

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Проект стенду для діагностики
електропроводу побутової техніки

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр, назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр, назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»

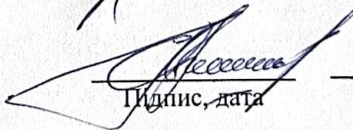
Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 3 курсу
група ЕТс-22-1


Підпис

І. А. Морозов
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

С. Л. Горященко
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

Турчак С.Т.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

В. С. Неймак
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС
2 06 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва


Спеціалізація _____

Шифр і назва

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2.06.2025

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Морозов Іван Андрійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Проект стану для діагностики електропроводу побутової техніки

керівник роботи Горященко Сергій Леонідович, к.т.н., доцент

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

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи Потужність електроприводу до 2кВт, напруга 220 В.

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

Вступ. 1. Аналіз існуючих систем діагностування електроприводу побутової техніки. 2. Розробка конструкції стану для діагностування електроприводу.

3. Розрахунки вимірювального блоку. Висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Пристрої вимірювання крутного моменту (ДО, А1). 2. Стенд для вимірювання крутного моменту тензOMETричним моментоміром (Д1, А1). 3.

Будова вдосконаленого тензOMETричного моментоміра (Д2, А1). 4.

Мікропроцесорна система вимірювання параметрів електричного двигуна змінного струму (Е1, А1). 5. Мікропроцесорна система вимірювання

параметрів електричного двигуна змінного струму (Е3, А1).

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	Примітка
1. <u>Аналіз існуючих систем діагностування електроприводу побутової техніки</u>		
2. <u>Розробка конструкції стенду для діагностування електроприводу</u>		
3. <u>Розрахунки вимірювального блоку</u>		
4. <u>Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу</u>		

Студент


Підпис

І.А. Морозов
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

С. Л. Горященко
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»


1. Прізвище, ім'я та по батькові Морозов Іван Андрійович

2. Тема магістерської роботи Проект стану для діагностики електропроводу побутової техніки

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

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 69

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: Вступ. 1. Аналіз існуючих систем діагностування електроприводу побутової техніки. 2. Розробка конструкції стану для діагностування електроприводу. 3. Розрахунки вимірювального блоку. Висновки. Перелік джерел посилань

Підпис студента 

" 2 " 06 2025 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 5 від " 25 " 06 2025 р.

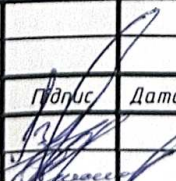
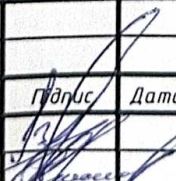
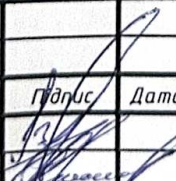
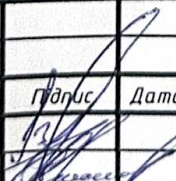
Оцінка проекту ЕК 4,0 / 5
Рекомендації ЕК впровадження в навчальний процес

Особливі відмітки _____

Технічний секретар 

" 25 " 06 2025 р.

	С.
Вступ	5
1 Аналіз існуючих систем діагностування електроприводу побутової техніки	6
1.1 Схеми та структури для діагностики електроприводів у побутовій техніці	6
1.2 Методи вимірювання крутних моментів на валу	8
1.3 Конструкції існуючих пристроїв для вимірювання крутного моменту	14
Висновки до першого розділу	23
2. Розробка конструкції стенду для діагностування електроприводу	25
2.1 Аналіз структурної схеми пристрою	25
2.2 Принцип роботи пристрою	28
2.3 Аналіз схеми електричної	30
2.4 Вибір типу вимірювального механізму	32
2.5 Моментоміри трансмісійного типу	35
2.6 Розробка схеми дослідження електродвигунів	37
2.7 Розробка електричної схеми стенду для діагностики електроприводу	39
2.8 Розробка конструктивної схеми пристрою для діагностування	44
Висновки до другого розділу	48
3 Розрахунки вимірювального блоку	49
3.1 Вибір схеми силового ключа	50
3.2 Електричні розрахунки електронного ключа	55
3.3 Розрахунки виготовлення друкованої плати блоку вимірювання	56
Висновки до третього розділу	64
Висновки	64
Перелік джерел посилань	66

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Морозов І.А.			Проект стенду для діагностики електроприводу побутової техніки	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Горященко					4	
Т.Контр.		Жуцкич			гр. ЕМз-21-1			
Н. Контр.		Неймак						
Затверд.								

ВСТУП

Відомо що із часом, процеси старіння ведуть до погіршення технічних характеристик рухомих частин двигуна. А подальша експлуатація двигунів, що мають критичні відхилення є небезпечною. Неодмінним роботи кожного електродвигуна є його ефективність роботи. Тобто перетворювати електричну енергію в механічну. На виході електродвигуна отримується механічна потужність, яка характеризується механічною характеристикою. Для її зняття необхідно вимірювати крутний момент на валу електродвигуна в залежності від кутової швидкості.

Вимірювання крутного моменту має важливу роль у проектуванні, експлуатації та діагностуванні електродвигунів, тому до пристроїв вимірювання вставляються високі вимоги. До них відносяться точність та простота, автоматизованість вимірювання та легкість обробки результатів, мінімальний вплив пристрою вимірювання на сам процес дослідження та роботи електродвигуна.

Актуальною задачею є розробка пристрою для вимірювання крутних моментів електродвигунів саме для побутової техніки, так як існуючі вимірювачі є дещо громіздкими та не враховують специфіку вимірювання на відмінно як для інших двигунів промисловості чи транспорту.

Елемент керування електродвигуном є типовим регулятором обертів, що виконує дії з утримання частоти обертання. Більш потужні елементи керування містять кола керування швидкістю наростання частоти обертання вала електродвигуна. Це дозволяє вмикати та вводити у режим електродвигун без великих імпульсних навантажень.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОБУТОВОЇ ТЕХНІКИ

1.1 Схеми та структури для діагностики електроприводу у побутовій техніці

Основні напрямки діагностування показані на БРМА 25.00.00.000 ДО. Діагностика несправностей індукційного двигуна запропонована у Motor Current Signature Analysis (MCSA), це аналіз спектра струму для визначення зламаних стержнів ротора, міжвиткових замикань чи проблем з підшипниками. Блок-схема системи: дослідження МК-аналіз, генерація особливостей, класифікація через нечітку логіку або нейронні мережі

Використовується інтегрована діагностика сучасного електроприводу. У складних схемах (напр., PMSM, інвертори) застосовують багаторівневі методи: модельні, сигнальні (струм/напруга), машинне навчання. Як правило це: сенсори струмів, напруги, Hall-датчики, аналіз коливань параметрів у часі.

Розроблена системи моніторингу та апаратного захисту Компанії (ТІ, Yokogawa, Teledyne, Fluke), що створюють референсні схеми для діагностики електроприводів: моніторинг Vds, струму, температури, вібрацій.

Пристрої забезпечують аналіз вхідної якості живлення, гармонік, аномалій швидкості обертання.

Конфігурація типового приводного вузла з діагностикою має такий вигляд

АС/DC-вирівнювач → DC-link → інвертор → електродвигун + вбудовані датчики струму та напруги → контролер/мікроконтролер/PLC.

На схемах є галузі контролю струму, сенсори температури, захист від коротких замикань, виявлення несиметрії фаз.

Визначення крутного моменту (моменту, що розвиває електродвигун) — важливий етап у діагностиці та керуванні електроприводом. Особливо це

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

актуально для побутової техніки (пральні машини, пилососи, кондиціонери, міксери), де момент тісно пов'язаний із навантаженням, ефективністю та несправностями.

Основні методи визначення крутного моменту: Прямі методи (з використанням давачів моменту). Використовують тензометричні або динамометричні датчики, встановлені на валу. Недолік: складні, дорогі, непридатні для компактної побутової техніки.

Непрямі методи (розрахункові, за струмом/швидкістю):

а) За струмом статора (асинхронний двигун):

$$M = k \cdot I_s^2$$

де

M — крутний момент,

I_s — струм статора,

k — коефіцієнт, що враховує характеристики двигуна (може бути калібрований на основі паспортних даних або вимірювання).

б) За електромагнітним моментом у PMSM/BLDC:

$$M_e = 3/2 \cdot P/2 \cdot (\psi \cdot I_q)$$

де

P — кількість полюсів,

ψ — магнітний потік,

I_q — складова струму, що створює момент (векторне керування).

Цей метод застосовується в інверторних двигунах з векторним або прямим керуванням моментом (FOC, DTC).

в) За механічною потужністю:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} / 60$$

де

P — потужність (Вт),

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

n — швидкість обертання (об/хв),

M — момент (Н·м).

Вбудовані сенсори струму дозволяють мікроконтролеру (ESP32, STM32, тощо) оцінювати момент у реальному часі. Контроль моменту дозволяє:

- визначити перевантаження;
- виявити зношення або підклинювання;
- керувати динамікою роботи пристрою (наприклад, у пральній машині — адаптація до ваги білизни).

1.2 Методи вимірювання крутних моментів на валу

Обертальний момент є одним з головних параметрів двигуна. Без його вимірювання неможливе визначення механічної властивості, а також корисної потужності та к. к. д. Обертальний момент, може бути визначений або шляхом безпосереднього вимірювання, або непрямим методом.

Мікроелектродвигуни систем автоматики мають зазвичай невисокий коеф. корисної дії (менше 70%) і для них, як правило, застосовують метод безпосереднього вимірювання обертальних моментів. Спеціальний прилад — моментомір навантажує випробовуваний двигун певним гальмівним моментом і вимірює величину цього моменту.

У основі методу безпосереднього вимірювання обертальних моментів, лежить наступне рівняння руху:

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} = M_c + M_d, \quad (1.1)$$

де M — крутний момент на валу двигуна;

M_c — момент опору механізму, що приводиться в рух;

$M_d = J \frac{d\omega}{dt}$ — динамічний момент.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

З рівняння (1.1) видно, що вимірювання моменту двигуна можна здійснити:

а) при сталому режимі роботи (статичний метод), коли $M_d=0$, а величина M_c , створювана пристроєм навантаження, постійна;

б) при розгоні (динамічний метод), коли можна допустити, що $M_c=\text{const}$ (зокрема $M_c=0$) у всьому робочому діапазоні;

в) вимірюючи загальний момент (спосіб загального моменту), наприклад, за реакцією статора випробовуваної машини.

У промисловості під час контрольних, типових та інших випробувань використовується перший спосіб. Проте у ряді лабораторних дослідів (визначення механічних характеристик асинхронних двигунів і т. ін.) широко застосовуються також другий і третій способи вимірювань.

В додатку А представлена загальна класифікація методів вимірювання і конструктивних різновидів моментомірів, що детально наведена в джерелі [2]. Для двигунів автоматичних пристроїв основним є безпосереднє вимірювання моментів, які обертають (непряме застосовується вкрай рідко). Тому нижче розглядаються тільки методи безпосереднього вимірювання: статичний, динамічний і метод загального моменту.

1.2.1 Статичний метод

Наразі основним способом вимірювання крутних моментів мікродвигунів є статичний метод. Він дає змогу визначити крутний момент при сталому русі, тобто при фіксованій швидкості обертання. Визначивши величину моменту M для кількох значень швидкості n , можливо по точках побудувати механічну характеристику $M = f(n)$. Такі механічні характеристики називаються статичними на відміну від динамічних, знятих при розгоні двигуна.

При визначенні статичних механічних характеристик двигуни, що випробовуються, значно нагріваються (особливо при роботі з малими швидкостями), внаслідок чого змінюються їхні обертаючі моменти. Погрішності

вимірювання, що виникають при цьому, а також велика трудомісткість побудови механічної характеристики по точках є головними недоліками цього способу.

При статичному методі вимірювання використовуються три основні конструктивні різновиди моментомірів: гальмівні, приводні і трансмісійні.

Найбільш поширені гальмівні моментоміри. Вони поєднують в собі гальмівний пристрій (гальмо), що навантажує випробувальний двигун гальмівним моментом та вимірювач цього моменту. Застосовуються гальмівні пристрої різних типів: фрикційні, гідравлічні, аеродинамічні, електромашинні, електромагнітні і ін. Вимірювальні пристрої також можуть бути різними: крутильні, маятникові, важільні, компенсаційні (зокрема з автоматичним урівноваженням).

За конструктивним виконанням гальмівні пристрої можуть бути (додаток А): фрикційними — із колодковими стрічковими і порошковими електромагнітними гальмами; електромашинними — з двигунами постійного струму, синхронними, гістерезисними і асинхронними з порожнистим ротором.

Приводні моментоміри використовуються для випробування тихохідних двигунів, редукторів, генераторів і т. д., виконуються аналогічно названим вище гальмівним електромашинним моментомірам. Проте їх машина навантаження працює не в гальмівному, а в руховому (приводному) режимі, наприклад, при визначенні моменту тертя.

Трансмісійні моментоміри, на відміну від гальмівних і приводних, не мають ні спеціального гальма, ні приводного двигуна і, відповідно, не поглинають самі і не додають енергію випробуваній машині. Вони мають в ланцюзі передачі крутного моменту від двигуна до споживача датчик або зі скручуванням валом (торсіоном), або з рухомою шестернею, або з редуктором. Зі зміною крутного моменту змінюється кут повороту датчика. Цей кут вимірюється тим чи іншим способом. Відомо багато різних вимірювачів, що застосовуються в трансмісійних моментомірах: стробоскопічні, тензометричні, індуктивні, ємкісні, фотоелектричні, магнітострикційні, фазовимірювальні, струнні та ін. [2].

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1.2.2 Динамічний метод.

Динамічний спосіб визначення крутних моментів найчастіше ґрунтується на вимірюванні прискорення двигуна, що розганяється в процесі запуску. Осцилографуючи прискорення при розгоні від $n = 0$ до $n = n_{\text{ном}}$ можна побудувати динамічну механічну характеристику досліджуваного двигуна.

Варто брати до уваги, що при включенні двигуна в його обмотках виникає вільна складова струму, котра спричинює значне збільшення пускового моменту. Ступінь впливу електромагнітних перехідних процесів на спотворення механічної характеристики залежить від співвідношення запасених протягом перехідного процесу електромагнітної енергії A_e і кінетичній енергії приводу A_k , як показав В. Т. Касьянов, впливом перехідного електромагнітного процесу можна нехтувати лише при співвідношенні:

$$k = \frac{A_e}{A_k} \leq 0.03 \div 0.05, \quad (1.2)$$

де k – коефіцієнт впливу електромагнітних перехідних процесів;

A_e – електромагнітна енергія, Дж;

A_k – кінетична енергія, Дж

Через невисоку швидкодію вимірювачів динамічних моментів зазвичай процес розгону мікродвигуна дещо сповільнюють, для чого на валу двигуна кріплять шків з великим моментом інерції.

