

Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки  
Кафедри ЕІС та РК

«Допущений до захисту»  
Завідувач кафедри ЕІС та РК

к.т.н., доцент  Д.В. Костенко

“ 12 ” 06 2026 року

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»  
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

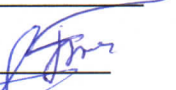
на тему: Розробка та моделювання вентильного електродвигуна

Виконав: студент IV курсу, групи 4307зст3  
спеціальності  
141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

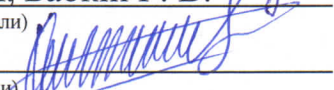
(шифр і назва спеціальності)

Слободян В. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доц. НУК, Бабкін Г. В. 

(прізвище та ініціали)

Рецензент Клозков О.П. 

(прізвище та ініціали)

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

Кафедра ЕІС та РК

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

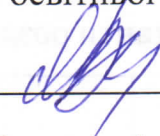
(шифр і назва)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор  Я.Б. Волянська

“ 22 ” 07 20 26 року

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Слободян Віктор Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та моделювання вентильного електродвигуна

Керівник роботи Бабкін Георгій Володимирович, к.т.н., доцент НУК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 22 ” 04 20 26 року № 286-уч

2. Термін подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані по роботі номінальна потужність  $P_{2н} = 13$  кВт; число фаз  $m=3$ ; номінальна напруга  $U_n = 380$  В ; з'єднання фаз зірка; число полюсів  $2p = 4$ ; частота мережі  $f = 100$  Гц; повторно-короткочасний режим роботи ПВ = 40%

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Огляд вентильного двигуна. 2 Математичне моделювання вентильного двигуна. 3 Моделювання магніту вентильного двигуна. 4 Імітаційне моделювання вентильного двигуна у середовищі MATLAB/SIMULINK. 5 Охорона праці

## 5. Перелік презентаційних матеріалів (з точним зазначенням назв)

1.

---



---



---



---



---



---



---

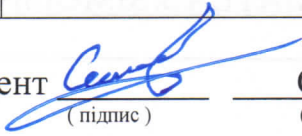
## 6. Консультанти розділів роботи

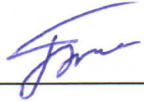
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта    | Підпис, дата   |                  |
|--------|----------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                              | завдання видав | завдання прийняв |
| ОП     | к.т.н., доцент кафедри ЕІС та РК Бабкін Г.В. |                |                  |
|        |                                              |                |                  |
|        |                                              |                |                  |
|        |                                              |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи              | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Призначення та область застосування              |                               |          |
| 2     | Технічні характеристики                          |                               |          |
| 3     | Опис та обґрунтування прийнятих технічних рішень |                               |          |
| 4     | Розрахунки, що підтверджують працездатність      |                               |          |
| 5     | Охорона праці                                    |                               |          |
|       |                                                  |                               |          |
|       |                                                  |                               |          |
|       |                                                  |                               |          |

Студент  Слободян В. С.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  Бабкін Г.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Як об'єкт дослідження виступає вентильний двигун електроприводу, призначеного для керування запірною, запірно-регулюючою арматурою, кульових кранів технологічних переробних вузлів, газопроводів та іншого трубопровідного транспорту, у тому числі високого тиску.

Метою роботи є проведення математичного моделювання вентильного двигуна електроприводу для магістральних нафтопроводів.

У процесі дослідження виконувались:

- електромагнітний розрахунок вентильного двигуна;
- математичне моделювання вентильного двигуна;
- імітаційне моделювання вентильного двигуна

В результаті дослідження: розроблено алгоритм математичного моделювання та обрано магніт для ротора вентильного двигуна.

Ступінь застосування: для будь-яких вентильних двигунів до їх виробництва.

Область застосування: як двигун у складі електроприводу, призначеного для керування запірною, запірно-регулюючою арматурою, кульових кранів технологічних переробних вузлів, магістральних нафтопроводів, газопроводів та іншого трубопровідного транспорту, зокрема високого тиску. У майбутньому планується створення методики математичного моделювання вентильного двигуна.

Ключові слова: вентильний двигун, постійні магніти, математична модель, імітаційна модель

## ABSTRACT

The object of research is a valve motor of an electric drive designed to control shut-off, shut-off and regulating valves, ball valves of technological processing units, gas pipelines and other pipeline transport, including high pressure.

The purpose of the work is to conduct mathematical modeling of a valve motor of an electric drive for main oil pipelines.

In the process of research, the following were performed:

- electromagnetic calculation of the valve motor;
- mathematical modeling of the valve motor;
- simulation modeling of the valve motor

As a result of the research: an algorithm for mathematical modeling was developed and a magnet was selected for the rotor of the valve motor.

Scope of application: for any valve motors before their production.

Scope: as a motor in an electric drive designed to control shut-off, shut-off and regulating valves, ball valves of technological processing units, main oil pipelines, gas pipelines and other pipeline transport, especially high pressure. In the future, it is planned to create a methodology for mathematical modeling of a valve motor.

Keywords: valve motor, permanent magnets, mathematical model, simulation model

## ЗМІСТ

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перелік умовних скорочень.....                                                                                                | 7  |
| Вступ .....                                                                                                                   | 8  |
| 1 Огляд вентильного двигуна .....                                                                                             | 10 |
| 1.1 Конструкція та принцип дії вентильного двигуна .....                                                                      | 10 |
| 1.2 Види вентильних двигунів .....                                                                                            | 13 |
| 1.3 Безконтактні двигуни постійного струму .....                                                                              | 14 |
| 2 Математичне моделювання вентильного двигуна .....                                                                           | 17 |
| 2.1 Алгоритм математичного моделювання вентильного двигуна .....                                                              | 18 |
| 2.2 Електромагнітний розрахунок вентильного двигуна .....                                                                     | 20 |
| 3 Моделювання магніту вентильного двигуна .....                                                                               | 57 |
| 4 Імітаційне моделювання вентильного двигуна у середовищі<br>MATLAB/SIMULINK.....                                             | 66 |
| 5 Охорона праці .....                                                                                                         | 71 |
| 5.1 Вступ .....                                                                                                               | 71 |
| 5.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на екіпаж<br>судна-носія при експлуатації підводного апарату ..... | 73 |
| 5.3 Розрахунок загального освітлення приміщення морської лабораторії<br>«Дельта».....                                         | 77 |
| 5.4 Заходи з техніки безпеки під час експлуатації судна .....                                                                 | 79 |
| 5.5 Висновки до розділу 5.....                                                                                                | 81 |
| Висновки.....                                                                                                                 | 82 |
| Перелік джерел посилання .....                                                                                                | 84 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БДПС – безконтактні (безщіткові) двигуни постійного струму

ВД – вентильний двигун

ВЕР – вентильний електропривод

СДПМ – синхронна електрична машина з збудженням від постійних магнітів

## ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку напівпровідникової техніки дали поштовх розвитку давно відомих систем електроприводів у нових сферах застосування. Одним із таких електроприводів є вентильний електропривод. На сьогоднішній день він стає все більш популярним завдяки простоті, високим енергетичним показникам та великому діапазону регулювання. Такий електропривод завдяки особливостям конструкції та простоті реалізації управління може знайти застосування у багатьох сферах промисловості, таких як військова, медична, космічна та інші. Вентильний електропривод є електромеханічною системою, в якій об'єднані синхронна електрична машина, з збудженням від постійних магнітів, електронний комутатор, за допомогою якого здійснюється живлення обмоток якоря машини, і система автоматичного управління інвертором, оснащена необхідними вимірювальними пристроями (датчиками). Цей двигун називають вентильним двигуном. Традиційно керування ключами інвертора здійснюється у функції положення ротора синхронного двигуна. Для вирішення завдань контрольованого руху в сучасних системах все частіше використовуються такі двигуни.

Завдяки своїм високим експлуатаційним характеристикам вентильні двигуни є найбільш перспективними електричними машинами в діапазоні малих і середніх потужностей, особливо для моментних систем електроприводу. Вентильні двигуни конструктивно прості, надійні, мають абсолютно жорсткі механічні характеристики та не вимагають витрат енергії на збудження. Ці якості електричної машини зумовлюють застосування у промислових системах автоматики, роботах та маніпуляторах, приводах подач, головного руху металорізальних верстатів, координатних пристроях тощо.

Метою даної є провести математичне моделювання вентильного двигуна. У даній магістерській роботі вентильний електродвигун використовується у складі електроприводу, призначеного для управління запірною, запірно-регулюючою арматурою, кульових кранів технологічних переробних вузлів, магістральних

нафтопроводів, газопроводів та іншого трубопровідного транспорту, у тому числі високого тиску.

В останні десятиліття при конструюванні роторів з постійними магнітами, перевага надається високоенергетичним магнітам на основі сплавів рідкісноземельних металів, що мають велику коерцитивну силу. Це дозволяє значно покращити масогабаритні показники вентильних двигунів і отримати більш високий момент, що обертає, в тому ж габариті статора двигуна. Для спроектованого вентильного двигуна вибирається магніт зі сплаву неодим-залізо-бор, так як він показує найкращі показники в передачі магнітної індукції і має хорошу магнітну проникність.

У роботі розглядається робота спроектованого вентильного двигуна серед MATLAB/Simulink. Дане середовище дозволяє змодельовати роботу даного двигуна і подивитися як би він поведився в готовому вигляді.

В економічній частині проводиться калькуляція собівартості двигуна, рентабельність та визначається критична програма випуску.

У розділі соціальної відповідальності дисертації порушуються питання аналізу небезпечних та шкідливих факторів, техніки, безпеки, виробничої санітарії, а також питання охорони навколишнього середовища.

## 1 ОГЛЯД ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА

### 1.1 Конструкція та принцип дії вентильного двигуна

Більш в узагальненому вигляді вентильним можна назвати будь-який електропривод, в якому регулювання режиму роботи електродвигуна здійснюється за допомогою керованих вентильних перетворювачів електричної енергії: випрямляча, імпульсного регулятора постійного струму, частоти перетворювача. У більш вузькому, загальноприйнятому сенсі вентильний електропривод (ВЕР) або вентильний двигун (ВД) являє собою електромеханотронну систему, в якій об'єднані синхронна електрична машина, як правило, з збудженням від постійних магнітів (СДПМ), приклад представлений на рис. 1.1, електронний комутатор (інвертор), за допомогою якого здійснюється інвертором, оснащений необхідними вимірювальними пристроями (датчиками). Традиційно керування ключами інвертора ВЕР здійснюється у функції положення ротора синхронного двигуна.

Завдяки своїм високим експлуатаційним характеристикам, СДПМ є найбільш перспективними електричними машинами в діапазоні малих та середніх потужностей, особливо для моментних систем електроприводу. СДПМ конструктивно прості, надійні, мають абсолютно жорсткі механічні характеристики та не вимагають витрат енергії на збудження. Ці якості електричної машини обумовлюють застосування ВД у промислових системах автоматики, роботах і маніпуляторах, приводах подач і головного руху металорізальних верстатів, координатних пристроях, автоматичних лініях з обробки різних матеріалів або збирання виробів, пакувальних та друкарських машинах, принтерах і плоттерах, намотувальних та стрічкопротяжних механізмах, намотувальних та стрічкопротяжних механізмах, медичної техніки. ВД мають свою "нішу" в тяговому електроприводі, приводах рульового управління літальних та підводних апаратів, електромеханічних пристроях автомобілів (електромеханічні підсилювачі керма, стартер-генераторні пристрої гібридних

автомобілів, склопідйомники та ін.), мотор-колесах акумуляторних індивідуальних транспортних засобах (електровелосипеди, інвалідні коляски різних розробок), в побутових пристроях (пральна машина дисків).



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд вентильного двигуна

На рис. 1.2 представлена схема роботи ВД.

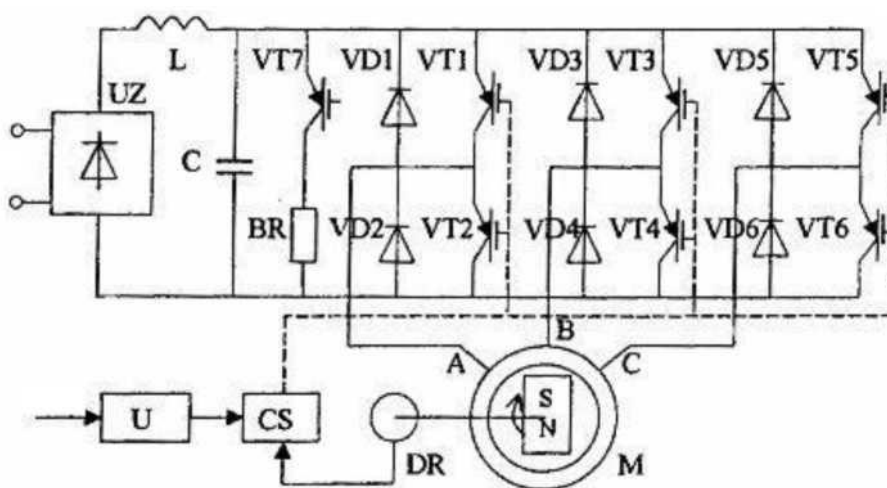


Рисунок 1.2 – Схема роботи ВД

Зі схеми видно, що у статорі струм утворюється в обмотках, а в роторі створюється за допомогою високоенергетичних постійних магнітів.

Умовні позначення: VT1-VT7 – транзисторні комунікатори; А, В, С – фази обмоток; М – момент двигуна; DR – датчик положення ротора; U – регулятор напруги живлення двигуна; S (south), N (north) – напрямки магніту; UZ – частотний перетворювач; BR – датчик частоти обертання; VD – стабілітрон; L – котушка індуктивності.

Схема двигуна показує, що однією з основних переваг ротора, в якому встановлені постійні магніти, є зменшення його діаметра і, як наслідок, скорочення моменту інерції. Такі пристрої можуть бути вбудованими в сам прилад або розташованими на його поверхні. Зниження цього показника дуже часто призводить до невеликих значень балансу моменту інерції самого двигуна та приведення до його валу навантаження, який ускладнює роботу приводу. З цієї причини виробники можуть запропонувати стандартний та підвищений у 2-4 рази момент інерції.

#### 1.1.1 Переваги

Застосовуючи вентильний двигун у роботі, можна відзначити такі його переваги:

- можливість застосування широкого діапазону модифікування частоти обертання;
- висока динаміка та швидкодія;
- максимальна точність позиціонування; - невеликі витрати на технічне обслуговування;
- пристрій можна віднести до вибухозахищених об'єктів;
- має здатність переносити великі навантаження у момент обертання;
- високий ККД, що становить понад 90%;
- є ковзаючі електронні контакти, які суттєво збільшують робочий ресурс та термін служби;
- при тривалій роботі немає перегріву електродвигуна.

#### 1.1.2 Недоліки

Незважаючи на величезну кількість переваг, вентильний двигун також має і недоліки в експлуатації:

- досить складне керування електродвигуном;
- відносно висока ціна пристрою через застосування в його конструкції ротора, який має дорогі постійні магніти

Саме завдяки цим перевагам ВД займають провідні позиції у каталогах продукції провідних зарубіжних електротехнічних фірм – Siemens AG, General Electronic, Bosch Rexroth AG, Ansaldo, Fanuc та ін.

Вентильні електроприводи та спеціалізовані СДПМ виробляються серійно з 1980-х років. Прикладами є комплектний електропривод ЕПБ1 і двигуни серій ДБМ, ДВ. В останні роки роботи зі створення сучасних ВЕП знову набули минулої інтенсивності. На базі електричних машин серій ДВФ і ДБМ спроектована нова серія сучасних вентильних двигунів, а також тяговий вентильний електродвигун ВМЕД-01 потужністю 120 кВт автомобілів. В електричних машинах нової серії застосовані термостабільні постійні магніти з матеріалу "неодим-залізо-бор" зі спеціальними легуючими добавками, які сприяють підвищенню коерцитивної сили та збереженню властивостей магнітів при нагріванні до  $+170^{\circ}\text{C}$  і п'ятикратному короточасному перевантаженню двигуна по моменту. Це забезпечує зниження витрати дорогих магнітних матеріалів та покращення масогабаритних показників машини.

## 1.2 Види вентильних двигунів

Залежно від конструктивних особливостей розрізняють два основні види вентильних двигунів:

- безконтактні (безщіткові) двигуни постійного струму (БДПС), в англomовній літературі звані "brushless DC motors", у яких конструкція синхронної машини магнітоелектричного збудження, тобто. геометричне розташування витків обмотки якоря на статорі та постійних магнітів на роторі, що обумовлює фазні ЕРС обертання трапецеїдальної форми;

- безконтактні двигуни змінного струму – "permanent-magnetbrushless AC motors", фазні ЕРС обертання яких мають синусоїдальний характер. Саме такі

системи найчастіше називають вентильними двигунами – ВД.

### 1.3 Безконтактні двигуни постійного струму

За принципом дії БДПС є зверненою машиною постійного струму з магнітоелектричним індуктором на роторі і обмоткою якоря на статорі, функції щітково-колекторного вузла в якій виконує напівпровідниковий комутатор, що живить обмотку якоря і перемикається в функції ротора. Найчастіше використовуються БДПС із трифазною обмоткою на статорі. Статор трифазний БДПС ідентичний статору асинхронного двигуна, рис. 1.3 і його обмотка, як правило, з'єднана в зірку. Можливі варіанти конструкції ротора двигуна та розташування постійних магнітів ілюструються рис. 1.4.



