гн.}$$

130. Постійна часу обмотки керування:

а) без урахування насичення

$$T_y = T_1 = L_y/r_y = 11,81/590 = 0,02 \text{ сек.}$$

б) з урахуванням насичення

$$T_{y\mu} = L_{y\mu}/r_y = 8,19/520 = 0,01 \text{ сек.}$$

131. Постійна часу поперечного кола:

а) без урахування насичення

$$T_2 = L_2/R_2 = 0,13/1,08 = 0,12 \text{ сек};$$

б) з урахуванням насичення

$$T_{2\mu} = L_{2\mu}/R_2 = 0,1/1,08 = 0,09 \text{ сек.}$$

123. Еквівалентна постійна часу поперечного кола з урахуванням дії реакції якоря:

а) без урахування насичення

$$T'_2 = L_2/\Sigma R_2 = 0,31/2,16 = 0,09 \text{ сек.}$$

б) з урахуванням насичення

$$T'_{2\mu} = L_{2\mu}/\Sigma R_2 = 0,1/2,16 = 0,05 \text{ сек.}$$

3.17.Перевірка нагріву

124. Нагрів колектора. Перегрів над навколишнім повітрям

$$\theta_K = \frac{P_{\text{ел.щ}} + P_{\text{щ}}}{\pi D_K l_K a_K} = \frac{77,94 + 100,4}{\pi \cdot 8,7 \cdot 0,906} = 7,21^\circ\text{C}$$

де

$$P_{\text{ел.щ}} = 2[I_H \Delta U_{\text{щ}3} + I_2 \Delta U_{\text{щ}2}] = 77,94 \text{ Вт.}$$

Нагрівання колектора залишається в межах допустимих значень.

ВИСНОВОК

З вересня 2023 року, я почав працювати в НДІ «КВАНТ» м.Київ та мав змогу не тільки побачити, як виготовляють електромашинний підсилювач поперечного поля але й взяти участь у виробництві даної машини. У складі слюсарної дільниці я мав змогу власноруч збирати колектор, полюса, магнітопровід зі шихтованих листів електротехнічної сталі та приймав участь у фінальних збиральних роботах з готових вже деталей. Пізніше, у січні 2024 року я перекваліфікувався на монтажника та до тепер працюю на монтажній дільниці. На місці монтажника я почав роботу з обмотками, тобто їх виготовлення, підготовка до укладки, та відповідно укладання у пази якоря та статора ЕМП.

У дипломній роботі виконані розрахунки удосконаленого електромашинного підсилювача. Поліпшення були досягнуті завдяки збільшенню обсягу матеріалу, використовуваного для виготовлення керуючої обмотки, як порівняти з вихідним підсилювачем, при цьому в удосконаленій версії відмовилися від використання третьої керуючої обмотки. Простір, що звільнився, було зайнято керуючою обмоткою. Завдяки збільшенню числа витків якірної обмотки вдалося підвищити напругу в режимах форсування до 131,5 В, що критично важливо для підвищення швидкості роботи виконавчого двигуна, що живиться від електромашинного підсилювача. При цьому збільшення числа витків якірної обмотки ускладнило технологію намотування, але водночас значно поліпшило ефективність використання електромашинного підсилювача.

Удосконалений електромашинний підсилювач перевершує базову модель за всіма параметрами, що робить економічно виправданим проведене поліпшення. Порівняльні характеристики вдосконаленого і базового електромашинних підсилювачів наведено в таблиці нижче.

Таблиця порівняння показників

Параметри	Одиниця вимірювання	Модернізований ЕМП	Базовий ЕМП
Номінальна напруга приводного двигуна.	В	27,0	27,0
Номінальний споживаний струм приводного двигуна, не більше.	А	145	150
Номінальна частота обертання.	Об/хв	6000	6000
Номінальна потужність ЕМП.	кВт.	2,0	2.0
Номінальна вихідна напруга.	В	95,0	115,0
Номінальний струм навантаження.	А	21,5	17,4
Номінальна потужність обмоток керування, не більше.	Вт	4	4
Номінальний ККД, не менше.	%	52	49
Кількість обмоток керування		2	3
Коефіцієнт форсування по напрузі та струму навантаження $\varphi_i = \varphi_a$		2	1,7