Можна виділити три основні способи визначення динамічного моменту:

- а) акселерометричний — за допомогою датчиків кутових прискорень;
- б) тахометричний — за допомогою тахогенераторів або частотних датчиків;
- в) кутовий — за допомогою вимірювання кутового переміщення.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Акселерометричний спосіб визначення крутних моментів реалізується в приладах з датчиками кутових прискорень або з електромашинними вимірниками прискорень. Проте високої точності при вимірюванні кутових прискорень досягти не вдається в основному через труднощі знімання інформації з валу, що обертається.

Як електромашинний вимірювач прискорень можна використовувати двофазну асинхронну машину з порожнистим ротором, одна обмотка якої підключається до джерела постійного струму, а друга — до спеціального реєструючого приладу.

На жаль, через різноманітні перешкоди, вібрацій та власних пульсуючих моментів датчика в кривій напруги корисного сигналу електромашинного вимірника прискорення є значні пульсації, що спотворюють реальну картину. Оскільки частота цих пульсацій порівняно висока, деякі автори пропонують їх усувати шляхом підбору відповідної частотної характеристики приладу, використовуючи, наприклад, спеціальний інерційний осцилографічний гальванометр, що не пропускає частоти вище 50 Гц.

Збільшення моменту інерції частин, що обертаються, зменшує величину пульсацій. Воно у низці випадків доцільне для узгодження частот перехідних процесів, з частотними можливостями вимірювальних пристроїв. Проте при цьому згладжуються не лише шкідливі пульсації, але деякі провали в механічній характеристиці, викликані дією вищих гармонік поля випробовуваного двигуна. Все це знижує точність визначення динамічних моментів випробовуваних машин і обмежує сферу застосування електромашинних вимірників прискорень.

Тахометричний спосіб визначення динамічних моментів реалізується за допомогою тахогенератора постійного або змінного струму і диференціюючого пристрою, що перетворює сигнал, пропорційний швидкості обертання, в сигнал, пропорційний кутовому прискоренню. Для тахометричних моментомірів ще більше потрібні спеціальні пристрої, що фільтрують: на виході диференціюючого пристрою пульсації зазвичай такі

великі, що одержувані криві дозволяють судити лише про загальну форму механічної характеристики двигуна.

У пристроях, що використовують як первинний сигнал кутове переміщення ротора випробовуваного двигуна, операція диференціювання повинна виконуватися двічі (що пов'язано з великими похибками). Область застосування динамічного методу визначення крутних моментів мікродвигунів обмежується не тільки великими похибками при вимірюванні, що виникають внаслідок затемнення корисного сигналу всілякими перешкодами, але також і значною складністю тарування вимірників кутових прискорень.

1.2.3 Метод сумарного моменту

Метод ґрунтується на вимірюванні реактивного моменту, що діє на статор випробовуваного двигуна. На відміну від динамічного методу тут вимірюється не кутове прискорення ротора, що розганяється, а обертальний момент. Це спрощує конструкцію та тарування приладу, у ряді випадків підвищує точність вимірювань.

Метод сумарного моменту дозволяє визначати обертальні моменти двигунів як при сталих режимах роботи, так і при перехідних процесах, наприклад при розгоні.

У моментомірах сумарного моменту можуть бути застосовані вимірювачі, які забезпечують запис у вигляді осцилограми, наприклад компенсаційні вимірники з автоматичним урівноваженням. Пристроєм навантаження таких моментомірів може бути або спеціальне гальмо, або безпосередньо навантаження випробовуваного двигуна. У деяких випадках це полегшує випробування двигунів.

Основним недоліком моментомірів, в яких використовується метод сумарного моменту, є необхідність кріплення випробовуваного двигуна до вимірювального механізму. Технологічний розкид розмірів двигуна приводить до зсуву його центру тяжіння відносно осі повороту приладу, що

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

призводить до похибок або вимагає ретельного балансування вимірювального вузла разом з випробуванням двигуном.

Не зважаючи на це, моментоміри сумарного моменту знаходять все більш широке застосування в різних комплексних установках завдяки своїй універсальності і порівняльній простоті. Вони дозволяють досить швидко записати механічну характеристику випробуваної машини в динаміці (наприклад, при розгоні) і більш ретельно досліджувати деякі відрізки її в сталому режимі роботи.

Наведена класифікація не охоплює всі різновиди моментомірів, проте дає деяке уявлення про найбільш поширені з них.

1.3 Конструкції існуючих пристроїв для вимірювання крутного моменту

Для механічного навантаження електродвигунів застосовують різного роду гальмові пристрої, що дозволяють регулювати величину навантажувального (протидіючого) моменту на валу двигуна й одночасно вимірювати величину цього моменту. Широко використовують при дослідженні електродвигунів фрикційні, електромеханічні та електромашинні гальмові пристрої.

1.3.1 Фрикційні пристрої вимірювання крутного моменту

Вимірювання пускового моменту електричних машин (МП) при нерухомому роторі може виконуватись за допомогою важеля та динамометра (рис. 1, БРМА 25.00.00.000 Д0). Конструкція цього приладу докладно описана в джерелі [3]. Процес вимірювання слід здійснювати з дотриманням таких умов: важіль має перебувати у строго горизонтальному положенні, а прикладене зусилля динамометра – спрямовуватись вертикально. Для усунення впливу тертя (у підшипниках, щітках) вимірювання проводиться двічі: перший раз – при повільному підніманні важеля до горизонтального

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

положення (знизу, проти напрямку вимірюваного моменту), та другий – при опусканні важеля зверху. Середнє арифметичне значення цих двох вимірів визначає фактичний електромагнітний пусковий момент, що діє на ротор. Зазвичай пусковий момент визначається в кількох позиціях ротора, з поступовим зміщенням на 1,5 зубцевих поділок статора в межах однієї третини полюсного розподілу. Зазначений підхід із виключенням впливу моментів тертя шляхом подвійного вимірювання пускового моменту при різноспрямованих рухах важеля використовується для всіх типів вимірювань моменту та калібрування відповідних пристроїв. У високоточних системах замість пружинних ваг або класичного динамометра, де вимірювання зусилля залежить від пропорційного переміщення пружини, застосовуються спеціальні механізми з вагами автоматичної дії. Вони забезпечують зустрічне за напрямком вимірюваного зусилля коригування до моменту, поки система не повернеться в нульове початкове положення, яке було до прикладання моменту. Це реалізується завдяки компенсаційному принципу вимірювання. Важливо зазначити, що під час визначення пускового моменту або випробувань короткого замикання необхідно особливо ретельно забезпечувати надійне та безпечне фіксування ротора, щоб уникнути аварій чи пошкодження валів і кріплень. Фіксація має виконуватися із запасом міцності, здатною витримати момент у 2–3 рази більший за максимально можливий, враховуючи ймовірні ударні навантаження. Під час підготовки також потрібно перевіряти кріплення, поступово збільшуючи прикладений момент. Напрямок обертання електричної машини слід перевірити заздалегідь на малих навантаженнях для запобігання небажаним ситуаціям.

Найбільш простими у виготовленні є фрикційні стрічкові гальма [3, с. 121]. На (рис. 2, БРМА 25.00.00.000 Д0) показано пристрій гальма з плоским пасом. На шків 1, насаджений на вал випробовуваного двигуна, накладається ремінь 2, забезпечений з боків латунними кутниками 3, що не дають йому зісковзнути з шківа. До ременя підвішено дві чашки 4. Якщо шків обертається

у напрямку за годинниковою стрілкою, як зображено на малюнку, то для рівноваги ліва чашка мусить бути навантажена більше, ніж права.

Для визначення моменту двигуна M , що обертає, необхідно силу Q помножити на плече t . Для цього гальма ці множники визначаються за формулами:

$$Q = (Q_1 + q_1) - (Q_2 + q_2), \quad (1.3)$$

де Q_1 — вага гирі на лівій чашці, г;

q_1 — вага лівої чашки, г;

Q_2 — вага гирі на правій чашці, г;

q_2 — вага правої чашки, г;

$$m = \frac{d + d'}{2}$$

де d — діаметр шківа, см;

d' — товщина ременя, см.

1.3.2 Електромагнітні пристрої вимірювання крутного моменту

Електромагнітним пристроєм вимірювання крутного моменту є конструкція детально описана в джерелі [3]. Принцип дії моментоміра (рис 3, БРМА 25.00.00.000 Д0) заснований на тому, що при обертанні мідного або алюмінієвого диска 1 у сталому магнітному полі, утвореному шістьма електромагнітами 2, в нім виникають вихрові струми, які взаємодіють з магнітним полем. Це створює гальмівний момент на осі 3 диска, а відтак, і на валу досліджуваного електродвигуна 4, оскільки вал останнього муфтою 5 сполучений з віссю диска 1.

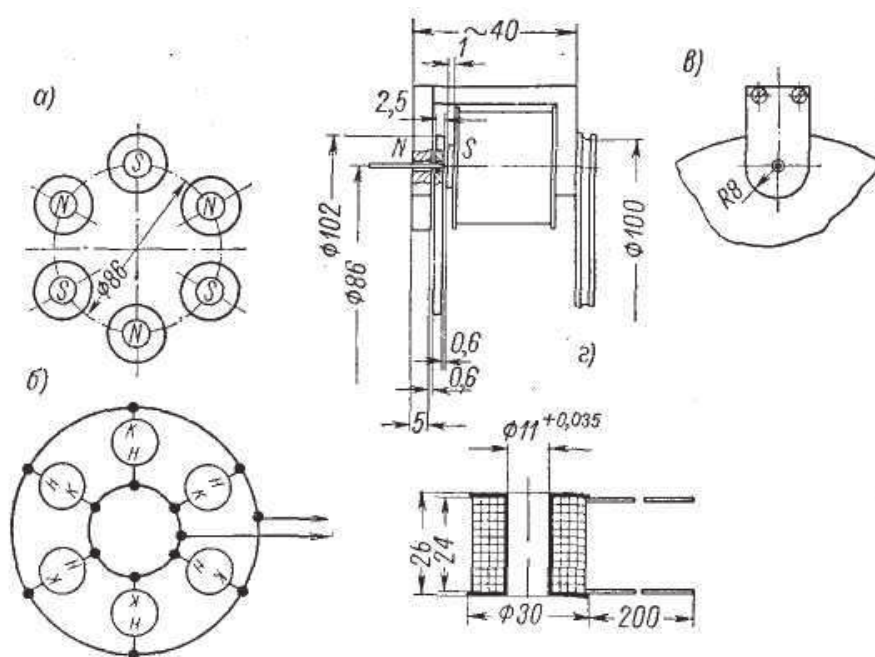
Електромагніти 2 закріплені на металевому диску 6, втулка 7 якого є віссю, встановленою в двох шарикопідшипниках; останні щільно посаджені з

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		16

двох сторін стійкі 8. Таким чином система електромагнітів може вільно обертатися незалежно від осі 3 і повертатися в початкове — нульове положення завдяки вантажу 9. Зверху до диска 6 прикручена стрілка 10, а на стійці 8 закріплена шкала 11. Вісь 3 вільно (із зазором 0,5—1 мм) проходить крізь втулку — вісь 7 і підтримується двома підшипниковими стійками 12.

За допомогою муфти 13 правий кінець осі 3 сполучений з годинним тахометром 14. Досліджуваний двигун встановлюється на призмі 15 і вмикається в схему стенду сполучною колодкою 16.

Електромагніти моментоміра з'єднуються в групу паралельно (рис.1.5), гнучкі вивідні кінці від групи електромагнітів приєднуються до затискачів 17. Якщо електромагніти з'єднати в групу послідовно, то напруга, що підводиться, мусить бути збільшена.



- а — розташування полюсів при правильному з'єднанні електромагнітів;
 б — паралельне включення електромагнітів: н — початок обмотки, к — кінець; в — розміри магнітопровода і диска (мм); г — котушка.

Рисунок 1.5 - Основні конструктивні дані моментоміра на 2000 г-см

Шкала 11 градується в грамм-сантиметрах, для чого до диска 6 підвішуються різні гирки. При включенні двигуна в мережу і подачі струму в електромагніти диск 1 приходить в обертання, індуковані в ньому струми взаємодіють з магнітним полем системи електромагнітів, чому остання захоплюється у напрямі обертання диска і зупиняється під деяким кутом до первинного — нульового положення; стрілка 10 при цьому указує на шкалі 11 величину крутного моменту.

Величина навантаження на валу досліджуваного двигуна відповідає певній величині струму в ланцюзі електромагнітів моментоміра. Регулюванням струму можна швидко встановити необхідний номінальний режим роботи двигуна.

За допомогою моментоміра можна також визначити пусковий момент двигуна; для цього необхідно диск 1 жорстко пов'язати з електромагнітною системою, наприклад шляхом установки тонкої шпильки в отворах, висвердлених в диску і магнітопроводі.

Якщо при такому з'єднанні, поступово збільшуючи напругу на затисках двигуна, встановити його номінальне значення, то сила, що виникла на валу двигуна, викличе відхилення електромагнітної системи до деякого рівноважного положення і стрілка 10 в даному випадку вкаже величину початкового пускового моменту.

Дані котушок електромагнітної системи моментоміра наступні: каркаси котушок виточують з ебоніту, текстоліту або стіракрила, кожна котушка складається з 1150 витків дроту мазкі ПЕВ-2 діаметром 0,29 мм.

Ще одним пристроєм електромагнітного типу [3] є конструкція показана на (рис 4, БРМА 25.00.00.000 Д0) . На вал досліджуваного двигуна 1 насаджений мідний або алюмінієвий диск 2, такий, що обертається між полюсами електромагніту 3. Останній спирається ножами 4 на сталеві подушки 5, які закріплені в стійці 6. З електромагнітом жорстко пов'язано два важелі 7 і 8 з вантажами 9 і 10. Рух важеля обмежується гвинтами 11.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Перед включенням двигуна гальмо повинне бути урівноважене вантажем 10 так, щоб вершини конусів 12 співпадали.

При випробуванні двигуна диск обертається і так же, як в розглянутому вище моментомірі, за рахунок вихрових струмів захоплює за собою полюси електромагніту, повертаючи при цьому важіль 7.

Невідомий крутний момент M на валу двигуна, рівний добутку сили x на плече y , може бути урівноважений вантажем Q , встановленим на відстані m від ножа 4.

Таким чином момент можна визначити:

$$M = Q \cdot m, \quad (1.5)$$

де M – крутний момент, Н*м;

Q – вага вантажу, Н;

m - плече, м

Дане електромагнітне гальмо володіє високою чутливістю, оскільки він не має підшипників, а отже, і втрат на тертя.

