

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка установки для дослідження електродвигунів постійного струму електропобутової техніки

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТМ-23-1


Підпис

Вальоса В.Л.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

проф. Білий Л.А.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

доц. Тимошук О.Г.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

17 12 2024 р.

Хмельницький 2024


ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр і назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н./доц. Неймак В.С.

 12 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Вальоса В'ячеслав Леонідович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка установки для дослідження електродвигунів постійного струму електропобутової техніки

керівник роботи проф. Білий Л.А.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____
3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики установок – аналогів та електропобутової техніки

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз конструктивних особливостей малопотужних двигунів постійного струму. 2. Розробка установки для дослідження електродвигунів постійного струму електропобутової техніки. 3. Експериментальне визначення параметрів двигуна постійного струму з постійними магнітами. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Конструктивні особливості двигунів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Типи двигунів постійного струму. Документ оглядовий (A1). Аркуш 3. Стенд для дослідження ДПС з стрічковим гальмом. Схема комбінована (A2)+Стенд для дослідження ДПС з електромагнітним гальмом (A2). Аркуш 4. Стенд для дослідження ДПС. Складальне креслення (A1). Аркуш 5. Стенд для дослідження ДПС. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 6, 7. Результати досліджень ДПС. Розрахунки (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1. Огляд та аналіз конструктивних особливостей малопотужних двигунів постійного струму	до 29.10.24р.	
2. Розробка установки для дослідження електродвигунів постійного струму електропобутової техніки	до 17.11.24р.	
3. Експериментальне визначення параметрів двигуна постійного струму з постійними магнітами	до 24.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

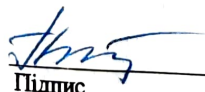
Студент



Підпис

В.Л. Вальоса
Ініціали, прізвище

Керівник роботи



Підпис

Л.А. Білий
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові _____

Вальоса В'ячеслав Леонідович

2. Тема магістерської роботи Розробка установки для дослідження електродвигунів постійного струму електропобутової техніки

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 7 арк., сторінок записки 68

5. Сучасне виробництво активно використовує електрифіковані машини та агрегати, зокрема електродвигуни постійного струму з постійними магнітами. Ці двигуни відзначаються простотою конструкції завдяки відсутності обмотки збудження, що знижує їх габарити, масу і виробничі витрати. Висока енергоефективність забезпечується відсутністю втрат на збудження та стабільністю магнітного потоку, незалежного від змін температури, напруги або частоти обертання. Електродвигуни постійного струму з постійними магнітами є ключовим елементом сучасних технологій, який сприяє розширенню можливостей автоматизованих систем і підвищенню їхньої ефективності. Тому тема магістерської роботи є актуальною завдяки необхідності створення стенду для дослідження електродвигуна постійного струму.

В магістерській роботі розроблено установку для дослідження електродвигунів постійного струму електропобутової техніки. В першому розділі проведено огляд та аналіз конструктивних особливостей малопотужних двигунів постійного струму. В другому здійснено розробку установки для дослідження електродвигунів постійного струму електропобутової техніки. В третьому розділі виконано експериментальне визначення параметрів двигуна постійного струму з постійними магнітами.

Підпис студента _____

" 17 " 12 20 24 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 5 від " 27 " 12 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК _____

Рекомендації ЕК _____

Особливі відмітки _____


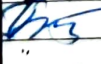



Технічний секретар _____

" 27 " 12 20 24 р.

ЗМІСТ

		стор.
	Вступ	6
1	Огляд та аналіз конструктивних особливостей малопотужних двигунів постійного струму	8
1.1	Електродвигуни постійного струму з постійними магнітами: типи та особливості конструкції	8
1.2	Особливості виконавчих двигунів постійного струму з збудженням від постійних магнітів	15
1.3	Двигуни постійного струму з гладким безпазовим якорем: переваги та недоліки	18
1.4	Безконтактні виконавчі двигуни: теорія та практика	18
1.5	Високошвидкісні виконавчі малоінерційні двигуни: теорія і практика	20
1.6	Електродвигуни з друкованою обмоткою та мінімальною інерцією	20
1.7	Електродвигуни з звичайною обмоткою якоря та малою інерцією	25
1.8	Технології керування частотою обертання двигунів з постійними магнітами	27
1.9	Аналіз робочих режимів двигуна постійного струму з постійними магнітами	28
1.10	Задачі, які необхідно вирішити в роботі	31
1.11	Висновки до першого розділу	31
2	Розробка установки для дослідження електродвигунів постійного струму електропобутової техніки	33
2.1	Теоретичні аспекти розробки електричної схеми стенда	33

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Вальоса			Розробка установки для дослідження електродвигунів постійного струму електропобутової техніки Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Білий				М	4	90
Н контр.					ХНУ гр. ЕТМ-23-1			
Затвер.		Поліщук						

2.2	Розробка комбінованої схеми лабораторного стенду для дослідження характеристик двигунів постійного струму з постійними магнітами	36
2.3	Розробка цифрового пристрою для вимірювання частоти обертання	41
2.4	Розробка конструкції стенду для дослідження характеристик двигунів постійного струму з постійними магнітами	43
2.5	Загальний вигляд установки для визначення параметрів двигунів постійного струму з постійними магнітами	44
2.6	Висновки до другого розділу	45
3	Експериментальне визначення параметрів двигуна постійного струму з постійними магнітами	46
3.1	Схема підключення і тестовий запуск двигуна постійного струму	46
3.2	Робочі характеристики двигуна постійного струму з постійними магнітами	46
3.3	Висновки до третього розділу	63
	Висновки	64
	Перелік джерел посилання	66
	Додаток А	

ВСТУП

Сучасне виробництво активно використовує електрифіковані машини та агрегати, зокрема електродвигуни постійного струму з постійними магнітами [1, 2]. Ці двигуни відзначаються простотою конструкції завдяки відсутності обмотки збудження, що знижує їх габарити, масу і виробничі витрати. Висока енергоефективність забезпечується відсутністю втрат на збудження та стабільністю магнітного потоку, незалежного від змін температури, напруги або частоти обертання. Ще однією перевагою є підвищена надійність, обумовлена відсутністю пробою обмотки збудження і меншою кількістю елементів, що піддаються зносу. Завдяки цим характеристикам двигуни з постійними магнітами широко використовуються у виробничому обладнанні, транспорті, автоматизованих системах, медичному обладнанні, побутових пристроях та робототехніці.

Дослідження таких двигунів є актуальним у контексті зростаючої потреби в енергоефективних і компактних електромеханічних системах. Ці двигуни забезпечують не лише низький рівень енергоспоживання, а й точне керування, здатність працювати в широкому діапазоні навантажень і менший нагрів під час експлуатації. Це робить їх придатними для створення інноваційних рішень у промисловості, автоматизації та побуті. Оптимізація їх параметрів дозволяє розширити галузі застосування, підвищити продуктивність, зменшити експлуатаційні витрати і забезпечити стале зростання технологій. У промисловості ці двигуни використовуються для прецизійного управління, а в побуті - для енергоефективних пристроїв, таких як вентилятори, електроінструменти та побутова техніка. Електродвигуни постійного струму з постійними магнітами є ключовим елементом сучасних технологій, який сприяє розширенню можливостей автоматизованих систем і підвищенню їхньої ефективності. Тому тема магістерської роботи є актуальною завдяки

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

необхідності створення стенду для дослідження електродвигуна постійного струму типу ДПМ–80–12 [3].

Метою роботи є аналіз електромагнітних процесів у двигуні постійного струму з постійними магнітами, отримання його робочих характеристик і параметрів, що дозволить оцінити можливості його подальшого використання.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МАЛОПОТУЖНИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Електродвигуни постійного струму з постійними магнітами: типи та особливості конструкції

Електродвигуни постійного струму з потужністю від долей вата до сотень ват знаходять широке застосування у приводах різних механізмів автономних систем. Вони використовуються на суднах, літаках, автомобілях, орбітальних космічних станціях, у промислових роботах, переносних побутових приладах, іграшках тощо.

Характеристики та властивості електричних машин постійного струму значною мірою залежать від способу збудження. Згідно з класифікацією, існують електродвигуни з електромагнітним збудженням та збудженням від постійних магнітів [4]. Зазвичай електродвигуни з електромагнітним збудженням проектується на більшу потужність (від кількох десятків ват і вище).

Електричні машини постійного струму за способом збудження поділяються на наступні типи [5]:

- незалежного збудження, у яких обмотка збудження (ОЗ) живиться від постійного джерела струму, яке не пов'язане електрично з обмоткою якоря (рис. 1.1, а, лист [МРМА24.00.00.000ДО1]);
- паралельного збудження, у яких обмотка збудження з'єднана паралельно з обмоткою якоря (рис. 1.1, б);
- послідовного збудження, де обмотка збудження підключена послідовно з обмоткою якоря (рис. 1.1, в);
- змішаного збудження, що мають дві обмотки збудження: паралельну (ОЗ1) і послідовну (ОЗ2) (рис. 1.1, г);

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- збудження від постійних магнітів, де магнітний потік забезпечується постійними магнітами (рис. 1.1, д).

Різноманітність способів збудження дозволяє адаптувати електродвигуни постійного струму для широкого спектру завдань, забезпечуючи необхідні характеристики для кожного конкретного застосування.

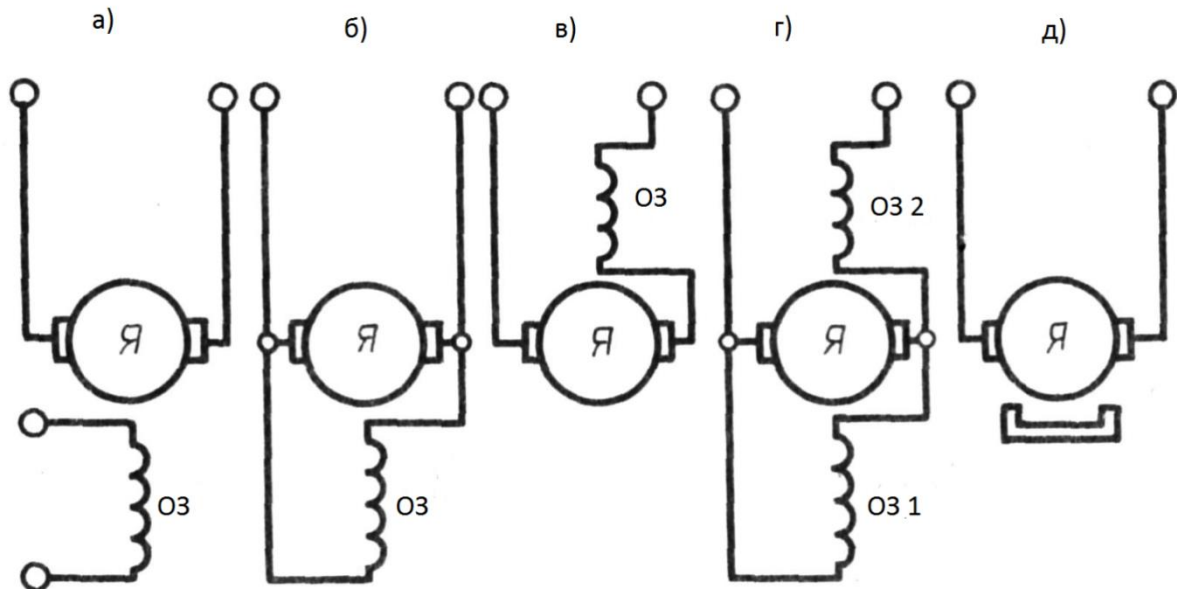
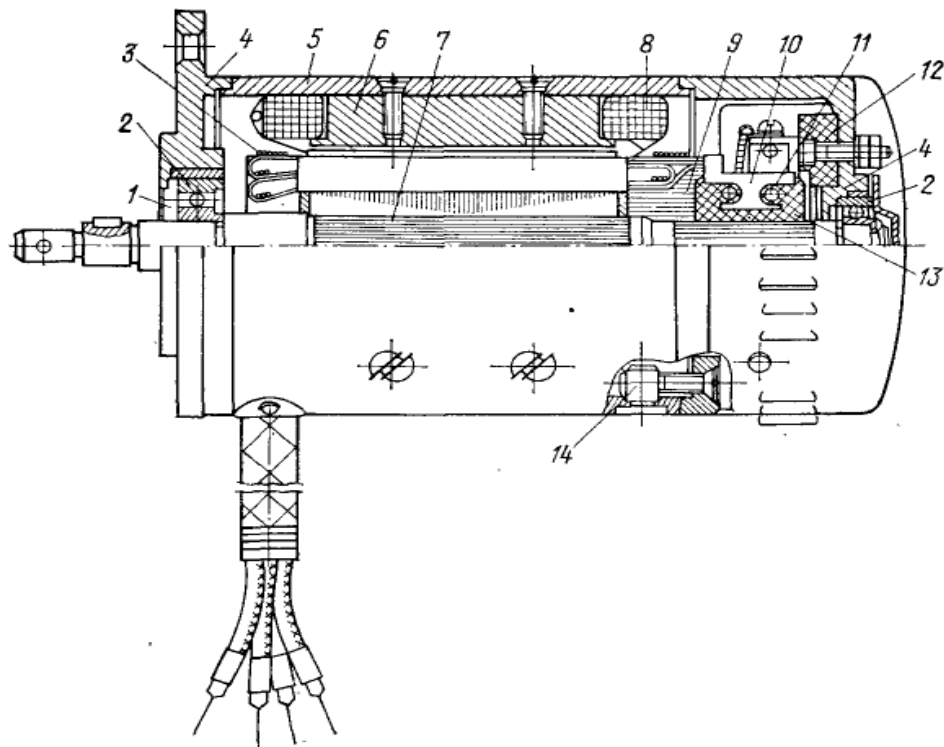


Рисунок 1.1 – Схеми включення обмоток збудження електричних двигунів постійного струму

Електродвигуни за конструкцією можуть бути виконані у закритому або захищеному варіанті [6]. Магнітна система, як правило, має дво полюсне виконання. Якір двигуна складається з пакета, сформованого з тонких листів електротехнічної сталі товщиною 0,35–0,5 мм. Для зменшення пульсацій магнітного потоку і усунення реактивних моментів пази якоря виконані зі скісом на одну зубцеву поділку. Обмотка якоря зазвичай проста петльована або хвильова, з невеликою кількістю секцій. Колектор утворений шляхом запресування мідних пластин у пластмасову втулку. У конструкції двигунів не передбачено додаткових полюсів і компенсаційної обмотки, а щітки для реверсу встановлені на геометричній нейтралі.

Оскільки електродвигуни малої потужності працюють із високою частотою обертання (4000–10000 об/хв), умови комутації є складними. Це вимагає особливої уваги до конструкції щітково-колекторного вузла, який разом із підшипниковими опорами значною мірою визначає надійність і термін служби двигуна.

На рис. 1.2 наведена конструкція електродвигуна постійного струму потужністю 200 Вт [4-7].



1 – кришка підшипника; 2 – кульковий підшипник; 3 – бандаж; 4 – підшипниковий щит; 5 – корпус (ядро); 6 – полюс; 7 – вал; 8 – обмотка збудження; 9 – ізоляційний матеріал між лобовою частиною обмотки та валом; 10 – колектор; 11 – колекторне кільце; 12 – траверса; 13 – ізоляція вала з боку колектора; 14 – прилив для кріплення щитів колекторного блоку двигуна.

Рисунок 1.2 – Схематична конструкція електродвигуна постійного струму потужністю 200 Вт.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
10

Магнітні системи електродвигунів із постійними магнітами відрізняються великою різноманітністю конструкцій. Це пояснюється тим, що такі двигуни не потребують обмоток, завдяки чому їм легше надати різну форму порівняно з електромагнітами.

Нижче наведено найбільш поширені типи магнітних систем електродвигунів із постійними магнітами [7].

На рис. 1.3 зображено магнітну систему електродвигуна з радіальними магнітами.