Рисунок 1.3 – Статор БДПС

Момент БДПС утворюється внаслідок реакції двох магнітних потоків - статора та ротора. Магнітний потік статора завжди прагне розгорнути ротор з постійними магнітами, щоб потік останнього збігся з ним у напрямку. Також діє магнітне поле Землі на стрілку компаса. При цьому за допомогою датчика положення ротора електричний кут між двома потоками БДПС завжди зберігається в діапазоні  $90 \pm 30^\circ$ , що відповідає максимальному моменту, що

обертає. Для живлення обмотки якоря БДПС може застосовуватися будь-який керований напівпровідниковий перетворювач, що реалізує жорсткий алгоритм 120 – градусної комутації струмів чи напруг трифазного навантаження.

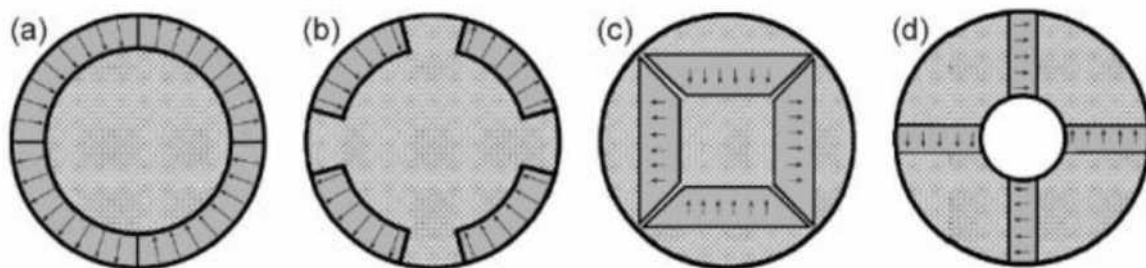


Рисунок 1.4 – Різні конструкції ротора БДПС

Механічні та електромеханічні (швидкісні) характеристики БДПС повністю аналогічні характеристикам класичної машини постійного струму з незалежним або магнітоелектричним збудженням. Тому системи автоматичного управління швидкістю БДПС зазвичай будуються за класичним принципом підлеглого регулювання координат електроприводу постійного струму з контурами струму якоря і частоти обертання.

Як датчик власних потреб, необхідного для реалізації алгоритму перемикання комутатора БДПС, можуть використовуватися узгоджені з двигуном за кількістю пар полюсів індуктивні або ємнісні дискретні датчики положення, а також системи на базі датчиків Холла і постійних магнітів. Однак будь-який з перелічених видів датчиків істотно ускладнює конструкцію електричної машини і знижує надійність електроприводу в цілому. Крім того, існує широке коло технологічних механізмів, де через віддаленість двигуна від комутатора використання датчиків положення практично неможливо. У зв'язку з цим часто застосовуються так звані "бездатчикові" (sensorless) алгоритми управління БДПС, засновані на аналізі поведінки електромагнітних змінних СДПМ, які можуть бути виміряні безпосередньо на вихідних клеммах напівпровідникового перетворювача та поточної частоти обертання (живлення) двигуна.

Одним із проявів загальносвітової тенденції розвитку виробництва

високотехнологічної електротехнічної продукції є певні успіхи у галузі створення нового покоління регульованих електроприводів із використанням вентильних електродвигунів.

Випуск таких електроприводів освоюють нині майже всі провідні електротехнічні компанії. Пропозиція на ринку вентильних електродвигунів характеризується широким потужним діапазоном – від одиниць ват до сотень кіловат, які можуть використовуватися в різних галузях промисловості, в тому числі і аерокосмічній.

Вентильний електропривод на базі СДПМ є універсальним засобом електромеханічного перетворення енергії та автоматизації технологічних процесів. Принципи побудови силової частини ВЕП вже устоялися і залишаються незмінними протягом кількох останніх десятиліть, що не виключає їх розвиток у частині поліпшення електромагнітної сумісності електроприводів з мережею живлення. Головним напрямом удосконалення ВЕП у найближчій перспективі буде розробка та оптимізація адаптивних "бездатчикових" алгоритмів управління, орієнтованих на мікропроцесорну реалізацію та забезпечуючи діапазони регулювання з сталістю моменту 1:150...200.

Таким чином, вентильні двигуни займають сьогодні гідне місце у каталогах провідних зарубіжних та вітчизняних виробників.

## 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА

Вентильний двигун за своєю конструкцією є синхронним двигуном з постійними магнітами на роторі і вбудованим датчиком положення ротора. Індуктор знаходиться на роторі, якірна обмотка на статорі.

Станина двигуна виконується литий з алюмінію, поверхні якої для охолодження є ребра. У станині є три отвори під рим-болт, що дозволяють встановлювати двигун горизонтальне або вертикальне положення при монтажі.

Статор є сердечником, набраним з листів електротехнічної сталі марки 2412. У пази пакету статора укладена шаблонна обмотка, намотана з проводу ПЕТД-180. Клас ізоляції обмотки статора Н.

Ротор двигуна складається з валу та напресованої на нього втулки. У пази втулки вставлені та приклеєні постійні магніти, виконані зі сплаву Nd-Fe-B неодим залізо бор. Приклеєні до втулки магніти бандажуються вуглецевою ниткою. Вал має східчасту форму. На ротор напресовані радіальні однорядні підшипники [1]. На одному кінці валу встановлена шпонка, в інший кінець валу встановлений постійний магніт, частина датчика положення ротора.

Згідно [2], двигун призначений для внутрішньої та зовнішньої установки, в потенційно вибухонебезпечних середовищах, крім підземних виробок шахт і копалень та їх наземних будівель, небезпечних по рудничному газу або горючому пилу, температура поверхні двигуна при цьому не повинна перевищувати 135°. При конструюванні двигуна потрібно врахувати тип вибухозахисту, в даному випадку тип вибухозахисту – вибухонепроникна оболонка, тобто двигун повинен мати міцну оболонку, здатну витримати внутрішній вибух без деформування корпусу. Захист забезпечується зазорами елементів корпусу, які забезпечують вихід газів, що утворилися під час спалаху у зовнішню атмосферу без підриву навколишнього вибухонебезпечного середовища.

Електродвигун має рівень вибухозахисту «вибухобезпечне електрообладнання» і призначений для встановлення у вибухонебезпечних зонах. Вибухонепроникність оболонки забезпечується використанням щілинного

вибухозахисту, яка виключає передачу вибуху, що виник усередині двигуна, в навколишнє середовище.

Температура навколишнього середовища, при якій можлива експлуатація двигуна від мінус  $50^{\circ}\text{C}$  до плюс  $40^{\circ}\text{C}$ . Режим роботи електродвигуна – повторно короткочасний S3 (ПВ=40%), тобто періоди роботи двигуна чергуються із періодами відключення. Ступінь захисту двигуна від зовнішніх впливів IP 68.

## 2.1 Алгоритм математичного моделювання вентильного двигуна

Математичне моделювання та пов'язаний з ним комп'ютерний експеримент незамінні в тих випадках, коли натурний експеримент неможливий або утруднений з тих чи інших причин. Тому в цій дисертації проводиться математичне моделювання вентильного двигуна. Математична модель – це наближений опис будь-якої електротехнічної дії або об'єктів технічного виконання мовою математики. Основна мета моделювання – дослідити ці об'єкти та передбачити результати майбутніх спостережень. Однак моделювання – це ще й метод пізнання можливостей об'єкта, що дає можливість керувати ним і дізнатися як він поведеться при тій чи іншій дії або навпаки. Математичне моделювання та пов'язаний з ним комп'ютерний експеримент незамінні в тих випадках, коли натурний експеримент неможливий або утруднений з тих чи інших причин. Для такого моделювання використовують алгоритм роботи об'єкта, що досліджується.

На рис. 2.1 представлено алгоритм математичного моделювання вентильного двигуна. Він дозволяє на підставі вироблених електромагнітного, економічного та магнітного розрахунків зробити вибір найбільш енергоефективного ВД, що задовольняє вимогам. Обмежуючими факторами розрахунку є коефіцієнт заповнення паза та середнє перевищення температури обмотки статора. Представлений на рис. 2.1 алгоритм математичного моделювання ВД дозволяє реалізувати різні варіанти проектування зі зміною довжин сердечника і обмотувальних даних машини. Задля реалізації даного

алгоритму для ВД коїться з іншими параметрами досить змінити вихідні дані.

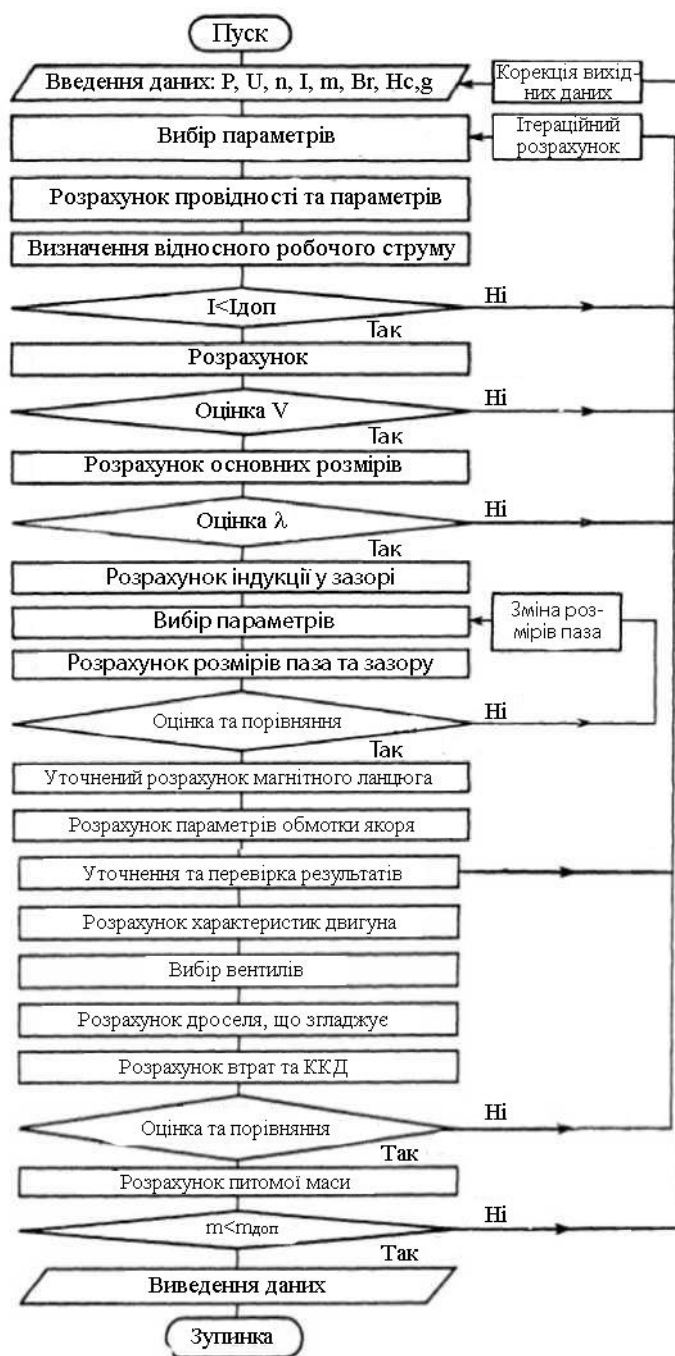


Рисунок 2.1 – Алгоритм математичного моделювання вентильного двигуна

Як вихідні параметри для електромагнітного розрахунку прийняті такі дані:

Потужність номінальна  $P_H = 13$  кВт;

Частота обертання  $n_c = 3000$  об/хв;

Число фаз  $m = 3$ ;

Напруга лінійна  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ ;

Перевантажувальна спроможність  $kp = 3$ ;

Число пар полюсів  $2p = 4$ ;

Частота мережі  $f_1 = 100 \text{ Гц}$ .

Як вихідні дані для алгоритму математичного моделювання ВД прийняті такі величини:

$I_H$  – струм, А

$M_H$  – момент, Н \* м

$\cos \phi_H$  – коефіцієнт потужності

$\eta_H$  – коефіцієнт корисної дії

$P_{2H}$  – корисна потужність

## 2.2 Електромагнітний розрахунок вентильного двигуна

За допомогою вихідних даних робимо електромагнітний розрахунок за методикою, викладеною в [1].

### 2.2.1 Вибір основних розмірів

Як матеріал постійних магнітів вибираємо сплав НмБ 150/160, так як магніти виготовлені з неодим - залізо-бору володіють великим значенням енергетичного твору (до  $(BH)_{\text{max}} = 360 \text{ кДж} / \text{м}^3$ ), високим значенням залишкової  $Br = 1,327 \text{ Тл}$  та коерцитивної сили, високою температурою Кюрі (до  $200^\circ \text{C}$ ).

Головна перевага таких сплавів перед іншими – це високі магнітні властивості при істотно менших розмірах і вазі, що веде за собою зменшення габаритів і ваги виробу, що випускається.

### 2.2.2 Вибраний тип сплаву має такі параметри:

- залишкова індукція  $Br = 0,94 \text{ Тл}$ ;
- коерцитивна сила  $H_c = 680 \text{ кА/м}$ ;
- максимальний енергетичний добуток  $(BH)_{\text{max}} = 150 \text{ кДж/м}^3$ .

2.2.3 Для статора використовуємо аркуш із параметрами:

- внутрішній діаметр статора  $D = 0,108 \text{ м}$ ;
- зовнішній діаметр статора  $Da = 0,1915 \text{ м-коду}$ .

2.2.4 Параметри паза:

- $h_{ns} = 16,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;
- $b_1 = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;
- $b_2 = 8,42 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;
- $h_{ui} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;
- $b_{ui} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Геометрія паза представлена рис. 2.2.

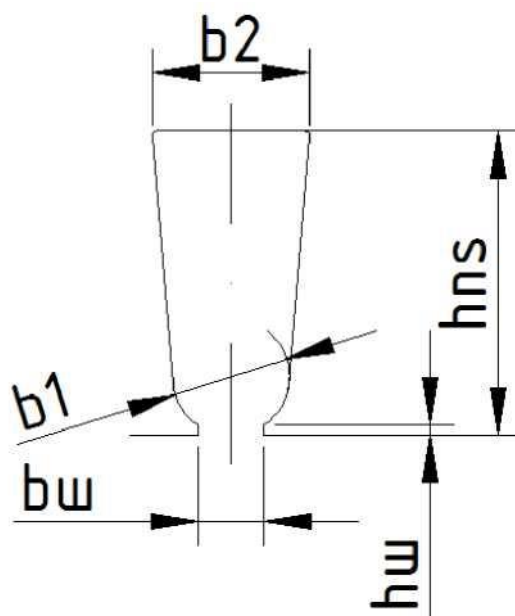


Рисунок 2.2 – Паз статора Потрібний обсяг постійних магнітів

$$V_M = 0,2 \cdot \frac{k_\phi \cdot k_{ad} \cdot (1 + \varepsilon)}{\xi \cdot f_1 \cdot Br \cdot Hc} \cdot P_{2H} \cdot kp, \quad (2.1)$$

де  $k_\phi$  – коефіцієнт форми поля магніту, попередньо приймаємо  $k_\phi = 0,9$ ;

$k_{ad}$  – коефіцієнт приведення поздовжньої м.д.с. реакції якоря, попередньо приймаємо  $k_{ad} = 0,8$ ;

$\varepsilon$  – ступінь збудженості двигуна, попередньо приймаємо  $\varepsilon = 0,8$ ;

$\xi$  – коефіцієнт використання постійних магнітів, попередньо  $\xi = 0,55$ .

$$V_M = 0,2 \cdot \frac{0,9 \cdot 0,8 \cdot (1 + 0,8)}{0,55 \cdot 100 \cdot 0,94 \cdot 680 \cdot 10^3} \cdot 13 \cdot 10^3 \cdot 3 = 2,875 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3,$$

### 2.2.5 Повітряний зазор

Зазор вибираємо по [4], приймаємо  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м. У зв'язку з тим, що магніти бандажуються вуглецевою ниткою, електромагнітний зазор виходить більше геометричного, тому необхідно врахувати діаметр нитки  $d_H = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м, тоді електромагнітний повітряний зазор

$$\delta_{\text{эм}} = \delta + d_H, \quad (2.2)$$

$$\delta_{\text{эм}} = 0,5 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Діаметр магніту

$$D_M = D - 2 \cdot \delta_{\text{эм}}, \quad (2.3)$$

$$D_M = 0,108 - 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,106 \text{ м.}$$

Довжина магніту

$$l_M = \lambda_M \cdot D_M, \quad (2.4)$$

де  $\lambda_M = 1 \dots 1,9$  приймаємо  $\lambda_M = 1,27$

$$l_M = 1,27 \cdot 0,106 = 0,135 \text{ м.}$$

Довжина пакету статора

$$l_s = \frac{l_M}{(1,02...1,05)}, \quad (2.5)$$

$$l_s = \frac{0,135}{1,02} = 0,132 \text{ м.}$$

2.2.6 Розміри полюса магніту

Ширина полюса магніту

$$b_M = \frac{(0,94...1,1) \cdot D_M}{p}, \quad (2.6)$$

$$b_M = \frac{1 \cdot 0,106}{2} = 0,053 \text{ м.}$$

Площа поперечного перерізу

$$S_M = l_M \cdot b_M, \quad (2.7)$$

$$S_M = 0,135 \cdot 0,053 = 7,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Об'єм одного полюса

$$V_{M1} = \frac{V_M^3}{4}, \quad (2.8)$$

$$V_{M1} = \frac{2,875 \cdot 10^{-4}}{4} = 7,19 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Середня висота полюса магніту

$$h_M = \frac{V_{M1}}{S_M}, \quad (2.9)$$

$$h_M = \frac{7,19 \cdot 10^{-5}}{7,14 \cdot 10^{-3}} = 0,01 \text{ м},$$

Приймаємо  $h_M = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Діаметр валу по [4]

$$d_B = 0,23 \cdot D_a, \quad (2.10)$$

$$d_B = 0,23 \cdot 0,1915 = 0,044 \text{ м},$$

## 2.2.7 Визначення кількості витків статора обмотки

Число пазів на полюс та фазу

$$q = \frac{Z_s}{2p \cdot m}, \quad (2.11)$$

$$q = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3.$$

По [4] в машинах змінного струму потужністю вище 15 кВт застосовуються двошарові обмотки, тому для двигуна, що розробляється, приймаємо одношарову шаблонну обмотку, з'єднану в зірку.