1.3.3 Електромашинні пристрої вимірювання крутного моменту

Прикладом електромашиного пристрою є конструкція на основі генератора постійного струму [3]. На рис.5 (БРМА 25.00.00.000 Д0) показаний пристрій навантаження стенду. Воно змонтоване на основі 1, до якого для додання жорсткості приварені кутники 2. Досліджуваний електродвигун 3 встановлюється на столику 4 і з'єднується з генератором навантаження 5 через муфту 6.

Як генератор береться машина постійного струму, по потужності близька до потужності досліджуваного двигуна. Статор генератора встановлюється на шарикових підшипниках, посаджених в стійки 7, і може вільно повертатися в будь-яку сторону на 90° . З боку муфти 6 на статорі

генератора укріплені диск 8 і стрілка 9, а знизу пригвинчений вантаж 10. Проти стрілки 9 знаходиться шкала 11, закріплена на стійці 7.

Для включення в схему служать затиски 12, сполучені з генератором дуже гнучкими провідниками 13.

При включенні досліджуваного двигуна якір генератора навантаження обертається і захоплює за собою статор повертаючи його на деякий кут щодо первинного положення. При цьому стрілка 9 відхиляється разом із статором і показує на шкалі 11 величину моменту на валу двигуна. Шкала 11 заздалегідь градується в грам-сантиметрах; для цього до диска 1 (рис.6, БРМА 25.00.00.000 Д0) на нитці підвішуються різні гирьки 2. Кожній вазі гирьки відповідає певний кут а відхилення стрілки 5.

Плече m вимірюється в см, вага гирки P визначається в гр. Момент знаходиться як добуток Pm в грсм.

1.3.4 Трансмисійні пристрої вимірювання крутного моменту

Трансмисійні пристрої вимірювання, навідмінно від багатьох розглянутих вище, вимірюють як статичний, так і динамічний крутні моменти. Також їх робота в основному заснована на перетворенні різного роду фізичних величин у електричний сигнал, що відмінно обробляється для відображення. До таких фізичних величин відноситься кут закручення, ємність, опір, магнітні величини, стрикційні властивості матеріалів і т.д.

Широкого застосування в останні роки отримали індуктивні перетворювачі, що працюють із спеціальним безконтактним трансформаторним струмознімачем [4]. На (рис.7, БРМА 25.00.00.000 Д0) приведена схема конструкції пристрою такого типу, який призначений для вимірювання статичного та динамічного крутних моментів. Вал 1, через який передається крутний момент, має ділянку із зменшеним діаметром. Закручування цієї ділянки вала під дією моменту приводить до взаємного переміщення двох плеч 2, на яких закріплені диференційні індуктивні датчики переміщення 3. Встановлення двох пар індуктивних датчиків із двох сторін

						БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

вала під кутом 180° дозволяє виключити вплив згинаючих зусиль. Симетрична конструкція і мала чутливість індуктивних датчиків до поперечних переміщень сердечників дозволяє значно послабити дію доцентрових сил і використати такі конструкції на підвищених швидкостях.

Для отримання нульового вихідного сигналу за відсутності навантаження застосовуються додаткові індуктивні датчики 4, розміщені в тому ж корпусі. У приладі застосовуються два безконтактних індуктивних струмознімачі: для подачі живлення на міст — котушки w_1 і w_2 (частота 8 кГц) і для зняття сигналу — обмотки w_3 і w_4 , причому для усунення взаємного впливу струмознімачі розташовані по різних сторонах від датчиків.

Прилади з індуктивним перетворювачем аналогічної конструкції застосовуються у вельми широкому інтервалі швидкостей обертання від 0 до 60 000 об/хв (наприклад, прилад фірми «Стейгер Моухіл») при навколишніх температурах — 40°C до $+100^{\circ}\text{C}$, похибка вимірювань за даними фірми не перевершує 1 %.

Загальною перевагою індуктивних торсіометрів є малий вихідний опір, а отже, і невисокий рівень перешкод, вельми висока чутливість, можливість застосування мостових вимірювальних схем, стійкість до дії навколишнього середовища (забрудненості, вологості, замасленій і т. д.), порівняно проста вторинна апаратура.

На (рис.8, БРМА 25.00.00.000 Д0) показана конструкція фотоелектричного торсіометра, розробленого лабораторією автоматики і приладів ВНІБудддоравто [4]

На валу 1, який піддається скручуванню, закріплюється за допомогою болтів дві циліндричні втулки 2 з дисками із прорізами 3. Кожен диск має по периферії 160 радіальних прорізів. Для усунення шкідливого впливу півтіней, який викликає звуження лінійної ділянки перетворення і погіршує точність приладу, диски із прорізами розташовуються на можливо ближчій відстані один від одного. Джерелами світла служать вісім лампочок 5, закритих матовим склом 6. З другого боку дисків розташовано вісім фігурних селенових

фотоелементів 7 утворюючих суцільне кільце. Джерела світла і фотоелемента розміщені усередині нерухомого корпусу 4. Прилад має наступні характеристики: максимальне закручування валу $0,75^\circ$, максимальна швидкість обертання 6000 об/хв., похибка вимірювання 3 - 5%.

За принципом дії, одним із перспективним пристроєм вимірювання крутних моментів, є магніострикційні крутильні моментоміри. Принцип роботи полягає на властивості зміни магнітної проникності феромагнітних тіл, до яких відносяться металічні вали, в залежності від механічних напружень

До найбільш досконалих магніострикційних моментомірів відносяться тордуктори, що розділяються відповідно до конструктивного виконання на прилади перехресного і кільцевого типів. Особливість пристрою і принцип дії даних тордукторів полягають в наступному. Датчик містить котушку збудження з U-подібним осердям і магнітними полюсами P1, P2 і приймальну котушку, також розміщену на U-подібному сердечнику.

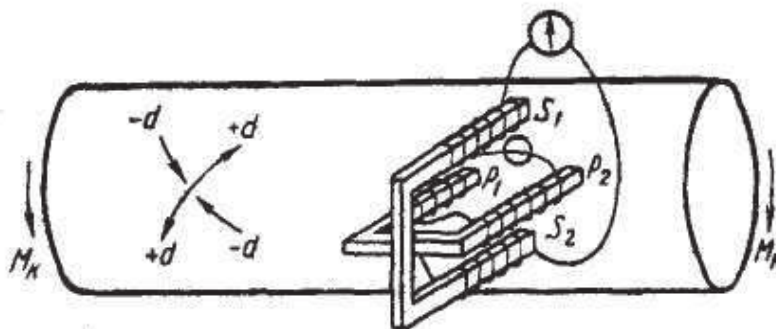


Рисунок 1.6 – Магніострикційний вимірювач крутного моменту

Кінці приймальної котушки S1 і S2 розташовані симетрично відносно магнітних полюсів збудливої котушки. Обидві котушки складаються з двох ідентичних обмоток, з'єднаних послідовно. Котушка збудження підключена до мережі змінного струму. Для випробування використовують вал із феромагнітного матеріалу. У стані без навантаження котушка збудження створює симетричне магнітне поле. Оскільки обмотки приймальної котушки розташовуються вздовж однієї еквіпотенціальної лінії зазначеного магнітного поля, сумарна ЕРС на її виході дорівнює нулю. Проте, при появі крутного

моменту симетрія магнітного поля, що генерується котушкою збудження, порушується, і на виході приймальної котушки формується відповідна ЕРС. Прилад має низьку чутливість до змін температури навколишнього середовища. Проте при повільному обертанні випробуваного валу можуть виникати відносно більші пульсації вихідної напруги датчика, спричинені неоднорідністю матеріалу валу.

На (рис.9, БРМА 25.00.00.000 Д0) зображений пристрій [5], що містить дві концентрично розташовані із зазором ведучу 1 і ведену 2 втулки. Втулки мають фланці 3 і 4 з вирізами, що утворюють спиці 5.

Втулки жорстко сполучені між собою по торцю фланців (зона Б). Ведена втулка жорстко насаджена на вал 6, на ведучу втулку встановлюють приводний елемент 7. Ведуча втулка має утоньшену трубчасту частину 8, на яку наклеєні тензодатчики 9.

При передачі крутного моменту від приводного елемента до валу основна частина моменту передається через трубчасту частину провідної втулки, яка має значну жорсткість на кручення в порівнянні із спицями фланців. Спиці діють як пружний шарнір, допускаючи поворот провідної втулки щодо веденої на невеликий кут, в той же час сприймають поперечну силу, утримуючи провідну втулку від радіального зсуву.

Підбором товщини трубчастої частини втулки можна отримувати необхідну чутливість тензодатчиків. Перевагою даного пристрою є те, що з метою зменшення габаритних розмірів пристрою втулки з одного боку забезпечені фланцями, по колу яких рівномірно розташовані радіальні вікна, і жорстко сполучені між собою по периметру фланців і протилежним торцям.

Висновки до розділу

Визначення крутного моменту — важливий етап у діагностиці та керуванні електроприводом. Особливо це актуально для побутової техніки (пральні машини, пилососи, кондиціонери, міксери), де момент тісно

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

пов'язаний із навантаженням, ефективністю та несправностями. Проведено огляд існуючих пристроїв для визначення моменту у електроприводі. Отримані дані можна занести до таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Методи оцінки моменту електроприводу

Пристрій	Метод оцінки моменту	Особливості діагностування
Пральна машина	За споживаним струмом, об/хв	Інверторна логіка або контролер оцінює момент за струмом
Холодильник / компресор	За часом запуску, активною потужністю	Компресори мають піковий момент при пуску
Міксер / блендер	За зміною швидкості під навантаженням	Двигуни зі щітками/BLDC – момент змінюється різко
Кондиціонер	PMSM-інвертор: момент = $f(I_q, \psi)$	FOC-керування дозволяє точно визначати момент

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ СТЕНДУ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1. Аналіз структурної схеми пристрою

Аналізуючи існуючі системи керування електродвигунами та системи їх дослідження, слід скомбінувати, поєднати їх властивості для створення автоматизованої системи керування та контролю електродвигунів. Але слід врахувати сучасний розвиток мікроелектроніки та силової техніки, так як її здобути значно оптимізують таку систему. Оптимізація полягає у мінімізації, зменшенні енергозатрат, підвищенні точності, стабільності, швидкодії роботи системи. Застосування сучасного програмного забезпечення спростить громіздкість обчислень їх обробку та аналізу при дослідженні електродвигунів. Все це скоротить час на дослідження, тобто автоматизує та підвищиться якість.

Специфікою розроблювальної системи, на відмінно від інших вже існуючих, є дослідження декількох типів електродвигунів, що застосовуються або застосовуватимуться в приводі електропобутової техніки. Ця специфічність ставить ряд вимог до проектування даної автоматизованої системи. Для поставлення подальшої роботи та досліджень необхідно розглянути вимоги до розроблювальної системи.

Умовно розроблювальну систему контролю електродвигунами побутової техніки (СКЕПТ) можна поділити на дві підсистеми – підсистема керування та підсистема вимірювання. Підсистема керування (ПК) має виконувати функцію керування електродвигунами згідно із заданої програми.

Вимоги до ПК:

- керування електродвигунами постійного та змінного струму: асинхронного, універсального колекторного та колекторного(або вентильного) електродвигунів;
- потужність керованих електродвигунів до 1000 Вт;

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- реверс електродвигунів;
- керування частоти обертання вала електродвигуна (деяких видів);
- наявність зворотного зв'язку за керованою величиною;
- захист від перенавантажень роботи електроприводу;
- можливість під'єднання різноманітних датчиків для імітації роботи у механізмі;
- можливість гнучко змінювати алгоритм роботи електродвигуна;
- зручне відображення режиму роботи електроприводу для оператора (дослідника);
- створені програми дослідження для кожного типу електродвигуна.

Підсистема вимірювання (ПВ) повинна забезпечити автоматизоване вимірювання параметрів електродвигунів, які характеризують якісні показники роботи електроприводу. Також вона має обраховувати похідні від них величини, аналізувати їх та виводити у потрібному вигляді для дослідника (графіків, таблиць, коефіцієнтів). Можливо обробляти та подальших перетворень, або для внесення корективів у ПК. ПВ має містити необхідні датчики (струму, напруги, потужності, моменту, швидкості обертання та інші), а також спеціалізоване програмне забезпечення для обробки та аналізу вимірних даних.

Отже до ПВ, що розроблятиметься у складі СКЕПТ, ставляться такі вимоги:

- вимірювання необхідних величин (або їх залежностей), враховуючи тип електродвигуна та алгоритм роботи;
- висока точність вимірювання, не більше 5%;
- автоматизованість вимірювання, обробки та аналізу із мінімальною участю людини;
- зв'язок із підсистемою керування;
- зручність відображення результатів дослідження для оператора (дослідника).

Отже, планується розробити СКЕПТ враховуючи поставлені вимоги до системи та результатів аналізу існуючих аналогів. Створивши дану систему також необхідно її дослідити на скільки вона відповідає поставленим вимогам та стабільність її роботи. Для початку необхідно змоделювати розроблювальну систему (або підсистеми окремо), щоб уникнути в процесі проектування та розробки СКЕПТ прихованих складностей

На рис. 2.1 показана структурна схема мікропроцесорної системи вимірювання параметрів електричного двигуна змінного струму.