Ця конструкція є найпростішою з представлених, однак її головним недоліком є слабка намагнічуюча сила (НС) магнітів і наявність невикористаного простору між полюсами.



Рисунок 1.3 – Схема магнітної системи електродвигуна постійного струму з радіальним розташуванням магнітів.

На рисунку 1.4 показана магнітна система електродвигуна з магнітами у формі скоб [4-7].

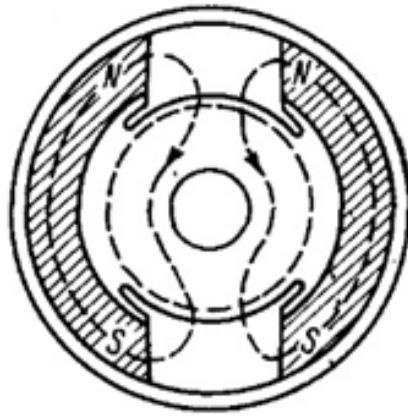


Рисунок 1.4 – Будова магнітної системи двигуна постійного струму з магнітами у формі скоб

Ця магнітна система забезпечує вищу намагнічуючу силу та ефективніше заповнення простору між якорем і корпусом. Однак її головним недоліком є складність створення потрібного напрямку магнітного поля під час намагнічування магнітів [4-7].

Магнітна система з кільцевим магнітом, зображена на рис. 1.5, вирізняється простотою конструкції і широко застосовується в електродвигунах невеликої потужності. Однак значна дія магнітного поля полюсів і реакція якоря у зоні комутації створюють труднощі в комутаційних процесах у двигунах такого типу.

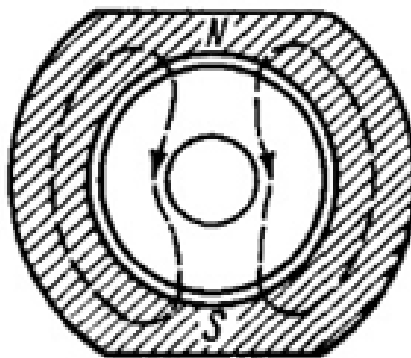


Рисунок 1.5 – Схема магнітної системи двигуна постійного струму із кільцевими магнітами

Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
12

Магнітна система з внутрішнім магнітом застосовується в двигунах з порожнистим якорем, виконаним у формі тонкостінного циліндра, що обертається між нерухомим ярмом і внутрішнім магнітом [4-7]. Її конструкція зображена на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 – Будова магнітної системи двигуна постійного струму з циліндричним магнітом всередині

Для виготовлення постійних магнітів використовуються магнітотверді сплави, які характеризуються широкою петлею гістерезису [8]. Основні параметри, що визначають якість таких сплавів, аналогічно як для синхронних двигунів з постійними магнітами, включають:

- коерцитивну силу H_c ;
- залишкову індукцію B_r ;
- максимальну питому енергію $\omega_{\text{макс}}$.

На рисунку 1.7 представлено конструкцію магнітної системи двигуна постійного струму з плоскими магнітами та полюсними наконечниками [7].

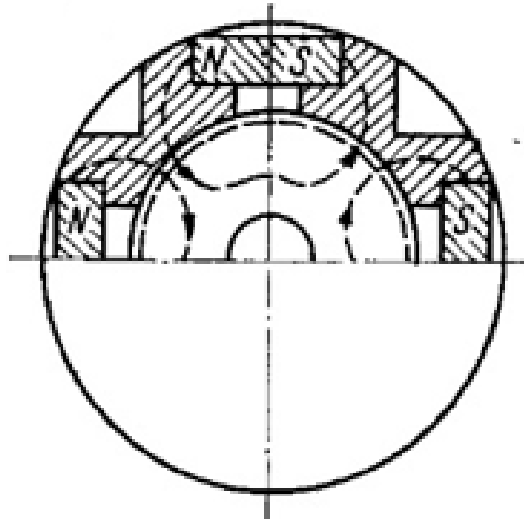
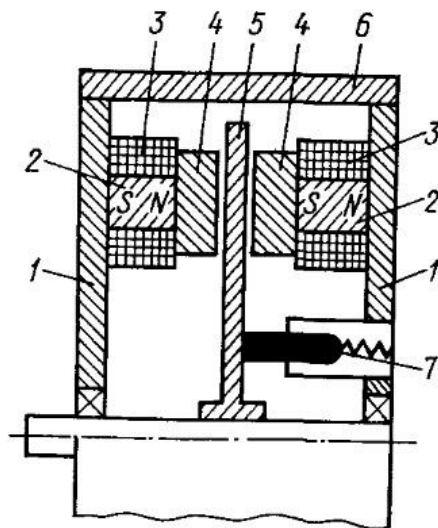


Рисунок 1.7 – Схема магнітної системи двигуна постійного струму з плоскими магнітами та полюсними наконечниками

Характерною рисою такої системи є її проста конструкція та зручність у виготовленні постійних магнітів.

Загалом, конструкція електродвигунів з постійними магнітами мало чим відрізняється від електродвигунів із електромагнітним збудженням. Багато закордонних компаній вже організували серійне виробництво двигунів постійного струму з дисковим друкованим якорем (рис.1.8).

Електродвигуни цього типу відзначаються високою енергоефективністю та сприятливими умовами комутації. Функцію колектора в таких машинах виконують лобові з'єднання обмоток. Друковану обмотку зазвичай виготовляють методом штампування з мідних листів (рис.1.5) [6].



1 – підшипниковий щит; 2 – полюсні постійні магніти; 3 – обмотка намагнічування; 4 – полюсний наконечник; 5 – дисковий якорь; 6 – корпус; 7 – щітковий елемент.

Рисунок 1.8 – Схема конструкції дискового електродвигуна з друкованим якорем:

1.2 Особливості виконавчих двигунів постійного струму з збудженням від постійних магнітів

Електродвигуни постійного струму зі збудженням від постійних магнітів відрізняються від традиційних виконавчих електродвигунів з електромагнітним збудженням тим, що основний магнітний потік у них створюється не обмоткою збудження, а постійними магнітами, які розташовані на статорі та замінюють класичні полюси з обмоткою збудження [9]. Оскільки такі двигуни не оснащені обмотками збудження, їх робота завжди здійснюється виключно через якірне керування.

Електродвигуни з постійними магнітами мають низку переваг у порівнянні з двигунами, оснащеними обмотками збудження [9]:

- відсутність втрат потужності на збудження, що забезпечує підвищений коефіцієнт корисної дії, навіть для двигунів дуже малої потужності (в межах

одиниць ват) цей показник досягає 60–70%, що недосяжно для двигунів з електромагнітним збудженням;

- відсутність потреби в джерелі живлення для обмотки збудження;
- майже повна незалежність магнітного потоку від зміни температури або коливань напруги в електромережі, що є суттєвою перевагою над звичайними електродвигунами.

Завдяки цим перевагам, двигуни з постійними магнітами все частіше використовуються в слідкуючих системах та автоматизованих приводах. Останнім часом вони знаходять застосування не лише у двигунах малої потужності, але й у двигунах середньої та великої потужностей, що свідчить про їхній зростаючий потенціал у сучасній техніці [9].

Відсутність втрат на відновлення дозволяє підвищити струм у якорі та втрачати в обмотці якоря без підвищення температури перегріву двигуна, що, у свою чергу, не вимагає збільшення його розмірів. Це погіршує підвищений обертовий момент, який розвиває двигун, а також його потужність, що робить двигун таким високомоментним.

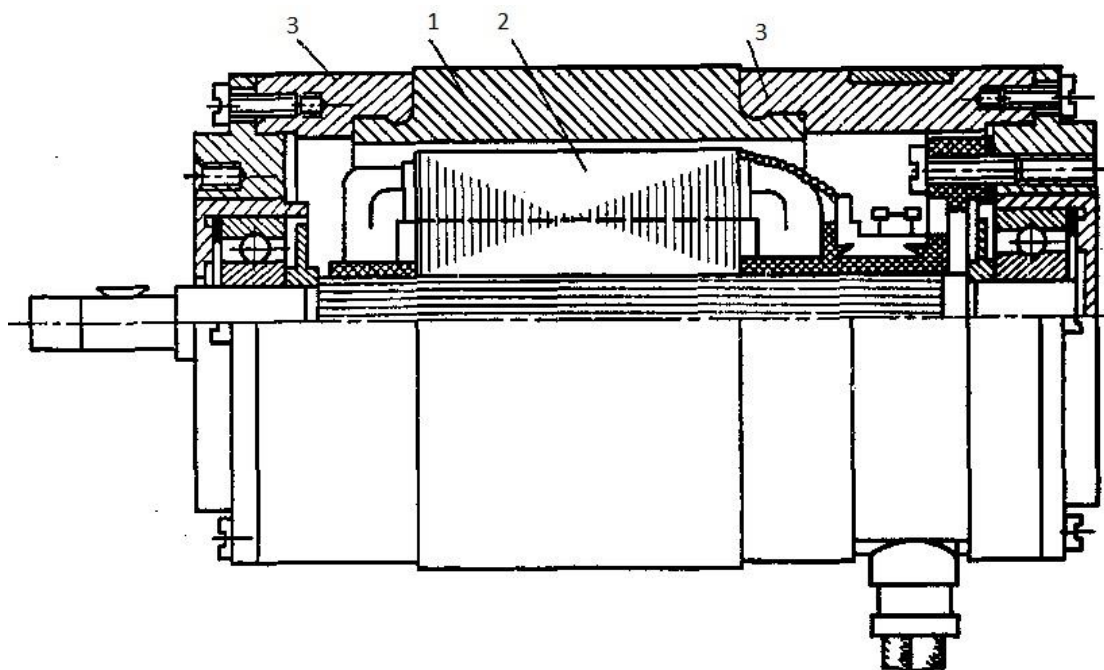
Для зменшення іскріння під щітками та забезпечення належної комутації при високих потоках, які відкриваються в перехідних режимах (наприклад, під час пуску, зупинки чи реверсу), обмотки якоря виробляються з великою кількістю секцій, а колектори - з великою кількістю пластів. Це дозволяє зменшити кількість вітамінів у шкірній секції, а отже, зменшити напругу, яка виникає в процесі комутації. Такий підхід значно покращує комутацію навіть у режимах роботи з високими струмами, характерних для високомоментних двигунів [9].

Тривалий час електродвигуни з постійними магнітами виготовлялися лише для невеликих потужностей через високу вартість магнітних матеріалів. Однак останнім часом завдяки впровадженню дешевших альтернатив, таких як ферито-барієві магніти, що мають високу коерцитивну силу та пітну енергію, стало можливим проектування та виробництво двигунів із постійними

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

магнітами для потужностей, що досягають десятків кіловат. Це дозволило значно розширити сферу їхнього використання, виключно з потужними промисловими застосуваннями. Багато моделей таких двигунів оснащуються вбудованими тахогенераторами, що забезпечує їх функціональність [9].

Мікродвигуни серії ДПМ, зображені на рисунку 1.9, є прикладом компактних електродвигунів із постійними магнітами, які отримали широке застосування. Попри те, що вони спочатку не проектувалися для масового використання, ці двигуни стали популярними завдяки своїм енергетичним характеристикам. Однак їхні недоліки, зокрема низька технологічність виробництва та використання дорогих кільцевих магнітів, обмежують сферу застосування. Висока вартість виробництва таких двигунів продовжує їх збільшення, хоча вони й демонструють значний потенціал [9].



1 – постійний магніт; 2 – ротор; 3 – кінцеві елементи корпусу з цинкового сплаву;

Рисунок 1.9 – Електричний виконавчий двигун серії ДПМ:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Була створена серія ДП мікродвигунів постійного струму, яка вимагає доступні ферито-барієві постійні магніти. Двигуни цієї серії відзначаються високою технологічністю, що дозволяє ефективно механізувати та автоматизувати їхнє виробництво. За своїми характеристиками вони майже ідентичні двигунам серії ДПМ (рис. 1.9) і розроблені з урахуванням потреб масового виробництва.

1.3 Двигуни постійного струму з гладким безпазовим якорем: переваги та недоліки

Електродвигуни постійного струму з гладким безпазовим якорем були впроваджені зовсім недавно [10]. Основною відмінністю цих двигунів є розташування обмотки якоря на гладкій циліндричній поверхні замість традиційних пазів, які в таких конструкціях відсутні. Кріплення обмотки запускається за допомогою клею-компаунда і бандажів. Це розташування значно знижує індуктивність обмотки, що покращує комутацію та зменшує електромеханічну постійну годину. Як результат, такі двигуни мають підвищену швидкість.

Однак електродвигуни з гладким безпазовим якорем мають і недоліки. Головним з них є наявність значного немагнітного проміжку, що включає повітряний зазор та товщину обмотки якоря. Це обмежує ефективність магнітного потоку полюсів. Такі двигуни можуть бути виконані як з електромагнітним збудженням, так і з постійними магнітами.

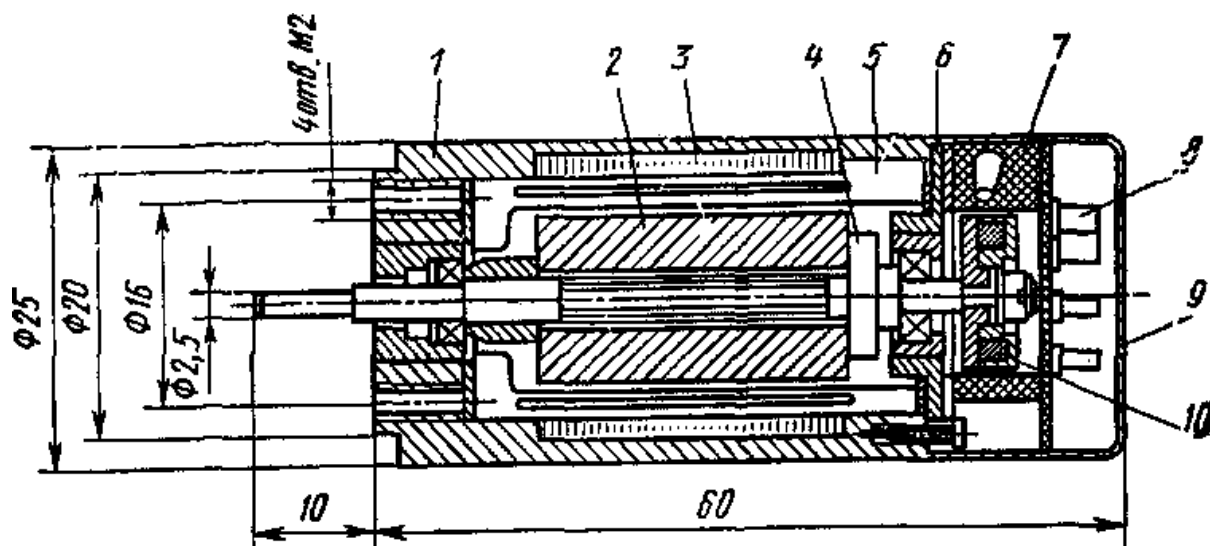
1.4 Безконтактні виконавчі двигуни: теорія та практика

Один із основних недоліків виконавчих електродвигунів постійного струму, раніше виявлених, виник у наявності ковзних контактів, таких як колектор і щітки. Ці елементи не тільки знижують надійність роботи

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

електродвигунів, але й обмежують сферу їх застосування, створюючи додаткові технічні труднощі. Для усунення цих недоліків розроблені безконтактні виконавчі електродвигуни постійного струму.

Безконтактні виконавчі електродвигуни постійного струму з'явилися недавно, але швидко набули популярності завдяки своїм численним перевагам. На відміну від колекторних моделей, ці двигуни запуснені ковзних контактів, що забезпечують стабільну і надійну роботу навіть у несприятливих умовах, таких як вібрація або різкі температурні коливання (рис.1.10). Відсутність колектора і щіток дозволяє також значно продовжити термін експлуатації та підвищити ефективність роботи.



