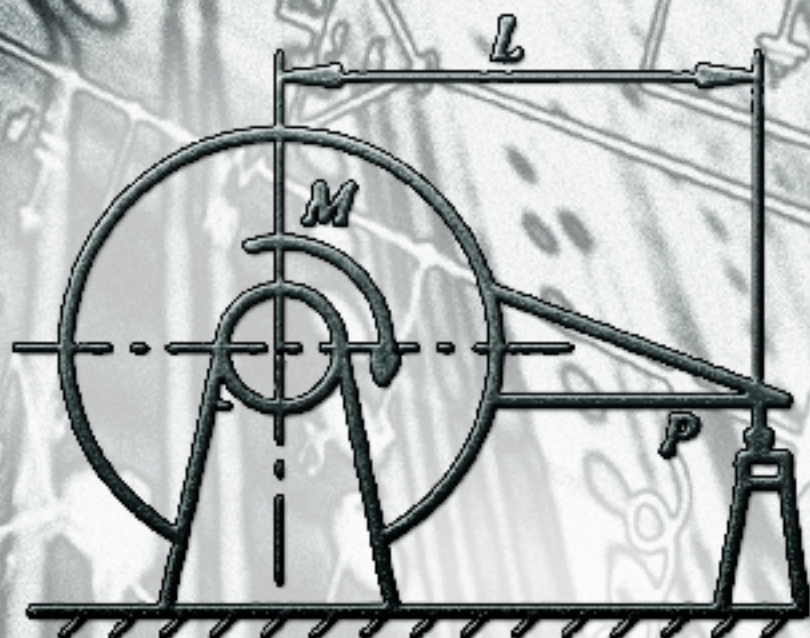
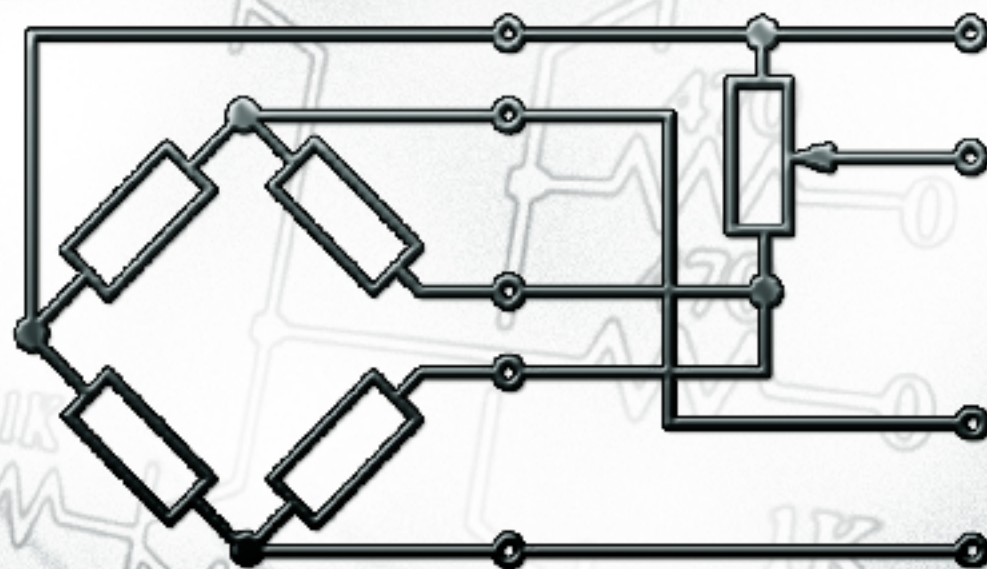
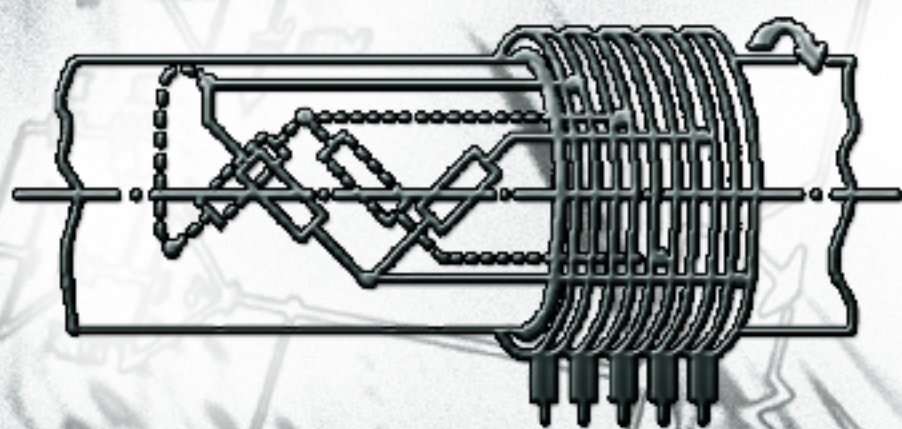
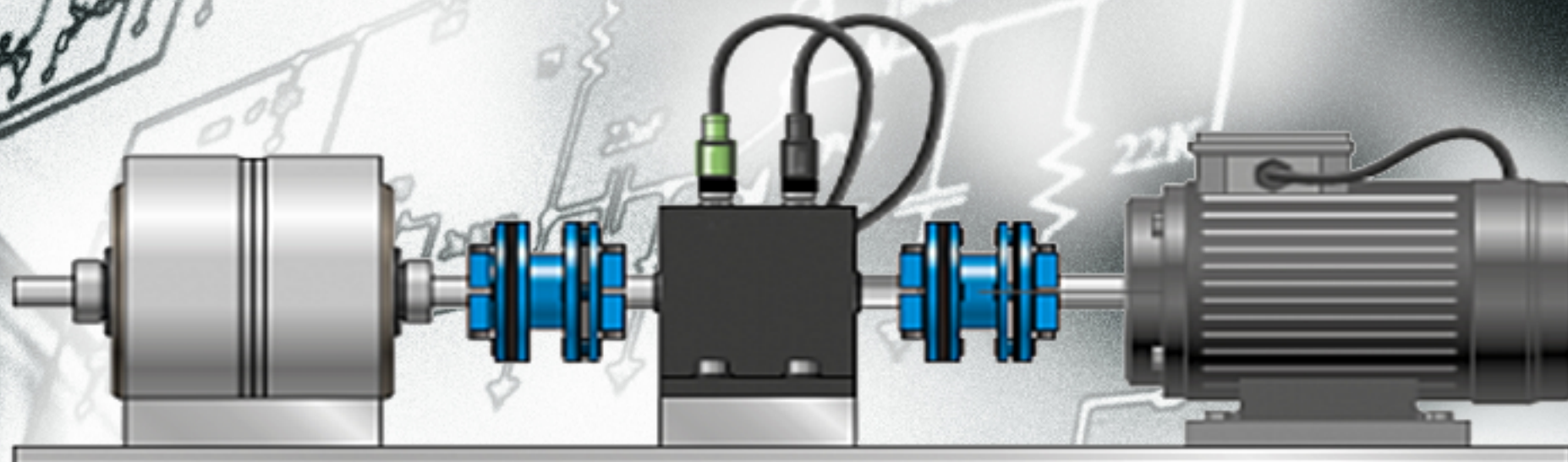


В. П. Квасніков, Д. М. Квашук

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ПРИЛАДІВ  
ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ  
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

МОНОГРАФІЯ



Міністерство освіти і науки України  
Національний авіаційний університет

*Квасніков В. П., Квашук Д. М.*

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ПРИЛАДІВ ДЛЯ  
ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

*Монографія*

Київ – 2023

УДК 621.317  
К323

*Рекомендовано Вченою радою  
Державного університету «Житомирська  
політехніка» (протокол № 5 від 31.03 2023 р.)*

Рецензенти:

*Сібрук Леонід Вікторович, доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри електроніки, робототехніки і технологій  
моніторингу та інтернету речей Національного авіаційного  
університету;*

*Кошовий Микола Дмитрович доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри інтелектуальних вимірювальних систем і  
інженерії якості Національного аерокосмічного університету  
ім. М. С. Жуковського "Харківського авіаційного інституту";*

*Дуднік Андрій Сергійович, доктор технічних наук, доцент,  
доцент кафедри мережесих та інтернет-технологій Київського  
національного університету імені Тараса Шевченка.*

**Квасніков В. П., Квашук Д. М.**

К323 Теоретичні основи розвитку приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів: *Монографія* / В. П. Квасніков, Д. М. Квашук. – Черкаси: Видавництво «Весела перерва», 2023. – 192 с.:67 іл., 24 табл.

**ISBN 978-966-96352-3-5**

В монографії проведений аналіз методів та засобів вимірювання обертальних параметрів електродвигунів, здійснено систематизацію технічних характеристик вимірювальних приладів. Проведено якісний аналіз дестабілізуючих факторів, що впливають на процес проведення вимірювань. Досліджено характеристики точності засобів вимірювання обертальних моментів. Запропоновано ряд покращених методів вимірювання динамічних та статичних моментів електродвигунів. Для цього було проведено експериментальні дослідження, що дозволило встановити оптимальні режими вимірювань під час сталої роботи електродвигуна, а також пускового та гальмівного перехідних процесів. Представлено дослідження з використанням розробленого моделюючого комплексу, який був побудований для вимірювання таких параметрів, як: напруга, струм, динамічний та статичний момент, кутова швидкість, частота обертання валу.

Здійснено математичне моделювання та аналіз похибок приладів для вимірювання обертальних моментів. Запропоновано розробку приладів на основі індуктивних перетворювачів, де реалізовано метод корекції похибки вимірювального каналу в умовах нелінійності та міжканальних зв'язків, що забезпечує розв'язання проблеми мінімізації впливу електромагнітних перешкод, чутливості та стійкості комплексно.

Монографія може представляти інтерес для наукових співробітників та інженерів, що працюють у сфері розробки приладів для вимірювання механічних величин, для систем управління електродвигунами та електрогенераторами.

УДК 621.317  
ISBN 978-966-96352-3-5  
© Квасніков В. П., Квашук Д. М., 2023

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ В ГАЛУЗІ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	
1.1. Дослідження параметрів обертального руху валу електродвигунів.....	10
1.2. Проблеми вимірювання обертальних моментів електродвигунів.....	32
1.3. Етапи розвитку засобів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів.....	37
1.4. Класифікація приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів .....	47
1.5. Аналіз методів та засобів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів .....	64
1.6. Аналіз структур побудови приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів .....	69
1.7 Аналіз похибок приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів .....	76
1.8 Вимірювальне перетворення сигналу від індуктивних сенсорів.....	80
1.9. Збільшення точності приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів .....	81
1.10. Визначення метрологічних характеристик сенсорів для вимірювання обертальних моментів .....	83
1.11 Синтез структури приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів з покращеними метрологічними характеристиками .....	84
1.12. Чутливість приладів для вимірювання обертальних моментів	85
Висновок до розділу 1.....	86
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ	
2.1 Моделювання вимірювального каналу.....	88
2.2 Математичне моделювання обертальних параметрів електродвигунів постійного струму та асинхронних двигунів.....	95
2.3 Моделювання роботи трифазного безколекторного двигуна постійного струму (BLDCM) .....	108
2.4 Моделювання роботи приводів шнекових конвеєрів.....	121
Висновок до розділу 2 .....	130
РОЗДІЛ 3. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ	
3.1 Розробка приладу для вимірювання обертальних моментів електродвигунів .....	132
3.2. Розробка індуктивного перетворювача обертального моменту .....	150
3.3 Комп'ютерна система вимірювання обертального моменту .....	160

3.4 Мережева автоматизована система для вимірювання робочих характеристик електрогенераторів вітрових турбін .....	168
Висновки до 3 розділу .....	175
ВИСНОВКИ .....	177
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	180

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

АД	- асинхронний двигун
ІВС	- Інформаційно-вимірювальна система
ЕМ	- електрична машина
ЕД	- електродвигун
BLDCM	- Безщіткові електродвигуни постійного струму
ККД	- коефіцієнт корисної дії
СД	- синхронний двигун
G	- генератор
АМ	- асинхронна машина
АВК	- асинхронно-вентильний каскад
ВМ	- виробничий механізм
ГМ	- генераторне гальмування
ГП	- гальмування противмиканням
ДНГ	- динамічне гальмування
ДПС	- двигун постійного струму
ЕРС	- електрорушійна сила
КГ	- конденсаторне гальмування
КЗ	- коротке замикання
ККД	- коефіцієнт корисної дії

## ВСТУП

Вимірювання зусиль, що передаються валами електричних двигунів, досліджується вже більше двох століть. І до теперішнього часу вони не втратили своєї актуальності. Це обумовлено розвитком та вдосконаленням електричних двигунів та силових установок, специфічні умови роботи яких вимагають застосування різних вимірювальних засобів. Тому, процес вдосконалення електричних машин, вимагає створення більш досконалих методів вимірювання та на їх основі, вимірювальних приладів. Підвищення точності вимірювання обертальних моментів електродвигунів дозволяє точніше визначати ККД електричних машин, якісно забезпечити виконання промислових потреб в обробці ряду сировинних матеріалів, дозволяє виявляти вплив малопомітних факторів на економічність силових установок, забезпечує надійність роботи промислового обладнання.

Застосування приладів для вимірювання обертальних моментів, на суднових установках дозволяє визначати найбільш економічний режим роботи при зміні навколишніх умов (течія, вітер, хвилювання тощо). В бурових машинах вимірювання обертальних моментів дозволяє встановити оптимальний режим буріння в залежності від породи та глибини свердління. Авіаційні системи також вимагають високої точності вимірювань при високих обертах та різних умов застосування.

Загалом, відповідні прилади знайшли широке застосування в машинобудуванні, робототехніці, військових розробках, авіації та в інших ключових для країни галузях промисловості. Разом з тим, основну частину споживання електричної енергії на промислових підприємствах займають електричні двигуни. Тому оптимізація їх роботи в частині енергоефективності та точності управління ними відіграє ключову роль в системі забезпечення енергетичної безпеки України зокрема та економічної безпеки нашої країни в цілому. На перший погляд така оптимізація залежить від ефективності автоматизованих систем управління, але вирішальну роль в цьому відіграють

саме первинні перетворювачі та алгоритми їх корекції, точність та швидкодія яких лежить в основі алгоритмів автоматизованого управління електродвигунами.

Особливої уваги заслуговують процеси вимірювання обертальних моментів на високошвидкісних електричних машинах, де звичайні системи вимірювання, або непридатні, або мають невисоку точність. В свою чергу широке застосування високошвидкісних електричних двигунів, потребує розробки високоточних вимірювальних приладів. Важливим аспектом в цьому напрямку слід вважати тривалу підтримку сталих режимів роботи в деяких механізмах та їх постійного навантаження на заданому рівні.

Серед значної кількості критеріїв для оцінювання робочих характеристики електродвигунів можна виділити магнітну систему, яка призначена для перетворення електромагнітної енергії в обертальний момент. В свою чергу, дослідження магнітних параметрів, які засновані на сучасних досягненнях у галузі мікроелектроніки, обчислювальної техніки та програмування з використанням найбільш значущих науково-технічних досягнень в теорії та практиці магнітних вимірювань дозволять збільшити точність та швидкодію засобів для вимірювання обертальних моментів оптимізувавши процес вимірювання. Тому, проблема оптимізації роботи електродвигунів, які використовуються для обробки матеріалів, стосується не лише енергоефективності, але й якості виготовленої продукції, яка вимагає точної обробки.

Так, розробка нових методів вимірювання обертальних моментів та моделей, які описують характеристики процесів вимірювання, а також методів оптимізації міжперевірних інтервалів, засобів мінімізації похибок, способів їх корекції та вимірювань з урахуванням невизначеності, потребує нових рішень, спрямованих на широку сферу застосування для різних пред'явлених технічних вимог.

У даній монографії розглядається прилади, в яких вимірювання обертального моменту визначається по куту закручування, по деформації



пружного елемента, що розміщується в ланцюзі передачі моменту від двигуна до навантаження, а також ряд непрямих вимірювань. Найбільш докладно розглянуті безконтактні індуктивні засоби вимірювання, що отримали в останні роки значне розповсюдження через їх простоту конструкції і високу чутливість та стійкість до електромагнітних перешкод, а також інші вимірювальні перетворювачі, інтерфейси, методи коригування похибок, конструкції приладів та шляхи їх оптимізації.

Сучасні засоби вимірювання обертальних моментів, які використовуються в промисловості мають переважно середній клас точності. Разом з тим, вимоги до точності сенсорів та систем вимірювання обертальних моментів електродвигунів з часом ускладнюються. Це пов'язано із проявленням високих вимог, щодо компактності, можливості визначення сил, як в динамічних, так і статичних режимах, стійкості до перешкод, до впливу дестабілізуючих факторів. Особливу увагу приділено засобам обробки матеріалів (метали, алмази, медичні потреби, тощо). Торсіометри та динамометри, які призначені для вимірювання обертальних моментів під час обробки матеріалів, або мають високу вартість і задовольняють потреби точності, або мають суттєві похибки. Тому, існує потреба у створенні недорогих вимірювальних приладів, що дозволять вимірювати складові обертальних сил під час обробки матеріалів, як у динамічному так і у статичному режимах, з високою точністю.

Дослідження в області розвитку методів вимірювання обертальних моментів та систем управління електродвигунами проводиться в багатьох вітчизняних та міжнародних наукових центрах – в НТУУ КПІ ім. Сікорського, НАУ «Львівська Політехніка», КНУ ім. Т. Шевченка, Національному авіаційному університеті та багатьох міжнародних університетах.

Дані дослідження базуються на роботах таких науковців як: В. Квасніков, О. Безвесільна, В. Кучерук, О. Васілевський, В. Кухарчук, П. Орнатський, П. Сопрунюк, М. Яковлев, Є. Володарський, В. Поджаренко, Г. Сердюк, В. Долгополов, Л. Грумінська, В. Матвеевский, Л. Потапов, Ф. Юферов, О.

Наталич, Н. Яремчук, В. Кнорринг, В. Лассан, П. Кулаков, О. Наталич, Г. Иосилевич, Ріхтер, А. Шнайдер а також інших вітчизняних та міжнародних вчених.

В першому розділі монографії проведено аналіз відомих методів та засобів вимірювання обертальних моментів. Приведено класифікації вимірювальних приладів, які застосовуються для вимірювання обертальних параметрів роботи електродвигунів. Висвітлено дослідження технічних характеристик приладів для вимірювання технічних характеристик електродвигунів (торсіометрів, спеціальних динамометрів та інших перетворювачів). Проведено аналіз впливу дестабілізуючих факторів на процес вимірювання. Другий розділ присвячений моделюванню електричних та механічних параметрів електродвигунів. Третій розділ присвячений пропозиціям, щодо вдосконалення методів та засобів вимірювання обертальних параметрів електродвигунів.

Новизну отриманих результатів отриманих в монографії підтверджено актами впровадження запропонованих напрацювань в процес виробництва.

Монографія розрахована на науково-технічних працівників промислових підприємств, наукових установ, проектних організацій, студентів та викладачів, які спеціалізуються в галузі розробки методів та систем вимірювання обертальних моментів електродвигунів.

Розділ 3 та підготовлений Квашуком Д. М. самостійно, а розділи 1 та 2 спільно - Квашуком Д. М. та Квасніковим В. П.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ В ГАЛУЗІ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Сьогодні сучасна література переповнена описами різноманітних методів вимірювання обертальних параметрів електричних машин. Разом з тим відсутній їх комплексний огляд. У зв'язку з цим, в даному розділі, було поставлено задачі пов'язані із аналізом відомих методів вимірювання обертальних моментів з подальшою побудовою класифікацій створених в результаті проведення систематизації технічних характеристик вимірювальних приладів, методів вимірювання та способів обробки сигналів з вимірювальних перетворювачів. Було проведено аналіз дестабілізуючих факторів, що мають вплив на результати вимірювання розглянутими методами.

За результатами проведеного дослідження в даному розділі, автором опубліковано наступні праці: [1, 2, 3, 4, 5, 6].

### 1.1. Дослідження параметрів обертального руху валу електродвигунів

Обертальний момент електродвигунів в літературі розглядається як момент сили, який прикладається до вала і забезпечує його обертання [7], [8], [9], [10], [11]. Виходячи із дослідження зазначеної літератури, класифікація обертальних моментів електродвигунів базується на декількох критеріях, а саме: за способом формування, напрямом дії та режимом роботи. Основні види кругних моментів представлено в табл. 1.1

Таблиця 1.1

Класифікація обертальних моментів електродвигунів, [8], [9], [10], [11],  
[12].

Вид	Характеристика	Особливості
1	2	3
Постійний обертальний момент	Момент, який залишається постійним при будь-якій швидкості обертання вала електродвигуна	Характерний для постійних магнітних електродвигунів

Продовження таблиці 1.1.

1	2	3
Змінний обертальний момент	Момент, який змінюється зі зміною швидкості обертання вала електродвигуна	Характерний для асинхронних електродвигунів та багато інших типів електродвигунів
Періодичний обертальний момент	Момент, який змінюється з певною періодичністю	характерний для деяких типів електродвигунів, таких як шагові та серводвигуни
Максимальний обертальний момент	момент, який електродвигун може розвинути при певному значенні струму, напруги та інших параметрів роботи	Цей параметр є важливим для планування роботи електродвигуна в тих випадках, коли потрібно розвинути максимальну потужність
Електромагнітний момент	момент, який виникає внаслідок взаємодії магнітного поля статора з магнітним полем ротора електродвигуна	момент забезпечує початковий рух ротора і є основним моментом ЕД
Механічний момент	момент, який виникає внаслідок взаємодії механічних елементів ЕД, таких як вал, корпус, підшипники і т.д.	забезпечує обертання вала ЕД та виконання корисної роботи
Електричний момент	момент, який виникає внаслідок взаємодії електричного поля статора з електричним полем ротора ЕД	має найменший вплив, оскільки не впливає на роботу ЕД.
Пусковий момент	момент, який виникає в момент запуску ЕД і забезпечує початкове обертання ротора	зазвичай більший, ніж робочий момент, оскільки він повинен перебороти сили тертя та інерції, що заважають початковому руху ротора
Реактивний момент	момент, який виникає внаслідок реактивних компонентів струму, що протікає через обмотки статора електродвигуна	не пов'язаний з енергетичними витратами, оскільки він відображає лише взаємодію магнітного поля статора з магнітним полем ротора електродвигуна. Може бути викликаний, наприклад, розбалансованістю магнітних полів статора та ротора, розривом ізоляції на обмотках статора, а також перешкодами в потоці повітря
Момент опору	це момент, який чинить опір обертанню вала двигуна і зумовлений силами тертя в підшипниках та інших елементах механізму. Цей момент залежить від багатьох факторів, таких як тип і конструкція двигуна, конструкція підшипників, швидкість обертання вала та умови змащення.	необхідно враховувати при виборі та проектуванні приводу для електродвигуна, щоб забезпечити правильний розрахунок навантажень та вибір оптимальної конструкції підшипників та інших деталей, які чинитимуть опір цьому основному моменту. Може впливати на споживану потужність та ККД двигуна.

Загальна математична модель моменту включає декілька компонентів, таких як магнітний момент, електричний струм та інерційний момент [12].:

$$M = M_m + M_e + M_i, \quad (1.1)$$

де  $M_m$  - магнітний момент,  $M_e$  - електричний момент, а  $M_i$  - інерційний момент.

Магнітний момент визначається як добуток індукції магнітного поля та площі поперечного перерізу ротора електродвигуна:

$$M_m = k_m B R^2, \quad (1.2)$$

де  $k_m$  - коефіцієнт пропорційності,  $B$  - індукція магнітного поля, а  $R$  - радіус ротора.

Електричний момент визначається як добуток струму, що протікає через обмотки статора, та магнітного поля ротора:

$$M_e = k_e I \cdot B, \quad (1.3)$$

де  $k_e$  - коефіцієнт пропорційності, а  $I$  - струм, що протікає через обмотки статора.

Інерційний момент визначається як добуток маси ротора та його квадрату відстані до осі обертання:

$$M_i = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.4)$$

де  $J$  - момент інерції ротора,  $\omega$  - кутова швидкість обертання.

Крім того, до складу моменту опору електродвигуна можуть входити такі компоненти, як момент тертя, момент навантаження та інші. Залежно від конкретної ситуації, можуть використовуватися різні математичні моделі моменту опору електродвигуна.

Математична модель постійного обертального моменту електричного двигуна може бути представлена у вигляді виразу:

$$M = k_t \cdot I, \quad (1.5)$$

де  $M$  – обертальний момент на валу електродвигуна (Нм),  $kt$  - коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом обертального моменту;  $I$  - сила струму, що протікає через обмотки двигуна.

Періодичний обертальний момент електродвигуна, залежний від часу, та може бути представлений виразом:

$$M(t) = M_{cp} + M_s \cos(\omega t + \phi), \quad (1.6)$$

де  $M_{cp}$  - середнє значення обертального моменту;  $M_s$  - амплітуда коливань обертального моменту;  $\omega$  - кутова частота коливань;  $\phi$  - початкова фаза коливань

Математична модель максимального обертального моменту електродвигуна може бути виражена за допомогою наступної формули:

$$M_{\max} = \frac{\pi}{2} \rho N^2 D^4 \frac{\eta}{2L}, \quad (1.7)$$

де  $\rho$  - густина матеріалу ротора;  $N$  - кількість витків обмотки статора;  $D$  - діаметр ротора;  $\eta$  - коефіцієнт корисної дії;  $L$  - довжина ротора.

Математична модель запропонована в працях [13], [14], [15] показує, що електромагнітний момент електродвигуна пропорційний магнітному потоку, що проходить через обмотки. Коефіцієнт пропорційності  $k_e$  залежить від конструкції електродвигуна та може бути розрахований експериментально:

$$M_e = k_e \cdot \phi \cdot I, \quad (1.8)$$

де  $M_e$  - електромагнітний момент електродвигуна, Н·м;  $k_e$  - коефіцієнт пропорційності;  $\phi$  - магнітний потік, Вб;  $I$  - струм, що проходить через обмотки електродвигуна, А.

Математична модель механічного моменту електродвигуна включає рівняння, що описують залежність між моментом, швидкістю обертання та струмом електродвигуна. Ці залежності базуються на законах електродинаміки та механіки.

Один з найбільш поширених підходів до моделювання механічного моменту електродвигуна - це використання рівнянь кутового руху та електромагнітної сили.

Математична модель механічного моменту електродвигуна описує залежність між струмом, напругою, кутовою швидкістю та моментом обертання, що генерується електродвигуном. Для вивчення детальної математичної моделі механічного моменту електродвигуна можна скористатися рівняннями електричної та механічної частин.

Рівняння електричної частини:

$$U = R_a I + L_a \frac{dI}{dt} + E, \quad (1.9)$$

де  $U$  - напруга живлення електродвигуна,  $I$  - струм, що протікає через обмотки,  $R_a$  - опір обмоток,  $L_a$  - індуктивність обмоток,  $E$  - ЕРС, що залежить від кутової швидкості обертання вала електродвигуна.

Рівняння механічної частини:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - T_L, \quad (1.10)$$

де  $J$  - момент інерції ротора електродвигуна,  $\omega$  - кутова швидкість ротора,  $M$  - механічний момент, який створюється електродвигуном,  $T_L$  - момент навантаження. ЕДС  $E$  залежить від кутової швидкості ротора  $E = K_E \omega$ , де  $K_E$  - коефіцієнт пропорційності між ЕДС та кутовою швидкістю.

Механічний момент залежить від струму, що протікає через обмотки  $M = K_T I$ , де  $K_T$  - коефіцієнт пропорційності між механічним моментом та струмом.

Електричний момент електродвигуна можна описати за допомогою закону Ейлера, [16]:

$$M_e = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + k_e \cdot I, \quad (1.11)$$

де  $J$  - момент інерції ротора електродвигуна,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $\frac{d\omega}{dt}$  - кутове прискорення ротора електродвигуна,  $\text{рад}/\text{с}^2$ ;  $B$  - коефіцієнт тертя,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $\omega$  - кутова швидкість обертання

ротора електродвигуна, рад/с;  $k_e$  - коефіцієнт пропорційності між електричним моментом та кутовою швидкістю;  $I$  - струм, що проходить через обмотки електродвигуна, А.

Таким чином, рівняння відображає закон збереження механічної енергії ротора електричного двигуна. Ліва частина рівняння відповідає кількості механічної енергії, яка витрачається на зміну кутової швидкості руху ротора, а права частина відображає кількість механічної енергії, яка виробляється за рахунок струму, що протікає через обмотки, та кількість енергії, що витрачається на подолання зовнішнього моменту та в'язкого тертя між ротором та повітрям. Зважаючи на ці фактори, рівняння можна використовувати для моделювання руху ротора електричного двигуна та розрахунку електромагнітних параметрів електродвигуна.

Одна з найпоширеніших математичних моделей пускового моменту електродвигуна має наступний вигляд [17]. Дана формула описує залежність механічного моменту  $M_s$ , який виникає у синхронному електродвигуні зі статорною обмоткою від квадрата напруги живлення статора  $V_s$ , опорного опору статора  $R_s$  та електромагнітного часу статичної та динамічної компонент магнітного поля  $T_e$ , який залежить від властивостей ротора:

$$M_s = k \cdot \frac{V_s^2}{R_s} \cdot \frac{1}{(1 + sT_e)}, \quad (1.12)$$

де  $k$  - коефіцієнт пропорційності, залежно від конструкції електродвигуна;

$V_s$  - напруга живлення, В;  $R_s$  - опір статора, Ом;  $S$  - оператор диференціювання за часом;  $T_e$  - часова стала електромагнітного поля ротора, с.

Ця модель дозволяє описати пусковий момент електродвигуна в залежності від вхідної напруги, опору статора та часової сталої електромагнітного поля ротора. Вона є важливою для дослідження та проектування електродвигунів, а також для оптимізації їхньої роботи при різних умовах живлення та навантаження.



Математичний опис реактивного моменту електродвигуна можна знайти, використовуючи рівняння ЕМС та рівняння механічного руху ротора, [22]. Електромагнітна сила електродвигуна може бути визначена за допомогою рівняння:

$$EMF = K\phi\omega, \quad (1.13)$$

де  $EMF$  - електромагнітна сила,  $K$  - константа, що залежить від конструкції електродвигуна,  $\phi$  - магнітний потік,  $\omega$  - кутова швидкість обертання ротора.

Також, реактивний момент можна визначити за допомогою рівняння механічного руху [18]:

$$M_{reactive} = J \frac{d\omega}{dt} - T_L - T_d, \quad (1.14)$$

де  $J$  - момент інерції ротора,  $\frac{d\omega}{dt}$  - кутова прискорення ротора,  $T_L$  - механічний навантажувальний момент, що діє на ротор,  $T_d$  - момент опору, який включає в себе опір тертя та інші втрати. Результат виразу  $M_{reactive}$  відображає реактивний момент електродвигуна.

Реактивний момент є зазвичай меншим за механічний момент, оскільки частина механічного моменту витрачається на подолання опору руху.

Коефіцієнт пропорційності залежить від проектування та типу електродвигуна, а також від швидкості обертання ротора та інших параметрів. Для постійного обертального моменту - це постійне значення, тобто обертальний момент на валу пропорційний струму, що протікає через обмотки.

Визначення обертальних параметрів електричних машин необхідно для керування електротранспортом, промисловими приладами, побутовими приладами, медичним обладнанням та іншими засобами, які використовують електродвигуни, що створюють рух та приймають участь у керуванні цим рухом.

Таким чином, в основі вимірювання обертальних моментів електричних двигунів лежать такі величини: момент сили  $M$ ; момент імпульсу  $L$ ; момент інерції  $J$ , що представлено на рис.1.2.

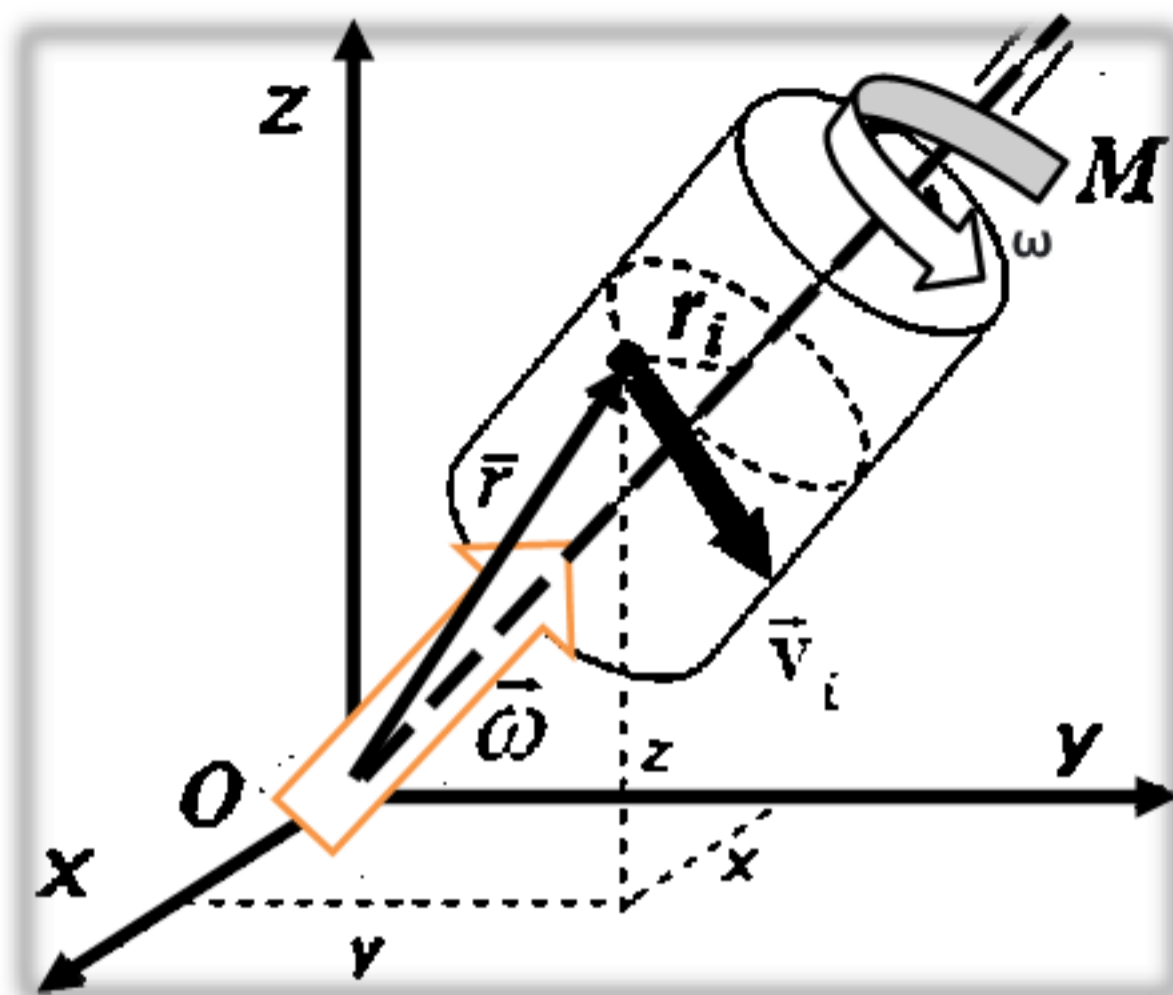


Рис. 1.1. Характеристика моментів обертального руху, [19]

Таблиця 1.2

Характеристика моментів обертального руху електричних машин, [20],  
[21], [22], [23]

Характеристика	Формула	Позначення
1	2	3
Момент сили матеріальної точки відносно центру обертання	$\vec{M} = \vec{r} \cdot \vec{F}$	$\vec{r}$ - радіус вектор; $\vec{F}$ - сила, що діє на вал; $l$ - плече сили; $\alpha$ - кут повороту.
Модуль моменту сили	$M = r \cdot F \cdot \sin \alpha = F \cdot l$ $l = r \cdot \sin \alpha$	
Момент імпульсу матеріальної точки L відносно центру осі	$\vec{L} = \vec{r} \cdot m\vec{v}$ $p = m \cdot v$ $L = r \cdot mv \cdot \sin \alpha = mv \cdot d$ $d = r \cdot \sin \alpha$	$p$ - імпульс; $m$ - маса матеріальної точки; $v$ - швидкість; обертання. $d$ - діаметр ротора.

Продовження таблиці 1.2

Момент імпульсу механічної системи, як векторна величина, що дорівнює геометричній сумі моментів імпульсу усіх матеріальних точок системи	$\vec{L} = \sum_{i=1}^n \vec{L}_i = \sum_{i=1}^n [\vec{r}_i \cdot m_i \vec{v}_i] = \sum_{i=1}^n [\vec{r}_i \cdot \vec{p}_i]$	$\vec{L}$ - момент імпульсу; $\vec{L}_i$ - момент імпульсу $i$ -го об'єкта; $\vec{r}_i$ - радіус-вектор; $m_i$ - маса; $\vec{v}_i$ - швидкість; $\vec{p}_i$ - імпульс; $i$ - тий об'єкт.
Основне рівняння динаміки обертального руху для матеріальної точки	$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} \cdot \vec{p} + \vec{r} \cdot \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{v} \cdot \vec{p} + \vec{r} \cdot \vec{F}$	$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ - швидкість матеріальної точки; $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ - сила, що діє на матеріальну точку; $\vec{r} \cdot \vec{F}$ - момент сили;
Момент інерції	$I = m \cdot r^2$ $I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n (m_i + \Delta m_i) \cdot r_i^2$ $I = \int dI = \int_0^L r^2 dm$	

Так, обертальний рух електричного двигуна створює поступальний рух технологічних конвеєрів, електричного транспорту, промислових верстатів, тощо. Математична модель обертальних та поступальних параметрів руху представлено в таблиці 1.2

Оцінка параметрів обертального руху здійснюється під час дії сили  $F$ , прикладеної до плеча радіусу перерізу валу. Результат такої дії може бути представлений обертальним моментом  $M$ , як добуток радіуса-вектора на силу, що прикладена до нього  $M = R \cdot F$  (Рис. 1.2):

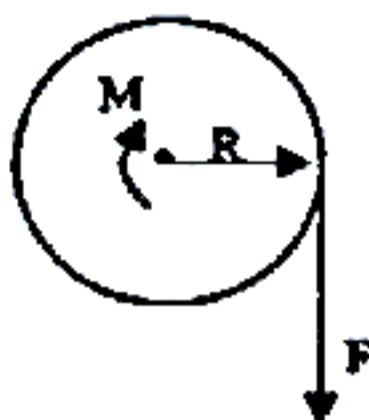


Рис. 1.2. Характеристика обертальних параметрів тіла, [24]

Таблиця 1.3, [25, 26, 27]

## Характеристики обертального та поступального руху

Поступальний рух			Обертальний рух		
Параметр	Позначення	Розмірність	Параметр	Позначення	Розмірність
Шлях	$S$	м	Кут повороту	$\varphi$	рад
Швидкість	$V = \frac{dS}{dt}$ ,	м/с	Кутова швидкість (частота обертання)	$\omega = \frac{d\phi}{dt}$ ,	рад/с; об/с
Прискорення	$a = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2}$ ,	м/с <sup>2</sup>	Кутове прискорення	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\phi}{dt^2}$ ,	рад/с <sup>2</sup> ; об/с <sup>2</sup>
Сила	$F$	Н	Момент	$M=mr$	Нм
Маса	$m$	кг	Момент інерції	$J=mr^2$	кг · м <sup>2</sup>

Розглядаючи найпростіший електродвигун постійного струму, де дія таких сил подвоюється. В залежності від дії електромагнітної індукції:

$M = 2 \frac{F}{2} R$ , (Рис. 1.3), можна спостерігати, як електричний двигун обертального

руху є джерелом обертального моменту.

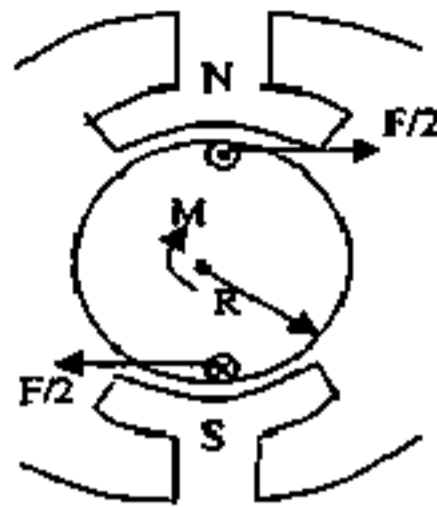


Рис.1.3. Формування обертального моменту електродвигуна, [25]

Обертальний момент, що розвивається електродвигуном, може бути позитивним - коли двигун працює в руховому режимі, перетворюючи електричну енергію на механічну, або негативним, гальмівним (-M), наприклад коли двигун працює в генераторному режимі, перетворюючи механічну енергію на електричну [28].

Відповідно до другого закону Ньютона прискорення передається тілам силами  $F$ . Тому, якщо тіло здійснює рух по колу з постійною  $V$ , на нього повинна діяти сила, спрямована до центру кола та рівна за величиною:

$$F = \frac{mv^2}{R} = mv^2 R = mv\omega, \quad (1.15)$$

Рух тіл механічних ланок, або кінематичного ланцюга робочої машини підпорядковується законам Ньютона, [29].

Щодо обертального руху перший закон Ньютона може бути сформульований наступним чином: тіло, що має фіксовану вісь обертання, перебуватиме в стані спокою, або рівномірного обертання доти, доки прикладені моменти не виведуть його з цього стану  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , якщо  $\sum_{i=1}^m M_i = 0$ .

Процес руху валу електродвигуна описується рівнянням рівноваги моментів:

$$\sum F = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt}, \quad (1.16)$$

$$\sum F = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt}, \quad (1.17)$$

де  $\sum F$  це сукупність статичних сил, які діють у електроприводі при поступальному русі;  $m$  – маса всіх елементів електроприводу, які здійснюють поступальний рух;  $v$  - лінійна швидкість рухомих мас електричного приводу;  $\sum M$  - це сукупність статичних моментів всіх частин електричного приводу, що здійснюють обертальний рух.

Так, бачимо, що рівняння, містять похідні від лінійної та кутової швидкості, а також від маси та моменту інерції.

$$\sum F = m \frac{dv}{dt} = ma, \quad (1.18)$$

$$\sum J = J \frac{d\omega}{dt} = JE, \quad (1.19)$$

де:  $a = \frac{dv}{dt}$  - прискорення поступального руху;  $E$  – прискорення при обертальному русі.

Електричний привід може працювати в динамічному та статичному режимах. У динамічному режимі швидкість обертання двигуна змінюється у часі. У статичному режимі  $v = \text{const}$ ,  $\omega = \text{const}$ . У статичному режимі динамічні моменти дорівнюватимуть нулю:  $\sum F = F - F_{\text{опору}}$ ,  $\sum M = M - M_{\text{опору}}$ , де  $F$  – рушійна сила електроприводу;  $F_{\text{опору}}$  - сила статичного опору;  $M$  – момент, що рухається, створюваний електричним двигуном;  $M_{\text{опору}}$  – момент опору, створюваний електричним приводом разом із виробничим механізмом.

Статичні характеристики електроприводу визначають характер руху робочого органу виробничого механізму та пов'язані з технологічним процесом.

Динамічні моменти діють лише у перехідних режимах, коли відбуваються зміни швидкості обертання – це режими прискорення електроприводу, уповільнення, регулювання швидкості та реверсування. Для динамічного

режиму можна записати основне рівняння руху електроприводу:

$$M - M_{опору} = J \frac{d\omega}{dt}. \text{ Тому, для визначення основних технічних характеристик}$$

електродвигуна, розраховується не лише його потужність, але й зміни навантаження на валу.

Для електричних двигунів вимірювання моментів сил проводять з урахуванням режимів їх роботи [23], (табл. 1.4). Загалом, основна увага приділено наступним режимам: номінальний режим – характеризується стандартним навантаженням на двигун; пусковий режим - сила обертання, що може розвивати електродвигун під час пуску; максимальний режим - граничне значення, після досягнення якого навантаження врівноважить двигун і зупинить його.

Таблиця 1.4

## Класифікація режимів роботи електродвигунів, [30],[34]

Найменування	Характеристика
1	2
S1 – Тривалий	Агрегат тривалий час працює від напруги мережі з незмінним навантаженням. Поступово розігрівається до робочої температури, а параметри роботи залишаються незмінними. Більшість загальнопромислових електродвигунів має саме такий режим роботи.
S2 – Короткочасний	При включенні в мережу агрегат досягає постійного навантаження протягом 10, 30, 60 або 90 хвилин. Часу недостатньо для досягнення максимального нагріву, а коли не працює, електромотор охолоджується до зовнішніх температур. Застосовується в пристроях, що подають робочі речовини, наприклад нафта, газ або воду.
S3 - Повторно-короткочасний	Електродвигун не досягає максимального нагріву, але на відміну від S2 при зупинці не охолоджується до зовнішньої температури. Застосовується для приводу у баштових кранах, в обладнанні для роботи ліфтів та ескалаторів.
S4 – режим S3 із частими пусками	Тривалість роботи та число пусків приблизно однакові, включень за годину: 30, 60, 120 та 240. Режим циклічний, пуск-робота-зупинка і так далі по колу.
S5 – Режим повторно – короткочасний з додаванням електричного гальмування	Наприкінці кожного циклу агрегат примусово зупиняється.

## Продовження таблиці 1.4.

1	2
S7 – Періодичний (навантаження короткочасне та гальмування в кінці)	Аналогічно S6 але додано гальмування електродвигуна в кінці кожного циклу.
S8 – Періодичний режим (навантаження короткочасне та змінюється зі змінами швидкості обертання механізму)	Відбуваються взаємопов'язані циклічні зміни навантаження електродвигуна та швидкості обертання його валу.
S9 – Особливий (періодичні зміни навантаження агрегату та частоти обертання)	Зміни відбуваються довільним чином. Допускається робота з навантаженням.

Дослідження перехідних характеристик зазначених режимів роботи мають широку наукову підтримку. Найбільш узагальнені результати представлено в таблиці 1.5, де визначено наступні режими роботи електродвигунів, зокрема: робота у сталому режимі; робота у короткочасному режимі та повторно короткочасному режимі.

Таблиця 1.5

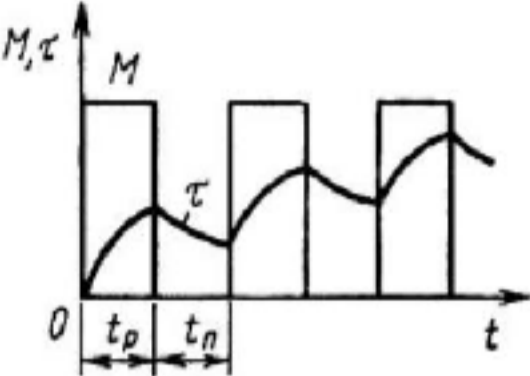
Перехідні характеристики основних режимів роботи електродвигунів,

[24]

Режим роботи	Перехідна характеристика	Визначення
1	2	3
Робота у сталому режимі		$\tau$ - температура нагрівання статора; M- обертальний момент;
Робота у короткочасному режимі		$t_k$ - час короткочасного навантаження;



## Продовження таблиці 1.5

1	2	3
Робота повторно короткочасному режимі		$t_p$ - час навантаження; $t_n$ - пауза

Розглянемо структуру моментів, що діють на вал електродвигуна. Беручи до уваги асинхронний двигун змінного струму, слід відзначити, що на ротор електродвигуна діють наступні моменти сил (таб. 1.6):

Таблиця 1.6

Дія моментів сил на ротор асинхронного електродвигуна, [33],[23],[11].

Назва параметру	Формула	Характеристики
1	2	3
$M$ – момент механічної потужності, що створюється електродвигуном	$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f S \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}$	$m_1$ - коефіцієнт корисної дії двигуна (ККД); $U_1^2$ - квадрат напруги живлення статора; $r_2'$ - опір обмотки ротора; $p$ - кількість пар полюсів ротора; $f$ - частота живлення статора; $S$ - коефіцієнт форми статора; $r_1$ - опір обмотки статора на одну фазу; $r_2'$ - реактивний опір обмотки ротора на одну фазу; $x_1$ - реактивний опір обмотки статора на одну фазу; $x_2'$ - опір реактивної складової обмотки ротора на одну фазу.

Продовження таблиці 1.6

1	2	3
$M_e$ – електромагнітний момент	$M_e = \frac{3U_1^2}{2\omega_0(r_1 - \sqrt{r_1^2 + x_k^2})}$	$M_e$ - електромагнітний момент, (Нм); $U_1$ - напруга живлення статора, (В); $\omega_0$ - кутова швидкість обертання струму відносно осі відліку, (рад/с); $r_1$ - активний опір статора, (Ом) $x_k$ - індуктивний опір статора, (Ом).
$M_{fric}$ – момент сил тертя у підшипниках та інших елементах кінематичного ланцюга електродвигуна. Момент тертя завжди перешкоджає руху. Його відмінність від реактивного моменту опору у тому, що $M_{fric}$ присутній і за швидкості, що дорівнює нулю. Більше того, $M_{fric}$ у стані спокою зазвичай значно перевищує момент тертя при русі	$M_{friction} = \mu Nr$	$M_{friction}$ - крутний момент сил тертя; $\mu$ - коефіцієнт тертя; $N$ - нормальне навантаження на поверхню; $r$ - радіус повороту.

Знаки всіх моментів визначаються щодо знака швидкості обертання: якщо момент сприяє руху – він позитивний, якщо перешкоджає – він негативний. Алгебраїчна сума всіх моментів визначає результуючий момент, що прикладається до валу електродвигуна.

У відповідності до другого закону Ньютона для обертального руху з урахуванням моменту інерції  $J$ , виразити обертальний момент можна наступним чином:

$$M = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.20)$$

де  $J$  – момент інерції, що тісно пов'язаний з динамікою обертального руху.

Розглядаючи види обертального руху слід відзначити рівномірне обертання при якому поворот ротора за рівні проміжки часу проходить на однакові кути, що свідчить про рівномірність переміщення. В такому випадку, кутове прискорення відсутнє:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega t, \quad (1.21)$$

де  $\omega t$  - кут повороту в будь-який момент часу,  $\varphi_0$  - початковий кут повороту.

Існує доцентрове прискорення, спрямоване по радіусу до центру кола.

$$a = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r, \quad (1.22)$$

При нерівномірному переміщенні постійне кутове прискорення набуває вигляду:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad (1.23)$$

При незмінному  $\varepsilon$ , закон зміни кутової швидкості має наступний вигляд:

$$\omega(t) = \omega_0 + \varepsilon t, \quad (1.24)$$

Підставляючи отримані дані у формулу руху при рівномірному обертанні отримаємо:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}, \quad (1.25)$$

кут повороту можна отримати через середню швидкість:

$$\varphi - \varphi_0 = \frac{\omega_0 + \omega}{2} t, \quad (1.26)$$

у таблиці 1.7 представлено основні вирази, які описують кутові характеристики обертального руху ротора електродвигуна.

Таблиця 1.7

Кутові характеристики обертального руху ротора електродвигуна

1	2
Лінійна швидкість	$v = \frac{2\pi R}{T}$ $v = \omega R$
Кутова швидкість	$\omega = \frac{2\pi}{T}$ $\omega = 2\pi n$
Прискорення	$a = \frac{v^2}{r}$ $a = \omega^2 r$
Рівномірне переміщення	$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega t$
Нерівномірне переміщення	$\omega(t) = \omega_0 + \varepsilon t$
Зміна кутової швидкості	$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$
Кути повороту	$\varphi - \varphi_0 = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$ $\varphi - \varphi_0 = \frac{\omega_0 + \omega}{2} t$ $\varphi - \varphi_0 = \frac{\omega^2 + \omega_0^2}{2\varepsilon} t$

Перехідним режимом електроприводу називають режим роботи при переході від одного стану до іншого, коли змінюються швидкість, момент, струм або інші параметри електродвигуна [31]. Причинами виникнення перехідних режимів в електроприводах є:

- зміна навантаження;
- вплив пускових та гальмівних моментів, зміна напрямку обертання та інші прикладені сили що діють на вал електродвигуна;
- порушення нормальних умов електропостачання
- зміна напруги та частоти струму в мережі, асиметрія фаз.

Знання перехідних режимів необхідне для вибору правильного режиму вимірювання обертальних параметрів, що в результаті дозволить визначити оптимальний вибір потужності двигуна, апаратури управління, витрати електроенергії, продуктивності машин, тощо.

Перехідні режими в електроприводі характеризуються механічними, електромагнітними та тепловими процесами, що діють взаємопов'язано.

Механічна частина електроприводу є складним кінематичним ланцюгом з великим числом рухомих елементів. Кожен із елементів має пружність, а також повітряні зазори. Якщо враховувати усі фактори, то математична модель рухомої частини електроприводу викличе величезні труднощі. Тому, у більшості практичних інженерних розрахунків, що не потребують абсолютної точності, можна знехтувати зазорами та пружними зв'язками, прийнявши механічні зв'язки як абсолютно жорсткі. При цьому припущенні рух одного елемента дає повну інформацію про рух решти. Так, рух електроприводу можна розглядати на якомусь одному механічному елементі. Зазвичай, таким елементом приймають вал електричного двигуна.

Розрахункову схему механічної частини приводу можна звести до однієї узагальненої жорсткої механічної ланки, що має еквівалентну масу з моментом інерції  $J$ , на яку впливає обертальний момент двигуна  $M$ , а також сумарний, приведений до валу двигуна, момент опору  $M_o$ , що включає всі механічні втрати у двигуна (рис. 1.4). Тоді рівняння руху електроприводу набуде наступного вигляду:

$$\pm M \mp M_o = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.27)$$

де  $J$ - момент інерції;  $M$  - момент сили;  $M_o$  - момент опору;

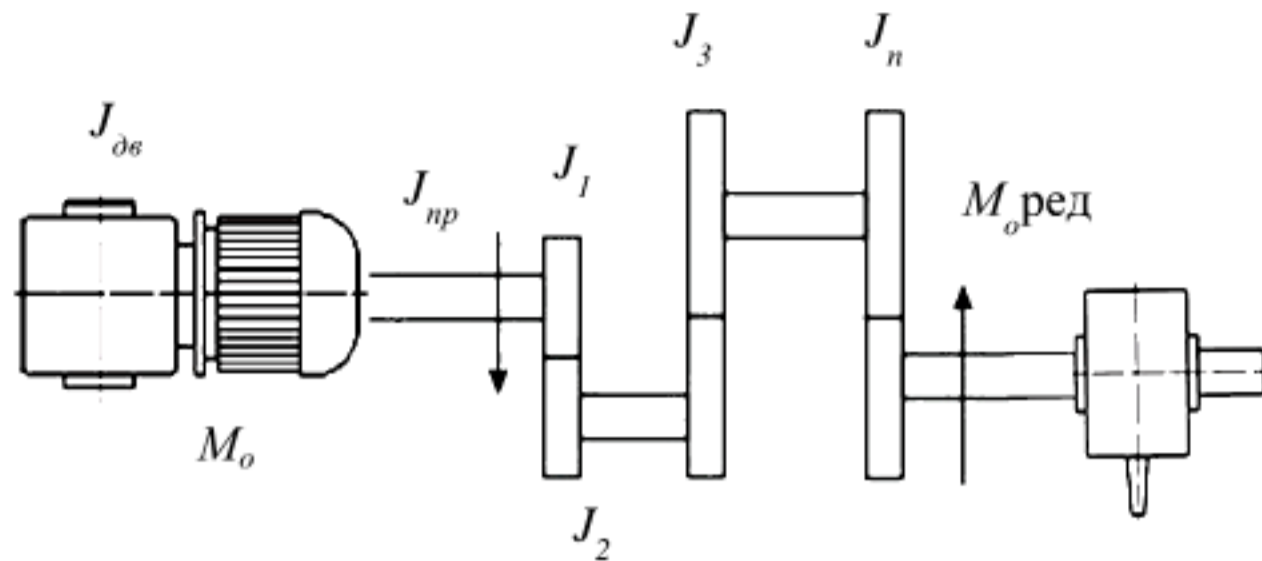


Рис. 1.4. Кінематична схема електропривода

Момент інерції може бути виражений як [32]:

$$J = m \cdot r^2 = \frac{GD^2}{4g}, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2, \quad (1.28)$$

де  $r$  та  $D$  - радіус та діаметр ротора, м;  $G$  - сила тяжіння, Н;  $g$  - прискорення вільного падіння -  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

Величина, що входить в рівняння (29), отримала назву махового моменту. Для електродвигунів значення махового моменту в числовому вираженні наводяться в каталогах електроустаткування [35].

З рівняння (28) видно, що при:

$$M > M_o \frac{d\omega}{dt} > 0, \text{ має місце прискорення приводу;}$$

$$M > M_o \frac{d\omega}{dt} < 0, \text{ електродвигун гальмує;}$$

$$M > M_o \frac{d\omega}{dt} = 0, \text{ електродвигун працює в сталому режимі;}$$

При визначенні наведеного моменту інерції  $J_{пр}$  (рис. 1.5) потрібно виходити із закону збереження енергії, тобто запас кінетичної енергії має залишатися постійним.

$$J_{пр} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} = J_о \cdot \frac{\omega_0^2}{2} + J_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{2} + m \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (1.29)$$

де  $J_\partial, J_{1,2}$  — момент інерції електродвигуна та окремих його вузлів;  $m$  - маса елементів, що рухаються поступально зі швидкістю  $v$ .