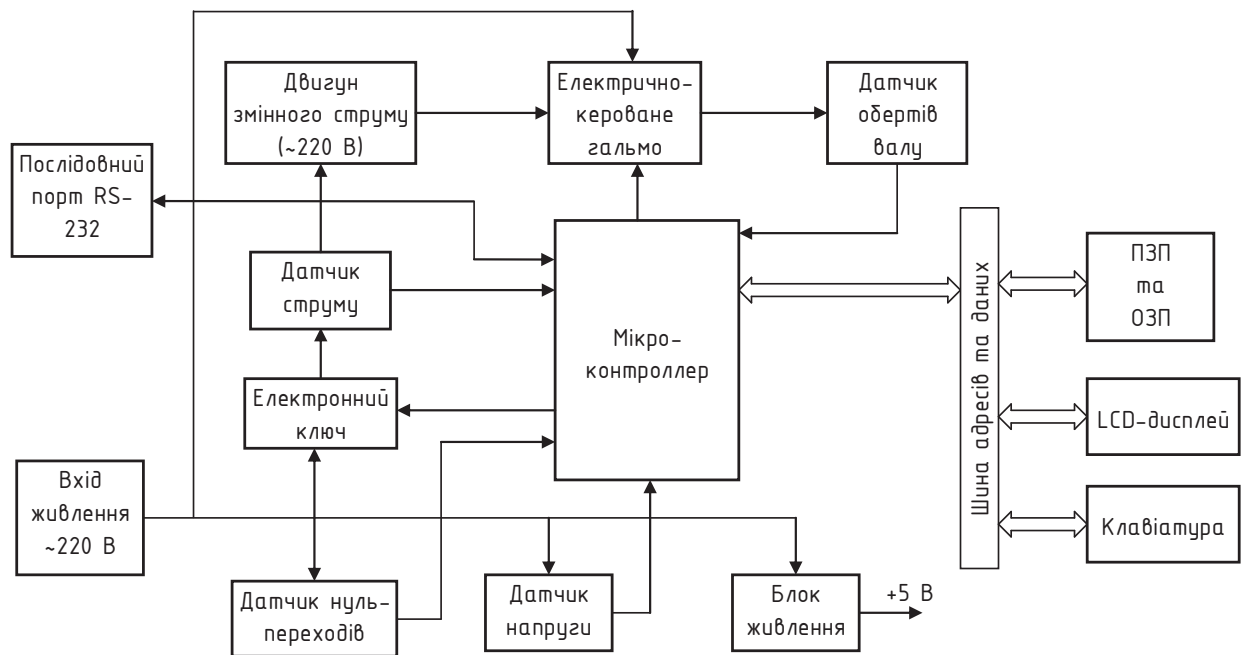


Рисунок 2.1 - Структурна схема мікропроцесорної системи вимірювання параметрів електричного двигуна змінного струму

Запропонована схема складається з таких функціональних блоків як:

- 1) Послідовний порт RS-232;
- 2) Двигун змінного струму;
- 3) Електронний ключ;
- 4) Датчик струму;
- 5) Датчик напруги;
- 6) Датчик нуль-переходів;

- 7) Датчик обертів валу;
- 8) Електрично-кероване гальмо;
- 9) Мікроконтролер;
- 10) ПЗП та ОЗП;
- 11) Клавіатура;
- 12) LCD-дисплей;
- 13) Вхід напруги змінного струму та блок живлення +5В.

Основу роботи пристрою складає мікроконтролер. Задача мікроконтролера – виконання програми користувача для забезпечення потрібної функціональності, що покладена на пристрій.

Силова частина пристрою представлена двигуном змінного струму та електрично-керованим гальмом.

2.2 Принцип роботи пристрою

Принцип роботи пристрою полягає у взаємодії окремих частин системи між собою, а саме:

- двигун;
- електрично-кероване гальмо;
- мікроконтролер;
- датчики.

До входу живлення підключається джерело зовнішнього змінного струму напругою 220 В. За допомогою датчику нуль-переходів визначаються моменти часу, що відповідають моментам переходу струму змінної напруги через 0 В. Визначення нуль-переходу потрібно для того, що визначити моменти часу, що відповідають початку зростання мережевої напруги.

Мережева напруга також подається на датчик напруги, який дозволяє мікроконтролеру відслідковувати зміни вхідної напруги в часі.

Наступний важливий ланцюг складається з електронного ключа, датчику струму та двигуна змінного струму. Електронний ключ комутує проходження

змінного струму на двигун змінного струму, при цьому сила струму фіксується датчиком струму та далі отримана інформація передається також на мікроконтролер.

За допомогою електрично-керованого гальма існує можливість впливу на двигун під час його роботи та створення імітації довільного навантаження на валу двигуна.

Вся отримана інформація в процесі роботи системи фіксується за допомогою датчику обертів валу, який під'єднано до двигуна змінного струму.

В блоці ПЗП та ОЗП знаходиться програма керування контролером, його поточні налаштування та проміжні результати виконання програми.

За допомогою клавіатури відбувається взаємодія з контролером з метою фіксації таких станів як:

- Запуск;
- Зупинка;
- Зміна рівня навантаження двигуна та ряду інших параметрів.

Через LCD-дисплей мікроконтролер виводить поточну та сумарну інформації для потреб користувача.

Блок живлення +5В забезпечує стабільним живлення цифрову частину вимірювального пристрою весь час підключення до зовнішнього джерела живлення.

На установці автоматизовані випробування електродвигуна проводяться за наступною програмою: вимірювання опору обмоток; зняття характеристики короткого замикання, механічної і робочої характеристики і характеристики холостого ходу.

Двигун 2 закріплюють на установці навантаження, призначеній для з'єднання валу двигуна з віссю махових мас 3, що створюють динамічне навантаження. Вал двигуна з'єднується також з валом датчика частоти обертання.

Зняття механічних та робочих характеристик здійснюється під час розгону електродвигуна. При цьому опір обмоток враховує сталу температуру,

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

досягнуту в результаті випробування на нагрівання. Ця температура автоматично встановлюється в режимі короткого замикання. Для проведення експерименту холостого ходу електродвигун відключають від махових мас. Електронно-обчислювальна машина (ЕОМ) 7, згідно із записаною програмою, керує випробувальним комплексом, переводить електродвигун у різні режими випробувань, комутує вимірювальні пристрої, отримує дані про електричні та неелектричні параметри, виконує необхідні обчислення та передає оброблену інформацію на друк. Пристрій вимірювання електричних величин передає в ЕОМ миттєві значення параметрів через визначені проміжки часу з високою частотою. У ЕОМ ці дані обробляються та відображаються на друкувальному пристрої 8 або графічному інструменті. Для створення кривих використовуються отримані значення вимірюваних електричних параметрів.

2.3 Аналіз схеми електричної

Схема електрична розробленого пристрою відповідає структурній схемі, що представлена на рис.2.1.

При проведенні аналізу електричної схеми варто розглянути роботу окремих складових схеми незалежно, що дозволить більш детально пояснити їх функції та визначити взаємозв'язок між вузлами.

2.3.1. Блок живлення +5В

Блок живлення (рис. 1.4) формує стабільне живлення напругою +5В за допомогою мікросхеми параметричного стабілізатора струму DA2 78L05 (вітчизняний аналог – K142EH5). Незважаючи на те, що параметричний стабілізатор струму має низький ККД, у даній схемі його використання є доцільне у зв'язку з низьким споживанням струму навантаженням.

Вхідна напруга 220 В через трансформатор Т1 поступає на випрямляч – діодний міст VD2. Одночасно з виходу трансформатора змінна напруга – півхвиля поступає через діод VD1 до датчику напруги.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Напруга, що випрямлена, поступає на вихідний стабілізатор (мікросхема DA2), який стабілізує значення напруги на рівні +5В. А за допомогою конденсаторів C1, C4 усуваються коливання вхідного та вихідного струмів.

Ланцюг VD4-R6 використовується для індикації роботи блоку живлення.

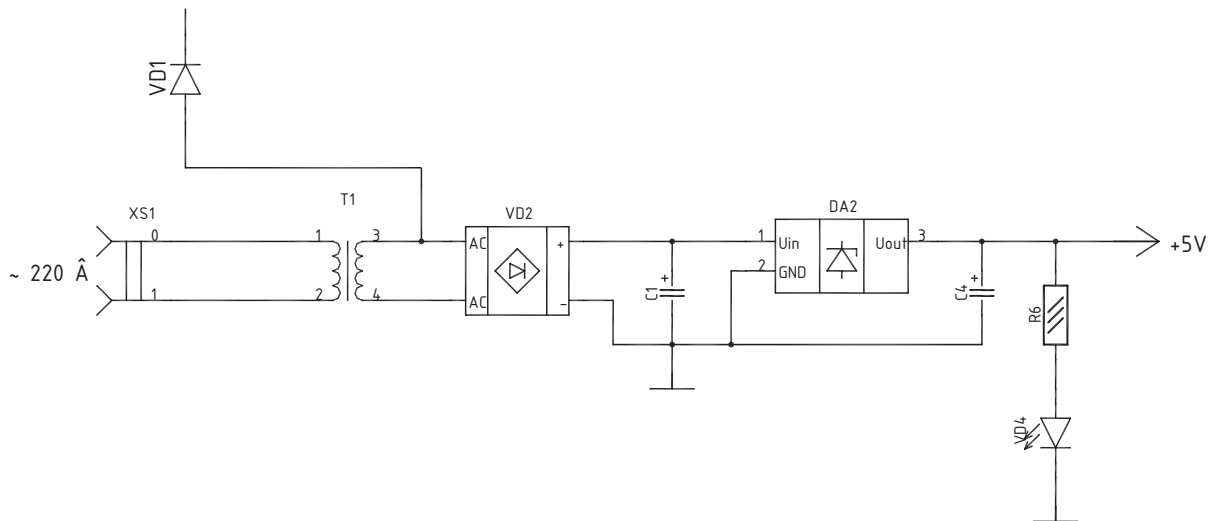


Рисунок 2.2 - Блок живлення +5В

2.3.2. Датчик нуль-переходів

Відомо, що для керування потужністю електроприладами, в яких конструктивно неможливо змінювати робочий опір під час їх роботи та експлуатації, існує можливість зміни потужності шляхом маніпулювання частиною від напруги живлення або . Одним з простих способів дискретного керування напругою є подавання "частини" напруги на навантаження шляхом періодичного включення та вимикання навантаження.

Датчик нуль-переходів в схемі керування будь-яким навантаженням відіграє важливу роль - виявлення початку зростання напруги змінного струму 220 В.

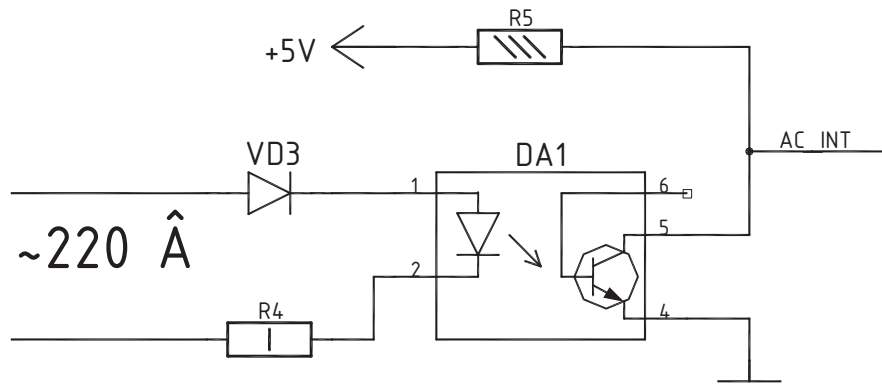


Рисунок 2.3 - Датчик нуль-переходів

Вхідна напруга подається на ланцюг VD3-DA1-R4 в якому VD3 пропускає одну півхвилю, а R4 є опором обмеження струму живлення.

При збільшенні напруги на світлодіоді оптотранзистора DA1 вище 1.2 В, світлодіод засвічується та генерує оптичне випромінювання на транзистор оптотранзистора. В результаті чого, транзистор відкривається, а на відповідному виході DA1.5 – AC_INT виникає напруга 1.2 В. В закритому стані, напруга на виході AC_INT складає 5 В.

2.4 Вибір типу вимірювального механізму

До складу вимірювального механізму входять: власне вимірювач моменту, відліковий механізм (шкала із стрілкою), опори, струмопроводи, муфти. При цьому, як показано, вище, крутний момент $M_{дв}$ на валу випробовуваного двигуна буває зазвичай більше вимірюваного моменту $M_{вим}$ на деяку величину, визначувану сумою втрат в різних вузлах:

$$M_{дв} = M_{вим} + (M_o + M_{сп} + M_m + M_p), \quad (2.1)$$

де $M_o, M_{сп}, M_m$ — додаткові моменти в опорах, струмопроводах і муфті;

M_p — момент тертя ротора моментоміра об повітря.

В результаті цього точність вимірювань залежить не тільки від точності вимірювання моментів, але також і від величини додаткових моментів, що не враховуються, в різних вузлах вимірювального пристрою.

Похибка моментоміра визначається різницею між дійсними моментами випробовуваного двигуна і значеннями, відліченими за шкалою вимірника.

Враховуючи, що момент на вході вимірника відрізняється від дійсного його значення на суму втрат в муфті, опорах, струмопроводах, а також беручи до уваги те, що сам вимірник вносить деяку погрішність, можна відносну погрішність вимірювання визначати за формулою:

$$\delta = \frac{M_{дв} - M_{вим}}{M_{дв}} + \delta_{вим}, \quad (2.2)$$

де $M_{дв}$ — крутний момент випробовуваного двигуна;

$M_{вим}$ — момент, визначений за шкалою вимірювача; $\delta_{вим}$ — відносна похибка вимірювача.

На рис.2.4 представлено декілька конструктивних схем моментомірів найбільш поширених типів і показано, які гальмівні моменти прикладені до валу випробовуваного двигуна і які — до вимірювального пристрою.

Найбільш відома схема гальмівних моментомірів (рис.3.1 , а) містить нерухому стійку або лещата 2, в яких закріплюється випробовуваний двигун 1, муфту 3 і пристрій навантаження 6 з ротором 5, закріплений на опорах 4. Живлення пристрою навантаження здійснюється через струмопроводи 7. Вимірювач моментів 8 дозволяє визначити величину реактивного моменту, що діє на статор пристрою навантаження 6.

Гальмівний момент $M_{дв}$ на валу випробовуваного двигуна більше моменту $M_{вим}$, прикладене до вимірювача 8, на величину втрат в муфті $M_{п.м}$, струмопроводах $M_{т.п}$, опорах моментоміра $M_о$ і вентиляційних втрат $M_в$ від тертя ротора 5 об повітря. Названі втрати важко піддаються оцінці і є основними джерелами похибок. До цих похибок додаються ще похибки власне

вимірювача моментів 8 . Момент тертя M_0 в опорах гальмівної машини 6 не впливає на похибку, оскільки він враховується вимірювачем 8.

Змінюючи конструкцію моментоміра — закріплюючи ротор 5 гальмівного пристрою 6 безпосередньо на валу випробовуваного двигуна 1 (рис.2.4 , б), можна уникнути втрат в муфті Мп.м. Застосування нерухомої обмотки збудження усуває втрати в струмопроводах (рис.2.4,в).