Крок обмотки

$$\tau_z = \frac{Z_s}{2p}, \quad (2.12)$$

$$\tau_z = \frac{36}{4} = 9,$$

$$y = \tau_z.$$

Обмотковий коефіцієнт [6]

$$k_{OS} = k_y \cdot k_p \cdot k_c, \quad (2.13)$$

де  $k_y$  – коефіцієнт скорочення обмотки;

$k_p$  – коефіцієнт розподілу обмотки;

$k_c$  – коефіцієнт скосу пазів.

Коефіцієнт укорочення обмотки

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right), \quad (2.14)$$

де  $\beta$  – відносний крок обмотки

$$\beta = \frac{y}{\tau_z}, \quad (2.15)$$

$$\beta = \frac{9}{9} = 1,$$

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 1\right) = 1,$$

Коефіцієнт розподілу обмотки

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2 \cdot q}\right)}, \quad (2.16)$$

де  $\alpha$  – електричний кут між вісями катушек

$$\alpha = \frac{2 \cdot 180 \cdot p}{Z_s}, \quad (2.17)$$

$$\alpha = \frac{360 \cdot 2}{36} = 20,$$

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{20}{2}\right)}{3 \cdot \sin\left(\frac{20}{2 \cdot 3}\right)} = 0,952,$$

Коефіцієнт скошу пазів

$$k_{ск} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\gamma_c}{2}\right)}{\gamma_c}, \quad (2.18)$$

$$\gamma_c = \frac{b_c}{\tau} \cdot \pi, \quad (2.19)$$

де  $\tau$  – полюсне ділення;

$b_c$  – величина скоса пазів.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}, \quad (2.20)$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot 0,106}{4} = 0,085 \text{ м},$$

$$b_c = \frac{2 \cdot p \cdot \tau}{Z_s}, \quad (2.21)$$

$$b_c = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,085}{36} = 0,015 \text{ м},$$

$$\gamma_c = \frac{0,015}{0,085} \cdot \pi = 0,548,$$

$$k_c = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{0,548}{2}\right)}{0,548} = 0,988 \text{ м},$$

$$k_{os} = 1 \cdot 0,952 \cdot 0,988 = 0,94.$$

Магнітний потік на полюс

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta 1} \cdot \tau \cdot li, \quad (2.22)$$

де  $B_{\delta l}$  – індукція в повітряному зазорі, попередньо приймаємо  $B_{\delta l} = 0,86$  Тл;

$li$  – розрахункова довжина сердечника статора.

$$li = l_s + 2 \cdot \delta_{эм}, \quad (2.23)$$

$$li = 0,126 + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,134 \text{ м},$$

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \cdot 0,86 \cdot 0,085 \cdot 0,134 = 6,23 \cdot 10^{-3} \text{ Вб},$$

Число витків статора обмотки на фазу

$$w_s = \frac{k_c \cdot U_{нф}}{4,44 \cdot f_1 \cdot k_{OS} \cdot \Phi_1}, \quad (2.24)$$

де  $k_b$  – відношення ЕРС обмотки статора до номінальної напруги, вибираємо по [4];

$U_{нф}$  – номінальна фазна напруга.

$$U_{нф} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}}, \quad (2.25)$$

$$U_{нф} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В},$$

$$w_s = \frac{0,968 \cdot 220}{4,44 \cdot 100 \cdot 0,94 \cdot 6,23 \cdot 10^{-3}} = 82.$$

Число провідників у пазу

$$u_{II} = \frac{w_s}{p \cdot q}, \quad (2.26)$$

$$u_{\Pi} = \frac{82}{2 \cdot 3} = 13,6.$$

Приймаємо  $u_{\Pi} = 14$ , тоді остаточно число витків

$$w_s = u_{\Pi} \cdot p \cdot q, \quad (2.27)$$

$$w_s = 14 \cdot 2 \cdot 3 = 84.$$

Висота ярма статора

$$h_{as} = \frac{D_a - D}{2} - h_{ns}, \quad (2.28)$$

$$h_{as} = \frac{0,1915 - 0,108}{2} - 16,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Зубцевий крок статора

$$t_s = \frac{\pi \cdot D}{Z_s}, \quad (2.29)$$

$$t_s = \frac{\pi \cdot 0,108}{36} = 9,42 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Ширина зубця статора

$$b_z = \frac{b'_z + b''_z}{2}, \quad (2.30)$$

$$b'_z = \frac{\pi \cdot (D + b_1 + 2h_{III})}{Z_s} - b_1, \quad (2.31)$$

$$b'_z = \frac{\pi \cdot (0,108 + 6,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3})}{36} - 6,2 \cdot 10^{-3} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$b''_z = \frac{\pi \cdot (D + 2h_{ns})}{Z_s} - b_2, \quad (2.32)$$

$$b''_z = \frac{\pi \cdot (0,108 + 2 \cdot 16,1 \cdot 10^{-3})}{36} - 8,42 \cdot 10^{-3} = 3,81 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$b_z = \frac{3,85 \cdot 10^{-3} + 3,81 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,83 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

Діаметр елементарного провідника

$$d_{эл.п} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{II} \cdot k_M}{u_{II} \cdot n_{эл} \cdot \pi}}, \quad (2.33)$$

де  $S_{II}$  – площа паза;

$k_M$  – коефіцієнт заповнення паза міддю,  $k_M = 0,35$ ;

$n_{эл}$  – число елементарних провідників, приймаємо  $n_{эл} = 3$ .

$$S_n = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_1 + \frac{\pi \cdot b_1^2}{8}, \quad (2.34)$$

$$S_n = \frac{6,2 \cdot 10^{-3} + 8,42 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 14 \cdot 10^{-3} + \frac{3,14 \cdot (6,2 \cdot 10^{-3})^2}{8} = 1,193 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$h_1 = h_{ns} - \left( h_{III} + \frac{b_1 - b_{III}}{2} \right), \quad (2.35)$$

$$h_1 = 16,1 \cdot 10^{-3} - \left( 0,5 \cdot 10^{-3} + \frac{6,2 \cdot 10^{-3} - 3,5 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$d_{эл} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,193 \cdot 10^{-4} \cdot 0,35}{14 \cdot 3 \cdot \pi}} = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

Приймаємо провід ПЕТД 180 [10], клас нагрівальності ізоляції Н, діаметр неізолюваного дроту  $d_{неиз} = 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , діаметр ізолюваного дроту  $d_{из} = 1,257 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Розміри паза у світлі з урахуванням припуску на складання [4]

$$b'_1 = b_1 - \Delta b, \quad (2.36)$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b, \quad (2.37)$$

$$h'_{n.k.} = h_{n.k.} - \Delta h, \quad (2.38)$$

де  $\Delta b$  – припуск по ширині паза,  $\Delta b = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

$\Delta h$  – припуск по висоті паза  $\Delta h = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

$$b'_1 = 6,2 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$b'_2 = 8,42 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 8,32 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$h'_{n.k.} = 14 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 13,9 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

Площа поперечного перерізу корпусної ізоляції у пазу

$$S_{uz} = b_{uz} \cdot (2 \cdot h_{ns} + b_1 + b_2), \quad (2.39)$$

де  $b_{uz}$  – одностороння товщина ізоляції в пазу,  $b_{uz} = 0,25 \cdot 10^{-3}$  м по [4].

$$S_{uz} = 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 16,1 \cdot 10^{-3} + 6,2 \cdot 10^{-3} + 8,42 \cdot 10^{-3}) = 11,71 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

Площа поперечного перерізу паза для розміщення провідників обмотки [4]

$$S'_{II} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{n.k.} - (S_{uz} + S_{PP}), \quad (2.40)$$

де  $S_{PP}$  – площа поперечного перерізу прокладок,  $S_{PP} = 0$ .

$$S'_{II} = \frac{6,1 \cdot 10^{-3} + 8,32 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 13,9 \cdot 10^{-3} - (11,71 \cdot 10^{-6} + 0) = 9,03 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2,$$

Коефіцієнт заповнення паза [4]

$$k_3 = \frac{d_{uz}^2 \cdot u_{II} \cdot n_{эл}}{S'_{II}}, \quad (2.41)$$

$$k_3 = \frac{(1,257 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 14 \cdot 3}{9,03 \cdot 10^{-5}} = 0,73,$$

## 2.2.8 Розрахунок магнітного ланцюга

Магнітний потік у повітряному зазорі

$$\Phi_{\delta} = \frac{k_e \cdot U_{нф}}{4 \cdot k_e \cdot f_1 \cdot w_s \cdot k_{OS}}, \quad (2.42)$$

де  $k_e$  – Коефіцієнт залежить від форми кривої поля. Вибирається за [5, с.108, рис. 6-4],  $k_e = 1,09$

$$\Phi_{\delta} = \frac{1,09 \cdot 220}{4 \cdot 1,2 \cdot 100 \cdot 84 \cdot 0,94} = 6,14 \cdot 10^{-3} \text{ Вб},$$

Індукція у повітряному зазорі

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot li}, \quad (2.43)$$

де  $\alpha_{\delta}$  – Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття, по [5]  $\alpha_{\delta} = 0,71$ .

$$B_{\delta} = \frac{6,14 \cdot 10^{-3}}{0,71 \cdot 0,085 \cdot 0,134} = 0,761 \text{ Тл},$$

Магнітна напруга повітряного зазору на пару полюсів

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta_{эм}, \quad (2.44)$$

де  $k_{\delta}$  – коефіцієнт повітряного зазору.

$$k_{\delta} = \frac{5 + \frac{b_{III}}{\delta_{эм}}}{5 + \frac{b_{III}}{\delta_{эм}} \cdot \left( \frac{t_s - b_{III}}{t_s} \right)}, \quad (2.45)$$

$$k_{\delta} = \frac{5 + \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}}{5 + \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot \left( \frac{9,425 \cdot 10^{-3} - 3,5 \cdot 10^{-3}}{9,425 \cdot 10^{-3}} \right)} = 1,18,$$

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,761 \cdot 1,18 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1,44 \cdot 10^3 \text{ A},$$

Індукція в зубцях статора

$$B_{zs} = B_{\delta} \cdot \frac{t_s}{b_z \cdot k_{cs}}, \quad (2.46)$$

де  $k_{cs}$  – коефіцієнт заповнення пакета статора сталлю, приймаємо  $k_{cs} = 0,95$  по [5]

$$B_{zs} = 0,761 \cdot \frac{9,42 \cdot 10^{-3}}{3,83 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 1,97 \text{ Тл},$$

Оскільки  $B_{zs} > 1,8$  Тл, необхідно врахувати відгалуження потоку паз і знайти дійсну індукцію в зубці  $B_{zl}$ .

Коефіцієнт  $k_{nx}$

$$k_{nx} = \frac{b_{nx}}{b_z \cdot k_{cs}}, \quad (2.47)$$

$$b_{nx} = \frac{b_1 + b_2}{2}, \quad (2.48)$$

$$b_{nx} = \frac{6,2 \cdot 10^{-3} + 8,42 \cdot 10^{-3}}{2} = 7,31 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$k_{nx} = \frac{7,31 \cdot 10^{-3}}{3,83 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 2,01,$$

$$B_{z1} = B_{zs} - \mu_0 \cdot H_{z1} \cdot k_{nx}, \quad (2.49)$$

приймаємо  $B_{z1} = 1,95$ , перевіряємо співвідношення  $B_{z1}$  і  $B_{zs}$

$$1,95 = 1,97 - 3 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 7200 \cdot 2,01$$

Магнітна напруга зубців статора

$$F_{zs} = H_{zs} \cdot 2 \cdot h_{ls}, \quad (2.50)$$

де  $H_{zs}$  – напруженість магнітного поля в зубці,  $H_{zs} = 7200 \text{ A/м}$  [4].

$$F_{zs} = 7200 \cdot 2 \cdot 16,1 \cdot 10^{-3} = 231,84 \text{ A},$$

Коефіцієнт насичення зубців

$$k_z = \frac{F_\delta + F_{zs}}{F_\delta}, \quad (2.51)$$

$$k_z = \frac{1440 + 231,84}{1440} = 1,16,$$

Індукція у ярмі статора

$$B_{as} = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot h_{as} \cdot li \cdot k_{CS}}, \quad (2.52)$$

$$B_{as} = \frac{6,14 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,026 \cdot 0,134 \cdot 0,95} = 0,95 \text{ Тл},$$

Магнітна напруга ярма статора

$$F_{as} = \xi_s \cdot H_{as} \cdot \frac{\pi \cdot (D_a - h_{as})}{2p}, \quad (2.53)$$

де  $\xi_s$  – коефіцієнт враховує нерівномірність розподілу індукції в ярмі,  $\xi_s = 0,6$  [5];

$H_{as}$  – напруженість магнітного поля в ярмі статора,  $H_{as} = 105 \text{ А / м}$  [4]

$$F_{as} = 0,6 \cdot 105 \cdot \frac{\pi \cdot (0,1915 - 0,026)}{4}.$$

Індукція у ярмі ротора

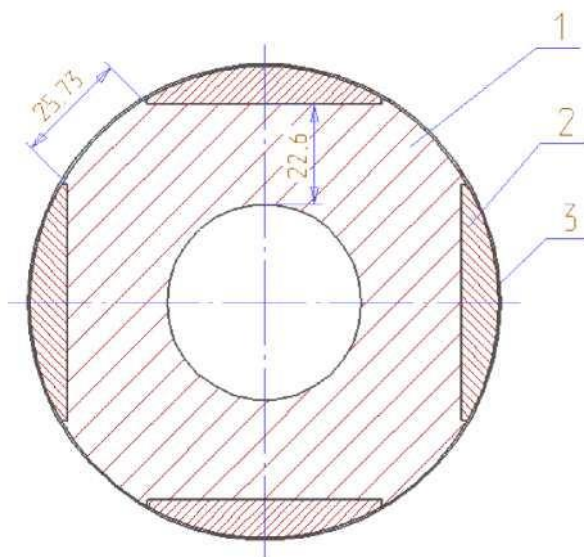
$$B_{ar} = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot h_{ar} \cdot lr \cdot k_{cr}}, \quad (2.54)$$

де  $h_{ar}$  – висота ярма ротора,  $h_{ar} = 22,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  на рис. 2.3;

$lr$  – довжина ротора, приймаємо рівною довжині магніту  $lr = l_M = 0,135 \text{ м}$ ;

$k_{cr}$  – Коефіцієнт заповнення пакета ротора сталлю,  $k_{cr} = 1$ .

$$B_{ar} = \frac{6,14 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 22,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,135 \cdot 1} = 1,01 \text{ Тл},$$



1) – втулка; 2) – магніт; 3) – нитка бандажна

Рисунок 2.3 – Ескіз ротора

Магнітна напруга ярма ротора

$$F_{ar} = \xi_r \cdot H_{ar} \cdot \frac{\pi \cdot (D_M - h_{ar})}{2 \cdot p}, \quad (2.55)$$

де  $\xi_r$  – коефіцієнт враховує нерівномірність розподілу індукції в ярмі,  $\xi_r = 0,58$ ;

$H_{ar}$  – напруженість магнітного поля в ярмі ротора,  $H_{ar} = 938$  А / м [4].

$$F_{ar} = 0,57 \cdot 938 \cdot \frac{\pi \cdot (0,107 - 19,19 \cdot 10^{-3})}{4},$$

Загальний коефіцієнт насичення

$$k_\mu = k_z + \frac{F_{as} + F_{ar}}{F_\delta}, \quad (2.56)$$

$$k_{\mu} = 1,16 + \frac{7,93 + 54,95}{1440} = 1,21,$$

## 2.2.9 Система базисних величин

Одиниця індукції

$$B_{\delta} = B_r = 0,94 \text{ Тл}$$

Одиниця напруженості магнітного поля

$$H_{\delta} = H_c = 6,8 \cdot 10^5 \text{ А/м}$$

Одиниця м.д.с.

$$F_{\delta} = F_c = H_c \cdot h_M, \quad (2.57)$$

$$F_{\delta} = 6,8 \cdot 10^5 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3} = 4220 \text{ А},$$

Одиниця магнітного потоку

$$\Phi_{\delta\delta} = \Phi_r = B_r \cdot S_M, \quad (2.58)$$

$$\Phi_{\delta\delta} = 0,94 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3} = 6,71 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Одиниця магнітної провідності

$$G_{\delta} = \frac{1}{R_{\delta}} = \frac{\Phi_r}{F_c}, \quad (2.59)$$

$$G_{\delta} = \frac{6,71 \cdot 10^{-3}}{4220} = 1,59 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Одиниця Е.Р.С.

$$E_{\delta} = \frac{2\pi}{k_{\phi}} \cdot f_1 \cdot w_s \cdot k_{OS} \cdot \Phi_r, \quad (2.60)$$

де  $k_{\phi}$  – коефіцієнт форми поля магніту.

$$k_{\phi} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{\alpha_i}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \alpha_i\right)}, \quad (2.61)$$

де  $\alpha_i$  – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття для поля магніту.

$$\alpha_i = \frac{b_M}{\tau}, \quad (2.62)$$

$$\alpha_i = \frac{0,053}{0,085} = 0,623,$$

$$k_{\phi} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{0,623}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 0,623\right)} = 0,927,$$

$$E_{\delta} = \frac{2\pi}{0,927} \cdot 100 \cdot 84 \cdot 0,94 \cdot 6,71 \cdot 10^{-3} = 358,93 \text{ В}$$

### 2.2.10 Розрахунок магнітних опорів та провідностей

Магнітна провідність магніту на один полюс

$$G_{md} = \rho_{\epsilon} \cdot \frac{S_M}{h_M}, \quad (2.63)$$

де  $\rho_{\epsilon}$  – коефіцієнт повернення по [2].