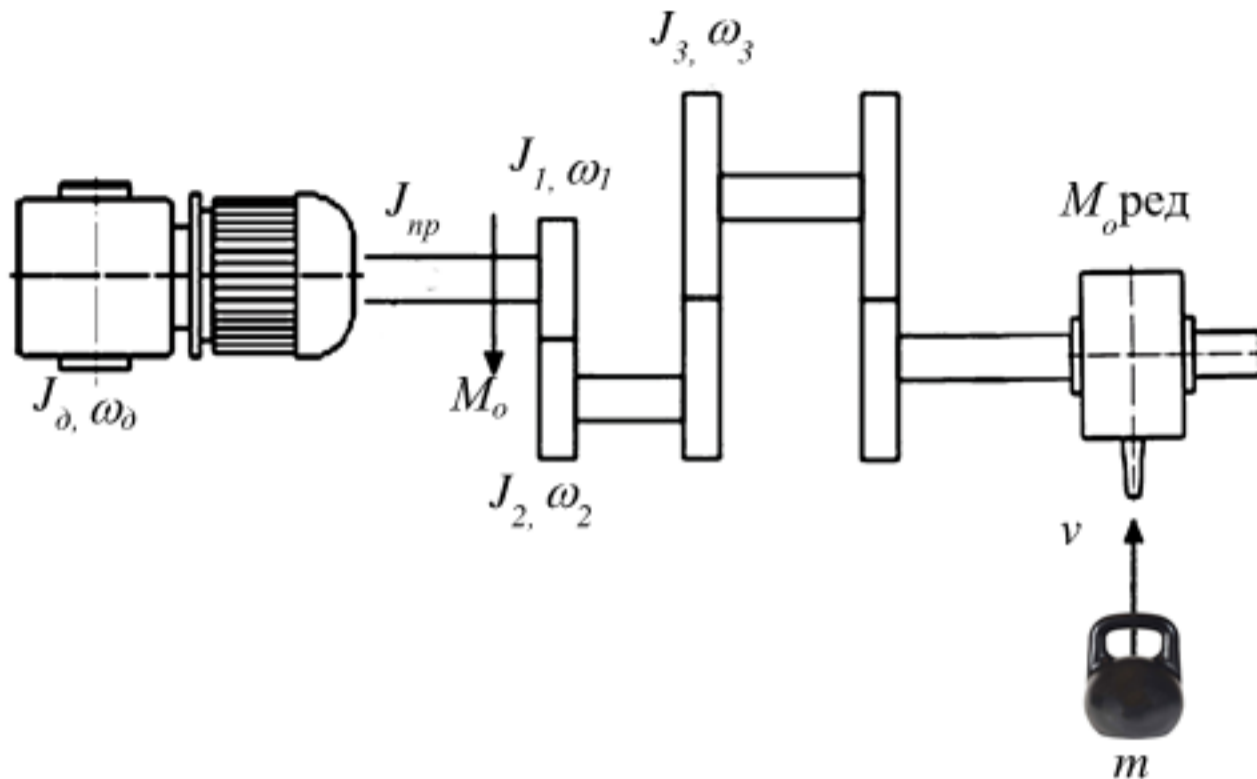


Рис. 1.5. Кінематична схема електропривода

Вирішив рівняння (1.29) відносно  $J_{np}$ , отримаємо:

$$J_{np} = J_\partial + J_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_\partial^2} + J_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{\omega_\partial^2} + m \cdot \frac{v^2}{\omega_\partial^2}, \quad (1.30)$$

$$J_{np} = J_\partial + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_2^2} + m \cdot \frac{v^2}{\omega_\partial^2}, \quad (1.31)$$

Виходячи із запропонованого рівняння, можна визначити:

- тривалість пуску чи гальмування;
- тривалість перехідних процесів від одного режиму до іншого в системі «двигун — машина»;
- моменти та сили, що діють в електропроводі, необхідні для визначення його потужності.

Так, момент інерції валу є сумою моментів інерції усіх матеріальних точок, та може бути виражений через масу тіла та його розміри. Значення моменту інерції для тіл обертання наводяться у каталогах та довідниках. Іноді в каталогах надається значення махового моменту, що пов'язаний простим

співвідношенням  $J = \frac{GD^2}{4}$ , де:  $GD^2$  – маховий момент ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ), ( $\text{кгс}\cdot\text{м}^2$ ), або ( $\text{т}\cdot\text{м}^2$ ).

Зважаючи на те, що механічна інерційність маси, що обертається, залежить не тільки від її величини, але і діаметра, то тіло при одній і тій же масі, що має більший діаметр, має значно більший момент інерції. Тому, малоінерційні електродвигуни прагнуть конструювати з меншим діаметром ротора більшої довжини. І навпаки, коли до складу кінематичного ланцюга робочої машини включається маховик, його доцільно конструювати з більшим діаметром.

Так, якщо момент інерції постійний, то:

$$M_{\Sigma} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.32)$$

де  $M_{\Sigma}$  - алгебраїчна сума моментів, що прикладаються до тіла обертання.

Вагому роль в процесі вимірювання обертальних моментів електродвигунів відіграє Третій закон Ньютона, [43], що характеризує моменти сил, з якими два тіла діють один на одного з протилежними напрямками дії. Саме він пояснює дію реактивних моментів опору руху. Наприклад, з якою силою різець впливає на оброблюваний метал. З такою ж силою, але протилежно спрямованою, метал впливає на різець, викликаючи появу на валу двигуна приводу різання реактивний моменту опору. Закон також пояснює наявність реакції опори. Саме виходячи із цього закону можна зробити висновок про необхідність кріплення двигуна до фундаменту оскільки під навантаженням сила яка викликана моментом опору валу буде, спрямована на обертальний рух статора.

Отже, параметри обертального руху валу електродвигунів є ключовими характеристиками, які відображають ефективність їх роботи, включаючи потужність. Швидкість, з якою обертається вал електродвигуна залежить від типу та потужності електродвигуна, а також від зовнішніх умов, таких як навантаження на електродвигун. Обертальний момент залежить від потужності



та типу електродвигуна, а також від швидкості обертання вала. Струм та напруга вказують на споживання електричної енергії електродвигуном та залежать від потужності електродвигуна та зовнішніх умов, таких як напруга живлення, механічні напруги, швидкість обертання, пускові моменти та інших перехідних характеристики. Температура вала залежить від навантаження на електродвигун, а також від ефективності системи охолодження. Коефіцієнт потужності характеризується, як відношення вихідної потужності електродвигуна до вхідної потужності.

Розглянуті в даному підрозділі принципи обертального руху валів електродвигунів будуть використані для подальшого дослідження засобів вимірювання обертальних моментів.

## **1.2. Проблеми вимірювання обертальних моментів електродвигунів**

Аналіз проблем вимірювання обертальних моментів електродвигунів дозволив дослідити основні їх види: статичний, квазістатичний та динамічний. Статичний момент вимірюють у відповідності до нерухомих конструкцій електродвигуна. Квазістатичний момент вимірюють в умовах постійної кутової швидкості та відсутності кутового прискорення. Динамічний момент включає прискорення.

Так, динамічна сила включає компонент, пов'язаний з прискоренням, а статична сила - ні. Зв'язок між динамічною силою та прискоренням описується другим законом Ньютона  $F = ma$  (сила дорівнює масі, помноженій на прискорення).

Вимірювання динамічних параметрів електродвигунів являє собою складну задачу, це пов'язано з наступними причинами:

Нерівномірність магнітного поля. Так, магнітне поле в електродвигуні може бути нерівномірним через нерівномірне розташування магнітів, нерівномірність обмоток котушок статора, різний опір провідників,

нерівномірну відстань між котушками обмоток статора, тощо. Це може призводити до неточностей у вимірюванні обертального моменту.

Дана проблема досліджувалась в роботі [33], де запропоновано мультифізичну модель вимірювання параметрів асинхронної електричної машини на основі кутового підходу, шляхом додавання взаємодії між незбалансованою магнітною тягою та радіальними зміщеннями центру ротора для посилення електромагнітно-механічних зв'язків.

Запропонована в роботі модель, створена шляхом додавання взаємодії між незбалансованим магнітним полем та радіальними зміщеннями центра ротора. Це дозволило розрахувати миттєву кутову швидкість валу з урахуванням негативних факторів впливу на процес вимірювання, таких, як вібрація, зміна температури, тощо. Досліджено вплив спотворення магнітного поля через ексцентричність ротора. В результаті було отримано кількісні характеристики впливу нерівномірного магнітного поля на результати вимірювання обертального моменту. Зважаючи на зазначені фактори впливу, слід звернути увагу саме на вплив вібрації на динаміку обертання ротора. Так, вібрація призводить не лише до зміни магнітного поля електродвигуна, а й до зміни його швидкості та температурних характеристик.

Вирішення проблеми впливу вібрації на отримання технічних характеристики роботи електродвигунів було досліджено в роботі [34], де розглядалися особливості буріння, в умовах значних обертальних моментів під час виникнення вібрації. В таких умовах вимірювання обертальних моментів потребує окремої фільтрації. Було запропоновано ряд датчиків, які дозволяють контролювати вібрації процесу. В результаті запропоновано нову сенсорну платформу, експериментальні результати моделювання даної платформи дозволили встановити окремі частотні спектри кручення та стиснення бурильної труби. В іншій праці [43] досліджується вплив різних властивостей моменту на перехідну динаміку системи валів та запропоновано спосіб гасіння вібрацій, що дозволило збільшити точність вимірювання обертального моменту. Найбільш вагомим фактором в даному питанні виступає точність

датчиків моменту, оскільки навіть дрібна похибка може привести до значної похибки в загальному результаті. Якщо датчик має низьку точність, це може призвести до заниження, або завищення вимірюваного значення обертового моменту. Наприклад, якщо датчик занижує вимірювання, можна пропустити виявлення незначної зміни в обертовому моменті, що може призвести до неправильних висновків щодо працездатності механізму. Якщо ж датчик завищує вимірювання, це може призвести до перевантаження механізму, що може спричинити його поломку.

Однією з праць, присвячених точності датчиків моменту, є стаття [35], де продемонстровано резонансний датчик моменту високої роздільної здатності на основі кварцового резонатора. Таких результатів вдалось досягти завдяки створенню експериментальної системи з мікроскопічним спостереженням і точним позиціонуванням.

Проблеми точності вимірювань технічних характеристик електродвигунів, розглядалися в роботі [36], де запропоновано спосіб виявлення впливу вібрацій на процес вимірювання моменту електродвигуна, шляхом вибору окремих параметрів. Процедура їх вибору залежить від різних параметрів. У даній статті описується вибір цих параметрів та обговорюються обчислювальні витрати.

Загалом, актуальність діагностики впливу вібрації на процес вимірювання моменту електродвигуна обумовила збільшення кількості публікацій за даною тематикою [37], [38], [25], [23]. Разом з тим, для покращення експлуатації силових енергетичних установок, визначення пружних зусиль валу займає одну з ключових позицій. Знання поточного значення моменту, разом з параметрами робочого процесу двигуна дозволяє уникнути перевантажень, як за потужністю, так і за іншими характеристиками.

Не менш важливою проблемою є зміна пружних властивостей валів, що зменшує періоди калібрування вимірювальних приладів. В частині безпосереднього вимірювання існуючі методики, такі як тензометричні, індуктивні та оптичні, частково вирішують проблему точності, проте

складність обладнання та значна його вартість, труднощі монтажу, а також високі вимоги до первинних вимірювальних перетворювачів вимагають нових оптимальних та дешевих рішень.

Так, наприклад тензометричний метод широко використовується в процесах вимірювання моменту, проте монтаж датчиків безпосередньо на валу здійснюється з допомогою клейового з'єднання, що виконується за досить складною багатоопераційною технологією, яка в свою чергу потребує суворого дотримання температурного режиму, а також значного часу, необхідного для полімеризації клею. Разом з тим, виконання цих умов не завжди можливо [37], [38]. Є й інші недоліки тензометричних сенсорів, зокрема незахищеність перед електромагнітним впливом, що створює перешкоди [39].

Застосування індуктивних сенсорів в приладах для вимірювання обертальних моментів електричних машин має переваги не лише в точності та чуттєвості, але й економічні переваги, через низьку вартість сенсорів та простоту в експлуатації. В роботі [40], розглядається проблема чутливості та точності індуктивних датчиків моменту, що дозволило запропонувати метод зменшення впливу дестабілізуючих факторів, з урахуванням впливу кількості витків обмотки, частоти напруги збудження, особливостей калібрування. Це є прикладом того, що їх застосування потребує підвищених вимог до обробки сигналу та оптимізації вимірювальних каналів. Створення на основі таких сенсорів вимірювальних систем може бути реалізовано на базі операційних підсилювачів, що дозволить отримати вихідний сигнал високої точності у вигляді напруги. Проте, вони потребують більш ретельної обробки сигналу у порівнянні із тензометричними, що створює ряд додаткових вимог до підсилювачів сигналу та його подальшої обробки.

Електричні ємнісні торсіометри, зважаючи на те, що вони є досить точними, за рахунок того, що працюють на основі зміни ємності конденсатора під дією моменту, який викликає зміну відстані між його електродами, суттєво залежні від зовнішніх електромагнітних хвиль та шумів. Це може призвести до збоїв у вимірюванні. Тому, для забезпечення стабільності вимірювання ємнісні

торсіометри зазвичай знаходяться в екранованих корпусах, або використовують спеціальні алгоритми фільтрації сигналу. Крім того, ємнісні торсіометри чутливі до змін температури та вологості, що також може впливати на точність вимірювання. Для зменшення впливу цих факторів, ємнісні торсіометри зазвичай знаходяться в спеціальних приміщеннях та використовують спеціальні компенсаційні методики. Іншим недоліком електричних ємнісних торсіометрів є те, що вони потребують додаткового електронного обладнання для обробки сигналу та перетворення його в вимірюваний крутний момент. Це збільшує складність та вартість приладу.

Оптичні датчики моменту, зважаючи на високу точність та незалежність від електромагнітних перешкод, мають високу чутливість до вібрацій та ударних навантажень. Це може призвести до пошкодження чутливих оптичних компонентів та зменшення точності вимірювання.

Крім того, оптичні датчики крутного моменту чутливі до зміни температури та вологості, що може впливати на точність вимірювання. Іншим недоліком оптичних датчиків крутного моменту є їх висока вартість та складність виготовлення та експлуатації. Вони мають складну оптичну систему та вимагають спеціального обладнання для їх калібрування та корекції. Крім того, вони можуть вимагати підтримки стабільної довжини хвилі та потужного джерела світла, що створює складності їх виготовлення та обслуговування.

Таким чином, переважна більшість проблем вимірювання обертальних моментів електродвигунів обумовлена впливом таких факторів як температура, вологість та інші.

Дослідження, які проводились для тензометричних приладів показали залежність від зазначених факторів. Для індуктивних сенсорів деякі фактори впливу не мають такого впливу, як для тензометричних, проте вимоги до застосування більш жорсткі, це пов'язано в першу чергу із особливостями вимірювальних каналів, що потребують забезпечення лінійності перетворення, [41], [42].

Отже, враховуючи кожен окремий розглянутий вище спосіб вимірювання обертальних моментів електродвигунів, можна зробити висновок, що точність вимірювання залежить не лише від приладу, а й від умов вимірювання та дестабілізуючих факторів (вібрація, електромагнітні хвилі, температура, тощо). Тому, для збільшення точності вимірювань потрібно збільшувати кількість інформаційних параметрів, проводити оптимізацію вимірювальних каналів, здійснювати фільтрацію шумів, застосовувати компенсаційні методи зменшення впливу дестабілізуючих факторів, збільшити частоту вимірювань та швидкості реакції перетворювача, використання мультиплексорних вимірювальних каналів, тощо. Зазначені напрями вдосконалень будуть розглянуті в наступних розділах.

### 1.3 Етапи розвитку засобів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів

Розвиток засобів вимірювання обертальних моментів бере свій початок ще з 1678 року. Цього року англійський вчений Роберт Гук описав пропорційну залежність між деформацією матеріалу та напругою матеріалу у відомому законі Гука [43] (рис. 1.6).

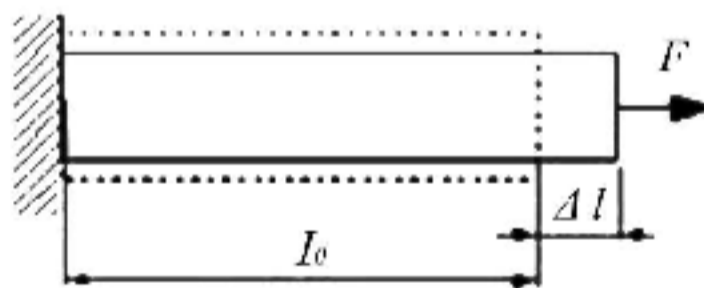


Рис. 1.6. Стискання стрижня під дією сили  $F$

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (1.33)$$

де  $E$  – модуль пружності.

Шляхи визначення залежності деформації роторних систем безпосередньо на валу, лягли основу вимірювання обертальних моментів електродвигунів, що дозволило вирішити велику кількість промислових, транспортних, військових, виробничих та сільськогосподарських задач. Так, залежність відстані між центром валу  $\rho$ , дотичною напругою валу  $\tau$ , та внутрішнім обертальним моментом  $T$ , може бути представлена наступним чином (рис. 1.7):

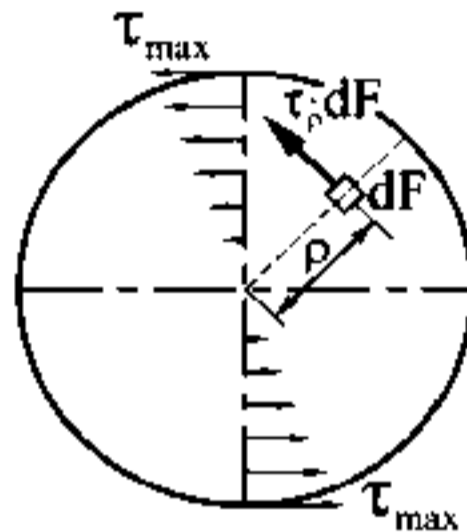


Рис. 1.7. Характеристики скручування валу

$$\tau_{\rho} = \frac{T}{I_{\rho}}, \quad (1.34)$$

де  $I_{\rho}$  - полярний момент інерції.

Дотичні напруження змінюються за лінійним законом та досягають максимального значення на контурі перерізу валу при  $\rho = \rho_{max}$ :

$$\tau_{max} = \frac{T}{W_{\rho}}, \quad (1.35)$$

де  $W_{\rho} = \frac{I_{\rho}}{\rho_{max}}$ , - полярний момент опору.

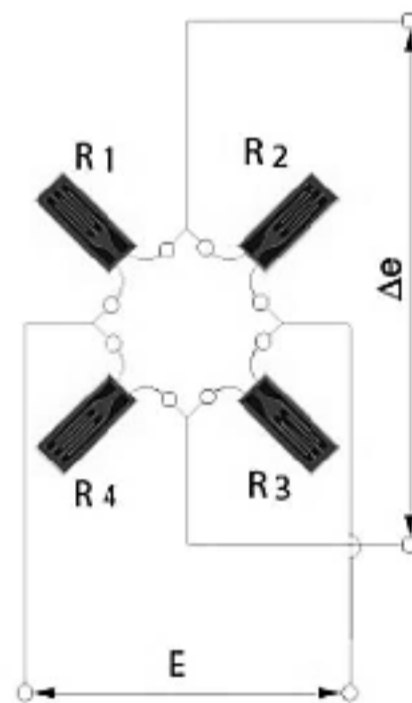
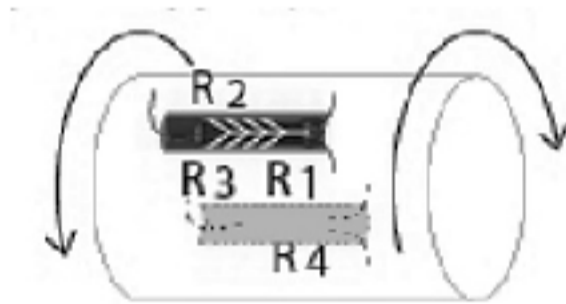
Сучасні вимоги до вимірювального обладнання постійно зростають та включають в себе ряд додаткових параметрів, які враховують дестабілізуючі фактори, що впливають на результат вимірювання. Тому, викликає інтерес до удосконалення методів збільшення точності управління обертальними

роторними системами. Це значною мірою спонукало до пошуку нових та вдосконалення вже існуючих методів вимірювання обертальних параметрів електричних роторних машин. Так, ще в 1833р. англійський вчений Хантер Крісті описав схему, за допомогою якої можна вимірювати найменші зміни напруги валу обертальної машини за допомогою тензометричної мостової схеми [44]. (Рис. 1.8).:

Принцип вимірювання

Мостова схема

Вихідний сигнал моста



$$\Delta e = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 - \Delta R_4}{R} =$$

$$= \frac{E}{4} \cdot K(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = E \cdot K \cdot \varepsilon,$$

де:

$E$  – напруга збудження;

$K$  – коефіцієнт тензочутливості тензорезистора;

$\varepsilon$  – деформація, викликана обертальним моментом;

Рис. 1.8. Схема тензорезисторного мосту, [45], [45]

Зважаючи на те, що дана схема широко застосовується в вимірювальних приладах, вона має і власні недоліки, зокрема залежність від електромагнітних перешкод, вплив механічних факторів, що в результаті вібрації та температурних перепадів з часом руйнує структуру поверхні вимірювального елемента.

Перші прилади для вимірювання обертальних моментів, що розташовані на валу були запропоновані у 1945 р. Вони були виконані у вигляді



кутовимірювальної машини, яка базувалася на індуктивних сенсорах, живлення яких було здійснено на частотах близько декілька сотень кГц, що дозволяло встановити залежність амплітуди змінного вимірювального сигналу та кута скручування датчика обертального моменту. Амплітуда мала ту саму частоту, як і напруга живлення.

Для живлення розташованої на валу вимірювальної системи і для передачі модульованого по амплітуді вимірювального сигналу, застосовувалися транслятори, побудовані за принципом трансформатора, що обертається. Одна обмотка трансформатора була закріплена на статорі, друга розташована на роторі. При передачі амплітудно-модульованого вимірювального сигналу через побудований за такою схемою транслятор, коефіцієнт передачі включається безпосередньо у вимірювальний сигнал.

Принцип дії таких перетворювачів можна бачити на схемі, показаній на рис. 1.9. У трьох перерізах пружного валу 1, що піддається скручуванню, закріплені три сталевих кільця 2-4 з зубцями, що утворюють між собою робочі зазори, якими проходить магнітний потік котушок 5 та 6. При скручуванні валу один із зазорів зменшується, інший збільшується, що викликає зменшення індуктивного опору однієї котушки і його збільшення для іншої.

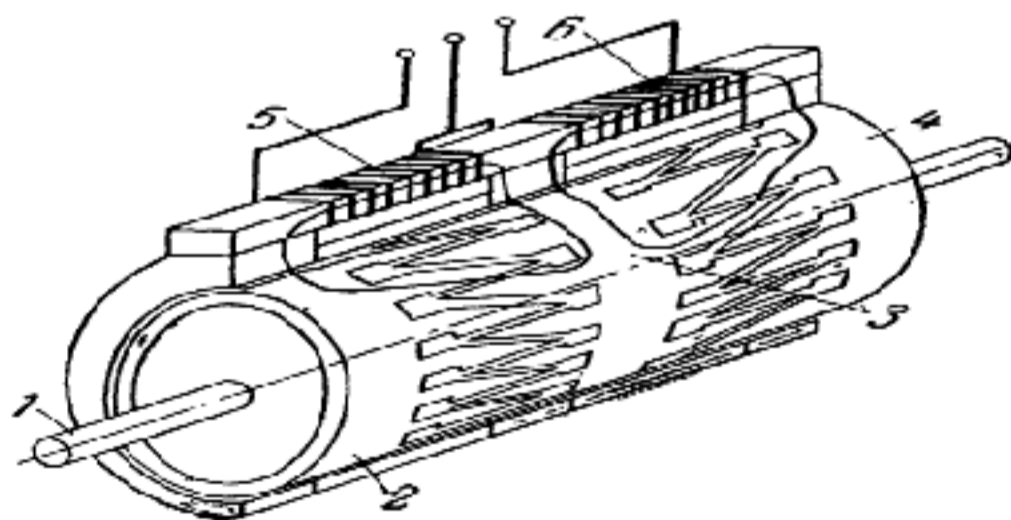


Рис. 1.9. Прилад для вимірювання обертального моменту індуктивного типу, [46].

Такі прилади через аксіальні та радіальні зсуви, ексцентричне обертання, зміни магнітних характеристик матеріалу та магнітних витоків мали значні

похибки вимірювань, тому вже у 1952 р. почали застосовувати методи передачі вимірювального сигналу тензорезисторного мосту, наклеєного на вал [44]. Передача живлення здійснюється за допомогою контактних кілець (Рис. 1.10 а; а,б,в,г,д).

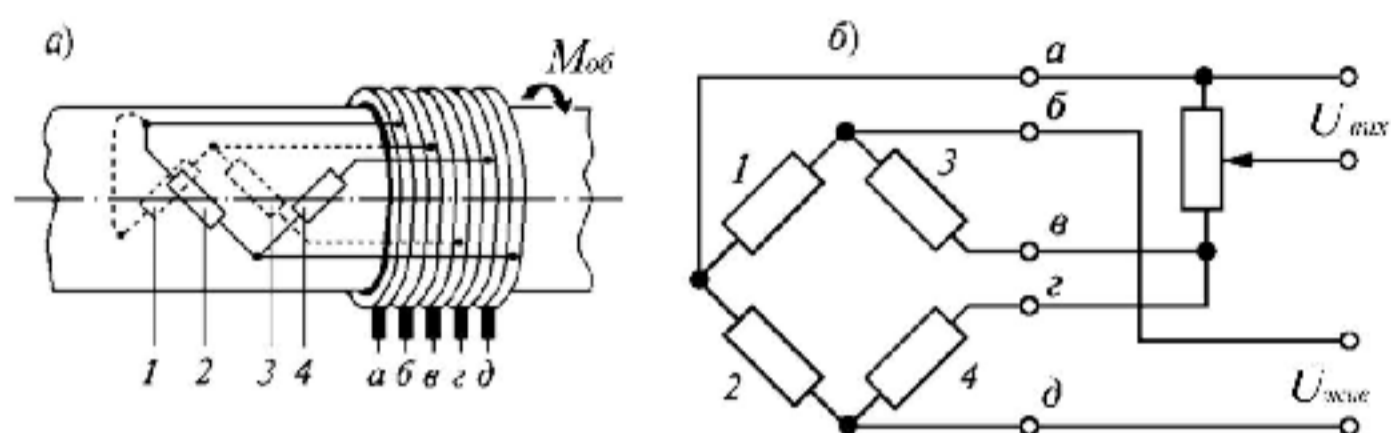


Рис. 1.10. Наклеєний на вал сенсор для вимірювання обертового моменту у вигляді тензорезисторного моста, [43].

Така конструкція також має ряд певних конструктивних особливостей, зокрема передача напруги, що живить міст та вихідної напруги через контактні кільця (а,б,в,г,д) потребує певної обережності. Контактні кільця мають бути ізольовані від валу. Найменші помилки в ізоляції можуть спричинити значні вимірювальні помилки. Сила натискання ковзного контакту повинна бути обрана так, щоб опір контакту був невеликим. Надійність контакту стосовно відривання внаслідок ексцентричності контактних кілець повинна бути достатньо високою. Не повинно бути допущено виникнення надмірного нагріву та зносу контактних пар кілець.

Особливі складнощі в таких конструкціях виникають при високих швидкостях обертання. Деякі датчики мають підйомні пристрої для щіток, які опускаються тільки для вимірювань. Загалом, недоліком даної технології є те, що контактні кільця та вугільні щітки з часом зношуються та потребують заміни.

Мінімізувати відповідні труднощі вдалось за допомогою розробки технології передачі сигналу, яка не вимагає технічного обслуговування і

забезпечує безконтактну передачу вимірювального сигналу з тензорезисторного мосту (рис. 1.11).

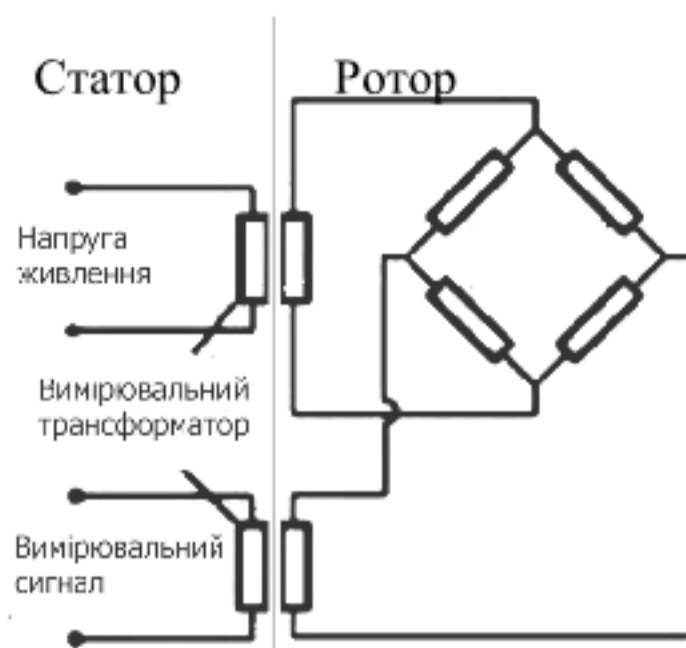


Рис. 1.11. Метод безконтактної передачі вимірювального сигналу, [43]

Завдяки живленню моста змінною напругою, на його виході створюється пропорційна обертальному моменту амплітудно-модульована змінна напруга. Як живлення тензометричного мосту, так і вимірювальний сигнал може передаватися завдяки трансформаторній передачі.

Такий механізм ліг в основу сучасних датчиків обертального моменту. Вже у 1972 р. стало можливим розмістити на валу, вимірювальний підсилювач, який служив для живлення тензорезисторного мосту та збільшення чутливості вимірювального сигналу [43]. Один трансформаторний транслятор слугував для живлення датчика, інший - для частотно-модульованої передачі вимірювального сигналу. У ті часи тензометрична техніка набула широкої популярності. Це пов'язано з тим, що компенсація негативного впливу дестабілізуючих факторів, таких, як наприклад, температурний вплив на пружність валу можлива безпосередньо в місцях вимірювання. Частина компенсаційних заходів проводиться в підсилювачі в підсилювачі. Крім того, датчики для вимірювання кута обертання мають ще одну проблему, яка полягає в тому, що для вимірювання обертального моменту, потрібно відносно великий кут скручування. Це, в свою чергу спонукає до використання м'яких торсіонних конструкцій, які дозволяють здійснювати лише повільні вимірювальні процеси.

З часом можливості передачі вимірювального сигналу призвели до зміни ринку датчиків обертальних моментів, вони почали постачатися з інтегрованими підсилювачами. Враховуючи розміри електроніки, що постійно зменшуються та покращуються можливості передачі вимірювального сигналу, поступово відбулась еволюція датчиків обертального моменту, де більша увага приділяється інтелектуальній складовій, яка вирішує проблеми невизначеності у вимірюваннях. Це реалізується за допомогою машинного навчання, нечіткої логіки, штучних нейронних мереж та інших засобів обчислювальних технологій. Якщо перші сенсори мали аналоговий вихідний сигнал, при якому неможливо виключити перешкоди, що виходять від сусідніх силових вузлів і приводів, особливо при протяжному підведенні та високій динаміці, то сучасні цифрові вимірювальні сенсори, які мають можливість генерувати сигнал безпосередньо на роторі, відразу оцифровуючи його.

Завдяки застосуванню мікропроцесорної техніки, такі дані, як серійний номер, калібрувальні значення, вимірювальний діапазон, дата калібрування та інші можуть бути збережені, як на роторі, так і на статорі і при необхідності можуть бути зчитані.

Як правило живлення сучасних сенсорів, реалізовано з використанням контрольованого процесором джерела. Таким чином, завдяки оцифровуванню вимірювального сигналу безпосередньо на місці його зняття та збереження, а також зчитування даних датчика, забезпечується висока експлуатаційна надійність вимірювального пристрою. На рис. 1.12 представлено приклад структурної схеми індуктивного приладу для вимірювання обертального моменту на базі мікропроцесора.

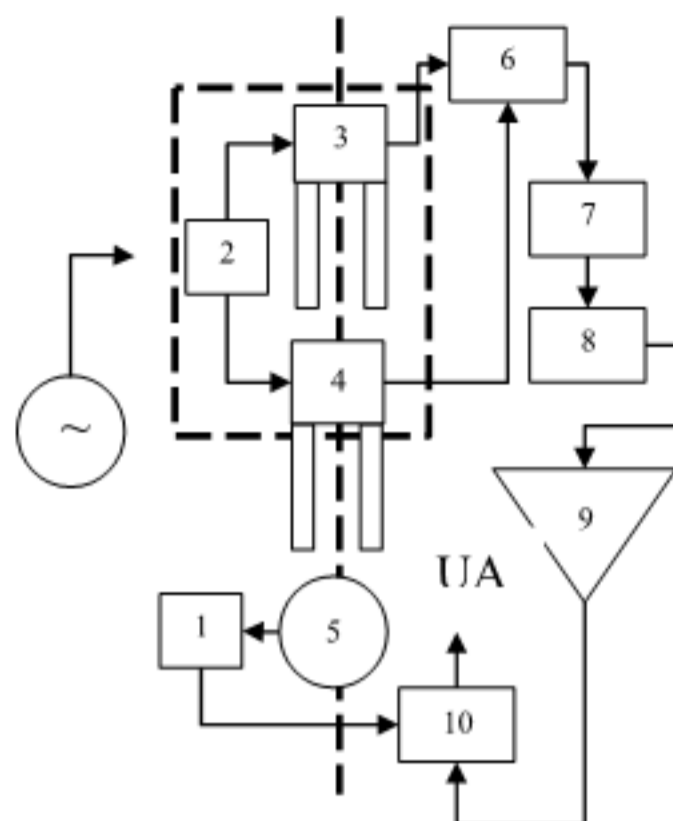


Рис. 1.12. Блок-схема цифрової передачі вимірювального сигналу

1 – накопичувач сигналу; ~ – генератор; 2, 3, 4 – котушки індуктивності; 5 – датчик кута повороту/частоти обертання; 6 – перетворювач; 7 – фільтр сигналів; 8 – підсилювач сигналу; 9 – АЦП; 10 – мікроконтролер.

У відповідності до рис. 1.12, змінний струм передається на котушку 2. Котушки 3, 4 реагують на зміну струму, яка виникає в результаті переміщення феромагнітного стержня між ними, що спричиняє відмінність струмів. Співвідношення, або різниця цих сигналів використовується для розрахунку абсолютного положення стержня. Так, за допомогою котушок індуктивності 3, 4 диференціального трансформатора LVDT (Linear Variable Differential Transformer), він передається до перетворювача 6. Схематично принцип дії індуктивного LVDT перетворювача представлено на рис. 1.13.

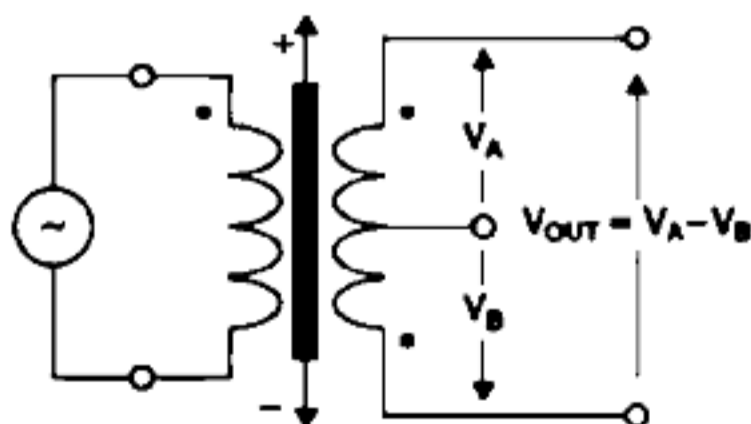


Рис. 1.13. Принцип індуктивного датчика перетворювача на трансформаторі

Основні переваги датчиків з LVDT: простота конструкції первинного та електронного перетворювачів, висока роздільна здатність, лінійність та відтворюваність, широкий діапазон робочих температур, відсутність рухомих електричних контактів і, як наслідок, довговічність.

Загалом, застосування вимірювальних перетворювачів обертальних моментів з цифровими вихідними сигналами первинних вимірювальних сенсорів значно збільшила сферу їх застосування. Так, широкого застосування вимірювальних перетворювачів обертальних моментів було набуто майже усіма ключовими сферами народного господарства, освіти та промисловості.

В сучасних умовах область застосування приладів для вимірювання обертальних моментів дуже широка, від перевірки ручних інструментів до вимірювання параметрів складних обертальних механізмів. Можливості обчислювальної техніки дозволяють, отримати дані навантажень в динаміці і таким чином, отримати відомості про правильність функціонування електродвигунів. За допомогою динамічного навантаження можна отримати інформацію про якість регулювання приводів, реакцію на збільшення навантаження, окремі перехідні характеристики, пусковий момент, тощо.

Разом з тим, оптимізація промислового виробництва потребує збільшення точності вимірювальних приладів, а також їх швидкодії. Тому, на сьогоднішній день, значну увагу приділено інтелектуальним способам вимірювання обертальних моментів, які поєднують в собі декілька інформативних параметрів, наприклад вимірювання моменту сили, напруги та струму, або кута повороту [32].

Попри те, що існують різні способи вимірювання обертального моменту, які відрізняються своєю точністю, гнучкістю, універсальністю, умовами використання та багатьма іншими параметрами, кожен із зазначених має як свої переваги так і недоліки, що пов'язані з багатьма факторами впливу на процес вимірювання. Наприклад вплив температури що має вплив на пружність втулки, в свою чергу впливає на лінійність вимірювальних перетворювачів та вимагає

вирішення проблеми шляхом вибору оптимальних алгоритмів корекції похибки. Вібродоформація елементів ротора, вимагає створення ефективних фільтрів в залежності від частоти обертання та навантаження на вал, щ також вимагає інтелектуальних засобів обробки отриманого сигналу. Електромагнітні перешкоди, що впливають, як на первинний вимірювальних сенсор, а також на вихідних сигнал також мають бути усунені, або нівельовані шляхом вибору стійких первинних засобів вимірювання до таких перешкод.

Існують труднощі, викликані малим ресурсом роботи розміщених на роторі елементів вимірювальних каналів через високі температури та механічні навантаження, у тому числі проблеми пов'язані із необхідністю забезпечення передачі інформації з ротора, використовуючи при цьому різні струмознімальні телеметричні системи. При цьому слід забезпечувати вимірювання десятків, а в деяких випадках сотні параметрів, у тому числі динамічних, у широкому частотному діапазоні з урахуванням додаткових шумів, що спотворюють вихідний вимірювальний сигнал.

Для вирішення викладених вище проблем постійно проводяться пошукові дослідження, присвячені розробці нових засобів вимірювання, у тому числі побудованих на нових фізичних принципах, застосування яких дозволило б спростити вимірювання параметрів ротора електродвигуна, особливо його високотемпературних та віброзалежних елементів. Для вирішення цієї проблеми, мають бути побудовані вимірювальні системи, засновані на дистанційному, бездротовому вимірюванні електричних характеристик пристроїв, застосуванні адаптивних інтелектуальних вимірювальних систем, на основі нейронних мереж, методів машинного навчання та нечіткої логіки, вдосконалених методах математичної обробки вхідних параметрів, оптимізації обчислювальних операцій, застосуванні більшої кількості інформативних параметрів, нових методах перетворення, а також нових вимірювальних елементах.

#### **1.4. Класифікація приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів**

Основними задачами, які стоять перед виробниками приладів для вимірювання обертальних моментів є:

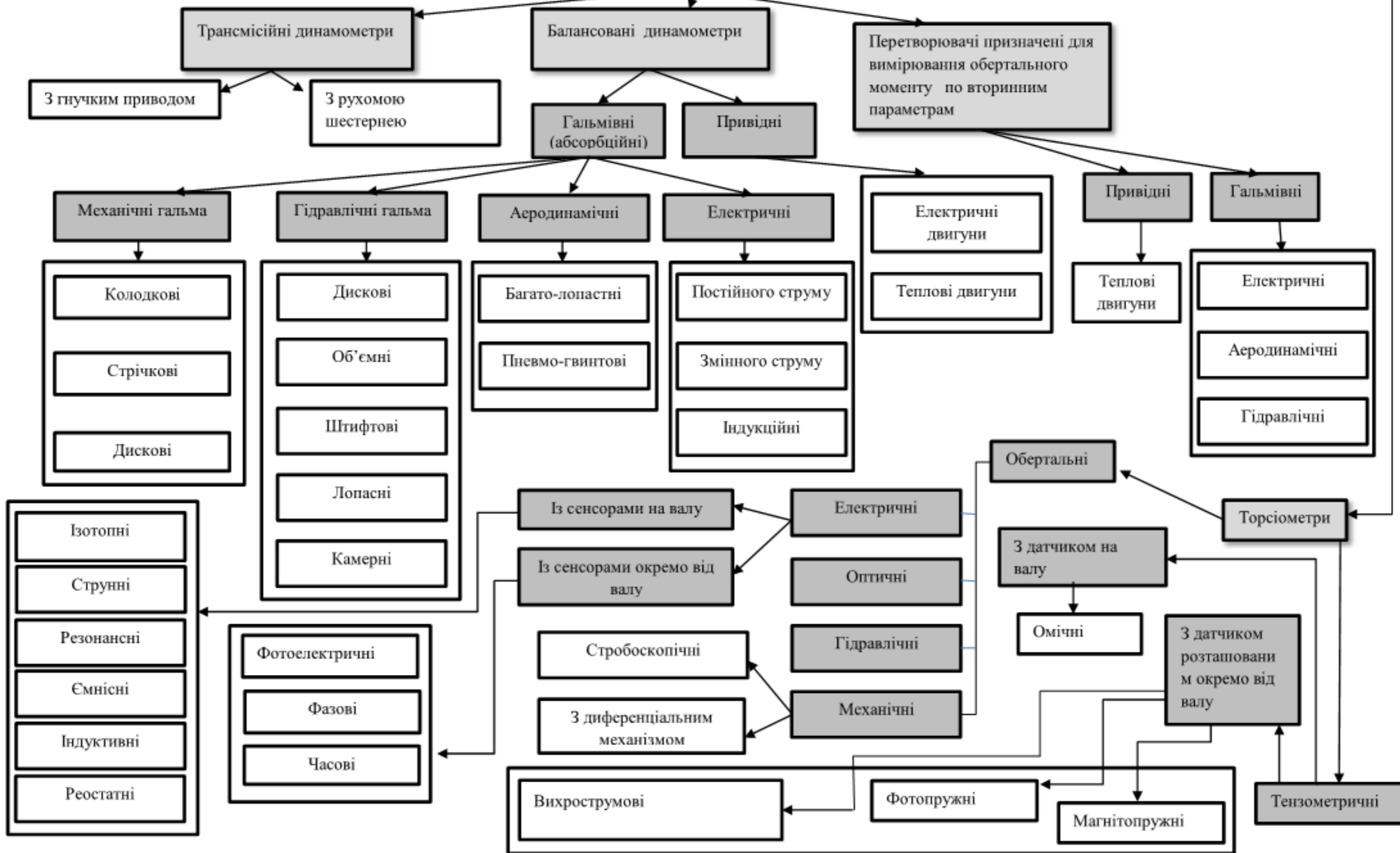
- висока точність визначення моменту;
- можливості випробовування у швидкісних та високошвидкісних приводах;
- моніторинг в режимі реального часу з мінімальним обслуговуванням у польових чи виробничих умовах експлуатації;
- інтеграція вимірювального вузла у вже існуючі установки та приводи;
- використання вимірювального вузла в мінімальні та настановні габарити.

Усі ці задачі можуть бути реалізовані різними типами приладів в залежності від їх класифікації, метрологічних характеристик та призначення. Тому, даний підрозділ присвячений дослідженням характеристик засобів для вимірювання обертальних моментів в залежності від їх класифікаційних ознак та метрологічних характеристик.

Їх класифікацію представлено на рис. 1.14, [47], [48], [49] переважна більшість яких встановлюється безпосередньо на вал, або в розріз валу та навантаженого приводу.



Рис. 1.14 Пристрої для вимірювання обертального



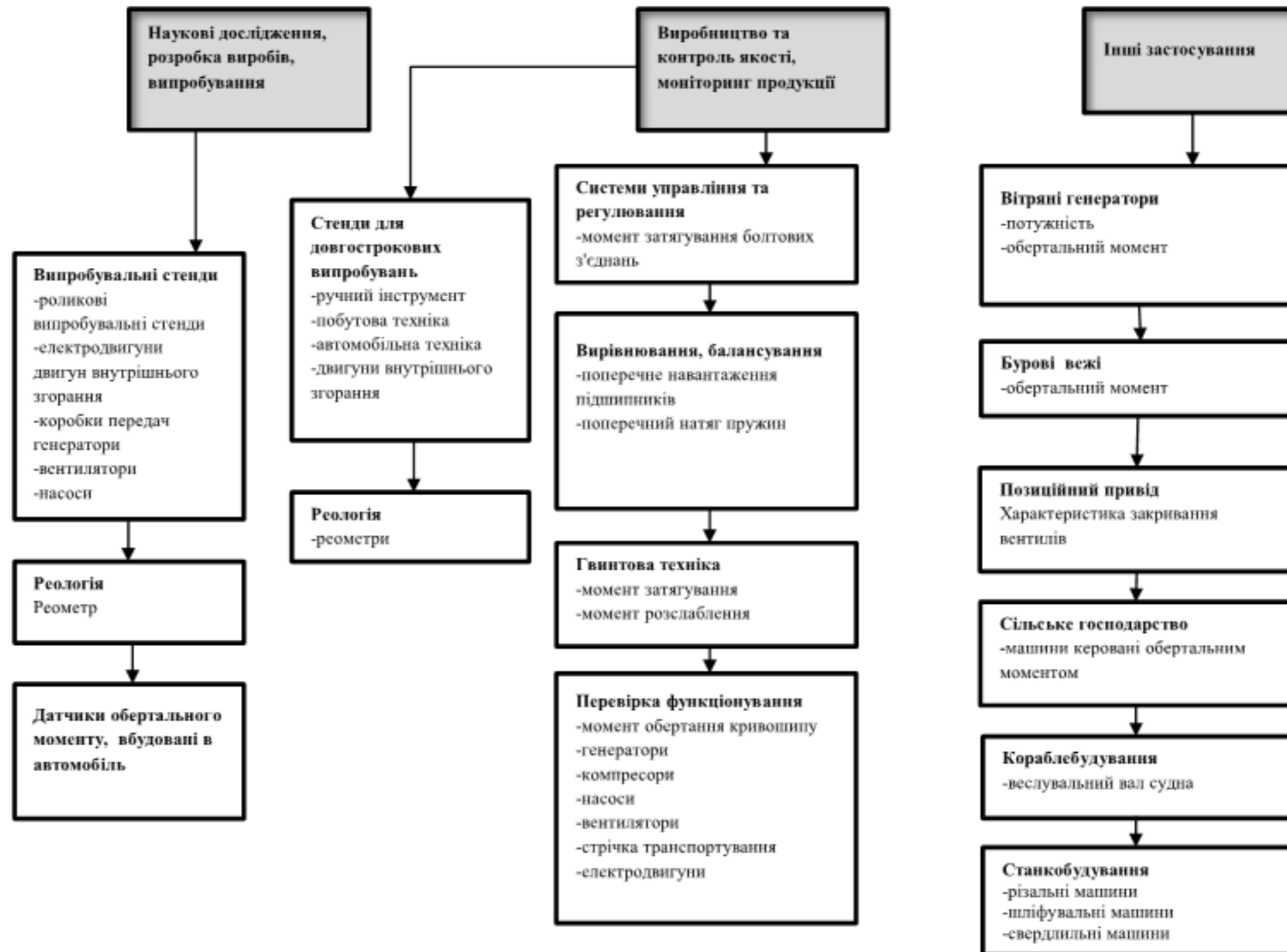


Рис. 1.15. Сфера застосування приладів для вимірювання обертових моментів

В залежності від класифікаційних ознак та метрологічних характеристик, їх застосовують в наступних галузях господарства (див. рис. 1.15), де існують різні вимоги до точності, а також стійкості до дестабілізуючих факторів впливу.

Останнім часом підвищується попит на прилади, що працюють на швидкостях обертання до 60 000 об/хв, що значною мірою ускладнює процеси вимірювання, оскільки при таких обертах збільшуються вібрації, змінюються температурні показники, відцентрова сила спотворює показники первинних вимірювальних сенсорів, під час вимірювання безпосередньо на валу. Тому слід виділити окремий тип вимірювальних приладів, які зменшують вплив зазначених дестабілізуючих факторів. Наприклад індуктивні датчики від світового виробника Magtrol, серії ТМ мають технологію вимірювання обертового моменту, що дозволяє забезпечувати не тільки високу точність вимірювань, але й дозволяє їм працювати з частотами до 60 000 об/хв. Вимірювальна система таких сенсорів працює за принципом диференціального трансформатора [50] і заснована на пропорційності обертового моменту, що виникає в результаті деформації індуктивності. Як правило складається з двох концентричних циліндрів, розташованих на валу з двох сторін області концентрацій деформації валу, та двох концентричних котушок статора, прикріплених до корпусу (рис. 16).

Кожен циліндр має розташований по колу ряд пазів і обертається разом із валом усередині котушки. Змінний струм із частотою до 20 кГц протікає через первинну обмотку. Коли обертовий момент відсутній, пази на двох циліндрах не суміщені. За наявності моменту, деформаційна зона піддається кутовій деформації і пази починають перекривати один одного. Таким чином, у вторинній обмотці виникає напруга, пропорційна моменту.

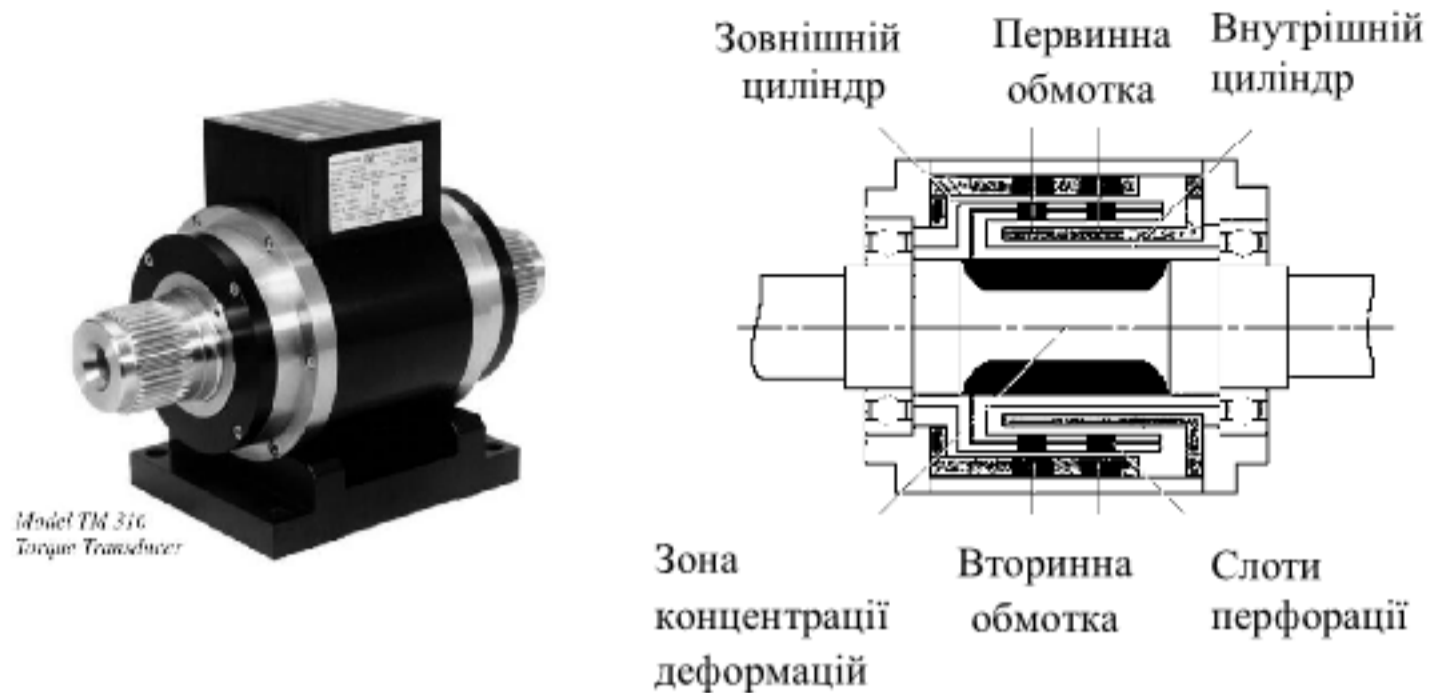


Рис. 1.16. Елементи конструкції приладу для вимірювання обертового моменту серії ТМ, [51]

Процес вимірювання побудов на основі визначення кута скручування торсійного валу, який відповідно до закону Гука, пропорційний переданому обертовому моменту [28], ґрунтується на тому, що при передачі моменту вал деформується. Кут обертання валу можна описати наступним співвідношенням:

$$\phi = \frac{M_{об} \cdot l}{G \cdot J_p}, \quad (1.36)$$

Де  $M_{об}$  - обертовий момент;  $l$  - довжина валу;  $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$ , - полярний момент опору перерізу валу,  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ , - модуль пружності при зрушенні валу.

Електроніка, вбудована в датчик, перетворює момент, в напругу від 0 до  $\pm 5$ В. Фільтр високих частот налаштовується від 5 кГц до 1 Гц, що дає змогу регулювати частотний діапазон корисного сигналу та відсікати небажані сигнали високої частоти. Оптичний сенсор зчитує швидкість із зубчастої частини механізму передаючи дані до вимірювальної системи.

Формуюча електроніка видає частотний сигнал, пропорційний швидкості обертання валу. Метрологічні характеристики даного типу приладів представлені в табл. 1.8.

Таблиця 1.8.

Метрологічні характеристики приладів для вимірювання обертальних моментів серії ТМ від виробника Magtrol, [52]

Вимірювання моменту	
1	2
Номинальний крутний момент (RT)	від 0 до $\pm 100\%$
Допустиме навантаження (макс, пікове значення моменту в динаміці без зміни властивостей)	от 0 до $\pm 200\%$
Граничне навантаження (максимальне значення моменту в динаміці до руйнування)	от 0 до $\pm 500\%$
Загальна помилка лінеаризації та гістерезису при 100% RT	$< \pm 0.1\% RT$ (0.2% для ТМ 301)
Загальна помилка лінеаризації та гістерезису від 100% до 200% RT	$< \pm 0.1\%$ от вим, величини (0.2% для ТМ 301)
Температурний вплив на чутливість: в діапазоні від +10 до +60 °С в діапазоні від -25 до +80 °С	$< \pm 0.1\% < \pm 0.2\%$ RT/10K RT/10K
Вплив швидкості на нульовий сигнал датчика	$< \pm 0.01\% RT/1000$ об/хв
Довготривала стабільність сигналу чутливості	$< \pm 0.05\% RT/год$
Вимірювання швидкості в залежності від моделі	
Номинальний діапазон	303: от 1-40 000 304-308: от 1 до 50 000 об/хв
Число зубів	60
Мінімальна швидкість, що реєструється	1 об /хв
Режими роботи	от - 40 °С до +100 °С
Допустима температура зберігання	от - 40 °С до +85 °С

Так, фактично вимірювання обертального моменту, зводиться до вимірювання кута скручування валу. Зазвичай вали проектуються досить жорсткими і кути скручування незначні, тому вимірювання таких малих деформацій є складним технічним завданням. Крім того, додаткова складність полягає в тому, що вимірювати необхідно деформацію валу, а інформація про неї повинна бути передана на апаратуру, встановлену на

нерухомому корпусі приладу, що вимагає безконтактного способу передачі сигналу, на який в свою чергу впливають електромагнітні перешкоди.

Основні групи приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів, а також принципи вимірювання, які застосовуються для кожної із таких груп представлено на рис. 1.17.

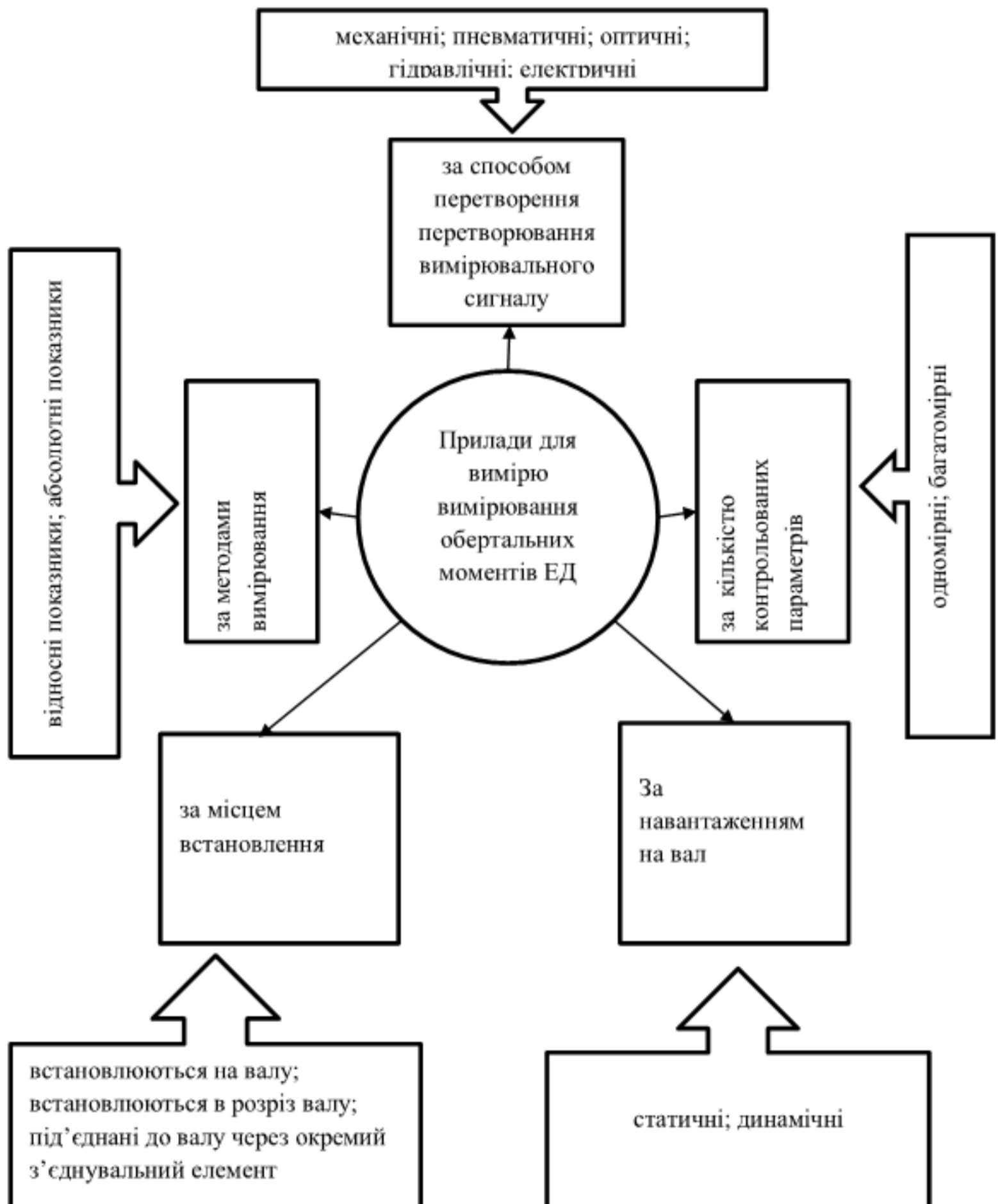


Рис. 1.17. Класифікація приладів для вимірювання обертального моменту за структурними особливостями

Розглядаючи кожну групу слід звернутися до прикладних досліджень вітчизняних та закордонних вчених [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62].

Відомо, за способом перетворення перетворювання вимірювального сигналу можна виділити такі класифікаційні ознаки вимірювальних приладів: механічні; пневматичні; оптичні; гідравлічні; електричні. Кожні з них мають як переваги, так і недоліки.