ЛІТЕРАТУРА

1. Горяїнов Ф.А. «Електромашинні підсилювачі». – Л.: Енергія, 1970.-500с.
2. Виноградов Н.В., Горяїнов Ф.А. Сергєєв П.С. «Проектування електричних машин». – Л.: Енергія, 1967.-504с.
3. Черданцев Н.А., Пояркова М.Ф. «Генератори та двигуни постійного струму».-Л.: Енергія, 1972.-543с.
4. Гуров В. Г. «Електромашинні підсилювачі поперечного поля.» 1980.
5. Савченко О. І. «Методичні вказівки до вивчення електромашинних підсилювачів». - Харків: ХНУРЕ, 2005.
6. Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлєв «Електричні машини і апарати: навчальний посібник» 2011.
7. Д.В. Циценкова «Проектування електричних машин: навчальний посібник Національного технічного університету» - Дніпровська політехніка, 2020.
8. А.Г. Морозов «Розрахунок електричних машин постійного струму» 1977.

**Перелік графічного матеріалу
що виноситься на захист
дипломного проекту**

Дипломна робота на тему: «Електромашинний підсилювач поперечного поля»

Виконав:

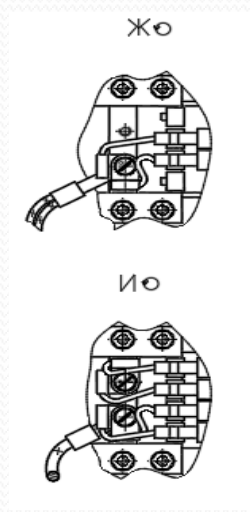
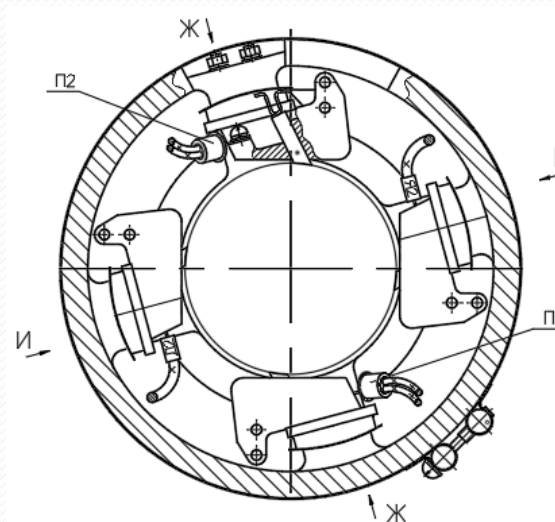
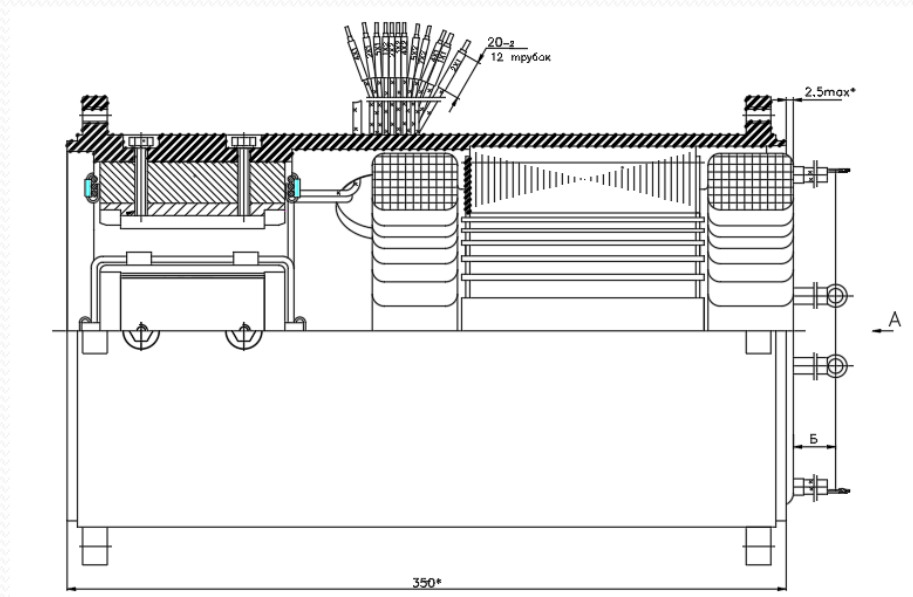
Студент гр.ЕМ-п11

Чамлай Г.Ю.