Для визначення коефіцієнта повернення будемо криву розмагнічування магніту у відносних одиницях.

Крива розмагнічування магніту визначається рівнянням

$$B = \frac{1 - H}{1 - aH}, \quad (2.64)$$

$$a = \frac{2\sqrt{\gamma} - 1}{\gamma}, \quad (2.65)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт форми кривої розмагнічування [2].

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{B_r \cdot H_c}, \quad (2.66)$$

$$\gamma = \frac{150000}{0,94 \cdot 680000} = 0,25,$$

$$a = \frac{2\sqrt{0,25} - 1}{0,25} = 2,5 \cdot 10^{-3},$$

Таблиця 2.1

|   |   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |
|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| Н | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| В | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0 |

Приклад розрахунку першого стовпця

$$B = \frac{1 - 0}{1 - 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0} = 1,$$

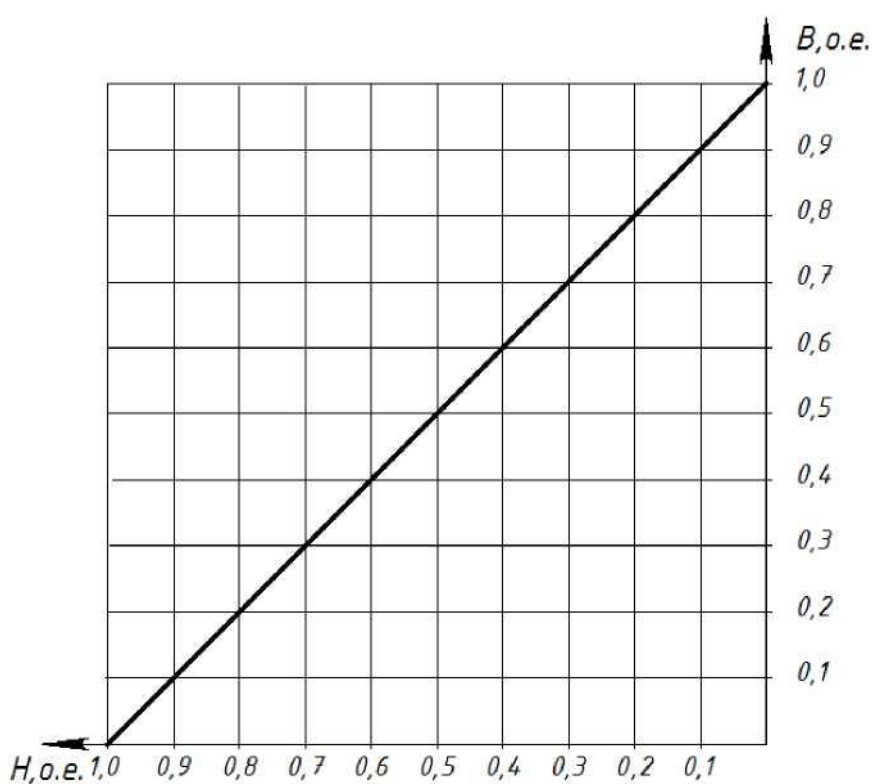


Рисунок 2.4 – Крива розмагнічування сплаву НмБ 150/160 у відносних одиницях

З рис. 2.4 визначаємо коефіцієнт повернення.

$$\Delta B_x = (0,8 - 0,6) \cdot B_r, \quad (2.67)$$

$$\Delta B_x = (0,8 - 0,6) \cdot 0,94 = 0,188 \text{ Тл},$$

$$\Delta H_x = (0,4 - 0,2) \cdot H_c, \quad (2.68)$$

$$\Delta H_x = (0,4 - 0,2) \cdot 680 \cdot 10^3 = 1,36 \cdot 10^5 \text{ А/м},$$

$$\rho_\epsilon = \frac{\Delta B_x}{\Delta H_x}, \quad (2.69)$$

$$\rho_\epsilon = \frac{0,188}{1,36 \cdot 10^5} = 1,382 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м},$$

$$G_{md} = 1,382 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{7,14 \cdot 10^{-3}}{6,2 \cdot 10^{-3}} = 1,59 \cdot 10^{-6},$$

Магнітна провідність розсіювання магніту

$$G_{am} = k_\lambda \cdot k_\sigma \cdot G_{\sigma\epsilon m}, \quad (2.70)$$

де  $k_\lambda$  – коефіцієнт враховує кінцеву проникність та нерівномірний розподіл питомої м.д.с. по висоті магніту,  $k_\lambda = 0,5$  по [1];

$k_\sigma$  – коефіцієнт, що враховує різницю між фактичним потоком розсіювання магніту і розрахунковим потоком,  $k_\sigma = 1,9$  по [1];

$G_{\sigma\epsilon m}$  – провідність розсіювання фіктивного електромагніту.

$$G_{\sigma\epsilon m} = 10^{-6} \cdot \left( 5 \cdot l_M \cdot \frac{h_M}{a_p} + 1,6 \cdot h_M \cdot \phi_\beta \right), \quad (2.71)$$

де  $a_p = 25,73 \cdot 10^{-3}$  м визначаємо з рис. 2.4.

$$\phi_{\beta} = 1,8 \text{ для } \frac{b_M}{a_p} = \frac{0,053}{25,73 \cdot 10^{-3}} = 2,09$$

$$G_{\sigma_{\Sigma M}} = 10^{-6} \cdot \left( 5 \cdot 0,135 \cdot \frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{25,73 \cdot 10^{-3}} + 1,6 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8 \right) = 1,82 \cdot 10^{-7} \text{ Гн},$$

$$g_M = \sqrt{\frac{G_{\sigma_{\Sigma M}}}{G_{md}}}, \quad (2.72)$$

$$g_M = \sqrt{\frac{1,82 \cdot 10^{-7}}{1,59 \cdot 10^{-6}}} = 0,339,$$

$$G_{\sigma m} = 0,5 \cdot 1,95 \cdot 1,82 \cdot 10^{-7} = 1,73 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$$

Магнітний опір повітряного зазору

$$R_{\delta} = \frac{0,8 \cdot \delta_{\Sigma M} \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu}}{a_i \cdot \tau \cdot li} \cdot 10^6, \quad (2.73)$$

$$R_{\delta} = \frac{0,8 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,18 \cdot 1,21}{0,623 \cdot 0,085 \cdot 0,134} \cdot 10^6 = 1,68 \cdot 10^5 \text{ Гн}^{-1}$$

Магнітна провідність шляхів потоку розсіювання обмотки якоря

$$G_s = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{ls \cdot \sum \lambda_s \cdot k_{\phi}}{m \cdot q \cdot k_{OS}^2 \cdot k_{ad}}, \quad (2.74)$$

де  $\sum \lambda_s$  – сумарна провідність потоку розсіювання статора;

$k_{ad}$  – коефіцієнт приведення поздовжньої м.д.с. реакції якоря.

$$k_{ad} = \frac{\pi \cdot \alpha_i + \sin(\pi \cdot \alpha_i)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \alpha_i\right)}, \quad (2.75)$$

$$k_{ad} = \frac{\pi \cdot 0,623 + \sin(\pi \cdot 0,623)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 0,623\right)} = 0,868,$$

$$\sum \lambda_s = \lambda_{\text{ИС}} + \lambda_{\text{ЛС}} + \lambda_{\text{ДС}}, \quad (2.76)$$

де  $\lambda_{\text{ИС}}$  – коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання, [4];

$\lambda_{\text{ЛС}}$  – коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання, [4];

$\lambda_{\text{ДС}}$  – коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання, [4].

$$\lambda_{\text{ИС}} = \frac{h_2}{3 \cdot b_1} + \left( 0,785 - \frac{b_{\text{III}}}{2 \cdot b_1} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_{\text{III}}}{b_{\text{III}}} \right), \quad (2.77)$$

$$h_2 = h_1 - b_{\text{из}}, \quad (2.78)$$

$$h_2 = 0,014 - 0,2 \cdot 10^{-3} = 13,8 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$\lambda_{\text{ИС}} = \frac{13,8 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}} + \left( 0,785 - \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,014}{6,2 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^{-3}} \right) = 3,69,$$

$$\lambda_{\text{ЛС}} = 0,34 \cdot \frac{q}{li} \cdot (l_{\text{л}} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau), \quad (2.79)$$

де  $l_{\text{л}}$  – довжина лобової частини по [4];

$$l_{\text{л}} = K_{\text{л}} \cdot b_{\text{км}} + 2 \cdot B, \quad (2.80)$$

де  $K_{\text{л}} = 1,3$  – коефіцієнт, що враховує наявність ізоляції в лобових частинах, по [4];

$b_{\text{км}}$  – середня ширина котушки, по [4];

$B$  – довжина вильоту прямолінійної частини котушок з паза від торця сердечника до початку відгину лобової частини, в обмотках укладаються до запресування сердечника в корпус  $B = 0,01$  м.

$$b_{\text{км}} = \frac{\pi \cdot (D + h_{\text{ПС}})}{2p}, \quad (2.81)$$

$$b_{\text{км}} = \frac{\pi \cdot (0,108 + 16,1 \cdot 10^{-3})}{4} = 0,097 \text{ м},$$

$$l_{\text{л}} = 1,3 \cdot 0,097 + 2 \cdot 0,01 = 0,147 \text{ м},$$

$$\lambda_{\text{лс}} = 0,34 \cdot \frac{3}{0,134} \cdot (0,147 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,085) = 0,708,$$

$$\lambda_{\text{лс}} = \frac{t_{\text{с}}}{12 \cdot \delta_{\text{эм}} \cdot k_{\delta}} \cdot \zeta, \quad (2.82)$$

де  $\zeta$  – залежить від числа  $q$ , укорочення кроку обмотки та розмірних співвідношень зубцевих зон і повітряного зазору, [4].

$$\zeta = 2 + 0,022 \cdot q^2 - k_{\text{ос}}^2 \cdot (1 + \Delta z), \quad (2.83)$$

де  $\Delta z = 0,1$  по [4], при  $\frac{b_{III}}{t_s} = 0,371$  та  $\frac{b_{III}}{\delta_{\Sigma M}} = 3,5$

$$\zeta = 2 + 0,022 \cdot 3^2 - 0,94^2 \cdot (1 + 0,1) = 1,227,$$

$$\lambda_{ds} = \frac{9,425 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,18} \cdot 1,227 = 0,806,$$

$$\sum \lambda_s = 3,69 + 0,708 + 0,806 = 5,2,$$

$$G_s = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,134 \cdot 5,2 \cdot 0,927}{3 \cdot 3 \cdot 0,94^2 \cdot 0,868} = 7,13 \cdot 10^{-7} \text{ Гн},$$

### 2.2.11 Розрахунок параметрів обмотки статора

Активний опір статора обмотки приведений до  $115^\circ\text{C}$

$$r_s = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{w_s \cdot l_{cp}}{S_{qs}}, \quad (2.84)$$

де  $l_{cp}$  – середня довжина витка обмотки статора;

$S_{qs}$  – площа поперечного перерізу неізолюваного провідника.

$$l_{cp} = 2 \cdot (li + l_{\pi}), \quad (2.85)$$

$$l_{cp} = 2 \cdot (0,134 + 0,147) = 0,56 \text{ м},$$

$$S_{qs} = \frac{d_{неуз}^2}{4} \cdot \pi \cdot n_{\Sigma n}, \quad (2.86)$$

$$S_{qs} = \frac{(1,18 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot \pi \cdot 3 = 3,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$r_s = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{84 \cdot 0,56}{3,28 \cdot 10^{-6}} = 0,351 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора

$$x_s = 0,158 \cdot f_1 \cdot w_s^2 \cdot \frac{li}{p \cdot q} \cdot \sum \lambda_s \cdot 10^{-6}, \quad (2.87)$$

$$x_s = 0,158 \cdot 100 \cdot 84^2 \cdot \frac{0,134}{2 \cdot 3} \cdot 5,2 \cdot 10^{-6} = 0,013 \text{ Ом},$$

Індуктивний опір реакції якоря по поздовжній осі

$$x_{ad} = k_{np} \cdot \frac{1}{R_\delta + \frac{1}{G_{\delta m} + G_{md}}}, \quad (2.88)$$

де  $k_{np}$  – коефіцієнт приведення.

$$k_{np} = 2 \cdot \frac{m}{p} \cdot f_1 \cdot (w_s \cdot k_{os})^2 \cdot \frac{k_{ad}}{k_\phi}, \quad (2.89)$$

$$k_{np} = 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot 100 \cdot (84 \cdot 0,94)^2 \cdot \frac{0,868}{0,927} = 1,78 \cdot 10^6,$$

$$x_{ad} = 1,78 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{1,68 \cdot 10^5 + \frac{1}{1,73 \cdot 10^{-7} + 1,59 \cdot 10^{-6}}} = 2,42 \text{ Ом.}$$

Повний індуктивний опір обмотки якоря по поперечній осі d

$$x_d = x_{ad} + x_s, \quad (2.90)$$

$$x_d = 2,42 + 0,013 = 2.42 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір реакції якоря по поперечній осі

$$x_{aq} = k_{np} \cdot \frac{k_{aq}}{k_{ad}} \cdot \frac{1}{R_\delta}, \quad (2.91)$$

де  $k_{aq}$  – коефіцієнт наведеної поперечної м.д.с. реакції якоря.

$$k_{aq} = \frac{\pi \cdot \alpha_i - \sin(\pi \cdot \alpha_i)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \alpha_i\right)}, \quad (2.92)$$

$$k_{aq} = \frac{\pi \cdot 0,623 - \sin(\pi \cdot 0,623)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 0,623\right)} = 0,312,$$

$$x_{aq} = 1,78 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,312}{0,868} \cdot \frac{1}{1,68 \cdot 10^5} = 3,8 \text{ Ом.}$$

Повний індуктивний опір обмотки по осі q

$$x_q = x_{aq} + x_s, \quad (2.93)$$

$$x_q = 3,8 + 0,013 = 3,8 \text{ Ом.}$$

2.2.12 Визначення точки відходу прямого повернення. Електрорушійна сила холостого ходу

Робочу характеристику магніту будуємо у відносних одиницях. Для цього спочатку будуємо криву розмагнічування металу НмБ 150/160.

$$\operatorname{tg}(\alpha_0) = \frac{G_{\sigma M} + G_{\delta}}{G_{\delta}}, \quad (2.94)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_0) = \frac{1,73 \cdot 10^{-7} + (1/1,68 \cdot 10^5)}{1,59 \cdot 10^{-6}} = 3,84,$$

Електрорушійна сила холостого ходу

$$E_0 = \frac{E_{\delta}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E'_f}{1 + G_{\sigma M} \cdot R_{\delta}}, \quad (2.95)$$

де  $E'_f$  – ордината точки перетину прямого повернення з характеристикою холостого ходу,  $E'_f = 0,785$  визначаємо рис. 2.5.

$$E_0 = \frac{358,93}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0,785}{1 + 1,73 \cdot 10^{-7} \cdot 1,68 \cdot 10^5} = 193,7 \text{ В.}$$