За кількістю контрольованих параметрів слід виділити одномірні та багатомірні засоби вимірювання.

За місцем встановлення характеризуються прилади: які встановлюються на валу; прилади які встановлюються врозріз валу ЕД; та прилади які під'єднані до валу через окремий з'єднувальний елемент.

За методами вимірювання можна виділити прилади, які дають абсолютні результати вимірювання і такі, що характеризують результат відносними показниками.

За навантаженням на вал можна виділити статичні прилади для вимірювання обертального моменту, тобто ті, які вимірюють виключно максимальний момент сили, а також динамічні, що проводять вимірювання під час обертання, безпосередньо на валу ЕД.

До найбільш розповсюджених вимірюваних перетворювачів можна віднести наступні:

Вимірювальні перетворювачі, що використовують ємність [63], [145] працюють за принципом конденсатора та мають назву ємнісний торсіометр (рис. 1.18).

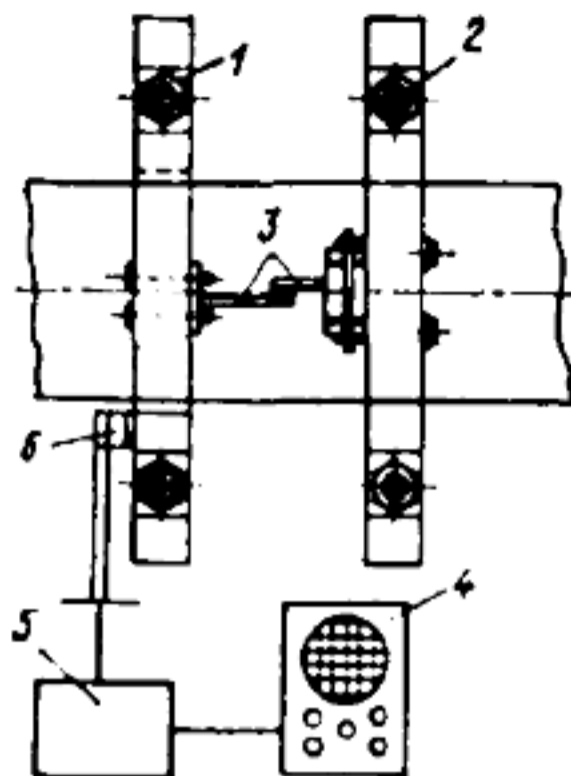


Рис. 1.18. Принципова схема електричного ємнісного торсіометра, [54]

Алгоритм вимірювання має наступні характеристики. На валу на відстані 100-150 мм закріплюють дві роз'ємні шайби 1 і 2. Пластинки 3 утворюють конденсатор змінної ємності з повітряним прошарком. Під час роботи двигуна відбувається відносне скручування на кут  $\varphi$  двох перерізів валопроводу, що відповідають місцям закріплення шайб. Внаслідок цього змінюється проміжок між пластинками 3, що викликає зміну ємності конденсатора. Зміна ємності через струмознімач 6 і підсилювач 5 фіксується осцилографом 4, шкала якого градується в одиницях, пропорційних обертальному моменту.

Електрична ємність конденсатора, утвореного паралельними пластинами 3, визначається за формулою:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r (n-1) \left( \frac{A}{d} \right), \quad (1.37)$$

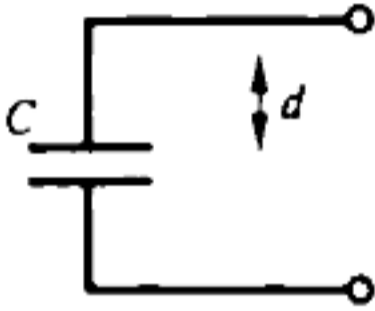

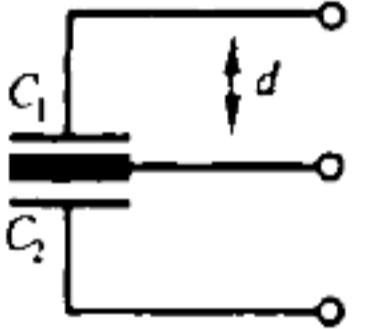
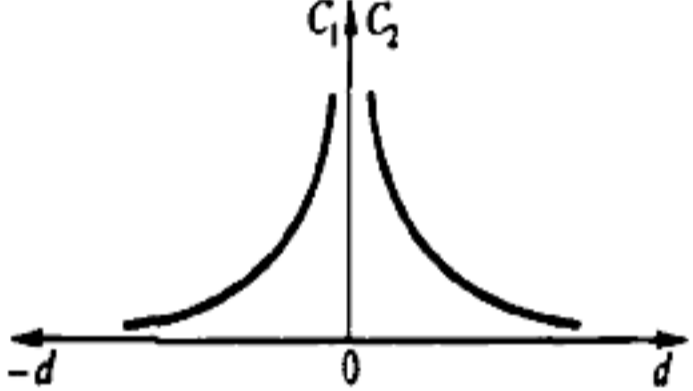
де  $n$  - число пластин;  $A$  - площа однієї сторони пластини;  $d$  - товщина діелектрика, розташованого між пластинами;  $\varepsilon_0$  - відносна діелектрична проникність цього діелектрика;  $\varepsilon_r$  - діелектрична проникність вакууму.



У таблицю 1.9 зведено основні методи вимірювань в залежності від відстані між пластинами.

Таблиця 1.9

Зміна ємності конденсатора в залежності від відстані між його пластинами

Спосіб вимірювання в залежності від відстані між пластинами конденсатора	Статична характеристика перетворення	Характеристика зміни ємності
		<p>Показує <math>C = C(d)</math>. Представляє собою обернено пропорційну (гіперболічну) залежність.</p>
		<p>Показує залежність <math>C_1 = C_1(d)</math> та <math>C_2 = C_2(d)</math>, де <math>C_1, C_2</math> - відповідно електричні ємності конденсаторів, що лежать вище і нижче середньої металевої пластини.</p>

Розроблено автором на основі джерела, [64]

Загалом, ємнісні перетворювачі можуть бути використані, як для статичних, так і для динамічних вимірювань обертального моменту. Проте, враховуючи їх чутливість до температурних коливань, та зміни вологості, в промисловості вони застосовуються не часто. Тому, їх в основному застосовують у стаціонарних умовах для стендових досліджень і прецизійних вимірювань фізичних величин.

Більш практичними є тензометричні перетворювачі та індуктивні.

Так, індуктивні перетворювачі використовують кількісні характеристики електромагнітної індукції, що пропорційні прикладеному моменту сили, яка крутить вал ЕД [65]. Таким чином, коли до первинної обмотки прикладена напруга і на валу датчика є момент сили, у вторинній обмотці виникає напруга, величина якої пропорційна моменту сили. В свою чергу вбудована електроніка перетворює сигнал з обмотки в напругу.

Такі прилади поділяють на індукційні фазо-чутливі торсіометри та індукційні магніто-пружні торсіометри. Перші дозволяють оцінити обертальний момент по куту скручування валу (рис. 1.19).

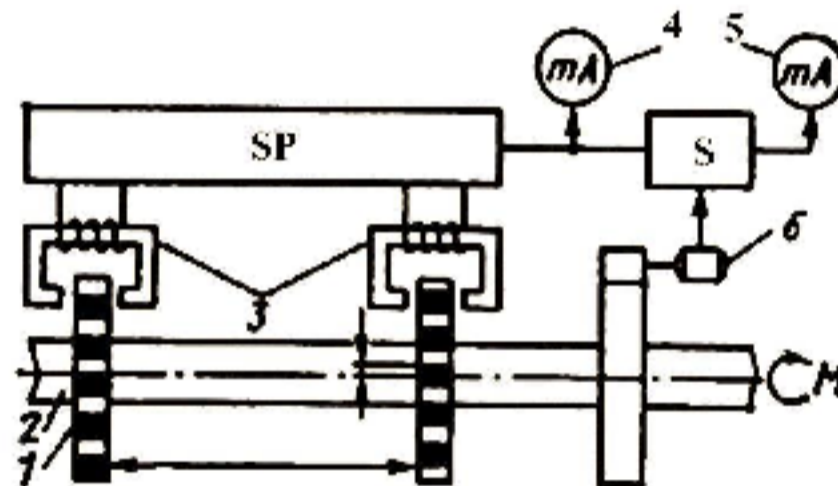


Рис. 1.19. Схема індукційного фазочутливого перетворювача обертального моменту, [34]

Для цього на валу 2 жорстко кріпляться зубчасті диски 1 з феромагнітного матеріалу. Зубці дисків з зазором рухаються в пазах нерухомо закріплених індукційних датчиків 3 у вигляді П-подібних сердечників з обмотками. По обмоткам тече змінний струм. Магнітний потік сердечників замикається через зубці дисків. В такому випадку, якщо вал нерухомий, фази напруг на виході датчиків збігаються. При обертанні під навантаженням вал скручується і зубці дисків зміщуються порушуючи синхронність замикання магнітних потоків датчиків. Це призводить до різниці фаз сигналів, що надходять від датчиків на вхід сенсору чутливого до фаз (SP). Пропорційно обертальному моменту вала на виході SP формується аналоговий сигнал, що надходить на прилад 4, шкала якого градуйована в

одиницях обертального моменту. Нульове значення обертального моменту встановлюється коли вал не має навантаження та відповідно індуктивні сенсори 3 мають взаємне переміщення по колу дисків 1.

В системах автоматичного управління потужність можна вимірювати безперервно. У цьому випадку вихідні сигнали від SP та від тахогенератора 6 надходять на вхід лічильного блоку (S). Згідно з отриманими даними, S розраховує і видає сигнал, пропорційний потужності, що передається валом на індикаторний пристрій 5.

Наступний вид сенсорів даного типу відноситься до магніто - пружних торсіометрів (рис. 1.20).

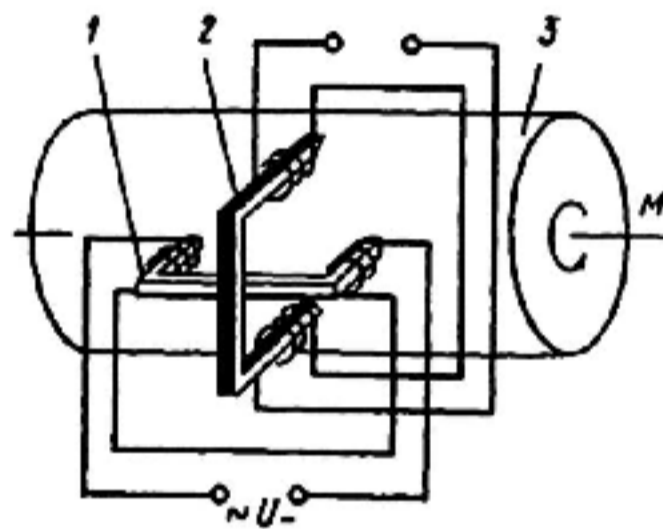


Рис. 1.20. Схема магнітопружного торсіометру, [35]

Принцип їх дії ґрунтується на зміні магнітної проникності металу валу при деформації [66]. Котушки індуктивності розташовані на взаємно перпендикулярних П - подібних сердечниках 1 і 2, нерухомо закріплених у поверхні валу 3 з певним повітряним зазором. Через пару котушок сердечника 1 пропускають змінний струм. Магнітний потік сердечника замикається через повітряні зазори під його полюсами і через метал валу. Якщо вал не навантажений, то магнітна проникність його металу однакова у всіх напрямках. Магнітний потік між полюсом сердечника 1 розподіляється симетрично відносно полюсів сердечника 2. В такому випадку струм в його котушках відсутній. Якщо вал навантажений, тобто передає обертальний момент в ньому виникають розтягування і стиснення, спрямовані під кутом

45° до його осі, що викликають збільшення магнітної проникності металу валу. Внаслідок цього напруженість магнітного поля під одним з полюсів сердечника 2 стає більше, ніж під іншим, і в його котушках з'являється електрорушійна сила, пропорційна обертовому моменту.

Загалом, індуктивні перетворювачі на сьогоднішній день широко використовуються для контролю навантаження на вали ЕД у важких умовах експлуатації. Наприклад, у спортивних автомобілях, автонавантажувачах, самоскидах або тракторах. Високнадійні індуктивні перетворювачі широко застосовуватимуться в автомобільній промисловості протягом наступних кількох років чи десятиліть. Тому, їх подальше дослідження в даній роботі спрямоване на вдосконалення як методів вимірювання обертових моментів ЕД з використанням індуктивних сенсорів, так і електричних схем вимірювальних перетворювачів.

Разом з тим, значну частину вимірювальних перетворювачів обертового моменту, побудовано на основі тензометричної технології, яка заснована на властивості металевого дроту, або фольги, що при розтягуванні, або стисканні може змінювати свій електричний опір. Таким чином, тензодатчик наклеюється на вихідний вал та сприймає його деформацію (рис. 1.21).

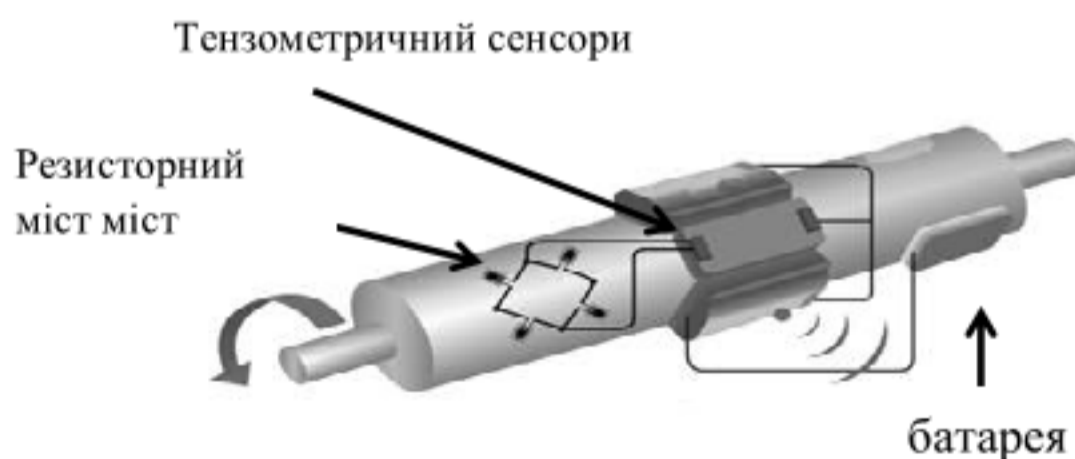


Рис. 1.21. Розташування тензометричних сенсорів на валу електродвигуна

Для зменшення похибки спричинену коливаннями температури у тензорезисторах застосовують матеріали із незначним температурним коефіцієнтом опору, які у широкому діапазоні зберігають лінійну залежність між відносною деформацією та зміною опору.

На рис. 1.22 представлено структурну схему тензорезисторів та їх з'єднання у вигляді мостової схеми, де видно, що конструктивно дротяний тензорезистор є решіткою з дроту, яка покладена зигзагоподібно на довжині  $S_2$  і ширині  $S_1$ , між двома електроізоляційними підкладками. До кінців дроту приєднані вивідні кінці. Тензодатчики з'єднуються у схему моста, точки живлення та діагоналі якого виведені через колекторні кільця 1 зі щітками.

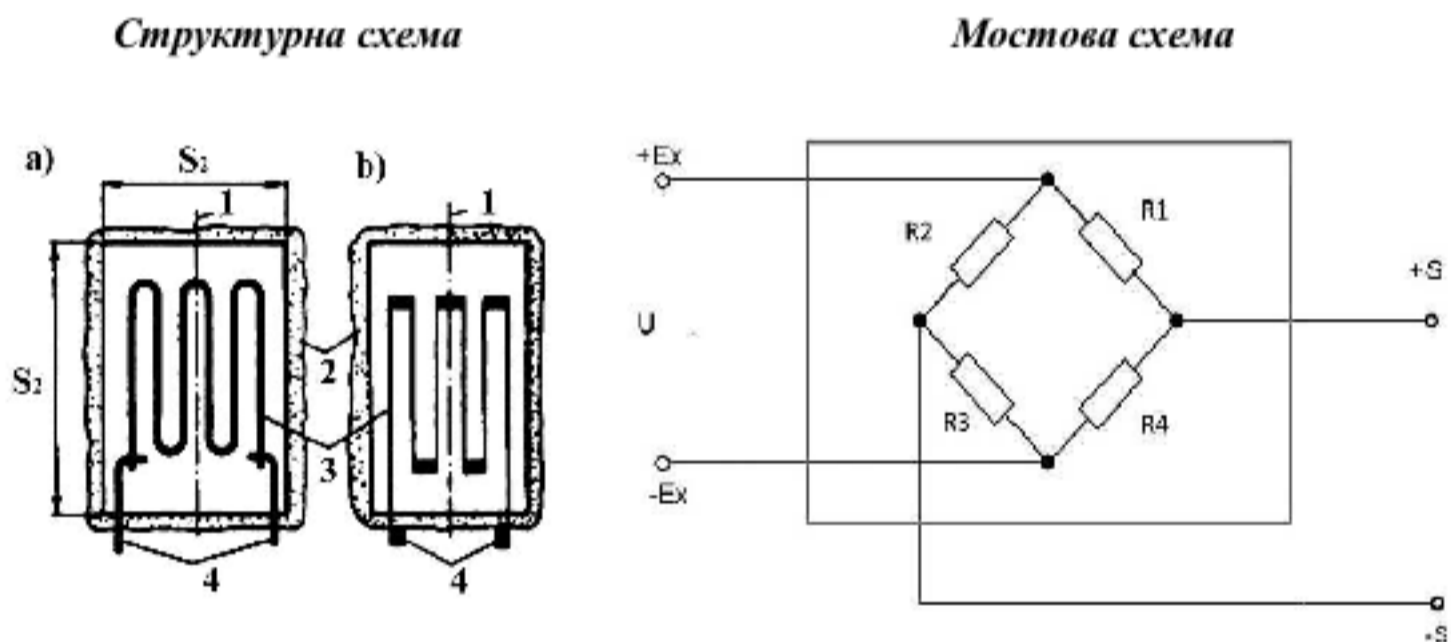


Рис. 1.22. Будова тензометричного сенсору

Розроблено на основі джерела, [43]

де:  $+Ex, -Ex$  - вхідна напруга;  $+S, -S$  - вихідний сигнал та  $R1-R4$  - тензометричні резистори, які змінюють свій опір в залежності від деформації.

Розташування тензодатчиків 2 під кутом  $45^\circ$  до осі валу практично компенсує спотворює вплив вигину, стискування та температури. Напруга в діагоналі моста 3 пропорційна обертальному моменту.

Відповідна технологія є достатньо точною, проте слід враховувати і фактори, які мають вплив на вимірювання, зокрема гальмівні сили, ковзання,

вібрація, температурні характеристики. На відміну від індукційних сенсорів, тензометричні більше мають вплив механічні та електромагнітні фактори, що значно зменшує ресурс їх роботи [67]. Незважаючи на те, що тензометричні сенсори забезпечують високу точність, вони досить громіздкі та мають високу вартість, тому їх застосовують в основному у дослідницьких лабораторіях та конструкторських бюро, а також для перевірки стандартів. Крім того, такі сенсори вимагають високого рівня обслуговування, що робить їх непридатними для масового використання.

Характеристики фотометричних сенсорів обумовлена комплексом заходів по вимірюванню інтенсивності світлового потоку, що йде від певного джерела до фотоелементу (рис. 1.23).

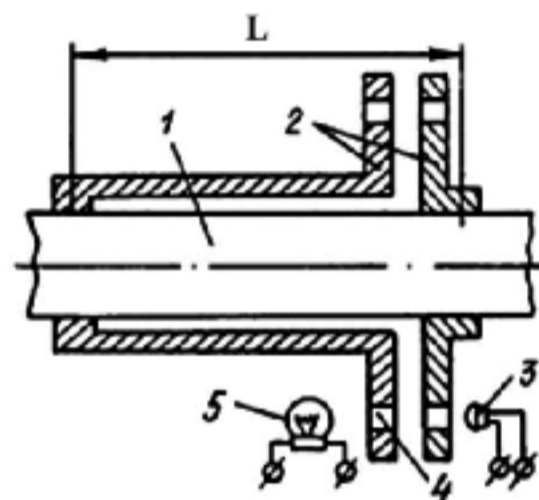


Рис. 1.23. Схема фотоелектричного датчика обертального моменту

Так, згідно рис. 1.8 інтенсивність пучка світла, що потрапляє на приймач 3 залежить від кута скручування валу наступним чином: на валу 1 на відстані  $L$  насаджено два диска 2, отвори 4 в яких збігаються, якщо вал не відчуває скручування. В іншому випадку осьова сумісність отворів порушується, і потік світла, що йде від лампи 5 до фотоелементу 3, зменшується. Внаслідок чого змінюється сила струму на виході фотоелемента.

Таким чином, враховуючи кожен окремий параметр для вимірювання обертальних моментів, точність вимірювання залежить не лише від сенсору, а й від умов вимірювання (вібрація, електромагнітні хвилі, температура,

тощо). Загалом, прилади для вимірювання обертальних моментів сильно залежать від зазначених факторів, тому для підвищення їх точності потрібно збільшувати кількість інформаційних параметрів, зменшувати перешкоди під час передачі та обробки вимірювального сигналу, визначити оптимальні шляхи мінімізації похибок.

Так, на сьогоднішній день, основною проблемою залишається збільшення точності при вимірюванні фазового зсуву торсіонного валу, оскільки торсіони не забезпечують широкого діапазону вимірювань, крім того, низька точність спричинюється і за рахунок резонансних явищ. Тому в перехідних режимах роботи вимірювання відбувається з використанням додаткових засобів нівелювання окремих впливів.

В сталих режимах роботи також існують пульсації моменту сили через особливості кінематики, нестабільності тертя та пульсації моменту двигуна. Таким чином, функція обертального моменту може бути представлена розкладанням в гармонійний ряд Фур'є з широким спектром гармонік [68].

Так, наприклад, помістивши перетворювач моменту сили у розрив кінематичного ланцюга ЕД, отримаємо систему, що складається з трьох елементів:

$$M = I_d - R - I_p, \quad (1.38)$$

де:  $I_d$  - момент інерції ротора ЕД;  $R$  - жорсткість торсіонного валу;  $I_p$  - момент інерції обертальних частин з боку навантаження.

Враховуючи утворений коливальний ланцюг, така система має власну резонансну частоту:

$$\omega_{рез} = \sqrt{\frac{R}{I}}, \quad (1.39)$$

$$\text{де: } I = \frac{I_d \cdot I_p}{I_d + I_p},$$

Разом з тим, з огляду на широкий спектр частот, які присутні при обертання валу, функція резонансної частоти в процесі вимірювального

перетворення, буде нелінійною. Що призведе до зниження точності вимірювань.

Відповідну проблему було вирішено в роботі [69] з використанням додаткових пружних та магнітних елементів, а також оптичних сенсорів. Так, під дією обертального моменту торсіонна пружина відчуває кутову деформацію пропорційну моменту, що передається. Оскільки цей момент змінний з широким спектром, то власна частота системи двигун-датчик-навантаження виявляється у спектрі частот обертального моменту. При виникненні обертальних коливань, резонансна частота компенсується постійним магнітом, це створює пропорційний опір відносної швидкості обертання, параметри, якого вибрані таким чином, щоб наблизити коливальну систему до аперіодичної ланки. Таким чином, функція перетворення датчика залишається лінійною. Відповідний метод стабілізує роботу вимірювальних перетворювачів, збільшуючи їх точність та нівелюючи не лінійність в цьому аспекті. Проте відповідний метод міг би бути, ще точнішим, якщо б можна було внести корегування у залежність пружності валу від температурного фактору. І це лише незначна частина факторів, вплив яких спотворює точність вимірювання обертальних моментів ЕД.

З одного боку проблему можна вирішити шляхом збільшення точності вимірювальних перетворювачів, проте частину факторів впливу, особливо під час перехідних процесів можна зменшити використовуючи інтелектуальні засоби обробки вимірювальної інформації.

Виходячи з цього, особливості підходів до вимірювання обертальних моментів ЕД можна поділити за такими класифікаційними ознаками:

1. За типом вимірювальних перетворювачів;
2. за параметрами, які контролюються;
3. за способом вимірювання;
4. за методом вимірювання;
5. за способом встановлення вимірювального перетворювача;



6. за характеристиками ЕД (швидкість обертання валу, вібрація, навантаження);
7. за способом обробки сигналу вимірювального перетворювача;
8. за методами автоматичного контролю роботи ЕД

Дослідивши кожен із вище згаданих способів можна визначити подальші шляхи оптимізації вимірювань обертальних моментів ЕД та проблеми, які вирішуються, а також потребують подальшого вирішення.

### 1.5. Аналіз методів та засобів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів

Класифікація методів вимірювання обертальних моментів включає в себе дві основні категорії (рис. 1.24), прямі та не прямі методи вимірювання.

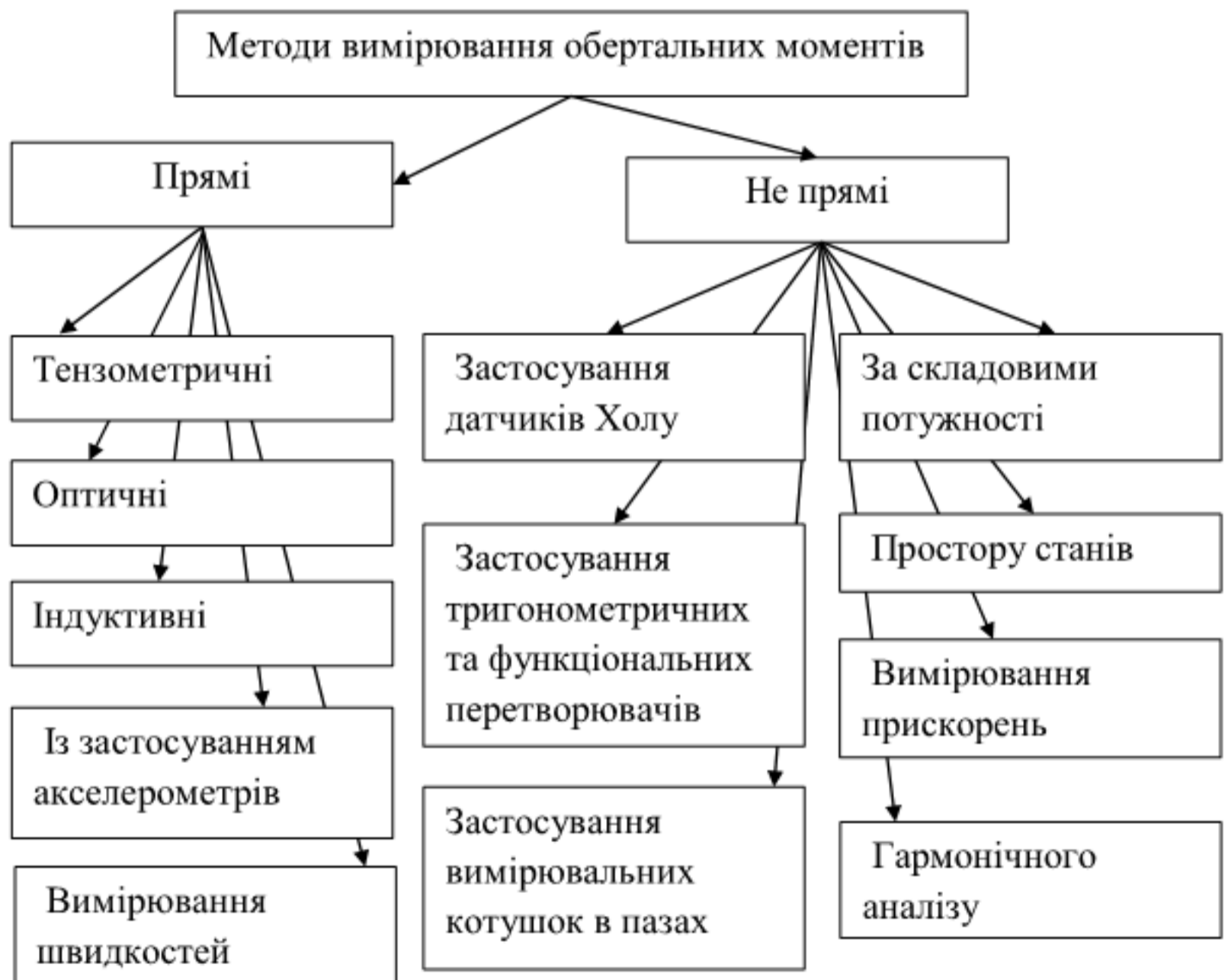


Рис. 1.24. Класифікація методів вимірювання обертальних моментів, [70], [70], [54], [55], [71], [71].

Переважає більшість вимірювань на сьогоднішній день проводиться в перехідних режимах саме непрямыми методами, заснованими здебільшого на вимірюванні прискорень, наприклад методами чисельного диференціювання кривої швидкості. Так, для визначення прискорення можна використовувати як опосередковані методи, шляхом чисельного диференціювання даних про переміщення валу [23], так і методи безпосереднього вимірювання, застосовуючи тензометричні технології [74], індуктивні [54], оптичні [26], тощо.

Розглядаючи першу групу методів, слід відзначити, що під час вимірювання обертальних моментів електродвигунів, з урахуванням різних механізмів та устаткування, можуть використовуватися різні методи чисельного диференціювання [25],[67],[89],[11].

Одним із найпоширеніших таких методів, можна вважати метод кінцевих різниць, який використовується для апроксимації похідної функції [12], [67]. У цьому методі, інтервал часу обертання валу  $t$  та швидкість обертання розбивається на рівні частини  $h$  (рис. 1.25), а потім на кожному інтервалі обчислюється обертальний момент. Після чого похідна цієї функції знаходиться чисельно.

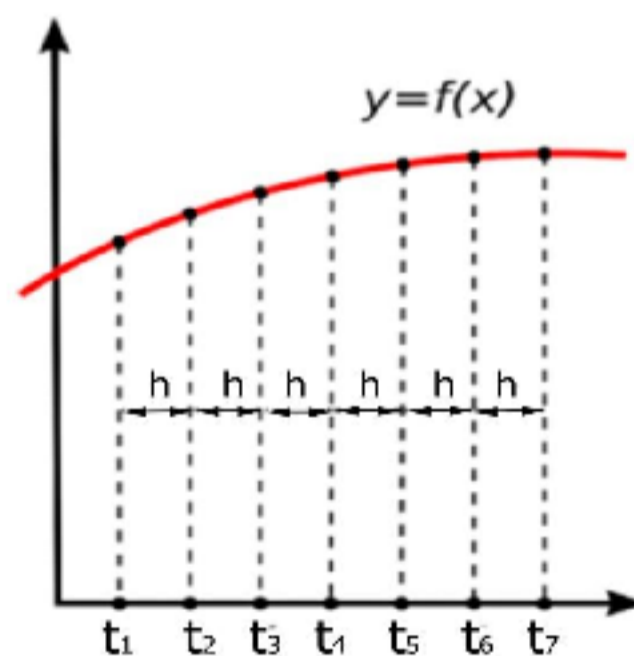


Рис. 1.25. Метод кінцевих різниць, [47]

Так, в контексті вимірювання обертальних моментів, метод кінцевих різниць може бути використаний для обчислення похідної кутової швидкості, яка є вимірюваною величиною, та для отримання значення моменту згідно з законом динаміки.

Для обчислення похідної використовується формула чисельного диференціювання, яка ґрунтується на апроксимації похідної дискретними різницями. Наприклад, з використанням центральної різницевої формули можна записати:

$$\frac{d\theta}{dt} \approx \frac{\theta_{i+1} - \theta_{i-1}}{2\Delta t}, \quad (1.40)$$

де:  $\theta_i$  - кутова координата в момент часу,  $\Delta t$  - інтервал часу між вимірюваннями. За допомогою цієї формули можна отримати оцінку кутової швидкості в кожен момент часу, зберігаючи значення кутової координати в дискретних точках часу.

Отримана оцінка кутової швидкості може бути використана для обчислення моменту за допомогою закону динаміки.

Застосування методу кінцевих різниць дозволяє отримати числову оцінку похідної кутової швидкості, що в свою чергу дозволяє отримати числову оцінку моменту.

Даний метод може бути використаний під час вимірювання моменту при зміні навантаження, оскільки при зміні навантаження на електродвигун обертальний момент також змінюється. Використовуючи метод кінцевих різниць, можна виміряти зміну моменту шляхом вимірювання зміни навантаження у задані моменти часу та обчислення різниці моментів між цими моментами часу.

Крім того, даний метод можна використовувати вимірюючи параметри змін температури, оскільки при зміні температури, електродвигуна момент може змінюватися. Таким чином, використовуючи метод кінцевих різниць, можна виміряти зміну моменту шляхом вимірювання зміни температури у задані інтервали часу та обчислити різниці моментів між цими інтервалами.

Для реалізації даного методу потрібно використання спеціального програмного забезпечення, яке дозволить записувати дані про швидкість обертання, навантаження та температуру електродвигуна в задані моменти часу, обчислюючи значення обертового моменту за допомогою методу кінцевих різниць. Отримані дані можуть бути використані для визначення технічних характеристик роботи електродвигуна та його динамічних властивостей.

Разом з тим, метод кінцевих різниць має певні обмеження. Зокрема, він може бути досить трудомістким за високої точності обчислень, а також може вимагати значних обсягів пам'яті та процесорного часу. Крім того, для отримання точних результатів необхідно враховувати багато факторів, що може ускладнити моделювання вхідних параметрів. Проте, в цілому, метод кінцевих різниць може бути корисним інструментом для вимірювання оберտального моменту електродвигуна, але його застосування може бути обмежене складністю системи та необхідністю високої точності обчислень.

Метод найменших квадратів є потужним математичним інструментом для вирішення задач апроксимації даних, зокрема для вимірювання оберտального моменту електродвигуна. Приклад застосування цього методу може бути наступним:

Розглянемо приклад з електродвигуном електродвигун, який працює при певних значеннях струму і напруги. Ми хочемо дослідити залежність оберտального моменту електродвигуна від цих параметрів. Для цього ми можемо виміряти значення обертального моменту при різних значеннях струму і напруги і записати ці дані в таблицю.

Потім ми можемо використати метод найменших квадратів, щоб знайти коефіцієнти лінійної апроксимації обертального моменту відносно струму і напруги. Для цього ми можемо взяти модель лінійної регресії:

$$P = aI * bU, \quad (1.41)$$

де:  $M$  - обертальний момент,  $I$  - струм,  $U$  - напруга,  $a$  і  $b$  - коефіцієнти лінійної апроксимації.

Для знаходження коефіцієнтів  $a$  і  $b$  ми можемо використати формули:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n I_i M_i - \sum_{i=1}^n I_i \sum_{i=1}^n M_i}{n \sum_{i=1}^n I_i^2 - (\sum_{i=1}^n I_i)^2}, b = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - a \sum_{i=1}^n I_i}{n}, \quad (1.42)$$

де  $n$  - кількість вимірювань,  $I_i$  і  $M_i$  - значення струму і обертального моменту в  $i$ -му вимірюванні.

Отже, застосовуючи метод найменших квадратів до таких даних, ми можемо знайти коефіцієнти  $a$  і  $b$  і отримати модель лінійної апроксимації обертального моменту.

При вимірюванні обертального моменту електродвигуна можуть бути отримані дані, які містять деяку похибку вимірювання. Метод найменших квадратів дозволяє знайти оптимальну апроксимаційну функцію для цих даних, яка буде найкраще описувати залежність між моментом і вхідним струмом електродвигуна.

За методом найменших квадратів ми повинні знайти такі значення  $a$  і  $b$ , щоб сума квадратів різниць між спостережуваними значеннями обертального моменту і тими, які передбачає лінійна модель, була мінімальною. Формально, ми повинні знайти такі значення  $a$  і  $b$ , які мінімізують наступну функцію:

$$\sum_{i=1}^n (M_i - aI_i - b)^2, \quad (1.43)$$

де  $n$  - кількість спостережень.

Задача полягає в тому, щоб знайти функціональну залежність між напругою та струмом, яка дає найбільш точне описання залежності обертального моменту від струму та напруги.

Спочатку необхідно визначити модель, яка буде описувати залежність між крутним моментом та струмом та напругою. У даному випадку можна використати лінійну модель:

$$M = aU + bI + c, \quad (1.44)$$

де:  $a$ ,  $b$  та  $c$  - коефіцієнти моделі, які необхідно знайти.

Далі необхідно знайти значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$  та  $c$  методом найменших квадратів. Для цього необхідно побудувати матрицю системи рівнянь.

Також можуть використовуватись інші методи, наприклад, метод Гауса, який використовується для обчислення похідної функції на основі інтерполяції багаточлена Гауса на заданому інтервалі [71].

Кожен окремий метод, вибраний для вимірювання моменту залежить від специфіки вимірюваного механізму і вимог до точності вимірювання.

Таким чином, методи вимірювання обертальних моментів електродвигунів, відносяться до загальноприйнятих методів вимірювання фізичних величин, які поділяються на такі категорії: методи безпосередньої оцінки та методи порівняння.

В свою чергу методи порівняння поділяються на: а) методи безпосереднього порівняння із мірою; б) методи опосередкованого порівняння із мірою. Методи ж безпосереднього порівняння з мірою – це методи вимірювання в яких вимірювану величину порівнюють безпосередньо з відтворюваною мірою. Методи опосередкованого порівняння з мірою – це методи в яких вимірювану величину порівнюють через непрямую величину, що відтворюється мірою з наступним перерахуванням значень з відповідною залежністю безпосередньої величини з опосередкованою.

У свою чергу методи безпосереднього порівняння з мірою, а також методи опосередкованого порівняння з мірою, поділяються на:

- метод протиставлення порівняно з мірою.
- метод заміщення у порівнянні з мірою;
- диференціальний метод порівняння з мірою;
- метод збігу при порівнянні з мірою;
- нульовий метод порівняння з мірою;

Кожен метод вимірювання має узагальнену структурну схему при прямому перетворенні та наявності компенсації, з використанням міри та без неї, має певні умови застосування, повинен мати можливість оцінки на точність.

### **1.6. Аналіз структур побудови приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів**

Виходячи із проведеного дослідження приладів для вимірювання обертальних моментів, було отримано наступну класифікацію (рис. 1.26).

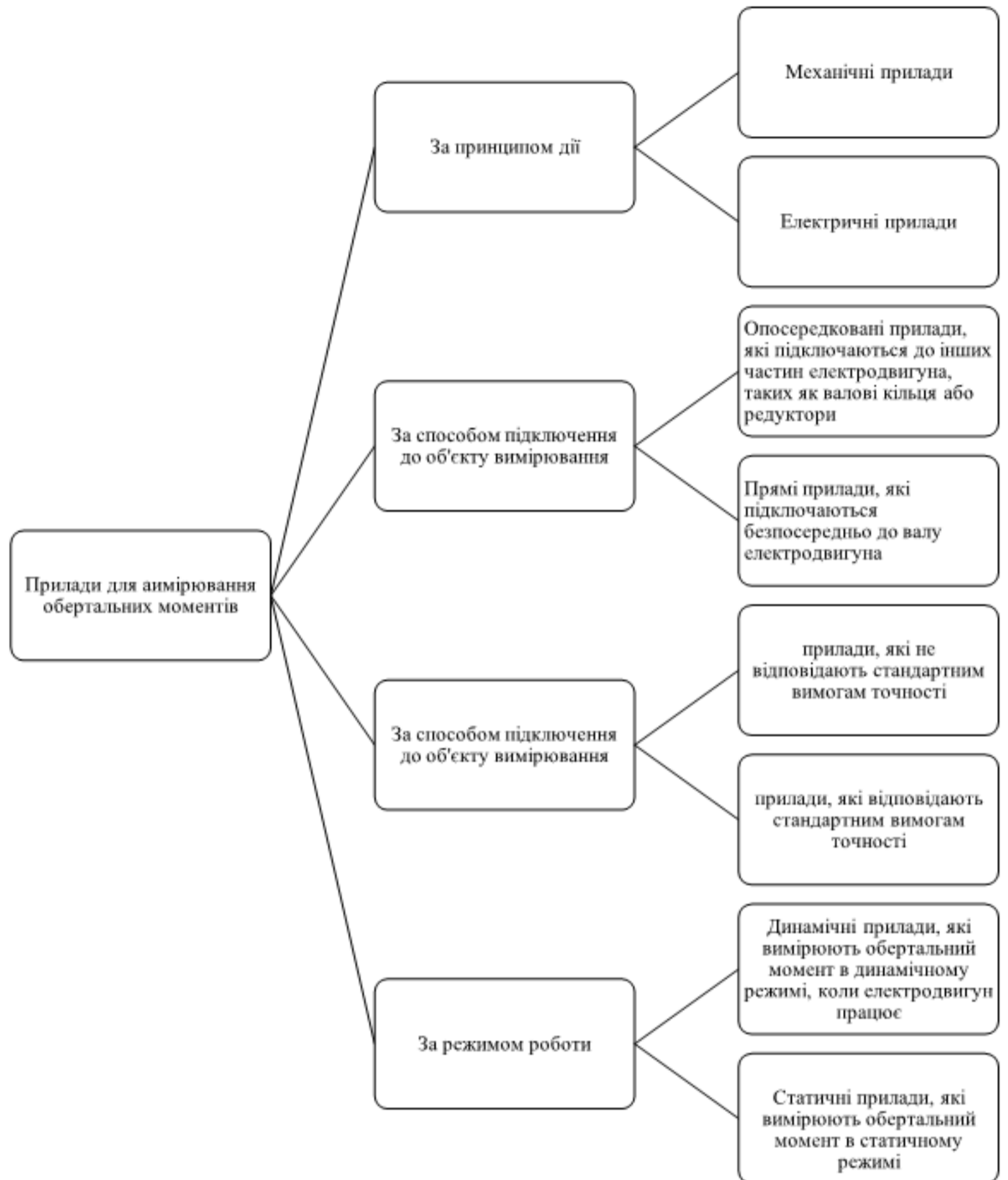


Рис. 1.26. Класифікація приладів для вимірювання обертальних моментів

Виходячи з того, що вона може бути розподілена на чотири категорії розроблено більш детальну їх класифікацію, яка включає основні види вимірювальних приладів (рис. 1.27)



Рис. 1.27. Класифікація механічних приладів для вимірювання обертальних моментів

Електричні прилади для вимірювання обертальних моментів можна розподілити за такими категоріями:

Тензометричні прилади:

– датчики вимірювання моменту, що розміщені на валу. Вимірюють деформацію валу, викликану моментом. Зазвичай використовують схему моста Уїнстона для вимірювання змін опору, спричинених деформацією.

– фланцеві датчики. Монтуються між валом і навантаженням та вимірюють момент, прикладений до навантаження.

Прилади основані на вимірюванні змін в магнітному полі, що виникають, коли момент сили прикладається до магнітного матеріалу:

– датчики реактивного обертального моменту. В основному застосовуються для вимірювання витрат рідин. Базуються на принципі лінійного перетворення електромагнітної індукції в електричний сигнал, яка



виникає в наслідок обертання магнітного ротору, обертальний рух якого створює потік рідини гідравлічним способом;

– датчики, що використовують ефект Холла. Вимірюють зміни у магнітному полі, викликані рухом заряджених частинок, наприклад, електронів, всередині матеріалу. Коли такий матеріал піддається моменту скручування, заряджені частинки зміщуються і змінюють магнітне поле. Датчик, може вимірювати ці зміни та переводити їх у електричну величину, пропорційну обертальному моменту;

– датчики, що використовують магнітопружний ефект. Вимірюють зміни в магнітному полі, викликані деформацією матеріалу. Коли вал деформується, магнітне поле змінюється, і датчик може виміряти ці зміни та перевести їх у величину пропорційну обертальному моменту;

– датчики, що використовують зміну індуктивності. Вимірюють зміни в індуктивності котушки, викликані деформацією матеріалу, що піддається моменту. Коли матеріал деформується, індуктивність котушки змінюється, що можна виміряти та використовувати для визначення величини обертального моменту.

Оптичні прилади:

– датчики, які використовують принцип поляризації для вимірювання крутного моменту. Вони складаються з джерела світла, поляризатора, датчика моменту та аналізатора. Датчик моменту розміщено між поляризатором і аналізатором, і коли датчик обертається завдяки прикладеному моменту, він змінює поляризацію світла, що проходить через нього. Аналізатор виявляє цю зміну поляризації та обчислює момент.

– волоконно-оптичні датчики моменту. Ці датчики використовують принцип волоконної оптики для вимірювання моменту. Вони складаються з волоконно-оптичного кабелю, намотаного навколо вала, і коли вал обертається через прикладений момент, це спричиняє незначну деформацію

волоконно-оптичного кабелю. Ця деформація змінює оптичні характеристики оптоволоконного кабелю, які можна виміряти для розрахунку моменту;

– лазерні спекл-датчики крутного моменту. Використовують принцип лазерного спекл-моменту для вимірювання моменту. Вони складаються з лазера, датчика моменту та камери. Лазер освітлює датчик крутного моменту, і коли датчик обертається внаслідок прикладеного моменту, це спричиняє зміну спеклової картини відбитого лазерного світла. Камера фіксує цю зміну в спекл-схемі та обчислює момент.

– датчики, що використовують принцип кореляції цифрового зображення для вимірювання моменту. Вони складаються з камери високої роздільної здатності, датчика моменту та комп'ютера. Камера фіксує зображення датчика моменту, коли він обертається внаслідок прикладеного моменту, а комп'ютер аналізує ці зображення, щоб обчислити момент.

П'єзоелектричні прилади:

– прилади, які використовують п'єзорезистивні матеріали, що змінюють електричний опір при деформації;

– прилади побудовані на основі п'єзоелектричних кристалів. Складаються з кристалів, які генерують електричний сигнал під час деформації обертального валу;

– прилади, що використовують п'єзокераміку для генерації акустичних хвиль, які залежать від моменту. Під час деформації п'єзоелектричного матеріалу відбувається коливання, яке генерує звукові хвилі. Ці звукові хвилі можуть бути виміряні за допомогою мікрофона і використані для визначення моменту.

Ємнісні прилади:

– датчики, що використовують зміну ємності в конденсаторі, яка викликана деформацією матеріалу, в результаті моменту скручування. Коли матеріал деформується, його ємність змінюється, що можна виміряти та використовувати для визначення величини моменту.

Розглядаючи кожен з них, можна дослідити їх основну структуру.

Так, дослідження тензометричних приладів оснований на тензометричній технології, зазвичай складаються з наступних основних компонентів:

Тензометри - це датчики, які вимірюють напруження в матеріалі, до якого вони прикріплені. У приладах для вимірювання обертальних моментів використовуються спеціальні тензометри, призначені для вимірювання розтягу або стиску валу електродвигуна, що відбувається при передачі обертального моменту.

Вимірювальний міст - це електронний прилад, який забезпечує збір, підсумовування та обробку даних з тензометрів. Вимірювальний міст перетворює вимірювання напруження на значення обертального моменту.

Інтерфейс - це зв'язуючий елемент між вимірювальним мостом та комп'ютером або іншим пристроєм, який забезпечує передачу даних з вимірювального моста до обробляючої системи.

Програмне забезпечення, яке дозволяє користувачу контролювати прилад та отримувати результати вимірювань. Програмне забезпечення може також забезпечувати збереження та обробку даних вимірювань.

Також застосовують спеціальні додаткові елементи для кріплення тензометрів на валу електродвигуна, що забезпечують точне вимірювання.

Загалом, прилади для вимірювання обертальних моментів електродвигунів, що побудовані на основі тензометричної технології мають досить складну структуру,

Модель вимірювального каналу приладу для вимірювання обертальних моментів, яка основана на тензометричній технології, може бути побудована наступним чином:

Вхідний сигнал: Вхідним сигналом є напруга, що виникає на тензометрах під час стискання або розтягу валу електродвигуна.

**Передаточна функція:** Передаточна функція визначає залежність вимірюваного обертального моменту від вхідної напруги. Вона може бути визначена експериментально або теоретично.

**Зсув:** Визначається при відсутності вимірювань обертального моменту та забезпечує зручне відображення результатів вимірювань на приладі.

**Аналого-цифровий перетворювач (ADC):** ADC перетворює аналоговий вхідний сигнал (напругу) в цифровий сигнал, що може бути оброблений цифровою обробкою сигналів.

**Цифрова обробка сигналів (DSP):** DSP використовується для обробки сигналу, який був перетворений ADC. Вона може включати в себе фільтрацію шумів, калібрування, підсумовування та обробку даних.

**Мікроконтролер:** Мікроконтролер контролює взаємодію всіх компонентів вимірювального каналу, забезпечує збір та обробку даних та передачу даних до інтерфейсу.

**Інтерфейс:** Інтерфейс забезпечує передачу даних з мікроконтролера до комп'ютера або іншого пристрою для відображення та аналізу даних.

Ця модель може бути реалізована як окремий блок вимірювального каналу, або як компонент в більш складному приладі.

Інші типи приладів побудовані мають подібну структуру, проте відрізняються вимірювальними елементами, класом точності та методами вимірювання.

Так, індуктивні перетворювачі обертальних моментів складаються з наступних основних елементів:

**Ротор:** Ротор складається з магнітів, які генерують магнітне поле. Ротор розташовується на валу електродвигуна і обертається разом з ним.

**Статор:** Статор складається з котушок, які розташовані в магнітному полі ротора. Статор є нерухомим і необхідний для створення індуктивного ефекту.

**Котушки:** Котушки складаються з дроту, який обмотаний на феромагнітній основі. Вони розташовані на статорі.

Вимірювальний пристрій: Вимірювальний пристрій складається з електронної схеми, яка зчитує напругу, що згенерувала індуктивна котушка, та обчислює момент, який генерується на валу електродвигуна.

### **1.7. Аналіз похибок приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів**

Результат будь-якого вимірювання не може бути повноцінним до того часу, поки не вказана похибка, з якою воно виконано. І хоча правила чисельної оцінки величини похибок досить давно розроблені, проте часто їх складно визначити. Дослідженню похибок приладів для вимірювання обертальних моментів присвячено багато наукових праць [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], в яких представлено класифікаційні ознаки та практичне застосування методів визначення похибок. Основна класифікаційна структура похибок вимірювальних приладів представлена на рис. 1.28, 1.29

Виходячи із неї, слід виділити найбільш розповсюджені для вимірювань обертальних моментів. Так, необхідно відзначити похибки, пов'язані з самим приладом, а саме мультиплікативні похибки, що змінюються разом із зміною значень вимірювальної величини.

*Похибки масштабування.* Такі похибки виникають, коли шкала приладу неправильно показує вимірювану величину.

*Похибки нуля.* Ці похибки виникають, коли прилад показує певне значення, навіть коли вимірювана величина дорівнює нулю.

Похибки, пов'язані з умовами вимірювання:

*Похибки температури.* Ці похибки виникають, коли температура навколишнього середовища відрізняється від температури, при якій калібрували прилад.

*Похибки вібрації.* Ці похибки виникають, коли вимірювання проводяться в умовах вібрації, або коли прилад вібрує під час роботи.

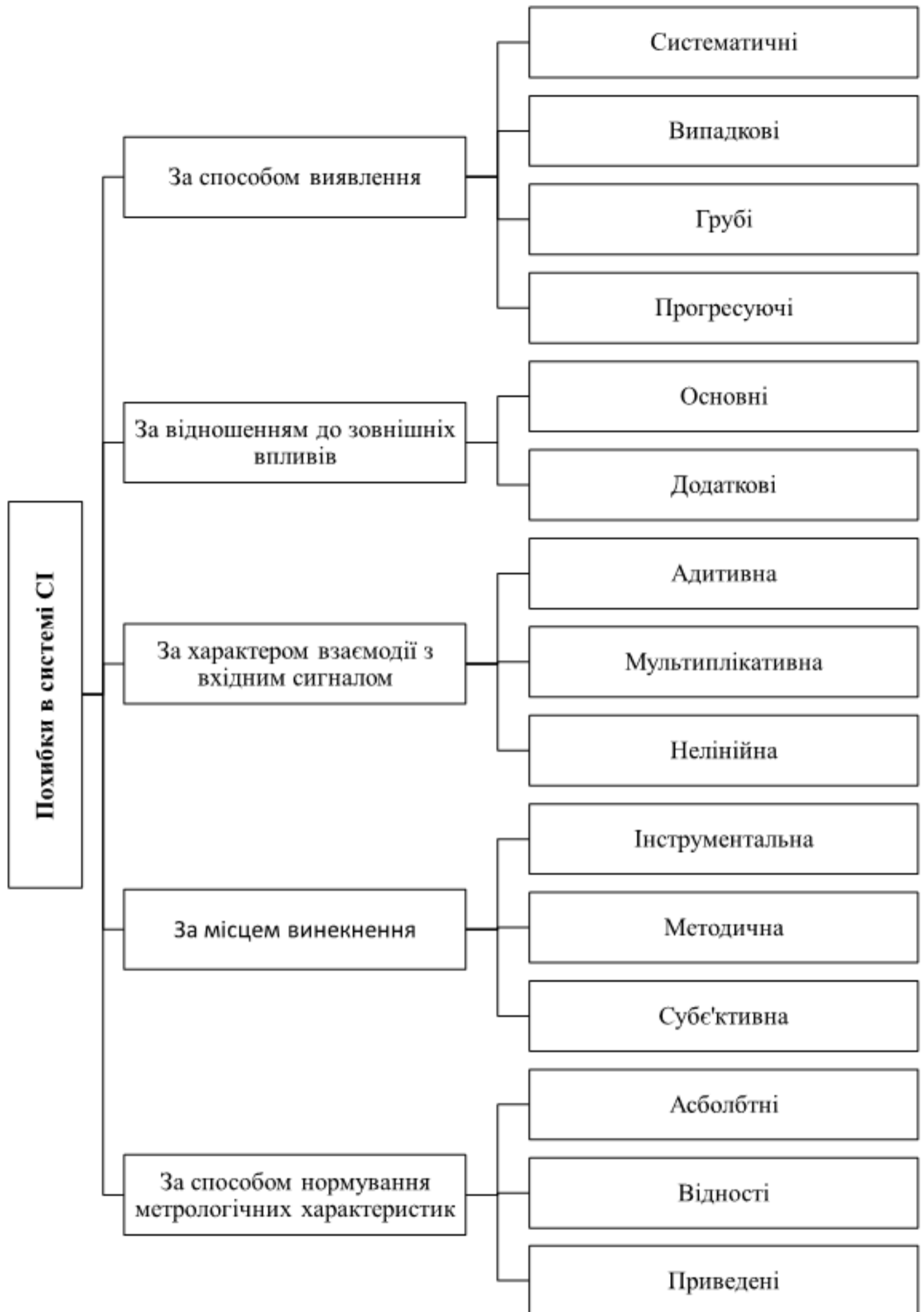


Рис. 1.28. Класифікація помилок вимірювальних приладів

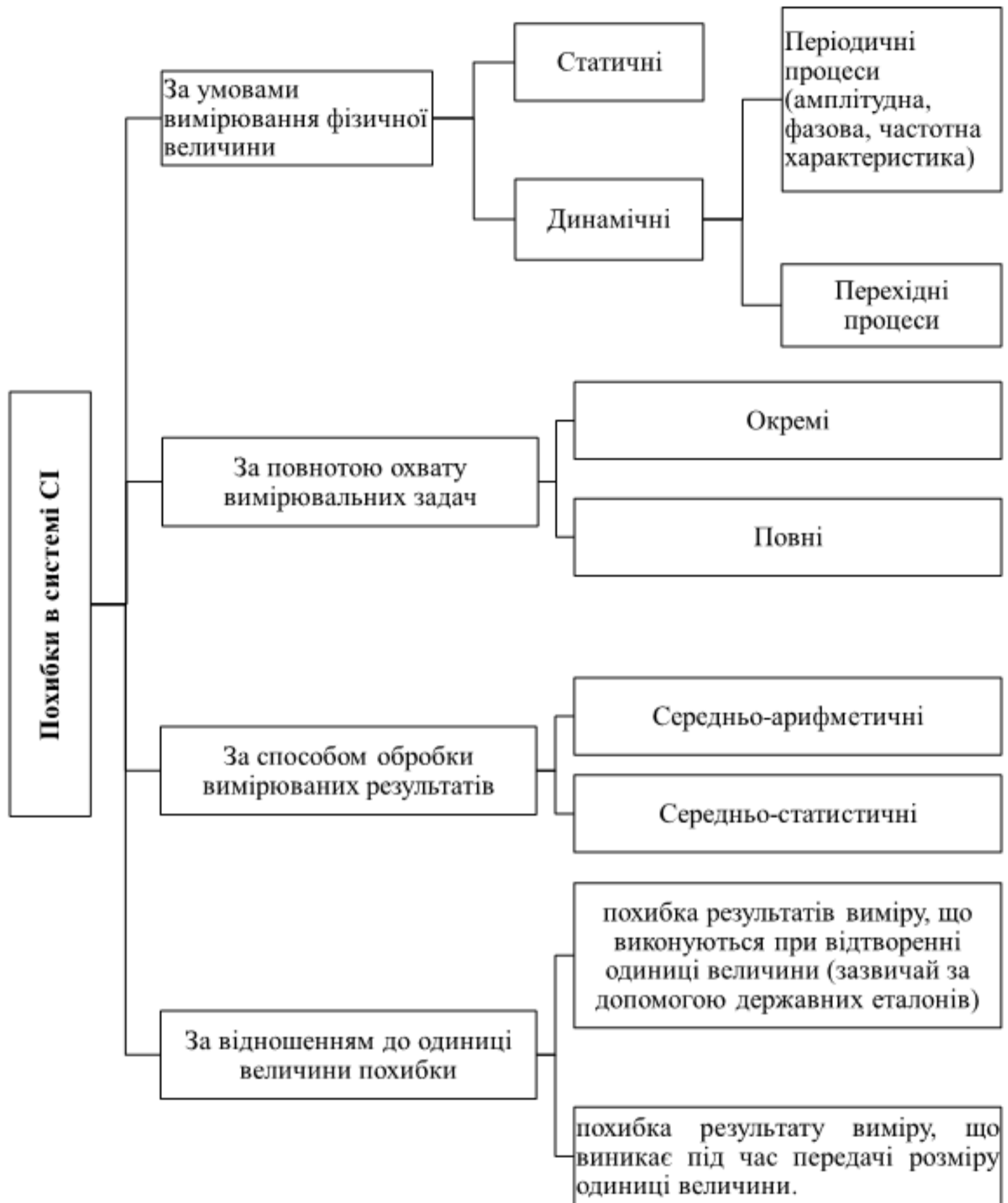


Рис. 1.29. Класифікація помилок вимірювальних приладів (продовження рис. 1.28)

*Похибки електромагнітного впливу.* Ці похибки виникають, коли прилад піддається електромагнітному впливу від інших пристроїв або проводів.

Похибки, пов'язані з самим електродвигуном:

*Похибки зміни кута повороту валу.* Ці похибки виникають, коли кут повороту валу електродвигуна змінюється внаслідок інших факторів, наприклад, коли навантаження змінюється.