1 – корпус; 2 – індикатор у вигляді двополюсного постійного магніту; 3 – магнітопровід статора; 4 – вал; 5 – обмотка якоря, розташована в немагнітному зазорі; 6 – підшипниковий щит; 7 – обойма датчика положення з трьома чутливими елементами; 8 – контактна плата; 9 – кожух контактної плати; 10 – один із сигнальних елементів датчика положення ротора (постійний магніт).

Рисунок 1.10 – Конструкція безконтактного виконавчого двигуна типу ДБУ [11]:

Зм.	Арк.	Нодокум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
19

1.5 Високошвидкісні виконавчі малоінерційні двигуни: теорія і практика

Одним із недоліків контактних виконавчих електродвигунів постійного струму є використання шихтованих якорів, виготовлених із листів сталі, що мають значний момент інерції [12]. Це суттєво обмежує їх швидкодію. Цей недолік відсутній у малоінерційних виконавчих електродвигунах, які були розроблені відносно недавно.

Малоінерційні електродвигуни можна класифікувати на дві основні групи залежно від конструкції та способу виготовлення обмоток якоря:

- а) двигуни з друкованою обмоткою якоря;
- б) двигуни з обмоткою якоря, виконаною із традиційного ізольованого проводу.

Обидва типи малоінерційних електродвигунів мають подібні пускові та експлуатаційні характеристики.

1.6 Електродвигуни з друкованою обмоткою та мінімальною інерцією

Сучасні двигуни цього типу випускаються у двох основних конструктивних виконаннях з [13]:

- дисковими якорями;
- циліндричними якорями.

Дисковий якор із друкованою обмоткою має форму тонкого диска, виготовленого з ізоляційного матеріалу, такого як текстоліт. На обидві сторони диска, зазвичай електрохімічним методом, наносяться плоскі провідники, що формують друковану обмотку. Провідники обмотки виготовляються з мідної фольги, яка з трьох боків оточена повітрям, а четвертою стороною прилягає до поверхні диска. Початкові частини секцій розташовані на одній стороні диска (рис. 1.11, а, лист [МРМА24.00.00.000ДО2]).

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

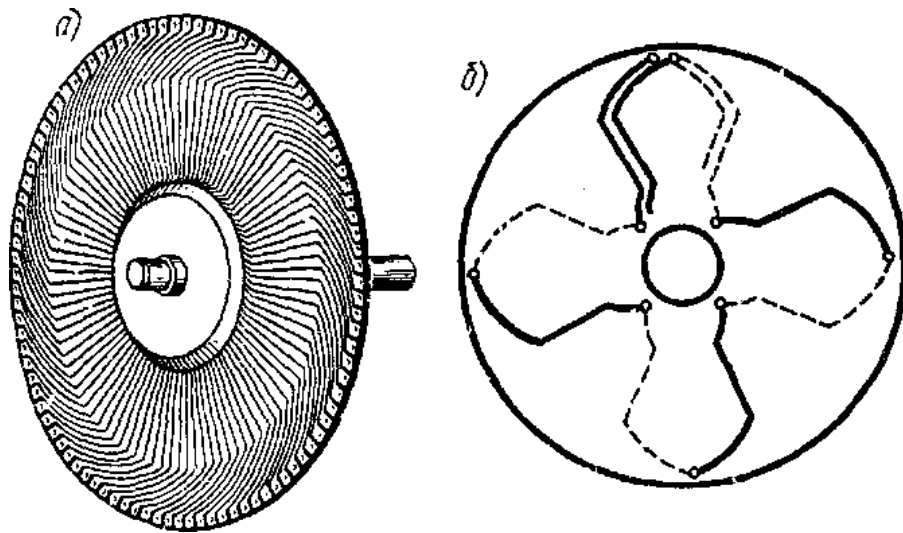


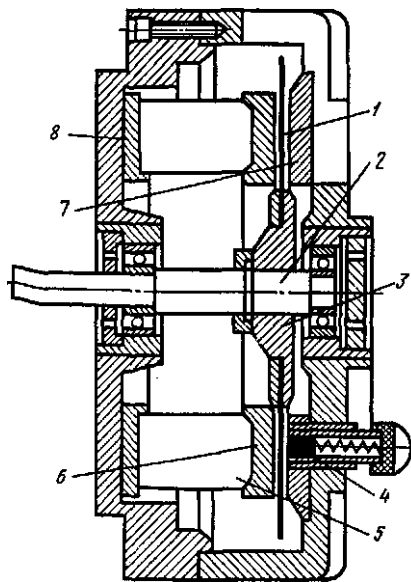
Рисунок 1.11–Дисковий якір з друкованою обмоткою

Другі половини секцій обмотки (рис. 1.11, б, позначені пунктиром) розташовані на протилежному боці диска. Кінці напівсекцій з різних сторін з'єднуються між собою через отвори, виконані у матеріалі диска.

Для ізоляції між окремими провідниками обмотки якоря використовуються повітряний прошарок та матеріал самого диска.

Дисковий якір обертається між полюсами, створюючи магнітний потік, що має аксіальну спрямованість у повітряному зазорі (рис. 1.12). До друкованої обмотки якоря, виготовленої фото-хімічним методом, аналогічним процесу створення фотокарток, напруга підводиться через щітки. Ці щітки ковзають безпосередньо по неізольованих поверхнях провідників секцій обмотки. Завдяки взаємодії струму в обмотці якоря з магнітним полем полюсів, у двигуні створюється крутний момент, аналогічно до звичайного двигуна постійного струму.

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата



- 1 – диск-якір; 2 – осьовий вал; 3 – втулка кріплення; 4 – контактні щітки;
 5 – магніти постійного типу; 6 – полюсні наконечники;
 7, 8 – кільцеві магнітопроводи.

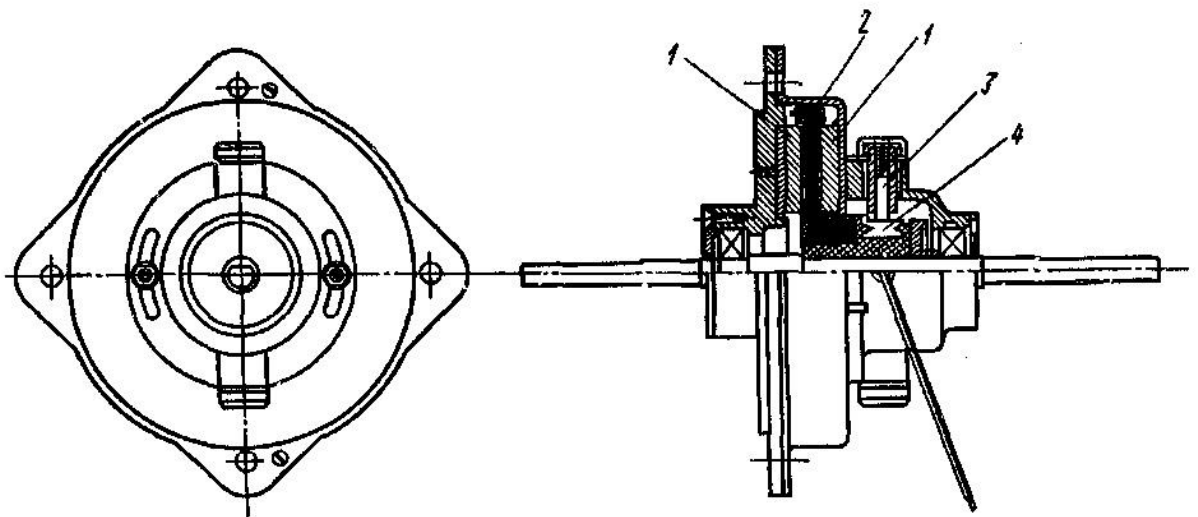
Рисунок 1.12 – Двигун постійного струму з дисковим якорем та друкованою обмоткою:

Одним із недоліків двигуна з дисковим якорем із друкованою обмоткою (рис. 1.12) є обмежений термін служби, обумовлений зносом тонкої друкованої обмотки, по якій ковзають щітки. Для вирішення цієї проблеми застосовуються два підходи: використання змінних дискових якорів, які можна легко замінювати, або виготовлення якоря з колектором.

У другому випадку кінці секцій обмотки, розташовані на диску, виводяться до колектора, встановленого на тому ж валу, що й диск. Така конструкція значно підвищує довговічність двигуна.

Нещодавно було розроблено і вже отримали популярність дискові якорі, секції обмоток яких виконані з традиційного круглого ізолюваного дроту. Після формування секцій їх укладають відповідним чином і заливають епоксидною смолою, яка після затвердіння забезпечує якорю необхідну форму та механічну міцність. Використання звичайного дроту дозволяє збільшити кількість витків у секціях, що підвищує номінальну напругу двигуна. На рис.

1.13 представлено двигун постійного струму серії ДП ... Р13 із дисковим якорем, обладнаним традиційною обмоткою [6].



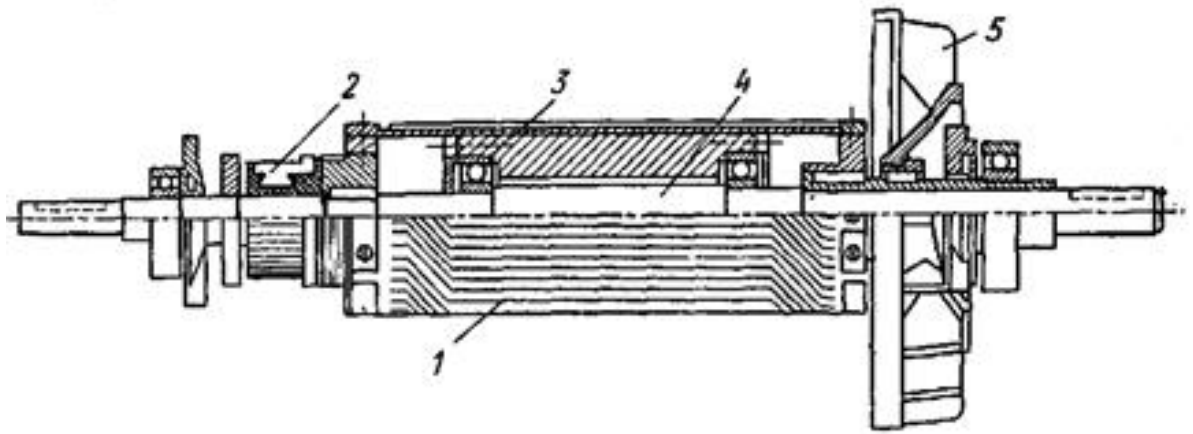
1 – кільцевий магніт; 2 – диск якоря; 3 – щітковий вузол; 4 – колектор

Рисунок 1.13 – Електродвигун постійного струму серії ДП ... Р13 із дисковим якорем:

Недоліком електродвигунів із дисковими якорями є те, що зі збільшенням діаметра диска (що необхідно для підвищення номінальної потужності двигуна) зростає момент інерції. Крім того, надійність роботи може погіршуватися через можливе викривлення диска при нагріванні. Одним із рішень для усунення цього недоліку є перехід до використання електродвигунів із порожнистим циліндричним якорем, оснащеним друкованою обмоткою.

Циліндричний якір із друкованою обмоткою (рис. 1.14) виготовляється у вигляді порожнистого циліндра з ізоляційного матеріалу. На зовнішню та внутрішню сторони цього циліндра наносяться частини друкованої обмотки, які з'єднуються між собою. Кінці секцій обмотки виводяться на колектор, встановлений на валу двигуна.

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата



1 – ізоляційний циліндр із друкованою обмоткою; 2 – колектор; 3 – внутрішнє статорне осердя; 4 – вал; 5 – вентилятор

Рисунок 1.14 – Циліндричний якір із друкованою обмоткою:

Зовнішня частина електродвигуна з циліндричним якорем аналогічна нерухомим частинам звичайних електромашин постійного струму, включаючи станину і шихтовані полюси. Для зниження опору основного магнітного потоку всередині порожнистого якоря розташовується осердя внутрішнього статора, яке закріплюється на виступі підшипникового щита або безпосередньо на валу двигуна [1].

Циліндричні якорі з друкованими обмотками мають переваги порівняно з дисковими: вони легші, міцніші та забезпечують менший момент інерції. Двигуни з циліндричними якорями здатні працювати на потужностях до 10 кВт, тоді як дискові зазвичай використовуються для потужностей у межах сотень ват.

Переваги двигунів із друкованими обмотками включають [1-3]:

- високу технологічність виготовлення, що мінімізує ручну працю;
- малий момент інерції якоря;
- відсутність втрат у сталі завдяки конструкції якоря без феромагнітних частин;
- якісну комутацію завдяки низьким втратам на самоіндукцію;

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

- низькі механічні втрати через відсутність магнітного тяжіння при нерівномірному зазорі;

- ефективно охолодження провідників обмотки;

- високий коефіцієнт корисної дії при використанні постійних магнітів;

- відсутність потреби в міжвитковій і пазовій ізоляції.

До недоліків належать:

- великий немагнітний проміжок, що збільшує об'єм магнітів;

- обмеження кількості витків через технологічні труднощі;

- низька механічна міцність якорів, що може викликати викривлення при нагріванні.

Через великий немагнітний проміжок такі електродвигуни зазвичай збуджуються постійними магнітами, що дозволяє уникнути втрат у обмотці збудження і зберігати високий коефіцієнт корисної дії. Використання електромагнітного збудження в таких двигунах значно знижує їх ефективність та збільшує габарити.

1.7 Електродвигуни з звичайною обмоткою якоря та малою інерцією

Ці електродвигуни відрізняються від малоінерційних двигунів із друкованою обмоткою якоря лише конструкцією обмотки [14]. Вони доступні як у варіантах із циліндричними, так і дисковими якорями. Обмотка якорів виготовляється з тонкого дроту з емалевою ізоляцією, який укладається у вигляді секцій на каркас (циліндричний або дисковий). Потім ця конструкція просочується епоксидним компаундом, що після полімеризації утворює монолітний і міцний циліндр або диск (рис. 1.12). Кінці обмоткових секцій з'єднуються з пластинами колектора.

На відміну від друкованих обмоток, у таких якорях можна розмістити значно більше провідників. Це дозволяє розраховувати двигуни на вищі

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

напруги та нижчі частоти обертання. Як і в попередніх конструкціях, такі електродвигуни зазвичай використовують постійні магніти для збудження.

Електродвигуни зі звичайною обмоткою якоря зберігають більшість переваг і недоліків малоінерційних двигунів із друкованими обмотками (рис.1.15). Проте вони мають деякі відмінності: зникають обмеження щодо кількості провідників, що дозволяє збільшити робочі параметри, але втрачається висока технологічність виготовлення, характерна для друкованих обмоток.