Найменші структурні похибки мають трансмісійні моментоміри з скручуваним валом (рис.2.4 ,г). Проте вони працюють зазвичай з вимірювачами моменту прямого перетворення (крутний момент — кутова деформація — зміна опору), які мають деякі особливості виконання електричної схеми.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		34

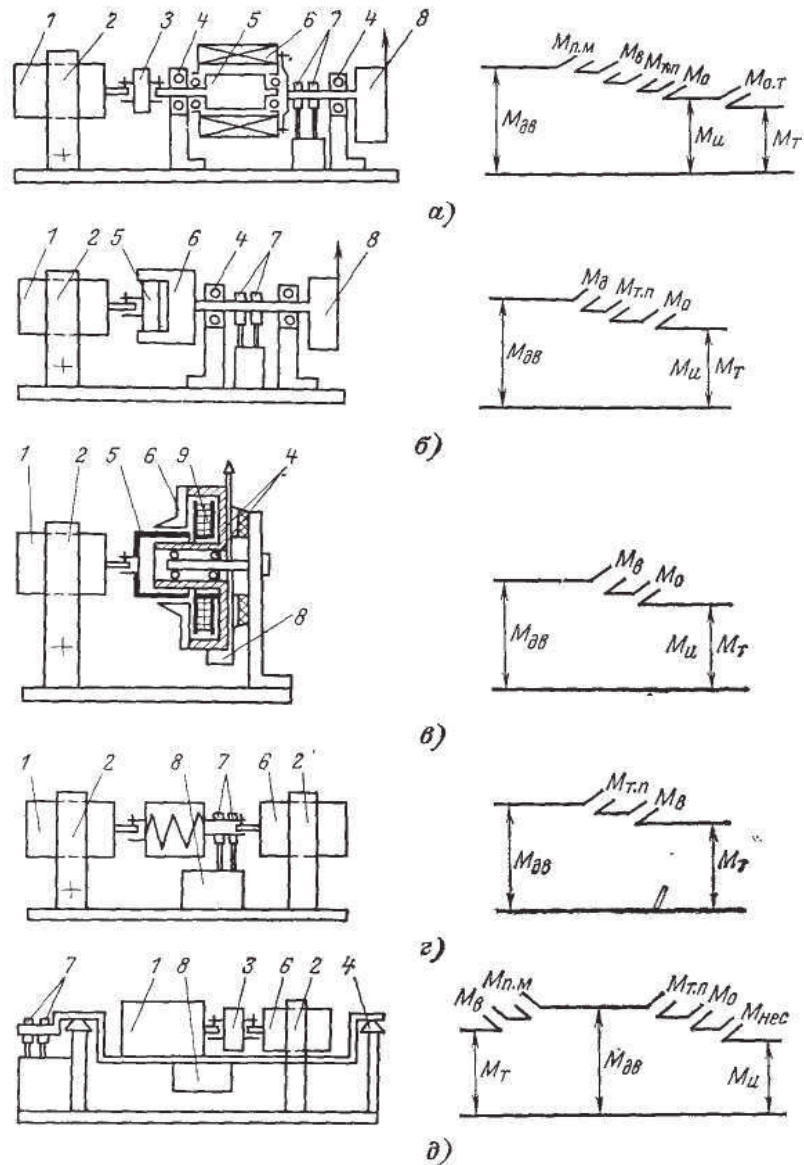


Рисунок 2.4 – Види схем та похибки моментомірів

Балансирне кріплення випробовуваного двигуна (рис.2.4 , д), вживане при методі вимірювання сумарних крутних моментів, дозволяє не розглядати момент втрат в муфті $M_{п.м}$. і вентиляційні втрати $M_{п}$, оскільки вони враховуються вимірювачем моменту 8, закріпленим на статорі випробовуваного двигуна 1. При цьому похибки створюються лише моментом тертя в опорах, в струмопроводах і моменті $M_{нес}$, що виникає через те, що центр тяжіння випробовуваного двигуна не співпадає з віссю обертання балансирної рами 9.

Момент тертя в опорах M_0 направлений завжди проти руху вимірювального вузла і залежно від передісторії повинен додаватися або відніматися з величини, відлічуваної за шкалою приладу. Тертя в опорах приводить до появи зони нечутливості. Наведені особливості слід враховувати в майбутньому при проектуванні моментоміра

2.5 Моментоміри трансмісійного типу

Аналізуючи огляд існуючих пристроїв та похибки, що виникають в них, найоптимальнішими є моментоміри трансмісійного типу. Вони на відмінно від інших не мають похибки на опори, муфту. Також вимірюють як статичний момент так динамічний та не потребують при цьому складних гальмівних механізмів та втрат енергії на гальмо. Широкого застосування набули крутильні моментоміри.

Крутильні вимірники виконуються як прилади прямого перетворення. Основою крутильного вимірника є пружний елемент. Він перетворить механічний момент в лінійну кутову деформацію. Головними причинами, що викликають похибки пружного елемента, можна вважати наступні: недосконалу пружність матеріалу, що виявляється в пружній післядії і пружному гістерезисі, залежність модуля пружності від температури, тертя в нерухомих з'єднаннях пружного елемента, тертя в опорах, опір середовища.

Вплив пружної післядії і залежність модуля пружності від температури приводять до зміни первинній деформації і зміни жорсткості пружного елемента. Вплив інших чинників виявляється в неоднозначній залежності деформацій від навантаження пружного елемента. Для їх точного обліку необхідно знати передісторію вантаження.

Для усунення впливу зовнішнього тертя (тертя в нерухомих зчленуваннях, опір середовища) рекомендується виготовляти пружний елемент у вигляді однієї деталі без механічних зчленувань, а для вимірювання малих моментів — обтічної форми. Складніше врахувати вплив внутрішнього

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

тертя. Така оцінка необхідна в тих випадках, коли як пружні елементи використовуються ділянки валів, виконаних з неякісної сталі, або інші елементи конструкції, наприклад сполучні муфти. Приблизно таку оцінку можна зробити по досвідчених коефіцієнтах, що характеризують петлю пружного гістерезису, або по декрементах загасання коливань в різних матеріалах.

У тих випадках, коли пружні елементи виконуються і ввиді самостійних конструкцій, їх рекомендується виконувати з високосортних пружинних матеріалів типу сталей 35ХГСА, 40Х, 65Г.

Залежно від застосованого перетворювача лінійної деформації в електричний або інший сигнал, зручний для вимірювання, лінійне або кутове переміщення пружного елемента, що деформується, може змінюватися від доль міліметра до десятків міліметрів (десятків кутових градусів).

Тензометричні вимірювачі крутного моменту проектуються на основі відомих тензометрических приладів для вимірювання напруги і деформацій в матеріалах.

Завдяки малим габаритам (особливо товщині) і масі тензодатчиків, зручності і надійності кріплення тензодатчиків на деталі, можливості дистанційного вимірювання і універсальності найбільш широке застосування знаходять тензометри. Правда, вони мають і ряд недоліків: вимагають посилення сигналу датчика або застосування приладів високої чутливості із-за малої відносної зміни опору датчика при деформації, схильні до впливу температури і вологості, іноді недостатньо стабільні.

Простою конструкцією у виконанні є тензомер типу “білячої клітки”, що зображений на рис. 2.5, що складається з плоских дисків, які з’єднуються пружними елементами прямокутного перерізу, куди і кріпляться тензодатчики.

Простою конструкцією у виконанні є тензомер типу “білячої клітки”, що зображений на рис. 2.5, що складається з плоских дисків, які з’єднуються пружними елементами прямокутного перерізу, куди і кріпляться тензодатчики. Тому вирішивши деякі його недоліки та вдосконаливши систему знімання

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

інформації з датчиків, можна отримати чудовий моментомір для електродвигунів побутової техніки. Також потрібно підрахувати всі розміри та параметри його елементів.

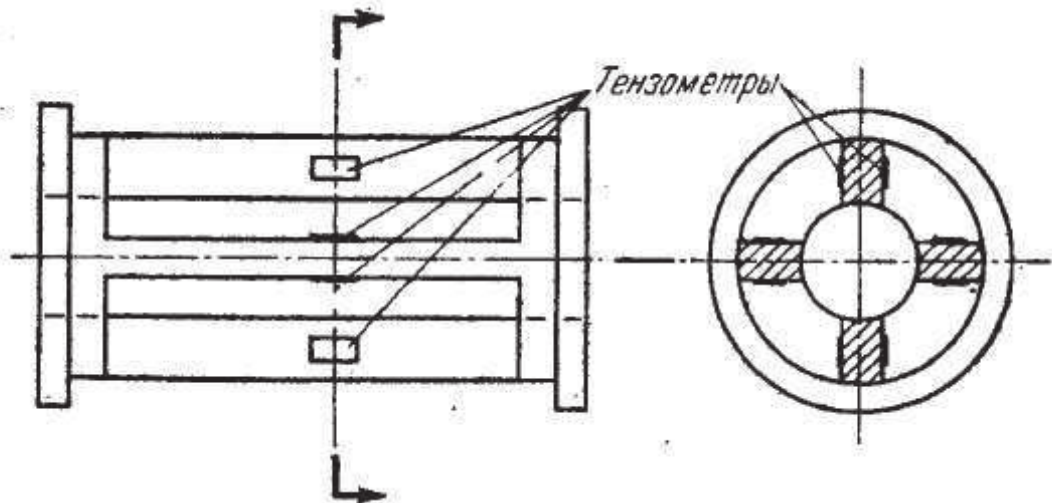


Рисунок 2.5 – Моментомір тензометричного типу.

2.6 Розробка схеми дослідження електродвигунів

Враховуючи, що було обрано тензометричний моментомір для вдосконалення, тобто основою розробки стануть існуючі тензомоментоміри. Слід врахувати недоліки існуючих, та запропонувати технічні рішення. До недоліків тензомоментомірів типу, що зображений раніше є похибки вимірювання, що вносять тензорезистори при зміні температури; наявність щіткових струмознімачів, що створюють протидіючий момент та утворюється нерівномірність перехідного контактного опору.

Запропоновано при вимірюванні використовувати тензорезисторний міст із провідникових резисторів, що мають високу температурну стабільність. Щітковий механізм струмознімання із датчиків замінити трансформаторним, що є більш досконалим. Ці принципові зміни слід врахувати при побудові

схеми дослідження електродвигунів за допомогою розроблювального моментоміра.

Схему дослідження слід виконати за прикладом вимірювання тезомоментоміром на [12]. Але необхідно врахувати конструктивно вище названі зміни та звернутися до розділу технічного завдання, де визначено всі технічні вимоги до проектуємого пристрою.

У графічній частині роботи БРМА 25.00.00.000 ВЗ розміщена схема вимірювання крутного моменту тензометричним моментоміром, який розробляється. Досліджуваний електродвигун 1 закріплюється до випробовувального столика 3 за допомогою механізму кріплення електродвигуна 2. Надійне кріплення електродвигуна має виключити появу вібрацій під час вимірювань. Випробовувальний столик 3 має ніжки 4, які забезпечують кращу стійкість у процесі вимірювання. Вал досліджуваного електродвигуна приєднується до тензомоментоміра 5 за допомогою гвинтів кріплення валу 6. Тензомоментомір 5 має трансформаторний струмознімач 7, що поліпшує процес передачі сигналу від датчиків до пристрою обробки та відображення інформації 11. Пристроєм відображення інформації може бути вольтметр, проградуєований відповідним чином по шкалі величини крутного моменту, тобто $N \cdot m$. Металева трубка 10, яка з'єднує струмознімач 7 та пристрій обробки та відображення інформації 11 служить для запобігання повертання нерухомої частини 7. Також в середині металевої трубки 10 проходять сигнальні провідники від датчиків до пристрою відображення інформації 11. Далі тензомоментомір 5 з'єднується за допомогою таких самих гвинтів кріплення 6 із валом пристрою навантаження 8. Пристрій навантаження також кріпиться до випробовувального столика 3 за допомогою механізму кріплення 9. Навантажувальним пристроєм в даному випадку служить генератор.

Таким чином, установка для дослідження не є занадто громіздкою, похибки вимірювання крутного моменту на валу електродвигуна є мінімальними.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2.7 Розробка електричної схеми стенду для діагностики електропроводу

Основним електричним та вимірювальним елементом у пристрої є тензодатчик, тобто фактично тензорезистор.

Тензорезисторний перетворювач, або тензорезистор, є провідником, здатним змінювати свій електричний опір під впливом механічної деформації, такої як стискання або розтягування. У процесі деформації змінюються як довжина провідника (l), так і площа його поперечного перерізу (Q). Крім того, зміни в кристалічній решітці матеріалу викликають зсув питомого опору (p). Усі ці фактори разом спричиняють зміну загального опору провідника.:

$$R = pl/Q, \quad (2.3)$$

де R – опір провідника, Ом;

p – питомий опір, Ом * м²/м;

Q – площа поперечного перетину, м²

Цю властивість мають усі провідники. На сьогодні широко використовують провідникові (фольгові, дротяні та плівкові) і напівпровідникові тензорезистори. Найкращим національним матеріалом для виготовлення провідникових тензорезисторів, які функціонують при температурах нижче 180°C, вважається константан. Залежність опору R від відносної деформації з достатньою точністю описується лінійним двочленом:

$$R = R_0(1 + SE) \quad (2.4)$$

де S — тензочутливість матеріалу;

R_0 — опір тензорезистора без деформації, Ом;

E – деформація.

Тензочутливість константана знаходиться в межах 2,0—2,1. Нелінійність функції перетворення не перевищує 1%. Фольгові тензорезистори представляють собою тонку лакову плівку, на яку нанесено фольгову тензочутливу решітку з константана завтовшки 4—12 мкм (рис. 2.7). Верхній шар решітки також вкритий лаком. Ці тензорезистори практично не реагують на поперечні деформації завдяки низькому опору перемичок, що з'єднують тензочутливі елементи..



Рисунок 2.7 – Фольговий тензорезистор

Дротяний тензорезистор має аналогічну конструкцію, проте його решітка виготовляється з константанового дроту діаметром 20–50 мкм. За метрологічними та експлуатаційними характеристиками дротяні перетворювачі поступаються фольговим. Зазвичай фольгові й дротяні тензорезистори мають довжину 5–20 мм і ширину 3–10 мм, а їх номінальний опір становить 50, 100, 200, 400 або 800 Ом. Напівпровідникові тензорезистори представляють собою пластинки з монокристала кремнію або германію розміром 5–10 мм у довжину і 0,2–0,8 мм у ширину, до яких на торцях приварені вивідні провідники. Номінальний опір напівпровідникових тензорезисторів також лежить у межах 50–800 Ом. Однак їх властивості суттєво відрізняються від металевих аналогів. Чутливість таких перетворювачів може бути як позитивною, так і негативною та варіюється в межах ST — від -55 до -130. Як опір, так і чутливість значно залежать від температури, що є серйозним недоліком. Також до мінусів можна віднести значний розкид параметрів та характеристик. Тензорезистори

використовуються для перетворення деформації деталей у зміну електричного опору. Для цього вони закріплюються на поверхні деталей і зазнають таких самих деформацій, як і самі деталі. З точки зору схем включення, тензорезисторні перетворювачі зазвичай інтегруються в схему незрівноваженого моста. Якщо опір навантаження R_n достатньо великий (режим холостого ходу), то вихідна напруга моста.

$$U_x = UR_1/(R_1 + R_2) - UR_3/(R_3 + R_4) = U[(R_1R_4 - R_2R_3)/(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)], \quad (2.5)$$

де U - напруга живлення, в якості R_1 і R_2 включаються однакові тензорезистори.