*Похибки зміни температури.* Ці похибки виникають, коли температура електродвигуна змінюється внаслідок довготривалої роботи, або зміни зовнішніх умов.

Загалом, існує кілька типів похибок приладів для вимірювання крутних моментів. Основні з них - це систематичні та випадкові похибки (див. рис. 1.28, 1.29).

**Систематичні похибки.** Систематичні похибки виникають, коли прилад має постійну зміщеність відносно дійсного значення вимірювання. Це може бути викликано поганим калібруванням, неправильною установкою, або несправними датчиками. Ці похибки можна виправити за допомогою корекції значень вимірювань, якщо відомо значення систематичної похибки.

**Випадкові похибки.** Випадкові похибки виникають внаслідок впливу випадкових факторів, таких як шум, вібрація, температурні зміни, тощо. Вони можуть бути зменшені за допомогою усереднення багатьох вимірювань, які здійснюються в одних і тих же умовах. Тобто похибки, які виникають через випадкові фактори, такі як шуми в електричних лініях або механічні вібрації. Вони не повторюються і не мають сталого характеру.

**Інші похибки.** До інших похибок можуть належати похибки, пов'язані з недосконалістю самого електродвигуна, а також похибки, які виникають внаслідок відмінності між реальними умовами експлуатації електродвигуна і умовами, в яких відбувається вимірювання моментів.

Для точного вимірювання обертальних моментів електродвигунів важливо знати всі можливі похибки та уникати їх за допомогою належного



калібрування, а також застосування методів усереднення вимірювань та врахування всіх можливих випадкових та систематичних похибок.

Похибки, пов'язані з досліджуванним об'єктом. Похибки, які виникають через вплив самого електродвигуна на вимірювальний прилад. Наприклад, вимірювання моменту може бути ускладнене через наявність інших вимірюваних величин, таких як оберти або температура, які також впливають на крутний момент.

Похибки, пов'язані з методикою вимірювання. Похибки, які виникають через неправильне застосування методів вимірювання моменту. Наприклад, неправильне розташування датчика моменту на електродвигуні, або неправильне використання вимірювального обладнання.

Усі ці типи похибок можуть впливати на точність вимірювання моментів електродвигунів і повинні бути враховані при плануванні експериментів і вимірювань.

### **1.8. Вимірювальне перетворення сигналу від індуктивних сенсорів**

Процес перетворення сигналу в індуктивних перетворювачах обертального моменту відбувається за допомогою взаємодії між магнітним полем індуктивної обмотки та металевими деталями, які знаходяться в цьому полі.

Коли на індуктивний перетворювач діє обертальний момент, то металеві деталі, розташовані в магнітному полі, починають рухатися. Цей рух генерує електричний струм в індуктивній обмотці, оскільки змінюється магнітне поле, що проходить через обмотку. Величина електричного струму, що генерується в індуктивній обмотці, залежить від обертального моменту, що діє на індуктивний перетворювач.

Отриманий електричний сигнал з індуктивного перетворювача може бути оброблений та відображений вимірювальним приладом, або використаний для керування іншими пристроями, або системами. Важливою

особливістю індуктивних перетворювачів моменту є їх висока точність та стійкість до зовнішніх впливів таких, як температурні зміни, або вібрації, що дозволяє їх використовувати в різних умовах.

Загалом перетворення, включає кілька етапів. Нижче наведено загальний опис етапів:

1. Вимірювання фізичної величини застосовується шляхом зміни індуктивності, в результаті зміни положення феромагнітного елемента в магнітному полі вимірювальної котушки.

2. вимірювальний сигнал піддається попередній обробці, яка може включати підсилення, фільтрацію, роз'єднання та інші процеси. Метою цього етапу є забезпечення відповідної якості сигналу та його підготовки для наступних етапів.

3. Аналогово-цифрове перетворення (ADC), що забезпечує більш точне та стабільне вимірювання, а також дозволяє легше обробляти та зберігати дані.

4. Обробка даних: цифрові дані піддаються подальшій обробці, яка може включати фільтрацію, компенсацію шумів та інші процеси. Метою цього етапу є забезпечення якості та точності даних.

5. Вихідний сигнал: на останньому етапі обробки дані перетворюються на уніфікований вихідний сигнал, який може бути відображений на вимірювальному приладі, використаний для керування системами, або переданий до інших пристроїв.

### **1.9. Збільшення точності приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів**

Перетворювачі обертальних моментів, такі як крутні ключі, мають певну точність вимірювання, яка може бути збільшена за допомогою різних методів. Деякі з них включають:

Калібрування: цей метод використовується для визначення ступеня відхилення вимірювального пристрою від точної вимірювальної шкали. Калібрування може здійснюватися з використанням знаного джерела моменту, що використовується для порівняння з результатами вимірювання пристрою.

Використання сенсорів вищої точності: заміна сенсорів з більш високою точністю, ніж вимірювальний пристрій, може допомогти збільшити точність вимірювання.

Зменшення впливу шуму: шум може викликати додаткові помилки вимірювання, тому зменшення впливу шуму може допомогти збільшити точність вимірювання. Це може досягатися за допомогою фільтрації або застосування електромагнітної захисту.

Зменшення впливу зовнішніх факторів: зовнішні фактори, такі як температура, вологість та механічні впливи, можуть впливати на точність вимірювання. Зменшення впливу цих факторів може допомогти збільшити точність вимірювання.

Використання алгоритмів компенсації помилок: компенсація помилок може допомогти зменшити вплив помилок вимірювання та збільшити точність вимірювання. Це може досягатися за допомогою корекції нуля, компенсації дрейфу, або використання інших алгоритмів

Використання сенсорів вищої точності: заміна сенсорів з більш високою точністю може допомогти збільшити точність вимірювання. Наприклад, використання деформаційних сенсорів з високою точністю може збільшити точність вимірювання крутного моменту.

Калібрування. Визначення відхилень від точної вимірювальної шкали дозволяє скоригувати вимірювальні значення пристрою та збільшити точність.

Зменшення впливу зовнішніх факторів: зовнішні фактори, такі як температура, вібрації та механічні впливи, можуть впливати на точність

вимірювання. Зменшення впливу цих факторів може допомогти збільшити точність вимірювання.

### **1.10. Визначення метрологічних характеристик сенсорів для вимірювання обертальних моментів**

Метрологічні характеристики сенсорів для вимірювання моменту включають наступні параметри: Діапазон вимірювання - максимальне та мінімальне значення моменту, яке може бути виміряно сенсором.

Номінальна чутливість - зміна електричного сигналу, яка відповідає зміні моменту сили від нульового значення до номінального значення.

Нульова похибка - значення вимірювання при відсутності моменту сили.

Нестабільність нульової точки - зміна значення вимірювання при довготривалому вимірюванні без зміни моменту сили.

Лінійність - рівномірність зміни електричного сигналу відповідно до зміни моменту сили в межах діапазону вимірювання.

Похибка чутливості - відхилення вимірювання від ідеальної лінійної залежності між моментом сили та електричним сигналом.

Швидкість реакції - час, необхідний для досягнення стабільного вимірювання після зміни моменту сили.

Шум - неправильні вимірювання, які виникають внаслідок випадкових вимірювань відхилення.

Температурна залежність - вплив температури на характеристики сенсора.

Ці метрологічні характеристики є важливими для визначення точності та надійності сенсорів для вимірювання моменту сили. Для кожного вимірювання важливо визначити вимоги до цих характеристик та вибрати сенсор з належними параметрами для певної задачі.

### **1.11. Синтез структури приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів з покращеними метрологічними характеристиками**

Синтез структури приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів передбачає визначення оптимальної конфігурації сенсорів та електронної схеми обробки сигналу для досягнення максимальної точності та надійності вимірювань.

Основні етапи синтезу структури приладу для вимірювання обертальних моментів електродвигунів:

Вибір типу сенсора - датчики обертальних моментів можуть бути засновані на різних принципах вимірювання, таких як електричний, магнітний, оптичний, акустичний тощо. Вибір залежить від характеристик об'єкта вимірювання, технічних вимог до точності вимірювань, та інших факторів.

Вибір режиму роботи сенсора - для досягнення максимальної точності вимірювань можна застосовувати додаткові методи компенсації похибок, такі як збурення, температурна залежність, шум та інші. Наприклад, компенсація температурної залежності може бути досягнута за допомогою використання додаткового датчика температури, який буде компенсувати вплив температури на основний датчик моменту.

Вибір методів обробки сигналу - після зчитування вимірюваного сигналу сенсором, сигнал повинен бути оброблений для отримання вихідного значення моменту. Для цього можуть бути застосовані різні методи обробки сигналу, такі як фільтрація шуму, корекція нульової точки, компенсація температурної залежності, апроксимація лінійної залежності та інші

### 1.12. Чутливість приладів для вимірювання обертальних моментів.

Характеристика чутливості приладів для вимірювання обертальних моментів є однією з важливих метрологічних характеристик. Вона відображає залежність вихідного сигналу від зміни вимірюваної фізичної величини - моменту сили.

Чутливість може бути визначена як відношення зміни вихідного сигналу до зміни вимірюваної фізичної величини:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \Rightarrow x = \frac{1}{S} a, \quad (1.45)$$

де  $S$  - чутливість,  $\Delta Y$  - зміна вихідного сигналу,  $\Delta X$  - зміна вимірюваної фізичної величини;  $a$  - показання приладу;  $1/S$  - ціна поділу приладу;  $S$  - абсолютна чутливість приладу;  $dy$  - зміна сигналу на виході;  $dx$  - зміна вимірюваної величини;  $x$  - вимірювана величина.

При нелінійній статичній характеристиці перетворення чутливість залежить від  $X$ , при лінійній характеристиці постійна. У вимірювальних приладів за постійної чутливості шкала рівномірна, тобто. відстань між сусідніми розподілами шкали однакова.

Не слід плутати чутливість із порогом чутливості, під яким розуміють найменше значення вхідного сигналу, у якому впевнено виявляється зміна вихідного сигналу. Поріг чутливості виражають у одиницях вхідної величини.

Чутливість може бути виміряна в одиницях вимірюваної фізичної величини на одиницю вихідного сигналу, наприклад Нм/В, або Нм/тА.

Чутливість приладу повинна бути належним чином налаштована і залежати від вимірюваної фізичної величини. Занадто висока чутливість може призвести до вимірювання шумів і збурень, а низька чутливість може призвести до недостатньої точності вимірювань.

Також, чутливість може бути залежною від діапазону вимірювання, температури, вологості, статичного навантаження та інших факторів. Тому

важливо проводити вимірювання чутливості приладу в різних умовах і забезпечувати правильне зберігання та експлуатацію приладу для досягнення максимальної точності вимірювань.

### **Висновок до розділу 1**

1. Аналіз літературних джерел в галузі вимірювання обертальних моментів електродвигунів дозволив отримати огляд наукових та технічних розробок у цій області, виявити переваги та недоліки існуючих методів та приладів, а також визначити перспективні напрямки досліджень та розвитку приладів даного типу. Отримано висновки про те, які проблеми виникають під час вимірювання обертальних моментів електродвигунів та як їх можна вирішити, а також які нові технології та методи можуть бути використані для поліпшення якості вимірювань.

2. Аналіз методів та засобів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів дозволив отримати інформацію про технічні характеристики та особливості різних методів та приладів для вимірювання обертальних моментів. А саме: на основі досліджено розроблена класифікація методів та приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів за різними ознаками (за принципом дії, за областю застосування, за точністю вимірювання); проведено порівняння різних методів та приладів за їхніми перевагами та недоліками, точністю вимірювання, областю застосування та іншими технічними параметрами; визначено технічні проблеми, що виникають під час вимірювання обертальних моментів електродвигунів; визначено перспективні напрямки досліджень та розвитку в галузі вимірювання обертальних моментів електродвигунів на основі бездротових технологій зв'язку та Інтернету речей.

## РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ

При дослідженнях обертальних параметрів електричних машин, силу навантаження на вал можна оцінити досить точно. Разом з тим, враховуючи різкі динамічні зміни, прискорення, вібрації, гальмування, виміряти, які з використанням стандартних первинних перетворювачів моментів представляє певну складність. Виходячи з цього, можна сказати, що застосування електричних машин в сучасних умовах викликає необхідність врахування відповідних перехідних процесів під час вимірювання, що дозволить з мінімальним запізненням стежити за змінами вимірюваної величини, враховуючи інерційність валу, температурні та вібраційні впливи та ряд інших дестабілізуючих чинників, що спотворюють вимірювальні показники.

Усе це, та багато інших факторів, пов'язаних із збільшенням точності та швидкодії вимірювальних приладів даного типу обумовлює потребу у вивченні окремих перехідних процесів та врахуванні їх у вимірюваннях. Тому, завдання вимірювання динамічних моментів та прискорень в елементах сучасних електроприводів є досить складним.

Задачами даного розділу виступають вдосконалення класичних методів визначення параметрів обертальних моментів електродвигунів з урахуванням вібрацій, прискорень, гальмувань, пускових моментів, а також температурних впливів на структуру пружності валів електродвигунів; врахування умов експлуатації та інших умов, які мають вплив на роботу електродвигуна; оцінка точності вимірювання обертальних параметрів електродвигунів з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів; розробка методів вимірювання обертальних моментів у врахуванням компенсаційних та стійких до негативних впливів засобів; а також дослідження можливостей застосування нових інформативних параметрів в процесах вимірювання обертальних моментів електродвигунів.



За результатами досліджень, які були проведені в даному розділі, авторами опубліковано наступні роботи [79, 80, 81, 82, 83].

### 2.1. Моделювання вимірювального каналу

Рівняння вимірювального перетворення, яке враховує динаміку процесу перетворення обертальних параметрів електродвигунів можна представити наступним чином, [84]:

$$F_{вих} \left( y_{вих}, \dot{y}_{вих}, \ddot{y}_{вих}, \dots, y_{вих}^{(n)}, t \right) = F_{вх} \left( x_{вх}, \dot{x}_{вх}, \ddot{x}_{вх}, \dots, x_{вх}^{(m)}, f_{в1}, \dots, f_{вn} \right), \quad (2.1)$$

в залежності від вхідних та вихідних величин у сталому режимі роботи електродвигуна, при  $t = const$  рівняння перетворення буде мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{y}_{вих} &= 0, \ddot{y}_{вих} = 0, \dots, y_{вих}^{(n)} = 0; \\ \dot{x}_{вх} &= 0, \ddot{x}_{вх} = 0, \dots, x_{вх}^{(m)} = 0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

В такому випадку рівняння (2.1) матиме наступний вигляд:

$$y_{вих} = F_{вх} \left( x_{вх}, f_{в1}, f_{в2}, \dots, f_{вn} \right). \quad (2.3)$$

При мінімальному впливі зовнішніх факторів рівняння можна представити наступним чином:

$$y_{вих} = F \left( x_{вх} \right). \quad (2.4)$$

Зазначена функція перетворення може бути описана з урахуванням наступних характеристик:

Швидкість відповіді: це час, за який перетворювач може зреагувати на зміну вхідного сигналу та відобразити новий вимірюваний рівень на виході. Швидкість відповіді може бути виражена у мікросекундах або в наносекундах. Так, рівняння затримки вимірювального сигналу можна представити у вигляді:

$$y(t) = x(t - \tau), \quad (2.5)$$

де  $y(t)$  - вихідний сигнал,  $x(t)$  - вхідний сигнал,  $\tau$  - затримка.

Це рівняння показує, що вихідний сигнал  $y(t)$  є функцією вхідного сигналу  $x(t-Tp)$ , де  $\tau$  відображає затримку вимірювального сигналу.

Із даної залежності можна знайти запізнення (рис. 2.1):

$$y(t) = f[x_{ex}(t - \tau)];$$

$$t \leq \tau \quad y_{вих} = 0, \text{ при } x_{ex} \neq 0. \quad (2.6)$$

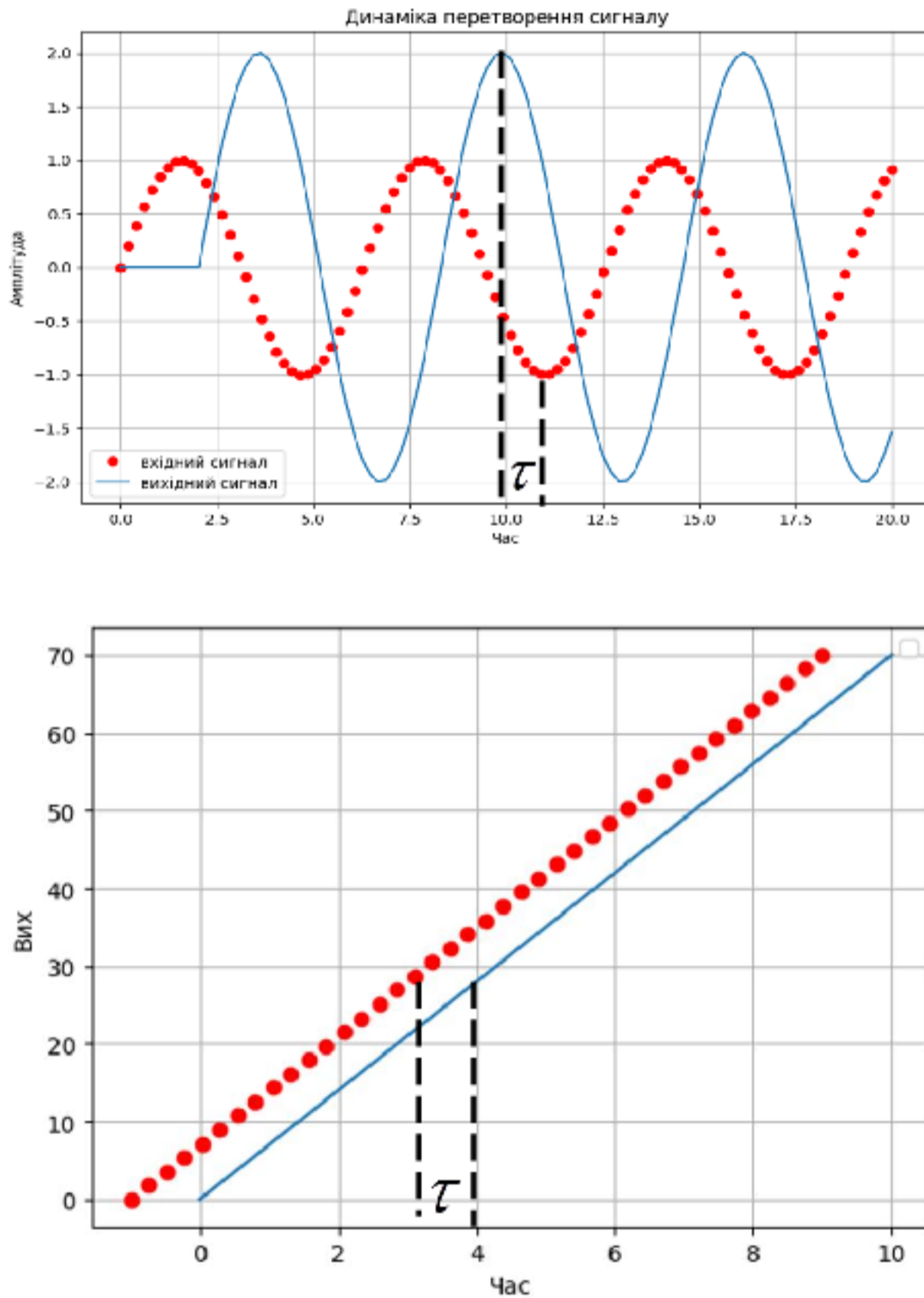


Рис. 2.1. Перетворення сигналу з урахуванням запізнення

Характеристика лінійності, як відношення між виходом перетворювача і вхідним сигналом. Чим більший коефіцієнт лінійності, тим точніше буде

вимірювання. Рівняння характеристики лінійності вимірювального каналу може мати наступний вигляд:

$$y = kx + b, \quad (2.7)$$

де  $x$  - вхідний сигнал,  $y$  - вихідний сигнал,  $k$  - коефіцієнт пропорційності,  $b$  - зсув сигналу.

Рівняння (2.7) відображає лінійну залежність між вхідним та вихідним сигналами в зоні лінійної роботи вимірювального каналу. Якщо вимірювальний канал є лінійним, то коефіцієнт пропорційності  $k$  залишається постійним для будь-якого значення вхідного сигналу. Зсув сигналу  $b$  може враховувати будь-які нелінійні ефекти, такі як зсув нуля, амплітудні спотворення та інші.

У загальному випадку, характеристика лінійності вимірювального каналу є важливим показником його якості, оскільки вона відображає точність та стабільність вимірювань у всьому діапазоні вхідного сигналу.

Отже, вимірювальний канал може мати різні рівні лінійності в різних діапазонах вхідного сигналу. Таким чином, характеристика лінійності може бути описана різними рівнями коефіцієнта пропорційності та зсуву сигналу для різних діапазонів вхідного сигналу. Разом з тим тип вимірювального каналу залежить від вимірювальної системи (ВС), які мають наступні класифікаційні характеристики (рис. 2.2)

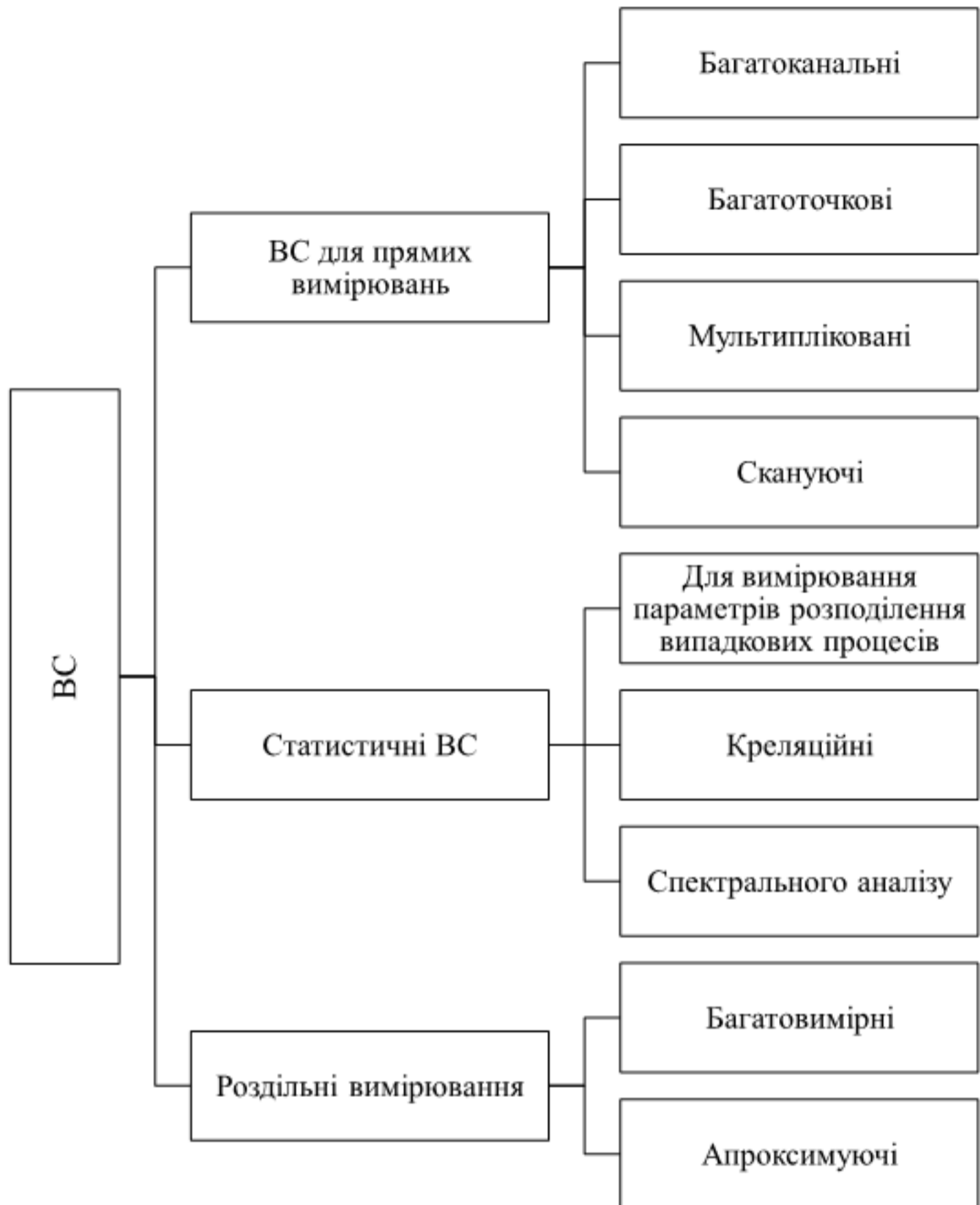


Рис. 2.2. Класифікація вимірювальних систем, [85], [86], [87], [88].

Виходячи із представленої схеми додатковий вимірювальний канал, може бути використаний для збільшення точності та швидкодії вимірювального простору.

Розглянемо типову структуру вимірювального каналу лінійного перетворювача, де представлено реальні характеристики вихідного сигналу та ідеальні. Так, бачимо, що реальний вихідний сигнал має певний діапазон відхилення. Якщо вимірювання в даному діапазоні задовольняє

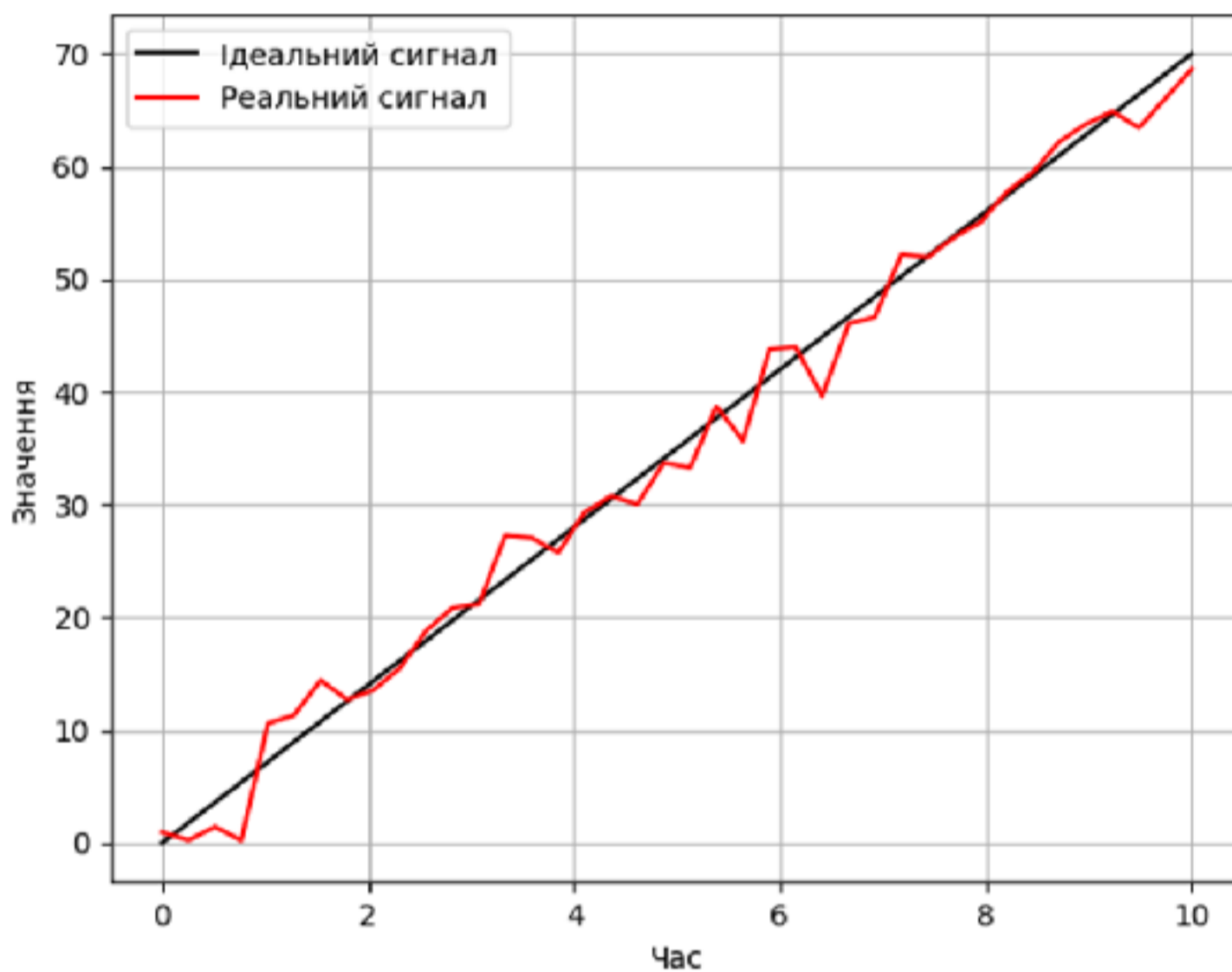
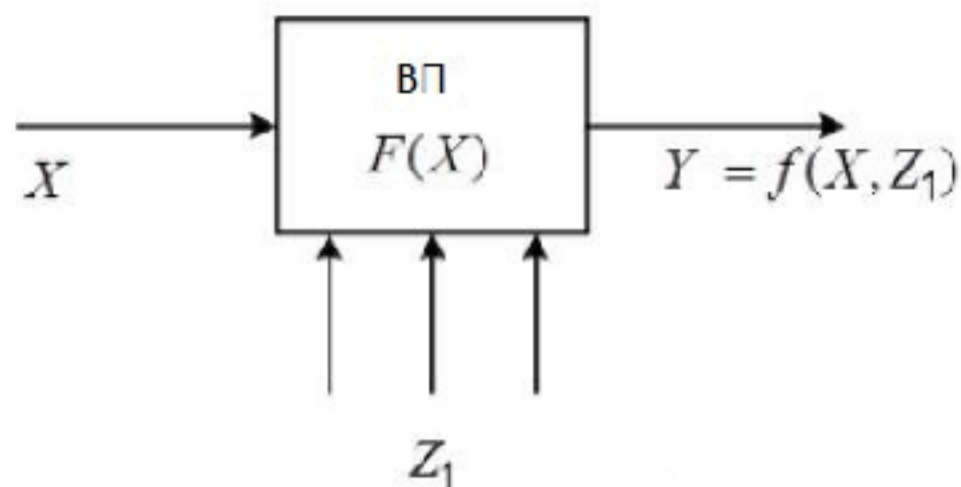


Рис. 2.3 Лінійне перетворення сигналу

потреbam точності відхиленням можна знехтувати. Такі відхилення залежать від чутливості вимірювальних приладів, яка може бути виражена кутом нахилу лінійної характеристики вихідного сигналу:

$$k_x = \frac{y_{\max}}{x_{\text{ев}}} = \text{tg}\alpha, \quad (2.8)$$

де  $k_x$  - коефіцієнт перетворення вимірювального перетворювача;  $\alpha$  - кут нахилу лінійної характеристики (див рис. 2.3).

Нелінійна характеристика вимірювального перетворення, характеризується функцією перетворення:

$$y_{\text{вих}} = y_{\text{вх}}(x_{\text{вх}}), \quad (2.9)$$

Так, чутливість вимірювальних перетворювачів може бути представлена, як функція вхідної величини:

$$S_x(x_{\text{вх}}) = \frac{dy_{\text{вих}}}{dx_{\text{вх}}}, \quad (2.10)$$

Границі чутливості у характеристиці вимірювального перетворювача з'являються до часового запізнення:

$$y_{\text{вих}}(t) = k_x x_{\text{вх}}(t - \tau), \quad (2.11)$$

де  $\tau$  - запізнення.

Для виведення основних лінійних характеристик вимірювального каналу лінійного перетворювача динамічного моменту електродвигуна та розрахунку його напруг та деформацій, представимо візуальну структуру валу в процесі деформації (рис. 2.4). Розглянемо квадратний майданчик у певній точці плоского конструктивного елемента.

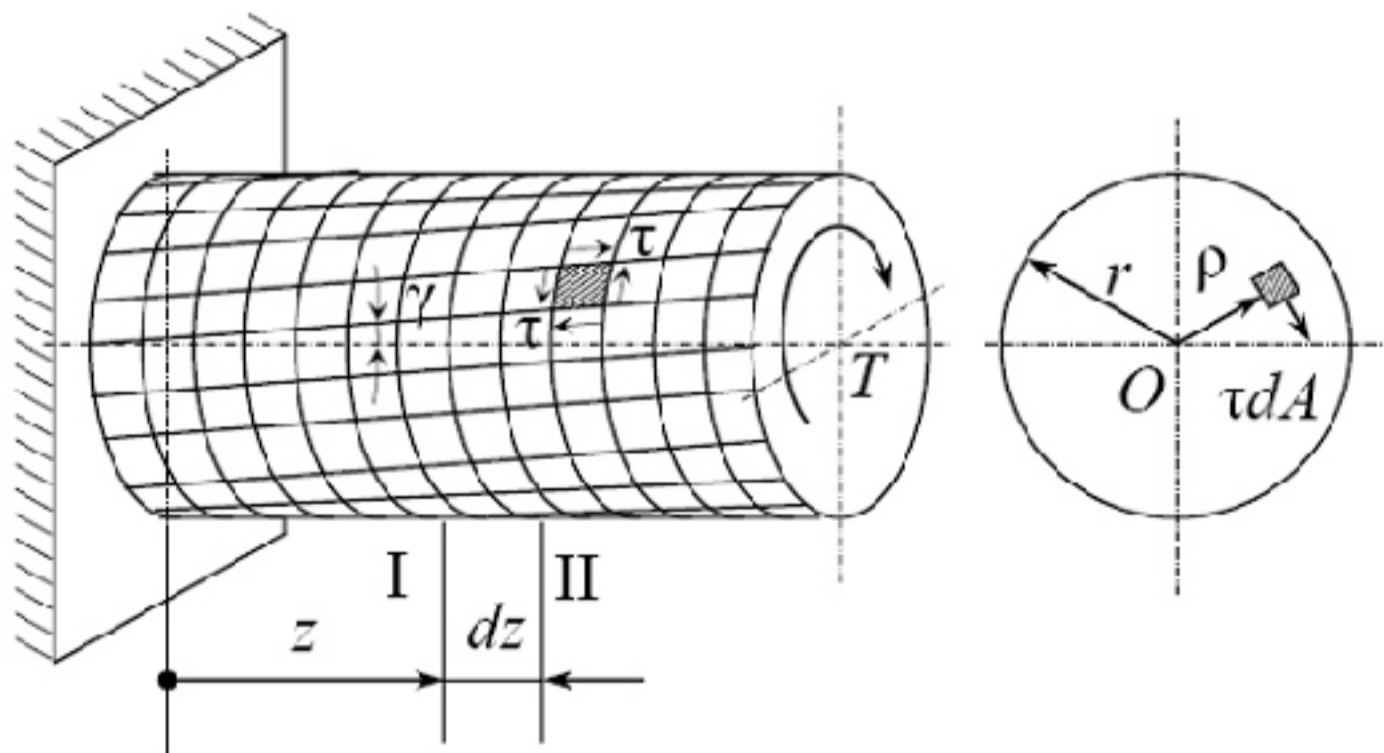


Рис. 2.4. Обертальна деформація валу, [89]

На рис. 2.4 видно, що він схильний до деформації зсуву. Так, в результаті кручення він змінює форму.

Для визначення дотичних напруг, що виникають в результаті обертальних деформацій, необхідно знати нормальні напруження та деформації у двох різних напрямках та враховувати, що вони  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  пов'язані з деформаціями у напрямках X та Y (рис. 2.5) наступними залежностями: [90]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_1, \\ \varepsilon_2 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_2\end{aligned}\quad (2.12)$$

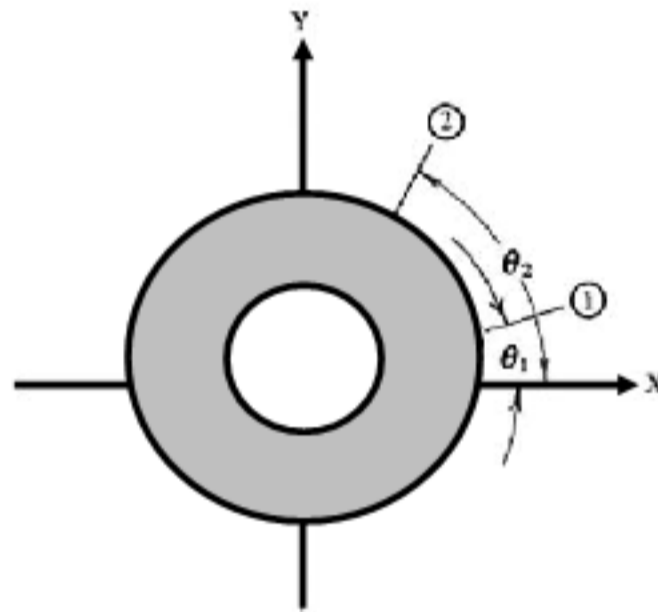


Рис. 2.5 Визначення обертальних деформацій

З урахуванням (2.12) обертальні деформації можна виразити наступною формулою:

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - (\varepsilon_x - \varepsilon_y)(\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2)}{\cos 2\theta_2 - \sin 2\theta_2}, \quad (2.13)$$

Якщо  $\cos 2\theta_1 \equiv \cos 2\theta_2$ , то:

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2}, \quad (2.14)$$

При цьому:  $\theta_1 + \alpha = -\pi/2, 0, \pi/2, \pi, \dots, \frac{n\pi}{2} = \theta_2 - \alpha$

Якщо вісь датчика моменту співпадає з напрямком по осі X, то:

$$\theta_1 = -\theta_2 = \alpha; \gamma_{xy} = -\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sin 2\theta_2} = -\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sin 2\theta_1} = -\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sin 2\alpha}, \quad (2.15)$$

Таким чином, можна зробити висновок, що різниця між деформаціями, яка визначається будь-якими двома довільно орієнтованими тензодатчиками, в однорідному полі деформацій пропорційна деформації зсуву вздовж осі, що проходить по осі симетрії тензодатчика, незалежно від кута між датчиками.

Використовуючи діаграму Мора [91], головні деформації можна визначити наступним чином:

$$\varepsilon_p, \varepsilon_q = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}, \quad (2.16)$$

З цього випливає, що майданчик на який діють зсувні зусилля, не змінюється в процесі деформування, що дозволяє проводити лінійне перетворення механічної деформації на зміну опору, відповідно зміну напруги в заданому діапазоні, тобто діапазону, максимальний рівень вхідного сигналу якого, перетворювач може виміряти.

## 2.2. Математичне моделювання обертальних параметрів

### електродвигунів постійного струму та асинхронних двигунів

Виходячи із розглянутої в першому розділі класифікації електродвигунів, слід звернути увагу на способи вимірювання обертальних моментів, до яких слід віднести прямі вимірювання, шляхом безпосереднього вимірювання кута деформації валу, який виникає в результаті дії моменту опору, або опосередковані, враховуючи параметри потужності, струму, напруги, кутової швидкості та інші, притаманні окремому типу електродвигуна. Для розуміння можливостей визначення моменту в умовах дестабілізуючих факторів впливу, з метою оптимізації вимірювань зазначеними способами, слід розглянути рівняння, які описують фізичні процеси, що відбуваються у електричних та механічних системах електродвигунів. Так, перехідні характеристики, в залежності від типу електродвигуна є різними.



Розглянемо динамічні характеристики електродвигунів постійного струму, математичному описанню, яких приділено багато уваги, [92], [93], [94], [95].

Запропонована в роботі [96] математична модель, яка основана на наступній схемі електромеханічного перетворення (рис. 2.6), має такий вигляд:

$$\begin{aligned} U_3 &= i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} \\ U_я &= i_я R_я + L_я \frac{di_я}{dt} + e_{об} \end{aligned} \quad (2.17)$$

де  $U_3$  - напруга обмотки збудження;  $U_я$  - напруга обмотки якоря;  $i_3$ ,  $i_я$ ,  $R_3$ ,  $R_я$ ,  $L_3$ ,  $L_я$  - струми, опір та індуктивності, відповідно обмотки збудження та обмотки якоря;  $e_{об} = c_e \omega \Phi$  - ЕРС обертання.

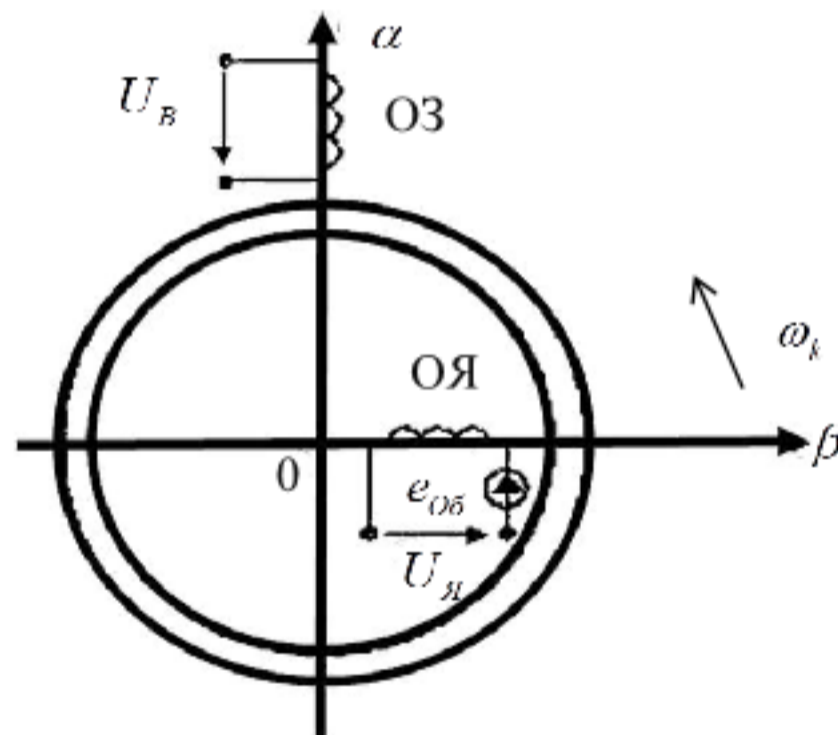


Рис. 2.6. Схема електромеханічного перетворення ЕД постійного струму

У схемі, що представлена на рис. 1..., в якості координатних вісей прийнято вісі  $(\alpha, \beta, 0)$ , що нерухомі в просторі ( $\omega_k = 0$ ). На відповідних осях, розташовані обмотки ОЯ і ОЗ. Це вказує на те, що магнітні поля, які взаємодіють, в електродвигунах постійного струму взаємно перпендикулярні і нерухомі відносно одна одної. ЕРС обертання  $e_{об}$  наводиться тільки в

обертальній частині електродвигуна (в обмотці якоря (ОЯ)), а в обмотці збудження (ОЗ) ЕРС обертання не наводиться, оскільки магнітне поле обмотки якоря нерухоме в просторі.

Доповнивши рівняння (2.17) рівняннями механічної рівноваги для електромагнітного моменту, представленого через струми двох обмоток можна звести їх до вигляду рівнянь Коші [97], та отримати систему рівнянь, яка описує процеси в електромеханічному перетворювачі постійного струму:

$$\begin{aligned} \frac{di_3}{dt} &= \frac{1}{L_3}(U_3 - i_3 R_3) \\ \frac{di_{я}}{dt} &= \frac{1}{L_{я}}(U_{я} - i_{я} R_{я} - \omega L_m i_3) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J_{\Sigma}}(L_m i_{я} i_3 - M_c) \\ M &= L_m i_{я} i_3, \end{aligned} \quad (2.18)$$

де  $L_m$  взаємна індуктивність обмотки якоря та обмотки збудження.

Розрахункова частина математичної моделі перехідних процесів електродвигунів постійного струму може бути виконана з використанням чисельних методів розрахунку диференціальних рівнянь, склавши систему ітераційних рівнянь. Для цього, в роботі [96] запропоновано наступний вираз на основі методу Ейлера:

$$\begin{pmatrix} t_{j+1} \\ i_{3j+1} \\ i_{яj+1} \\ \omega_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_j + dt \\ i_{3j} + dt \left[ \frac{U_3 - R_3 i_{3j}}{L_3} \right] \\ i_{яj} + dt \left[ \frac{U_{я} - R_{я} i_{яj} - \omega_j \cdot L_m \cdot i_{3j}}{L_c} \right] \\ \omega_j + \frac{dt}{J_{\Sigma}} (L_m \cdot i_{яj} \cdot i_{3j} - M_c) \end{pmatrix}, \quad (2.19)$$

$$M_j = L_m \cdot i_{яj} \cdot i_{3j}$$

Також додатково розраховують повні індуктивності обмотки якоря та обмотки збудження за такими виразами:  $L_{я} = L_{\sigma r} + L_m$ ,  $L_3 = L_{\sigma S} + L_m$

формуючи початкові умови для досліджуваних змінних:  $\begin{pmatrix} t_0 \\ ia_0 \\ ic_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $\omega_0 = 0$ ,

а також визначають число ітерацій  $j = 0 \dots N$ ,

де  $L_m$  - взаємна індуктивність обмотки якоря та обмотки збудження;

$L_{\sigma r}$  - індуктивність розсіювання обмотки якоря;  $L_{\sigma S}$  - індуктивність розсіювання обмотки збудження;  $U_B$  - напруга в ланцюзі якоря;  $R_{я}$  - опір обмотки якоря;  $R_3$  - опір обмотки збудження;  $J$  - сумарний момент інерції двигуна;  $M_C$  - момент статичного навантаження (момент опору на валу двигуна);  $U_3$  - напруга обмотки збудження;  $N$  - число ітерацій;  $dt$  - крок ітерації.

Для вирішення системи ітераційних рівнянь розроблено програмний код, що дозволив, використати вибірккові дані та представити результати (рис. 2.7).

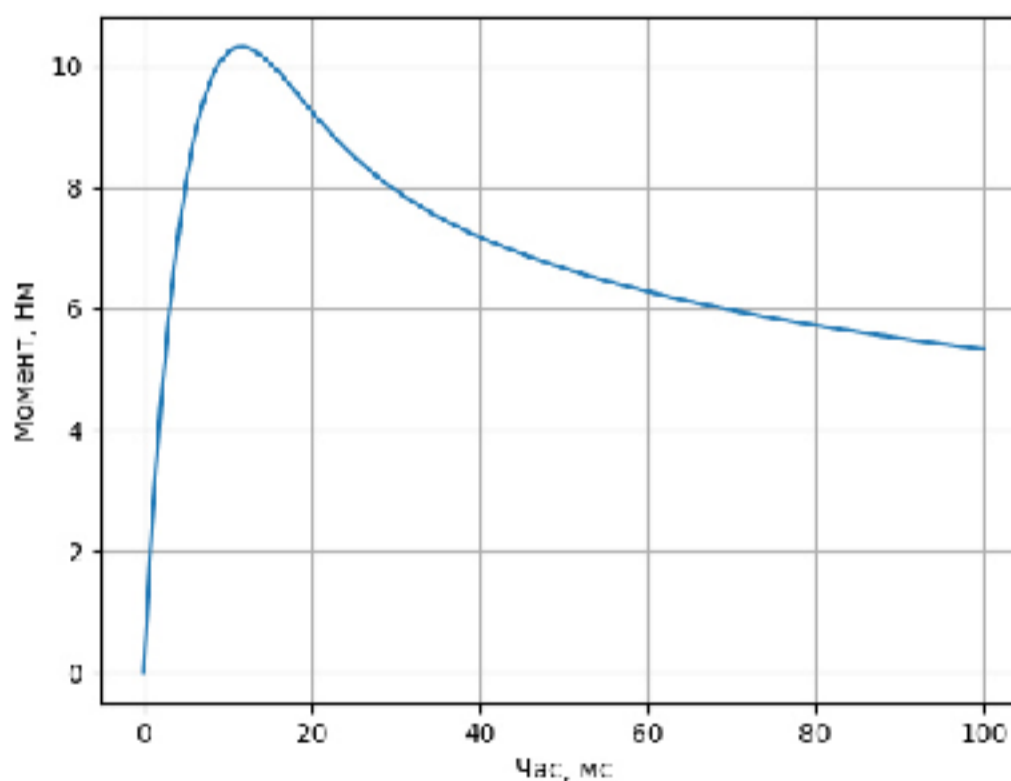


Рис. 2.7. Результати моделювання (2.19)

Код:

```
import matplotlib.pyplot as plt
# Початкові умови
t0, iB0, i0, w0 = 0, 0, 0, 0
# Значення параметрів
R, L, Lc, Lm, Js, Mc, U = 1, 0.1, 0.005, 0.05, 0.01, 0.01, 12
# Крок ітерації
dt = 0.001
# Масиви для зберігання даних
i_arr = [i0]
w_arr = [w0]
# Обчислення
for i in range(100):
    t = t0 + i * dt
    iB = iB0 + dt * ((U - R * i_arr[-1]) / L)
    i = i_arr[-1] + dt * ((U - R * i_arr[-1] - w_arr[-1] * Lm * i_arr[-1]) / Lc)
    w = w_arr[-1] + dt * ((Lm * i_arr[-1] * i_arr[-1] - Mc) / Js)
    i_arr.append(i)
    w_arr.append(w)
# Побудова графіку
plt.grid()
plt.plot(i_arr)
plt.xlabel('Час, мс')
plt.ylabel('Момент, Нм')
plt.show()
```

Разом з тим, запропонована математична модель не враховує зовнішніх факторів, таких як температура, вібрація, тощо, які можуть впливати на роботу електродвигуна. Деякі параметри можуть змінюватися з часом, наприклад, опір може змінюватися при зміні температури, що може призвести до неточності результатів. Рівняння може бути непридатним для систем з нелінійними властивостями, такими як гістерезис, або насичення магнітного поля, що може призвести до неточності результатів.

Для врахування зовнішніх факторів та змінних параметрів модель можна модифікувати, додавши до неї додаткові рівняння, які описують вплив цих факторів. Наприклад, можна додати рівняння для врахування температури, яке описує зміну опору з температурою. Також можна додати рівняння, які описують ефект гістерезису та насичення магнітного поля, якщо ці ефекти мають значний вплив на роботу електродвигуна.

З урахуванням зазначеного, вираз (2.19) можна представити наступним чином:

$$\begin{pmatrix} t_{j+1} \\ i_{3j+1} \\ i_{яj+1} \\ \omega_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_j + dt \\ i_{Bj} + dt \left[ \frac{U - R(T_j)i_j}{L(T_j)} \right] \\ i_j + dt \left[ \frac{U - R(T_j)i_j - \omega_j L_m i_j}{L_c} \right] \\ \omega_j + \frac{dt}{J_\Sigma} \left( L_m i_j i_j - M_c - J_{eq} \frac{d\omega}{dt} \right) \\ \omega_j + \frac{dt}{J_{eq}} (M_c - L_m i_j i_{Bj}) \end{pmatrix}, \quad (2.20)$$

де додано додаткові параметри  $T_j$  та  $T_{j+1}$ , що описують температуру системи на поточному та наступному кроці часу; враховується залежність опору від температури через параметр  $R(T_j)$ ; враховується вплив температури на індуктивність обмоток та електромагнітної сили, що генерується, через параметри  $L_m(T_j)$ .

В результаті в запропонований код, також буде внесено корективи:

```
import matplotlib.pyplot as plt
# Початкові умови
t0, iB0, i0, w0 = 0, 0, 0, 0
# Значення параметрів
R, L, Lc, Lm, Js, U = 1, 0.1, 0.005, 0.05, 0.01, 12
T0 = 10 # початкова температура
k1 = 0.04 # коефіцієнт пропорційності між моментом і температурою
k2 = 0.002 # коефіцієнт пропорційності між моментом і вібрацією
# Крок ітерації
dt = 0.001
# Масиви для зберігання даних
i_arr = [i0]
w_arr = [w0]
mc_arr = [k1*(T0-t0)] # початкове значення моменту
# Обчислення
for i in range(1000):
    t = t0 + i * dt
    iB = iB0 + dt * ((U - R * i_arr[-1]) / L)
    i = i_arr[-1] + dt * ((U - R * i_arr[-1] - w_arr[-1] * Lm * i_arr[-1]) / Lc)
    w = w_arr[-1] + dt * ((Lm * i_arr[-1] * i_arr[-1] - mc_arr[-1] - k2*w_arr[-1]) / Js)
    i_arr.append(i)
```

```

w_arr.append(w)
mc_arr.append(k1*(T0-t)+k2*w_arr[-1])
# Побудова графіку
plt.grid()
plt.plot(mc_arr)
plt.xlabel('Час, мс')
plt.ylabel('Момент, Нм')
plt.show()

```

Це дозволило отримати наступну перехідну характеристику (рис. 2.8)

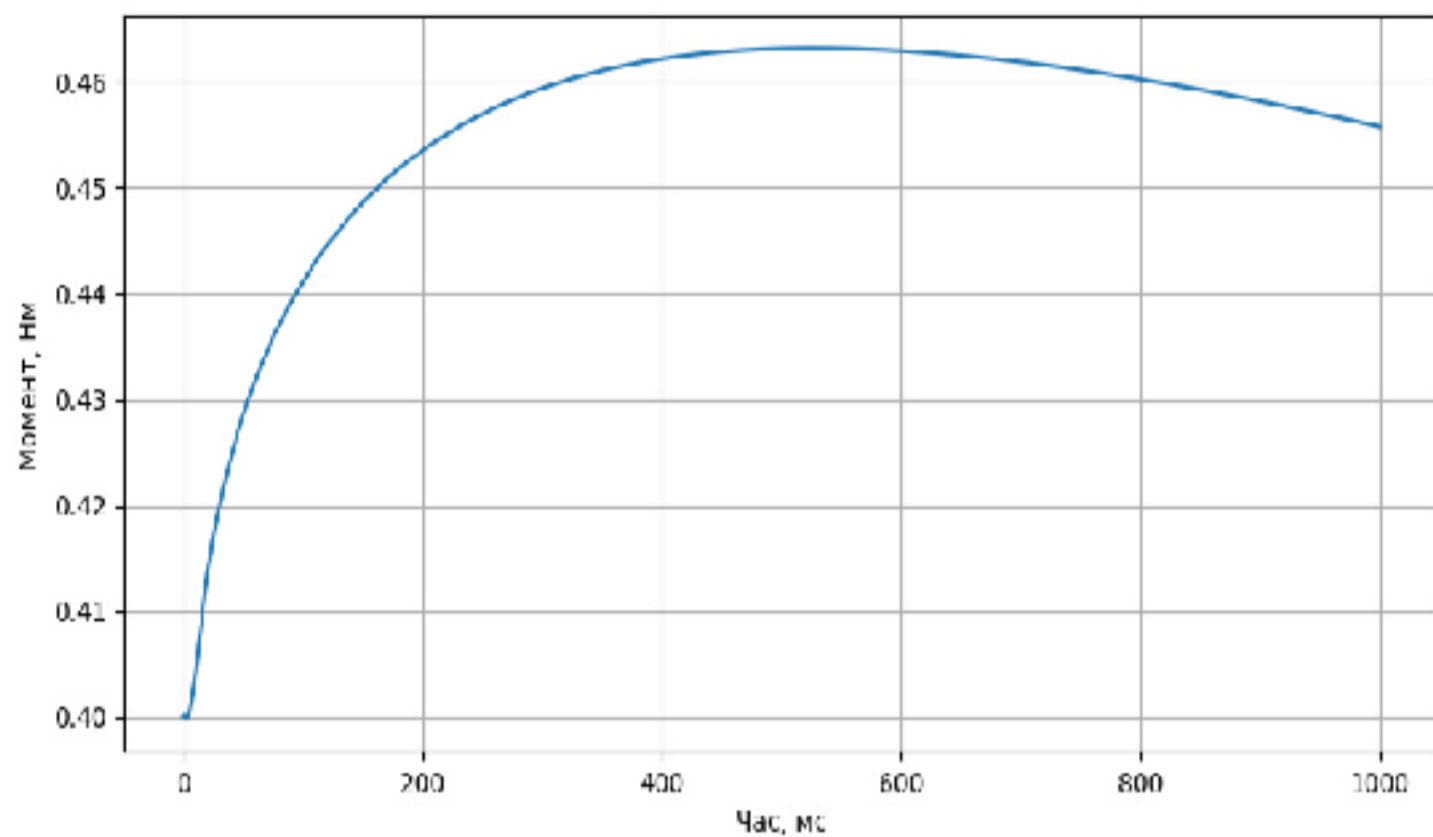


Рис. 2.8 Результати моделювання (2.20)

Процеси, що відбуваються в асинхронних електродвигунах змінного струму можуть бути представлені в осях  $(u, v, 0)$ , шляхом вирішення системи нелінійних диференціальних рівнянь (Рис. 2.9).

Такі рівняння трансформуються в залежності від системи координат. Такі залежності відрізняються кутовою швидкістю. Основна перевага використання різних координатних осей - це можливість отримання необхідної змінної та отримання постійних коефіцієнтів.

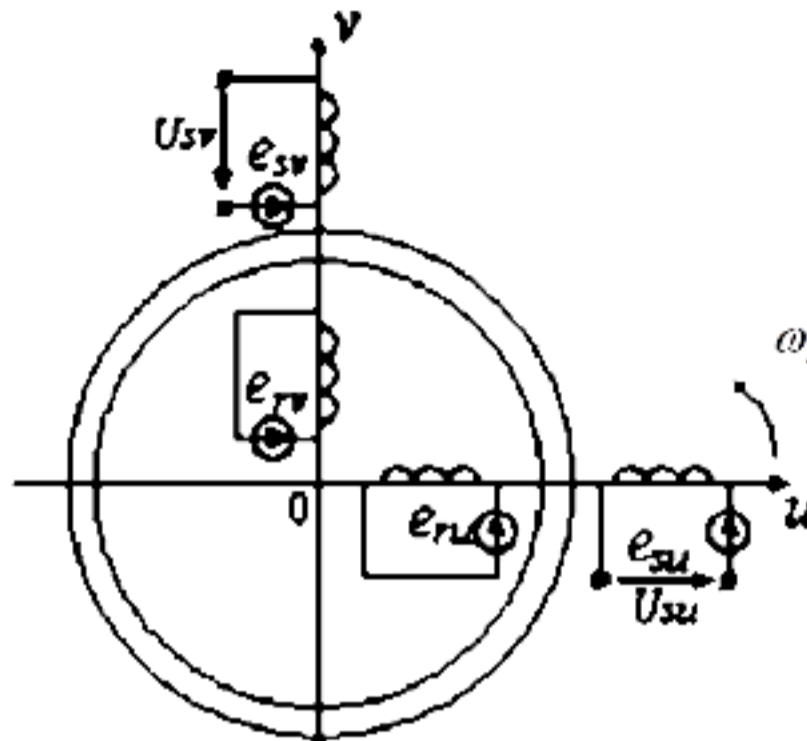


Рис. 2.9. Схема електромеханічного перетворення ЕД постійного струму, [99]

Рівняння, що описують перехідні процеси в асинхронному двигуні, який має довільну кутову швидкість запропоновані в працях [96, 98]:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_s &= R_s i_s + \frac{d}{dt} \dot{\Psi}_s + j\omega_k \dot{\Psi}_s \\
 0 &= R_r i_r + \frac{d}{dt} \dot{\Psi}_r + j(\omega_k - \omega) \dot{\Psi}_r \\
 M &= \frac{3}{2} p_n J_m (\dot{\Psi}_s \times i_s) \\
 J_\Sigma \frac{d}{dt} \omega &= M - M_o
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

де  $i_s, i_r, \dot{\Psi}_s, \dot{\Psi}_r, \dot{U}_s$ , миттєві значення узагальнених просторових векторів струмів, потокозчеплень та напруг обмоток статора та ротора,  $R_r, R_s$  - активні опори фаз обмоток статора і ротора,  $\omega, \omega_k$  - кутові швидкості ротора і координатних осей відповідно;  $M, M_o$  - електромагнітний момент двигуна, і момент опору його валу;  $J_\Sigma$  - сумарний момент інерції;  $p_n$  - число пар полюсів.