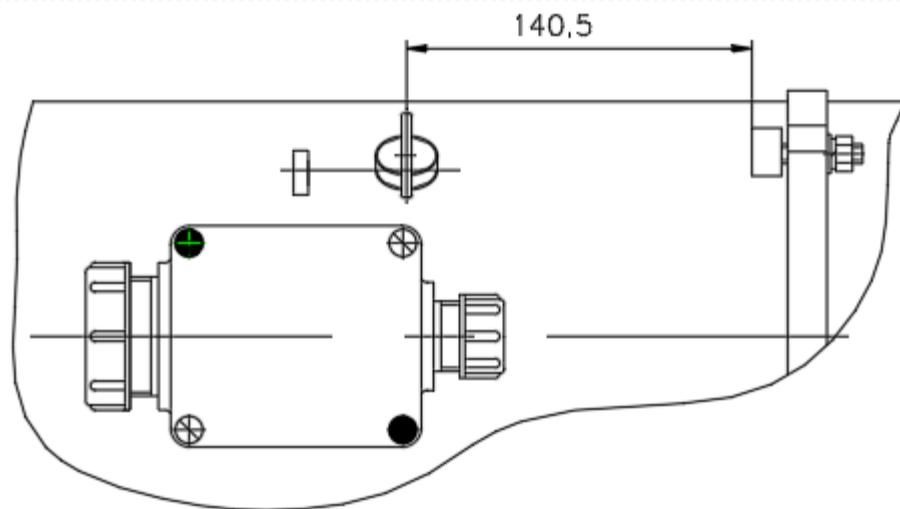
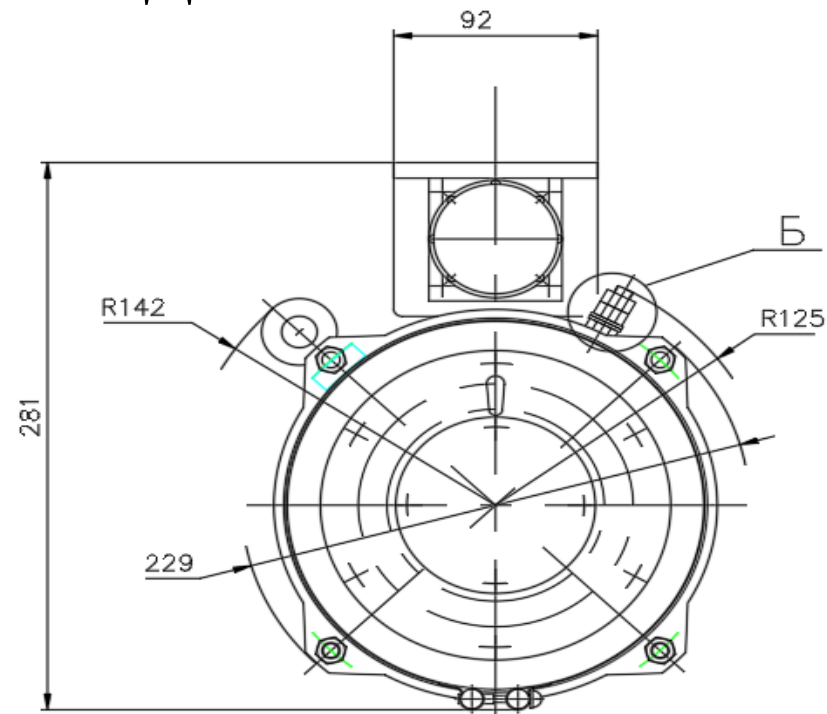
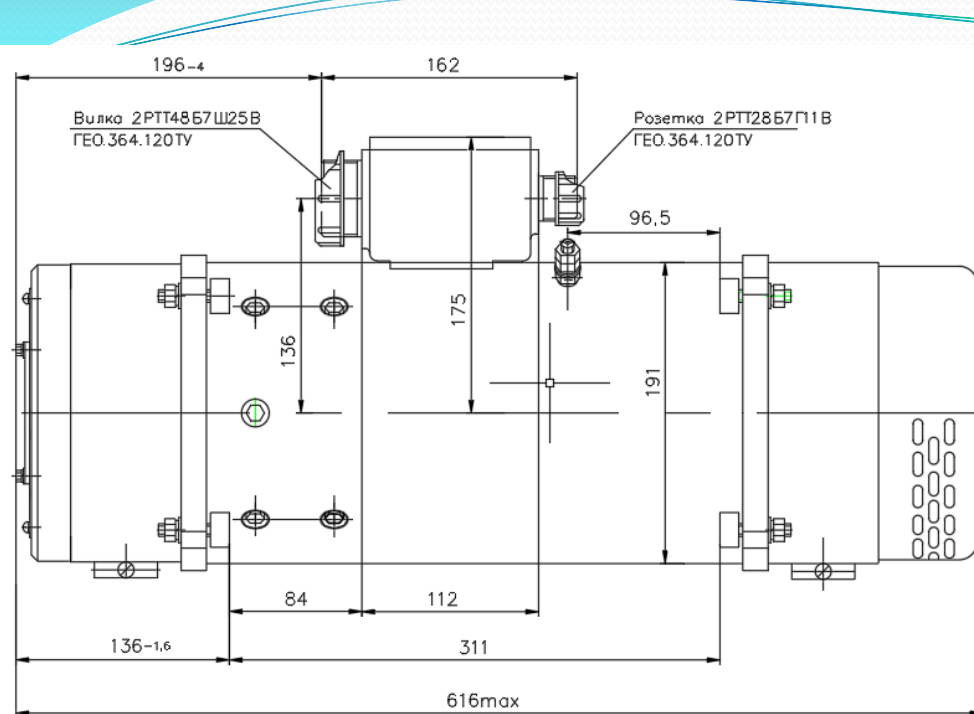
Вступ