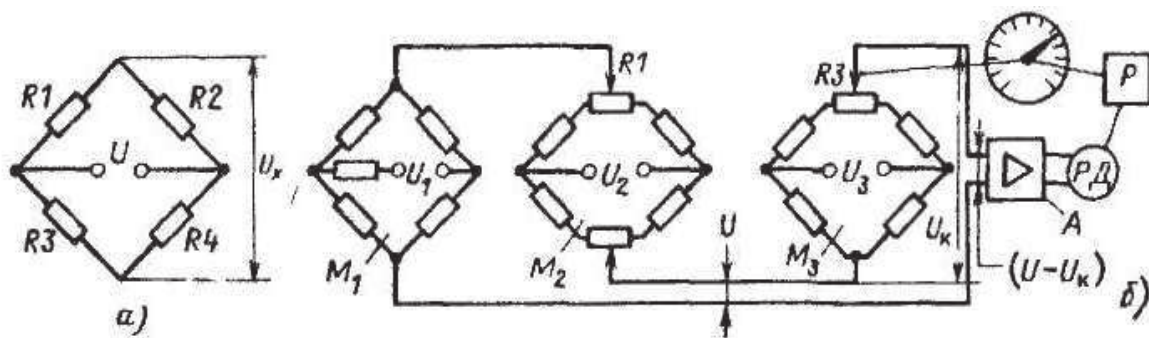


Рисунок 2.8 – Схеми включення тензорезисторів

За відсутності помітної деформації опори рівні: $R_{10} = R_{20} = R_0$. Окрім цього, зазвичай приймають, що $R_3 = R_4$. У такій ситуації, коли деформація тензорезистора відсутня ($\epsilon = 0$), вихідна напруга U_x дорівнює нулю. У випадку ж деформації тензорезисторів, якщо ϵ не дорівнює нулю і R_1 не дорівнює R_2 , вихідна напруга мостової схеми стає пропорційною різниці опорів тензорезисторів:

$$U_x = U(R_1 - R_2)/2(R_1 + R_2). \quad (2.6)$$

Мостовий ланцюг є диференціальним, що дозволяє компенсувати адитивні похибки. Завдяки цьому тензорезисторні прилади створюють на основі диференціальних схем першого або другого типу. Використання схеми першого типу, зокрема при $R_1 = R_0 + \Delta R$ і $R_2 = R_0$.

Визначимо вихідну напругу ланцюга і чутливість в режимі холостого ходу:

$$U_x = U\Delta R/4R_0, \quad S_{cx} = \frac{U_x}{\Delta R} = U/4 \quad (2.7)$$

Коли $R_1 = R_0 + \Delta R$ і $R_2 = R_0 - \Delta R$, то вихідна напруга і чутливість в режимі холостого ходу збільшуються вдвоє при використанні диференціальної схеми другого типу:

$$U_x = U\Delta R/2R_0, \quad S_{cx} = \frac{U_x}{\Delta R} = U/2 \quad (2.8)$$

Вихідна напруга тензорезисторного моста зазвичай становить лише 10–20 мВ, що ускладнює її безпосереднє використання без попереднього підсилення. Саме тому в конструкціях тензорезисторних приладів зазвичай застосовуються підсилювачі. Якщо напруга живлення моста U не є стабільною, то її зміни можуть призводити до виникнення мультиплікативної похибки. Для усунення такого впливу використовують компенсаційний метод вимірювання вихідної напруги моста. Міст $M1$ зазвичай включає два або чотири тензорезистори. Через технологічний розкид опорів таких резисторів, міст опиняється незбалансованим і має певну початкову вихідну напругу. При нульовому значенні вимірюваної величини ця напруга компенсується мостом $M2$ за допомогою підстроювальних резисторів $R1$ та $R2$. Результуюча напруга U стає пропорційною вимірюваній величині. Для компенсації цієї напруги використовується міст $M3$, вихідна напруга якого U_k протилежна за

напрямок до напруги U . Різниця напруг U і U_k проходить через підсилювач А та подається на двигун $РД$. При роботі двигуна його ротор через редуктор Р переміщує движок реохорда $ЛЗ$, що також змінює положення покажчика приладу відносно шкали. Движок реохорда рухається в такому напрямку, щоб зменшити різницю між U та U_k . Ротор двигуна зупиняється, коли $U = U_k$, тобто, коли різниця стає рівною нулю. У цей момент движок реохорда займає положення, що відповідає вимірній напрузі U , а покажчик приладу вказує значення вимірюваної величини. Мости $M1$, $M2$ і $M3$ живляться від одного джерела змінної напруги через окремі обмотки трансформатора. Навіть у разі нестабільності джерела живлення, значення напруг $U1$, $U2$ та $U3$ змінюються пропорційно, що дозволяє зберігати рівновагу $U=U_k$. Унаслідок цього покази приладу залишаються незмінними. Основна похибка вимірювання становить $\pm 0,5\%$ від нормованого значення, яке дорівнює $2dR_{max}$, де dR_{max} — це максимальний приріст опору плеча моста.

Обрано мостову схему із чотирьох дротяних тензорезисторів, які з'єднуються за мостовою схемою, описаною раніше. Дана схема забезпечить термокомпенсацію при вимірюванні. На рис. графічної частини роботи БРМА 25.00.00.000 Е1 показано функціональна електрична схема тензомоментоміра. Тензорезистори $R1 - R4$ з'єднані у вимірювальний міст. Їх опір є однаковим – 220 Ом

На міст потрібно подати напругу. Тому у схемі наявне джерело напруги у вигляді батарейки GB1. З плеч моста, при наявності деформацій на пружному елементі виникає напруга, значення якої становить близько 20 мВ. Цей сигнал є досить слабким для передачі та обробки, тому застосовується операційний підсилювач ОП. Він підсилює вхідний сигнал 1000 разів, і це дозволяє подати потужний сигнал на первину обмотку W1 трансформатора T1. Так як вал обертається, то постійна напруга створює на вторинній обмотці W2 напругу, пропорційну напрузі вторинній через коефіцієнт трансформації трансформатора T1. Він в свою чергу залежить від співвідношення кількості витків між W1 та W2. Далі перетворений сигнал потрапляє на вимірювальний

пристрій ВП (вольтметр), який проградуєований у шкалі моментоміра, враховуючи коефіцієнти підсилення ОП, коефіцієнти трансформації Т1 та похибку при вимірюваннях.

2.8 Розробка конструктивної схеми пристрою для діагностування

Спираючись на раніше сказані міркування щодо конструкції, типу та вдосконалень тензомоментоміра, можна сформувати конструкцію. Це буде тензомоментомір із 4-ма пружними елементами, що розміщені радіально відносно вісі типу “біляча клітка” На них будуть приклеєні тензорезистори. Елементи матимуть прямокутний переріз. Відповідним матеріалом для пружних елементів є метали із пружними властивостями, як наприклад Сталь 65, ресорні та інструментальні сталі. Конструктивні розміри будуть детально прораховані у наступному розділі.

До уваги слід взяти також електричну схему, яка вкаже які елементи слід розмістити і як розмістити. По-перше – це трансформаторний струмознімач, який складається із первинної обмотки у вигляді рухомої котушки на рухомій частині та вторинної – нерухомої котушки, яка має бути зафіксованою. По-друге, на самій рухомій частині тензомоментоміра має розміщуватися елемент живлення та операційний підсилювач, з'єднаних провідниками відповідним чином. До того ж так як є нерухома та рухома частини пристрою, то їх взаємне обертання із найменшим коефіцієнтом тертя повинно забезпечитись за допомогою підшипника.

Необхідно забезпечити у конструкції моментоміра чітке кріплення із валом електродвигуна та валом навантажувального пристрою. Також забезпечити кріплення нерухомої частини та електричний зв'язок між самим тензопристроєм та вимірювальним пристроєм моментоміра.

Враховавши необхідні зауваження та технічні рішення, сформовано конструкцію тензомоментоміра в загальних рисах. Конструкція тензомоментоміра показана у графічній частині БРМА 25.00.00.000 ВЗ.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		45

Тензомоментомір складається із 4-х сталених пружних балок 1 прямокутного перерізу, які закріплюються радіально між двома дисками механізму кріплення валів 2 та 3 шляхом зварювання чи пайки. Механізми кріплення закріплюють вал шляхом загвинчування по три на кожній гвинта кріплення 4, які розміщуються радіально циліндричної поверхні 2 та 3 на відстані 60 градусів один від одного. На пружні елементи 1 приклеюються тензорезистори 5. Напруга на тензодатчики, які з'єднані у міст, передається по провідниках від елемента живлення 6, а потім електричний сигнал розбалансу при деформації по інших провідниках надходить на операційний підсилювач 7. Конструктивним є виконання спеціального посадкового місця під елементи 6 та 7 у вигляді обойми, що насаджуватиметься на циліндричну поверхню пристрою. Далі підсилений сигнал надходить на первину обмотку 8 трансформаторного струмоміра. Первина обмотка 8 складається з двох протилежно розміщених котушок. Для них слід теж забезпечити відповідні каркасні конструкції у вигляді кільця. Вторинна обмотка трансформаторного струмоміра у вигляді однієї котушки 9 сприймає сигнал. Вона є нерухомою відносно основи, так як вона закріплена у кожусі 10, що запобігає механічному пошкодженню котушок та потраплянню пилу. Кожух садиться на підшипник 11, який у свою чергу закріплений на циліндричній поверхні пристрою. Підшипник 11 зменшує тертя між рухомою та нерухомою частинами моментоміра та забезпечує сталий зазор між котушками 8 та 9 трансформаторного струмоміра при обертанні тензомоментоміра. Нерухома частина залишається нерухомою під час обертання завдяки металевій трубці 12, яка крім даної функції ще у своїй порожнині проводить провідники вихідного сигналу 13. Провідники 13 під'єднуються до вимірювального пристрою (типу вольтметр), що при попередньому градуванні у шкалі моменту, покаже крутий момент на валу випробовувального електродвигуна

За своїм призначенням, блок керування є практично незалежною системою в роботі, який не потрібно зовнішнє керування на протязі всього

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

циклу роботи. Тому, засоби обміну інформацією призначені лише для передачі інформації загально-керуючого типу від комп'ютера. Такими даними можуть бути: швидкість, напрямок, прискорення, час роботи; а від мікроконтролера – хід виконання та інша статистична інформація.

Блок виконання представляє собою елементи керування напругою від джерела живлення до виконуючого елемента. По своїй суті, блок виконання є набором силових ключів, що керуються сигналами від блоку керування. Головною характеристикою блоку виконання є, по-перше, кількість каналів, що керуються блоком керування; по-друге, швидкодія ввімкнення та вимикання каналу; по-третє, навантажувальна здатність каналу.

Швидкодія ввімкнення та вимикання характеризує здатність до керування виконуючим елементом. Від цього параметру залежить як швидко блок керування може впливати на швидкодію двигуна. Швидкодія оцінюється часом ввімкнення $t_{ввм,n}$ та часом вимикання $t_{вим,n}$, де n – номер каналу.

Навантажувальна здатність каналу визначається двома факторами – максимальна потужність блоку живлення та навантажувальна здатність ключового елемента, що є основою каналу. Здатність виражається у максимальній робочій напрузі $U_{макс,n}$, постійним робочим струмом $I_{роб,n}$, та максимальний піковий струм ввімкнення $I_{макс,n}$.

Блок датчиків стану представляє собою коло оберненого зв'язку від двигуна до мікроконтролера. Задача блоку датчиків полягає у наданні інформації про зміни у двигуні – це є напрямок та швидкість обертання. Не менш важливою інформацією може слугувати зміна струму при ввімкненні каналів.

В загальному вигляді, алгоритм показано на рис. 2.9.

Для обміну даними, мікроконтролерний блок оснащено відповідно послідовним та паралельним портами.

Так як мікроконтролер оснащено незначною кількістю вбудованих портів вводу-виводу, виникає необхідність розширити кількість портів вводу-

виводу. Це досягається шляхом використання відповідних каналів вводу та виводу. Запропонований блок керування містить 2 канали виводу (А та В) по 8 розрядів кожний та 1 канал вводу (С), який також є 8 розрядним.

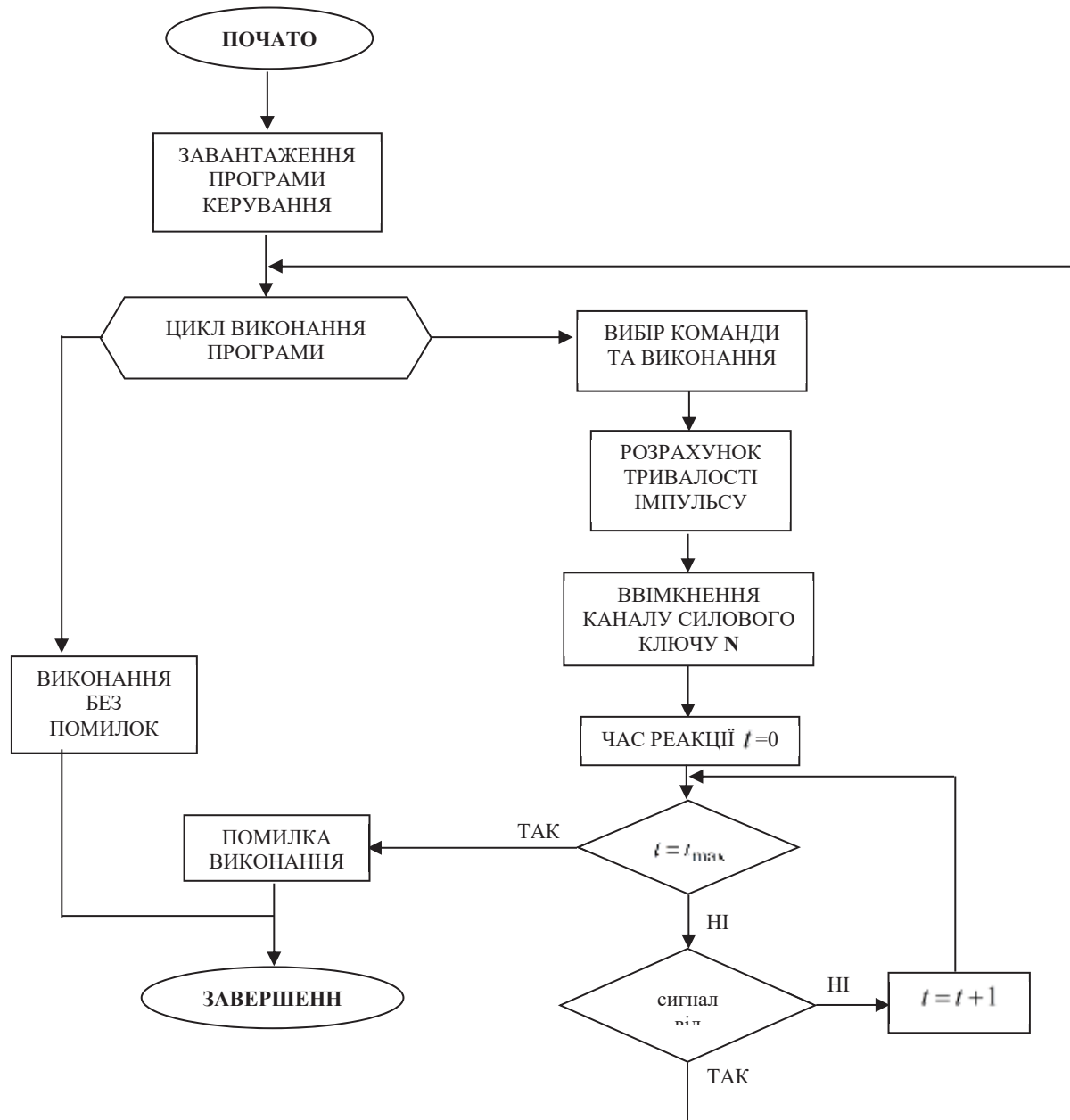


Рисунок 2.9 - Алгоритм роботи

Враховуючи, як було показано раніше, те, що швидкодія мікроконтролера є значно вищою за швидкодію відповідних елементів керування, а також те, що згідно алгоритму роботи (рис. 3), більшу частину часу мікроконтролер знаходиться у стані очікування результату дії (перевірка

стану “сигнал від датчика”) видно, що робота блоку складається із встановлення відповідного стану на виході каналу А або В та постійному опитуванні каналу С.