Представивши результуючі вектори у вигляді проєкцій на комплексній площини можна записати їх через речові та уявні частини в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_s &= U_{su} + jU_{sv} \\
 \vec{i}_r &= i_{ru} + ji_{rv} \\
 \dot{i}_r &= i_{su} + ji_{sv} \\
 \dot{\Psi}_r &= \Psi_{ru} + j\Psi_{rv} \\
 \dot{\Psi}_s &= \Psi_{su} + j\Psi_{sv}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Систему рівнянь (2.21) у разі для координатних вісей (x,y,0), де k=0 с можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned}
 U_{sx} &= i_{sx}R_s + \frac{d}{dt}\Psi_{sx} - \omega_c\Psi_{sy} \\
 U_{sy} &= i_{sy}R_s + \frac{d}{dt}\Psi_{sy} + \omega_c\Psi_{sx} \\
 0 &= i_{rx}R_r + \frac{d}{dt}\Psi_{rx} - (\omega_c - \omega)\Psi_{ry}, \\
 0 &= i_{ry}R_r + \frac{d}{dt}\Psi_{ry} + (\omega_c - \omega)\Psi_{rx} \\
 M &= \frac{3}{2}p_n(\Psi_{sx}i_{sy} - \Psi_{sy}i_{sx}) \\
 J_\Sigma \frac{d}{dt}\omega &= M - M_c
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

В даний час розроблено та використовується для дослідження динамічних режимів роботи АТ у тимчасовій області понад 50 різних математичних моделей [11, 12]. Найбільш стійкою та швидкодіючою моделлю є математична модель АТ, представлена в осях (x,y,0), де в якості змінних використовують потокозчеплення обмоток статора і ротора  $S$  і  $r$



Виражаючи струми через потокозчеплення, та розписуючи систему щодо похідних, одержують систему рівнянь (2.24). У координатних осях (x, y, 0), що обертаються у просторі з кутовим швидкістю  $\omega_k = \omega_c$ , проекції узагальненого вектора напруги обмотки статора  $U_{sx}$  і  $U_{sy}$  є постійними величинами. У моделі зазвичай поєднують вектор напруги обмотки статора з речовинною віссю координатної системи та відносно значення напруги за цією осі x приймають рівним 1, а по осі y - рівним нулю.

Математична модель асинхронного двигуна, як і двигуна постійного струму, може бути представлена з використанням методу Ейлера

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}\Psi_{sx} &= U_{sx} - \alpha'_s \Psi_{sx} + \alpha'_s K_r \Psi_{rx} + \omega_c \Psi_{sy}; \\
 \frac{d}{dt}\Psi_{sy} &= -\alpha'_s \Psi_{sy} + \alpha'_s K_r \Psi_{ry} - \omega_c \Psi_{sx}; \\
 \frac{d}{dt}\Psi_{rx} &= -\alpha'_r \Psi_{rx} + \alpha'_r K_s \Psi_{sx} + \omega_c \Psi_{ry}; \\
 \frac{d}{dt}\Psi_{ry} &= -\alpha'_r \Psi_{ry} + \alpha'_r K_s \Psi_{rx} - \omega_c \Psi_{rx}; \\
 M &= \frac{3}{2} p_n \omega_c \frac{K}{x_c \sigma} (\Psi_{rx} \Psi_{sy} - \Psi_{sx} \Psi_{ry}); \\
 \frac{d}{dt}\omega &= \frac{p_n}{J_\Sigma} (M - M_c).
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

Використовуючи систему рівнянь (3.24), розрахункову модель асинхронного двигуна в можна подати у вигляді системи ітераційних рівнянь (2.26) за наступних вихідних даних та початкових умов.

Вихідні дані:  $R_s = 0.031, R_r = 0.063, L_s = 1.02, L_r = 1.07, L_m = 1, U_{sx} = 1,$   
 $\omega_c = 1, p_n = 1, M_c = 0, J_\Sigma = 100.$

Додаткові обчислення (розрахунок коефіцієнтів електродвигуна):

$\sigma = \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  - коефіцієнт розсіювання Блонделя;

$\alpha'_s = \frac{R_s}{L_s \sigma}$  - коефіцієнт загасання процесів в обмотці статора при замкнутій

обмотці ротора;  $\alpha'_r = \frac{R_r}{L_r \sigma}$  - коефіцієнт згасання процесів в обмотці ротора

при замкнутій обмотці статора;  $K_s = \frac{L_m}{L_s}$  - коефіцієнт взаємозв'язку обмотки

статора з обмоткою ротора;  $K_r = \frac{L_m}{L_r}$  - коефіцієнт взаємозв'язку обмотки

статора з обмоткою ротора.

Початкові умови:

$$\begin{pmatrix} \Psi_{sx_0} \\ \Psi_{sy_0} \\ \Psi_{rx_0} \\ \Psi_{ry_0} \\ \omega_0 \\ M_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, t_0 = 0, dt = 0.01, j = 0 \dots 1000 \quad (2.25)$$

Система ітераційних рівнянь:

$$\begin{pmatrix} t_{j+1} \\ \Psi_{sx_{j+1}} \\ \Psi_{sy_{j+1}} \\ \Psi_{rx_{j+1}} \\ \Psi_{ry_{j+1}} \\ \omega_{j+1} \\ M_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_j + dt \\ \Psi_{sx_j} + dt \left( U_{sx} - \alpha'_s \Psi_{sx} + K_r \alpha'_s \Psi_{rx_j} + \omega_c \Psi_{sy_j} \right) \\ \Psi_{sy_j} + dt \left( -\alpha'_s \Psi_{sy_j} + K_r \alpha'_s \Psi_{ry_j} - \omega_c \Psi_{sx_j} \right) \\ \Psi_{rx_j} + dt \left( -\alpha'_r \Psi_{rx_j} + K_s \alpha'_r \Psi_{sx_j} + (\omega_c - \omega_j) \Psi_{ry_j} \right) \\ \Psi_{ry_j} + dt \left( -\alpha'_r \Psi_{ry_j} + K_s \alpha'_r \Psi_{sy_j} - (\omega_c - \omega_j) \Psi_{rx_j} \right) \\ \omega_j + dt \left( \frac{p_n}{J_\Sigma} \left( 1.5 p_n \frac{K_r}{\sigma L_s} (\Psi_{rx_j} \Psi_{sy_j} - \Psi_{sx_j} \Psi_{ry_j}) - M_c \right) \right) \\ \left( 1.5 p_n \frac{K_r}{\sigma L_s} (\Psi_{rx_j} \Psi_{sy_j} - \Psi_{sx_j} \Psi_{rx_j}) \right) \end{pmatrix}, \quad (2.26)$$

В результаті вирішення даного рівняння з використанням наступного програмного коду:

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
Rs = 0.031
Rr = 0.063
Ls = 1.03
Lr = 1.07
Lm = 1
Usx = 1
wc = 1
pn = 1
Mc = 0
JSigma = 100
Rs = 0.031
Rr = 0.063
Ls = 1.02
Lr = 1.08
Lm = 1
Usx = 1
w_c = 1
p_n = 1
M_c = 0
J_Sigma = 100
alpha_s = Rs / Ls
alpha_r = Rr / Lr
Kr = Lm / Lr
Ks = Lm / Ls
sigma = Lm ** 2 / (Lr * Ls)
Psi_sx = 0
Psi_sy = 0
Psi_rx = 0
Psi_ry = 0
omega = 0
K_r=0
Rs = 0.042
Rr = 0.074
Ls = 1.03
Lr = 1.08
Lm = 1
Usx = 1
w_c = 1
p_n = 1
M_c = 0
J_Sigma = 200
L_s=1.03
# Задання часу моделювання та кроку інтегрування
t_max = 1
dt = 0.001
num_steps = int(t_max / dt)
# Створення списків для зберігання значень змінних
t_values = np.zeros(num_steps)
Psix_s_values = np.zeros(num_steps)
Psix_r_values = np.zeros(num_steps)

```

```

Psiy_s_values = np.zeros(num_steps)
Psiy_r_values = np.zeros(num_steps)
omega_values = np.zeros(num_steps)
M_values = np.zeros(num_steps)
# Задання початкових значень змінних
t_values[0] = 0
Psix_s_values[0] = 0
Psiy_s_values[0] = 0
Psix_r_values[0] = 0
Psiy_r_values[0] = 0
omega_values[0] = 0
M_values[0] = 0
# Час та крок
t_final = 10
dt = 0.01
# Ітерація по часу
t_values = [t * dt for t in range(int(t_final / dt))]
Psi_sx_values = [Psi_sx + dt * (Usx - (Rr * Psi_rx - w_c * Psi_sy - Rs * Psi_sx) / Ls) for _ in
t_values]
Psi_sy_values = [Psi_sy + dt * (Rr * Psi_ry - w_c * Psi_sx - Rs * Psi_sy) / Ls for _ in t_values]
Psi_rx_values = [Psi_rx + dt * ((w_c - omega) * Psi_ry - Rr * Psi_rx / Lr + Rs * K_r / Lr *
Psi_sx) for _ in t_values]
Psi_ry_values = [Psi_ry + dt * (-(w_c - omega) * Psi_rx - Rr * Psi_ry / Lr + Rs * K_r / Lr *
Psi_sy) for _ in t_values]
omega_values = [omega + dt * ((1.5 * p_n / J_Sigma) * (1.5 * p_n * K_r / (sigma * L_s) *
(Psi_rx * Psi_sy - Psi_sx * Psi_ry)) - M_c / J_Sigma) for _ in t_values]
M_values = [1.5 * p_n * K_r / (sigma * L_s) * (Psi_rx_values[i] * Psi_sy_values[i] -
Psi_sx_values[i] * Psi_ry_values[i]) for i in range(len(t_values))]
# Побудова графіків
fig, axs = plt.subplots(5, sharex=True, figsize=(8, 16))
axs[0].plot(t_values, Psi_sx_values)
axs[0].set_ylabel('Ψsx')
axs[1].plot(t_values, Psi_sy_values)
axs[1].set_ylabel('Ψsy')
axs[2].plot(t_values, Psi_rx_values)
axs[2].set_ylabel('Ψrx')
axs[3].plot(t_values, Psi_ry_values)
axs[3].set_ylabel('Ψry')
axs[4].plot(t_values, omega_values)
axs[4].set_ylabel('ω')
axs[4].set_xlabel('Час')
plt.show()

```

Разом з тим, вираз (2.24), не враховує тертя у підшипниках, тому його можна вдосконалити додаванням додаткових компонентів:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\Psi_{sx} &= U_{sx} - \alpha'_s \Psi_{sx} + \alpha'_s K_r \Psi_{rx} + \omega_c \Psi_{sy}; \\
\frac{d}{dt}\Psi_{sy} &= -\alpha'_s \Psi_{sy} + \alpha'_s K_r \Psi_{ry} - \omega_c \Psi_{sx}; \\
\frac{d}{dt}\Psi_{rx} &= -\alpha'_r \Psi_{rx} + \alpha'_r K_s \Psi_{sx} + \omega_c \Psi_{ry} - \frac{\mu_r x \Psi_{rx}^2}{B_r}; \\
\frac{d}{dt}\Psi_{ry} &= -\alpha'_r \Psi_{ry} + \alpha'_r K_s \Psi_{rx} - \omega_c \Psi_{rx} - \frac{\mu_r y \Psi_{ry}^2}{B_r}; \\
M &= \frac{3}{2} p_n \omega_c \frac{K}{x_c \sigma} (\Psi_{rx} \Psi_{sy} - \Psi_{sx} \Psi_{ry}); \\
\frac{d}{dt}\omega &= \frac{P_n}{J\Sigma} (M - M_c).
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Зокрема, у рівнянні для компоненти  $\Psi_{rx}$  додано член  $\frac{\mu_r x \Psi_{rx}^2}{B_r}$ , а в рівнянні для компоненти  $\Psi_{ry}$  додано член  $\frac{\mu_r y \Psi_{ry}^2}{B_r}$ . Тут  $\mu_r$  - проникність сердечника,  $x$  та  $y$  - відстані до відповідних країв сердечника,  $B_r$  - індукція.

Ці додаткові члени враховують втрати, які залежать від магнітної індукції та є нелінійними функціями квадрату магнітного потоку.

### 2.3. Моделювання роботи трифазного безколекторного двигуна постійного струму (BLDCM)

Трифазні безщіткові двигуни постійного струму (BLDCM) мають важливі переваги в порівнянні з щітковими двигунами та асинхронними двигунами. Вони мають кращі характеристики швидкості, моменту, високу ефективність, високу динамічну реакцію та малі конструкції [99]. Проектування та аналіз таких машин, дозволить забезпечити точні прогнози поведінки систем вимірювання обертальних моментів в режимі реального часу. Тому, протягом останнього десятиліття класичні та сучасні методи проектування систем керування, що включають передові математичні

методи, значною мірою сприяли програмним засобам, які можуть забезпечити точні прогнози поведінки таких систем.

Останніми роками BLDCM став більше використовуватись у таких сферах, як: автомобільна, аерокосмічна, побутова, медична, приладобудівна. Обертальний момент, який передається валу, вищий у порівнянні з іншими типами електродвигунів. Разом з тим, BLDCM потребує інформації про положення ротора для створення моменту. Інформацію про положення зазвичай отримують шляхом вимірювання за допомогою таких пристроїв, як кодер положення, револьвер, або датчики Холла. Ці пристрої збільшують розмір машини, вартість та інерцію ротора. Трифазний BLDCM має три фазні обмотки на статорі та ротор з постійним магнітом. Різниця між цією машиною та синхронним двигуном з постійними магнітами (PMSM) полягає в тому, що зворотна ЕРС машини є трапецієподібною [100]. Тому, існує певна плутанина щодо правильних моделей, які слід використовувати в кожному конкретному випадку. BLDCM дуже схожий на стандартну синхронну машину з намотаним ротором, за винятком того, що BLDCM не має демпферних обмоток, а збудження забезпечується постійним магнітом замість обмотки збудження [101].

На рис. 2.10 показана динамічна еквівалентна схема BLDCM.

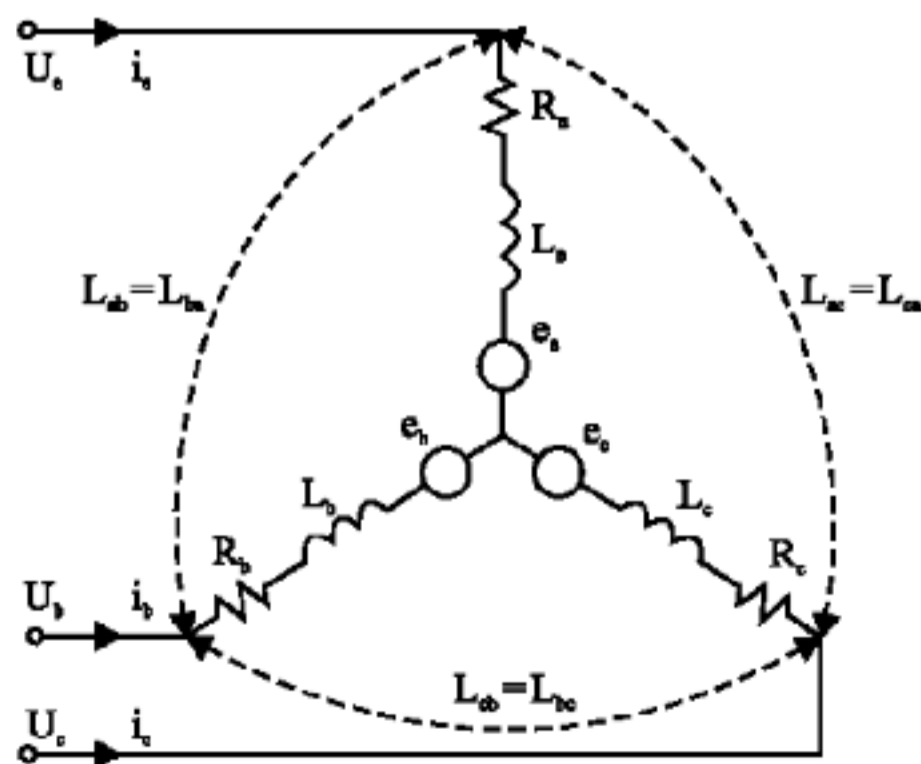


Рис. 2.10. Еквівалентна схема BLDCM, [104]

Під час моделювання передбачається загальне з'єднання «типу зірка» обмоток статора, трифазна збалансована система та однорідний повітряний зазор. Для цієї моделі рівняння фазової напруги статора має наступний вигляд, [101]:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

де  $u_a, u_b, u_c$  - компоненти напруги, що подаються на фазні обмотки двигуна;

$R_a, R_b, R_c$  - опори фазних обмоток;  $i_a, i_b, i_c$  - струми, що протікають кожною фазою;  $L_a, L_b, L_c$  - індуктивності самої фази;  $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$  - взаємні індуктивності між фазами;  $\frac{d}{dt}$  - диференціювання за часом;  $e_a, e_b, e_c$  - електромагнітні сили, які виникають в обмотках двигуна.

Є й інші математичні моделі описання динамічних характеристик електродвигунів даного типу, [102]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_e}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

де  $i_a, i_b, i_c$  - струми фаз двигуна,  $\omega$  - швидкість обертання,  $R$  - опір фази двигуна,  $L$  - індуктивність фази двигуна,  $K_e$  - електромагнітна стала,  $J$  - момент інерції ротора,  $B$  - коефіцієнт в'язкості,  $v_a, v_b, v_c$  - напруги, що подаються на фази двигуна.

Для вирішення виразу (2.28) із застосуванням умовних параметрів, було створено програмний код, який дозволив візуалізувати результати зміни напруги під час пускового моменту (рис. 2.11):

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Отримання параметрів
Ra = 0.5
Rb = 0.5
Rc = 0.5
La = 0.5
Lab = 1
Lac = 1
Lba = 1
Lb = 0.5
Lbc = 1
Lca = 1
Lcb = 1
Lc = 0.5
Ea = 2
Eb = 2
Ec = 2
# Визначення діапазону часу та розмір кроку
t_start = 0
t_stop = 50
dt = 1
t = np.arange(t_start, t_stop, dt)
# Визначити початкові поточні значення
Ia0 = 0
Ib0 = 0
Ic0 = 0
# Визначення системи рівнянь
def dI_dt(I, t):
    R = np.array([[Ra, 0, 0], [0, Rb, 0], [0, 0, Rc]])
    L = np.array([[La, Lab, Lac], [Lba, Lb, Lbc], [Lca, Lcb, Lc]])
    dI = np.dot(np.linalg.inv(L), -np.dot(R, I) - np.array([Ea, Eb, Ec]))
    return dI
# Розв'язок системи рівнянь з використанням програмної бібліотеки scipy, модуля
odeint
from scipy.integrate import odeint
I = odeint(dI_dt, [Ia0, Ib0, Ic0], t)
# Обчислення значень напруги
U = np.dot(np.array([[Ra, 0, 0], [0, Rb, 0], [0, 0, Rc]]), I.T).T + np.dot(np.array([[La,
Lab, Lac], [Lba, Lb, Lbc], [Lca, Lcb, Lc]]), np.gradient(I.T, dt, axis=1)).T + np.array([Ea, Eb,
Ec])
# Plot the results
plt.grid()
plt.plot(t, U[:, 0], label='Ua')
plt.plot(t, U[:, 1], label='Ub')
plt.plot(t, U[:, 2], label='Uc')
plt.xlabel('Time (mks)')
plt.ylabel('Voltage (V)')
plt.legend()
plt.show()

```



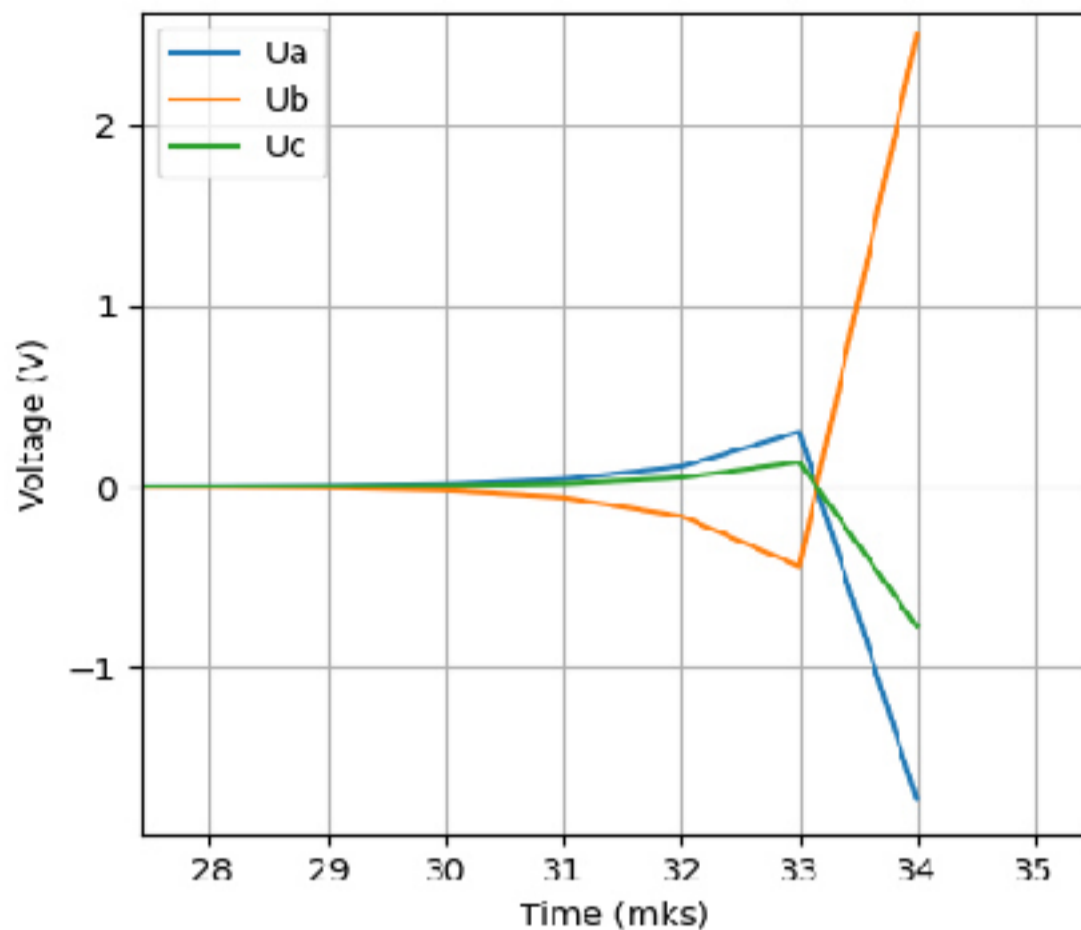


Рис. 2.11 Результати моделювання роботи BLDCM електродвигуна з використанням виразу (2.28)

В роботі [103] запропоновано Блок-схему BLDCM (Рис. 2.12), вхідними параметрами виступають значення напруги, а вихідними кут обертання ротора та його кутова швидкість.

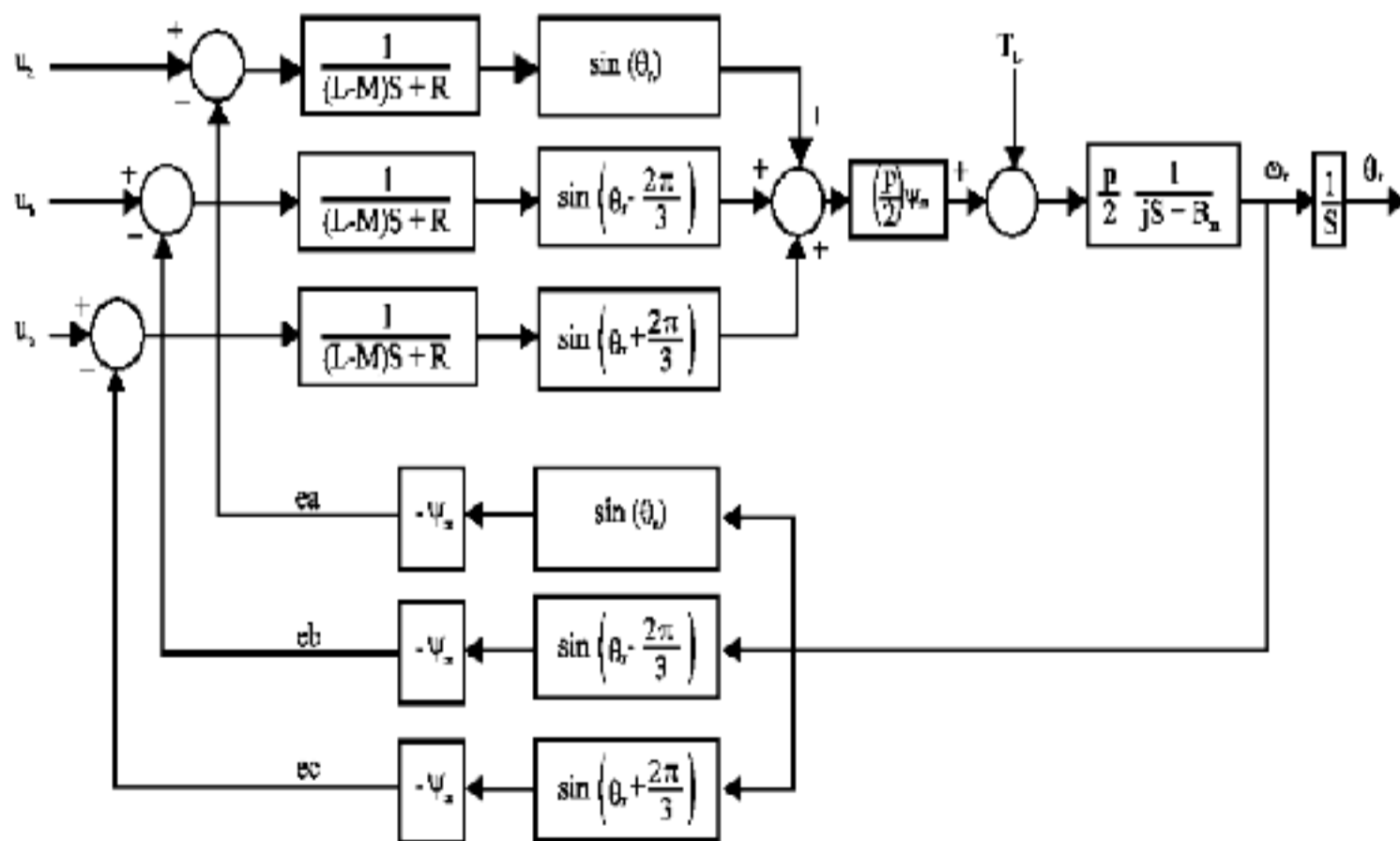


Рис. 2.12. Блок-схема BLDCM, [104]

Зворотню ЕРС, яка залежить від магнітного потоку в роторі можна виразити наступним рівнянням:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = -\omega_r \psi_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

В даному рівнянні:  $[e_a \ e_b \ e_c]$ - вектор зворотної електромагнітної сили (ЕМС) фаз статора, де  $e_a, e_b, e_c$  є складовими вектора;  $-\omega_r$ - знак від'ємний, оскільки вектор  $e$  протилежний до напрямку зміни магнітного поля в статорі;

$\psi_m$  - максимальний магнітний потік в роторі;

$\left[ \sin(\theta_r) \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$  - вектор амплітуд струму статора

відповідно до кутів  $\theta_r, \theta_r - \frac{2\pi}{3}, \theta_r - \frac{4\pi}{3}$ .

Оскільки вектор  $e$  залежить від вектора струму статора, який зміщується на певний кут  $\theta_r$  відносно вісі статора, амплітуди струмів допомагають описати це зміщення.

Результати розрахунку та програмний код для його реалізації за даним виразом для  $e_a, e_b, e_c = -20 \dots 20V$  представлено на рис. 2.13, 2.14

Рівняння двигуна можна виразити у формі простору станів:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{(L-M)} \left\{ \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right\} + \Psi_m \omega_r \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

де  $\frac{d}{dt} [i_a \ i_b \ i_c]$  - диференціальний оператор, що описує зміну струмів у

фазах а, b і с з плином часу;  $\frac{1}{(L-M)}$  - обернена величина різниці між (L)

індуктивностями фаз а і b та взаємною індуктивністю (M) між фазами а і b;

$[u_a \ u_b \ u_c]$  - вектор напруг у фазах а, b і с;  $\begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$  - матриця опорів

відповідно для фаз а, b і с;  $[i_a \ i_b \ i_c]$  - вектор струмів у фазах а, b і с;  $\Psi_m$  -

магнітний потік в роторі;  $\omega_r$  : кутова швидкість обертання ротора;  $\theta_r$  - кут

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = -\omega_r \psi_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
omega_r = 100
psi_m = 0.2
theta_r_range = np.linspace(0, 2*np.pi, num=200)
sin_array = np.vstack((np.sin(theta_r_range),
np.sin(theta_r_range-2*np.pi/3), np.sin(theta_r_range-
4*np.pi/3)))
e_array = -1 * omega_r * psi_m * sin_array
fig, axs = plt.subplots(3, 1, figsize=(5, 6))
axs[0].plot(theta_r_range, e_array[0])
axs[0].set_xlabel("")
axs[0].set_ylabel('ЕРС фази a (V)')
axs[1].plot(theta_r_range, e_array[1])
axs[1].set_xlabel("")
axs[1].set_ylabel('ЕРС фази b (V)')
axs[2].plot(theta_r_range, e_array[2])
axs[2].set_xlabel('t, ms')
axs[2].set_ylabel('ЕРС фази c (V)')
plt.tight_layout()
plt.show()

```

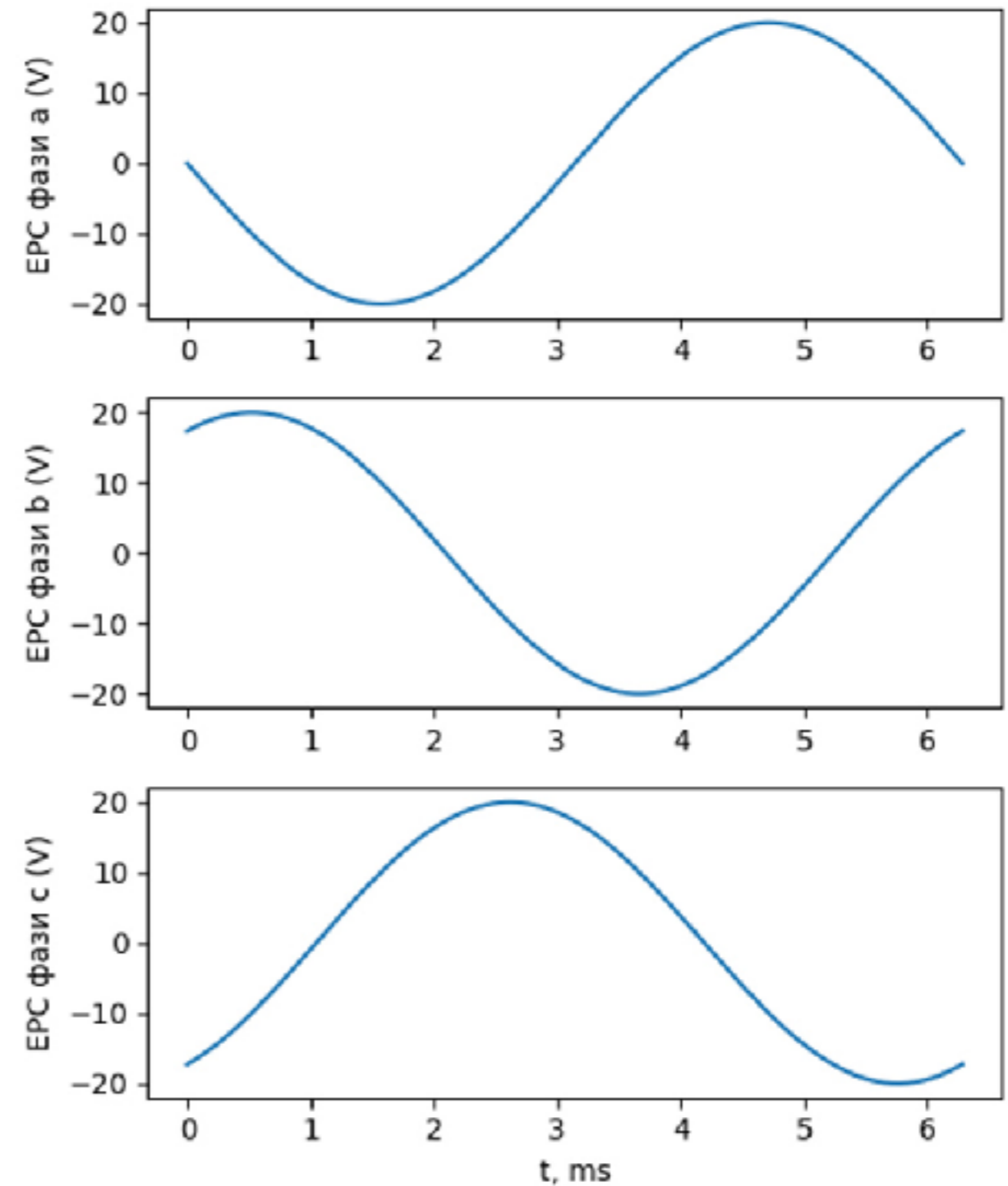


Рис. 2.13. Зміна ЕРС на кожній фазі.

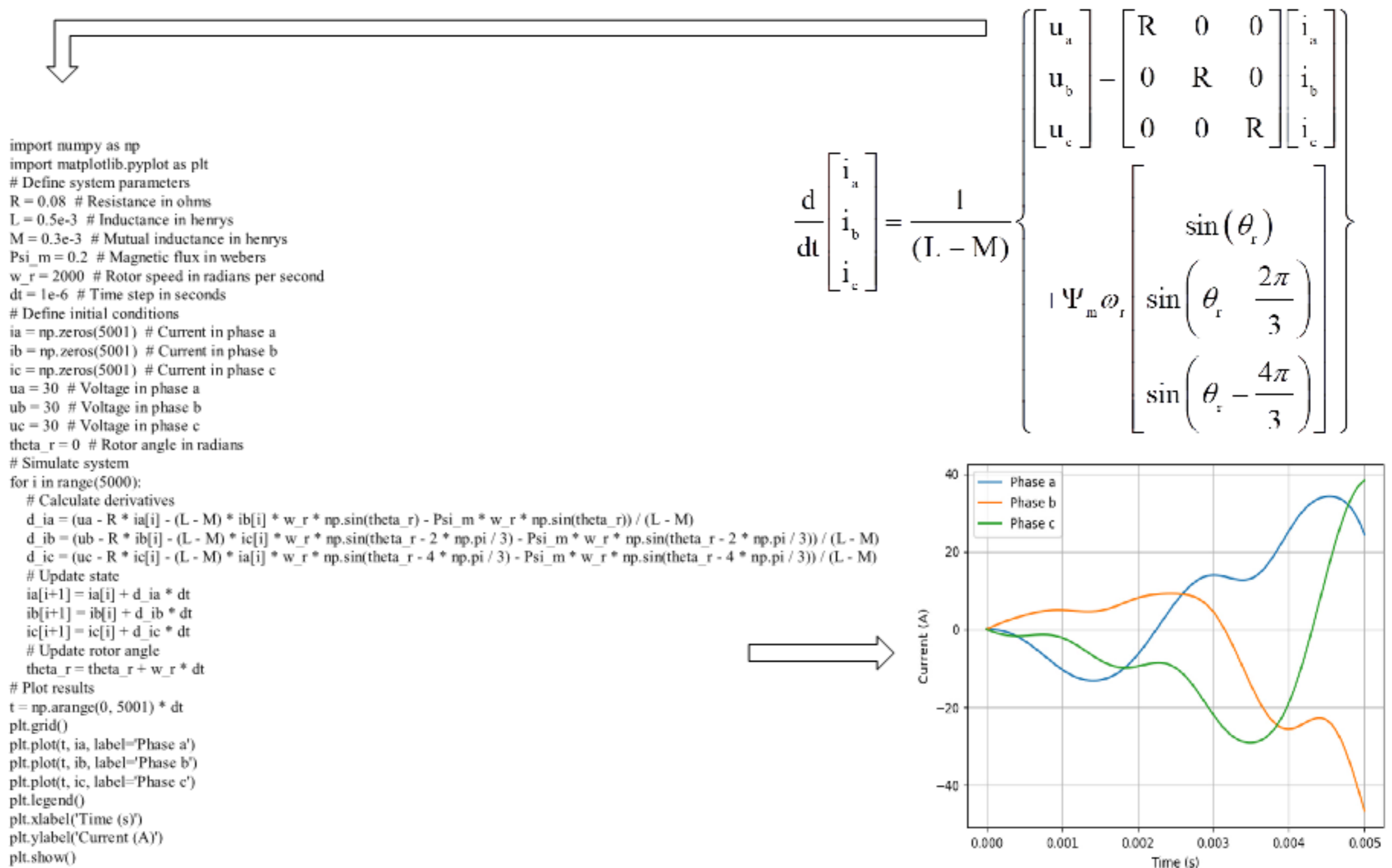


Рис. 2.14 Зміна струму ротору

повороту ротора в радіанах;  $\sin(\theta_r), \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right), \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right)$  - значення синуса відповідно для кутів  $\theta_r, \theta_r - \frac{2\pi}{3}, \theta_r - \frac{4\pi}{3}$

Електричну існуючу потужність двигуна можна розрахувати за допомогою наступного рівняння:

$$P = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c, \quad (2.32)$$

Поєднавши створені вище програмні коди та дані які були застосовані для розрахунку виразів (2.31) та (2.30) отримаємо перехідну характеристику потужності двигуна Рис. 2.15.

Електромагнітний обертальний момент, який є рівняннями динаміки двигуна, можна виразити у вигляді рівняння.

$$T_e = \frac{P}{\omega_m}, \quad (2.33)$$

$$T_e = j \left( \frac{2}{p} \right) \frac{d}{dt} \omega_r + B_m \left( \frac{2}{p} \right) \omega_r + T_L, \quad (2.34)$$

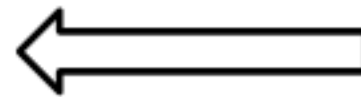
де  $T_e$  - електромагнітний обертальний момент, що генерується двигуном;  $j$  - момент інерції;  $p$  - кількість пар полюсів двигуна;  $\frac{d}{dt} \omega_r$  - похідна швидкості обертання ротора за певний час;  $B_m$  - коефіцієнт моменту тертя двигуна;  $\omega_r$  - кутова швидкість обертання ротора;  $T_L$  - магнітний момент, що діє на ротор.

В результаті проведення моделювання за даною формулою, використовуючи наступний програмний код, використовуючи умовні параметри, отримано наступну залежність (Рис. 2.15.)

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
omega_r = 100
psi_m = 0.2
theta_r_range = np.linspace(0, 2*np.pi, num=5001)
sin_array = np.vstack((np.sin(theta_r_range),
np.sin(theta_r_range-2*np.pi/3), np.sin(theta_r_range-
4*np.pi/3)))
e_array = -1 * omega_r * psi_m * sin_array
R = 0.08
L = 0.5e-3
M = 0.3e-3
Psi_m = 0.2
w_r = 2000
dt = 1e-6
ia = np.zeros(5001)
ib = np.zeros(5001)
ic = np.zeros(5001)
ua = 30
ub = 30
uc = 30
theta_r = 0
for i in range(5000):
    d_ia = (ua - R * ia[i] - (L - M) * ib[i] * w_r *
np.sin(theta_r) - Psi_m * w_r * np.sin(theta_r)) / (L -
M)
    d_ib = (ub - R * ib[i] - (L - M) * ic[i] * w_r *
np.sin(theta_r - 2 * np.pi / 3) - Psi_m * w_r *
np.sin(theta_r - 2 * np.pi / 3)) / (L - M)
    d_ic = (uc - R * ic[i] - (L - M) * ia[i] * w_r *
np.sin(theta_r - 4 * np.pi / 3) - Psi_m * w_r *
np.sin(theta_r - 4 * np.pi / 3)) / (L - M)
    ia[i+1] = ia[i] + d_ia * dt
    ib[i+1] = ib[i] + d_ib * dt
    ic[i+1] = ic[i] + d_ic * dt
    theta_r = theta_r + w_r * dt
pa=[e_array[0][i]*ia[i] for i in range(len(e_array[0]))]
pb=[e_array[1][i]*ib[i] for i in range(len(e_array[1]))]
pc=[e_array[2][i]*ic[i] for i in range(len(e_array[2]))]
p=[(pa[i]+pb[i]+pc[i])/1000 for i in
range(len(e_array[0]))]
t = np.arange(0, 5001) * dt
plt.grid()
plt.plot(t, p, label='Power')
plt.legend()
plt.xlabel('Time (s)')
plt.ylabel('Power (W)')
plt.show()

```



$$P = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

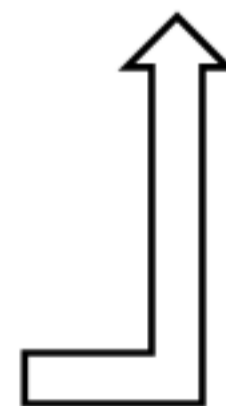
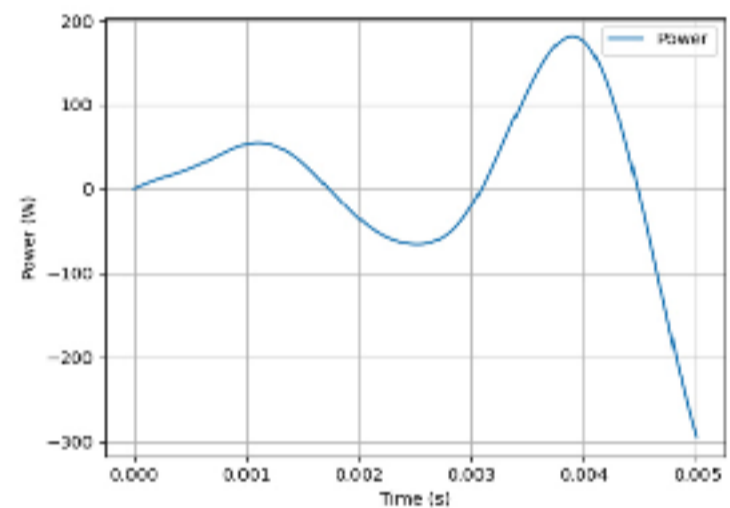


Рис. 2.15. Електрична потужність двигуна

Електромагнітний момент можна розрахувати за формулами (2.6), (2.7) (рис. 2.16).

$$T_e = j \left( \frac{2}{p} \right) \frac{d}{dt} \omega_r + B_m \left( \frac{2}{p} \right) \omega_r + T_r$$