- **Мета роботи:** Розібратися в принципі дії, будові, та характеристиках ЕМП. Виконати розрахунок електромашинного підсилювача поперечного поля, який характеризується високим коефіцієнтом підсилення сигналу керування для використання в автоматизованих приводах.
- **Задачі роботи:** Розібратися в технології виготовлення обмоток, вкладання обмоток у пази, участь у процесі збирання машини та в процедурі випробування електромашинного підсилювача. Зрозуміти принцип роботи та конструкцію електромашинного підсилювача, виконати розрахунки параметрів та побудувати характеристики.
- **Предмет дослідження:** Генератор, як частина електромашинного підсилювача, його електромеханічні характеристики та параметри.
- **Шляхи реалізації:** Безпосередня участь у процесі виготовлення та укладання обмоток, збирання колектора з мідних пластин, приймання участі у збиральних роботах та випробуваннях. Аналіз конструкторської та технічної документації, ознайомлення з будовою ЕМП наживо, виконання електромагнітного розрахунку та побудова електромеханічних характеристик в комп'ютерній програмі Mathcad.

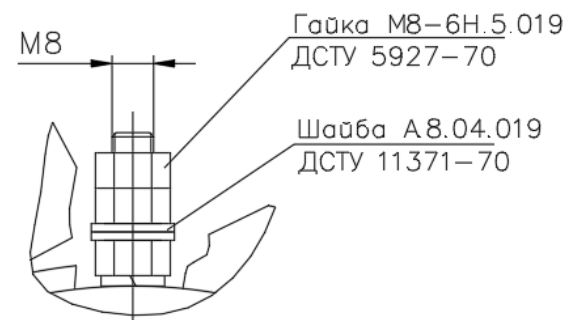
ЕМП поперечного поля



Зовнішній вигляд ЕМП



Б (1:1) ∅

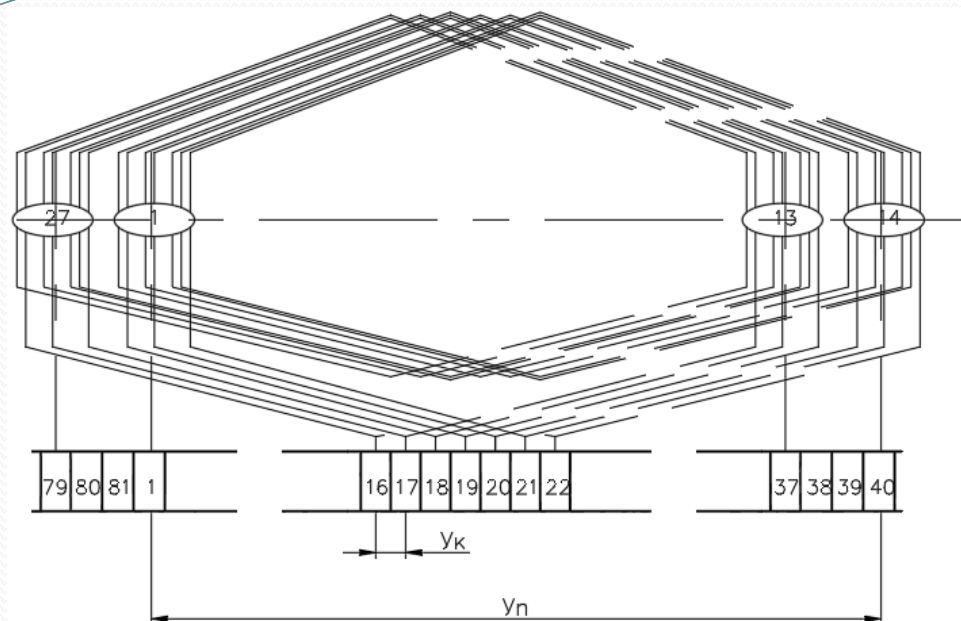


[illegible]

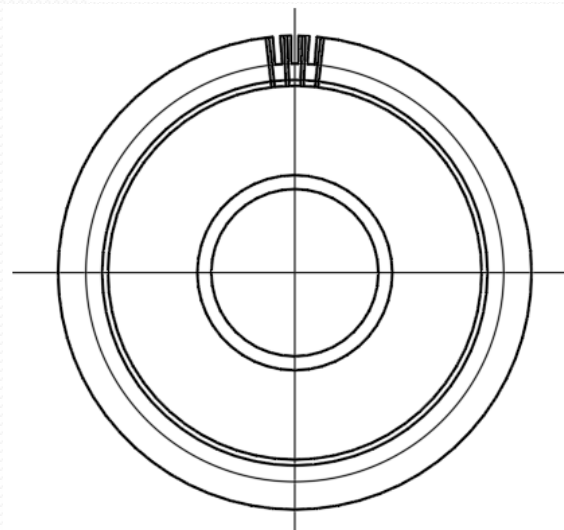
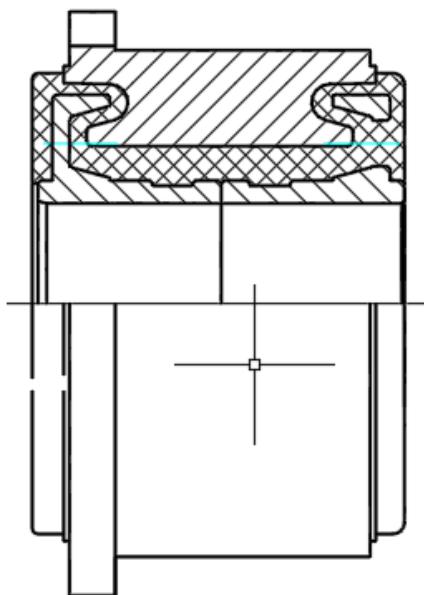
Елементи конструкції ЕМП поперечного поля