Блок керування пристроями вводу-виводу виконує операцію з вибору відповідного каналу керування таким чином, щоб мікроконтролер через шини даних мав змогу передати інформацію до обраного каналу або прийняти від її.

Висновки до другого розділу

Було розроблено конструкцію пристрою для діагностування електроприводу побутової електротехніки на основі моментоміру.

Основа є тензомоментомір із 4-ма пружними елементами, що розміщені радіально відносно вісі типу “біляча клітка” На них приклеєні тензорезистори. Елементи матимуть прямокутний переріз. Розроблена електрична схема обробки сигналу. Розроблено алгоритм роботи пристрою.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		49

3 РОЗРАХУНКИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО БЛОКУ

Відома фірма Atmel, що пропонує як аналоги MCS-51 – серія AT89, так і свої розробки – 8-бітні RISC мікроконтролери сімейств AT90 та AT91.

Мікроконтролери серії AT89 окрім повної сумісності за програмним кодом із i8051, мають також покращенні енергетичні показники, більшу тактову частоту, а також наявністю покращеної можливості програмування не тільки зовнішнім програматором із необхідністю використання джерела у 12В, але й внутрішньосистемним (коли чіп вже встановлено у друковану плату) із використанням 5В джерела.

Окрім мікроконтролерів серії AT89, компанія Atmel також випускає 8-бітні RISC мікроконтролери сімейства AT90 (наприклад, AT90S2222, AT90S8535 та інші) та серію ATmega, що включає моделі ATmega8, ATmega16, ATmega163, ATmega48 тощо. Крім того, для більш вимогливих завдань представлено сімейство AT91 Arm Thumb, яке охоплює продуктивні 32-бітні мікроконтролери.

Головною перевагою більш сучасних мікроконтролерів є не тільки сумісність за живленням (5В) та розташуванням виводів, але й здатність виконувати програмний код попередніх моделей. Також, вони здатні виконувати команди множення, а деякі (наприклад, i80196) навіть і команди ділення.

Мікроконтролери, які призначені для обробки аналогової інформації є більш орієнтовані для виконання операцій з обробки результатів аналогово-цифрового перетворення. Хоча вони і мають можливість керувати цифровими портами, вбудовані в них функції є непотрібними для задачі керування електродвигунами. Слід також зауважити, що необхідна швидкодія системи керування у першу чергу визначається швидкодією елементів виконання – електродвигунів. Якщо навіть прийняти, що швидкість обертання валу складе $\omega = 150$ об/сек ($\omega = 9000$ об/хв) та за один оберт датчик формує $n = 50$ імпульсів положення валу, то маємо кількість імпульсів від датчика за

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

секунду:

$$N = \omega n \quad (3.1)$$

де ω – швидкість обертання, об⁻¹;

n – кількість імпульсів за 1 оберт.

Відповідно до прикладу, кількість імпульсів складе 7500 імпульсів за 1 секунду. При тактовій частоті у 1 МГц, мікроконтролер має змогу виконати понад 130 команд. При частоті у 8 МГц (найбільш типове значення) – понад 1060 команд. Тому, найбільш прийнятним вибором є використання простих, низькочастотних мікроконтролерів.

Вимогам простоти та швидкодії задовольняють мікроконтролери серії АТmega. Обираємо АТmega8 як найбільш простіший з цієї серії. Його параметри наступні: об'єм пам'яті команд – 8кБ, об'єм пам'яті даних – 1 кБ, об'єм електрично стираемого ПЗП – 0,5 кБ. Мікроконтролер оснащено внутрішнім RC-генератором, що дозволяє йому працювати із частотою до 16 МГц без зовнішнього тактового генератора. Мікросхема містить 28 виводів, з яких 23 ліній вводу/виводу згруповано у 4 порти. Ядро АТmega8 дозволяє виконувати команди множення 8-бітних чисел за 2 такти.

3.1 Вибір схеми силового ключа

Важливим елементом виконуючої системи є електронний ключ. Враховуючи, що сучасний комплекс автоматизованого виробництва містить певну кількість електромеханічного обладнання, а саме: крокові двигуни, електродвигуни, електромагніти, що працюють із постійною та змінною напругами від 12 до 220 В та мають робочі струми на рівні до 1-10 А, це вже робить реалізацію вузла керування досить нетривіальною задачею.

Основними недоліками класичних реалізацій систем керування є:

- низька швидкодія;

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- недостатня гнучкість у керуванні;
- складність забезпечення часових рамок періодів ввімкнення та вимикання;
- недостатнє керування струмами керування;
- високе споживання електроенергії системою керування.

Враховуючи сучасні тенденції розвитку управління автоматизованими пристроями, що базуються на останніх досягненнях електроніки та мікроелектроніки, особливістю силового електрообладнання є необхідність забезпечення керування процесом за допомогою низьковольтної логіки. Робочі рівні сучасної КМОП та TTL логіки складають лише 3,3-5,0 В.

Електронний ключ, що необхідно розробити із використанням сучасної силової елементної бази, повинен поєднувати різні за своїми характеристиками вузли із найменшою складністю.

Типовим елементом, що використовується як виконуючий елемент системи керування, є реле. Зазвичай реле дозволяє комутувати напругу навантаження за допомогою одної або декількох керованих контактних пар. Виконуючий елемент реле – електромагніт. У таблиці 1 наведені параметри деяких поширених електромагнітних реле, що використовуються у елементах електромеханіки.

забезпечити значно більший струм на навантаженні із меншими втратами ніж класичний транзисторний ключ за рахунок використання польових транзисторів.

Як силовий елемент використовується МДП польовий транзистор із ізольованим каналом (MOS FET). Розглянемо роботу такого ключа на базі силового транзистора IRLZ34 фірми International Rectifier [15]. Для відкриття каналу необхідно подати додатній потенціал на затвор транзистора. Для відкриття транзистора необхідно лише 1,0-2,0 В. При цьому струм затвору сягає не більше 1-5 мкА. Особливістю силових польових транзисторів є надзвичайно низький опір каналу.

Для транзистора IRLZ34 опір відкритого каналу складає лише 0,035 Ом. Його внутрішня структура дозволяє виконувати комутацію постійних струмів на рівні 30 А, та витримувати стрибки імпульсів до 100 А при напрузі до 55 В.

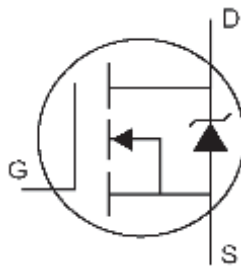


Рисунок 3.3– Внутрішня схема силового польового транзистора IRLZ34N (HEXFET® Power MOSFET) [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Механічне реле на такий же великий струм та напругу вимагає використання додаткових, часто нестандартних конструктивних рішень. На рис. 3 видно, що у внутрішній структурі транзистора введено захисний діод, який бере на себе функцію захисту транзистора від імпульсів оберненої полярності, що йдуть на транзистор при комутації реактивного навантаження.

3.2 Електричні розрахунки електронного ключа

Коло R2 та стабілітрон VD1 є джерелом фіксованої напруги. Так як

оптопара DA1 розраховується на невеликі напруги, це коло дозволяє вмикати ключ на більшу напругу.

Резистор R2 розраховується як:

$$R = \frac{U_{живл}}{I_{ст}}, \quad (3.2)$$

де $U_{живл}$ – напруга живлення;

$I_{ст}$ – максимальний струм стабілізації стабілітрона.

Обираємо напругу живлення схеми ключа $U_{живл}=45$ В. Стабілітрон VD1 визначає максимальну напругу живлення на транзисторі оптопарі, ця напруга не повинна перевищувати 0,5-0,7 від максимальної робочої напруги оптопарі $U_{макс}$. Обираємо оптопару 4N25 [21] із максимальною напругою $U_{макс}=30$ В. Так як робочий струм, що необхідний для живлення оптопарі складає до 10 мА, обираємо стабілітрон КС147, що забезпечує напругу стабілізації 4,7 В. Для стабілітрона КС147, максимальний струм стабілізації складає 25 мА. Резистор R2 відповідно буде:

$$R = \frac{45}{25 \cdot 10^{-3}} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ Ом} \quad (3.3)$$

Обираємо R2 з стандартного ряду значень опорів E24 – 1,8 кОм. Резистор R3 в запропонованій схемі призначено для обмеження струму затвору. Його значення визначається з міркувань забезпечення необхідного струму затвору транзистора VT1. Обираємо R3 у межах 10 кОм. При відкритті транзисторної оптопарі напруга на R3 складе 4,6-4,7 В. Струм, що протікає через R3 складе $\frac{4,6}{10 \cdot 10^3} = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ А} = 0,46 \text{ мА}$, що цілком достатньо. Так як затвор в транзисторі VT1 є ізольованим, він утворює внутрішню ємність. Для

знаття цього потенціалу з затвору транзистора VT1 використовується резистор R4. Так як R3-R4 утворюють подільник напруги, обираємо його значення на рівні 100 кОм.

Простота схеми рис. 2 і, відповідно її реалізація, дозволяє обирати цю схему як базову схему електронного ключа.

3.3 Розрахунки виготовлення друкованої плати блоку вимірювання

Друковані плати є конструктивними елементами, призначеними для реалізації заданих електричних схем. Вони складаються з провідникових ділянок у вигляді металізованих шарів, нанесених на діелектричну основу. До основних компонентів друкованої плати входять діелектрична основа, металізоване покриття, що формує малюнок провідників та контактні майданчики, а також монтажні та кріпильні отвори. Всі ці елементи повинні відповідати галузевим стандартам і вимогам. Діелектричні основи друкованих плат мають бути структурно однорідними, без дефектів, таких як внутрішні порожнини, раковини, сторонні вклучення, сколи, тріщини чи відшарування. Провідниковий малюнок повинен бути чітким, з рівними краями і без дефектів, таких як роздуття, відшарування, підтравлення, темні плями чи залишки технологічних матеріалів. Для розробленої схеми цифрового керування необхідно створити двосторонню друковану плату третього класу точності. Подібні плати мають струмопровідний малюнок з обох боків діелектричної або металевий основи. Електричне з'єднання між шарами плати забезпечується металізацією отворів. Завдяки цьому вони дозволяють збільшити щільність монтажу, покращити надійність з'єднань, а також забезпечують вищу жорсткість конструкції. Такі плати часто використовуються в бортовій і портативній апаратурі. Для виготовлення обрано адитивну технологію виробництва. Оскільки друкована плата виготовляється серійно, ручний процес виключається – застосовується автоматизація. Заготовки вирубуються за допомогою преса, а для цього

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

визначають робочі розміри пуансона і матриці штампу, необхідного для оброблення плати по контуру.

Так як товщина плати складає 1,5 мм, то вирубку плати будемо проводити без попереднього підігріву.

Робочі розміри матриці і пуансона визначаємо за наступними формулам [21]:

$$D_M = (D_d - \delta) + \delta; \quad (3.4)$$

$$D_{II} = (D_d - \delta - \Delta) - \delta; \quad (3.5)$$

де D_M – робочий розмір матриці, мм;

D_{II} – робочий розмір пуансона, мм;

D_d – номінальний розмір вирубуючої деталі, $D_d = 140 * 160$ мм;

δ – допуск на відповідний розмір вирубуючої деталі, $\delta = -0,63$ мм

У відповідності із потрібною ступінню точності виготовлення друкованої плати повинні бути наступні допуски контуру, що вирубуються:

$$160_{-0,63} * 140_{-0,63},$$

Δ – номінальний технологічний проміжок між пуансоном і матрицею, $\Delta = 0,055$ мм [21];

δ_m і δ_n – допуски на виготовлення ріжучого контуру матриці і пуансона.

Тоді робочі розміри матриці по ширині і довжині відповідно складають:

$$A_M = (160 \text{ мм} - 0,63 \text{ мм}) + \delta_{MM}; \quad (3.6)$$

$$B_M = (140 \text{ мм} - 0,63 \text{ мм}) + \delta_{MM}. \quad (3.7)$$

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Звідки отримаємо наступні розміри:

$$A_M = 159.37^{+\delta_{\text{м}}} \text{ мм},$$

$$B_M = 139.37^{+\delta_{\text{м}}} \text{ мм}.$$

Робочі розміри пуансона по ширині і довжині відповідно складають:

$$A_{\text{п}} = (A_M - 0,055\text{мм}) - \delta_{\text{мм}};$$

$$B_{\text{п}} = (B_M - 0,055\text{мм}) - \delta_{\text{мм}}.$$

Для отримання розмірів плати, які відповідають 13-му квалітету точності, пуансони і матрицю слід виготовити по 10-му квалітету [21], якому відповідає допуск 160 мкм [21].