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
p = 6
Bm = 0.4
TL = 0.1
omega_r0 = 0.4
t_start = 0
t_end = 50
dt = 0.01
num_steps = int(np.ceil((t_end - t_start) / dt))
t = np.zeros(num_steps)
omega_r = np.zeros(num_steps)
Te = np.zeros(num_steps, dtype=complex)
t[0] = t_start
omega_r[0] = omega_r0
for i in range(1, num_steps):
    Te[i-1] = 1j * (2/p) * (omega_r[i-1] - omega_r[i-2]) / dt + Bm * (2/p) * omega_r[i-1] + TL
    omega_r[i] = omega_r[i-1] + Te[i-1] * dt
    t[i] = t[i-1] + dt
plt.grid()
plt.plot(t/100, Te/50)
plt.xlabel('Час, с')
plt.ylabel('Електромагнітний момент, Нм')
plt.show()

```

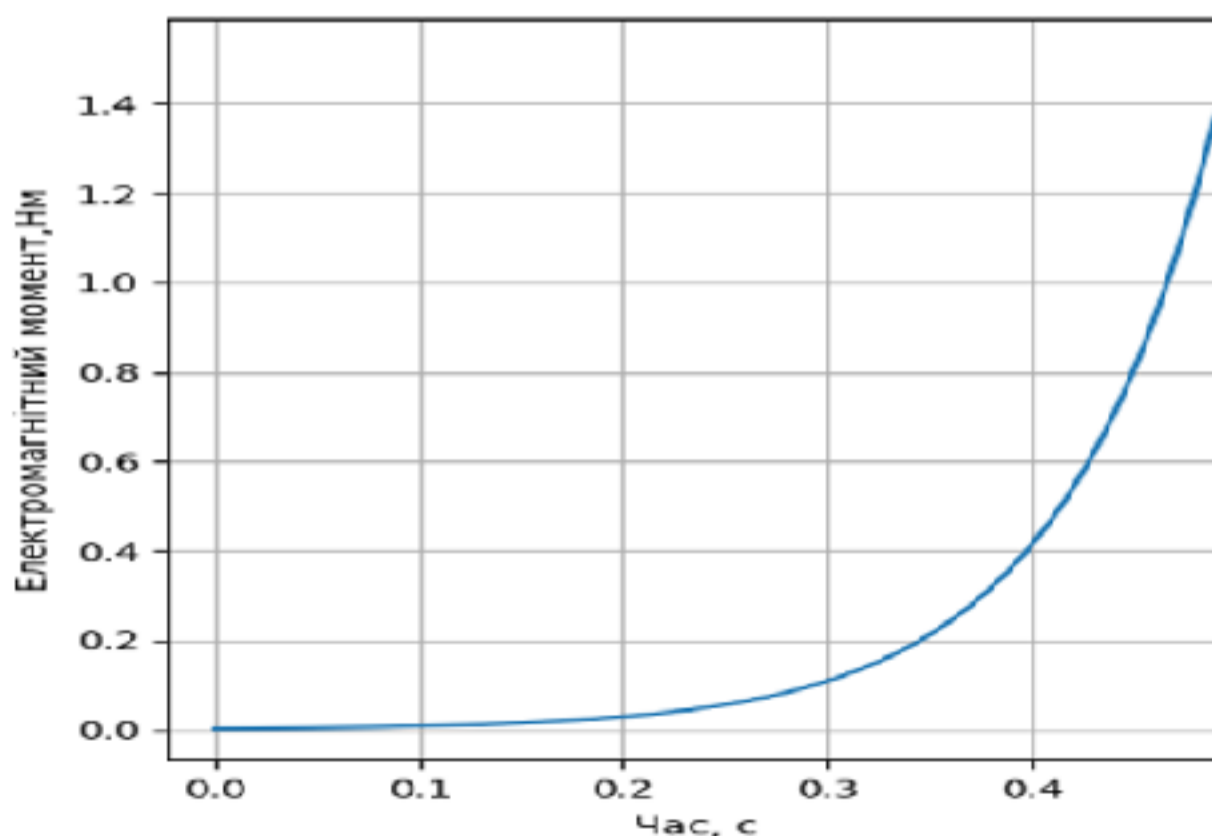


Рис. 2.16. Динаміка зміни електромагнітного обертового моменту



Також, рівняння 2.34 можна оформити як 2.35 у формі простору станів (2).

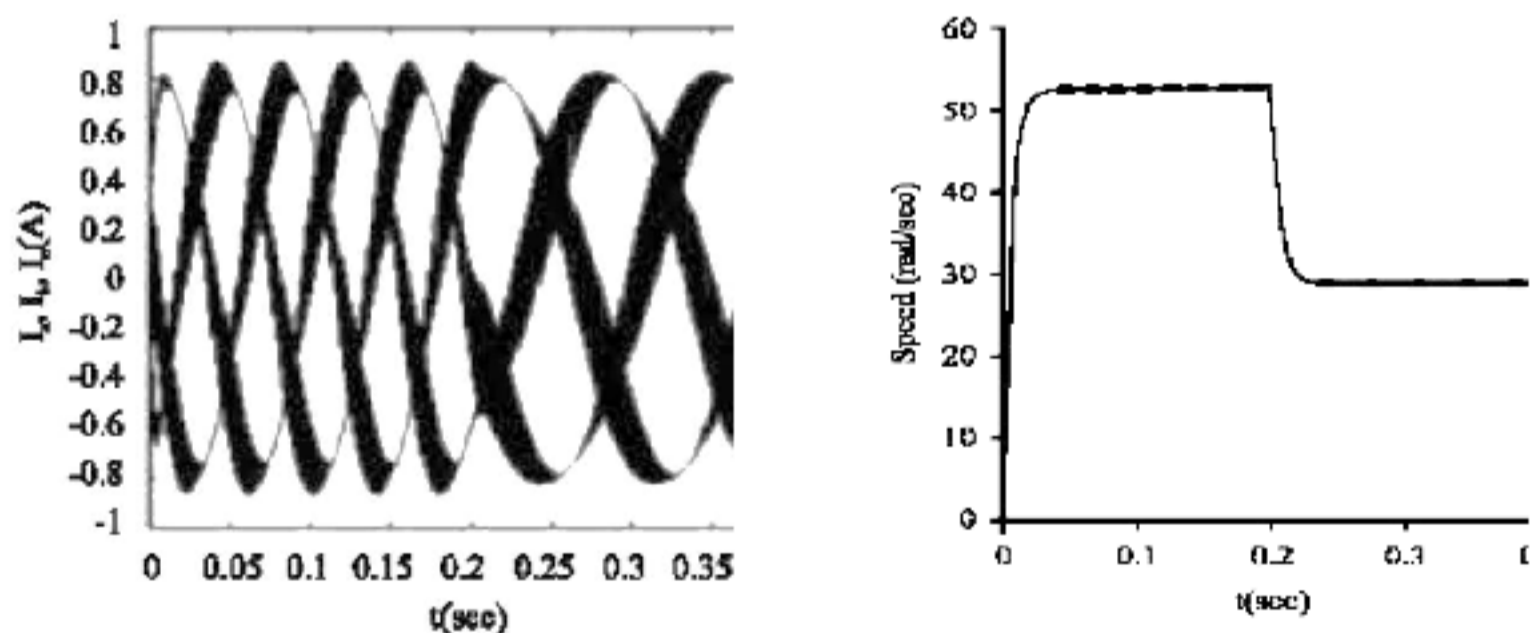
$$\frac{d}{dt}\omega_r = \left(\frac{p}{2j}\right) \left[ T_e - B_m \left(\frac{2}{p}\right) \omega_r - T_L \right], \quad (2.35)$$

Швидкість двигуна пропорційна положенню ротора  $\frac{d}{dt}\theta_r = \omega_r$ .

Так, моделювання BLDCM відповідно до системи обертання ротора з використанням рівнянь, наведених вище було реалізовано для умовних параметрів з метою визначення перехідних характеристик досліджених математичних моделей та динаміки їх зміни.

Реальні показники були застосовані в розділі, який присвячений експериментальним дослідженням параметрів електродвигунів даного типу.

Дослідження проведені для існуючих параметрів електродвигунів BLDCM досліджувались в роботі [104], що дозволило отримати наступні результати (Рис. 2.17)



$i_a, i_b, i_c$  - струми фаз двигуна

Швидкість електродвигуна

Рис. 2.17. Струм та швидкість електродвигуна BLDCM, [104].

Параметри, які були застосовані в роботі [104] для моделювання в середовищі Matlab Simulink мають наступні характеристики.

<i>Опір котушок статора</i>	<i>Індуктивності</i>	<i>Кількість пар полюсів</i>	<i>Стала тертя</i>	<i>Момент інерції</i>	<i>Магнітний потік</i>	<i>Взаємна індуктивність</i>	<i>Магнітний момент</i>	<i>Фазні струми двигуна</i>
$R, \text{ Ом}$	$L, \text{ Гн}$	$P$	$B, \text{ Н/рад/с}$	$J, \text{ кг м}^2$	$\Psi, \text{ вб}$	$M, \text{ Гн}$	$T_L, \text{ Нм}$	$i_a, i_b, i_c, \text{ А}$
12.05	0.0213	7	0.003	0.0003	012	0.003	0.3	1,1,1

Таким чином, моделювання динамічних характеристик BLDCM електродвигунів можуть бути використані в подальших дослідженнях, що дозволяє користувачам легко змінювати параметри двигуна та визначати динаміку їх зміни.

#### **2.4. Моделювання роботи приводів шнекових конвеєрів**

Розвиток технологій вимірювання електротехнічних характеристик електродвигунів, обертальний момент яких діє на результат переміщень сипких вантажів гнучким шнеком по криволінійній траєкторії, обумовлений не лише оптимізацією експлуатаційних характеристик шнекових конвеєрних ліній, а й постійно зростаючими промисловими потребами. В таких умовах, збільшуються і вимоги до технологічного обладнання, яке постійно працює в пікових режимах.

Разом з тим, існує потреба у точному вимірюванні пікових можливостей технологічного обладнання, оскільки перевищення його граничних можливостей завжди є причиною виходу з ладу електродвигунів. А в деяких випадках це закінчується виробничими

аваріями. Тому завжди є потреба у збільшенні кількості інформаційних параметрів, що характеризують роботу електродвигунів.

Незважаючи на велику кількість робіт пов'язаних із використанням гвинтових конвеєрних ліній, що застосовуються на гірничо-збагачувальних комбінатах, будівельних комбінатах, а також в електротехнічній промисловості, при виготовленні ізоляторів, існує значна потреба в теоретичних та експериментальних дослідженнях роботи силових електродвигунів. Основним аспектом таких досліджень є вимірювання фізичних величин, зокрема обертального моменту, потужності та споживання електроенергії, а також пускового моменту. Залежності між вказаними величинами можуть розглядатися, як додаткові інформаційні параметри, які можна використати для збільшення точності окремих фізичних величин. У зв'язку з цим виконано експериментальні дослідження процесу роботи синхронного електродвигуна з вбудованими постійними магнітами, який встановлено на гвинтовому конвеєрі.

Для обґрунтування метрологічних характеристик роботи електродвигуна гвинтового конвеєра та встановлення закономірностей між рядом інформаційних параметрів було створено мережу сенсорів, які дозволили отримати характеристики: обертального моменту, споживання напруги, споживання струму. Це дозволило дослідити роботу електродвигуна в режимі холостого ходу та в режимі переміщення матеріалу. В результаті було визначено оптимальні режимні роботи для шнекового конвеєру.

Напруги, що виникають в гнучкому гвинті обертального шнека на різних ділянках траєкторії транспортування матеріалу істотно відрізняються на протязі періоду роботи конвеєра. Це значною мірою впливає на роботу електродвигуна [104], що обумовлено багатьма факторами, основним із яких є неоднорідність матеріалу, який транспортується. В залежності від виду траєкторії транспортування,

конструкції механічної частини гвинтового конвеєра, напружено-деформований стан гнучкого гвинта створює змінні навантаження, що призводить до виникнення максимально допустимих напруг електродвигуна [105]. Тому, для забезпечення довговічності роботи електродвигуна та гнучкого гвинта необхідно враховувати вплив змінності навантажень на різних ділянках траєкторії транспортування. Так, при роботі шнека, обертальний момент електродвигуна передається шнеку не рівномірно. Змінність обертального моменту вздовж осі гнучкого гвинта описується наступною формулою [106] (рис. 2.18):

$$M_x = M_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right), \quad (2.36)$$

де  $M_0$  - номінальний обертальний момент приводу шнека;  $x$  - координата на осі гнучкого гвинта шнека;  $L$  - довжина гнучкого гвинта шнека.

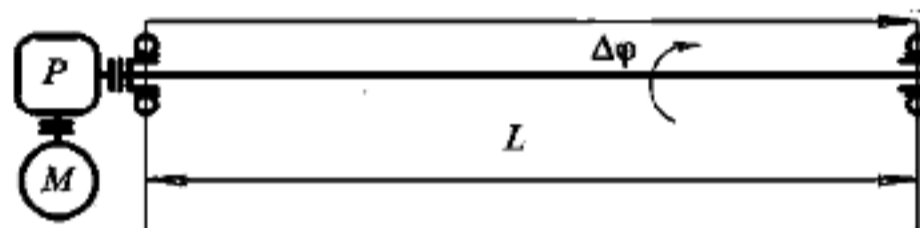


Рис. 2.18. Кінематична схема конструктивного виконання транспортуючого шнека

Користуючись методом розрахунку стрижневої системи при спільному розтягуванні та крученні, запишемо рівняння:

$$\begin{cases} P_x = A_\varepsilon + C\theta \\ M_x = C_\theta + B\theta \end{cases}, \quad (2.37)$$

де  $P_x$  - сила, що розтягує;  $M_x$  - обертальний момент;  $\varepsilon$  - відносна поздовжня деформація;  $\theta$  - відносна кутова деформація;  $A, B, C$  - агрегатні коефіцієнти жорсткості стрижневої системи [107].

Якщо, один кінець гнучкого гвинта закріплений від осьових переміщень (див. рис. 2.18), то стрижнева система не переміщається в

осьовому напрямку і в ній не виникає подовжніх деформацій, тоді  $\varepsilon = 0$  і рівняння (2.37) приймає наступну форму:

$$\begin{cases} P_x = C\theta \\ M_x = B\theta \end{cases}, \quad (2.38)$$

Розв'язавши систему рівнянь (3) відносно  $\theta$ , з урахуванням рівняння (2.36), отримаємо вираз для визначення поздовжнього зусилля в будь-якій точці гнучкого гвинта при його закріпленні від осьових переміщень:

$$M_x = \frac{CM_0}{B} \left(1 - \frac{x}{L}\right), \quad (2.38)$$

де  $x$  – координата на осі гнучкого гвинта шнека.

З виразу  $M_x = B\theta$  з урахуванням (2.36) отримаємо закон розподілу обертальної деформації по довжині гвинтового шнеку:

$$\theta = \frac{M_0}{B} \left(1 - \frac{x}{L}\right), \quad (2.39)$$

З урахуванням того, що  $\theta = \frac{dv}{dx}$ , Проінтегруємо вираз (2.39) по  $dx$  та визначимо кутові переміщення стрижневої системи:

$$v = \frac{M_0}{B} \left(1 - \frac{x^2}{2L}\right) + C_v, \quad (2.40)$$

де  $C_v$  - постійна інтегрування, яка в початкових умовах набуває нульового значення.

Максимальне кутове переміщення стрижневої системи виникає в кінці траєкторії транспортування при  $x=L$ , тому вираз (2.40) можна подати у вигляді:

$$v_{\max} = \frac{M_0 L}{2B}, \quad (2.41)$$

Вирішуючи вираз (2.41) щодо  $M_0$  підставляючи в (2.39), отримаємо закон розподілу обертальної деформації по довжині гнучкого гвинта у разі

закріплення його однієї опори від осьових переміщень з урахуванням максимального кутового переміщення.

$$\theta = \frac{2v_{\max}}{L} \left(1 - \frac{x}{L}\right), \quad (2.42)$$

Напруга, що виникає у стрижневій системі, визначається за наступною формулою [108]:

$$\sigma = E\varepsilon_s, \quad (2.43)$$

де:  $E$  – модуль пружності;  $\varepsilon_s$  – відносне подовження гвинтової осі.

Потужність відповідного електродвигуна розраховується за формулою [109]:

$$N = M \cdot \omega \frac{2\pi \cdot M \cdot n}{60}, \quad (2.44)$$

де:  $\omega$  - кутова швидкість обертання валу;  $M$  – обертальний момент;  $n$  - частота обертання, яка вимірюється в оборотах в одиницю часу (в даному випадку одна хвилина).

У свою чергу  $M$  розраховується, як векторна фізична величина, що характеризує дію сили на механічний об'єкт, що може викликати його обертальний рух:

$$\dot{M} = [\vec{r} \cdot \dot{F}], \quad (2.45)$$

де:  $\dot{F}$  - вектор сили;  $\dot{r}$  - радіус вектор.

Враховуючи нерівномірність ходу шнеку та потужність електродвигуна, обертальний момент електродвигуна буде розрахований за формулою:

$$N = \vec{r} \cdot \vec{F} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \omega \frac{2\pi \cdot M \cdot n}{60}, \quad (2.46)$$

В такому випадку, враховується інерційність та запізнення обертального моменту гнучкого шнеку.

Розглядаючи модель шнека (рис. 1, 2), бачимо, що маса  $m$  проходить горизонтально вздовж лінії тертя. Коефіцієнт тертя маси  $m$  повздовж горизонтальної лінії проходження маси може бути описаний наступним чином (рис. 2.19), (2.47):

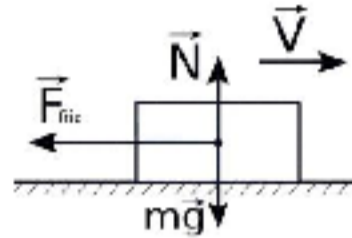


Рис. 2.19. Проходження маси через горизонтальну пряму

$$\mu = \frac{F_{fric}}{mg}, \quad (2.47)$$

де:  $\mu$  - коефіцієнт тертя;  $F_{fric}$  - сила тертя;  $m$  - маса тіла;  $g$  - прискорення вільного падіння;

Момент сили тертя під дією зовнішнього навантаження може бути описаний таким чином:

$$M_{fric} = \frac{F_a P_h}{2\pi\eta}, \quad (2.48)$$

де:  $M_{fric}$  - момент сил тертя під впливом зовнішнього навантаження;  $F_a$  - прикладене навантаження;  $P_h$  - крок обертальної передачі шнеку;  $\eta$  - ККД передачі редуктора (0,9 ... 0,95).

Також слід врахувати момент інерції [110].

Враховуючи, що на момент сили, яка передається електродвигунові, діє ряд додаткових сил, момент інерції можна представити наступним чином:

$$M_{in} = \frac{w_{max} - w_{min}}{w_{cp}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{cp}}, \quad (2.49)$$

де:  $w_{\max}, w_{\min}$  - максимальне та мінімальне значення швидкості обертання вала електродвигуна;  $w_{cp}$  - середнє арифметичне значення швидкості обертання вала.

Окремою ланкою інформаційних параметрів є визначення обертового моменту під час запуску електродвигуна, оскільки саме в цей період споживання електричної енергії є максимальним, (рис. 5) [111].

$$M_{start} = M_n * K_{step}, \quad (2.50)$$

де:  $M_{start}$  - пусковий момент електродвигуна;  $M_n$  - номінальне зусилля на валу електродвигуна;  $K_{step}$  - кратність пусків, паспортна величина, яка приймає значення від 1,5 до 6.

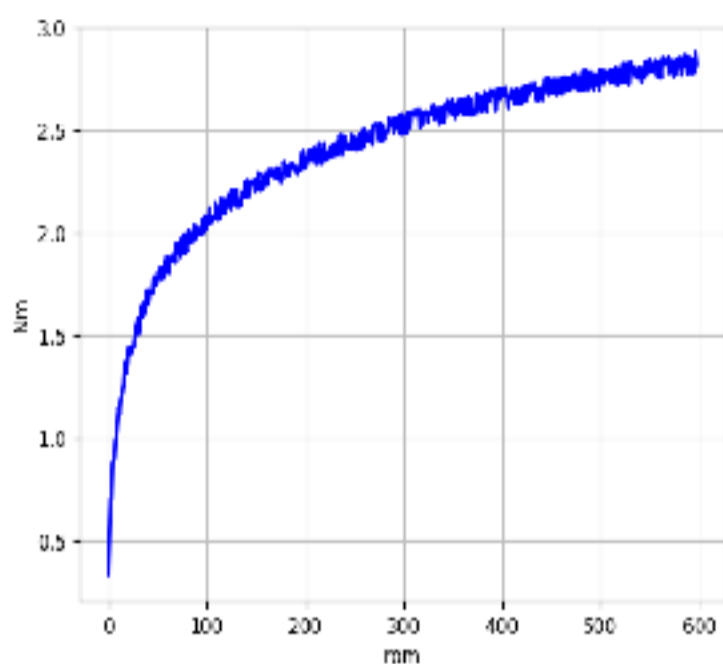
Так, враховуючи момент сили тертя, момент інерції, а також пусковий момент, потужність електродвигуна шнекового конвеєру можна представити наступним виразом:

$$N = r \cdot F \cdot K_{step} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \omega \frac{2\pi \cdot M \cdot n}{60} + \frac{F_a P_h}{2\pi\eta} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega_{cp}}, \quad (2.51)$$

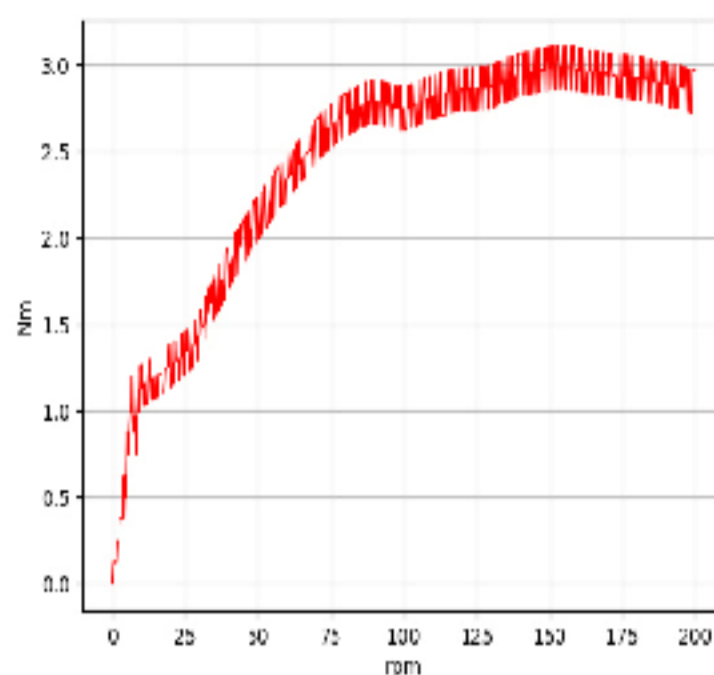
Для отримання параметрів моменту сили синхронного електродвигуна із вбудованими постійними магнітами та його швидкості обертання було використано сенсори: датчик обертового моменту фланцевого типу серії TF виробник (Magtrol) [112] та безконтактний сенсор IFM Electronic DI5020. Також були використані сенсори струму та напруги.

В результаті отримано залежність обертового моменту та швидкості обертання електродвигуна шнекового конвеєру (рис. 2.20.) в декількох режимах роботи.





а



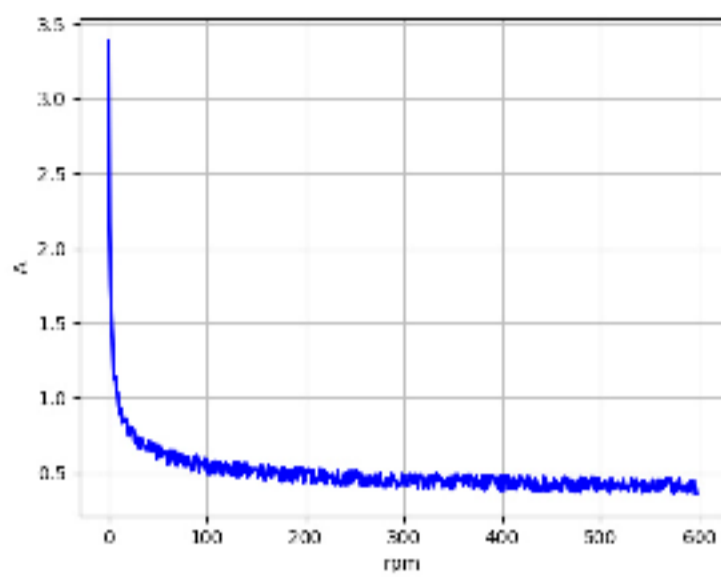
б

Рис. 2.20. Залежність швидкості обертання та обертового моменту електродвигуна шнекового конвеєру (а-в режимі холостого ходу, б-під час переміщення матеріалу)

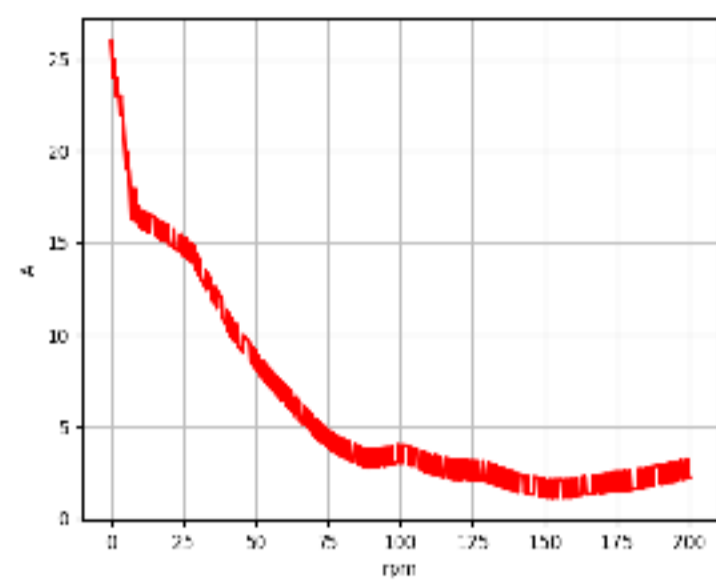
З урахуванням неоднорідності матеріалу, який транспортується шнековим конвеєром спостерігаються значні навантаження на електродвигун. Враховуючи, що передатний редуктор має коефіцієнт підсилення 1:5, при 25 об. хв., момент переміщення матеріалу та обертовий момент показують незначне просідання (рис. 2.20., б). Це говорить про недостатню потужність електродвигуна.

Саме в цей період зафіксовано стрибок у споживанні струму електродвигуном (рис 2.21, б).

Відповідні параметри в режимі холостого ходу мають рівномірну динаміку.



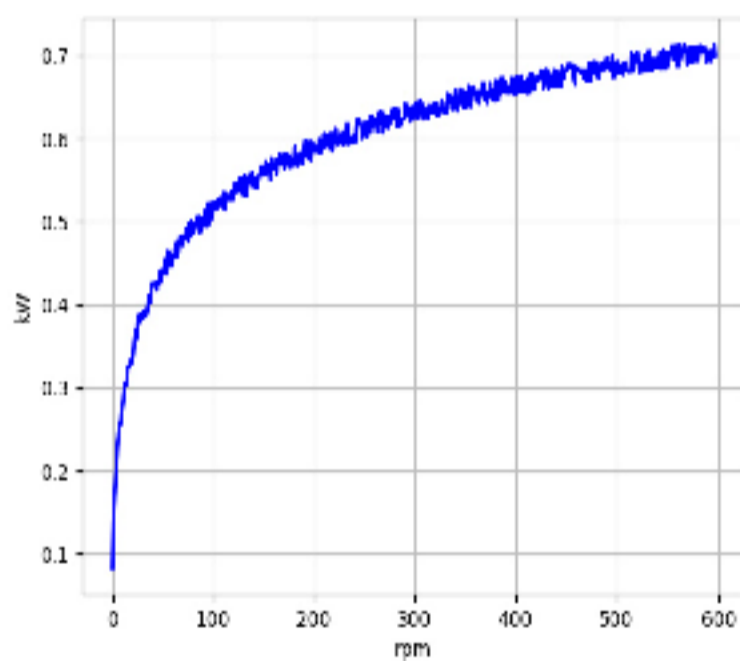
а



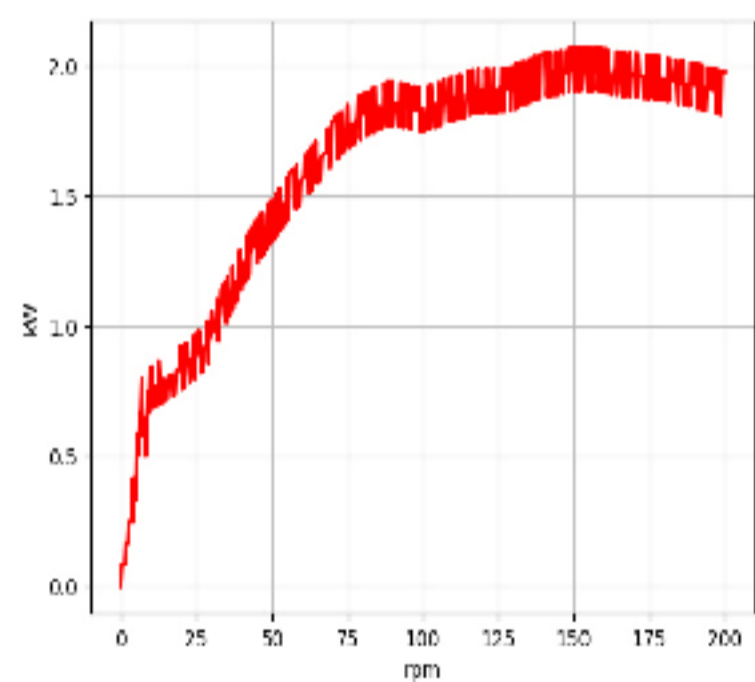
б

Рис. 2.21. Характеристика споживання струму електродвигуном (а - в режимі холостого ходу, б-під час переміщення матеріалу)

Основне навантаження, яке спостерігається під час роботи електродвигуна стосується пускового моменту, а саме від 0 до 75 об/хв. Це також можна спостерігати на рис. 2.22, де представлено потужність електродвигуна, яку розраховано з використанням виразу (2.51).



а



б

Рис. 2.22. Потужність електродвигуна шнекового конвесру (а-в режимі холостого ходу, б-під час переміщення матеріалу).

Збільшення навантаження на роботу електродвигуна, що спричинено механічним спротивом, повинно бути компенсовано, або збільшенням коефіцієнту підсилення редуктору, або заміною електродвигуна на більш потужний. Але, в обох випадках необхідно визначити потреби у швидкості транспортування матеріалу, його в'язкості та кількостях при подачі.

Таким чином, ефективність роботи електродвигунів, що застосовуються в у шнекових конвеєрах, залежать від режиму роботи конвеєра, який має забезпечувати узгодженість з технологічною продуктивністю конвеєру, потужністю електродвигуна, в'язкістю та щільністю матеріалу, який переміщується, а також особливостями передатного коефіцієнту редуктора.

Точність розрахунку параметрів обертального моменту та потужності електродвигуна може бути досягнута за рахунок використання достатньої кількості математичних факторів, що описують силу тертя, спротив матеріалу, потужність силової установки та рівня навантаження на шнек під час просування матеріалу.

Результати розрахунку потужності електродвигуна шнекового конвеєру з використанням виразу (2.51) показують можливість поєднання ряду інформаційних параметрів, які отримано з використанням вимірювальних засобів. Подальше дослідження розглянутих параметрів комплексно, дозволить отримати додаткові характеристики роботи електродвигунів.

### **Висновок до розділу 2**

1. Моделювання вимірювального каналу тензометричного перетворювача обертального моменту, дозволило встановити лінійну залежність між деформаціями валу та рівнем вихідного сигналу датчика. Таким чином встановлено, що лінійність вимірювального каналу забезпечується незалежно від кута деформації між датчиками.

2. Проведене математичне моделювання динамічних та електричних характеристик електродвигунів дозволило вдосконалити математичну модель роботи асинхронного електродвигуна, додавши додаткові інформаційні параметри, що враховують втрати, які залежать від магнітної індукції та є нелінійними функціями квадратів магнітних потоків. А також, на основі відомих математичних моделей, створити програмний код для обчислення перехідних процесів електродвигунів постійного струму

3. В результаті моделювання динамічних характеристик BLDCM електродвигунів отримано ряд залежностей, які можуть бути використані в процесі дослідження.

4. Визначено шляхи збільшення точності розрахунку обертальних моментів та потужності електродвигунів, яка може бути досягнута за рахунок аналізу сили тертя, спротиву матеріалу, потужності силової установки та рівня навантаження на електродвигун. Такий спосіб реалізовано під час дослідження параметрів електродвигуна шнекового конвеєру, що дозволило визначити можливість поєднання ряду інформаційних параметрів, які отримано з використанням вимірювальних засобів.

### **РОЗДІЛ 3. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ**

Задачами даного розділу є вдосконалення засобів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів шляхом розробки нових та покращення роботи вже існуючих вимірювальних систем, використовуючи сучасні мікропроцесорні пристрої, нові методи оцінювання похибок, засоби візуалізації та зберігання даних отриманих від вимірювальних перетворювачів, а також сучасні протоколи передачі даних.

За результатами досліджень, які були проведені в даному розділі, авторами опубліковано наступні роботи [113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120]

#### **3.1. Розробка приладу для вимірювання обертальних моментів електродвигунів**

Для визначення технічного стану та робочих характеристик електричних двигунів ЕД використовують аналіз електричної потужності, аналіз моменту сили, напруги та струмового сигналу. Більшого поширення набули методи діагностування ЕД по струмовому сигналу, які реєструється з обмоток приводу. Це обумовлено мобільністю та оперативністю отримання результатів обстеження, можливістю проведення дистанційних вимірювань, коли доступ до об'єкта діагностування ускладнений, або неможливий. В залежності від потреб в точності використовують і контактні засоби вимірювання обертальних моментів також, перетворюючи ряд фізичних величин в уніфікований сигнал. В будь-якому випадку, прийняття рішення про технічний стан ЕД та їх робочих характеристик загалом, здійснюється на основі стандартизованої процедури вимірювання, об'єктивність якої визначається точністю даних, як вимірювальних приладів, так і ІВС. Тому, подальше підвищення

точності результатів діагностичного обстеження ЕД може бути здійснено за рахунок вдосконалення використовуваних методів обробки даних та способів вимірювання. Вимірювання обертального моменту валу електродвигуна в статичному режимі не викликає труднощів, проте вимірювання безперервно в процесі обертання є завданням більш складним, особливо коли це стосується мікроелектродвигунів. Так, переважна більшість приладів для вимірювання обертального моменту ЕД побудовано на основі вимірювання струму, який прикладається до двигуна. Разом з цим, такі вимірювання не можна застосовувати для мікроелектродвигунів, оскільки невеликі потужності висувають ряд додаткових вимог до чутливості вимірювальних приладів. Істотний вплив на показники точності сенсорів мають вібрації, нестабільності індуктивних характеристик, нестабільності напруги джерела живлення, температурний режим роботи, швидкість обертання валу та стан підшипникових вузлів електродвигуна. В таких умовах, існує потреба в систематизації вимірювань шляхом обробки більшої кількості даних, що дозволить не лише отримувати поточні показники, а й проводити прогнозування зміни похибок та визначення потреб у калібруванні вимірювальних приладів, визначати критерії виникнення додаткових вібрацій, зміни температурних режимів, тощо. В свою чергу, недостатня кількість інформативних параметрів, які можна отримати під час вимірювання робочих характеристик ЕД, звужує коло методів, що застосовуються для підвищення точності вимірювальних приладів. Усе це, та багато інших не вирішених питань, пов'язаних із недостатньою кількістю інформативних параметрів вимірювання робочих характеристик ЕД, потребує створення гнучких та розподілених інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які мають поєднувати вимірювальні пристрої та засоби прогнозування аварійних режимів роботи ЕД в єдиний інформаційний простір підприємства.

Сучасні системи діагностики робочих характеристик електродвигунів, окрім обертального моменту та потужності, використовують: вібродіагностику; аналіз електричних струмів та напруг; вимірювання теплових полів та магнітних полів, електромагнітну дефектоскопію [121,122]. Широко застосовуються методи сигнатурного аналізу, які включають в себе методи обробки сигналу шляхом перетворення Фур'є, Гілберта-Хуана та вейвлет-перетворення [123,124].

При дослідженнях електромеханічних систем часто виникає необхідність визначення обертальних моментів та прискорень.

Методологія вимірювання динамічних характеристик обертальних моментів ЕД та прискорень, недостатньо висвітлені в технічній літературі. Переважна більшість праць спрямована на вимірювання лінійних прискорень, а питанням вимірювання нелінійних кутових прискорень, приділяється мало уваги [125, 126]. Тому, актуальними є дослідження нелінійних характеристик роботи електродвигунів.

Так, для моделювання динамічних характеристик обертального моменту в роботі [127] представлено модифіковану формулу Клосса, яка пов'язує середнє значення обертального моменту електродвигуна та частоту обертання його валу, з урахуванням впливу частоти обертання та напруги живлення. За даною моделлю отримано механічні характеристики електродвигуна, які представляють залежність обертального моменту від частоти обертання валу ЕД, напруги мережі, частоти мережі та ряду інших номінальних параметрів. В даній роботі застосовано метод імітаційного моделювання моменту зупинки ЕД без навантаження. Реалізацію моделі було здійснено в середовищі Matlab/Simulink.

На основі запропонованого виразу було також побудовано модель для декількох робочих характеристик асинхронного ЕД змінного струму.

Моделювання здійснено з використанням програмної бібліотеки Matplotlib мовою програмування Python, що дозволило отримати наступні

результати (рис . 3.1). Так, при напрузі в 220 В., частота обертання валу та момент сили у період моделювання (5 с) були найбільшими. Це говорить про адекватність моделі.

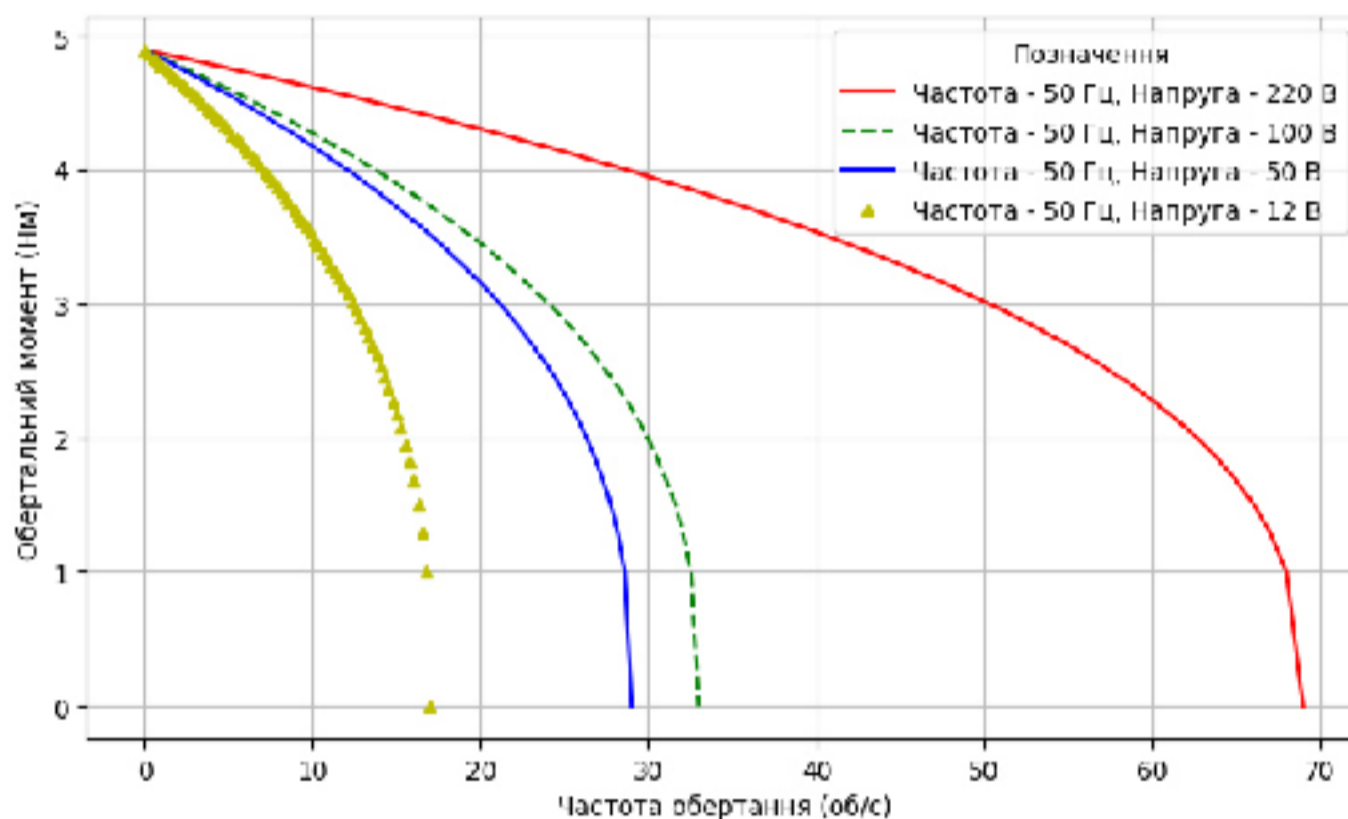


Рисунок 3.1. - Робочі характеристики ЕД

Разом з тим, вона не містить, параметрів струму та опору котушок статора. Не враховано електромагнітних вібрацій, які впливають на обертальний момент валу ЕД.

В роботі [128] представлено методику, що дозволяє визначити момент інерції ЕД обчислювальними засобами, тестування якої, з використанням корекції параметрів регуляторів приводу дозволило встановити параметри кривої розгону шляхом проведення імітаційного моделювання з використанням пакета SimPowerSystems у середовищі MatLab. Це дозволило вдосконалити методику вимірювання моменту інерції електроприводу на основі методу площ Симою [129]. Похибка при визначенні моменту інерції була 1,5 %. Цей метод дозволяє визначити передатні характеристики функції за кривою розгону. Але недоліком такого методу є те, що передатні характеристики для кожного окремого



виду електродвигуна є різними та їх вибір для кожного має певні складнощі. Тестування даної методики на інших видах ЕД не проводились.

Модель визначення моменту сили ЕД під час його роботи представлена в роботі [130], яка також враховує момент інерції та момент опору навантаження:

$$M - M_o = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}, \quad (3.1)$$

де  $M$  - обертальний момент;  $M_o$  - момент опору навантаження;  $J_{\Sigma}$  - сумарний момент інерції приводу, приведений до валу двигуна;  $\omega$  - кутова швидкість двигуна  $t$  - час.

Важливою складовою у вимірюванні обертального моменту є визначення коефіцієнта тертя. Тому, заслуговує уваги робота [131], де запропоновано стенд, робота якого заснована на вимірі навантаження на ЕД з урахуванням сили тертя. Таке навантаження фіксується амперметром, включеним до ланцюга ЕД, де коефіцієнт тертя визначається за залежністю:

$$f = \frac{\sqrt{3U} (I_n - I_{x.p.}) \cos \varphi \cdot \eta}{2V_k \cdot M}, \quad (3.2)$$

де  $U$  – напруга;  $I_n$  – струм навантаження;  $I_{x.p.}$  -

струм холостого ходу двигуна;  $\cos \varphi$  - коефіцієнт потужності (де  $\varphi$  - зсув фаз між силою струму та напругою);  $\eta$  – К.К.Д. підшипників кочення;  $V_k$  - швидкість ковзання на контакті;  $M$  - обертальний момент.

Зазначені методи вимірювання лежать в основі переважної більшості ІВС. Разом з тим, в багатьох випадках вибір методу залежить від умов, в яких проводиться вимірювання, де необхідно визначити найбільш оптимальні методи вимірювання. Так, в деяких випадках силою тертя, або вібрацією можна знехтувати, в той час, коли важливими параметрами виступають струм, напруга та потужність ЕД.

Для визначення потреб придатності вимірювального обладнання враховуються особливості отримання сигналу від перетворювачів різного типу та методи його обробки.

Разом з тим, комплексна ІВС має передбачати не лише засоби поточного вимірювання, але й сховище даних, де має зберігатися статистична інформація, яка може бути використана для визначення окремих режимів роботи ЕД.

Тому, слід звернути увагу на роботи, які висвітлюють не лише способи первинного збору даних та обробку сигналу, але й подальшу його візуалізацію та обробку на більш високому рівні [132].

Вимірювання обертального моменту та швидкості роботи ЕД вимагає чутливості сенсорів. Такими, наприклад, є тензOMETричні сенсори. Тому для роботи у складі ІВС було вибрано тензOMETричний сенсор мостового типу (рис. 3.2). ТензOMETричний сенсор використано разом із мікросхемою НХ711. Дана мікросхема є аналого-цифровим перетворювачем з розрядністю 24 біти та має вбудований операційний підсилювач [133].

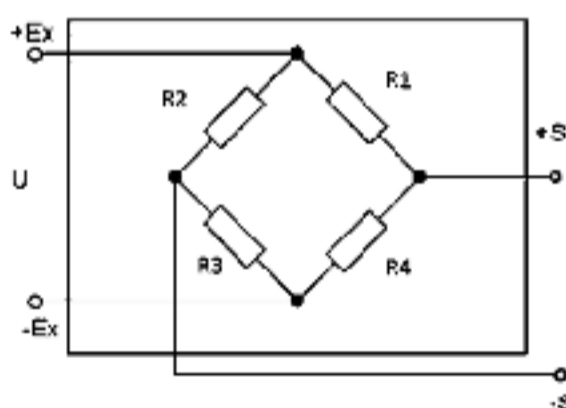


Рисунок 3.2. Мостова схема тензOMETричного сенсору

На рис. 3.2 представлено: +Ex, -Ex – вхідна напруга; +S, -S – вихідний сигнал та R1-R4 – тензOMETричні резистори, які змінюють свій опір в залежності від деформації.

Запропонована мікросхема включає інтегральний стабілізатор напруги, що дозволяє не використовувати зовнішній стабілізатор.

Датчик швидкості обертання валу електродвигуна реалізований за принципом частотного вимірювача, який побудовано на базі оптичного сенсору, що фіксує обертання генеруючи імпульси з кожним обертом. Їх обробляє мікроконтролер Atmega 8 та передає отриманий результат до мікроконтролеру ESP32, використовуючи послідовну шину зв'язку I2C.

Оскільки Atmega 8 може виявляти лише прямокутні сигнали, для перетворення сигналу було використано тригер Шмітта, що являє собою цифровий логічний елемент, призначений для арифметичних і логічних операцій. Він має пороговий рівень напруги. Так, коли рівень вхідного сигналу вище порогового рівня елемента, рівень сигналу на виході буде високим. Якщо рівень вхідного сигналу нижче порога, на виході буде низький рівень. Для цього була використана мікросхема 74LS14, яка містить 6 триггерів Шмітта.

Для вимірювання частоти в мікроконтролері Atmega 8 використовуються два типи переривання: переривання за переповненням таймеру T0 і зовнішнє переривання за зміною сигналу на вході мікроконтролера INT0. Восьмими-бітний таймер T0 працює з частотою 1 МГц, для цього програмно було включено дільник частоти на 8. Обробник переривання при переповненні таймеру викликається 4000 разів у секунду, при цьому змінний лічильник збільшує своє значення на одиницю. Як тільки ця змінна стане рівною 4000, тобто пройде 1 секунда, в змінну `edgescount` буде внесено кількість отриманих імпульсів за цей період. Дані про кількість імпульсів будуть збережені у масив. Програмний код для обробки імпульсного сигналу мікроконтролером Atmega 8 має наступний вигляд:

```
#include<avr/interrupt.h>
#include<util/delay.h>
volatile unsigned int edgescount = 0, count = 0;
// Обробник переривання по переповненню T0 //викликається 4000 разів на секунду
ISR(TIMERO)
{
```