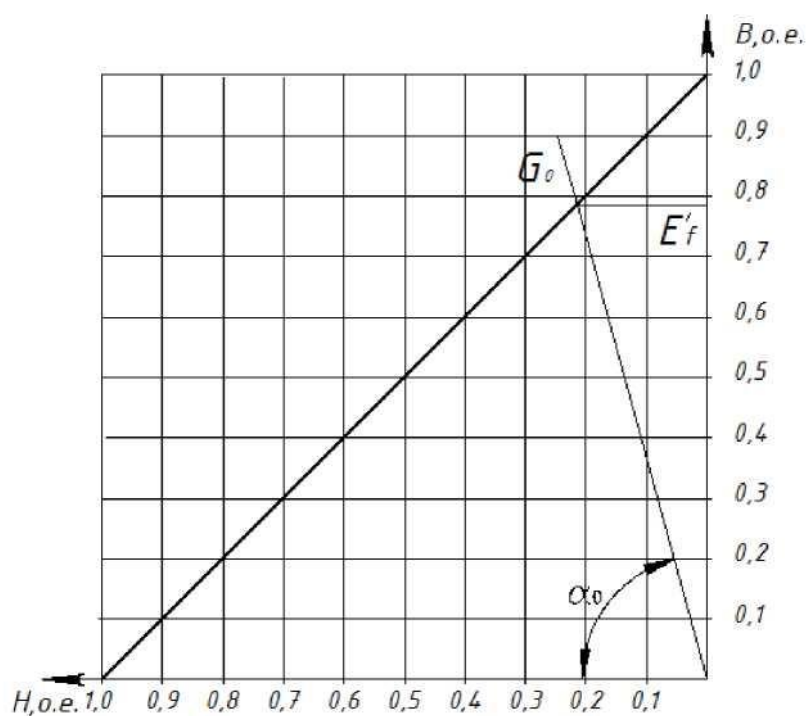


Рисунок 2.5 – До визначення точки відходу прямого повернення

Ступінь збудженості двигуна

$$\varepsilon = \frac{E_0}{U_{нф}}, \quad (2.96)$$

$$\varepsilon = \frac{193,7}{220} = 0,88,$$

### 2.2.13 Розрахунок робочих характеристик

Струм обмотки статора

Приклад розрахунку для  $\Theta_u = 23,4^\circ$ .

$$I = \frac{U_{нф}}{x_d} \cdot \left[ (1 + \varepsilon^2 - 2 \cdot \varepsilon \cdot \cos(\Theta_u)) - (1 - \zeta_d^2) \cdot \sin(\Theta_u)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.97)$$

де  $\Theta_u$  – кут між напругою та електрорушійною силою холостого ходу.

$$\zeta_d = \frac{x_d}{x_q}, \quad (2.98)$$

$$\zeta_d = \frac{2,42}{3,8} = 0,637,$$

$$I = \frac{220}{2,42} \cdot \left[ (1 + 0,88^2 - 2 \cdot 0,88 \cdot \cos(23,4)) - (1 - 0,637^2) \cdot \sin(23,4)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 23,19 \text{ A.}$$

Потужність

$$P_1 = m \cdot \frac{U_{\text{нф}}^2}{x_q} \cdot \frac{1}{\zeta_d + \rho_s^2} \cdot \left[ \varepsilon \cdot \sin(\Theta_u) + \rho_s \cdot (1 - \varepsilon \cdot \cos(\Theta_u)) - \frac{1}{2} \cdot (1 - \zeta_d) \cdot \sin(2 \cdot \Theta_u) \right] \quad (2.99)$$

,

$$\rho_s = \frac{r_s}{x_q}, \quad (2.100)$$

$$\rho_s = \frac{0,351}{3,8} = 0,09,$$

$$\begin{aligned} P_1 &= 3 \cdot \frac{220^2}{3,8} \cdot \frac{1}{0,637 + 0,09^2} \times \\ &\times \left[ 0,88 \cdot \sin(23,4) + 0,09 \cdot (1 - 0,88 \cdot \cos(23,4)) - \frac{1}{2} \cdot (1 - 0,637) \cdot \sin(2 \cdot 23,4) \right] = \\ &= 13870 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Втрати у сталі

$$P_{cm} = \rho \cdot \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{\partial a} \cdot B_{as}^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{zs}^2 \cdot m_z), \quad (2.101)$$

де  $\rho$  – питомі втрати,  $\rho = 1,3$  Вт/кг по [4];

$k_{\partial a}$ ,  $k_{\partial z}$  – коефіцієнти, що враховують вплив на втрати в сталі нерівномірності розподілу потоку за перерізами ділянок магнітопроводу та технологічних факторів, приймаємо  $k_{\partial a} = 1,6$ ,  $k_{\partial z} = 1,8$  по [4];

$m_a$  – маса стали ярма;

$m_z$  – маса сталі зубців;

$\beta$  – показник ступеня, що враховує залежність втрат у сталі від частоти перемагнічування, приймаємо  $\beta = 1,3$  [4].

$$m_z = h_{IS} \cdot b_z \cdot Z_s \cdot li \cdot k_C \cdot \gamma_C, \quad (2.102)$$

де  $\gamma_C$  – питома маса сталі  $\gamma_C = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> за [4].

$$m_z = 16,1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,83 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,134 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 2,21 \text{ кг},$$

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_{as}) \cdot h_{as} \cdot li \cdot k_C \cdot \gamma_C, \quad (2.103)$$

$$m_a = \pi \cdot (0,1915 - 0,026) \cdot 0,026 \cdot 0,134 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 13,28 \text{ кг},$$

$$P_{cm} = 1,3 \cdot \left( \frac{100}{50} \right)^{1,3} \cdot (1,6 \cdot 0,88^2 \cdot 13,28 + 1,8 \cdot 1,887^2 \cdot 2,21) = 110,37 \text{ Вт}.$$

Втрати електричні

$$P_{эл} = m \cdot I^2 \cdot r_s, \quad (2.104)$$

$$P_{эл} = 3 \cdot 23,19^2 \cdot 0,351 = 565,56 \text{ Вт.}$$

Додаткові втрати по [4]

$$P_{доб} = 0,005 \cdot P_1, \quad (2.105)$$

$$P_{доб} = 0,005 \cdot 13870 = 69,35 \text{ Вт.}$$

Втрати механічні [4]

$$P_{мех} = K_T \cdot \left( \frac{n_c}{10} \right)^2 \cdot D_a^4, \quad (2.106)$$

де  $K_T$  – коефіцієнт тертя.

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_a), \quad (2.107)$$

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - 0,1915) = 1,051,$$

$$P_{мех} = 1,051 \cdot \left( \frac{3000}{10} \right)^2 \cdot 0,1915^4 = 127,22 \text{ Вт.}$$

Корисна потужність на валу

$$P_2 = P_1 - (P_{см} + P_{эл} + P_{мех} + P_{доб}), \quad (2.108)$$

$$P_2 = 13870 - (110,37 + 565,56 + 127,22 + 69,35) = 13000 \text{ Вт.}$$

ККД

$$\eta = 1 - \frac{(P_{cm} + P_{эл} + P_{мех} + P_{дод})}{P_1}, \quad (2.109)$$

$$\eta = 1 - \frac{870}{13870} = 0,937,$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{m \cdot U_{ном.ф.} \cdot I}, \quad (2.110)$$

$$\cos \varphi = \frac{13870}{3 \cdot 220 \cdot 23,19} = 0,906,$$

Обертальний момент

$$M_C = \frac{P_2}{\omega_C}, \quad (2.111)$$

$$\text{де } \omega_C = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 100}{2} = 314,159$$

$$M_C = \frac{13000}{314,159} = 41,38 \text{ Нм.}$$

Залежність моменту від кута навантаження представлена рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Кутова характеристика

Результати розрахунку робочих характеристик наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

| $\Theta_u,$   | 0     | 5      | 10     | 15     | 20     | 23,43 | 30    | 35    | 40    |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| $P, Вт$       | 651   | 3330   | 6070   | 8890   | 11810  | 13870 | 17970 | 21220 | 24580 |
| $I, А$        | 10,86 | 11,68  | 13,8   | 16,83  | 20,45  | 23,19 | 28,87 | 33,54 | 38,48 |
| $\Sigma P$    | 365   | 397,28 | 468,24 | 580,21 | 736,81 | 870   | 1200  | 1530  | 1920  |
| $P, Вт$       | 0     | 2940   | 5610   | 8310   | 11070  | 13000 | 16760 | 19690 | 22660 |
| $\eta$        | 0     | 0,88   | 0,922  | 0,934  | 0,937  | 0,937 | 0,932 | 0,928 | 0,921 |
| $\cos\varphi$ | 0,09  | 0,433  | 0,667  | 0,8    | 0,875  | 0,906 | 0,943 | 0,958 | 0,968 |
| $M_c, Нм$     | 0     | 9,35   | 17,85  | 26,46  | 35,24  | 41,38 | 53,36 | 62,69 | 72,14 |

$$\text{де } \Sigma P = P_{ст} + P_{эл} + P_{мех} + P_{доб}$$

Номінальний режим роботи двигуна характеризується такими даними:

$$- P_{2H} = 13000 \text{ Вт};$$

- $I_H = 23,19 \text{ A}$ ;
- $M_H = 41,38 \text{ Нм}$ ;
- $\eta_H = 0,937$ ;
- $\cos\varphi_H = 0,906$
- $P_{1H} = 13870 \text{ Вт}$ .

Робочі показники представлені рис. 2.7.

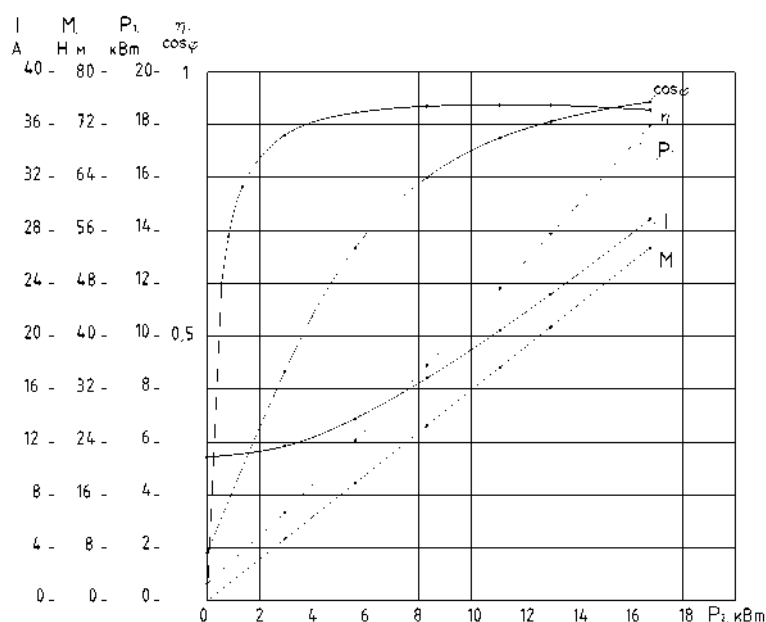


Рисунок 2.7 – Робочі характеристики спроектованого двигуна

Таким чином, виконане математичне моделювання ВД охоплює основні розділи електромагнітного розрахунку, такі як вибір основних параметрів, магнітів, ротора, статора та розрахунок магнітного ланцюга. На базі робочих характеристик можна дійти невтішного висновку, що з  $P_{1H} = 13000 \text{ Вт}$  значення  $\cos\varphi$  і ККД  $\eta_H$  вийшли відповідно 0,906 та 0,937. Характеристики показують, що розраховані параметри даного двигуна задовольняють всім умовам і є найбільш ефективними для роботи ВД. Дане математичне моделювання рекомендується використовувати для будь-яких ВД, але особливо для промислових систем автоматизації, роботах і маніпуляторах, приводах подач, головного руху металорізальних верстатів, координатних пристроїв.

### 3 МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТУ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА

У цьому розділі проводиться моделювання постійного магніту для розрахованого вентильного двигуна. За допомогою програми проводиться порівняння виробленого магніту на підприємстві та його проектів. На основі виконаної роботи, будується модель у програмі для спроектованого вентильного двигуна потужністю 13 кВт. У порівнянні з аналогом, в спроектованому двигуні змінена конфігурація постійних магнітів, що застосовуються, збільшена їх довжина і ширина. Також закладена електротехнічна сталь марки 2412 з меншими питомими втратами. Ці заходи дозволили отримати коефіцієнт корисної дії двигуна 93%. Збільшення к.к.д. викликано зниженням магнітних втрат у сердечнику статора, за рахунок зниження індукції в ярмі, зубцях та повітряному зазорі, внаслідок збільшення довжини статора.

У зв'язку з тим, що магніти надходять на завод від постачальників і для того, щоб запобігти запуску виробництва двигунів, з не відповідними вимогам конструкторської та нормативно-технічної документації магнітами, проводиться їх вхідний контроль. При контролі здійснюється перевірка конструкції та розмірів, перевірка зовнішнього вигляду та перевірка магнітних параметрів магнітів, зокрема перевірка величини індукції магнітного поля. Так як величина індукції магнітного поля змінюється по ширині, довжині і залежить від геометрії магніту, то для перевірки магніту необхідно знати розподіл магнітного поля та значення індукції магніту у кожній його точці. Також є необхідність перевірки розподілу магнітного поля виготовлених роторів і роторів двигунів, що надійшли на ремонт, так як одні можуть бути пошкоджені під час технологічних операцій, а інші можуть вийти з ладу під час експлуатації. У зв'язку з цим у цій частині дипломного проекту розглянуто методику вхідного контролю магнітів, роторів у зборі, чого побудовано картини магнітних полів магнітів, ротора в зборі, визначено основні зони вимірювання магнітної індукції, а так само визначено значення індукції в цих зонах.

Побудова моделі магніту, ротора та подальше визначення індукції здійснено

за допомогою спеціального програмного продукту, призначеного для моделювання різних фізичних полів у двовимірних площинах. Моделювання здійснюється з допомогою методу кінцевих елементів, у якому об'єкт розбивається багато дискретних елементів простий форми, полі у яких змінюється лінійно.

Для підтвердження вірності методики визначення параметрів магнітів, виміряно параметри магніту, взятого з двигуна, що випускається і проведено порівняння цих даних. Магніт з двигуна представлений на рис. 3.1.

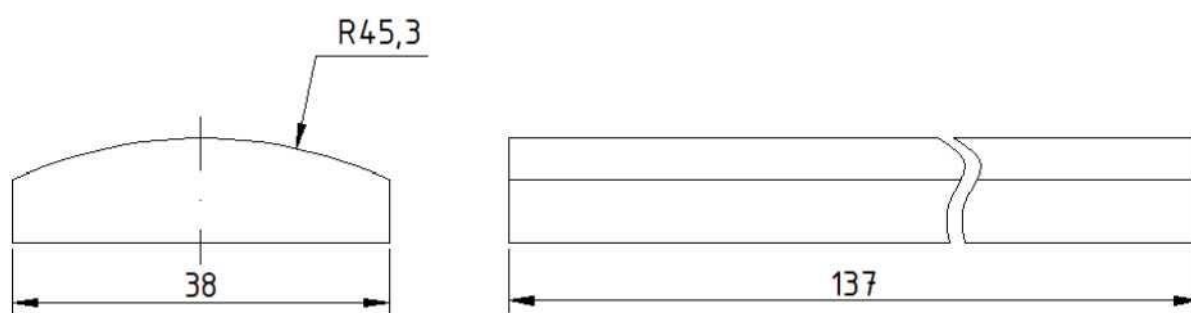


Рисунок 3.1 – Ескіз магніту випускається двигуна

Дані експериментальних вимірювань представлені в табл. 3.1, точки вимірювань на рис. 3.2. Вимірювання зроблено за допомогою тесламетра ЕМ4305.



Рисунок 3.2 – Точки вимірювання індукції на магніті

Таблиця 3.1 – Результати складання індукцій

| Місце виміру | Індукція, Тл |
|--------------|--------------|
| 1-2          | 0,30         |
| 1-3          | 0,23         |
| 1-4          | 0,30         |

Потім зроблено моделювання даного магніту, картина магнітного поля з торця магніту представлена на рис. 3.3, в перерізі магніту на рис. 3.4. При створенні моделі магніту врахована його крива розмагнічування.