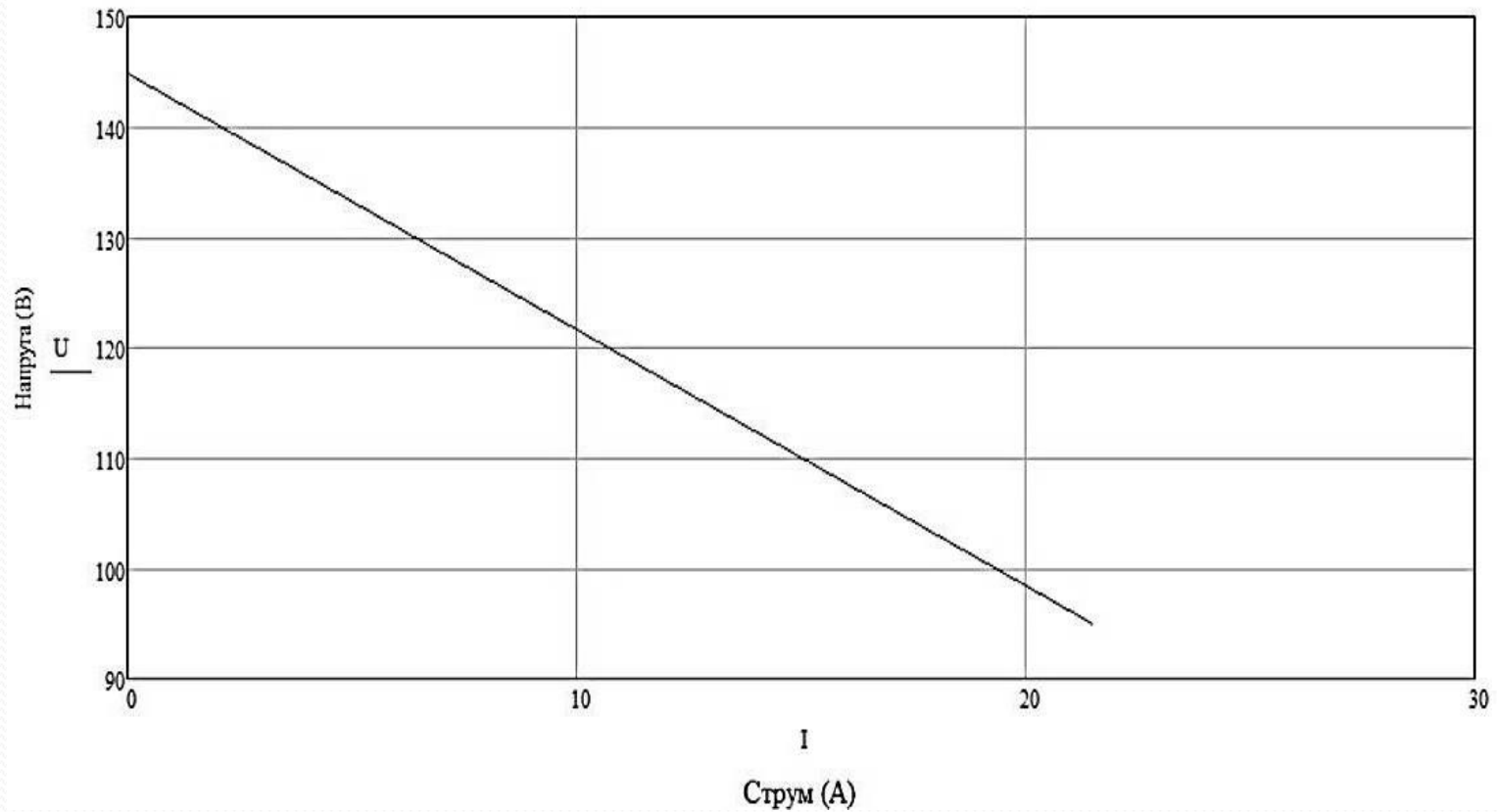
Обмотка та колектор підсилювача



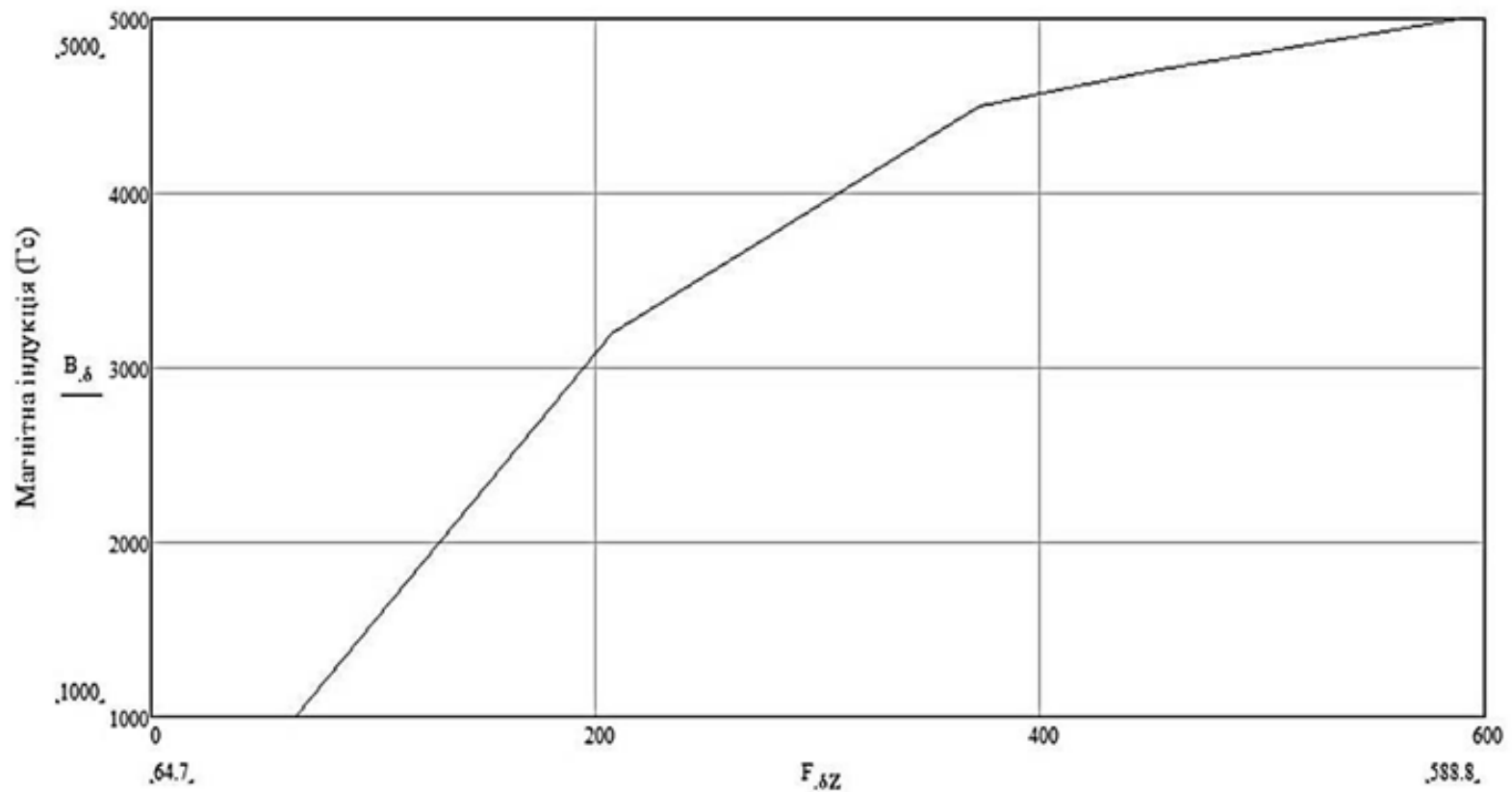
	Генератор
Тип обмотки	Проста петльова
Число парів	$Z=27$
Число колекторних пластин	$K=81$
Крок по колектору	$y_k=1$
Крок по парам	$y_n=13$
Число витків на секцію	2; 3
Число секцій (загальне)	81
2-х виткових	54
3-х виткових	27
Опір обмотки при 20°C, Ом	0,15 & 0,015