```

TCNT0 = 6; // Лічильник T0 починає рахувати з //6, оскільки 1MHz/(256-6) = 4000Hz
count++;
}
// обробник зовнішнього переривання
ISR(INT0)
{
edgecount++;
}
int main(void)
{
// Налаштування портів введення/виводу
DDRD = 0b11110011;
PORTD = 0x00;
// Налаштування таймеру T0
TCCR0 |= (1 << CS01); // Дільник на частоти на 8 //для таймеру 1 MHz
TIMSK |= (1 << TOIE0); // Дозвіл на //переривання таймеру T0
// Налаштування зовнішнього переривання
GICR |= (1 << INT0); // Дозволяємо зовнішнє //переривання на вході INT0
MCUCR |= (1 << ISC01)|(1 << ISC00); // Зовнішнє //переривання формується по
передньому фронту
sei(); // Глобально дозволяємо переривання
while(1)
{
// передаємо дані
if(count == 4000)
{
send_data(edgecount);
count = 0;
edgecount = 0;
}
}
}

```

Дані про кількість імпульсів за хв від датчика швидкості та цифровий сигнал від АЦП, а також цифровий сигнал від датчиків вимірювання напруги та струму електродвигуна обробляється мікроконтролером ESP32, який має вбудований WIFI – модуль.

Використовуючи відомі програмні бібліотеки для роботи з протоколом TCP/IP, даний мікроконтролер був використаний для відправки http повідомлень методом POST, які містять кількісні характеристики обертального моменту, напруги, струму та швидкості обертання валу безконтактного двигуна постійного струму.

Принцип вимірювання обертального моменту, який передається валом електродвигуна отримано за допомогою спеціальної муфти, яка приєднана до плеча, використовуючи наступний вираз

$$M=F \cdot R=F \cdot R \cdot \sin a, \quad (3.3)$$

де  $M$  – момент сили;  $F$  - сила (Н);  $R$  - плече сили (м);  $a$  – кут між вектором сили  $F$  та вектором плеча сили  $R$ .

Функціональну схему ІВС представлено на рис. 3.3.

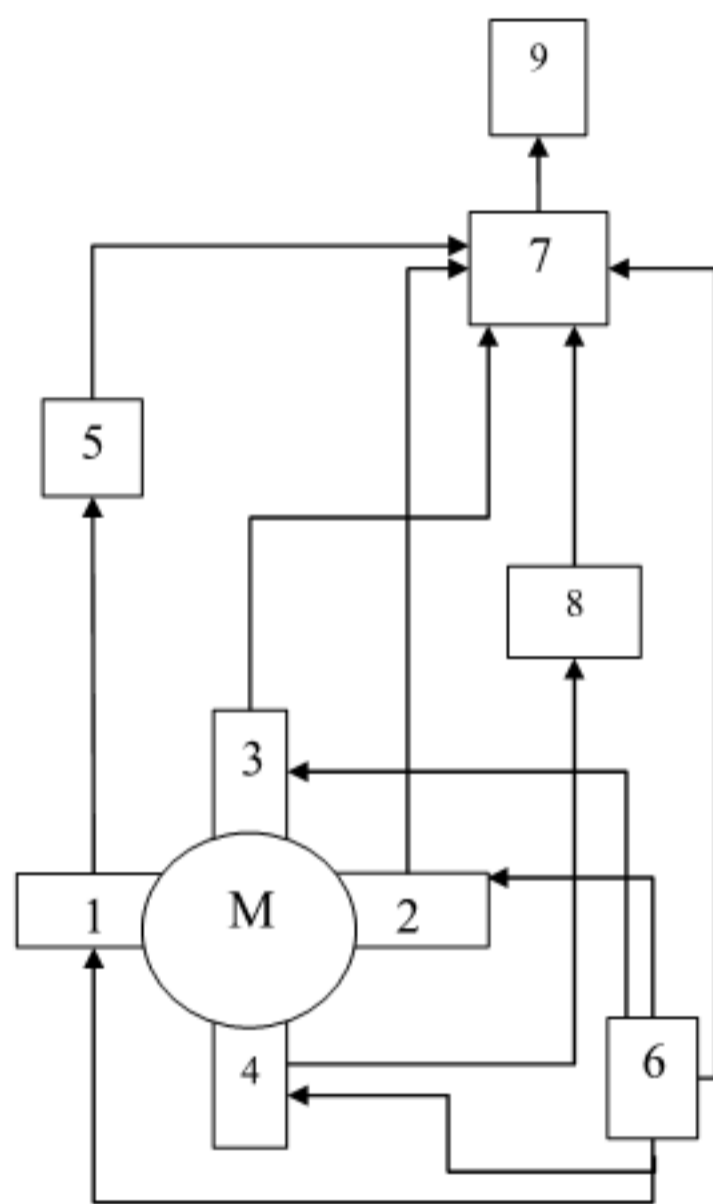


Рисунок 3.3. – Функціональна схема ІВС

$M$  – електродвигун; 1 – оптичний сенсор, що фіксує обертання, генеруючи імпульси з кожним обертотом валу електродвигуна; 2 – цифровий модуль для вимірювання напруги; 3 – цифровий модуль для вимірювання струму; 4 – індуктивний датчик; 5 – мікроконтролер Atmega8; 6 – джерело живлення; 7 – мікроконтролер ESP32; 8 – АЦП HX711; 9 – WEB – сервер.

Оброблений сигнал передається до головного мікроконтролера ESP32 з використанням протоколу I2C. Програмний код мікроконтролера [134] реалізує не лише збір даних від сенсорів, але й їх передавання з використанням WEB-протоколу http, використовуючи Wi-Fi модуль мікроконтролера. Так, дані передаються до серверного додатку, який дозволяє їх візуалізувати та зберегти в базу даних SQLITE.

Серверна частина написана мовою програмування Python, використовуючи ряд серверних бібліотек.

WEB-інтерфейс додатку реалізовано із використанням мови програмування JavaScript та програмної бібліотеки plotly.js. Ознайомитись з програмним кодом серверного додатку можна за посиленням [135].

Для тестування запропонованої ІВС, в середовищі Matlab/Simulink, було побудовано модель електродвигуна RS-775 з наступними робочими характеристиками (Таб.3.1).

Таблиця 3.1

Робочі характеристики електродвигуна RS-775

Номінальна напруга	V	6-12, В
Номінальний обертальний момент	Te	1, Нм
Номінальна швидкість	Nr	3500, об/хв
Опір статора	Rs	5.5, Ом
Індуктивність статора	L	2,52, Гн
Інерція ротора	Jm	2,807, кг·м <sup>2</sup>
Кількість пар полюсів	Pn	2

Метою такого моделювання, було порівняння робочих характеристик ЕД RS-775, які були отримані шляхом моделювання в середовищі Matlab/Simulink та характеристик отриманих під час прямих вимірювань з використанням розробленого стенду, який входить до складу ІВС (рис. 3.4).

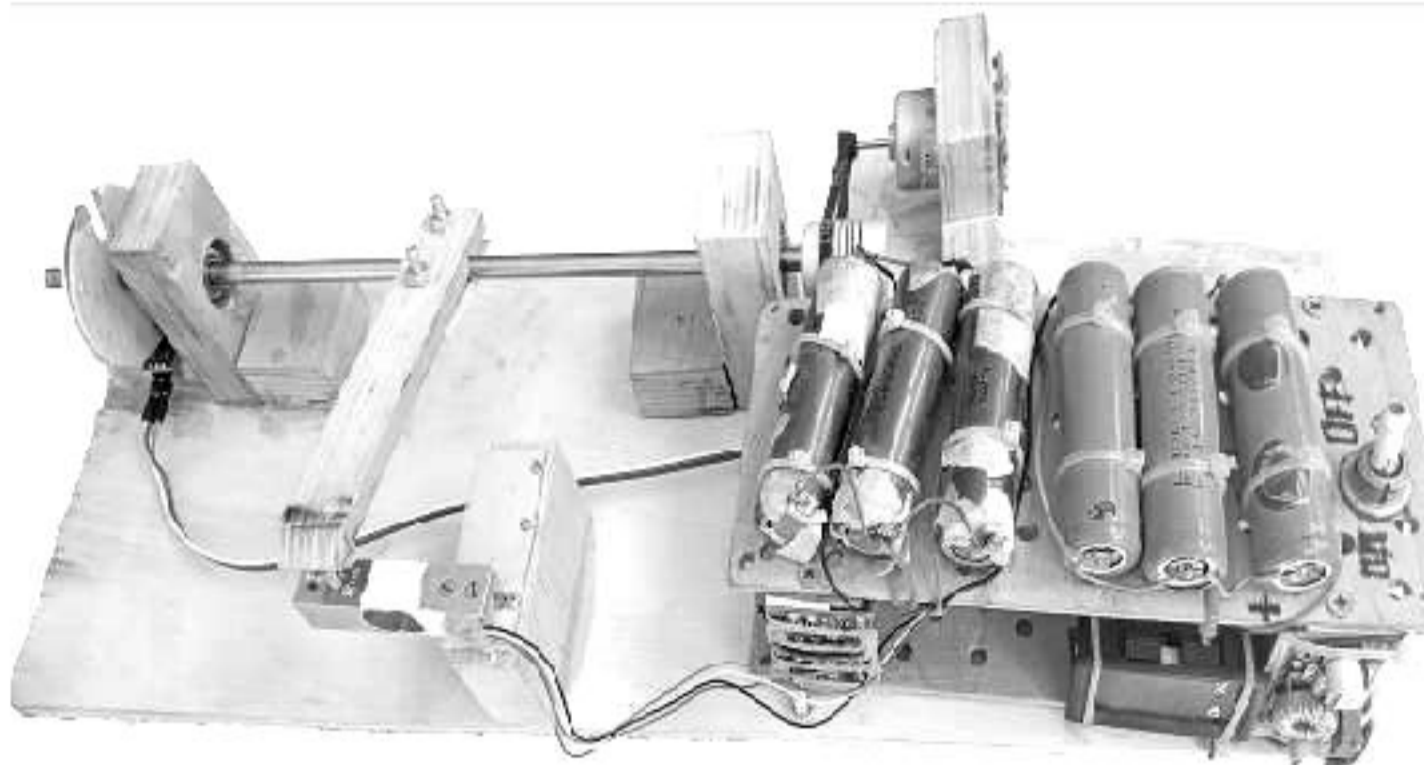


Рисунок 3.4. Прототип приладу для вимірювання параметрів роботи ЕД

Модель вимірювального каналу, яка застосовується в середовищі Matlab/Simulink представлено на рис 3.5.

Сигнал з тензометричного сенсору задається блоком «Сенсор». Блок «Шуми» імітує вібрацію, яка виникає під час обертання валу ЕД. Генератор імпульсів імітує оптичний сенсор для вимірювання частоти. Генератор зразкової частоти генерує час, за який має відбуватись вимірювання імпульсів.

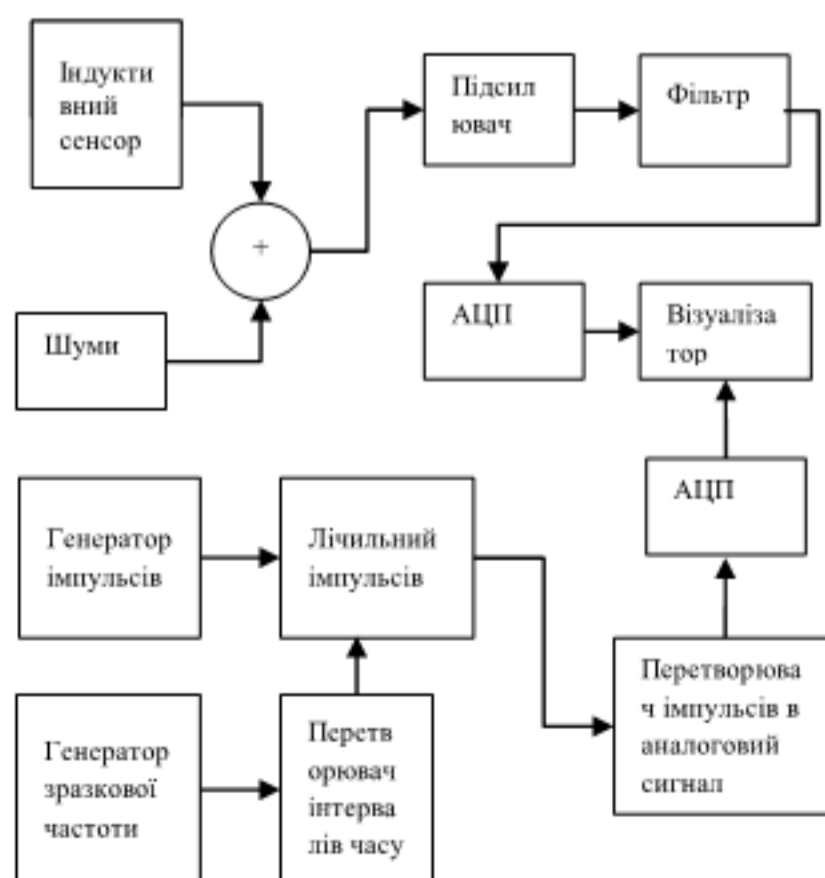


Рис. 3.5. Модель вимірювального каналу створена в Simulink

Лічильник імпульсів передає оброблений сигнал до перетворювача імпульсів в аналоговий сигнал. Після чого сигнал надходить до АЦП та передається до візуалізатора.

У відповідності до джерела [136] передавальну функцію ЕД постійного струму по керуючому впливу з урахуванням перетворень можна записати наступним чином:

$$W_y(S) = \frac{I_y(S)}{U_y(S)} = \frac{k_f S}{(T_m T_e S^2 + T_m S + 1)}, \quad (3.4)$$

де  $T_m = \frac{JR_{\text{я}}}{C_w C_e}$  - механічна постійна часу двигуна;  $T_e = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$  - електротехнічна

постійна часу роботи двигуна;  $k_f = \frac{J}{C_w C_e}$  - коефіцієнт передачі по струму;  $I_{\text{я}}$  -

струм в якірному ланцюгу ЕД;  $R_{\text{я}}$  - опір якірного ланцюга, що рівний сумі опору

якірних обмоток ЕД та вхідного опору підсилювача, Ом;  $L_{\text{я}}$  - сума індуктивностей якірного ланцюга двигуна та вихідного ланцюга підсилювача,

Гн;  $J$  - момент інерції якоря, Нм<sup>2</sup>;  $C_e$  - коефіцієнт моменту сили;  $C_w$  - швидкості, рад/с;  $s$  - оператор Лапласа;  $U_y$  - напруга.

Змодельовавши криву розгону ЕД та його роботу за час в 0,25 с, отримаємо наступну робочу характеристику швидкості обертання (рис. 3.6)

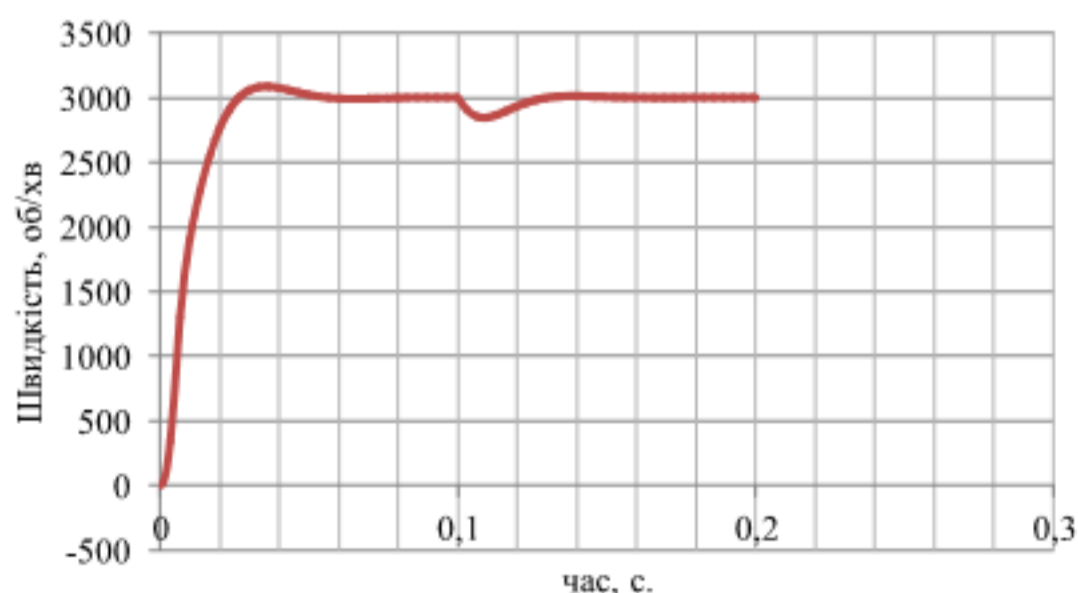


Рис. 3.6. Модель кривої розгону ЕД



Електромагнітний момент має наступні характеристики (рис. 3.7)

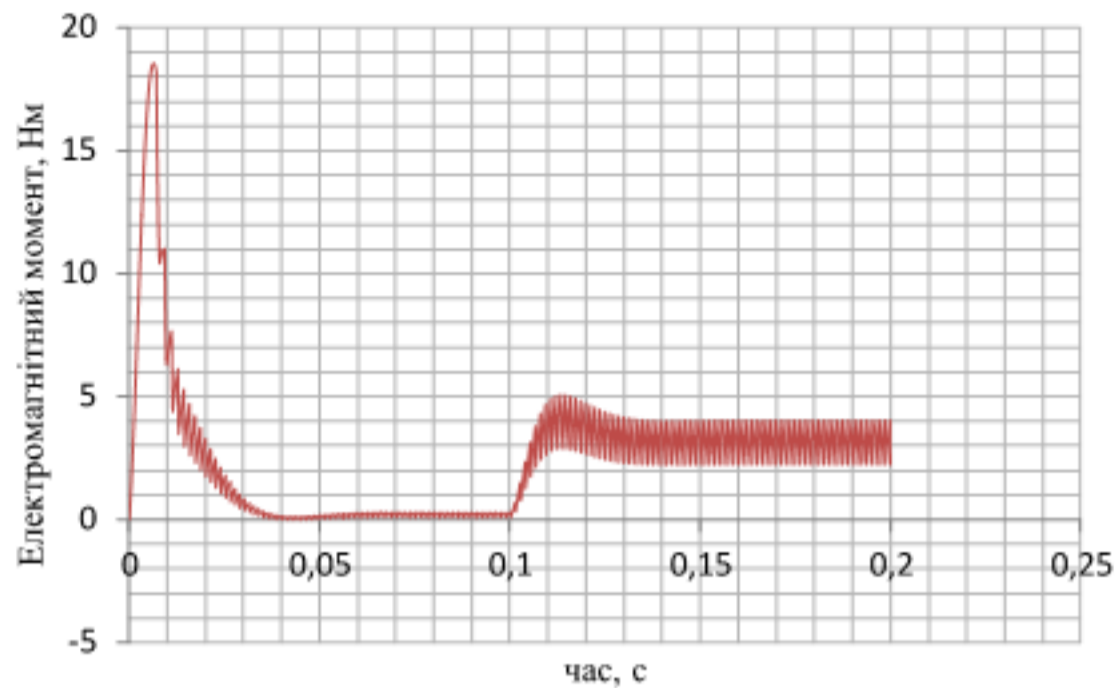


Рис. 3.7. Динаміка зміни електромагнітного моменту

Середньоквадратичне відхилення кривої, що характеризує часові характеристики зміни електромагнітного моменту, отримане за виразом:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}, \quad (3.5)$$

складає 3.86

Динаміка зміни напруги представлена на рис. 3.8., де стрибки напруги обумовлені частотними характеристиками джерела живлення, моделювання якого реалізовано на прикладі імпульсного перетворювача.

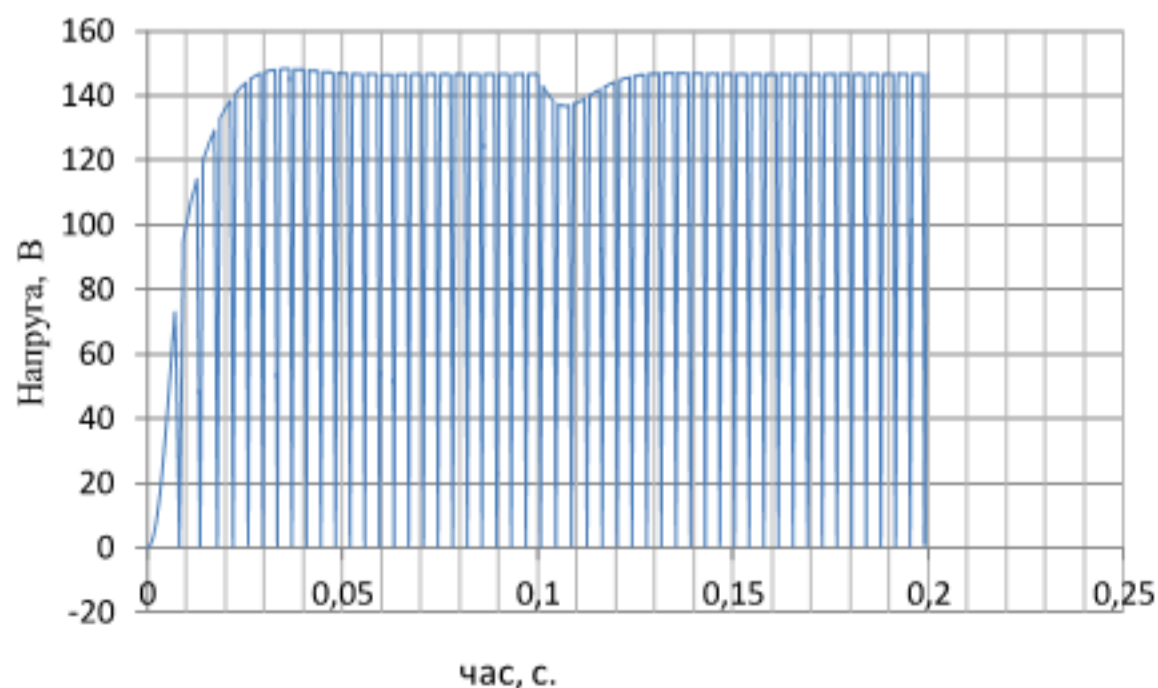


Рис. 3.8. Динаміка зміни напруги

Залежність швидкості обертання та електромагнітного моменту представлено на рис. 3.9., де видно, що на швидкості більше 1500 об/хв., момент сили набуває синусоїдальної форми. Саме в цей період, спостерігається вплив пульсуючого струму.

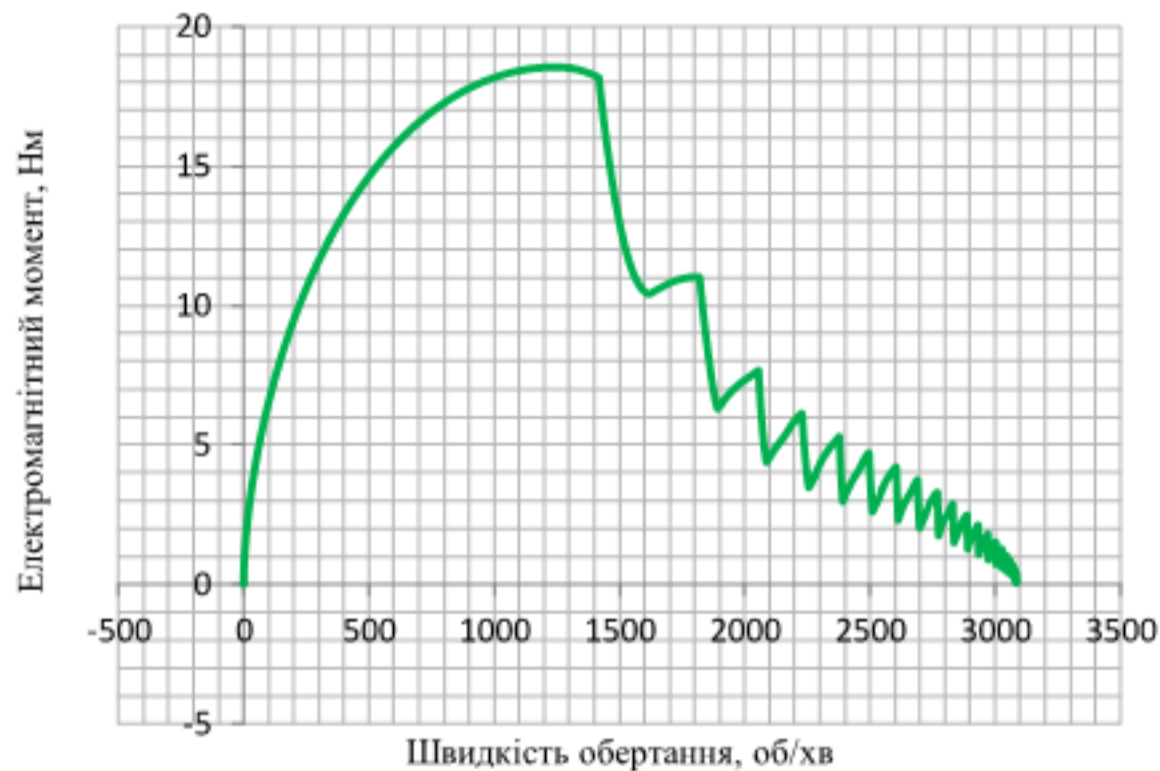


Рис. 3.9. Залежність обертального моменту та швидкості обертання ЕД.

На рис. 7 видно вплив вібрації у вигляді відхилень постійної частоти, що значно ускладнює вимірювання. На рис. 9, також спостерігаються стрибки напруги у вигляді пульсацій.

Усе, та багато інших впливів на вимірювальний сигнал, які обумовлені його пульсацією потребує гасіння таких імпульсів шляхом згладжування кривої.

Для вирішення цієї проблеми, апроксимовано криву розгону, що представлена на рис. 3.7 методом віконних перетворювань Ханна (Хеммінга), в основі якого лежить згладжування розривів на початку та в кінці імпульсного сигналу [137]:

$$\omega(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right), 0 \leq n \leq M-1, \quad (3.6)$$

де  $M$  - ширина вікна.

Після апроксимації кривої розгону, отримане середньоквадратичне відхилення склало 2.61, що дозволило зменшити похибку з 3.86 до 2.61. Результати представлено на рис. 3.10.

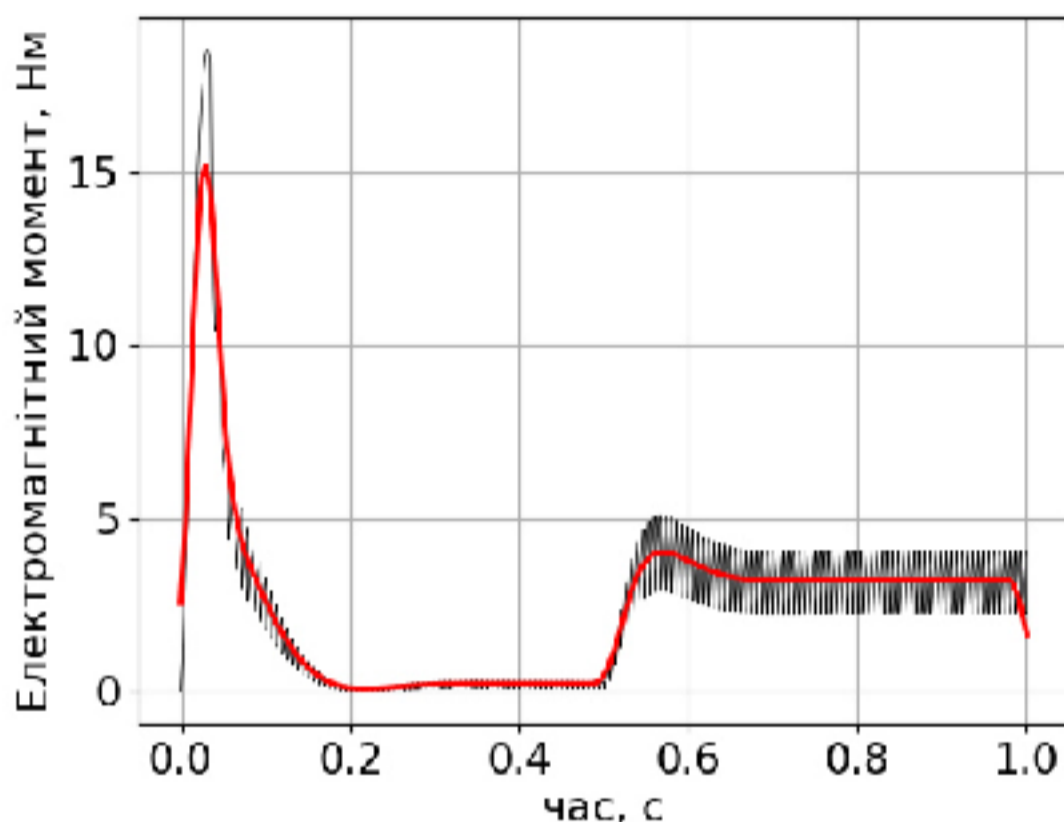


Рис. 3.10. Результати апроксимації кривої розгону шляхом зважування вікном Ханна (Хеннінга)

Тестування прототипу пристрою для вимірювання обертового моменту ЕД, який входить до складу запропонованої ІВС показало наступні результати.

Перехідна характеристика обертового моменту під час запуску ЕД та його роботи впродовж 20 с представлена на рис. 3.11, де з використанням виразу (3.6) було проведено подвійну апроксимацію кривої розгону, що дозволило скоротити стандартне відхилення, викликане вібрацією з 3.06 до 1.83 Дб.

Разом з тим, на рис. 11 видно, що під час запуску, коли двигун ЕД потребує найбільшого моменту сили, для того, щоб набрати потрібні оберти, такий спосіб не може бути використаний у зв'язку із значною похибкою. Так, на рис 3.11, в точці  $X_n$  значення кривих отриманих в результаті апроксимації та вихідних параметрів сигналу отриманого у відповідності до функціональної схеми ІВС, суттєво різняться. Тому в цьому аспекті є потреба у подальших

дослідженнях спрямованих на зменшення впливу шумів на результат вихідного сигналу.

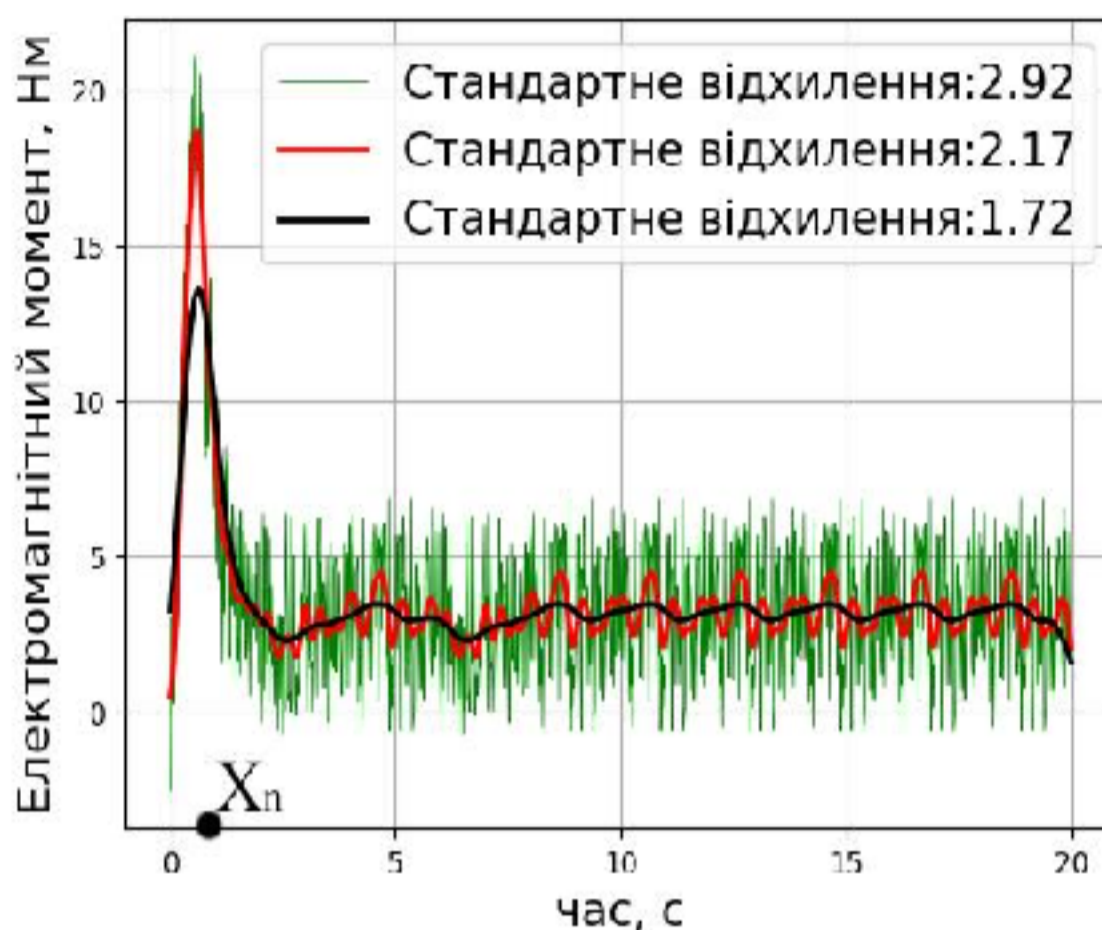


Рис. 3.11. Подвійна апроксимація сигналу, отриманого у відповідності до рис. 3.10, з використанням тензOMETричного сенсору.

З метою дослідження похибки вимірювання швидкості, проведено порівняння отриманих результатів моделювання та експериментальних даних, які отримані з використанням вимірювального стенду. Для цього було проведено 5 експериментальних запусків ЕД та отримано криві розгону (рис. 3.12), де визначено відхилення від очікуваних результатів, середнє значення якого склало 20 %.

До отриманих в результаті дослідження кривих було застосовано вираз (3.6), що дозволило зменшити відхилення до 17%. Так, стандартне відхилення отриманих результатів склало 5.8. Після застосування виразу (3.6) стандартне відхилення склало 5.02

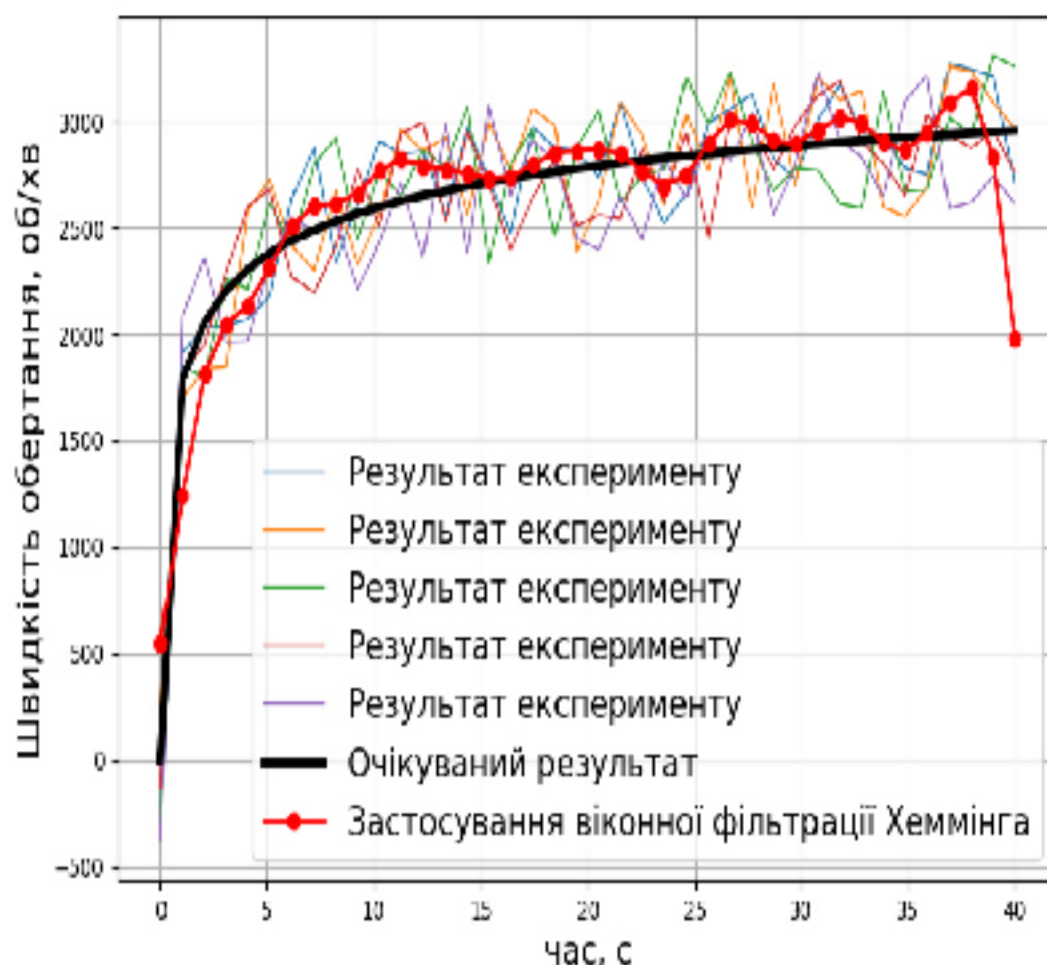


Рис. 3.12. Криві розгону ЕД

Так, реалізація методів безпосереднього вимірювання у запропонованій ІВС з використанням датчику НХ711 для вимірювання обертового моменту та лічильника імпульсів, які генерує оптичний сенсор з метою вимірювання швидкості обертання валу ЕД., дозволила отримати наступні результати.

Проведення імітаційного моделювання параметрів ЕД постійного струму в середовищі Matlab/Simulink, дозволило отримати перехідні характеристики сигналу від тензOMETричного сенсору, що створено для імітації вимірювання обертового моменту. З метою моделювання швидкості обертання валу. Для моделювання вібрації, був створений генератор імпульсів регульованої частоти.

Застосована в моделі передання функція (3.4) показала, що вплив вібрації зменшує точність вимірювання, середньоквадратичне відхилення якого склало 3.86. Для нівелювання такого впливу було використано віконне згладжування Хеммінга (3.6), що дозволило частково зменшити вібрацію. Середньоквадратичне відхилення в такому випадку складало 1.83.

Такий спосіб було застосовано для запропонованого вимірювального стенду провівши серію послідовних вимірів. Середньоквадратичне відхилення при вимірюванні обертального моменту вдалось зменшити з 2.92 до 1.72%. Похибку при вимірювання швидкості зменшено з 5.8% до 5.02%.

### 3.2. Розробка індуктивного перетворювача обертального моменту

Пристрій для вимірювання обертального моменту може бути побудований на базі диференціального трансформатора для вимірювання лінійних переміщень (LVDT), що є електромеханічним перетворювачем, який визначає механічне переміщення сердечника та видає пропорційну змінну напругу на виході. Висока роздільна здатність, висока лінійність, висока чутливість та нульове механічне тертя, можуть бути використаними для покращення метрологічних характеристики вимірювального каналу.

Для реалізації даного способу було застосовано електричну схему, побудовану на основі операційних підсилювачів на інвертуючих каскадах, що дозволяє зменшити вплив обмеження синфазних сигналів із зростанням частоти (рис. 3.13).

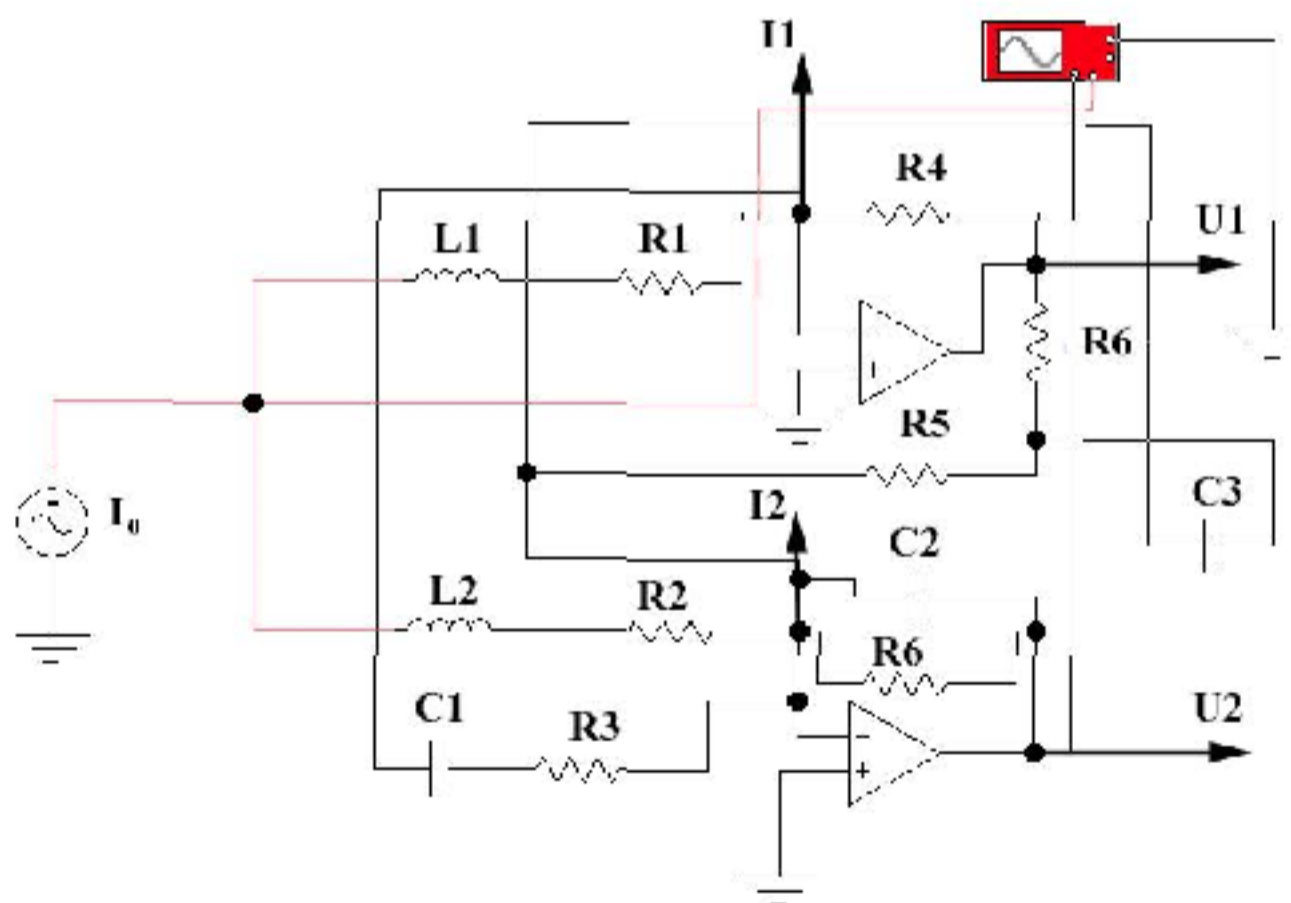


Рисунок 3.13 – Електрична схема вимірювального каналу приладу індукційного типу на операційних підсилювачах для вимірювання обертального

## моменту

Зміна струму в залежності від переміщення феромагнітного елемента навколо котушок індуктивності  $L_1$ ,  $L_2$ , може бути описана наступними співвідношеннями:

$$I_1 = I_0 \cdot \frac{R_2 + k\omega L_2}{R_1 + R_2 + k\omega(L_1 + L_2)}, \quad (3.7)$$

$$I_2 = I_0 \cdot \frac{R_1 + k\omega L_1}{R_1 + R_2 + k\omega(L_1 + L_2)}, \quad (3.8)$$

де  $I_0$  – струм, первинної обмотки LVDT – трансформатора;

$L_1 = L_0 + \Delta L, L_2 = L_0 - \Delta L$ , – індуктивність;

$R_1, R_2$  – опори;

$\omega$  – частота вхідного сигналу.

Вихідні параметри напруги  $U_1$ ,  $U_2$  з урахуванням (3.7), (3.8), можна описати наступними виразами:

$$U_1 = (R_1 + R_4) \cdot I_0 \left[ \frac{R_1 + k\omega L_1}{R_1 + R_2 + k\omega 2L_0} \right] - \left[ \frac{R_2 + k\omega L_2}{R_1 + R_2 + k\omega 2L_0} \right] = (R_1 + R_4) \cdot I_0 \left[ \frac{k\omega L_2}{R_1 + R_2 + k\omega 2L_0} \right]; \quad (3.9)$$

$$U_2 = I_1 \cdot (R_1 + R_4) = I_0 \cdot (R_1 + R_4) \frac{R_2 + k\omega L_2}{R_1 + R_2 + k\omega 2L_0}. \quad (3.10)$$

Характеристики зміни напруги в залежності від зміни індуктивності, спричиненої переміщенням феромагнітного елемента можна описати наступним виразом:

$$\Delta U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_0 \cdot (R_1 + R_4) \frac{R_2 + k\omega L_2}{R_1 + R_2 + k\omega 2L_0}}{(R_1 + R_4) \cdot I_0 \left[ \frac{R_1 + k\omega L_1}{R_1 + R_2 + k\omega 2L_0} \right]}. \quad (3.11)$$

Такий підхід дозволить збільшити чутливість вимірювального каналу за рахунок оптимального підбору опорів  $R1-R6$ . Крім того, індуктивний сенсор є стійким до електромагнітних завад.

Загалом, прилади для вимірювання обертальних моментів електродвигунів, що побудовані на основі електромагнітної індукції використовують сигнал, який отримують з котушки індуктивності. Їх поділяють на індукційні фазо-чуттєві торсіометри та індукційні магніто-пружні торсіометри. Перші дозволяють оцінити обертальний момент по куту скручування на валу [138], [139]. Наступний вид сенсорів даного типу ґрунтується на зміні магнітної проникності металу валу при деформації [140].

В обох випадках на безкінечно малих траєкторіях руху валу електродвигуна  $dl_i$  за час  $dt_i$ , буде виникати ЕРС на сигнальні обмотці, миттєве значення якої буде наступним:

$$e_i = \frac{\Delta d_i}{dt_i}, \quad (3.12)$$

де  $\Delta d_i$  – приріст потягосцеплення сигнальної обмотки за інтервал часу  $dt_i$

Виразивши  $dt_i$  через швидкість руху тіла  $v(t)$ ,  $dt_i = \frac{dl_i}{v(t)}$  отримаємо наступний вираз для  $e_i$ :

$$e_i = \frac{\Delta d_i * v(t)}{dl_i}, \quad (3.13)$$

У зв'язку з тим, що для визначення положення валу використовують феромагнітне тіло, яке входить в зону електромагнітного поля з певним інтервалом часу, то в певний момент воно буде мали найбільше потягосцеплення на інтервалі  $dl$ . У зв'язку з цим, на сигнальній обмотці при проходженні цього інтервалу  $dl$ , в момент часу  $t_m$ , буде виникати найбільше, амплітудне значення ЕРС сигналу:

$$e_{max} = \left( \frac{\Delta d_i}{dl} \right)_{max} * v(t_m), \quad (3.14)$$

Для миттєвого обертання валу електродвигуна, вираз матиме вигляд [4]:

$$v(t_m) = \frac{e_{max}}{\left( \frac{\Delta d_i}{dl_i} \right)_{max}} = \frac{e_{max}}{c \Psi}, \quad (3.15)$$



де  $c\psi$  - постійна величина, що характеризує максимальне значення потягосцеплення сигнальної обмотки від елементарного переміщення феромагнітного тіла в момент певного обертового положення валу.

Так, вольт-секундна характеристика сигналу ЕРС, при певному положенні феромагнітного тіла в зоні електромагнітного поля, буде дорівнює вольт-секундній характеристиці сигналу зворотної полярності, що виникає при під час протилежного положення феромагнітного тіла. Тому що приріст потягосцеплення сигнальної обмотки при обох положеннях, має одне і теж значення. Ця властивість дозволяє використовувати один з імпульсів для керування електронним запам'ятовуючим пристроєм на кожному обороті валу електродвигуна при вимірюванні миттєвої швидкості.

Тому, індукційний метод дозволяє отримати інформацію про миттєву швидкість руху протягом короткого проміжку часу, з урахуванням певного положення феромагнітного тіла в зоні магнітного поля.

Застосовуючи у поєднанні з індукційним первинним перетворювачем електронний пристрій для зберігання амплітудного значення сигналу на кожному періоді, можна здійснити вимір прискорення і створити комплекс технічних засобів вимірювання механічних характеристик прямолінійного або криволінійного руху валу електродвигуна з високою точністю

Оцінка якості процесу вимірювання обертання валу електродвигунів вимагає розширення функціональних можливостей вимірювання фізичних величин у процесі роботи електродвигунів за рахунок використання спектра кутової швидкості та прискорення дозволить встановити взаємозв'язок між режимами їх роботи. Розглядаючи поняття кутової швидкості та кутового прискорення при обертанні твердого тіла, слід зазначити, що кутова швидкість обертання тіла навколо осі, що визначається прирощенням кута повороту тіла за проміжок часу, якщо відома кількість обертів  $n$  за одиницю часу  $t$  може бути представлена виразом:

$$\omega = \frac{n}{t}, [\text{об} / \text{хв}], [c^{-1}] \quad (3.16)$$

І якщо заданий кут повороту  $\varphi$  за одиницю часу:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}, [\text{rad} / \text{s}] \quad (3.17)$$

На рис. 3.14 показано зміну швидкості кута  $\varphi$  (переміщення з положення P1 в положення P2), як характеристику кутової швидкості:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \varphi', [\text{rad} / \text{s}]; [\text{s}^{-1}] \quad (3.18)$$

Прийнявши  $k$  як одиничний орт позитивного напрямку осі, отримаємо наступний вираз:

$$\bar{\omega} = \bar{k} \cdot \varphi = \bar{k} \frac{d\varphi}{dt}, \quad (3.19)$$

Вектор кутової швидкості може бути доданий до будь-якої точки осі обертання та завжди спрямований уздовж осі, при позитивному значенні кутової швидкості напрямку  $\omega$  і  $k$ .

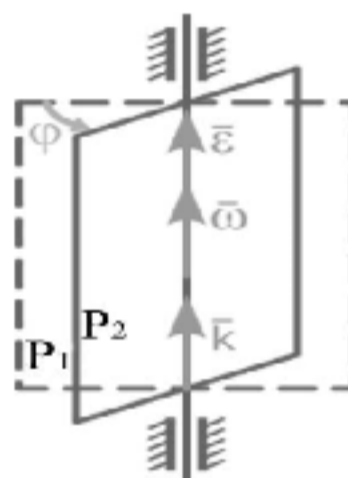


Рис. 3.14. Візуалізація зміни кутової швидкості валу електродвигуна

Кутове прискорення характеризує величину зміни кутової швидкості при обертанні твердого тіла [141]:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \varphi'', [\text{rad} / \text{s}^2], [\text{s}^{-2}]; \varepsilon = \frac{d\bar{\omega}}{dt}, \quad (3.20)$$

Вектор кутового прискорення також спрямований по осі обертання. При прискореному обертанні їх напрями збігаються, при уповільненому протилежні. Так, при позитивному прискоренні кутова швидкість наростає, а при негативному обертанні сповільнюється.

В деяких окремих випадках обертального руху твердого тіла можуть бути використані наступні вирази:

При рівномірному обертанні валу ( $\omega - const$ ) -  $\varphi = \varphi_0 + \omega t$ .

При рівнозмінному обертанні валу ( $\varepsilon - const$ ) -  $\varepsilon = \omega_0 + \varepsilon t$ .

В такому випадку загальне кутове переміщення буде мати вираз:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}, \quad (3.21)$$

Для виміру кутової швидкості широко застосовують імпульсні (індукційні) генератори, тахометри. Їхня робота заснована на явищі електромагнітної індукції полягає в наведенні ЕРС в електричному контурі за рахунок зміни магнітного потоку.

До найбільш популярних засобів вимірювання кутової швидкості можна віднести індукційні датчики [142, 143], (рис. 3.15).

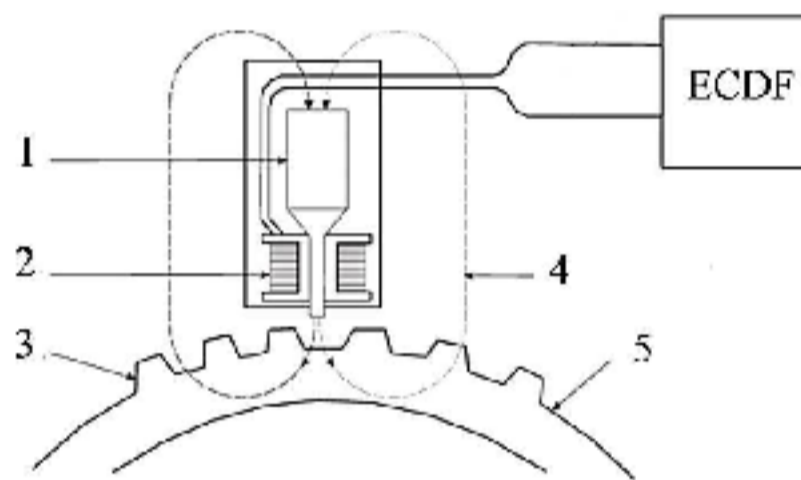


Рис. 3.15. Датчик швидкості обертання валу, [144]

де: 1-магніт, 2-котушка, 3-зубець, 4-магнітна силова лінія, 5- ротор

Їх конструкція складається з постійного магніту з обмоткою та зубчастого диска-ротора, закріпленого на валу. При обертанні зубчастого диска в обмотці датчика наводиться ЕРС. Це призводить до зміни магнітного потоку в осерді і появи в обмотці електричного струму, амплітуда і частота якого пропорційні частоті обертання ротора. Такі прилади називають індукційними тахометрами [145].

Чутливість індукційних датчиків залежить від швидкості обертання диска-ротора, що її задає. Сучасні датчики виконуються, як правило, на основі магнітокеріваних мікросхем, завдяки чому видають сигнал навіть при зупиненому зубчастому диску. Для зняття з індуктивних датчиків інформації в

умовах сильних перешкод застосовують спеціальні фільтри сигналу на спеціалізованих мікросхемах типу MAXIM9926 [146].

Загальною статичною характеристикою чутливого елемента індуктивних датчиків для вимірювання обертального моменту без урахування сил тертя та сили тяжіння рухомих деталей є нелінійна залежність:

$$\Delta z = \frac{\omega^2 \cdot kmz \left( 1 + \frac{2r_0}{\sqrt{4l^2 + z^2}} \right)}{4c}, \quad (3.22)$$

де  $\Delta z$  - поточна координата;  $\omega$  - кутова швидкість;  $k$  - число вантажів;  $m$  - маса вантажу;  $z$  - відстань між втулками  $r_0$  - радіус підвісу тяги;  $l$  - довжина тяги;  $c$  - жорсткість пружини.

До найбільш популярних електричних схем, які застосовуються при обробці сигналу від тахометрів можна віднести наступну [147] (Рис. 3.16).

В основі такої схеми є перетворювач частоти в струм, який перетворює вхідний сигнал у пропорційний струм. Вимірюється стрілочним приладом. Відхилення стрілки міліамперметра пропорційно до частоти вхідного сигналу.

Для установки приладу на електродвигун вхідний контакт А треба підключити до високовольного дроту, а контакт В - до маси електродвигуна.

Для калібрування схеми слід резистори R2 та R4 встановити у середнє положення. Увімкнути живлення схеми та подати на її вхід прямокутні імпульси частотою 60 Гц від генератора.

Резистором R2 потрібно встановити показання міліамперметра 0.36 мА, що еквівалентно 3600 об /хв. Відключивши сигнал від входу, підстроювальним резистором R3 можна виставити 0 мА. Підключивши знову вхідний сигнал 60 Гц, якщо показання приладу відрізняються від 0.36 мА, можна провести калібрування резистором R4. Повністю відкалібрований тахометр повинен показувати 0 мА.

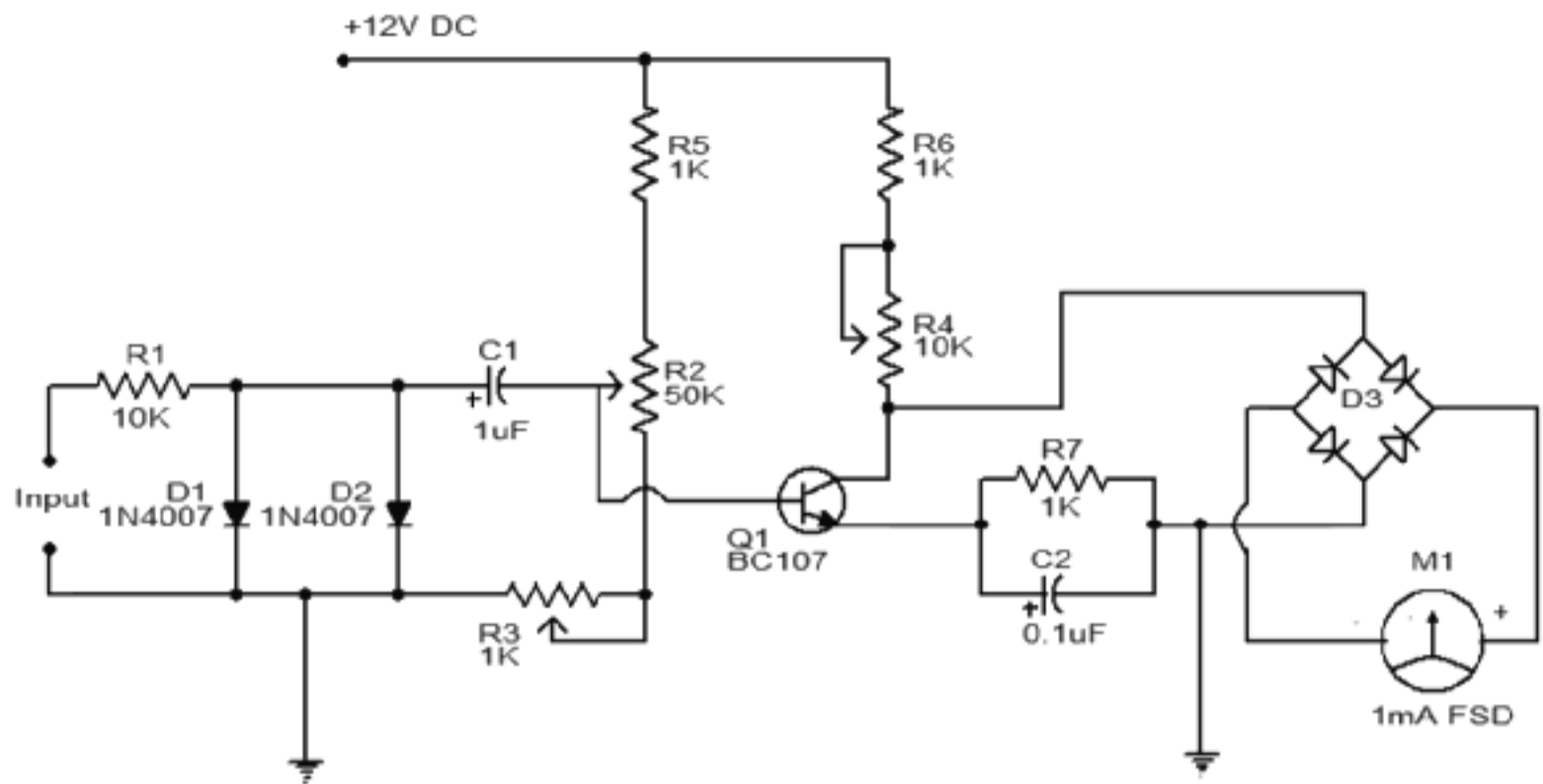


Рис. 3.16. Електрична схема індуктивного тахометра, [148]

Для дослідження роботи електродвигуна постійного струму на постійних магнітах (12 В, 5 А) на базі платформи Arduino було розроблено пристрій для визначення нерівномірності обертання валу електродвигуна, функціональна схема якого представлена на рис. 3.17.

Цей пристрій дозволяє проводити безперервні вимірювання кутової швидкості обертання валу без втручання у конструкцію силових агрегатів. Такий підхід реалізовано шляхом застосування двох індуктивних датчиків.

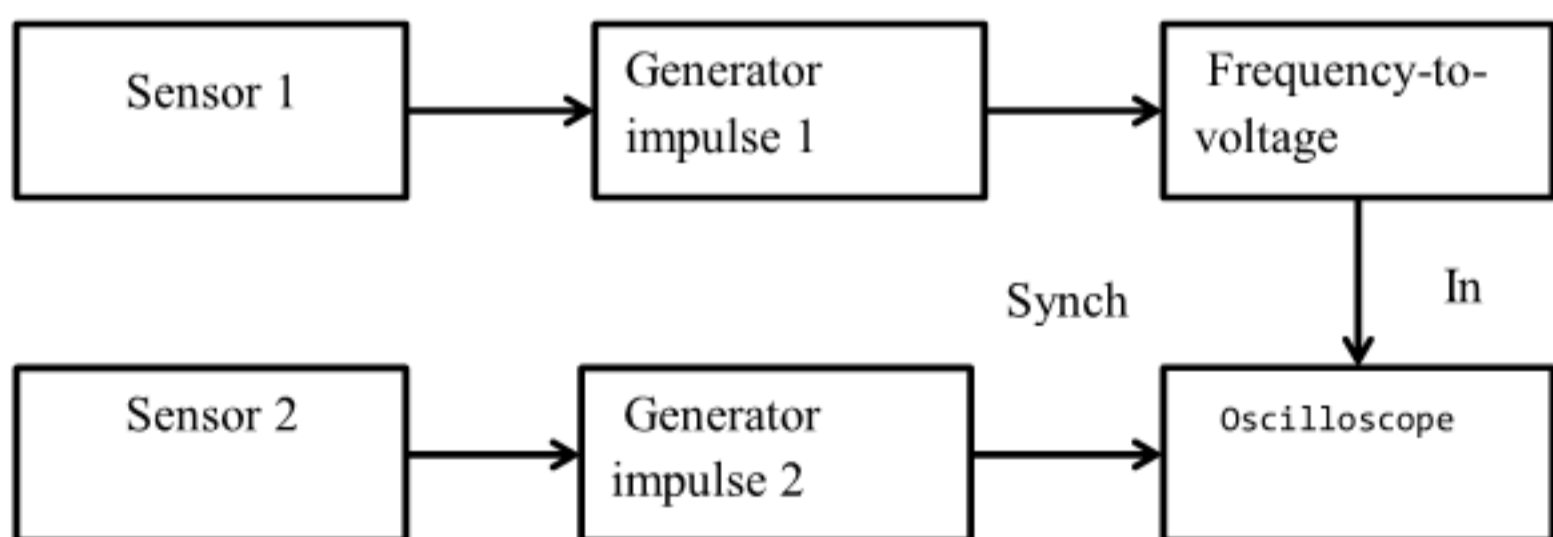


Рис. 3.17 Структурна схема пристрою для дослідження нерівномірності обертання валу електродвигуна

При цьому перший датчик забезпечує визначення одного характерного положення маховика протягом циклу, наприклад, у верхній мертвій точці, інший застосований для детального контролю швидкості кутового переміщення всіх зубів магнітного маховика, який кріпиться до валу електродвигуна.

Сенсори 1 і 2 представляють собою котушки, які генерують ЕРС. Сигнали обох датчиків надходять на входи відповідних генераторів імпульсів (Generator impulse 1) та (Generator impulse 2), одинвібраторів з тривалістю імпульсів близько 0,1 мілісекунди. З виходу першого генератора імпульсів сигнал надходить на вхід частотного перетворювача частоти в напругу (Frequency-to-voltage), що є електронним. Частотомір, виконаний на базі прецизійного конвертора LM331.

На виході частотоміра діє аналоговий сигнал, напруга якого пропорційна частоті вхідних імпульсів.

Таким чином, на екрані осцилографа циклічно реєструється форма та амплітуда періодичних змін кутової швидкості обертання.

Результати експерименту, що дозволили отримати амплітудно-частотну характеристику пристрою, представлено на рис. 3.18.

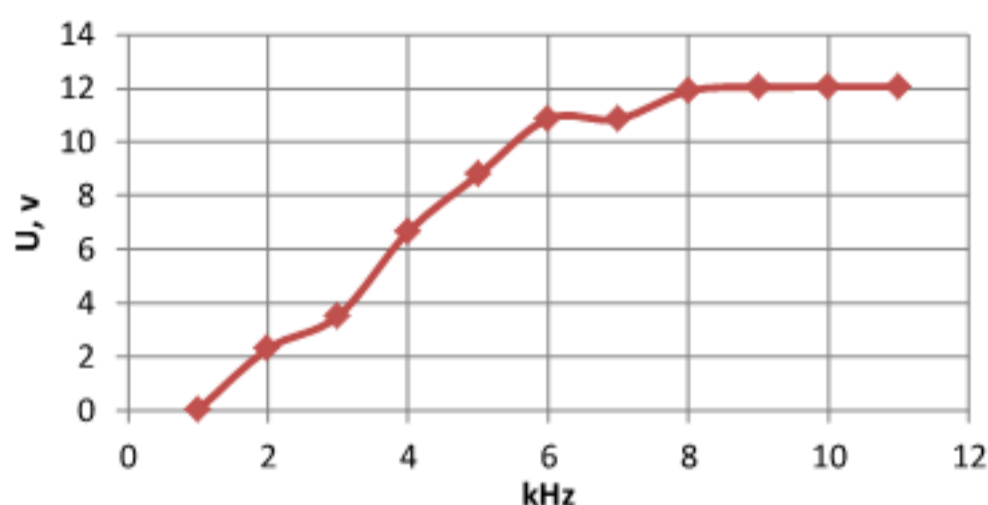


Рис. 3.18 Амплітудно-частотна характеристика пристрою для дослідження нерівномірності обертання валу електродвигуна

Оцінка можливостей вимірювання кутової швидкості валу електродвигунів з використанням індуктивних сенсорів показала, що даний тип датчиків має просту конструкцію та високу точність вимірювання. Проведення експериментальних вимірювань кутової швидкості колекторного електродвигуна

постійного струму (12 В, 5А), шляхом побудови блоку вимірювання на базі індуктивних сенсорів та платформи Arduino, дозволило отримати частотну характеристику сигналу від двох сенсорів. Використовуючи частотний перетворювач, отриманий сигнал було візуалізовано у вигляді залежності напруги та частоти (див рис. 3.18).

### **3.3. Комп'ютерна система вимірювання обертального моменту**

Забезпечення ефективної та надійної роботи електродвигунів – одне з найважливіших завдань, для фахівців з обслуговування промислового обладнання. Враховуючи те, що електродвигуни споживають значну кількість енергії, ефективність їх використання стала основним фактором економічної ефективності роботи промислових підприємств.

Необхідність забезпечити економію підтримується промисловими стандартами, такими, як ISO 50001 [149], який встановлює основні положення та вимоги для підтримки систем управління енергоспоживанням. Разом з тим, стандартизовані системи управління та контролю електричними двигунами, які побудовані на основі вимірювальних засобів, мають обмежену кількість інформаційних параметрів, які можна отримати в процесі роботи електродвигуна. Як правило, такі системи є уніфікованими [150], основне призначення яких - отримувати основні метрологічні характеристики роботи електродвигуна. До таких можна віднести: напругу, струм, обертальний момент та швидкість обертання валу. Проте, для передбачення виходу із строю електродвигуна, можна розширити коло інформаційних параметрів. Наприклад додавши показники вібрації, температури, вологості, задимленості, тощо.

Разом з тим, необхідність точного вимірювання обертального моменту та швидкості обертання валу обумовлена не лише стабільністю роботи електродвигуна, а й технологічними потребами. Тому актуальним є дослідження розподілених інформаційних систем управління електродвигунами, з метою ведення контролю та прогнозування їх основних параметрів.

Запропонована інформаційна система для вимірювання обертального моменту електродвигунів побудована з використанням тензометричних сенсорів

серії TS [3], аналогово-цифрового перетворювача (24 біт) HX711, який передає перетворений цифровий сигнал до мікроконтролеру ESP8266, що має у своєму складі WIFI модуль. Це дозволяє отримати доступ до локальної мережі та створює можливість шляхом http запиту передавати показники ряду інформаційних параметрів до спеціально розробленого web – додатку, який візуалізує отримані дані та дозволяє надсилати відповіді на періодичні запити від ESP8266. Такі відповіді містять управляючі сигнали, що перетворюються на вихідні логічні сигнали мікроконтролеру ESP8266, а також сигнали ШИМ. Функціональна схема такої системи представлена на рис. 3.19.



Рис. 3.19 Функціональна схема інформаційно-вимірювальної системи роботи електродвигунів

Принцип вимірювання обертального моменту, який передається валом електродвигуна реалізовано за допомогою спеціальної муфти, яка приєднана до плеча. В такому випадку обертальний момент буде дорівнювати векторному добутку:



$$M = \vec{F} \cdot \vec{R} = F \cdot R \cdot \sin \alpha, \quad (3.23)$$

де  $M$  – момент сили;  $F$  – сила (Нм);  $R$  – плече сили;  $\alpha$  - кут між вектором сили  $\vec{F}$  та вектором плеча сили  $\vec{R}$ .

Макет вимірювального пристрою з використанням плеча та муфти, яка регулює силу взаємодії із валом електродвигуна та самим плечем, що під час обертання валу тисне на тензOMETричний сенсор побудовано з використанням тензOMETричного сенсору та АЦП (рис. 3.20).

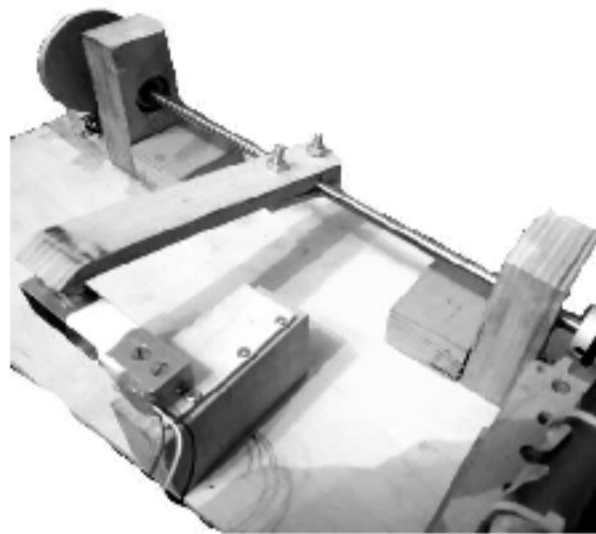


Рис. 3.20. Макет сенсору для вимірювання обертального моменту

Вимірювання швидкості обертання електродвигуна, реалізовано шляхом підрахунку імпульсів. Для цього застосовано датчик обертів FC-03, який має у своєму складі світлодіод, який спрямовує світло на фото - транзистор, що змінює свій логічний стан, передаючи його на вхід одного із портів мікроконтролера (рис. 3.21).

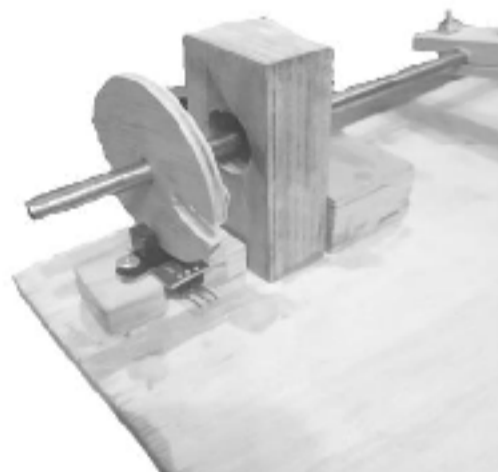


Рис.3.21. Датчик обертів



де  $q_1, q_2, q_n$  – величини похибок. Разом з тим не можна знайти таку криву, яка б проходила через усі задані точки. Тому, відповідно до принципу найменших квадратів найкращі значення коефіцієнтів  $A_0, A_1$  будуть такі, для яких сума квадратів похибок буде найменшою, тобто значення  $\sum_{k=1}^n q_k^2$ , буде мінімальним.

Таким чином, величина, яка розглядається, як функція коефіцієнтів  $A_0, A_1$  повинна мати мінімум:

$$\sum_{k=1}^n (A_0 + A_1 m_k - M_k)^2 = F(A_0, A_1), \quad (3.27)$$

Тому для калібрування тензOMETричного сенсору було застосовано метод підстановок. Відкалібрувавши тензOMETричний сенсор, з допомогою еталонних ваг, його похибка склала 1-1.5% в межах 5 кг.

Така ж процедура була проведена із калібруванням сенсору для вимірювання обертів.

Отриманий сигнал від HX711 у вигляді бінарного коду передається з використанням фізичного інтерфейсу UART до мікроконтролеру ESP8266. Для роботи із мікросхемою HX711 використовується бібліотека HX711.h, яка міститься в середовищі Arduino IDE. Для роботи із http протоколом також було використано ряд програмних бібліотек в цьому середовищі.

Серверна частина реалізована на базі серверного програмного забезпечення Nginx, який встановлено на віртуальному сервісі, який забезпечує можливість використовувати інтерпретатор Python, завдяки якому відбувається обробка даних. Веб - інтерфейс реалізовано з використанням фреймворку CherryPy. Для візуалізації даних застосовано JavaScript бібліотеку plotly.js.

Для тестування інформаційної системи, було використано розроблений метрологічний стенд, де встановлено електродвигун 12 В, 5 А. (рис. 3.22). Функціональна схема тензOMETричного стенду представлена на рис. 3.23

Вимірювання струму було реалізовано з використанням модуля аналогового типу. Принцип вимірювання заснований на контролі напруги, що знімається з прецизійного дільника напруги. Для вимірювання використовується мікросхема MAX471 із вбудованим вимірювальним шунтом.

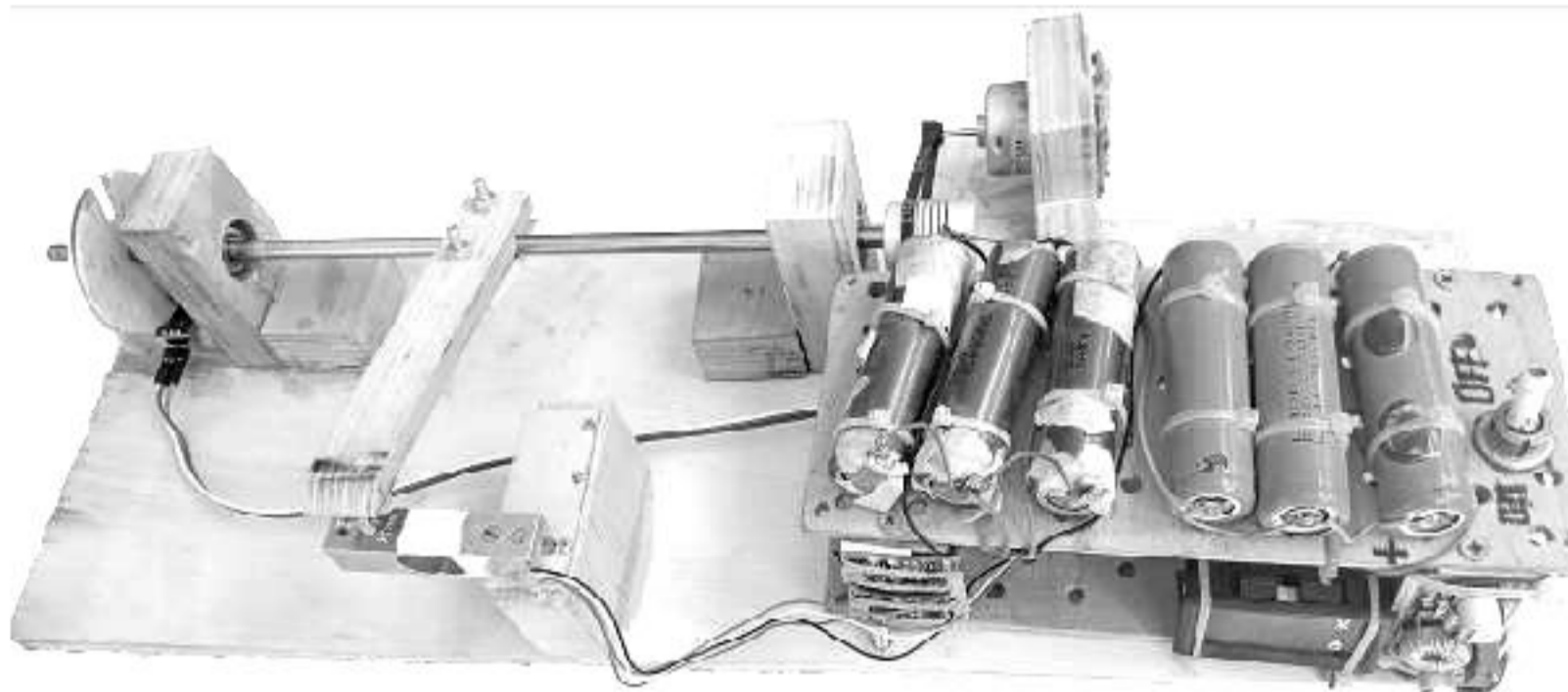


Рис. 3.22. Стенд для вимірювання робочих характеристик електродвигунів

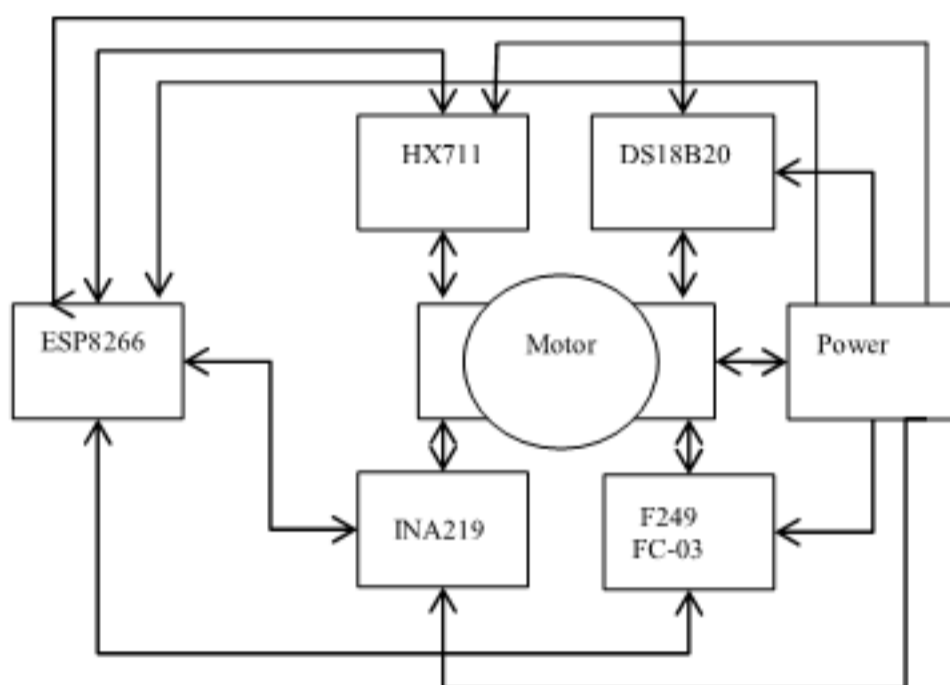


Рис. 3.23. Функціональна схема стенду для вимірювання робочих характеристик електродвигунів

Результати тестування вимірюваної системи представлено на рис. 3.24, де видно, як в момент пуску, споживання струму є максимальним, обертальний момент стабілізується на рівні 800 об/хв, а перехідна характеристика розгону складає 3 с.

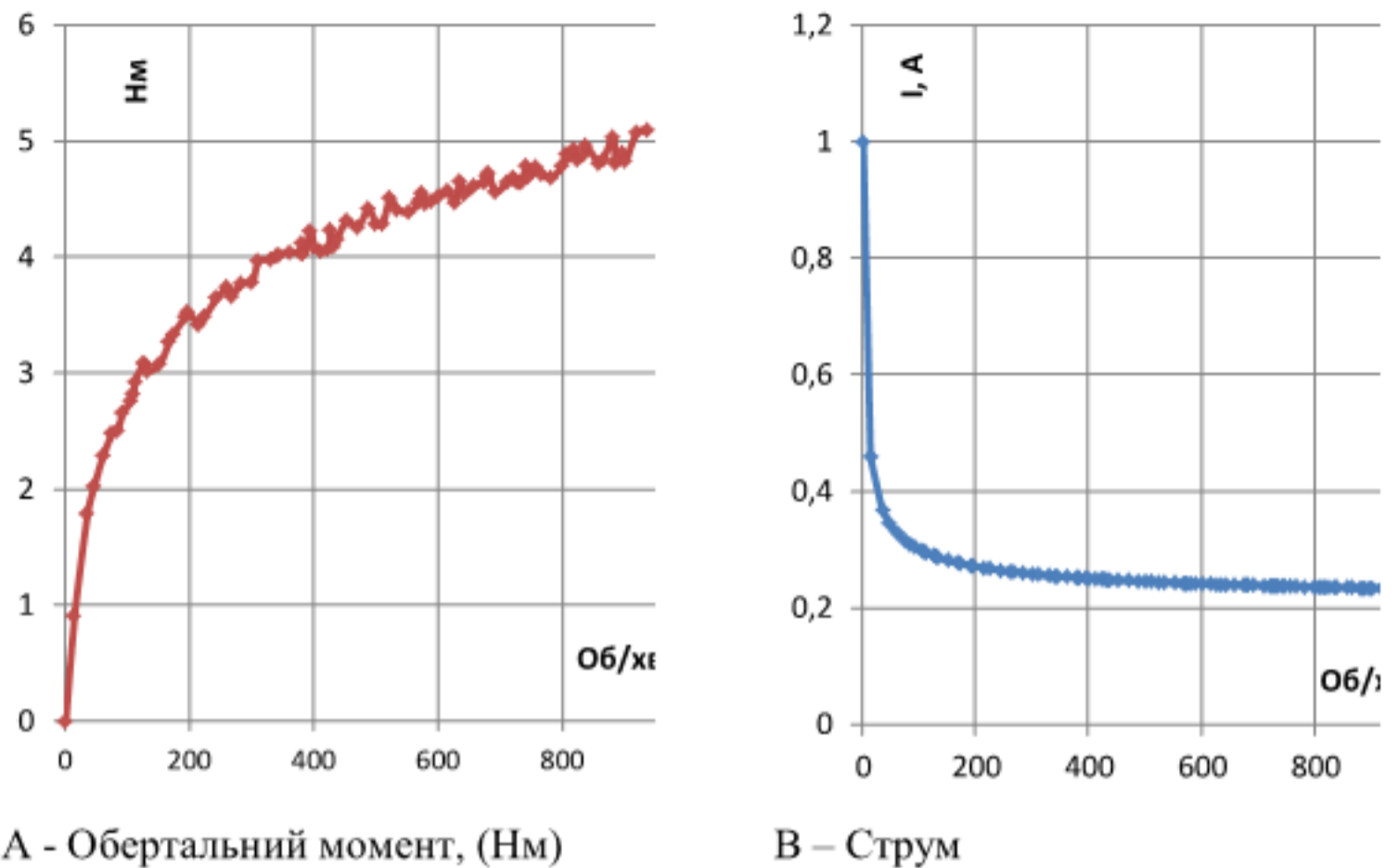


Рис. 3.24 Результати тестування інформаційної системи для вимірювання метрологічних характеристик роботи електродвигуна, [7]

Разом з тим перевірка на точність таких вимірювань показала значну похибку. Так, показники швидкості обертання мали похибку  $\pm 2-3\%$  при обертанні валу до 1000 об/хв. Клас точності сенсору для вимірювання обертального моменту склав 3-4%, в діапазоні 2-5 Нм.

Тестування запропонованої інформаційної системи для вимірювання основних інформаційних параметрів електродвигунів показало, що її можна використовувати не лише для вимірювання, а й для управління, що робить її універсальною в багатьох сферах.

Разом з тим, за результатами обробки сигналу, було отримано значну похибку обертального моменту та швидкості обертання валу електродвигуна, що потребує використання спеціалізованих обчислювальних пристроїв та використання більш точних сенсорів.

### **3.4 Мережева автоматизована система для вимірювання робочих характеристик електрогенераторів вітрових турбін**

Сьогодні існує потреба у покращенні енергетичного потенціалу світу за рахунок альтернативних джерел енергії. Найбільш енерго-ефективною, серед вже існуючих енергетичних сфер, можна вважати вітрову енергетику. Тому покращення цієї сфери є однією із найбільш актуальних задач світової політики, економіки, науки і техніки багатьох країн світу. Разом з тим, на перешкоді стоїть багато факторів впливу на ці процеси. Зокрема, з технічної сторони, це визначення населених пунктів, найбільш оптимальних для розміщення вітрових турбін, оптимізація вимірювальних каналів для збільшення точності контролю за роботою вітрових станцій, покращення роботи автоматизованих систем регулювання навантаженням, тощо.

Крім того, переважна більшість громадян, які проживають за межею бідності в різних країнах світу, через недоступність електроенергії, потребують власних та автономних джерел живлення. Тому існує необхідність для таких категорій населення побудови автономних джерел електропостачання. Враховуючи що, недоступність централізованого електропостачання в деяких регіонах світу, при наявності власних джерел живлення у громадян, потужності яких не вистачає для власних потреб, такі джерела можна об'єднувати в мережу з розподіленим графіком користування. Це дозволить використовувати малозабезпеченому населенню малопотужні вітрові генератори, сонячні панелі, та інші джерела живлення, об'єднуючи їх в мережу. Тому, для того, щоб поєднати такі джерела живлення, потрібно як апаратне, так і програмне забезпечення для управління та контролю цією системою.

Контроль за роботою вітрових електростанцій здійснюється за допомогою уніфікованих рішень, які включають в себе набір програмних та технічних засобів, проте вони розраховані в основному на обслуговування великих електростанцій, а їх вартість для малозабезпечених громадян не є доступною.

Таким, чином для побудови мережевої системи вітрових електрогенераторів, потрібно контролювати значну кількість інформаційних параметрів, зокрема стан вітрових турбін та їх продуктивність. Найважливішим таким параметром виступає контроль за переміщенням валу електрогенератора, його обертового моменту та швидкості обертання, оскільки при перевищеннях допустимих режимів роботи, виникає підвищене зношування підшипників, перенавантаження на електроніку, збільшення руйнівних вібрацій, що значно зменшує строк експлуатації вітрової турбіни, а в деяких випадках і до аварійних ситуацій.

Усе це, та багато інших потреб вимагають створення автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи вітрових електрогенераторів мережевого типу, що дозволить малозабезпеченим громадянам, за відсутності постійного електропостачання поєднувати власні вітрові генератори та навіть інші джерела живлення малої потужності в загальну мережу, управління якою може здійснюватись в автоматизованому режимі.

Не значна кількість напрацювань, щодо створення мережеских вимірювальних систем, а також систем управління вітровими електростанціями стримує розвиток бюджетних електричних мереж малої потужності для потреб власних домогосподарств.

Останнім часом автоматизовані системи, які застосовуються для управління вітровими електростанціями почали інтеграцію в єдині вимірювальні мережі, що дозволяють ефективно отримувати велику кількість інформаційних параметрів. Така інтеграція дозволяє збільшити точність вимірювань та створити умови для подальшого прогнозування окремих видів похибок. Тому, в сучасних умовах, широкої популярності набув термін «бездротова сенсорна мережа» що розглядається, як само-організована, стійка до відмов окремих елементів мережа мініатюрних датчиків, обмін інформації між якими відбувається за рахунок бездротового зв'язку [152].

Вузли сенсорної мережі є автономними, що дозволяє забезпечити належну стійкість до зміни топології та зміни умов поширення результатів вимірювань. Так, первинний елемент виступає і як вимірювальний перетворювач, а також, як пристрій для обробки первинного сигналу, з власним інтерфейсом для передачі даних в мережу.

Переважна більшість сенсорних мереж є бездротовими, що дозволяє значно спростити їх експлуатацію, особливо в умовах, коли кожна вітрова турбіна потребує окремих рішень щодо автономності вимірювальних засобів, їх енергонезалежності та уніфікованості для використання.

Враховуючи особливості роботи вітряних електростанцій, сигнали від сенсорів, які знаходяться на вітрових турбінах, як правило передаються безпроводним каналом та мають перешкоди. Долідження такого впливу знайшло своє відображення в роботі [153], де описано сумарний вплив таких перешкод у вигляді логарифмічної моделі:

$$PL(d) = PL(d_0) + n \cdot 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}, \quad (3.28)$$

де  $PL$  – відстань затухання сигналу;  $d$  – відстань від передавача до приймача;  $d_0$  –

деяка відстань, на якій розраховується опорне значення затухання;  $n$  - ступінь втрат у каналі зв'язку;  $X_\sigma$  - Гаусівська випадкова величина з нульовим математичним очікуванням та середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$ , що описує неоднорідності середовища поширення сигналу.

Вимірювальні сенсори, які використовують для вітрових генераторів виконують наступні функції: контроль рівня вібрації для забезпечення захисту від аварійних ситуацій; моніторинг температури, тиску та механічних напруг. Останній параметр заслуговує на особливу увагу, оскільки він є ключовим в процесі визначення вихідної потужності електрогенератора та оцінювання навантаження. Так, загальноприйнята формула для визначення обертального моменту в залежності від швидкості вітру має на наступний вираз [154]:

$$M = \frac{C_m}{2} \rho V^2 r, \quad (3.29)$$

де  $C_m$  - коефіцієнт обертального моменту;  $\rho$  - щільність повітря;  $2 \text{ кг/м}^3$ ;  $V$  - швидкість вітру, м/с;  $S$  - площа лопатки;  $r$  - радіус вітроколеса.

$C_m$  - визначається при максимальному коефіцієнті використання енергії вітру та швидкохідності  $Z$ , [155]:

$$Z = \frac{V_{lin}}{V_{win}} = \frac{\omega \cdot r}{V}, \quad (3.30)$$

де  $V_{lin}$  - лінійна швидкість обертання, м/с;  $V_{win}$  - швидкість вітру, м/с;  $\omega$  - кутова швидкість обертання валу.

Вихідна напруга може бути розрахована за наступною формулою [156]:

$$U = \frac{P}{I \cdot \cos \varphi}, \quad (3.31)$$

де  $I$  - струм;  $\cos \varphi \cong 0,8 \div 0,85$  - коефіцієнт потужності,  $P$  - потужність вітрового потоку.

В роботі [107], проведено моделювання впливу обертального моменту на роботу електрогенератора вітрової турбіни, в основі якої закладено наступне рівняння:



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_d - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d, \\ \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_d + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_q - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}, \\ T_e = 1,5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m), \\ \frac{d}{dt} \theta = \omega_r, \end{array} \right. \quad (3.32)$$

де  $L_q$ ,  $L_d$  - індуктивності статора по осях  $q$  і  $d$ ;  $R$  – опір обмотки статора;  $i_d$ ,  $i_q$  – проекції струму статора на осі  $q$  та  $d$ ;  $u_d$ ,  $u_q$  - проекції напруги статора на осі  $q$  та  $d$ ;  $\omega_r$  – кутова швидкість обертання ротора;  $\lambda$  – магнітний потік, зчеплений зі обмоткою статора;  $p$  – кількість пар полюсів;  $T_e$  – електромагнітний момент;  $J$  – сумарний момент інерції ротора та навантаження;  $F$  – коефіцієнт тертя;  $\theta$  – кут положення ротора;  $T_m$  – момент

опору.

Оскільки генератор видає змінний струм по фазі, частоті та амплітуді, який складно використати для потреб споживача, він проходить через трьохфазних випрямний міст. Вимірювання вихідної напруги здійснюється за допомогою вольтметра, частота обертання ротора вимірюється з використанням акселерометрів, які призначені для вимірювання прискорення та частоти обертання. З метою моніторингу швидкості обертання валу електрогенератора використовують акселерометри. У вітрогенераторах вони використовуються для виявлення вібрації в підшипниках, а також в інших компонентах, що обертаються. Дані про вібрації необхідні для поточного моніторингу, прогнозування та запобігання можливим аваріям. Для визначення змін ефективності роботи генератора використовують датчики швидкості вітру. Важливим параметром є і температура, оскільки вал та інші механізми змінюють свою пружність в залежності від зміни температури. Для узгодження таких змін використовують інтелектуальну корекцію похибок.

Розглянуті параметри можуть бути отримані з використанням сенсорних мереж. Наприклад в роботі [157] запропоновано метод кластеризації бездротової сенсорної мережі з додаванням алгоритму рою бджіл, який дозволяє створювати мережі, незалежні від точки управління такою мережею. Загалом, існує більше 200

різних алгоритмів самоорганізації, сенсорних мереж, класифікація яких представлена в роботі [158]. Тому, для побудови сенсорної мережі, яка може бути застосована для вітрових електрогенераторів малої потужності слід провести моделювання такої системи для визначення її номінальних режимів, аварійних станів та енергоефективності загалом.

Для побудови сенсорної мережі, до складу якої може входити невелика кількість вітрових турбін малої потужності, слід визначити параметри, які мають бути враховані. До таких можна віднести: швидкість вітру; температуру поверхні статора; обертальний момент генератора; швидкість обертання валу; вібрації. В залежності від швидкості вітру, вібрацій, обертального моменту а також температури статора має бути побудована АСУ для управління положенням лопаток вітрової турбіни, з можливістю її аварійної зупинки (рис. 3.25). Моделювання даної схеми з використанням моделей (3.28-3.32) при поступальному збільшенні швидкості вітру та інших заданих вхідних параметрах, було здійснено шляхом написання програмного коду і дозволило отримати наступний результат (рис. 3.25-3.26)

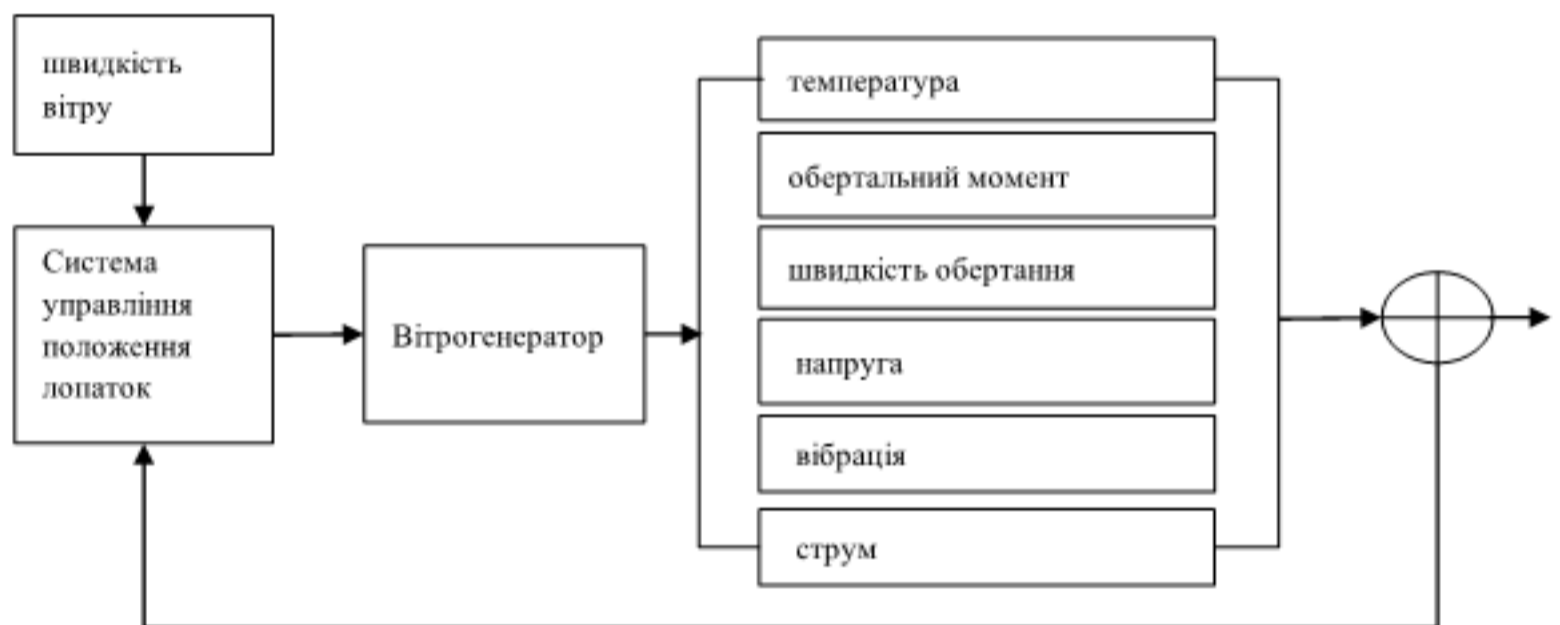


Рис. 3.25. Структурна схема вимірювальних засобів однієї вітрової турбіни

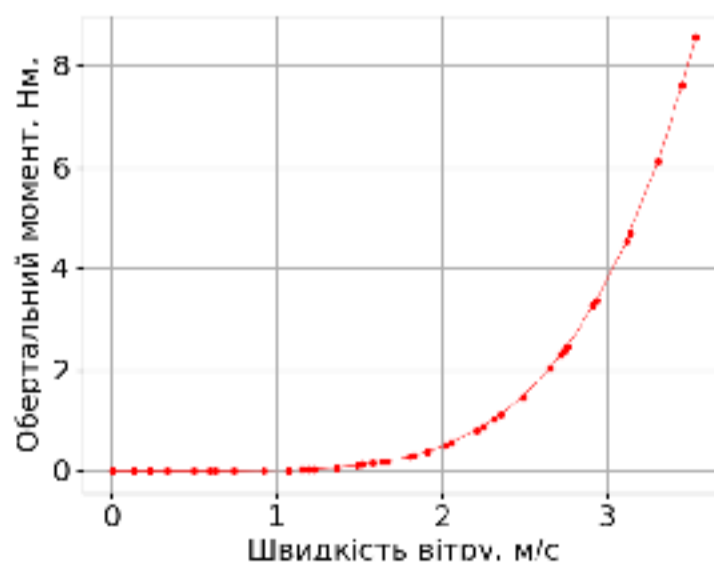


Рис. 3.26. Залежність обертального моменту від швидкості вітру

Динаміка зміни вихідної напруги, отримана за формулою (3.32), представлена на рис. 3.27.

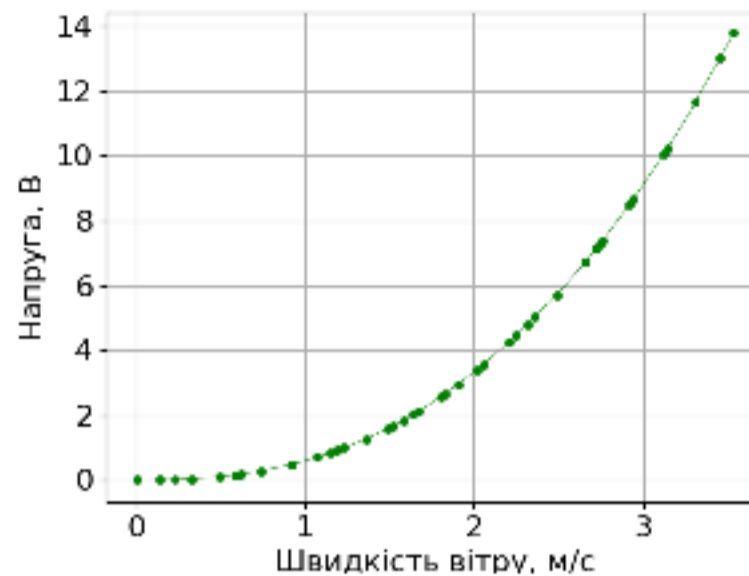


Рис. 3.27. Залежність напруги електрогенератора та швидкості вітру  
*Побудовано з використанням Matplotlib*

Моделювання дозволило встановити номінальну напругу при швидкості вітру 3,5 м/с., яка склала 12 В.

Моделювання отриманих параметрів для мережі вітрогенераторів з урахуванням відхилень швидкості вітру  $\pm 0,5$  м/с, дозволило встановити, що при застосуванні 10 вітрових турбін, напруга коливатиметься в межах 12 вольт при наявності вітру на менше 3,5 м/с. (рис. 3.28)