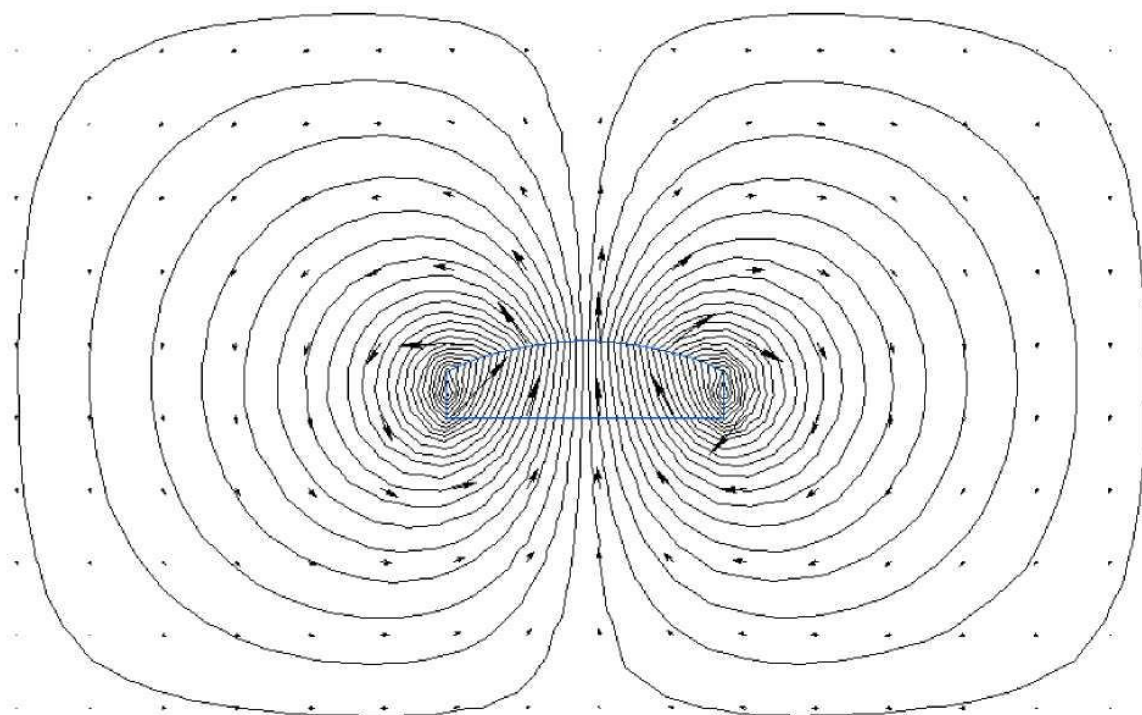


Рисунок 3.3 – Картина магнітного поля з торця магніту

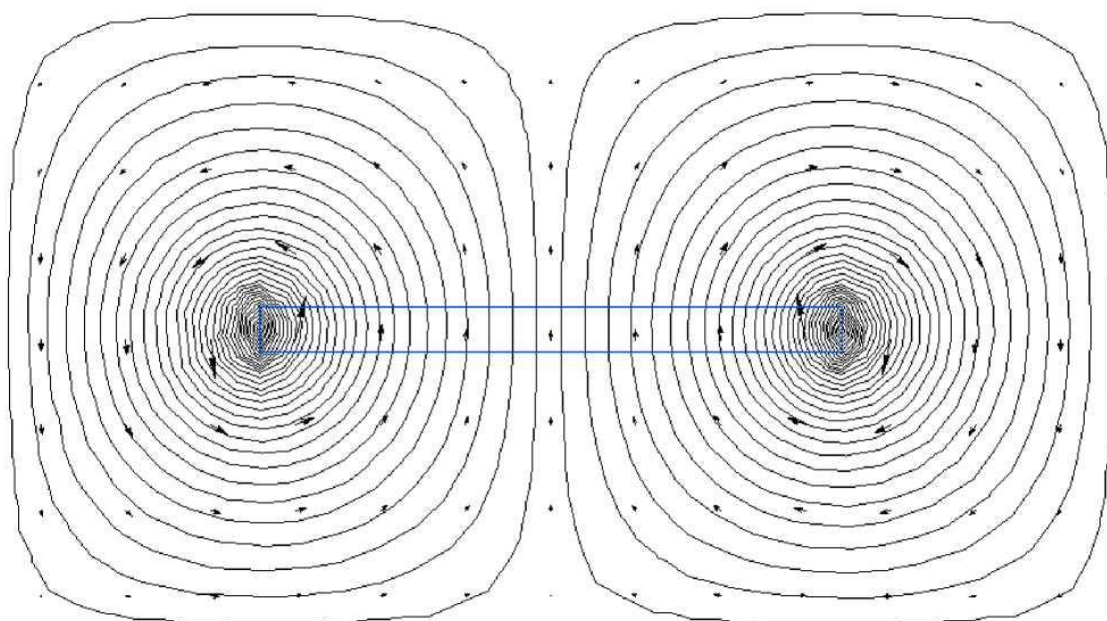


Рисунок 3.4 – Магнітне поле в поздовжньому перерізі магніту

На картині магнітного поля лініями показані лінії магнітної індукції, а також вектори магнітної індукції. Індукція отримана під час побудови моделі, у точках зазначених рис. 3.2, становила:

- точка 1) –  $B = 0,224$  Тл ;
- точка 2) –  $B = 0,192$  Тл ;
- точка 3) –  $B = 0,035$  Тл ;
- точка 4) –  $B = 0,192$  Тл .

Для порівняння з експериментальними значеннями необхідно зробити додавання індукцій за точками, тобто значення індукції в точці 1 складаємо зі значеннями в точках 2, 3, 4 і зводимо результати в табл. 3.2.

Приклад для точки 1-2:

$$B_{1-2} = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}, \quad (3.1)$$

$$B_{1-2} = \sqrt{0,224^2 + 0,192^2} = 0,295,$$

Таблиця 3.2 – Результати складання індукцій

| Точка виміру | Індукція, Тл |
|--------------|--------------|
| 1-2          | 0,295        |
| 1-3          | 0,228        |
| 1-4          | 0,295        |

Як видно з табл 3.2, отримані дані відрізняються від експериментальних не більше 1,7%, звідси можна дійти невтішного висновку про те, що параметри моделі збігаються з параметрами реального магніту і тепер можна з точністю змодельовати магнітне поле магніту, отриманого в електромагнітному розрахунку.

Виробляємо моделювання магніту двигуна, вихідні дані для моделювання магніту отримані в електромагнітному розрахунку, ескіз магніту представлений на рис. 3.5.

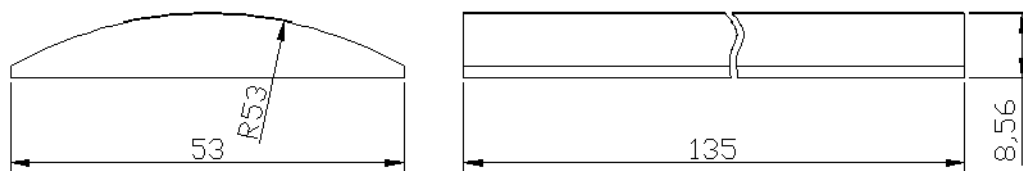


Рисунок 3.5 – Ескіз магніту спроектованого двигуна

Картина магнітного поля отримана з торця магніту представлена рис. 3.6, перерізу магніту, рис. 3.7.

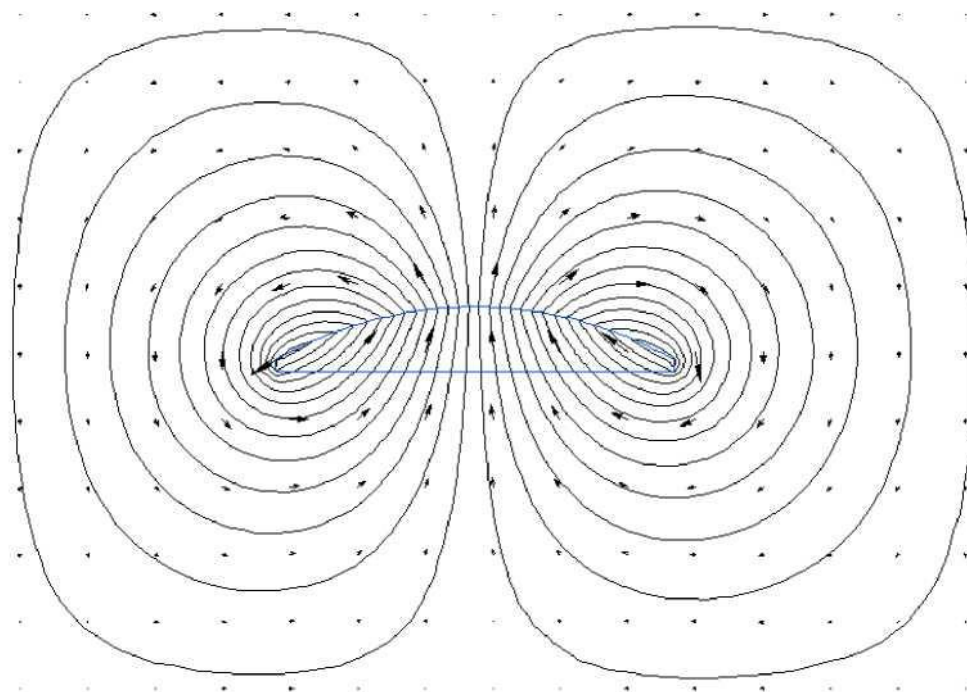


Рисунок 3.6 – Картина магнітного поля з торця магніту

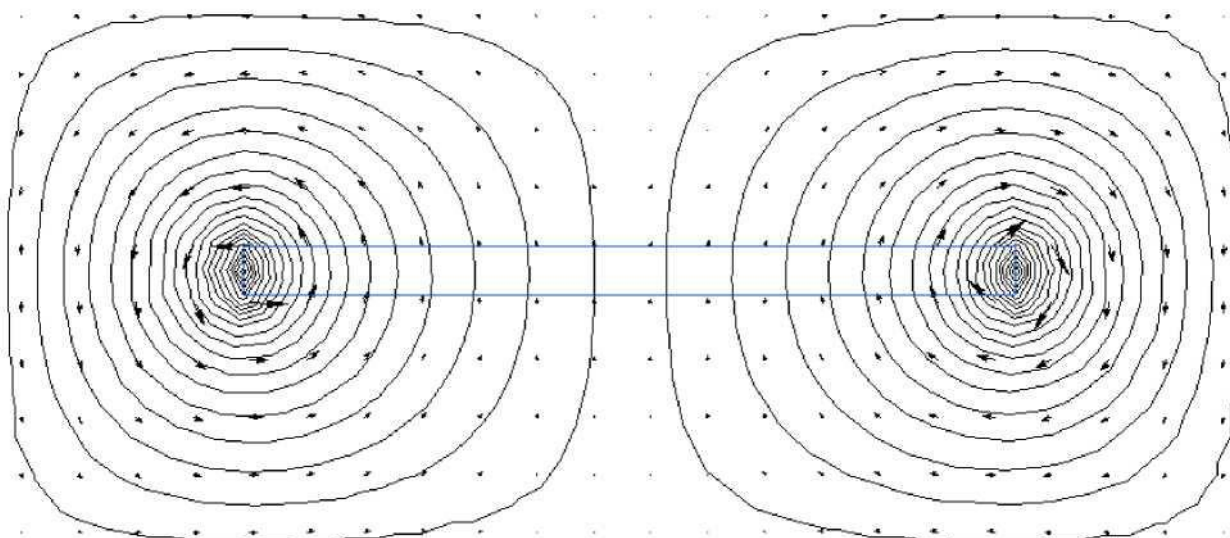


Рисунок 3.7 – Магнітне поле в поздовжньому перерізі магніту

Вимірювання індукції виробляємо у тих місцях, як і за моделюванні попереднього магніту, індукція становила:

- точка 1) –  $B = 0,141$  Тл;
- точка 2) –  $B = 0,162$  Тл ;
- точка 3) –  $B = 0,016$  Тл ;
- точка 4) –  $B = 0,162$  Тл .

Складаємо отримані результати за формулою (3.1) та зводимо до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати складання індукцій

| Точка виміру | Індукція, Тл |
|--------------|--------------|
| 1-2          | 0,215        |
| 1-3          | 0,142        |
| 1-4          | 0,215        |

Далі робимо моделювання ротора в зборі. На рис. 3.8 і рис. 3.9 представлені результати побудов магнітних полів, а також точки вимірів. Результати зведені в табл. 3.2. Вимірювання індукції робимо в тих же місцях магніту, що й у попередньому випадку.

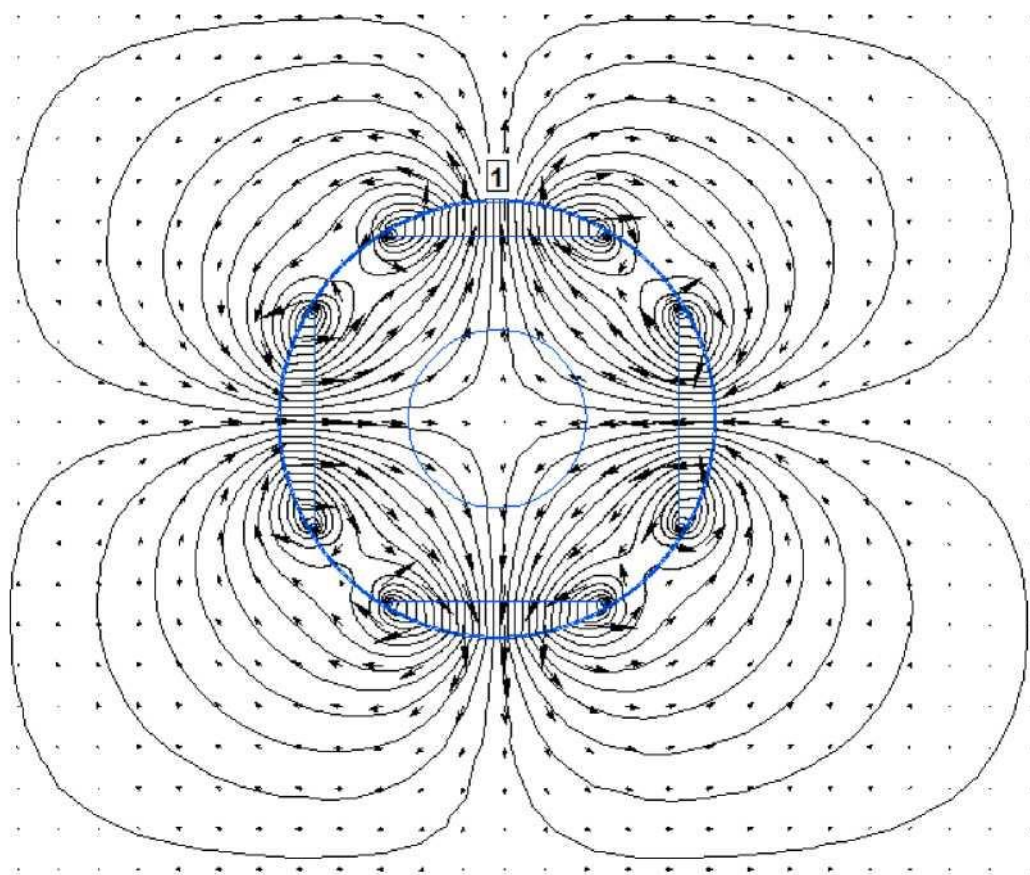


Рисунок 3.8 – Картина магнітного поля перерізу ротора у зборі

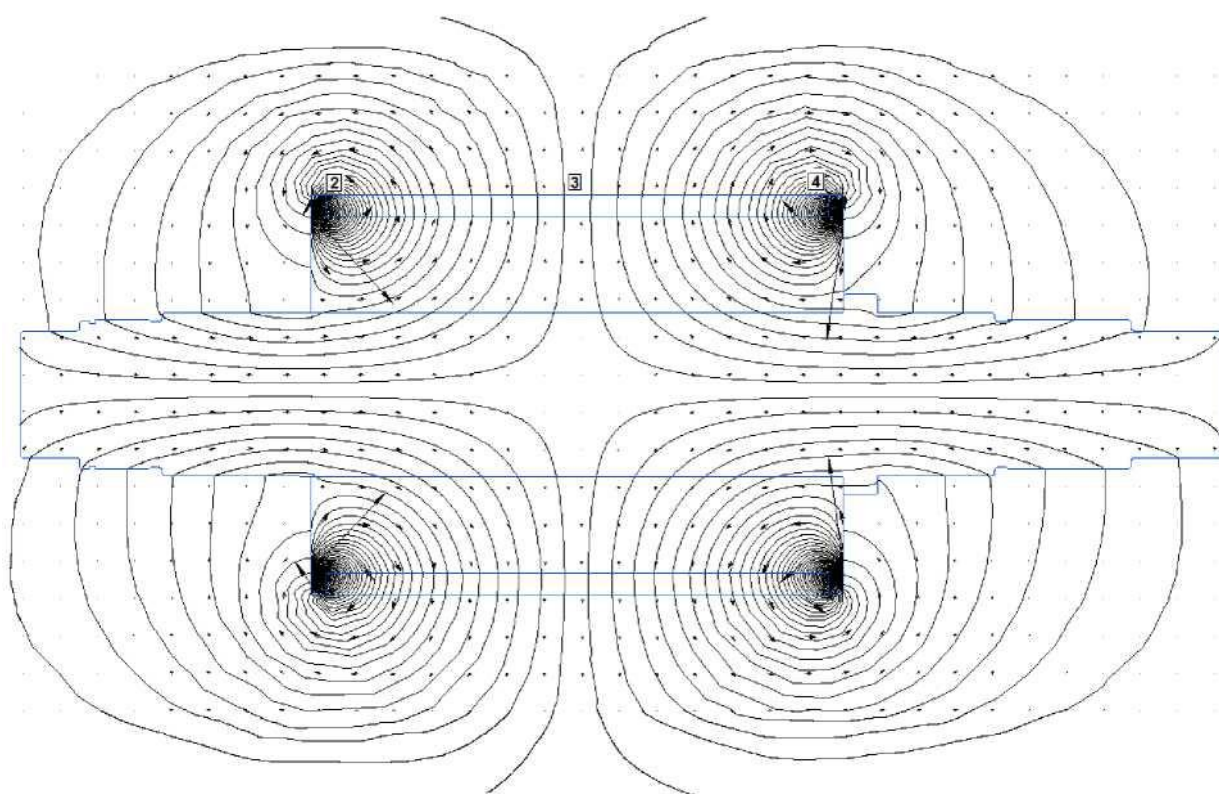


Рисунок 3.9 – Картина магнітного поля в поздовжньому перерізі ротора

Індукції у точках з 1 по 4 складала:

- точка 1) –  $B = 0,215$  Тл;
- точка 2) –  $B = 0,352$  Тл;
- точка 3) –  $B = 0,027$  Тл;
- точка 4) –  $B = 0,352$  Тл.