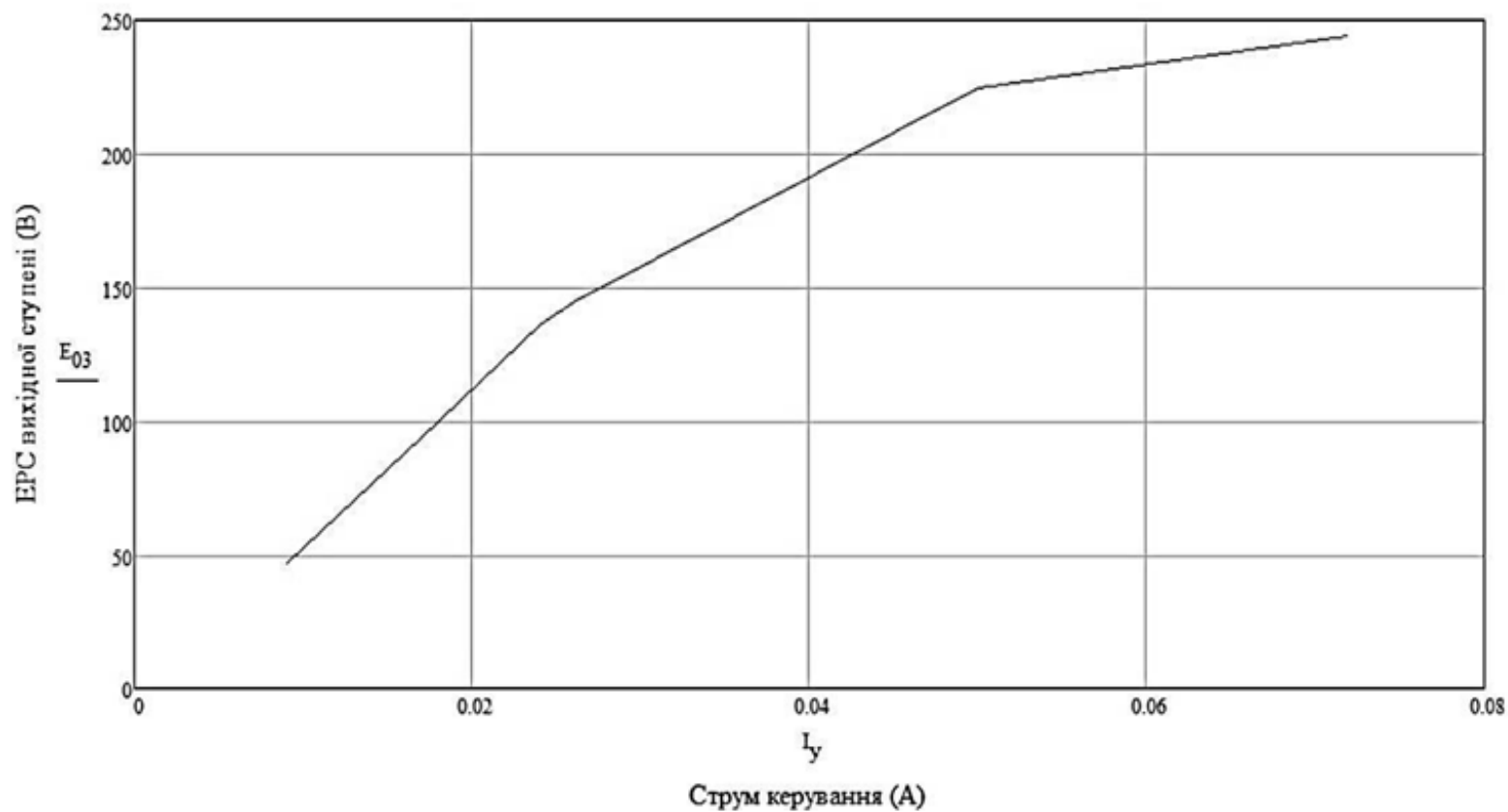
Зовнішня характеристика ЕМП



Перехідна характеристика ЕМП



Результуюча характеристика холостого ходу



Висновок

З вересня 2023 року, я почав працювати в НДІ «КВАНТ» м.Київ та мав змогу не тільки побачити, як виготовляють електромашинний підсилювач поперечного поля але й взяти участь у виробництві даної машини. У складі слюсарної дільниці я мав змогу власноруч збирати колектор, полюса, магнітопровід зі шихтованих листів електротехнічної сталі та приймав участь у фінальних збиральних роботах з готових вже деталей. Пізніше, у січні 2024 року я перекваліфікувався на монтажника та до тепер працюю на монтажній дільниці. На місці монтажника я почав роботу з обмотками, тобто їх виготовлення, підготовка до укладки, та відповідно укладання у пази якоря та статора ЕМП.

У дипломній роботі виконані розрахунки удосконаленого електромашинного підсилювача. Поліпшення були досягнуті завдяки збільшенню обсягу матеріалу, використовуваного для виготовлення керуючої обмотки, як порівняти з вихідним підсилювачем, при цьому в удосконаленій версії відмовилися від використання третьої керуючої обмотки. Простір, що звільнився, було зайнято керуючою обмоткою. Завдяки збільшенню числа