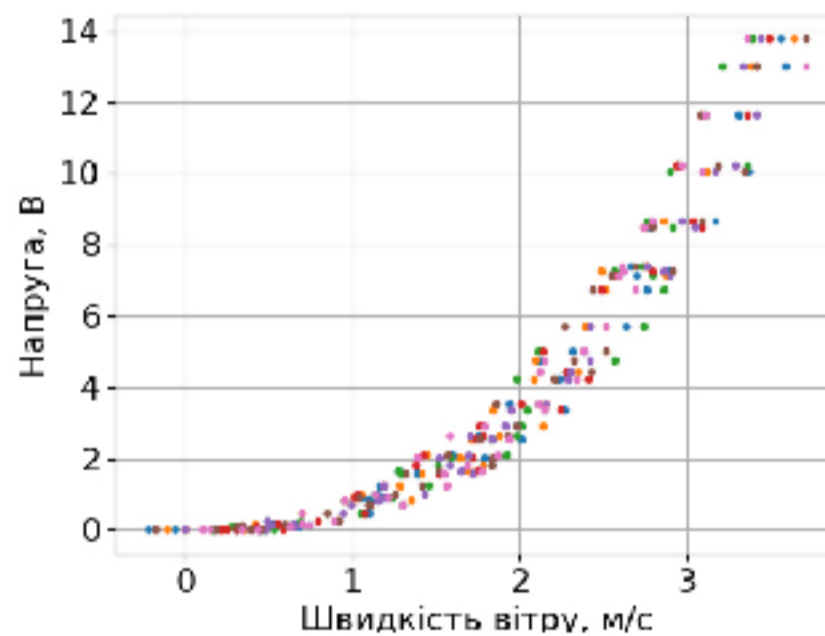


Рис. 3.28. Вихідні параметри напруги мережі із 10-ти вітрових електрогенераторів.

Сенсорну мережу можна побудувати, в залежності від розташування вітрових турбін за топологією зірки, дерева, або mesh мережі (рис. 3.29), в

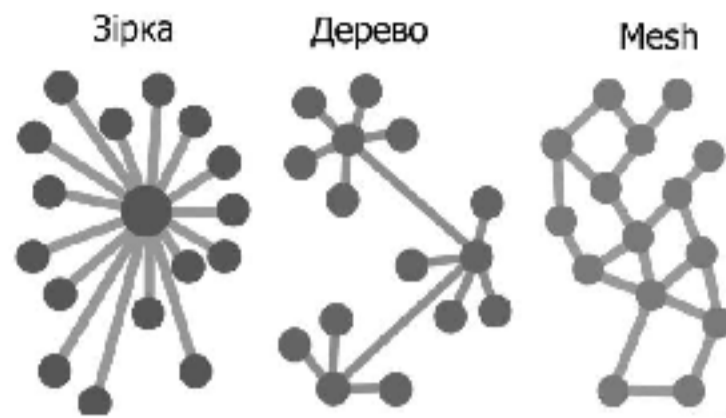


Рис. 3.29. Топологія побудови сенсорної мережі

Управління мережею може здійснюватись в автоматизованому режимі використовуючи серверне програмне забезпечення та стандартні web-протоколи для передачі даних.

Так, сенсорні вимірювальні мережі можуть бути реалізовані для контролю та управління вітровими станціями малої потужності. Моделювання робочих характеристик вітрових турбін, як окремо так і у складі мережі, дозволило встановити вихідну напругу при середньостатистичній швидкості вітру  $3,5 \pm 0,5$  м/с. Із відповідними вхідними параметрами, в мережі із 10 вітрових турбін, напруга коливатиметься в межах 12 вольт при наявності вітру на менше 3,5 м/с.

### Висновки до 3 розділу

1. Запропонована інформаційно-вимірювальна система у комплексі з додатковими вимірювальними пристроями, які можуть бути під'єднані до неї з використанням локальної мережі, утворюючи розподілену сенсорну мережу вимірювальних пристроїв об'єднаних між собою за допомогою радіоканалу, може бути використана для тестування електродвигунів, візуалізації вимірювальних даних та подальшого їх зберігання.

Тестування запропонованої інформаційної системи показало, що її можна використовувати не лише для вимірювання, а й для управління, що робить її універсальною в багатьох сферах.

Разом з тим, за результатами обробки сигналу, було отримано значну похибку обертового моменту та швидкості обертання валу електродвигуна, що потребує використання спеціалізованих обчислювальних пристроїв та використання більш точних сенсорів.

2. Пропозиції щодо створення приладу для вимірювання обертових параметрів електродвигунів з використанням індуктивних та тензометричних сенсорів дозволять отримати просту конструкцію та високу точність вимірювання в жорстких умовах експлуатації, що пов'язано із завадостійкістю.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел в галузі вимірювання обертальних моментів електродвигунів дозволив отримати структуру наукових та технічних розробок у цій області, виявити переваги та недоліки існуючих методів та приладів, а також визначити перспективні напрямки досліджень та розвитку приладів даного типу. Отримано висновки про те, які проблеми виникають під час вимірювання обертальних моментів електродвигунів та як їх можна вирішити, а також які нові технології та методи можуть бути використані для поліпшення якості вимірювань.

2. Аналіз методів та засобів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів дозволив отримати інформацію про технічні характеристики та особливості різних методів та приладів для вимірювання обертальних моментів. А саме: на основі досліджено розроблена класифікація методів та приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів за різними ознаками (за принципом дії, за областю застосування, за точністю вимірювання); проведено порівняння різних методів та приладів за їхніми перевагами та недоліками, точністю вимірювання, областю застосування та іншими технічними параметрами; визначено технічні проблеми, що виникають під час вимірювання обертальних моментів електродвигунів; визначено перспективні напрямки досліджень та розвитку в галузі вимірювання обертальних моментів електродвигунів на основі бездротових технологій зв'язку та інтернету речей.

3. Математичне моделювання процесів вимірювання обертальних параметрів електродвигунів дозволило отримати наступні результати: розроблено математичну модель перетворювача обертального моменту що дозволяє прогнозувати точність вимірювання; визначено вплив різних факторів на точність та надійність вимірювання обертальних моментів, таких як швидкість обертання деталей, температура, вібрації, взаємодія з електричними та магнітними полями; визначено оптимальні параметри

приладів для вимірювання обертальних моментів електродвигунів, таких як діапазон вимірювання, точність, швидкість реакції.

4. Розроблена математична модель вимірювання обертального моменту індуктивними сенсорами дозволяє отримати більш точні результати вимірювань в порівнянні з вже існуючими методами. Це досягнуто завдяки врахуванню ефекту вібрації валу та зміни його пружності в результаті температурного впливу. Розроблена модель дозволяє підібрати оптимальні параметри сенсора для отримання максимальної точності вимірювань.

5. На основі моделювання трифазного безколекторного двигуна постійного струму (BLDCM) було отримано вдосконалену математичну модель, яка враховує такі фактори, як нестационарність та нелінійність процесів, а також динаміку магнітного поля із залежністю від часу. Розроблена модель дозволяє вивчити різні параметри BLDCM електродвигунів, такі як обертовий момент, кутову швидкість та струм, а також динаміку руху вісі. Така модель може бути корисною для розробки та оптимізації систем управління та контролю безколекторних електродвигунів.

6. Запропонований моделюючи комплекс для вимірювання динамічних та статичних моментів електродвигунів дозволив встановити оптимальні режими вимірювань під час сталої їх роботи, а також пускового та гальмівного перехідного процесу.

7. Пропозиції щодо компенсації нелінійності індуктивних вимірювальних перетворювачів обертального моменту, які виникають через температурні дестабілізуючі фактори дозволили збільшити точність вимірювань за рахунок покращення алгоритмів корекції похибки нелінійності.

8. Запропонований метод автоматичного коригування похибки вимірювального каналу, який ґрунтується на дистанційному порівнянні результатів зі зразком, де процес встановлення належних параметрів відбувається з використанням зовнішнього джерела вимірювання, дозволив

проводити калібрування вимірювальних приладів в дистанційному режимі, що значно скорочує час між повірками.

9. Запропонований в роботі індуктивний перетворювач обертового моменту, може застосовуватись, як статичному режимі вимірювання параметрів роботи електродвигунів, так і в динамічному. В даному перетворювачі, в якості первинного перетворювача застосовується високочуттєвий лінійний трансформатор, який дозволяє збільшити чутливість вимірювального каналу, а також має значну стійкість до електромагнітних завад. У складі індуктивного перетворювача запропоновано електронний пристрій для зберігання амплітудного значення сигналу на кожному періоді вимірювання, це дозволило уніфікувати вихідний сигнал та збільшити точність за рахунок фільтрації шумів, які викликані вібрацією валу.

10. Представлена в роботі інформаційно-вимірювальна система для вимірювання основних інформаційних параметрів електродвигунів може бути використана не лише для вимірювання, але й для управління роботою електродвигунів, що робить її універсальною в багатьох сферах.

11. Розроблена в роботі сенсорна вимірювальна мережа дозволяє детектувати та аналізувати величини, пов'язані з роботою електрогенератора, такі як швидкість обертання валу, момент, струм, напруга та інші. Завдяки цим даним, запропонована система може контролювати ефективність та безпеку роботи генераторів, виявляти можливі несправності та запобігати виникненню аварійних ситуацій. Крім того, сенсорна мережа дозволяє збирати дані про роботу генераторів в режимі реального часу та передавати їх до системи моніторингу та управління, що сприяє оптимальному використанню ресурсів та забезпеченню стійкості роботи електричних машин.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kvasnikov V., Kvashuk, D., Kataieva M. . (2021). High-precision methods for measuring the moment of rotation. *Nauka I Studia*, (6). url: [http://nauka-i-studia.info/ojs/index.php/pl\\_ojs/article/view/151](http://nauka-i-studia.info/ojs/index.php/pl_ojs/article/view/151)
2. Kvasnikov, V., Kvashuk , D., Tutchenko , R. . (2022). Research of indirect methods of measuring the characteristics of three-phase asynchronous electric motors. *News of Science and Education*, (8). url: [http://scieduc.info/ojs\\_en/index.php/en\\_ojs/article/view/37](http://scieduc.info/ojs_en/index.php/en_ojs/article/view/37)
3. Kvasnikov, V., Kvashuk (2021). Classification of devices for measuring the torque of electric motors. *News of Science and Education*, (7). url: [http://scieduc.info/ojs\\_en/index.php/en\\_ojs/article/view/28](http://scieduc.info/ojs_en/index.php/en_ojs/article/view/28)
4. Квашук, Д., Кобилянський І. (2021). Вимірювання кутової швидкості валу електродвигунів з використанням індуктивних сенсорів. *Středoevropský věstník Pro vědu a výzkum*, (9). url: [http://czvestnic.info/ojs/index.php/cz\\_ojs/article/view/143](http://czvestnic.info/ojs/index.php/cz_ojs/article/view/143)
5. Ornatskyi D., Kvashuk D., Larionova , J. (2021). Вимірювання фізичних величин електродвигуна гвинтового конвеєру під час транспортування матеріалу. *Nauka I Studia*, (7). извлечено от [http://nauka-i-studia.info/ojs/index.php/pl\\_ojs/article/view/156](http://nauka-i-studia.info/ojs/index.php/pl_ojs/article/view/156)
6. Т. Олешко, Д. Квашук, К. Троцюк (2022). Аналіз характеристик індуктивних перетворювачів в приладах для вимірювання обертальних моментів. *Věda a perspektivy*, № 6(13), с. 317-324, DOI: [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2022-6\(13\)-317-332](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2022-6(13)-317-332)
7. Дудніков, В. (2021). Огляд методів і засобів вимірювання крутних моментів. *Editorial Board*, 710.
8. Васілевський, О. М. (2015). Метрологічне забезпечення вимірювань крутного моменту електромоторів з урахуванням концепції непевності. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. № 3: 75–79.



9. Attila Szántó, Éva Ádámkó, György Juhász, Gusztáv Áron Sziki, Simultaneous measurement of the moment of inertia and braking torque of electric motors applying additional inertia, *Measurement*, Volume 204, 2022, 112135, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112135>.

10. Hongwei Yue, Hongwen He, Mo Han, Study on torsional vibration characteristics and suppression of electric vehicles with dual-motor drive system, *Journal of the Franklin Institute*, Volume 360, Issue 1, 2023, Pages 380-402, ISSN 0016-0032, <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.11.008>

11. Muhammad Usman Jamil, Waree Kongprawechnon, Nattapon Chayopitak, Average Torque Control of a Switched Reluctance Motor Drive for Light Electric Vehicle Applications\*\*This research project is supported by Sirindhorn International Institute of Technology (SIIT), Thammasat University, and the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) of Thailand for the Excellent Foreign Student (EFS) Scholarship and the equipments for this research. The research project is partially funded by the National Research Universities (NRU) by the Office of Higher Education Commission (HEC), and Thammasat University, Thailand., *IFAC-PapersOnLine*, Volume 50, Issue 1, 2017, Pages 11535-11540, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1628>.

12. Мисяць, В. П., Рубанка, Н. Н. (2014). Экспериментальная установка для исследования динамических характеристик роторной ножевой дробилки. *Труды Одесского политехнического университета*, (1), 78-82.

13. Кононов, Б. Т., Рябуха, Н. М., & Уваров, В. М. (2015). Визначення електромагнітного моменту дугостаторного асинхронного електричного двигуна з короткозамкненим ротором. *Системи озброєння і військова техніка*, (2), 109-112.

14. Thanh Vo-Duy, Minh C. Ta, Fundamental design of electric motor control systems, Editor(s): Jorge García, *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, Elsevier, 2023, Pages 428-453, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00054-4>.

15. N. Hanappier, E. Charkaluk, N. Triantafyllidis, A coupled electromagnetic–thermomechanical approach for the modeling of electric motors, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 149, 2021, 104315, ISSN 0022-5096, <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104315>.
16. Безрученко В. М. Теорія електроприводу [Електронний ресурс] : підручник. Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2011.
17. A. A. Arkhipov, "Calculation of Starting Torque and Currents of a Three-Phase Asynchronous Motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-23, no. 4, pp. 771-775, Jul./Aug. 1987.
18. J. Chapman, S. (2004). *Electric machinery fundamentals*. McGraw-hill.
19. Кухарчук В. В., Ведміцький Ю.Г., Граняк В. Ф. Вимірювання параметрів обертального руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2018. – 155 с.
20. Васілевський О. М., Поджаренко В. О. Система вимірювального контролю параметрів взаємозв'язаних роторних машин. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМВінниця, 2007. – 156 с.
21. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 219с
22. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К: Вища школа, 1983. – 319 с.
23. Потапенко, М. В., & Шаршонь, В. Л. (2023, January). Вплив ймовірнісних зовнішніх факторів на роботу електродвигунів. In *The 1th International scientific and practical conference "Current issues of science and integrated technologies"* (January 10-13, 2023) Milan, Italy. International Science Group. 2023. 799 p. (p. 719).
24. Chi, Cheng & Xu, Gang & Xu, Ying & Shen, Jianhao & Chen, Biyun. (2018). Development of XBW in-wheel-motor-drive electric vehicle simulation platform. *Journal of Physics: Conference Series*. 1074. 012098. 10.1088/1742-6596/1074/1/012098.

25. Вовк, О. Ю. (2020). Обґрунтування діагностичних параметрів асинхронних електродвигунів для періодичного контролю. Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем: матеріали I Всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції пам'яті ВВ Овчарова (Мелітополь, 20 травня-04 червня 2020 р)/ТДАТУ; орг. ком. ВМ Кюрчев, ВТ Надикто, ІП Назаренко [та ін.].-Мелітополь: ТДАТУ, 2020.-110 с., 42.

26. Загальна фізика. Механіка [Текст] : навч. посіб. для студ. інженерно-техн. спец. вищ. навч. закл. / С. М. Пастушенко. - К. : НАУ, 2002. - 284 с.

27. Наукові записки. – Випуск 4. – Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. Частина 1. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В.Винниченка, 2013 – 347 с.

28. Бекишев, Р. Ф. Электропривод : учебное пособие для вузов / Р. Ф. Бекишев, Ю. Н. Дементьев. — 2-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2021. — 301 с.

29. Analytical Mechanics, L.N. Hand, J.D. Finch, Cambridge University Press, 2008, ISBN 978-0-521-57572-0

30. Hughes, A., & Drury, B. (2019). Electric motors and drives: fundamentals, types and applications. Newnes.

31. Теорія електропривода/ За ред. М.Г.Поповича.- К.: Вища школа, 1993.-494 с

32. Острецов, В. Н. Электропривод и электрооборудование : учебник и практикум для СПО. В. Н. Острецов, А. В. Палицын. - М. : Издательство Юрайт, 2019. - 239 с.

33. Xiaowen Li, Adeline Bourdon, Didier Rémond, Samuel Kœchlin, Dany Prieto, Angular-based modeling of unbalanced magnetic pull for analyzing the dynamical behavior of a 3-phase induction motor, Journal of Sound and Vibration, Volume 494, 2021, 115884, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115884>.

34. Jannik Summa, Sebastian Michel, Moritz Kurkowski, Dirk Biermann, Markus Stommel, Hans-Georg Herrmann,

Process Monitoring of a Vibration Dampening CFRP Drill Tube in BTA deep hole drilling using Fibre-Bragg-Grating Sensors, *Procedia CIRP*, Volume 115, 2022, Pages 119-124, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.060>

35. Yanyu Ding, Ziming Ren, Shudong Wang, Weixuan Jing, Zhuangde Jiang, Xueyong Wei, A high-resolution resonant torque sensor based on MEMS quartz resonator, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 320, 2021,

112579, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112579>

36. S. Taleb, S. Lesecq, R. Stucher, Torsional Vibration Detection Using Torque Measurement of a Main Drive of a Hot Rolling Mill with Wavelet Transform, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 37, Issue 15, 2004, Pages 119-124.

37. Толмачов С. Т. Система безконтактного виміру моменту на валу електродвигунів в умовах експлуатації [Електронний ресурс] / С. Т. Толмачов, І. М. Бурчак // Вісник Криворізького національного університету. - 2017. - Вип. 44. - С. 131-137.

38. Брилистий, В., Назарова, О., & Осадчий, В. (2022). Вимірювання крутного моменту для дослідження енергетичних характеристик приводів електромобілей. *Електротехніка та електроенергетика*, (4), 36–44. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-4-4>

39. Андреев А. Г. Тензометрия : учебник / А. Г. Андреев, Г. І. Львов, О. В. Щепкін. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – 232 с.

40. Hengli Song, Haobin Dong, Xin Wang, Liangliang Tang. (2021) Non-destructive diagnosis of grounding grids based on the electromagnetic induction impedance method. *Measurement Science and Technology* 32:11, 115901. Online publication date: 16-Jul-2022.

41. Zhang, C., Li, Z., Chen, J., Qiu, F., & Na, S. (2021). Design and research of a novel non-contact vertical inductive torque sensor. *Measurement*, 177, 109252.

42. Turner, J. D. (1988, September). Development of a rotating-shaft torque sensor for automotive applications. In *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)* (Vol. 135, No. 5, pp. 334-338). IET Digital Library.

43. Guk, R., & Loranc, E. (1880). Über die Gesetze der drehenden Bewegung und der Ausbreitung elektromagnetischer Schwingungen. *Annalen der Physik*, 251(8), 157-191. doi: 10.1002/andp.18802510802
44. Christie, H. J. (1955). The measurement of torque by strain gauges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 169(1), 391-408. doi: 10.1243/PIME\_PROC\_1955\_169\_018\_02.
45. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи.- Киев, “Вища школа”, 1981. (296с).
46. Фролов Л. Б. Измерение крутящего момента. М., «Энергия», 1967. 120 с. с
47. Goszczak, J. (2016, September). Torque measurement issues. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 148, No. 1, p. 012041). IOP Publishing.
48. Chen, C., Ma, T., Jin, H., Wu, Y., Hou, Z., & Li, F. (2020). Torque and rotational speed sensor based on resistance and capacitive grating for rotational shaft of mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 142, 106737.
49. Han, K., Chen, L., Xia, M., Wu, Q., Xu, Z., & Wang, G. (2020). Design and optimization of a high sensitivity joint torque sensor for robot fingers. *Measurement*, 152, 107328.
50. B. Żółtowski: *Podstawy diagnostyki maszyn*. Bydgoszcz: Wydawnictwo Uczelniane Akademi Techniczno – Rolniczej w Bydgoszczy, 1996.
51. <https://www.magtrol.ru/files/torque/TM-manual.pdf>
52. Класифікація датчиків моменту [Електронний ресурс] // Офіційний сайт. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.magtrol.com/>.
53. Васілевський О.М. Інформаційно-вимірювальна система для автоматичного контролю параметрів роторних систем : Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.11.16. — Вінниця, 2005. — 19 с. — укр.
54. Філоменко А. А. Безконтактний магнітоелектричний двигун зворотно-обертального руху: автореф. дис. ... к.т.н. : 05.09.01 - Електричні машини і апарати. — 2021 — укр.

55. Кухарчук В.В. Автоматизований контроль моментних характеристик електричних машин : Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.11.13. — Вінниця, 1999. — 35 с.

56. Kucheruk, Volodymyr & Vasilevskyi, Oleksandr & Наталич, О. (2007). Розвиток частотних методів визначення моментних характеристик електричних машин. Вісник Інженерної Академії України. 3/4.

57. В. Ю. Кучерук, І. В. Коломійчук, П. І. Кулаков. Безконтактне вимірювання параметрів обертання роторних систем. Кучерук, В. Ю. Безконтактне вимірювання параметрів обертання роторних систем : Збірка тез матеріалів четвертої міжнародної науково-практичної конференції // В. Ю. Кучерук, І. В. Коломійчук, П. І. Кулаков // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси – 2011, Київ, 2011. - с. 170-171.

58. Podzharenko, V. A., & Kucheruk, V. Y. (1997, June). New method of measurement of a moment of inertia of an electrical machines. In XIV IMEKO World Congress, Tampere, Finland (Vol. 3, pp. 90-95).

59. Mosconi, F., Allemand, J. F., Bensimon, D., & Croquette, V. (2009). Measurement of the torque on a single stretched and twisted DNA using magnetic tweezers. *Physical review letters*, 102(7), 078301.

60. T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg & H. Rubinsztein-dunlop (2001) Optical measurement of microscopic torques, *Journal of Modern Optics*, 48:3, 405-413, DOI: 10.1080/09500340108230922

61. Torque Measurement at the Single-Molecule Level Scott Forth, Maxim Y. Sheinin, James Inman, Michelle D. Wang *Annual Review of Biophysics* 2013 42:1, 583-604.

62. Wegener, G., & Andrae, J. (2007). Measurement uncertainty of torque measurements with rotating torque transducers in power test stands. *Measurement*, 40(7-8), 803-810.

63. Samani, Loghman & Abdolhamidy, Mahdi & RASHIDI, Amir & SAGHAIANNEZHAD, Sayed. (2016). A designed converter for minimizing SRM torque ripple with controlled boost capacitor automatically. *TURKISH JOURNAL*

OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES. 24. 3358-3370. 10.3906/elk-1402-200.

64. Староверов А. Г. Основы автоматизации производства: Учеб. для сред. учеб. заведений по спец. «Металловедение и термическая обработка металлов», «Литейное производство черных и цветных металлов». —М.: Машиностроение, 1989. — 312 с.

65. Приборы для измерения крутящего момента и мощности [Электронный ресурс] // Блог электромеханика. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: [https://www.electroengineer.ru/2012/01/blog-post\\_04.html](https://www.electroengineer.ru/2012/01/blog-post_04.html).

66. Mahmoud, Aiman & Coleri, Erdem & Batti, James & Covey, David. (2017). Development of a field torque test to evaluate in-situ tack coat performance. *Construction and Building Materials*. 135. 377-385. 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.013.

67. Костиков К. Тензометрические датчики силы [Текст] / К. Костиков, Й. Чукан // Компоненты и технологии. – 2010. - № 102, С. 16-18.

68. Буряк, Е. С. (2002). Аппроксимация экспериментальных кривых крутящего момента для полуосей лесовозного автомобиля. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, (2), 49-52.

69. Устройство для измерения крутящего момента [Текст]: пат. на полезную модель 84550 Рос.Фсдерация: МДЖ G01L 3/04 Богданов Д.Н., Ломов А.С., Шарыгин Л.Н., заявитель и парентообладдтель Владимир, гос. гу-манит. ун-т. -№2009109520/22; заявл. 16.03.2009; опубл.10.07.09, Бюл. № 1

70. А.П. Черный, Д.И. Родькин А.П. Калинов, О.С. Воробейчик. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.

71. O. E. Elgendy, M. N. Taha, and A. M. Sharaf, "A novel non-contacting method for torque measurement in electrical machines," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 4, pp. 1324-1333, Apr. 2011. doi: 10.1109/TIM.2010.2092222

72. Leonard Klaus, Michael Kobusch, The 20 N·m dynamic torque calibration device at PTB, *Measurement: Sensors*, Volume 22, 2022, 100370, ISSN 2665-9174.
73. Attila Szántó, Éva Ádámkó, György Juhász, Gusztáv Áron Sziki, Simultaneous measurement of the moment of inertia and braking torque of electric motors applying additional inertia, *Measurement*, Volume 204, 2022, 112135, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112135>.
74. Zhongkai Zhang, Guangchuan Zhang, Jiayun Qi, Yu Zhang, Yibai Wang, Zun Zhang, Haibin Tang, Jianjun Wu, Roll torque measurement and interpretation of low power Hall-effect thrusters, *Acta Astronautica*, Volume 203, 2023, Pages 16-25, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.040>.
75. Yingjun LI, Guicong WANG, Shuai ZHANG, Yuanqin ZHOU, Hongyu LI, Zhenguang QI, Design and calibration of spoke piezoelectric six-dimensional force/torque sensor for space manipulator, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.03.012>.
76. Przemysław Kowalak, Tadeusz Borkowski, Michał Bonisławski, Marcin Hołub, Jarosław Myśków, A statistical approach to zero adjustment in torque measurement of ship propulsion shafts, *Measurement*, Volume 164, 2020, 108088, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108088>.
77. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Долгополов В.П., Грумінська Л.В. К 95 Метрологія та вимірювальна техніка- Навчальний посібник. -Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. -252с.
78. О. М. Васілевський і А. В. Поджаренко, «Оцінювання невизначеності вимірювання моменту інерції ротора за амплітудою крутильних коливань», *Вісник ВПІ*, вип. 4, с. 5–9, Листоп. 2010.
79. Oleshko, T., Kvashuk, D. & Heiets, I. Image recognition in unmanned aviation using modern programming languages. *SN Appl. Sci.* 1, 1686 (2019).
80. Д. П. Орнатський, Д. М. Квашук, і КатаєваМ. О., Методи вимірювання робочих характеристик електрогенераторів, *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*, вип. 2(19), с. 37-47, Груд 2021.



81. Квашук Д.М., Єгунько В.М. Аналіз методів корекції похибок вимірювальних приладів // Д.М.Квашук, В.М.Єгунько/ Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, Випуск 6(37), Ч. 1, 2022, с. 60-69.

82. Квашук Д. М, Кудренко С.О., Федорченко С. В. Методи підвищення точності вимірювальних перетворювачів / Д. М. Квашук, С.О. Кудренко, С. В. Федорченко // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць: Випуск 2 (70). – К.: НАУ,- 2022, с. 35-41.

83. Ornatskyi , D. ., Kvashuk , D. ., & Lagionova , J. (2021). Вимірювання фізичних величин електродвигуна гвинтового конвєсуру під час транспортування матеріалу . Nauka I Studia, (7). извлечено от [http://nauka-i-studia.info/ojs/index.php/pl\\_ojs/article/view/156](http://nauka-i-studia.info/ojs/index.php/pl_ojs/article/view/156)

84. Перетворювальні пристрої приладів: Підручник / О.М.Безвесільна, П.М.Таланчук. - К.: ІСДО, 1994. —448 с.

85. Поліщук Є.С. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.І. Стадник та ін.; за ред. Є.С. Поліщука. – Львів: Вид-во Бескид Біт. 2012. – 618 с.

86. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники: Учебник. – К.: Вища школа, 1983. - 455 с.

87. Кузнецов В.П. Метрологические характеристики измерительных систем. – М.: Машиностроение, 1984. – 412 с.

88. Бабак В.П. Обробка сигналів: Підручник / / В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1999. - 392 с.

89.

<http://www.materials.kiev.ua/departments/008/MechTest.files/page0012.htm>

90. Бардаев П.П., Писчасов В.М. Датчик крутящего момента для исследования нагрузок на механизацию модели летательного аппарата в аэродинамической трубе малых дозвуковых скоростей Материалы III Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов

ISSN 2541-8920 | 5–6 июня, Жуковский, Дом ученых ЦАГИ |  
tsagi.ru/pressroom/events/kimila

91. Keaton J.R. (2018) Mohr Circle. In: Bobrowsky P.T., Marker B. (eds) Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9\\_206](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_206)

92. Чабанюк Ю. А. Адаптивна система автоматичного контролю кутових швидкостей електромеханічних перетворювачів із спостережним засобом ідентифікації / Ю. А. Чабанюк, П. М. Сопрунюк, О. М. Васілевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 67–71.

93. Мысливец Н. Л. Самонастраивающийся электропривод промышленного робота, построенный на базе системы подчиненного регулирования / Н. Л. Мысливец, Ю. А. Сабинин // Электропривод. – 1987. – Вып. 8 (61). – С. 23–25.

94. Beaty H. W. Motors require voltage limits / H. W. Beaty // Electrical world. – 1988. – Vol. 189, № 5. – P. 52–53.

95. Шёнфельд Р. Автоматизированные электроприводы / Р. Шёнфельд, Э. Хабигер. – Л. : Энергоиздат, 1985. – 464 с.

96. А.В. Аристов, Л. К. Бурулько, Л.А. Паюк Математическое моделирование в электромеханике. Учебное пособие: Томск, Изд-во ТПУ 2005. – 155 с.

97. Чабан В. Математичне моделювання в електротехніці / Чабан В. – Л., 2010. – 508 с.

98. Ефимов А.А. Динамика электромеханических систем, Учебное пособие. - Томск: Изд. ТПИ, 1991.- 99 с.

99. Gençer, Çetin & M, Gedikpinar. (2006). Modelювання та імітація BLDCM за допомогою MATLAB/SIMULINK. Журнал прикладних наук. 6. 10.3923/jas.2006.688.691

100. Lee, B.K. and M. Ehsani, 2003. Advanced simulation model for brushless DC motor drives. Electric Power Components and Systems. Taylor and Francis Inc., 31:841-868.

101. Demirbas, S. and Q. Gencer, 2004. Matlab/Simulink based modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive. Proc. 2. International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, Tabriz, Iran, pp: 645-649.

102. Моделирование асинхронного двигателя с переменными  $\psi_m - i_s$  в Matlab-Script в системе относительных единиц / А. А. Емельянов, В. В. Бесклеткин, В. М. Гусев [и др.]. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2018. — № 48 (234). — С. 1-9.

103. C. Gencer and M. Gedikpinar, 2006. Modeling and Simulation of BLDCM Using MATLAB/SIMULINK. Journal of Applied Sciences, 6: 688-691. DOI: 10.3923/jas.2006.688.691

104. Кондрахин В. П. Измерение грузопотока на ленточном конвейере с помощью съемного тензоизмерительного устройства с учетом натяжения ленты / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Наукові праці ДонНТУ. Серія електромеханічна. - 2013. - № 1(25). - С. 79-87.

105. Хальфин М. Н. Влияние неравномерности распределения нагрузок на деформацию канатного рабочего органа винтового конвейера // М. Н. Хальфин, С. С. Подуст, Р. К. Шагеев, Б. Ф. Иванов / Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, №. 3, 2011, С. 49-51.

106. Хальфин М. Н., Подуст С. С., Шагеев Р. К. Расчет гибкого винта шнека с учетом переменности крутящего момента по его длине // М. Н. Хальфин С. С. Подуст Р. К. Шагеев / Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. - 2009 - (6), С. 80-83.

107. Горбунов, В. Ф. Обзор современного состояния теории транспортирования горной массы винтовыми конвейерами / В. Ф. Горбунов, Д. М. Кобылянский // Вестн. РАЕН (ЗСО). – 2006. – №8. – С. 171-177.

108. Стальные канаты подъемно-транспортных машин : учебное пособие / М.Н. Хальфин [и др.] / Новочеркасск, 2009. 116 с.

109. Osipov O.I., Kholin A.V., Ivanov G.M., Novikov V.I. Elektroprivod stenda dlya ispytaniy silovoy transmissii vertoletov. [Electric drive of the test stand for testing power transmission of helicopters]. Tula, TulGU Publ., 2010, pp. 107-112.
110. Єжов С. М., Макарець М. В., Романенко О. В. Класична механіка. — К. : ВПЦ "Київський університет", 2008. — 480 с.
111. Grover, Suraj & Mankar, Mr. (2019). Minimization of Starting Torque and Inrush Current of Induction Motor by Different Starting Methods using MATLABSIMULINK. International Journal of Trend in Scientific Research and Development. Volume-3. 646-651. 10.31142/ijtsrd22935.
112. Раянов Тимур Александрович (2020). Обзор новых типов датчиков крутящего момента. Транспортные системы и технологии, 6 (1), 5-14.
113. Катаєва М.О., Квашук Д. М. Розробка методу підвищення точності та швидкодії вимірювальних комплексів, Перспективні технології та прилади, № 20 (2022), с. 45-50.
114. Квашук Д. М, Кудренко С.О., Федорченко С. В. Методи підвищення точності вимірювальних перетворювачів / Д. М. Квашук, С.О. Кудренко, С. В. Федорченко // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць: Випуск 2 (70). – К.: НАУ,- 2022, с. 35-41.
115. Т.І. Олешко, Д. М. Квашук, М.М. Нестюк (2022) Контроль робочих характеристик електродвигунів за допомогою індуктивних датчиків, Проблеми інформатизації та управління, с. 60-65.
116. Квашук Д.М. Дослідження робочих характеристик електрогенераторів вітрових електростанцій /Д.М. Квашук// Проблеми інформатизації та управління, 2021. – №(68)/4, с. 31-37.
117. Д. П. Орнатський, Д. М. Квашук, Катаєва М. О., Методи вимірювання робочих характеристик електрогенераторів, Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості, вип. 2(19), с. 37-47, Груд 2021.
118. Квасніков, В. П., Квашук, Д. М., Сомчинська, К. О. (2022). Мережева автоматизована система для вимірювання робочих характеристик

електрогенераторів вітрових турбін. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, (3), 49-55. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.5>

119. Квасніков В. П., Квашук Д. М., Шелуха О. О., Любунь К. О. Комп'ютерна система вимірювання обертального моменту / В. П. Квасніков, Д. М. Квашук, К. О. Любунь // Проблеми інформатизації та управління 2021. – № (67)/3 – с. 87-94.

120. Катаєва М. О. Розробка стенду для вимірювання метрологічних характеристик електродвигунів // В. П. Квасніков, Д. М. Квашук, М. О. Катаєва /Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2021, № 4(174) спецвипуск 2, Стр. 104-111.

121. Вахромеев О. С., Каримов Р. Т., Надеев А. И. Современные методы диагностики электромеханических систем. М.: Машиностроение, 2005. С. 51-56. DOI: 10.7463/1015.0820865

122. Gunal S., Gokhan Ece D., Gerek O.N. Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current // Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. Vol. 23, iss. 8. P. 2658-2670. DOI:10.1016/j.ymssp.2009.05.011

123. Ayaz, E., Ozturk, A., & Seker, S. (2006). Continuous Wavelet Transform for Bearing Damage Detection in Electric Motors. IEEE Electrotechnical Conference, MELECON. Mediterranean, pp. 1130 -1133.

124. Cabal-Yepez E., Osornio-Rios R., Romcro-Troncoso R., Razo-Hernandcz J., & Lopez-Carcia, R. (2009). FPGA-Based Online Induction Motor Multiple-Fault Detection with Fused FFT and Wavelet Analysis. International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, pp. 101 -106.

125. Мансуров Т. М., Алиев Ч. П. Акселерометр для измерения параметров движущихся объектов. Научный журнал «Проблемы инфокоммуникаций» Белорусской Государственной Академии Связи. Минск, 2017. № 2 (6). С. 37-46.

126. Мансуров Т.М., Алиев Ч.П. Акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов в автоматическом режиме. Научный журнал «Вестник Хмельницького Національного Університета». Харків, ХНУ. 2018. № 5. С. 78-83.

127. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.

128. Ермаков К. С., Тумакова Е. В. Информационно-измерительная система для контроля электрических и механических параметров электродвигателя. Машиностроение и компьютерные технологии. 2015. № 10. С. 211-220. DOI: 10.7463/1015.0820865

129. Стельмашук С. В. Определение момента инерции электропривода по кривой разгона методом Симою // Известия ТПУ. 2015. №6. с.103-113.

130. Кононенко Е. В. Влияние момента инерции и момента сопротивления привода на переходные процессы пуска и реверса рольганговых двигателей / Е. В. Кононенко, Б. А. Данчинов // Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ]. — 1971. — Т. 212 : Электрические машины. — С. 496-502.

131. Юсупов Р.Р. Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Губарев Е.В. Исследование влияния карбонитрирования на снижение коэффициента трения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т. 1. №1. С. 214-216.

132. Жидков В. А. Сравнительный анализ SCADA-систем, применяемых в диспетчерских службах Белгородской энергосистемы. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 185–189.

133. Тензодатчики и HX711. Руководство пользователя [Электронный ресурс]: за данными сайта [wiki.iarduino.ru](http://wiki.iarduino.ru) / Режим доступа: [https://wiki.iarduino.ru/page/hx\\_711\\_with\\_tenzo](https://wiki.iarduino.ru/page/hx_711_with_tenzo).

134. A. Maier, A. Sharp, Y. Vagapov, “Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things” 2017 Internet Technologies and Applications, ITA 2017 - Proceedings of the 7th International Conference IEEE, pp 143-148, November 2017, DOI: 10.1109/ITTECHA.2017.8101926.

135. Квашук Д. Програмный код WEB-дodatку інформаційної системи для вимірювання параметрів роботи електродвигунів [Електронний ресурс] / Д. Квашук. 2021. Режим доступу : <http://dmitro.pythonanywhere.com>.

136. Рубанов В.Г., Бушуев Д.А., Паращук Е.М., Трикула А.К. Идентификация момента инерции якоря двигателя постоянного тока и нагрузки в экспериментальной вибрационной установке для исследования хаотической динамики. Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(2): с. 97-108. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108

137. A. Douglas, Time Sequence Analysis in Geophysics E. R. Kanasewich (University of Alberta Press), Geophysical Journal International, Volume 43, Issue 3, December 1975, Page 1026, DOI:10.1093/gji/43.3.1026

138. José F Barraza, Norberto M Grzywacz, Measurement of angular velocity in the perception of rotation, Vision Research, Volume 42, Issue 21, 2002, Pages 2457-2462.

139. Юрманов С.Ю. Оптимизация упругого подвеса чувствительных элементов датчиков в системах навигации // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – № 3 (82). – С. 315–324.

140. Mark Howard, The new generation of inductive sensors, World Pumps, Volume 2013, Issue 2, 2013, Pages 10-11.

141. José F Barraza, Norberto M Grzywacz, Measurement of angular velocity in the perception of rotation, Vision Research, Volume 42, Issue 21, 2002, Pages 2457-2462.

142. Юрманов С.Ю. Оптимизация упругого подвеса чувствительных элементов датчиков в системах навигации // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – № 3 (82). – С. 315–324.

143. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы. – Москва: Наука, 1976. – 576 с.

144. Mark Howard, The new generation of inductive sensors, World Pumps, Volume 2013, Issue 2, 2013, Pages 10-11.
145. Методы и средства измерений / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – М: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
146. Gençer, Çetin & M, Gedikpinar. (2006). Modelювання та імітація BLDCM за допомогою MATLAB/SIMULINK. Журнал прикладних наук. 6. 10.3923/jas.2006.688.691
147. Курочкина А.В., Ереско А.С., Иваненко Е.В. "Цифровой тахометр с использованием датчика холла на платформе Arduino" Актуальные проблемы авиации и космонавтики, vol. 1, no. 14, 2018, pp. 363-365.
148. Бељавин, В. Ф. Метод восстановления работоспособности микропроцессорных систем высокой готовности при отказах, связанных с воздействием электростатических разрядов [Текст] / В. Ф. Бељавин // Математичні машини і системи Mathematical machines and systems Математические машины и системы : науковий журнал. - 2019. - N 1. - С. 179-190.
149. ISO 50001:2011 Energy management systems – Requirements with guidance for use [електро ний ресурс] – режим доступу – <http://webstore.ansi.org/>.
150. Abdalhossein Rezai, Parviz Keshavarzi, Zahra Moravej, Key management issue in SCADA networks: A review, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 20, Issue 1, 2017, pp. 354-363
151. Jiroutova, Dita & Vokáč, Miroslav. (2013). Analysis of the accuracy of fibre-optic strain gauges. Acta Polytechnica. 53. 10.14311/AP.2013.53.0872.
152. Enrique Ramos Melgar Arduino and Kinect Projects. Design, Build, Blow Their Minds [Text] / Ramos Melgar Enrique, Castro Díez Ciriaco and Jaworski Przemek - Apress, Inc. – 2012. – P. 385.
153. Дядюнов Александр Николаевич, Смолев Дмитрий Владимирович Моделирование канала связи беспроводных локальных сетей // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. №3 (189). URL:



<https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-kanala-svyazi-besprovodnyh-lokalnyh-setey> (дата обращения: 26.05.2022).

154. Кирпичникова, И.М. Преобразование энергии в ветроэнергетических установках / И.М. Кирпичникова, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2010. – № 1. – С. 93–97.

155. Татарникова Т.М., Бимбетов Ф., & Горина Е.В. (2022). Алгоритм энергоэффективного взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 22 (2), 294-301.

156. Dressler F. A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks // *Computer Communications*. — 2008. — V. 31, N 13. — P. 3018–3029.

157. Татарникова Т.М., Бимбетов Ф., & Горина Е.В. (2022). Алгоритм энергоэффективного взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 22 (2), 294-301.

158. Dressler F. A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks // *Computer Communications*. — 2008. — V. 31, N 13. — P. 3018–3029.

Наукове видання

**Квасніков Володимир Павлович**

**Квашук Дмитро Михайлович**

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ  
ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ  
ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ  
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

**Монографія**

*(українською мовою)*

Підписано до друку 05.04.2023 р. Формат 60x84/16  
Друк цифровий. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.  
Наклад прим.: 300. Замовлення №8/23.

Віддруковано у м. Черкаси, вул. Хрещатик, 195,  
Видавництво «Весела перерва», Свідоцтво про реєстрацію  
суб'єкта видавничої справи ДК № 1484 від 01.09.2003 р.

### **КВАСНІКОВ ВОЛОДИМИР ПАВЛОВИЧ**

Заслужений метролог України, доктор технічних наук, професор. завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету. Автор понад 200 наукових робіт, серед яких 4 підручники, 9 монографій, наукові статті та патенти. Підготував 11 докторів та 28 кандидатів технічних наук. Розробив та впровадив у виробництво координатно-вимірювальні машини. Сфера наукових досліджень: метрологія та робото-технічні комплекси. Наукові праці поєднані з фундаментальними та прикладними дослідженнями по створенню нових засобів вимірювання механічних величин.



### **КВАШУК ДМИТРО МИХАЙЛОВИЧ**

Кандидат економічних наук, доцент, докторант кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету. Автор понад 60 наукових робіт, серед яких підручник, монографія, наукові статті. Сфера наукових досліджень: вимірювання електричних та механічних величин; інтелектуальні системи вимірювання; обробка сигналів мікромеханічних сенсорів; системи управління, діагностики та контролю параметрів роботи електродвигунів.