Складаємо крапки за формулою (3.1), результати зводимо до табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати складання індукцій

| Точка виміру | Індукція, Тл |
|--------------|--------------|
| 1-2          | 0,412        |
| 1-3          | 0,217        |
| 1-4          | 0,412        |

Так як ротор симетричний, аналогічні результати виходять при вимірі інших магнітів.

Під час створення моделей у програмі задавалися такі параметри:

- магнітна проникність повітря у відносних одиницях  $\mu = 1$ , в абсолютних  $\mu = 1,257 \text{ Гн} / \text{м}$ ;
- магнітна проникність магніту в о.  $\mu = 1,1$ , в абсолютних  $\mu = 1,382 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} / \text{м}$  ;
- коерцитивна сила спроектованого магніту  $H_c = 680000 \text{ А} / \text{м}$  ;
- крива намагнічування втулки виготовленої із сталі марки Ст3.

Значення індукції, що вийшло в ході моделювання магнітів і ротора в зборі, можна використовувати при перевірці готових зразків. Це підтверджується виконаним порівнянням експериментальних даних, знятих з реального магніту та даними, отриманими в ході моделювання цього магніту. Магніти складу «неодим-залізо-бір» цілком здатні створювати індукцію в зазорі близько 0,8 Тл, тобто на рівні асинхронних машин, причому основні електромагнітні втрати у такому роторі відсутні. Лінійне навантаження на ротор може бути підвищено без

підвищення загальних втрат. Цим і обумовлюється висока електромеханічна ефективність вентильних двигунів порівняно з іншими безколекторними машинами, наприклад, з асинхронними двигунами.

#### 4 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK

У сучасному світі обійтися без моделювання практично неможливо у будь-якій сфері. Імітаційне моделювання може замінити реальні події, необхідні для отримання конкретних результатів, створення та аналіз яких коштують надто дорого. Або ж може бути нагода, коли проводити реальні експерименти заборонено. Також імітаційне моделювання використовується, коли просто неможливо побудувати аналітичну модель через низку випадкових факторів, наслідків та причинних зв'язків. Останній випадок, коли використовується цей метод - це тоді, коли необхідно імітувати поведінку будь-якої системи протягом даного відрізка часу. Для цього створюються симулятори, які намагаються максимально відтворити якості початкової системи.

MATLAB – пакет прикладних програм для вирішення завдань технічних обчислень та однойменна мова програмування, яка використовується у цьому пакеті. Пакет використовують понад мільйон інженерних та науковців, він працює на більшості сучасних операційних систем.

Simulink – це графічне середовище імітаційного моделювання, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді спрямованих графів, будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні та гібридні, нелінійні та розривні системи. модельно-орієнтований підхід при розробці систем керування, засобів цифрового зв'язку та пристроїв реального часу.

Додаткові пакети розширення Simulink дають змогу вирішувати весь спектр завдань від розробки концепції моделі до тестування, перевірки, генерації коду та апаратної реалізації. Simulink інтегрований у середовище MATLAB, що дозволять використовувати вбудовані математичні алгоритми, потужні засоби обробки даних та наукову графіку. На рис. 4.1 представлена імітаційна модель роботи ВД середовищі MATLAB.

У цій схемі показана робота вентильного двигуна із замкнутим контуром та регулятором струму на двигуні потужністю 13 кВт, 3000 об/хв. Він живиться

інвертором PWM. Перетворювач PWM повністю побудований зі стандартними блоками MATLAB/Simulink. Його вихід проходить через блоки джерела контрольованої напруги, перш ніж застосовується до статора обмоток блоку ВД. Управління ключами інвертора вентильного електродвигуна зазвичай виконується функції положення його ротора. Високі експлуатаційні характеристики, що досягаються таким чином, роблять ВД досить перспективним у діапазоні малих та середніх потужностей. Перемикання комутатора ВД відбувається в залежності від поточного положення ротора. Напівпровідниковий комутатор для живлення обмоток статора ВД – це напівпровідниковий перетворювач, що керується, з жорстким алгоритмом  $120^\circ$  комутації напруг або струмів трьох робочих фаз.

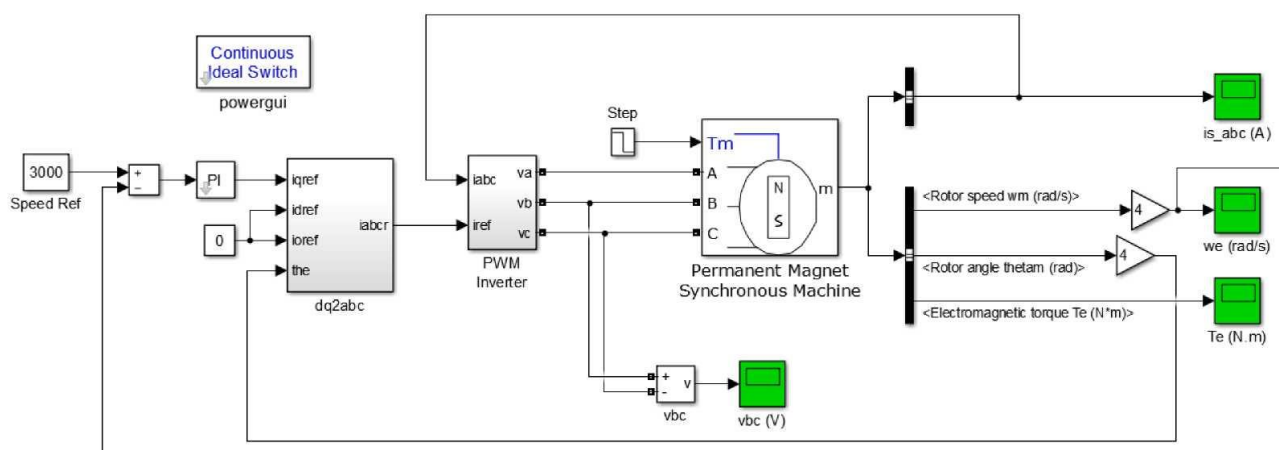


Рисунок 4.1 – Імітаційна модель вентильного двигуна

Використовуються дві петлі управління цієї моделі. Внутрішній контур регулює струми двигуна. Зовнішня петля керує швидкістю двигуна.

Вентильний двигун даного типу виконаний на базі трифазної синхронної машини з постійними магнітами на роторі. Трифазні обмотки статора живляться постійним струмом, що подається по чергові дві послідовно з'єднані фазні обмотки. Перемикання обмоток проводиться транзисторним комутатором, виконаним за трифазною бруківкою. Транзисторні ключі відкриваються та закриваються в залежності від положення ротора двигуна. Схема вентильного двигуна представлена рис. 4.2.

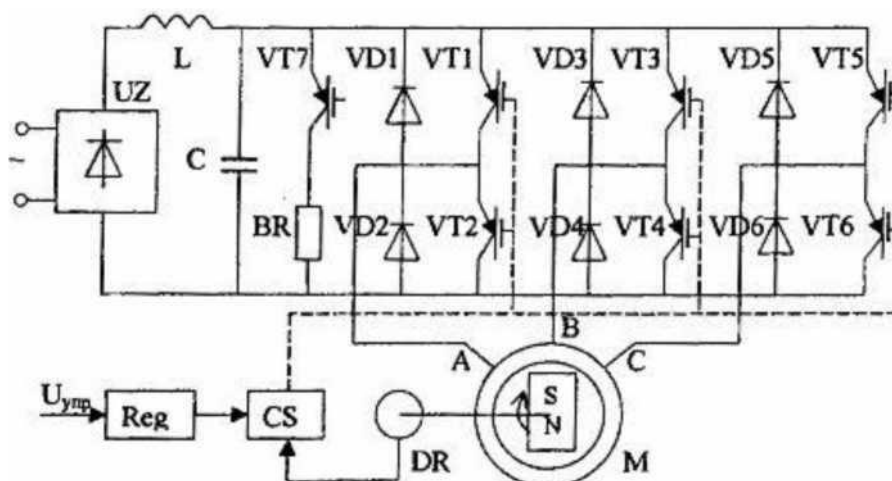


Рисунок 4.2 – Схема вентильного двигуна з транзисторним комутатором

Тут інвертор з амплітудно-імпульсною модуляцією виходу виконаний на IGBT транзисторах, причому амплітуда регулюється завдяки широтно-імпульсній модуляції на проміжному ланці постійного струму.

Взагалі для цієї мети використовуються: тиристорні перетворювачі частоти з автономним інвертором напруги або струму з управлінням живлення і транзисторні перетворювачі частоти з автономним інвертором напруги з управлінням в ШІМ або з релейним регулюванням струму на виході.

Однак інерція двигуна в даній моделі запобігає появі шуму у формі хвилі двигуна. Це можна бачити з графіків характеристик швидкості та моменту, які представлені на рис. 4.3 та рис. 4.4 відповідно.

Таким чином, застосування імітаційної моделі вентильного двигуна дозволяє спрогнозувати поведінку двигуна до виробництва на етапі проектування. Такі моделі будуються у тому, що вони копіюють якості та показники деяких реальних систем. Отримані електромеханічні характеристики двигуна відповідають традиційним машинам постійного струму з магнітоелектричним або незалежним збудженням, тому системи управління вентильним двигуном і будуються за класичним принципом підпорядкованого регулювання координат постійного струму контурами частоти обертання ротора і статора. У цій імітаційній моделі видно, що шум, створюваний інвертором PWM, впливає на

момент  $T_e$ .

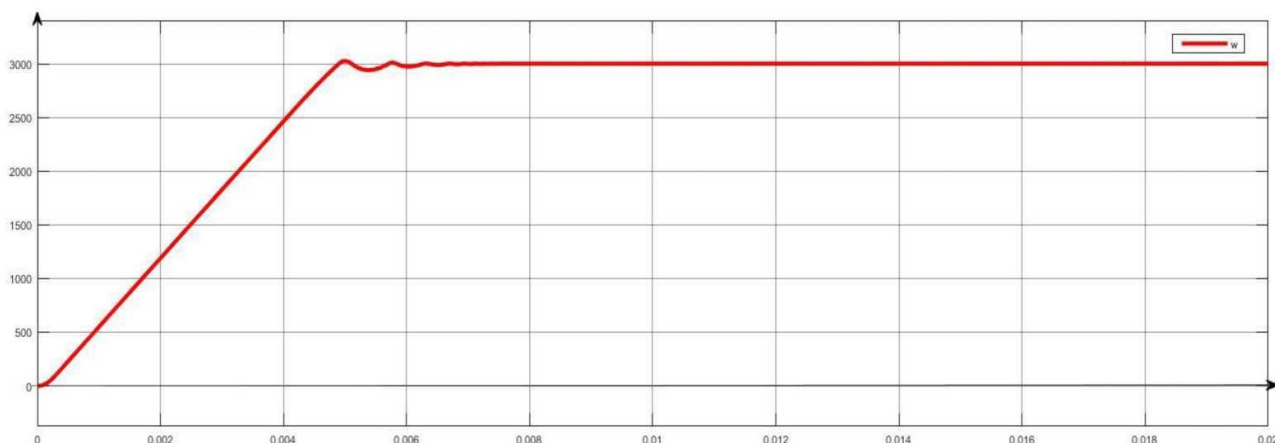


Рисунок 4.3 – Графік швидкості роботи, спроектованого ВД

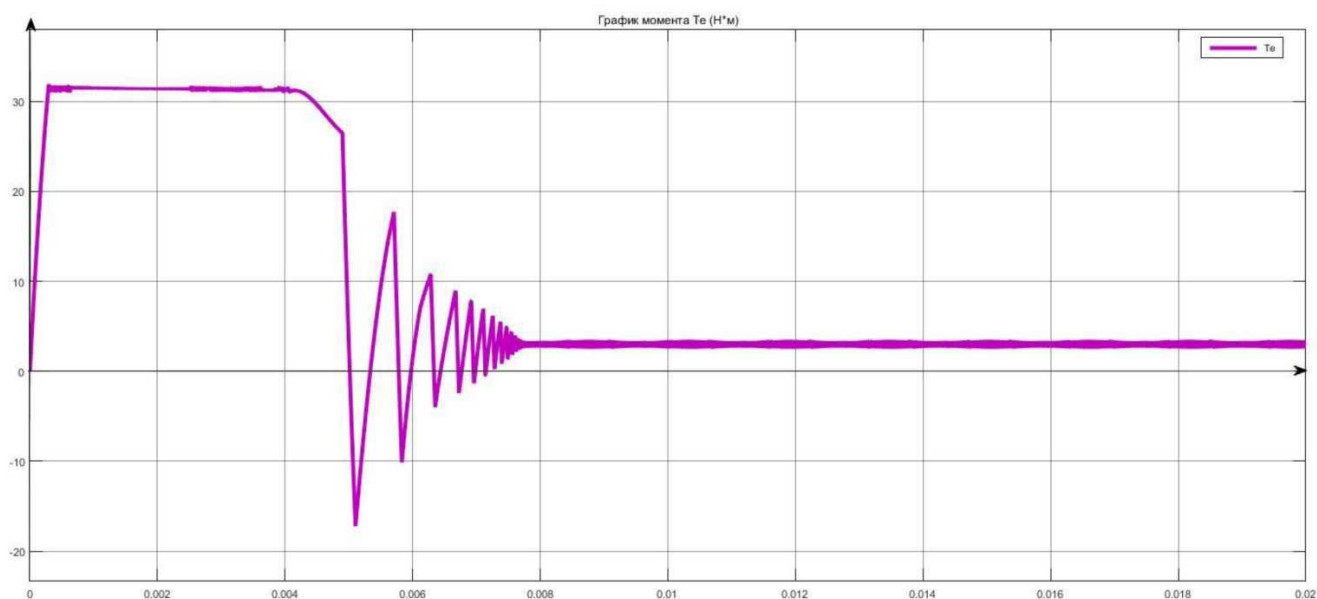


Рисунок 4.4 – Графік моменту для ВД

Момент, створюваний двигуном, визначається взаємодією двох потоків:

- статора, створюваного струмом в обмотках статора,
- ротора, що створюється високоенергетичними постійними магнітами (на основі сплавів самарій-кобальт та інших).

Момент у ВД утворюється внаслідок взаємодії магнітних потоків статора і ротора: магнітний потік статора постійно прагне, як би розгорнути ротор в таке положення, щоб магнітний потік, встановлених на ньому постійних магнітів

збігся у напрямку з магнітним потоком статора.

Найбільший момент, що створюється на валу ротора, буде при куті між векторами потоків рівним  $\pi/2$  і зменшуватиметься до нуля при зближенні векторів потоків.

Після пуску вентильний двигун розганяється до швидкості 3000 об/хв і виходить на режим нормальної роботи за час  $t=0.008$ с. У цей час момент коливається в діапазоні від 30Нм до -15Нм і виходить на нормальну роботу з моментом  $T_e=4$  Нм. Така робота двигуна, змодельована серед MatLab, допомагає зняти необхідні характеристики до його проектування на практиці.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1 Вступ

Для задоволення матеріальних та духовних потреб людині необхідно працювати. В процесі праці людина взаємодіє з засобами виробництва, з виробничим середовищем та з предметами праці. При цьому він, як правило, піддається впливу великого числа факторів, різних по своїй природі, формам проявлення та характеру дії, які впливають на здоров'я та працездатність людини.

Виробничі фактори залежно від наслідків, до яких може привести їх дія, прийнято підрозділяти на небезпечні та шкідливі. Небезпечний виробничий фактор - фактор, вплив якого на працюючого у визначених умовах приводить до травми або різкому погіршенню здоров'я. Шкідливий виробничий фактор - фактор, вплив якого на працюючого у визначених умовах приводить до захворювання або зниженню працездатності. В залежності від рівня та тривалості впливу шкідливий фактор може стати небезпечним. По природі дії на організм людини небезпечні та шкідливі виробничі фактори підрозділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

До фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів відносяться фактори, що характеризують технологічний процес (рухомі машини та механізми, рухомі частини обладнання, пересуваючися вироби, заготовки та матеріали, гострі кромки, заусениці; підвищена або знижена температура поверхней обладнання або матеріалів; підвищене значення електричної напруги, підвищений рівень статичної електрики), та фактори, що характеризують повітря виробничих приміщень (підвищена запиленість та загазованість повітря робітничої зони, метеорологічні умови, підвищений рівень шуму, ультразвукових коливань, вібрації на робітничому місці, недостатня освітленість робітничої зони і т.п.). Хімічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори підрозділяються:

- по характеру впливу на людину на: токсичні (викликають отруєння організму), дратівні, сенсibiliзуючі (викликають алергію), канцерогенні

(викликають злоякісні створення), мутагенні (впливають на змінення спадковості), репродуктивні;

– по шляху проникнення у організм людини: проникаючи через органи дихання, шлунковокишечний тракт, шкіру та слизисті оболонки.

Біологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори містять такі біологічні об'єкти: мікроорганізми (бактерії, віруси та ін.) та продукти їх життєдіяльності, макроорганізми (рослини та тварини). Психофізіологічн-фізичні та нервово-психічні перевантаження. (Повний перелік небезпечних та шкідливих виробничих факторів дається у ГОСТ 12. 0. 003-74).