витків якірної обмотки вдалося підвищити напругу в режимах форсування до 131,5 В, що критично важливо для підвищення швидкості роботи виконавчого двигуна, що живиться від електромашинного підсилювача. При цьому збільшення числа витків якірної обмотки ускладнило технологію намотування, але водночас значно поліпшило ефективність використання електромашинного підсилювача.

Удосконалений електромашинний підсилювач перевершує базову модель за всіма параметрами, що робить економічно виправданим проведення поліпшення. Порівняльні характеристики вдосконаленого і базового електромашинних підсилювачів наведено в таблиці нижче.

Таблиця порівняння показників

Параметри	Одиниця вимірювання	Модернізований ЕМП	Базовий ЕМП
Номінальна напруга приводного двигуна.	В	27,0	27,0
Номінальний споживаний струм приводного двигуна, не більше.	А	145	150
Номінальна частота обертання.	Об/хв	6000	6000
Номінальна потужність ЕМП.	кВт.	2,0	2.0
Номінальна вихідна напруга.	В	95,0	115,0
Номінальний струм навантаження.	А	21,5	17,4
Номінальна потужність обмоток керування, не більше.	Вт	4	4
Номінальний ККД, не менше.	%	52	49
Кількість обмоток керування		2	3
Коефіцієнт форсування по напрузі та струму навантаження $\varphi_i = \varphi_a$		2	1,7