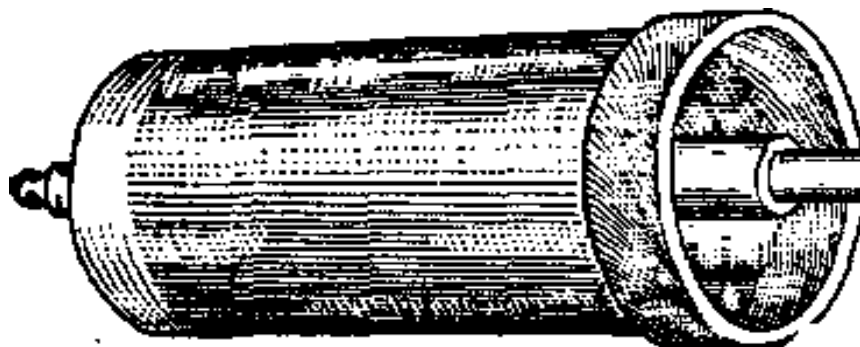


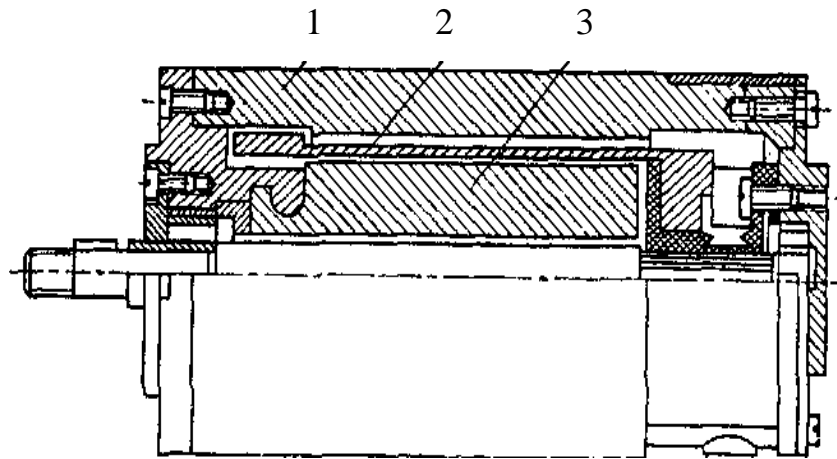
Рисунок 1.15—Порожнистий циліндричний якор із звичайною обмоткою

В електродвигунах цієї серії магніт розташований усередині якоря, що значно зменшує потоки розсіювання магнітного поля і підвищує ефективність його використання. Корпус двигуна одночасно виконує функцію магнітопроводу. Серія ДПР охоплює потужності від 0,12 до 37 Вт. Коефіцієнт корисної дії цих двигунів на 15–25% вищий, ніж у двигунів серії ДПМ зі звичайною конструкцією якоря. Електромеханічна постійна часу двигунів серії ДПР (рис.1.16) у 2–2,5 рази менша порівняно з двигунами серії ДПМ і становить від 15 до 20 мс.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
26



1 – корпус (станина); 2 – порожнистий якір із традиційною обмоткою;
3 – постійний магніт

Рисунок 1.16 – Виконавчий малоінерційний електродвигун постійного струму серії ДПР

Одним із недоліків електродвигунів серії ДПР, які спочатку не були призначені для масового виробництва, є низька технологічність, що спричиняє значну трудомісткість їх виготовлення. Для задоволення зростаючого попиту на електродвигуни з порожнистим циліндричним якорем малої потужності останніми роками була розроблена серія ДПР...11. Ці мікродвигуни мають спрощену конструкцію порожнистого циліндричного якоря, що робить їх виготовлення значно простішим і економічнішим. У порівнянні з попередньою серією ДПР, нові двигуни характеризуються меншою трудомісткістю та зниженою вартістю.

1.8 Технології керування частотою обертання двигунів з постійними магнітами

Регулювання частоти обертання електродвигунів постійного струму з постійними магнітами має кілька підходів, кожен із яких характеризується

різними технічними і економічними показниками [15]. Основними критеріями оцінки цих способів є плавність регулювання, діапазон частот і економічність. Найпростішим методом є додавання реостату в коло якоря, що дозволяє плавно знижувати частоту обертання. Однак цей спосіб є неекономічним через значні втрати енергії в реостаті, особливо при збільшенні потужності двигуна. Регулювання напруги живлення кола якоря є більш ефективним і досягається за допомогою спеціальних джерел живлення, таких як регульовані випрямлячі.

Імпульсне регулювання є сучасним і економічним підходом, який базується на періодичному підключенні і відключенні напруги до обмотки якоря. Це забезпечує подачу середньої напруги на якір і дозволяє зменшити пульсації струму за допомогою дроселів. Схеми з використанням тиристорів для керування напругою забезпечують високу точність і надійність, дозволяючи ефективно регулювати частоту обертання в широкому діапазоні. Завдяки можливості плавного регулювання і жорстким механічним характеристикам, електродвигуни постійного струму з постійними магнітами широко застосовуються в регульованих електроприводах для верстатів, вентиляторів та інших механізмів, де важлива стабільна робота при змінних навантаженнях.

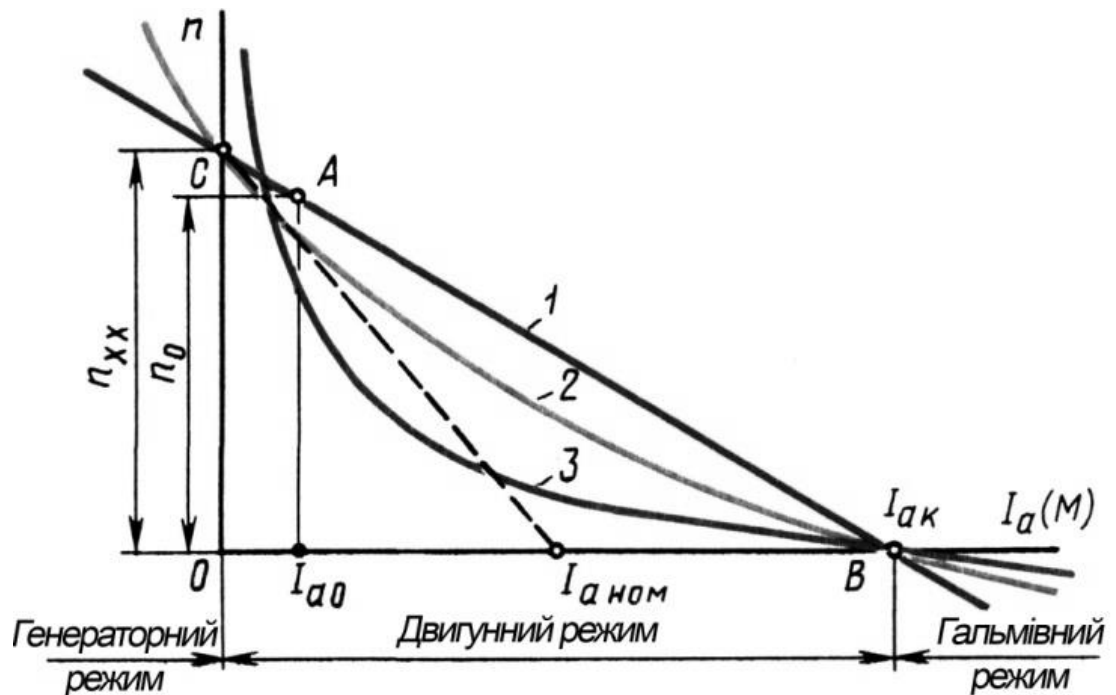
1.9 Аналіз робочих режимів двигуна постійного струму з постійними магнітами

У двигуні постійного струму з постійними магнітами магнітний потік можна вважати постійним [16]. У такому випадку електромагнітний момент буде прямо пропорційний струму, що протікає через коло якоря, а механічна характеристика $n = f(M)$ перетворюється на залежність $n = f(I_a)$, як показано на графіку (рис.1.17).

Продовжуючи цю характеристику в обидві сторони поза межі осей координат (лінія 1), можна визначити, що електрична машина, залежно від

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

величини та напрямку зовнішнього моменту, який діє на її вал від підключеного механізму, може працювати в трьох основних режимах: двигунному, гальмівному, генераторному.



- 1 – з паралельним (незалежним) збудженням за рахунок постійних магнітів; 2 – із комбінованим (змішаним) збудженням;
- 3 – з послідовним збудженням

Рисунок 1.17 – Режимы роботи електричної машини постійного струму:

Коли електродвигун працює без навантаження, струм у колі якоря (I_{a0}) залишається невеликим, а частота обертання досягає значення $n=n_0$ (точка А). З появою на валу двигуна навантаження, яке протидіє обертальному моменту, струм у колі якоря збільшується, а частота обертання знижується. Якщо навантаження збільшується до значення, при якому якор двигуна зупиняється (точка В), то електрорушійна сила (ЕРС) $E_a=0$, а струм досягає максимальної величини $I_{ак}=U/\Sigma R$ [1].

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

У випадку, якщо двигун приводить у дію механізм із навантаженням, яке може перевищувати обертальний момент (наприклад, під час підйому троса з вантажем), подальше збільшення навантаження змусить якор машини обертатися у зворотному напрямку. У такій ситуації момент від навантажувального механізму стає обертальним, а електромагнітний момент двигуна — гальмівним, що переводить машину в гальмівний режим роботи. У цьому режимі ЕРС якоря співпадає за напрямком з напругою, що викликає струм у колі якоря, виражений як $I_a = (U + E_a) / \Sigma R$.

У гальмівному режимі роботи машини необхідно обмежити струм у колі якоря. Для цього в коло якоря вводять додатковий опір, який створює штучну характеристику двигуна, що перетинає вісь абсцис при струмі $I_{аном} < I_{ак}$ (штрихова пряма) [1]. Це дозволяє забезпечити контрольовану роботу двигуна в цьому режимі.

Якщо двигун працює в режимі холостого ходу, і до його вала прикладається момент, спрямований у напрямку обертання якоря, частота обертання і ЕРС E_a починають зростати. Коли ЕРС E_a зрівняється з напругою U , машина перестане споживати струм з мережі (точка С), а частота обертання досягає граничного значення, що називається ідеальним холостим ходом ($n_{х.х.}$).

При подальшому збільшенні зовнішнього моменту на валу ЕРС E_a перевищує напругу, і в колі якоря з'являється струм, спрямований у зворотному напрямку. У такому випадку машина переходить у генераторний режим, коли механічна енергія, що витрачається на обертання якоря, перетворюється в електричну і подається назад у мережу. Використання генераторного режиму для гальмування двигуна є ефективним, оскільки в цьому режимі електромагнітний момент виступає в ролі гальмівного, що забезпечує рекуперативне гальмування [1].

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

1.10 Задачі, які необхідно вирішити в роботі

В магістерській роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити електричну схему для дослідницького стенду;
- розробити конструкцію стенду і забезпечити його виготовлення;
- створити методику дослідження механічних характеристик, робочих параметрів і характеристик двигуна;
- обрати апаратні засоби та елементну базу для стенду;
- проаналізувати способи підвищення ефективності застосування електродвигунів постійного струму з постійними магнітами в промисловості й побуті.

1.11 Висновки до першого розділу

У тексті проведено аналіз основних типів і конструктивних особливостей двигунів постійного струму з постійними магнітами, а також конструкцій магнітних систем цих електродвигунів. Визначено ключові переваги таких двигунів:

- відсутність втрат потужності на збудження, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії;
- відсутність потреби в джерелі живлення обмотки збудження;
- практично повна незалежність магнітного потоку від змін температури та коливань напруги в електромережі, що часто спостерігається у звичайних електромашинах;

Ці характеристики сприяють дедалі ширшому використанню двигунів постійного струму з постійними магнітами в автоматизованих системах, слідкуючих пристроях і побутовій техніці.

Раніше одним із недоліків таких двигунів було старіння постійних магнітів, що призводило до втрати їх властивостей із часом. Однак цей недолік

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

практично усунуто завдяки розробці нових високоякісних матеріалів для виготовлення магнітів, таких як: сплави типу альніко; металокерамічні матеріали на основі заліза, нікелю, кобальту й алюмінію; композитні сплави із заліза, хрому та кобальту.

Сучасні постійні магніти стали основою для створення надійних і довговічних двигунів постійного струму, що сприяє їх широкому впровадженню в різні галузі.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЕЛЕКТРОПОБУТОВОЇ ТЕХНІКИ

2.1 Теоретичні аспекти розробки електричної схеми стенда

Експлуатаційні параметри двигуна постійного струму з постійними магнітами залежать від його робочих характеристик [1-3, 17]. Під цими характеристиками мають на увазі залежність частоти обертання n , струму I , корисного моменту M_2 , що обертає, та моменту M від потужності на валу електродвигуна P_2 за умови сталості напруги U .

Для аналізу залежності $n=f(P_2)$, що зазвичай називають швидкісною характеристикою, необхідно враховувати фактори, які впливають на частоту обертання двигуна, виходячи з відповідної формули:

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi},$$

З наведеної формули видно, що частота обертання залежить від поданої на обмотку якоря напруги U , падіння напруги в колі якоря $I_a \sum R$ та потоку збудження Φ .

Зі збільшенням навантаження зменшується чисельник $(U - I_a \sum R)$, а внаслідок реакції якоря також знижується знаменник Φ [1-3, 17]. Як правило, послаблення потоку через реакцію якоря є незначним, тому основний вплив на частоту обертання має перший фактор. У результаті частота обертання двигуна зменшується зі зростанням навантаження P_2 , а графік залежності $n=f(P_2)$ набуває спадного вигляду з невеликою опуклістю, зверненою до осі абсцис. Якщо ж реакція якоря викликає суттєвіше послаблення потоку Φ то при зростанні навантаження частота обертання може збільшуватися.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Відсоткова зміна частоти обертання двигуна під час переходу від номінального навантаження до холостого ходу називається номінальним відхиленням частоти обертання й визначається спеціальною формулою:

$$\Delta_{\text{НОМ}} = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

де n_0 частота обертання електродвигуна в режимі холостого ходу.

Для двигунів постійного струму з постійними магнітами номінальна зміна частоти обертання $\Delta n_{\text{НОМ}}$ зазвичай становить 2–8%, що свідчить про їх жорстку механічну характеристику [1-3, 17].

Залежність корисного моменту M_2 від навантаження описується формулою $M_2 = 9,55P_2/n$. За умови постійної частоти обертання n , графік залежності $M_2 = f(P_2)$ мав би вигляд прямої. Однак, зі зростанням навантаження частота обертання двигуна знижується, через що ця залежність набуває криволінійної форми.

При постійній частоті обертання $n_{\text{пн}}$, обертаючий момент двигуна M дорівнює сумі моменту холостого ходу M_0 і корисного моменту M_2 . Оскільки робочі характеристики двигуна зазвичай аналізуються при сталості струму збудження $I_3 = \text{const}$, що забезпечує постійність магнітних втрат, момент холостого ходу M_0 також вважається сталим. Тому графік залежності $M = f(P_2)$ проходить паралельно до кривої $M_2 = f(P_2)$.

Якщо магнітний потік Φ прийняти за сталий, то графік $M_2 = f(P_2)$ водночас описує і залежність струму I від навантаження P_2 , оскільки обертаючий момент визначається як $M = c_m \Phi I_a$.

Для отримання аналітичного виразу механічної характеристики $n = f(M)$, необхідно відповідним чином перетворити вихідну формулу:

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a \Sigma r}{c_e \Phi}, \quad (2.2)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

та підставивши в нього значення струму якоря отримаємо:

$$I_a = M/(c_m \Phi), \quad (2.3)$$

тоді

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \Sigma_r}{c_e c_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (2.4)$$

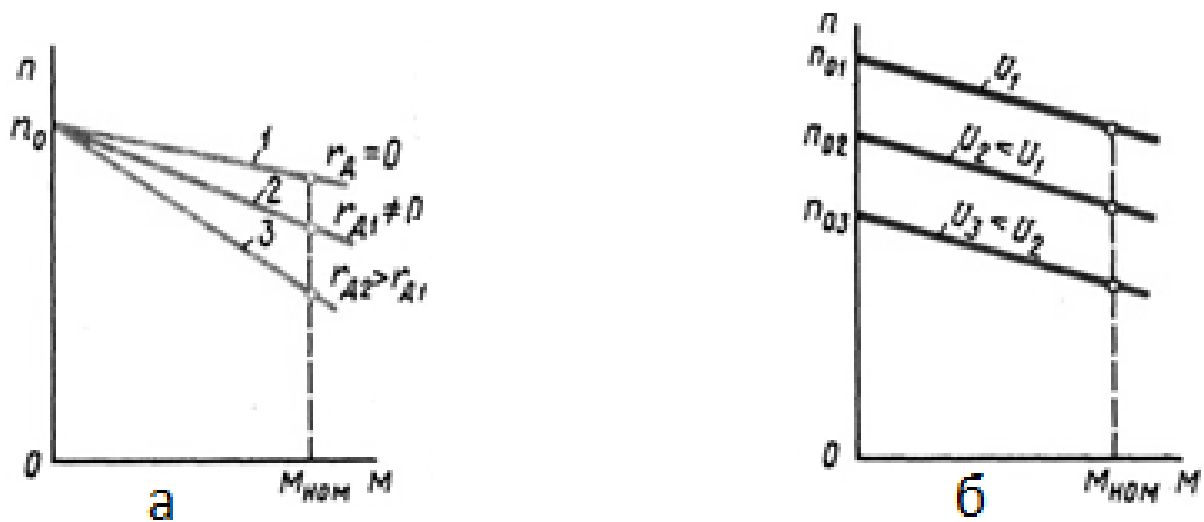
де Δn - зміна частоти обертання, що викликана зміною навантаження на валу електродвигуна;

n_0 - частота обертання в режимі холостого ходу.