З врахуванням цього допуску розміри матриці складуть:

$$A_M = 159,37^{+0,16} \text{ мм},$$

$$B_M = 139,37^{+0,16} \text{ мм}.$$

а пуансона:

$$A_{\text{п}} = 159,32_{-0,16} \text{ мм},$$

$$B_{\text{п}} = 139,32_{-0,16} \text{ мм}.$$

Одночасно із вирубкою плати, відбувається вирубка монтажних отворів на платі. Визначимо розміри пуансона і матриці для вирубки монтажних

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

отворів у платі.

Діаметри отворів складають 3Н13.

Розміри пуансона і матриці для пробиття отворів визначається за наступними формулами:

$$D_m = (D_H + \delta/2 + v_{\text{зовн}} + \Delta) + \delta_m, \quad (3.8)$$

$$D_n = (D_H + \delta/2 + v_{\text{вн}}) - \delta_n, \quad (3.9)$$

де D_H – номінальний розмір отвору що пробивається, мм;

δ – допуск на розмір отвору що пробивається, мм;

δ_n – допуск на виготовлення ріжучого контуру пуансона, мм;

$v_{\text{зовн}}$ – середня величина усадки зовнішнього контуру при пробивці, мм;

δ_m – допуск на виготовлення ріжучого контуру матриці, мм,

$\delta_m = 0,18 \text{ mm}$;

D_n – діаметр пуансона, мм;

$v_{\text{вн}}$ – середня величина усадки отвору при вирубці, мм.

$$v_{\text{зовн}} = a_T D_n + \psi_y, \quad (3.10)$$

$$v_{\text{вн}} = C_T D_H + \psi_y, \quad (3.11)$$

де a_T і C_T – коефіцієнти, які характеризують термічну усадку при охолодженні;

ψ_y – відносні виміри розмірів, викликане пружністю матеріалу, мм;

Для матеріалу товщиною 1,5 мм з [21] визначаємо $a_T = 0,0022$;

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$C_T = 0,0030$; $\psi_Y = 0,04$, тоді:

$$v_{BH} = 0,0022 * 3 + 0,04 = 0,0466 \text{ мм},$$

$$v_{зОВН} = 0,003 * 3 + 0,04 = 0,049 \text{ мм}.$$

Величина допуску на отвір $\delta_m / 2 = 0,18 = 0,09$ мм

Допуск на виготовлення ріжучого контуру пуансона і матриці позначаємо по восьмому квалітету, тобто $\delta_n = 0,018$ мм і $\delta_m = 0,018$ мм.

Таким чином діаметри пуансона і матриці:

$$D_n = (3 + 0,06 + 0,0466) - 0,018 = 3,1066_{-0,018} \text{ мм},$$

$$D_m = (3 + 0,06 + 0,049) + 0,018 = 3,109_{+0,018} \text{ мм}.$$

При виготовленні друкованих плат використовуються стандартні заготовки друкованих плат.

Як матеріал – використовується плати з склотекстоліту марки СФ-2-1,5-35 ГОСТ 10316-78, лист розміром 600x400 мм.

Вирубується плата розміром 160x140 мм,

Коефіцієнт використання матеріалу ($\eta, \%$) визначається за формулою:

$$\eta = \frac{F_{n.пов.} \cdot N_1}{F_1} * 100 \quad (3.12)$$

де $F_{n.пов}$ – корисна площа плати, m^2 і визначається за формулою:

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		62

$$F_{n.пов} = F_n - 4 \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.13)$$

де F_n – площа плати m^2 ;

$\frac{\pi d^2}{4}$ – площа монтажного отвору в платі, m^2 ;

$n_{отв}$ – число монтажних отворів на платі.

F_1 – площа листа, з якого одержують заготовки плат;

Кількість заготовок із одного листа матеріалу:

$$N = \left[\frac{F_1}{F_n} \right], \quad (3.14)$$

Так як величина $\frac{\pi d^2}{4}$ дуже мала, то нею при розрахунку η можна знехтувати, тоді маємо:

$$\eta = \frac{160 \times 140 * \left[\frac{600 \times 400}{160 \times 140} \right]}{600 \times 400} * 100 = 93,3\%$$

Визначимо зусилля вирубки друкованої плати по контуру за наступною формулою [21]:

$$P_{заг} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4, \quad (3.15)$$

де P_1 – відповідне зусилля вирубки, Н;

P_2 – зусилля прижиму, Н;

P_3 – зусилля піхання, Н;

P_4 – зусилля знімання, Н.

Відповідне зусилля вирубки визначається за формулою [21]:

$$P_i = \Pi \tau K_i, \quad (3.16)$$

де Π – периметр контуру плати, що вирубуюється,

$$\Pi = 2(240 + 120) * 10^{-3} = 0.72 \text{ м};$$

H – товщина матеріалу, $H = 0,0015 \text{ м}$;

τ – опір зрізу для текстоліту, $\tau = 9 * 10^7 \text{ Па}$ [21]

K_1 – коефіцієнт, який враховує нерівномірність товщини штампованого матеріалу, затуплення ріжучих країв пуансона і матриці, присутність напруженого стану в процесі вирубки, $K_1 = 1,1 \div 1,3$ [21].

Приймаємо $K_1 = 1,2$.

З формули 3.23 слідує наступне значення зусилля вирубки:

$$P_1 = 0,72 * 0,0015 * 9 * 10^7 \text{ Па} * 1,2 = 116640 \text{ Н}$$

Зусилля притиску визначають по формулі [21]:

$$P_2 = \Pi g, \quad (3.17)$$

де g – питомий тиск притискування, $g = 1 * 10^7 \div 1,5 * 10^7 \text{ Па}$ [21],

приймаємо $g = 1,3 * 10^7 \text{ Па}$.

$$P_2 = 0,72 * 0,0015 * 1,3 * 10^7 \text{ Па} = 14040 \text{ Н}$$

Визначаємо зусилля проштовхування [8]

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$P_3 = K_2 P_1 \frac{h}{H}, \quad (3.18)$$

де K_2 – коефіцієнт, який залежить від механічних властивостей матеріалу плати і проміжку між пуансоном і матрицею, $K_2 = 0,05 \div 0,08$ [21].
Вибираємо $K_2 = 0,06$;

h – висота пояса матриці, $h = H$ [21], отже $h = 1,5$ мм.

$$P_3 = 0,06 * 116,64 \frac{1,5}{1,5} = 6998H$$

Зусилля зняття деталі вираховують по формулі [21]:

$$P_4 = K_{zn} P_1, \quad (3.19)$$

де K_{zn} – коефіцієнт, який залежить від товщини матеріалу і типу штампа. $K_{zn} = 0,06$ [21]

$$P_4 = 0,06 * 116.64 = 6994H$$

Підставивши значення $P_1 \div P_4$ у (3.14) отримуємо:

$$P_{сум} = 116640 + 14040 + 6998 + 6994 = 14467H$$

На основі розрахунків вибираємо електрогідравлічний прес моделі ПВГ-8 з параметрами: номінальне зусилля – 78,8 кН, хід повзуна – 0÷30 мм, число ходів повзуна – до 250 в годину.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		65

Висновки до третього розділу

Було вибрано елементи силового ключа. Проведено електричні розрахунки електронного ключа.

Також зроблені розрахунки елементів пристрою, такі як друкована плата, що необхідно для визначення габаритних розмірів та подальшого компонування елементів.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		66

ВИСНОВКИ

Метою роботи було розроблення стенду для вимірювання характеристик електродвигунів побутової техніки. Після огляду та аналізу існуючих пристроїв, увагу було покладено на трансмісійні мометоміри тензометричного типу, котрі мають не велику похибку та простоту виконання та застосування. Недоліками був щітковий струмознімач та недосконала система вимірювання.

Після вирішення недоліків та корегувань згідно технічних вимог до пристрою була запропонована нова, вдосконала конструкція. Також і вдосконалилась електрична частина пристрою. Увагу приділялося проектуванню трансформаторному струмознімачу та операційному підсилювачу, що розміщувались на рухомій частині тензомоментоміра.

У розрахунковому розділі підраховувалися необхідні розміри пружного вимірювального елемента. Також було проведено аналіз існуючих тензодатчиків та обрано їх схему підключення.

Конструкція була спроектована, складено креслення, наступним кроком буде втілення проекту у реальну практичну конструкцію щоб з легкістю можна було вимірювати механічні характеристики електродвигунів, так як розроблена конструкція має можливість знімати як крутні моменти так і кутову швидкість на валу електродвигуна.

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		67

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Якими бувають електродвигуни та де їх використовують / Веб-сайт. Якими бувають електродвигуни та де їх використовують. *Lutsk.rayon.in.ua*. URL: <https://lutsk.rayon.in.ua/news/347742-iaкими-buvaiut-elektrodivguni-ta-de-yihvikoristovuiut> (дата звернення: 16.04.2025).

2. Адаптивне векторне керування асинхронними двигунами при активних опорах статора та ротора / Веб-сайт. Адаптивне векторне керування асинхронними двигунами при активних опорах статора та ротора. *E-learning Архів* *KPI*. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/16105/1/Konoplinsky_diss.pdf (дата звернення: 16.04.2025).

3. Порівняльний аналіз схем контурів ротора асинхронного двигуна... / Веб-сайт. Порівняльний аналіз схем контурів ротора асинхронного двигуна для розрахунків електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів. *Pratsi VNTU*. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/5> (дата звернення: 16.04.2025).

4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Підручник [для ВНЗ]. Перехідні процеси в системах електропостачання / за ред. Г.Г. Півняка. *Core.ac.uk*. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/132413069.pdf> (дата звернення: 16.04.2025).

5. ТОЕ. Перехідні процеси. Синтез. Нелінійні кола / Підручник [для ВНТУ]. ТОЕ. Перехідні процеси. Синтез. Нелінійні кола / Ю.О. Карпов, Ю.Г. Ведміцький, В.В. Кухарчук, С.Ш. Кацев. *IQ.VNTU.edu.ua*. URL: [https://iq.vntu.edu.ua/fdb/671/Books/ТОЕ_II_\(1\).pdf](https://iq.vntu.edu.ua/fdb/671/Books/ТОЕ_II_(1).pdf) (дата звернення: 16.04.2025).

6. Конспект лекцій з дисципліни «Основи автоматизованого проектування електричних машин» частина 2. Конспект лекцій з дисципліни «Основи автоматизованого проектування електричних машин» ч. 2. *FEA KPI*. URL: https://em.fea.kpi.ua/images/doc_stud/distsiplini/oapem2/K1_2.pdf (дата звернення: 16.04.2025).

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

7. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів / Навч. посібник. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів / О.П. Чорний, Ю.В. Зачепа, В.К. Титюк, О.А. Чорна. *KDU.edu.ua*. URL: http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/posibnuk_Monitorung.pdf (дата звернення: 15.04.2025).

8. Рябченко Дмитро О (2018). *Розробка експериментального стенду для дослідження крокового двигуна* (Бакалаврська дипломна робота, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»). E-learning Архів КПІ. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d7c4db3c-51b2-4802-bdfa-6ce271243e07/content>

9. Покращення характеристик безредукторних приводів на основі синхронного двигуна/ Дисертація. Покращення характеристик безредукторних приводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами / дис. [для здобуття наук. ступ.] (2020, 205 с.). *LPNU.edu.ua*. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/4450/disertaciya-koziyav.pdf> (дата звернення: 15.04.2025).

10. Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик та інтелектуальної класифікації / Д.О. Чернявський. *Core.ac.uk*. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/84274068.pdf> (дата звернення: 01.05.2025).

11. Електроприводи змінного струму. Електроприводи змінного струму. *Stud.com.ua*. URL: https://stud.com.ua/84202/tehnika/elektroprivodi_zminnogo_strumu (дата звернення: 02.05.2025).

12. Аналіз методів контролю і діагностичних параметрів ізоляції тягових двигунів постійного струму. Аналіз методів контролю і діагностичних параметрів ізоляції тягових двигунів постійного струму. *CSW.Kart.edu.ua*. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/view/75121> (дата звернення: 03.05.2025).

						БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

13. Алгоритм визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів. Алгоритм визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів з використанням низькочастотної напруги живлення. *IPROP-UA.com*. URL: <https://iprop-ua.com/inv/pdf/tbxq5lfm-description.pdf> (дата звернення: 06.05.2025).

14. Теоретичні основи електротехніки (Частина 1). Теоретичні основи електротехніки (Частина 1) / Є.А. Кудря, Л.Ю. Спінул; за ред. А.А. Щерби. *TOE KPI*. URL: https://toe.fea.kpi.ua/download/lecture_notes/toe-1.pdf (дата звернення: 03.05.2025).

15. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем / Монографія. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем / О.О. Закладний. *E-learning Архів КІІІ*. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50554/1/Monohrafiia_1.PDF (дата звернення: 03.05.2025).

16. Методи випробувань асинхронних двигунів. Методи випробувань асинхронних двигунів. *web.posibnyky.vntu.edu.ua*. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feem/4lagutin_vyprobuv_elektrmashin_transformatoriv/p37.htm (дата звернення: 04.05.2025).

17. Метод ідентифікації параметрів асинхронного електропривода... Метод ідентифікації параметрів асинхронного електропривода з низькою чутливістю до похибок вимірювання його режиму при нерухомому роторі. *IR.NMU.org.ua*. URL: <https://ir.nmu.org.ua/xmlui/handle/123456789/155008> (дата звернення: 04.05.2025).

18. Вербовий А.П., Вербовий П.Ф., С'янов О.М. Поліпшення динамічних і регулювальних властивостей асинхронних двигунів... Вербовий А.П., Вербовий П.Ф., С'янов О.М. (1999). Поліпшення динамічних і регулювальних властивостей асинхронних двигунів як джерело енергозбереження // *Електротехніка та електроенергетика*, 1, 37.

19. Експериментальні дослідження електричних машин частина III. Асинхронні машини. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. *Core.ac.uk*. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/52161096.pdf> (дата звернення: 06.05.2025).

20. Теорія електропривода ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. Теорія електропривода ХНУМГ ім. О.М. Бекетова / Донець В., Колотіло. *Eprints.kname.edu.ua*. URL: https://eprints.kname.edu.ua/57522/1/76Л_Консп_Лекцій_2019%20печ.pdf (дата звернення: 06.05.2025).

21. Динаміка й оптимізація машин / Навч. посібник. Динаміка й оптимізація машин [Навчальний посібник]. *NUBIP.edu.ua*. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/posibnik_dinamika_y_optimizaciya_mashin.pdf (дата звернення: 06.05.2025).

22. Сигнали та процеси в радіотехніці (Частина 1). Сигнали та процеси в радіотехніці (Частина 1) освітньо-проф. програма. *DSTU.dp.ua*. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/3/20/3-20k124.pdf> (дата звернення: 01.05.2025).

					БРМА 25.00.00 000 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		