Охорона праці - система правових, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на забезпечення збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці. Дисципліна охорони праці - комплексна дисципліна. Вона містить:

I. Правові та організаційні аспекти охорони праці (законодавство з охорони праці).

II. Виробничу санітарію:

а) оздоровлення повітря робочого середовища (мікроклімат, запиленість, вентиляція);

б) освітлення виробничих приміщень;

в) шум;

г) вібрація;

д) іонізуючі випромінювання .

III. Техніку безпеки:

а) електробезпека;

б) безпека експлуатації герметичних систем, що знаходяться під тиском;

в) безпека експлуатації пристроїв, машин та механізмів.

IV. Пожежну безпеку.

Виробнича санітарія - система організаційних заходів та технічних засобів, що запобігають впливові на працюючого шкідливих виробничих факторів.

Техніка безпеки - система організаційних заходів та технічних засобів, що

запобігають вплив на працюючого небезпечних виробничих факторів. Пожежна безпека - система організаційних заходів та технічних засобів, які запобігають виникненню пожеж та захищають від них.

Закон України, що визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, регулює за участю відповідних державних органів відносини між власником підприємства, установи і організації або уповноваженим ним органом (далі - власник) і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні. Прийнятий 14 жовтня 1992р.

## 5.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на екіпаж судна-носія при експлуатації підводного апарату

Під час виконання робіт на береговій частині, акваторії та суднах на працівників можуть діяти такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори, вплив яких на працівника за певних умов може викликати професійне захворювання, тимчасове або стійке зниження працездатності, підвищити частоту соматичних та інфекційних захворювань. До професійних хвороб відносять захворювання, що викликані професійними шкідливостями. Професійні шкідливості - це фактори виробничого середовища або трудового процесу, які спричиняють несприятливу дію на організм працюючих і при певній силі та тривалості їх дії здатні викликати патологічні стани або нозологічні форми захворювань.

### I Фізичні:

- 1) машини і механізми, що рухаються;
- 2) рухомі частини виробничого обладнання;
- 3) підвищена небезпека перевантажувальних робіт;
- 4) слизькість підлоги, суднової палуби та робочих місць;
- 5) хитами судна під час виконання суднових робіт;
- 6) обрив натягнутих під навантаженням канатів, тросів і ланцюгів;

- 7) імовірність падіння з висоти, у трюм і за борт суден;
- 8) великі глибини води та можливість утоплення людей;
- 9) підвищена запиленість повітря робочої зони;
- 10) пожежо- та вибухонебезпечність палива й інших застосовуваних нафтопродуктів;
- 11) підвищена або знижена вологість повітря;
- 12) підвищена або знижена температура повітря робочої зони,
- 13) поверхні обладнання, трубопроводів;
- 14) несприятливі гідрометеорологічні умови - туман, гроза, злива, шторм тощо;
- 15) підвищений рівень шуму та вібрації на робочих місцях;
- 16) підвищена або знижена рухомість повітря;
- 17) надмірна швидкість наростання тиску, підвищений парціальний тиск кисню, підвищений парціальний тиск азоту, підвищена концентрація вуглекислого газу, вуглеводнів, окисів вуглецю та окису азоту під час виконання водолазних робіт;
- 18) підвищений рівень сонячної радіації;
- 19) підвищена напруга в електричній мережі, замикання якої може пройти через тіло людини;
- 20) електромагнітне випромінювання;
- 21) відсутність або недостатність природного освітлення;
- 22) недостатня освітленість робочої зони.

## II Хімічні:

- 1) підвищена загазованість повітря робочої зони;
- 2) токсичність, шкідливість і подразнювальна дія мийних, дезінфекційних засобів та інших небезпечних рідин і речовин;
- 3) за характером впливу на організм людини - токсичні, дратівні, сенсibiliзуювальні;
- 4) за шляхом проникнення в організм людини - через органи дихання, шкірні покриви і слизові оболонки.

### III Біологічні:

1) патогенні мікроорганізми і продукти їх життєдіяльності.

### IV Психофізіологічні:

1) фізичні перевантаження (статичні та динамічні);

2) нервово-психічні перевантаження (робота на висоті, монотонність праці, емоційні перевантаження тощо).

За діючим законодавством встановлені гранично допустимі концентрації токсичних речовин і гранично допустимі рівні впливу професійних шкідливостей, які виключають можливість розвитку як гострих, так і хронічних професійних захворювань.

Завдяки технічному прогресу, широкому впровадженню механізації і автоматизації виробничих процесів, модернізації обладнання, здійсненню необхідних санітарно-технічних заходів, професійні шкідливості на багатьох підприємствах в нашій країні в значній мірі ліквідовані або їх рівень знижений до безпечних величин. Разом з тим, на сучасному етапі розвитку науки і техніки, не у всіх випадках можливо повністю уникнути впливу професійних шкідливостей. Крім того створення та впровадження в промисловість і сільське господарство нових видів виробництва ставлять задачу вивчення нових факторів праці з точки зору впливу їх на організм з метою розробки ефективних заходів профілактики.

Професійні шкідливості не тільки здатні викликати професійні хвороби, але й можуть проявити вплив на перебіг загальних, етіологічно не пов'язаних з трудовою діяльністю, захворювань серцево-судинної і нервової систем, органів дихання, кровотворних органів, опорно-рухового апарату, шкіри, викликаючи їх загострення, ускладнення, рецидивування.

При роботі на судні професійні шкідливості можуть призвести до захворювань. Приклади таких захворювань та чинники що можуть їх спричинити вказані в табл. 5.1

Таблиця 5.1 – Список професійних захворювань

| Найменування хвороб                                                                                                                                                                                                                                    | Небезпечні та шкідливі речовини і виробничі фактори, вплив яких може викликати розвиток професійних захворювань        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вібраційна хвороба                                                                                                                                                                                                                                     | Тривалий систематичний вплив виробничої локальної вібрації, що передається на руки працюючих та вібрації робочих місць |
| Невротична приглухуватість                                                                                                                                                                                                                             | Систематичний вплив виробничого шуму                                                                                   |
| Пперегрів:<br>- гострий (тепловий удар, судомний стан);<br>- хронічний (вегетативно-судинна дисфункція з перманентним або пароксизмальним перебігом, з порушенням терморегуляції, електролітного обміну та зниженням терморезистентності еритроцитів). | Висока температура та інтенсивне теплове випромінювання у робочій зоні                                                 |
| Онїходистрофії, механічні епідермози (омозолістості та інші)                                                                                                                                                                                           | Обробка мїздри, температурні і метеорологічні фактори                                                                  |
| Виразене варикозне розширення вен на ногах, ускладнене                                                                                                                                                                                                 | Тривале перебування у вимушеній робочій позі стоячи                                                                    |

Згідно інструкції по застосуванню „Списку професійних хвороб” діагноз гострого професійного захворювання (інтоксикації) може бути поставлений лікарем будь-якого лікувально-профілактичного закладу після обов’язкової консультації з спеціалістом профпатологом та лікарем гігієни праці територіальної санітарно-епідеміологічної станції.

Втрата працездатності при професійних хворобах може бути частковою або повною. При цьому розрізняють наступні види втрати працездатності: тимчасову, тривалу і постійну.

Питання тимчасової непрацездатності вирішуються в лікувально-профілактичних установах (медико-санітарні частини поліклініки), лікарсько-консультативними комісіями (ЛКК).

При повній тимчасовій втраті працездатності, яка виникає при гострих

формах і загостреннях хронічних форм професійних захворювань та інтоксикацій, на час лікування видається лікарняний листок.

Часткова тимчасова втрата працездатності у хворих професійними захворюваннями зустрічаються в тих випадках, коли за характером захворювання вони тимчасово не можуть виконувати свою звичайну роботу, але без шкоди для здоров'я можуть бути використані на інших роботах.

При тимчасовому переведенні на іншу роботу в зв'язку з професійним захворюванням за рішенням ЛКК хворому видається так званий трудовий (доплатний) лікарняний листок, згідно якого проводиться доплата до попереднього середнього заробітку. Трудовий лікарняний листок одноразово видається не більше як на 10 днів, а максимальний термін продовження його не повинен перевищувати 2 місяців в календарному році.

Питанням тривалої і постійної втрати працездатності займається медико-соціальна експертна комісія, яка відноситься до органів соціального забезпечення, вона встановлює групи інвалідності, а також відсоток втрати професійної працездатності по направленню ЛКК.

### 5.3 Розрахунок загального освітлення приміщення морської лабораторії «Дельта»

Вхідні дані для розрахунку загального освітлення лабораторії:

$A = 5$  – довжина лабораторії, м;

$B = 4$  – ширина лабораторії, м;

$H = 2,2$  – висота лабораторії, м;

$\rho_{\text{под}} = 30$  – коефіцієнт відображення подволоку, %;

$\rho_{\text{пер}} = 10$  – коефіцієнт відображення переборок, %;

$\rho_{\text{нов}} = 10$  – коефіцієнт відображення робочої поверхні, %.

Виконаємо розрахунок загального освітлення приміщення морської лабораторії «Дельта» використовуючи світильники з люмінесцентними лампами. Обираємо судовий світильник типу СС-124 з однією люмінесцентною лампою

ЛБ20.

Визначимо площу приміщення за формулою:

$$S = A \cdot B = 5 \cdot 4 = 20 \text{ м}^2. \quad (9.1)$$

Знаходимо індекс приміщення за формулою:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{5 \cdot 4}{2,2 \cdot (5 + 4)} \approx 1. \quad (9.2)$$

Для житлового приміщення  $H = h$ .

Для обраного світильника типу СС-124 коефіцієнт використання світлового потоку:

$$\eta = 60\% = 0,6. \quad (9.3)$$

для лабораторії  $E_{\min} = 150 \text{ лк}$ ,  $K_c = 1,5$ ,  $Z = 1,1$ ,  $n = 1$ .

Номінальний світловий потік  $\Phi$  лампи ЛБ20 дорівнює 1200 лм. Визначимо необхідну кількість світильників:

$$N = \frac{E_{\min} \cdot S \cdot K_c \cdot Z}{n \cdot \Phi \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{1 \cdot 1200 \cdot 0,6} \approx 7. \quad (9.4)$$

Таким чином розраховано, що для загального освітлення приміщення морської лабораторії «Дельта» можна використати судові світильники типу СС-124, з люмінесцентними лампами ЛБ20, у кількості – 7 штук, які повністю відповідатимуть нормам та задовольнятимуть потребам працюючого персоналу.

#### 5.4 Заходи з техніки безпеки під час експлуатації судна

Усе електрообладнання та електроустановки конструюються, встановлюються, діють і утримуються таким чином, щоб запобігти будь-якій небезпеці, і відповідають нормам, визнаним компетентним органом влади.

При розвантаженні або навантаженні судна біля причалу чи біля борту іншого судна передбачають та утримують в готовності належні і відповідним чином встановлені й закріплені безпечні засоби доступу на судно.

Під час перевезення працівників водним шляхом на судно чи з судна або в інше місце та назад вживають належних заходів для забезпечення їхньої безпечної посадки, перевезення та висадки; визначають умови, яким повинні відповідати судна, що використовуються для цієї мети. Під час перевезення працівників з місця роботи або на місце роботи на березі, перевізні засоби, які надає роботодавець, повинні бути безпечними.

Доступ до трюму чи на вантажну палубу судна забезпечується за допомогою закріпленого трапового марша або, де це практично недоцільно, закріпленого трапа чи кріпильних рейок або опор відповідних розмірів, достатньої міцності та належної конструкції;

Жодна кришка люку чи бімс не повинні використовуватися, якщо вони не мають надійної конструкції, достатньої міцності і не утримуються належним чином для мети використання. Якщо для операцій з кришками люків використовується підіймальний механізм, вони забезпечуються легко доступними і відповідними кріпленнями для фіксування строп або інших підіймальних пристроїв. Якщо кришки люків та бімси не є взаємозамінними, на них наносять чіткі позначки з указанням того люку, до якого вони належать, а також їхнього положення при цьому. Лише уповноваженій особі (коли це практично можливо - членові екіпажу судна) дозволяється відкривати чи закривати механічно діючі кришки люків; кришки люків не відкриваються або не закриваються, якщо така дія створює загрозу заподіяння травми тій чи іншій особі.

Вживають належних заходів для огороження будь-якого отвору в палубі чи

на ній, де працівники зобов'язані працювати і який може становити небезпеку падіння для працівників або транспортних засобів. Кожний люк, не забезпечений комінгсом належної висоти та міцності, закривається або його огорожа знову ставиться на місце, коли люк більше не використовується, за винятком робочих перерв короткої тривалості.

Вживають усіх потрібних заходів для забезпечення безпеки працівників, які повинні перебувати в трюмі чи на вантажній палубі судна під час роботи там механічних засобів або під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій за допомогою механічних пристроїв.

Кожний підймальний механізм і кожний підймальний пристрій випробовуються згідно з національними законодавством або правилами компетентною особою до першого застосування і після будь-якої істотної зміни чи ремонту будь-якої деталі, котра може вплинути на їхню безпечність. Підймальні механізми, котрі є частиною обладнання судна, проходять чергові випробування не рідше ніж один раз на п'ять років. Підймальні механізми, що працюють на березі, піддаються черговому випробуванню через проміжки часу, приписані компетентним органом влади. Після завершення кожного випробування підймального механізму або підймального пристрою, проведеного відповідно до цієї статті, вони ретельно перевіряються та засвідчуються особою, яка проводила це випробування.

Вживають належних заходів для захисту працівників від шкідливого впливу надмірного шуму на робочому місці.

Засоби індивідуального захисту та захисний одяг роботодавець утримує належним чином.

У разі нещасного випадку забезпечуються належні засоби, куди входить підготовлений персонал, для порятунку будь-якої людини, яка перебуває у небезпеці, для надання першої допомоги та для евакуації потерпілих осіб, не наражаючи їх, наскільки це практично можливо, на нову небезпеку.

## 5.5 Висновки до розділу 5

В зв'язку з тим, що в більшості випадків експлуатація підводних апаратів відбувається з борта судна-носія, правила техніки безпеки під час перебуванні на судні розповсюджуються і на роботи пов'язані з підводним апаратом. Окрім того необхідно пам'ятати, що оператори телекерованого підводного робота знаходяться під впливом випромінювання моніторів. Додержання всіх правил безпеки необхідно для забезпечення безпечної роботи екіпажу.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційної роботі основні дослідження було спрямовано дослідження вентильного двигуна потужністю 13 кВт. Було проведено аналіз літератури з тематики дослідження.

Зроблено електромагнітний розрахунок. Зроблено проектування магніту ротора. Розроблено імітаційну модель, що дозволяє досліджувати розрахований вентильний двигун у середовищі MATLAB.

Математичне моделювання вентильного двигуна охоплює основні розділи електромагнітного розрахунку, такі як вибір основних параметрів, магнітів, ротора, статора та розрахунок магнітного ланцюга. Також зроблено електромагнітний розрахунок, у якому визначено геометричні розміри магнітів зі сплаву неодим-железо-бор, ширина магніту становила 53 мм, довжина 135 мм, висота 8,6 мм. Розраховано та побудовано робочі характеристики, визначено енергетичні показники, коефіцієнт корисної дії становив  $\eta = 0,937$  та коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = 0,906$ . Розроблено алгоритм математичного моделювання вентильного двигуна.

Примодельовання магніту в середовищі Elcut, значення індукції, що вийшло, можна використовувати при перевірці готових зразків. Це підтверджується виконаним порівнянням експериментальних даних з даними, отриманими в ході моделювання цього магніту. Магніти складу «неодим-залізо-бір» цілком здатні створювати індукцію в зазорі близько 0,8 Тл, тобто на рівні асинхронних машин, причому основні електромагнітні втрати у такому роторі відсутні.

При імітаційному моделюванні вентильного двигуна в середовищі МАТАВ можна дослідити робочі характеристики двигуна до виробництва, на етапі проектування. Таке моделювання копіює якість та характеристики реальних систем. Електромеханічні характеристики двигуна відповідають традиційним машинам постійного струму з магнітоелектричним або незалежним збудженням, тому системи управління вентильним двигуном і будуються за класичним

принципом підпорядкованого регулювання координат постійного струму контурами частоти обертання ротора і статора.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kuznetsova, Y., Kuznetsov, V., Tryputen, M., Kuznetsova, A., Tryputen, M., Babyak, M. “Development and Verification of Dynamic Electromagnetic Model of Asynchronous Motor Operating in Terms of Poor-Quality Electric Power” (2019) Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019, pp. 350–353.
2. Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2003. – 327 с.
3. Юхимчук В. Д. Технологія виробництва електричних машин: Підручник / В.Д. Юхимчук – Х.: Тім Пабліш Груп, 2014. – 750 с.
4. Яцун М. А. Електричні машини: підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 464 с.:іл.
5. Осташевський М. О., Юр’єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навчальний посібник. Київ: Каравела, 2018. 454 с.:іл.
6. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини. Підручник для вузів. Київ: Знання, 2009. 399 с.:іл.
7. Д. В. Ципленков, О. Б Іванов, О. В. Бобров, В. В. Кузнецов, В. В. Артемчук, М. О. Баб’як Проектування електричних машин: навч. посіб. Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. 408 с.
8. М. М. Заблудський, В. Є. Плюгін Системи автоматизованого проектування електромеханічних пристроїв: навч. посіб. Алчевськ: ДонНТУ, 2012.