Якщо нехтувати реакцією якоря, то можна прийняти що $\Phi = const.$ Відповідно механічна характеристика електродвигуна постійного струму з постійними магнітами буде представляти собою пряму лінію, що небагато нахилена до осі абсцис (рис.2.1, а) [1-3, 17]. Кут нахилення механічної характеристики тим більше, чим більше значення опору, що входить в коло якоря. Механічну характеристику двигуна при відсутності додаткового опору в колі якоря ще називають природною (пряма 1).

Механічні характеристики двигуна, що отримані при додаванні додаткового опору в коло якоря, називають штучними (прямі 2 і 3).

При зміні напруги на якорі двигуна U змінюється частота його обертання n_0 , а Δn залишається незмінною. В загальному жорсткість механічної характеристики (якщо знехтувати впливом реакції якоря), не змінюється (рис.2.1, в), тобто характеристики будуть зміщуватися по висоті, залишаючись рівнозначними одна одній.



а – при додаванні в ланцюг якоря додаткового опору; б – при зміні
напруги в ланцюзі якоря

Рисунок 2.1 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження:

2.2 Розробка комбінованої схеми лабораторного стенду для дослідження характеристик двигунів постійного струму з постійними магнітами

Стенд розроблено для проведення досліджень двигуна постійного струму з постійними магнітами моделі ДПС–80–12 [18].

Основні технічні параметри цього двигуна наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні параметри двигуна постійного струму з постійними магнітами моделі ДПС–80–12 [18]

Номінальна напруга, В	12
Діапазон робочих напруг, В	9...15
Потужність, що споживається ,не більше, Вт	120

Продовження табл.2.1.

Коефіцієнт корисної дії, %, не менше	66
Сила струму, не більше, А	10,5
Частота обертання, хв^{-1}	$5800 \pm 10\%$
Номінальний обертовий момент, $\text{Н} \times \text{см}$	13,5
Напрямок обертання зі сторони вихідного кінця валу	правий
Температура навколишнього середовища при тривалій роботі, $^{\circ}\text{C}$	$-40 \dots +65$
Відносна тривалість ввімкнення	100%
Маса електричного двигуна, кг	1,44
Робоче положення – горизонтальне з отвором знизу для витоку води	
Термін служби, більше, годин	5000

2.2.1 Схема стенда для дослідження двигуна постійного струму з постійними магнітами із стрічковим гальмом

Стенд для дослідження включає електродвигун моделі ДПС-80-12, навантажувальний пристрій, електронний тахометр і схему регулювання та контролю постійної напруги, що подається на обмотку якоря двигуна.

Принципова схема дослідження двигуна постійного струму з постійними магнітами за допомогою стрічкового гальма показана на рис. 2.2 (лист [МРМА24.00.00.000С4]).

Електроживлення обмотки якоря забезпечується постійною напругою, яку формує випрямний міст (VD1 – VD4). Випрямляч отримує змінну напругу від однофазного регулятора напруги (РНО), підключеного до мережі 220 В через автоматичний вимикач QF1 і запобіжники FU1 і FU2. Регулювання напруги, що подається на обмотку якоря, виконується за допомогою повзунка РНО та реостата R. Вольтметр PV1 і амперметр PA1 використовуються для контролю відповідно напруги та струму в обмотці.

Частоту обертання валу електродвигуна вимірюють за допомогою електронного тахометра, диск якого жорстко з'єднаний із валом двигуна.

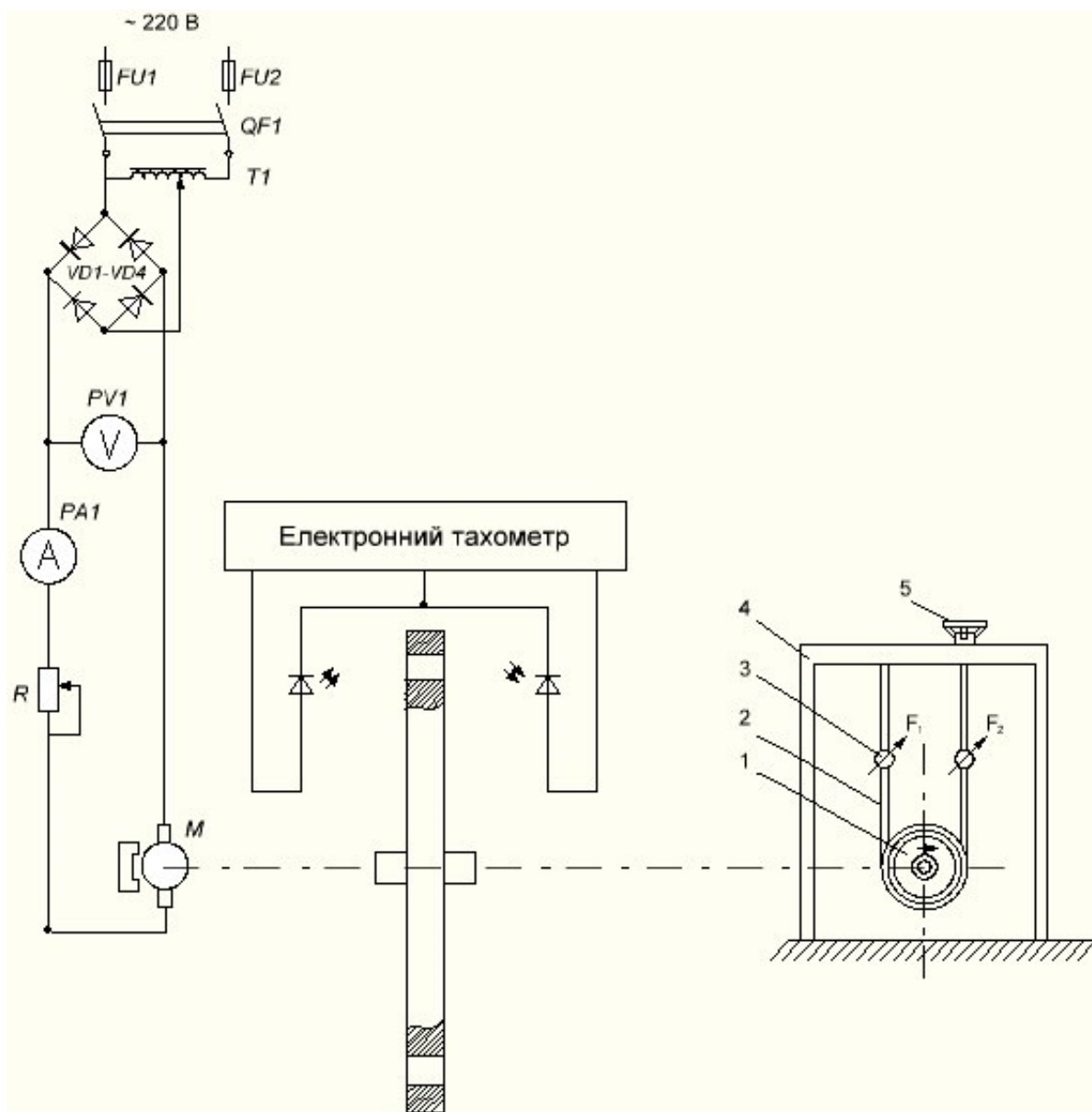
Для визначення моменту на валу використовується фрикційне стрічкове гальмо. Воно складається зі шків (1), закріпленого на валу електродвигуна, гальмівної стрічки (2), двох

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

динамометрів (3), стійки (4), штурвала (5) з гайкою і гвинта (6). Навантажувальний момент M_2 (Н·м) визначається за показниками динамометрів F_1 і F_2 за відповідною формулою:

$$M_2 = 0,5D(F_2 - F_1), \quad (2.5)$$

де D – діаметр шківів, м.



1 – гальмівний шків; 2 – стрічка гальма; 3 – динамометричний пристрій; 4 – опорна стійка; 5 – штурвал для регулювання.

Рисунок 3.2 – Принципова схема випробування електродвигуна постійного струму з постійними магнітами за допомогою стрічкового гальма:

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

Поскілки шкали динамометрів відградуїовані в кілограмах то в (2.5) слід ввести множник 9,81.

2.2.2 Схема для дослідження двигуна постійного струму з постійними магнітами з електромагнітним гальмом

Схема випробувань двигуна постійного струму з постійними магнітами, оснащеного електромагнітним гальмом, наведена на рис. 2.3 (лист [МРМА24.00.00.000С4]).

Живлення обмотки якоря забезпечується постійною напругою, яка надходить через випрямний міст VD1–VD4. Змінна напруга подається на випрямний міст від однофазного регулятора напруги (РНО), який підключається до мережі змінного струму (220 В) через автоматичний вимикач QF1 і запобіжники FU1 та FU2. Регулювання напруги, що подається на обмотку якоря, здійснюється переміщенням повзунка РНО та за допомогою реостата R. Вимірювання напруги та струму виконуються за допомогою вольтметра PV1 і амперметра PA1.

Частота обертання якоря визначається за допомогою електронного тахометра, диск якого жорстко з'єднаний із валом двигуна.

Момент на валу двигуна визначається за допомогою електромагнітного гальма (ЕМГ). Це гальмо складається з електромагніту, в магнітному полі якого обертається металевий диск, закріплений на валу двигуна. Навантажувальний момент створюється вихровими струмами, які виникають у диску під впливом магнітного поля електромагніту. Регулювання величини моменту здійснюється зміною струму, що подається на обмотку електромагніту.

Живлення обмотки електромагніту забезпечується через випрямний міст VD5–VD8, який підключається до електромережі через однофазний регулятор напруги T2 та автоматичний вимикач QF2. Контроль параметрів

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

електромагнітного гальма (напруги та струму) здійснюється за допомогою вольтметра PV2 і амперметра PA2.

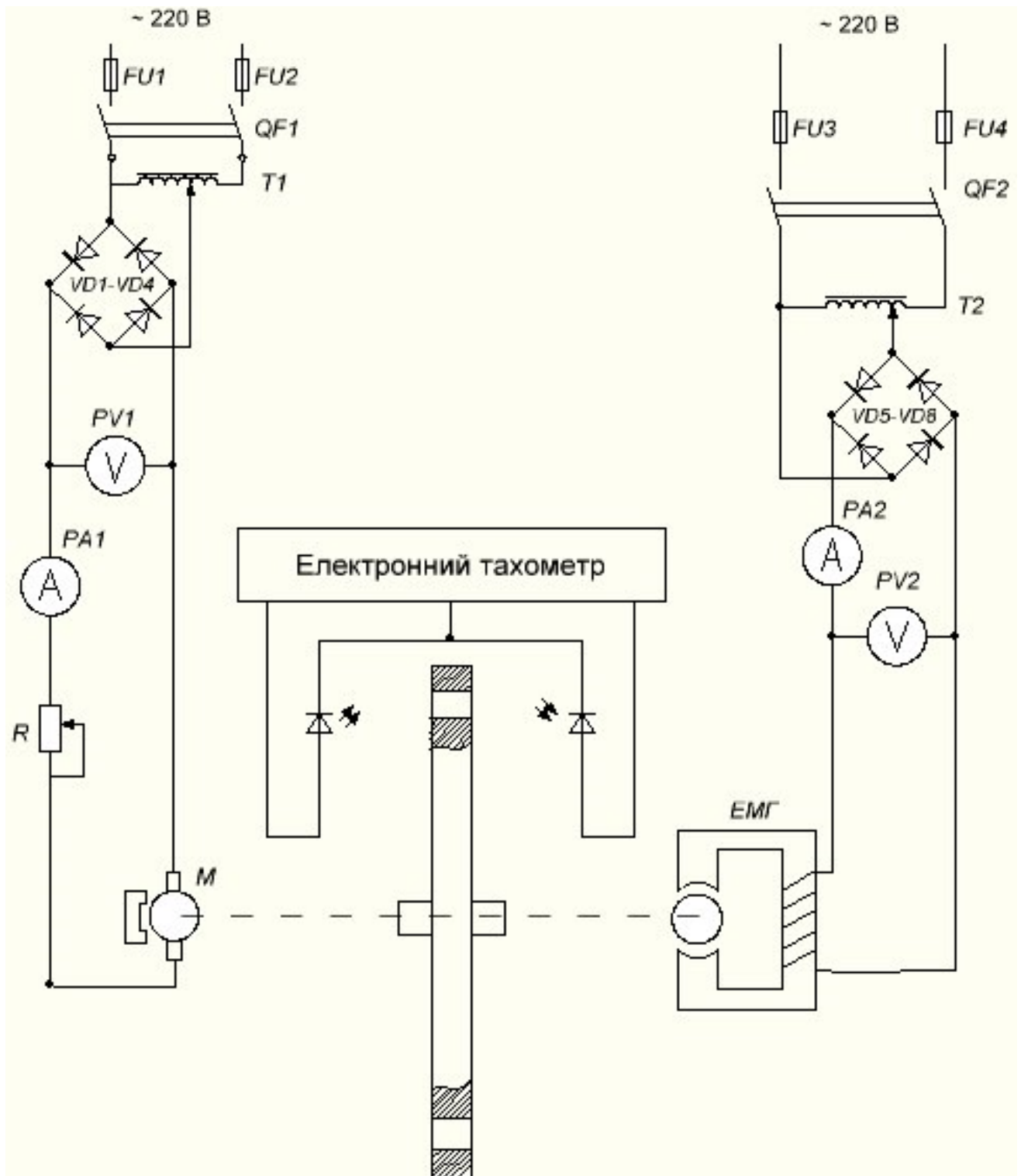


Рисунок 3.3 – Схема дослідження електричного двигуна постійного струму з електромагнітним гальмом

Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
40

2.3 Розробка цифрового пристрою для вимірювання частоти обертання

Електронний тахометр являє собою цифровий частотомір з фіксованим інтервалом вимірювання [19]. Для визначення обертів двигуна використовується оптопара, яка включає фотодіод і інфрачервоний світлодіод [20].

Світловий потік від світлодіода спрямовується на світловідбиваючу пластину, встановлену на валу досліджуваного двигуна. У процесі обертання вала модульований світловий сигнал відбивається на фотодіод оптопари ОР. Цей сигнал підсилюється і формується у підсилювачі-формуєві UF, а потім передається на вхід комутатора.

Генератор задаючої частоти G працює на кварцовій стабілізації та генерує сигнали частотою 64 Гц і 1 Гц. Сигнал з частотою 64 Гц використовується для керування цифровим індикатором, а сигнал 1 Гц подається на тригер Т, що створює вимірювальний імпульс тривалістю 1 секунду.

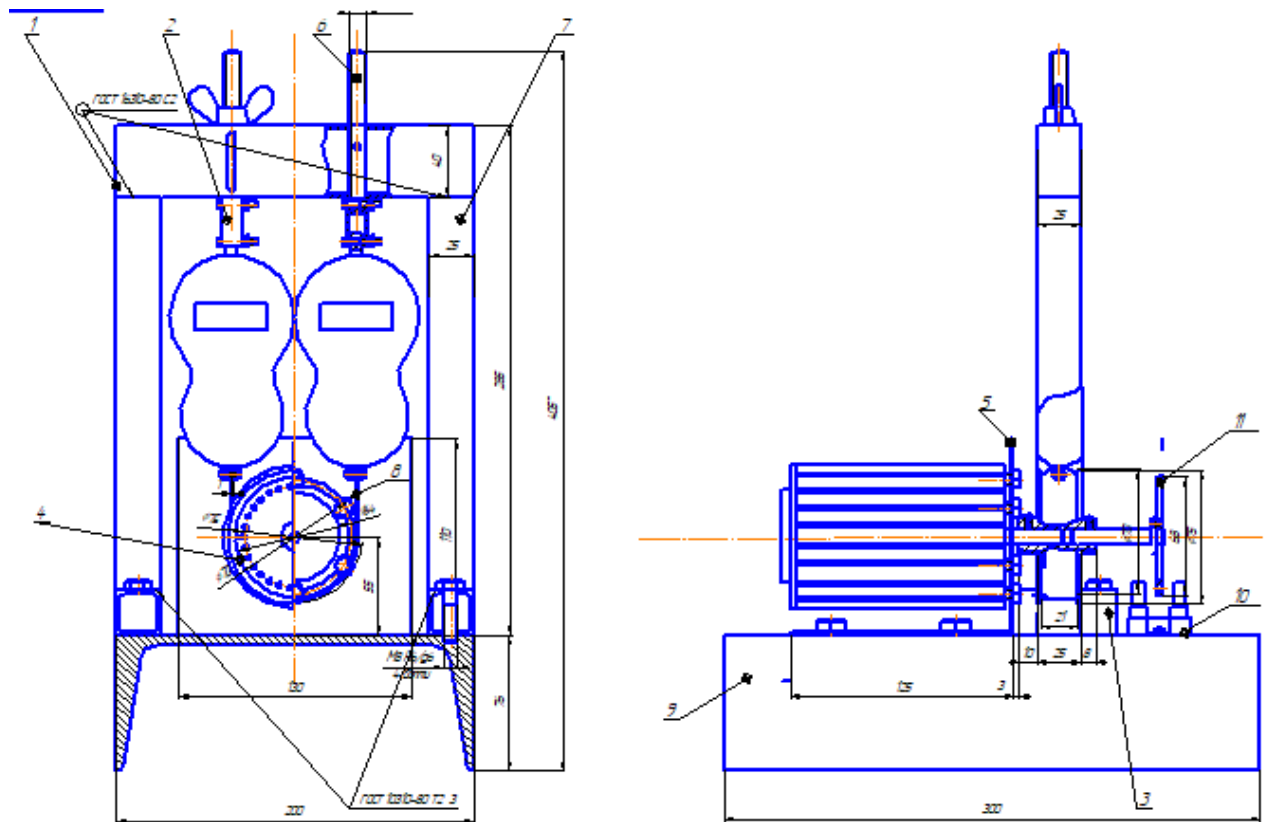
Цей вимірювальний імпульс надходить як на вхід комутатора, так і на формувач імпульсів F. Під час роботи тахометра комутатор генерує пакети імпульсів, які передаються на вхід чотирирозрядного десяткового лічильника. До виходу лічильника підключений цифровий індикатор, який відображає результат. Перед початком кожного циклу вимірювання формувач імпульсів скидає лічильник у нульовий стан, забезпечуючи точність подальших вимірювань.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2.4 Розробка конструкції стану для дослідження характеристик двигунів постійного струму з постійними магнітами

На основі виконаних розрахунків був розроблений станд для дослідження двигунів постійного струму з постійними магнітами [21-23]. Збірне креслення цього стану наведено на рис. 2.5 (лист [МРМА24.00.00.000СК]).

Основними компонентами стану є: балка 1, втулка 2, опора 3, шків 4, кронштейн 5, шпилька 6, стійка 7, металева стрічка 8, станина 9, електронний тахометр 10, диск 11.



1 – балка, 2 – втулка, 3 – опора, 4 – шків, 5 – кронштейн, 6 – шпилька, 7 – стійка, 8 – стрічка металева, 9 – станина, 10 – електронний тахометр, 11 – диск.

Рисунок 3.5 – Збірне креслення стану для вивчення двигунів постійного струму з постійними магнітами:

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
43

2.5 Загальний вигляд установки для визначення параметрів двигунів постійного струму з постійними магнітами

Загальний вигляд стенду для дослідження двигунів постійного струму з постійними магнітами зображено на рис. 2.6 (лист [МРМА24.00.00.000ДІ]).

Основні компоненти стенду включають: диск 1, стійку 2, динамометр 3, шпильку 4 та штурвал 5.



1 – диск; 2 – стійка; 3 – динамометр; 4 – шпилька; 5 – штурвал.

Рисунок 2.6 – Фотографія стенду для вивчення двигунів постійного струму з постійними магнітами:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2.6 Висновки до другого розділу

1. Розроблений стенд дозволяє проводити дослідження робочих та механічних характеристик двигунів постійного струму з постійними магнітами, а також визначати їх основні параметри.

2. У стенді використовуються доступні та недорогі прилади й пристрої.

3. Основними перевагами стенду є його простота конструкції, наочність і висока надійність.

4. Стенд може бути інтегрований у навчальний процес кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

3.1 Схема підключення і тестовий запуск двигуна постійного струму

Перед початком досліджень необхідно встановити резистор R на максимальне значення опору. Слід підключити стенд до електричної мережі змінного струму 220 В. Повзунок регулятора напруги однофазного слід перемістити в крайнє ліве положення для встановлення мінімальної напруги. Увімкніть автомат QF1 і за допомогою регулятора напруги однофазного подайте потрібну напругу на обмотку якоря двигуна. Величину постійної напруги контролюють за допомогою вольтметра PV1, а струм – за допомогою амперметра PA1.

Для зміни напрямку обертання двигуна потрібно змінити полярність струму в обмотці якоря. Навантаження двигуна створюється стрічковим гальмом (рис.2.2) або електромагнітним гальмом (рис.2.3). Регулювання навантаження при використанні електромагнітного гальма здійснюється зміною напруги на його обмотку, яка подається через випрямляч VD5-VD8 та лабораторний автоматичний трансформатор T2. Контроль напруги й струму електромагнітного гальма виконується за допомогою вольтметра PV2 та амперметра PA2 [1-7].

3.2 Робочі характеристики двигуна постійного струму з постійними магнітами

Робочі характеристики демонструють залежність частоти обертання n_{pp} , споживаного струму I , корисного моменту M_2 , та коефіцієнта корисної дії η від корисної потужності на валу електродвигуна, за умов постійної напруги на обмотці якоря [1-7].

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для визначення параметрів, необхідних для побудови робочих характеристик, запускають електродвигун і поступово навантажують його до досягнення номінального струму навантаження при номінальній частоті обертання. У цей момент знімають показання амперметра РА1, вольтметра РV1, та дані зі стрічкового гальма. Потім електродвигун поступово розвантажують до режиму холостого ходу. Через рівні інтервали струму навантаження фіксують показання приладів і записують їх до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Дослідження механічної та робочих характеристик електричного двигуна постійного струму з постійними магнітами ДПС-80-12

№ вим.	Вимірювання						Розрахунки		
	F ₂ , кг	F ₁ , кг	F ₁ -F ₂ , кг	M ₂ , Н·м	n, об/хв.	I _a , А	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	η, %
1	0	0	0	0	7400	2,8	18	0	0
2	1	0,897	0,103	0,025	7180	7	84	18,8	22,4
3	2	1,794	0,206	0,05	6800	7,8	94	39,5	42
4	3	2,588	0,412	0,1	6200	9,4	113	75	58
5	4	3,45	0,55	0,135	5800	10,3	124	82,2	66
6	5	4,175	0,825	0,2	5000	10,6	127	79	62
7	7	5,76	1,24	0,3	3800	10,8	130	64	49
8	8	6,35	1,65	0,4	2500	10,9	129	44	34
9	9	6,94	2,06	0,5	1200	11	135	23	17

Розрахунок значення споживаної потужності, Вт знаходиться за наступною формулою:

$$P_1 = U \cdot I, \quad (3.1)$$

корисної потужності, Вт:

$$P_2 = 0,105M_2 \cdot n, \quad (3.2)$$

і ККД двигуна, %:

$$\eta = (P_2/P_1)100\%, \quad (3.3)$$

будуються робочі характеристики в одних осях координат.

Розрахунок для другої точки характеристики проведено виходячи із формули:

$$P_1 = U \cdot I = 12 \cdot 7 = 84 \text{ Вт};$$

$$P_2 = 0,105M_2 \cdot n = 0,105 \cdot 0,025 \cdot 7180 = 18,8 \text{ Вт}.$$

$$\eta = (P_2/P_1)100\% = (18,8/84) \cdot 100 = 22,4\%.$$

Аналогічно було здійснено розрахунки для інших точок характеристик та занесено їх в табл.3.1.

Графіки характеристик представлені на рис.3.1.

3.2.1 Визначення коефіцієнту корисної дії методом холостого ходу

Частина енергії, що подається на машину постійного струму, витрачається на подолання різних втрат, які поділяються на дві категорії [1-3]:

- основні втрати;
- додаткові втрати.

Основні втрати поділяються на такі типи:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- магнітні;
- механічні;
- електричні.

Магнітні втрати виникають у сердечнику якоря через процеси перемагнічування та утворення вихрових струмів. Їхня величина залежить від частоти обертання якоря (що визначає частоту перемагнічування) і розміру основного магнітного потоку, який пропорційний електрорушійній силі обмотки якоря E_a [1-3].

Механічні втрати зумовлені тертям обертових частин машини. Це включає тертя у підшипниках, тертя щіток об колектор, а також опір руху якоря в повітрі. Їх розмір безпосередньо залежить від частоти обертання якоря.

Магнітні та механічні втрати разом називаються постійними втратами, оскільки їх потужність не залежить від навантаження машини. Аналітичне визначення таких втрат є складною задачею і зазвичай не дає високої точності. Для оцінки цих втрат часто застосовують експериментальний метод, який полягає у запуску електричної машини в режимі холостого ходу. У цьому режимі вимірюють струм якоря I_{a0} , подану напругу U_0 , і визначають потужність холостого ходу в колі якоря, яка є сумою магнітних і механічних втрат [1-3]:

$$P_{a0} = U_0 I_{a0} = P_M + P_{mex}, \quad (3.4)$$

При використанні цього методу важливо враховувати, що для отримання коректних результатів необхідно забезпечити таку подачу напруги U_0 на електродвигун, щоб електрорушійна сила якоря E_a у режимі холостого ходу дорівнювала електрорушійній силі якоря $E_{аном}$ у режимі номінального навантаження.

У двигунному режимі електричної машини постійного струму електрорушійна сила якоря завжди менша за подану напругу. Ця різниця зумовлена спаданням напруги на елементах, що входять у коло якоря (обмотка

якоря, обмотка додаткових полюсів тощо), $I_a \Sigma r_{75}$ та падінням напруги на щітках $\Delta U_{щ}$. З урахуванням цього, вираз для визначення електрорушійної сили якоря E_a у різних режимах виглядає наступним чином:

- для режиму холостого ходу

$$E_{a0} = U_0 - I_{a0} \Sigma r_{75} - \Delta U_{щ} (I_{a0} / I_{аном}), \quad (3.5)$$

- для режиму номінального навантаження

$$E_{аном} = U_{ном} - I_{аном} \Sigma r_{75} - \Delta U_{щ}, \quad (3.6)$$

Прийнявши до уваги умову рівності електрорушійної сили якоря, яку необхідно для досліду холостого ходу ($E_{a0} = E_{аном}$) і зробивши порівнявши (3.5) до (3.6), то було отримано те значення напруги холостого ходу U_0 , яке слід підвести до електричного двигуна при дослідженні холостого ходу (В) [1-3]:

$$U_0 = U_{ном} - \Sigma r_{75} (I_{аном} - I'_{a0}) - \Delta U_{щ} [1 - (I'_{a0} / I_{аном})] \quad (3.7)$$

де $\Delta U_{щ}$ – спадання напруги на щітках, як правило приймають рівним $\Delta U_{щ} = 2В$;

Σr_{75} – сума опорів обмоток у колі якоря (Ом), яка приведена до робочої температури 75 °С;

I_a і $I_{аном}$ – струми в електричних колах якоря в режимі холостого ходу і в режимі номінального навантаження, А.

Електричні втрати в машинах постійного струму виникають через протікання струму в обмотках і щітках електромашини. Ці втрати, які відбуваються в обмотках, що підключені послідовно до кола якоря, розраховуються за допомогою наступної формули:

$$P_{ea} = I_a^2 \Sigma r_{75} ; \quad (3.8)$$

електричні втрати у щітковому контакті (Вт) знаходяться за наступною формулою:

$$P_{e.щ} = I_a \Delta U_{щ} . \quad (3.9)$$

Електричні втрати, що виникають в обмотках кола якоря та у щітковому контакті, називаються змінними, оскільки їхня величина залежить від рівня навантаження електромашини [1-3].

Додаткові втрати включають важко обчислювані втрати, такі як магнітні втрати в полюсних наконечниках, викликані пульсацією магнітної індукції в повітряному зазорі, втрати через вихрові струми в мідних провідниках обмотки якоря тощо. Зазвичай величина цих втрат приймається на рівні 1% від підведеної до електродвигуна потужності (Вт). Тоді:

$$P_{\text{дод}} = 0,01UI . \quad (3.10)$$

Сума загальних втрат (Вт) визначається за наступною формулою:

$$\Sigma P = P_{a0} + P_{ea} + P_{e.щ} + P_{\text{дод}} , \quad (3.11)$$

ККД машини постійного струму (%) розраховується за формулою

$$\eta = (P_2 / P_1) 100 , \quad (3.12)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

де

$$P_2 = P_1 - \Sigma P. \quad (3.13)$$

4.2.2 Електричний опір обмоток у колі якоря

Опір вимірюється методом вольтметра – амперметра [24]. Для цього складають схему згідно рис.3.1 і після перевірки під'єднують до джерела постійного струму, а потім реостатом R у колі встановлюють струм $I = (0,1 \dots 0,2)I_{ном}$. За допомогою спеціальних щупів до пластин колектора, на які накладені щітки різної полярності, під'єднують вольтметр та вимірюють напругу U_a .

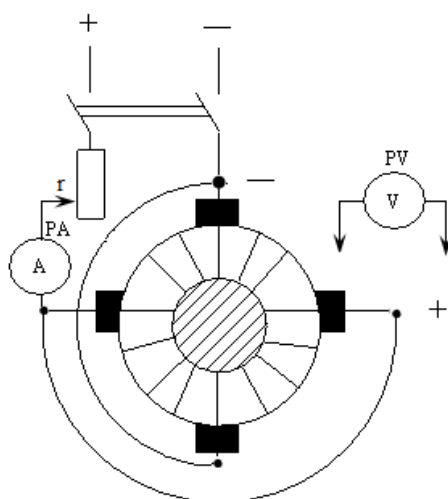


Рисунок 3.1 – Вимірювання опору обмотки якоря електричної машини постійного струму

Вимірювання виконують на обмотках у "холодному" стані, тобто за температури, що майже відповідає температурі навколишнього середовища θ_1 . Процедуру повторюють тричі, змінюючи положення якоря.

Значення опору обмотки якоря під час кожного вимірювання (в Омах) розраховують за формулою:

$$r_a = U_a / I . \quad (3.14)$$

За електричний опір обмотки якоря було прийнято середнє арифметичне значення опорів при трьох вимірюваннях (Ом) та визначено за формулою:

$$r_{acp} = (r_{a1} + r_{a2} + r_{a3}) / 3 . \quad (3.15)$$

Після цього щупи вольтметра прикладаються до виводів обмотки додаткових полюсів. Вимірюється напруга $U_{\text{дод.}n}$ і струм $I_{\text{дод.}n}$ та визначається електричний опір цієї обмотки (Ом) за наступною формулою:

$$r_{\text{дод.}n} = U_{\text{дод.}n} / I_{\text{дод.}n} . \quad (3.16)$$

Якщо в колі якоря є ще інші обмотки, то їх опір визначається аналогічним шляхом.

Сумарний опір обмоток у колі якоря (Ом) знаходиться із виразу:

$$\Sigma r = r_{acp} + r_{\text{дод.}n} + \dots \quad (3.17)$$

До робочої температури 75°C приводять отримане значення опору Σr :

$$\Sigma r_{75} = \Sigma r | 1 + \alpha (75 - \theta_1) | , \quad (3.18)$$

де α – температурний коефіцієнт, для міді - $\alpha = 0,004$.

3.2.3 Дослід холостого ходу

Для виконання дослід холостого ходу вмикається двигун у електромережу (слід замкнути автомат $QF1$), і встановлюється лабораторним автотрансформатором $T1$ і реостатом R номінальна напруга $U_{ном}$. В такому режимі вимірюється амперметром попереднє значення струму якоря в режимі холостого ходу I_{a0} . За (3.7) визначається напруга, що потрібна для виконання дослід холостого ходу з метою визначення експериментальним шляхом потужності холостого у колі якоря $P = P_m + P_{мех}$.

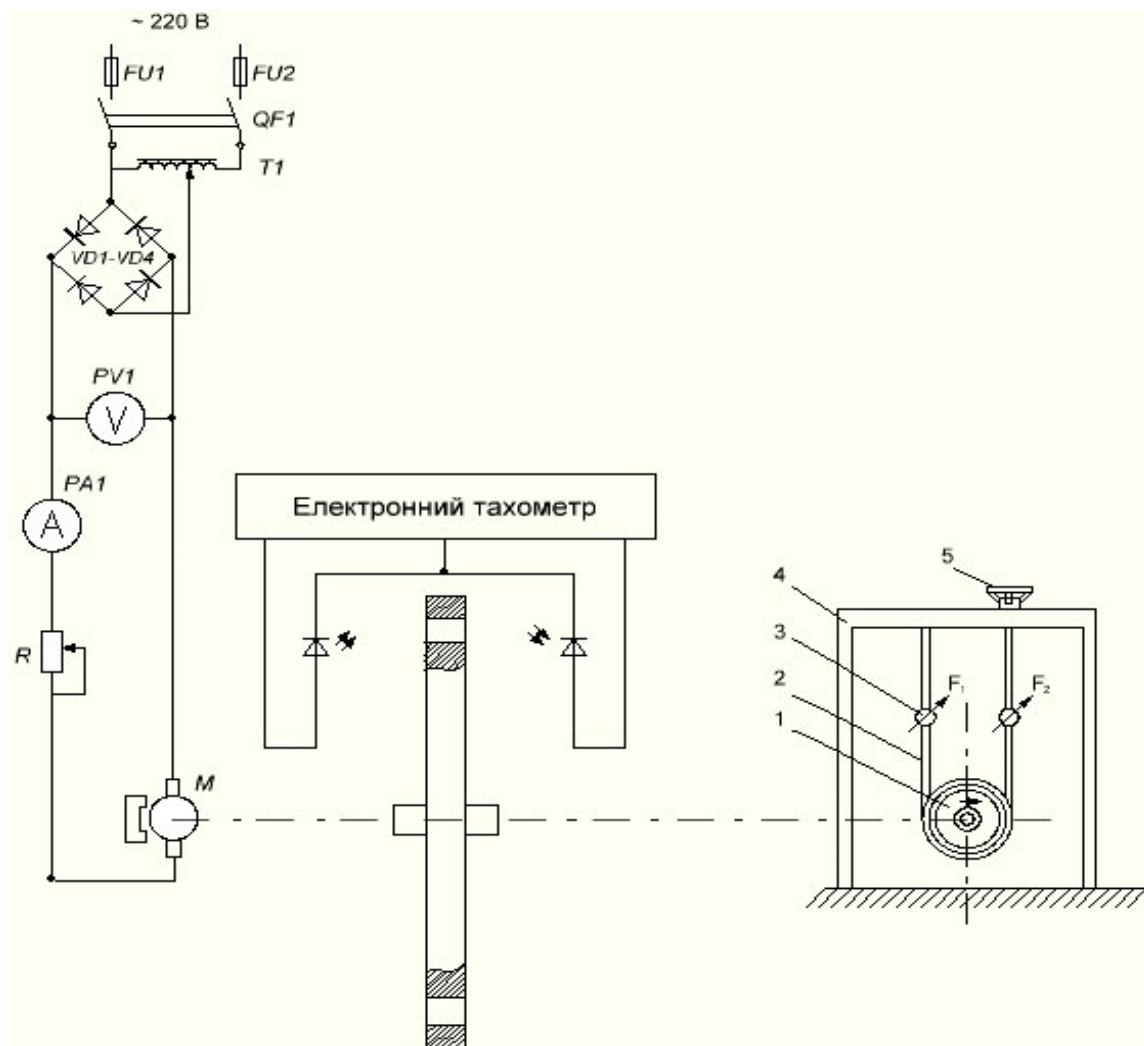


Рисунок 3.2 – Схема включення електричного двигуна постійного струму при досліді холостого ходу

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Номинальне значення струму в обмотці якоря (А) знаходиться за слідуючою формулою:

$$I_{аном} = I_{ном}. \quad (3.19)$$

Після цього реостатом R встановлюється на вході електродвигуна напруга U_0 , вимірюється струм якоря в режимі холостого ходу I_{a0} і знаходиться потужність холостого ходу у колі якоря P_{a0} , яка представляє собою суму магнітних і механічних втрат.

3.2.4 Коефіцієнт корисної дії

Задавши ряд значень струму навантаження, наприклад $I = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$ $I_{ном}$ визначаються відповідні значення струму в обмотці якоря (А) електродвигуна за наступною формулою [1-3]:

$$I_a = I, \quad (3.20)$$

а потім знаходяться електричні втрати: в обмотках кола якоря P_{ea} (3.8) і в щітковому контакті $P_{e.щ}$ (3.9), а також додаткові втрати $P_{дод}$ (3.10).

Знайшовши суму втрат ΣP (3.11), спожиту ($P_1=UI$) та корисну (3.12) потужності, вираховується ККД машини і будується графік залежності коефіцієнта корисної дії η від струму навантаження I .

3.2.5 Механічна характеристика

Механічна характеристика електричного двигуна постійного струму з постійними магнітами являє собою залежність частоти обертання двигуна від

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

абсцис. Чим більший опір, увімкнений у коло якоря, тим більший кут нахилу механічної характеристики. Характеристику електродвигуна за відсутності додаткового опору в колі якоря називають природною (натуральною), а у разі використання додаткового опору - штучною. Результати дослідження механічних характеристик двигуна постійного струму з постійними магнітами за різних опорів у колі якоря наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Дослідження механічних характеристик електродвигуна постійного струму з постійним магнітами ДПС–80–12 при введенні в коло якоря додаткових опорів

№ з/п	$R_d = 0 \text{ Ом}$		$R_d = 0,1 \text{ Ом}$		$R_d = 0,2 \text{ Ом}$	
	М, Н·м	n, об/хв	М, Н·м	n, об/хв	М, Н·м	n, об/хв
1	0	7400	0	7400	0	7400
2	0,05	6800	0,05	6400	0,05	6080
3	0,1	6200	0,1	5400	0,1	4600
4	0,135	5800	0,135	4800	0,13	3800
5	0,15	5600	0,15	4500	0,15	3400

При зміні напруги в колі якоря електричного двигуна U змінюється частота обертання n_0 , а Δn залишається незмінною. Підсумовуючи можна констатувати, що жорсткість механічної характеристики, якщо знехтувати впливом реакції якоря не змінюється.

Результати досліджень наведені в табл.3.4, а отримані графіки на рис.3.3 - 3.6 (аркуш [МРМА24.00.00.000РР2] - (аркуш [МРМА24.00.00.000РР5])).

Таблиця 3.4 – Дослідження механічних характеристик електричного двигуна постійного струму з постійними магнітами ДПС-80-12 при зміні напруги в колі якоря

№ з/п	U ₁ = 9В		U ₂ =10В		U ₃ =11В		U ₄ =12В		U ₅ =13В		U ₆ =14В	
	М, Н·м	п, об/ хв	М, Н·м	п, об/ хв	М, Н·м	п, об/ хв	М, Н·м	п, об/ хв	М, Н·м	п, об/ хв	М, Н·м	п, об/ хв
1	0	5000	0	600	0	6600	0	7400	0	8200	0	9000
2	0,05	4400	0,05	5200	0,05	6000	0,05	6800	0,05	7600	0,05	8400
3	0,1	3800	0,1	4600	0,1	5400	0,1	6200	0,1	7000	0,1	7800
4	0,135	3400	0,135	4200	0,135	5000	0,135	5800	0,135	6600	0,135	7400
5	0,15	3200	0,15	4000	0,15	4800	0,15	5600	0,15	6400	0,15	7200
6	0,2	2600	0,2	3400	0,2	4200	0,2	5000	0,2	5800	0,2	6600

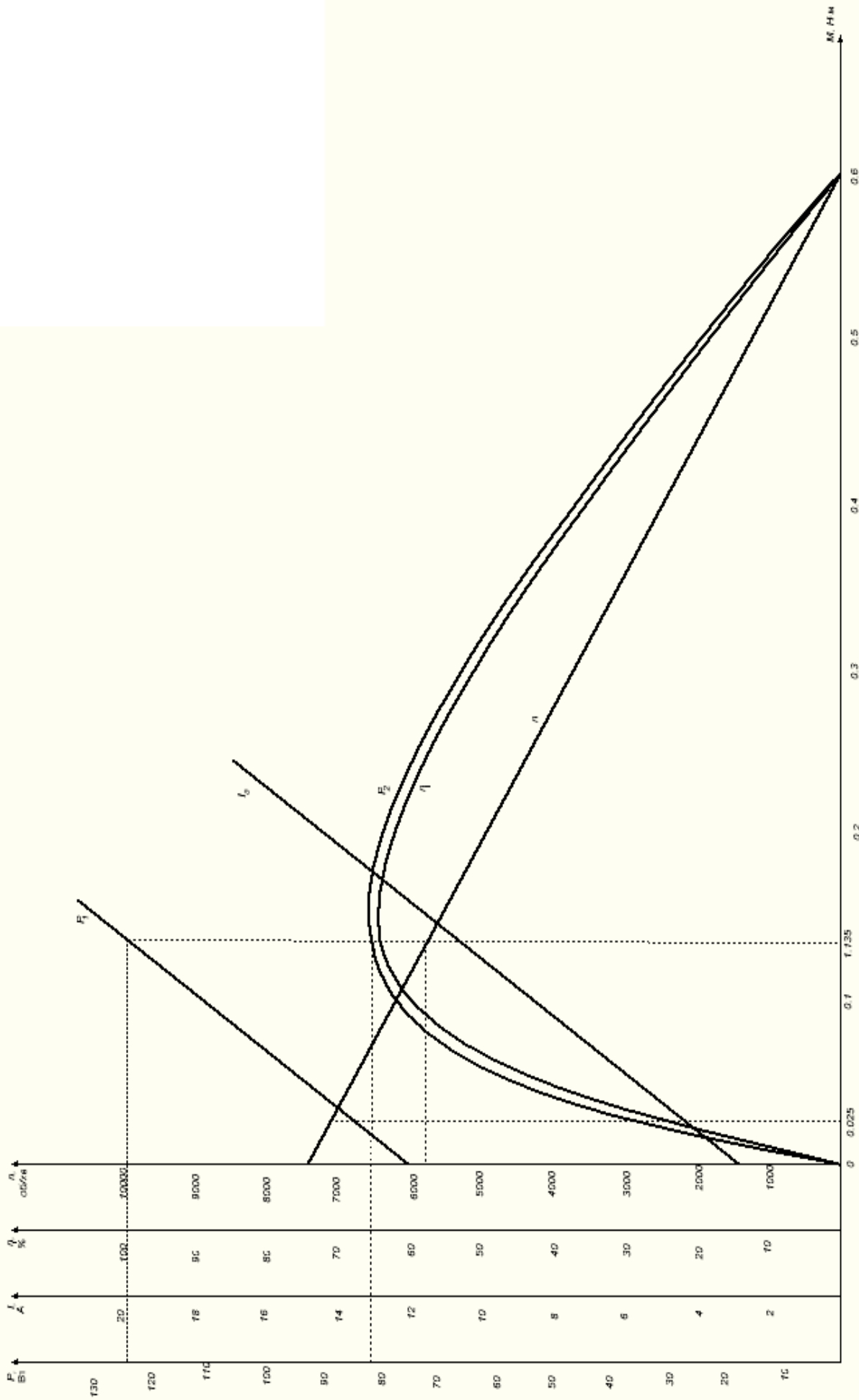


Рисунок 3.3 – Механічна $n=f(M)$ і робочі характеристики $P_1=f(M)$, $P_2=f(M)$, $I_a=f(M)$, $\eta=f(M)$

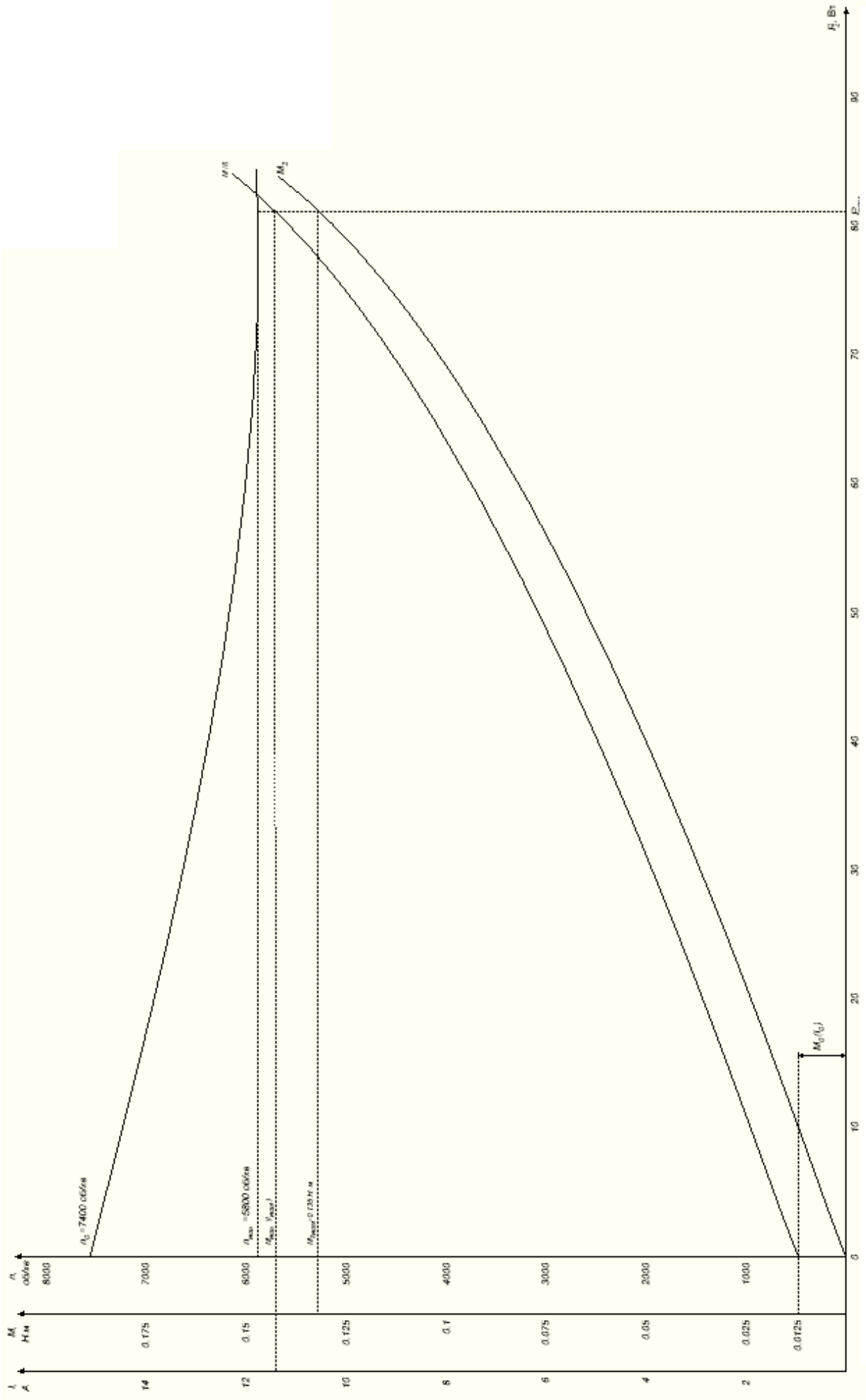


Рисунок 3.4 –Робочі характеристики ДПС з ПМ типу ДПС 80-12 $n=f(P_2), M_2=f(P_2), M=f(P_2)$

Зм.	Арк.	Но́докум.	Підпис	Дата
-----	------	-----------	--------	------

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

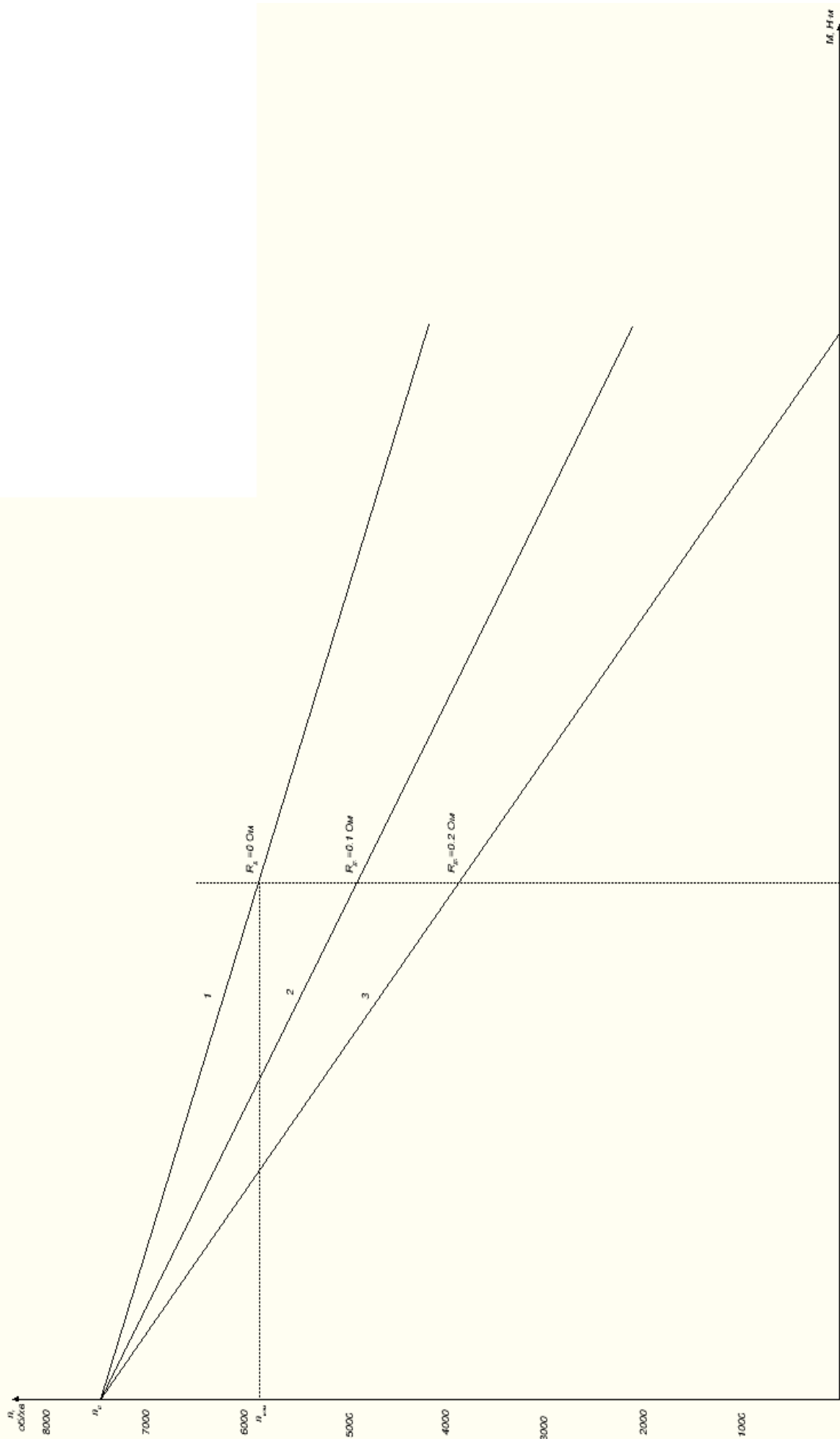


Рисунок 3.5—Механічні характеристики ДПС з ПМ типу ДПС 80-12 при додатковому опорі в колі якоря

Зм.	Арк.	Но́докум.	Підпис	Дата
-----	------	-----------	--------	------

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
61

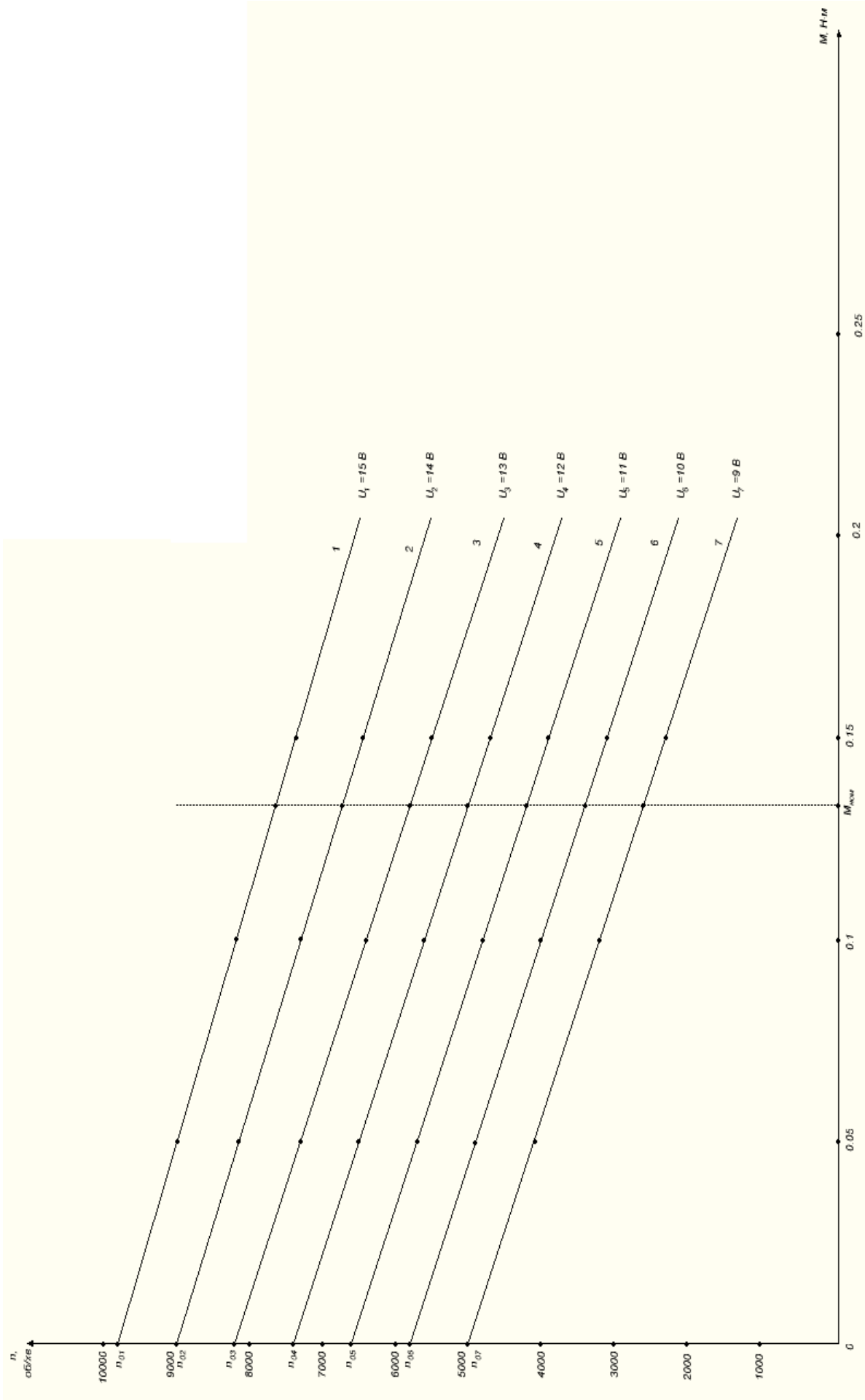


Рисунок 3.6–Механічні характеристики ДПС з ПМ типу ДПС 80-12 при зміні напруги в колі якоря

Зм.	Арк.	Но́докум.	Підпис	Дата
-----	------	-----------	--------	------

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

3.3 Висновки до третього розділу

1. Встановлено, що механічна характеристика двигуна постійного струму з постійними магнітами має лінійну залежність, де пряма лінія злегка нахилена до осі абсцис.

2. Величина кута нахилу механічної характеристики зростає із збільшенням опору, увімкненого в коло якоря.

3. Зміна напруги на якорі призводить до зміни частоти обертання n_0 двигуна, при цьому Δn залишається постійною. Жорсткість механічних характеристик, за умови ігнорування реакції якоря, залишається незмінною.

4. Характеристики зсуваються вертикально, залишаючись паралельними одна одній.

1. З'ясовано, що механічна характеристика двигуна постійного струму з постійними магнітами має лінійний характер. Пряма лінія дещо нахилена до вісі абсцис.

2. Кут нахилу механічної характеристики тим більший, чим більший опір, що увімкнений в коло якоря.

3. При змінній напруги на якорі змінюється частота обертання n_0 двигуна, а Δn залишається незмінною. При цьому жорсткість механічних характеристик, якщо знехтувати впливом реакції якоря, не змінюється.

4. Характеристики зміщуються по висоті, залишаючись паралельно одна одній.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході дослідження розглянуто й проаналізовано основні типи та конструктивні особливості двигунів постійного струму з постійними магнітами, а також конструкції їх магнітних систем. Виявлено, що такі двигуни мають низку переваг, серед яких відсутність втрат потужності на збудження, високий коефіцієнт корисної дії, незалежність основного магнітного потоку від змін температури або коливань напруги. Завдяки цим властивостям двигуни постійного струму з постійними магнітами набувають дедалі більшого поширення в автоматизованих електроприводах, слідкуючих системах та побутовій техніці.

До недоліків цих двигунів раніше відносили старіння постійних магнітів, проте з появою сучасних матеріалів, таких як альніко, металокераміка та залізо-хром-кобальтові композиції, цей недолік майже усунуто. Важливими технічними характеристиками є коефіцієнт полюсного перекриття та розподіл магнітної індукції, які безпосередньо впливають на робочі властивості двигуна. При цьому максимальне значення електрорушійної сили досягається при повному кроці обмотки якоря, а положення щіток на геометричній нейтралі забезпечує найвищу електрорушійну силу.

Електромагнітний момент двигуна в двигунному режимі має обертовий характер, а в генераторному - гальмівний. Для однакової потужності двигуни з меншою частотою обертання якоря створюють більший момент. Водночас реакція якоря викликає спотворення магнітного поля, що може розмагнічувати машину, а також впливати на її робочі властивості. У генераторному режимі фізична нейтраль зміщується залежно від напрямку обертання якоря.

При збільшенні навантаження на вал двигуна зростає потужність у колі якоря, що супроводжується збільшенням струму в обмотці якоря. Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму з постійними магнітами

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

можливе як шляхом зміни напруги, що подається, так і через зміну електричного опору в колі якоря.

Розроблений стенд для дослідження двигунів постійного струму з постійними магнітами дозволяє вивчати їх робочі та механічні характеристики, а також визначати основні параметри. Використані у стенді прилади є доступними і недорогими. Серед переваг стенду можна виділити його простоту, наочність і надійність. Цей стенд рекомендовано для впровадження у навчальний процес кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету.

Дослідження показали, що механічна характеристика двигунів постійного струму з постійними магнітами має лінійний характер, а її нахил до осі абсцис залежить від опору в колі якоря. При зміні напруги на якорі змінюється частота обертання двигуна, однак жорсткість характеристик залишається незмінною, якщо не враховувати реакцію якоря. Характеристики зміщуються по висоті, залишаючись паралельними одна одній.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Електричні машини. Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.П. Довгань. -Дніпропетровськ, Видавництво Національного гірничого університету, 2003, -328 с.
2. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с. 3. Електродвигуни ДПМ [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zapadpribor.com/ua/category/elektrodvyhuny-dpm/2/>
4. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
5. Белікова Л. Я. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012.– 480 с.
6. Електричні машини і трансформатори /підручник за заг. Ред. В. І. Мілих. – Х.: ХП, 2017. – 452 с.
7. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: Навч. посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.
8. Спеціальні сплави, РЗМ та благородні метали. Навчальний посібник / Куцова В.З., Носко О.А., Ковзель М.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007. – 163 с. 9. Оцінка стійкості до розмагнічування двигуна постійного струму зі збудженням від постійних магнітів [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/uk/sepes/vsi-vypusky/vypusk-2-nomer-1-2020/ocinka-stiykosti-do-rozmagnichuvannya-dvyguna-postiynogo>.
10. Двигун з гладким (безпазовим) якорем [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://willardmh.livejournal.com/10927.html>.
11. Безконтактний керований електродвигун [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://crust.ust.edu.ua/bitstream/123456789/16256/1/Ananchenko_dip_m_2022.pdf.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

12. Малоінерційний електродвигун постійного струму [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://alaro.com.ua/ua/p658098068-elektrodivigatel-edm-16u.html>.

13. Електричні машини постійного струму [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://lpcollege.com.ua/e-library/get-file/elektrichni-mashini-postijnogo-strumu-zagalni-kharakteristiki>.

14. Вікромашини постійного струму [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://learn.ztu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=37362>.

15. Електричні машини постійного струму [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://univer.nuczu.edu.ua/e-books/326/520.html>.

16. Електричні машини постійного струму [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://web.kpi.kharkov.ua/ze/wp-content/uploads/sites/146/2022/03/Lektsiya-6-Elektrychni-mashyny-postijnogo-strumu.pdf>.

17. Характеристики двигуна постійного струму з постійними магнітами [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://ua.sivomotor.com/info/characteristics-of-permanent-magnet-dc-motor-81337695.html>.

18. ДПС 80-12 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://epp.electron.ua/motors_dc_500/dps_80-12_181.htm?act=print.

19. Тахометри безконтактні [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://protester.com.ua/ua/tachometer/?srsltid=AfmBOop0Z_aIyN33jLHAJQd-ueRRwb7UvxxAegEtcz8V-dISKn87G5K5.

20. Оптрон [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BF%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD>.

21. Лабораторний стенд для дослідження двигунів постійного струму з цифровими каналами вимірювання, обробкою даних та віртуалізацією процесу

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	Нодокум.	Підпис	Дата		

досліджень [Електронний ресурс]. - Режим доступу:
<https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/23735?locale-attribute=en>.

22. Поднебенна С., Бурлака В., Корольов І. (2020). Розробка лабораторного стенду для визначення характеристик безколекторного двигуна постійного струму. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (41), С.76–80.

23. Білюк І., Савченко О., Ольшевський С., Тубальцев А., Бугрім Л., Майборода О. (2023). Стенд для дослідження електроприводу на базі безколекторного трифазного двигуна постійного струму. Науковий збірник «InterConf+», (29(139), С.227–241.

24. Метод амперметра і вольтметра [Електронний ресурс]. - Режим доступу:
https://stud.com.ua/175396/tehnika/metod_ampermetra_voltmetra#google_vignette.

25. Електричні машини постійного струму [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://lpcollege.com.ua/e-library/get-file/elektrichni-mashini-postijnogo-strumu-zagalni-kharakteristiki>.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		