

ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

*На правах рукопису*

**Козловський Андрій Володимирович**

УДК 621.313.333.004.5

**РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ  
СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПУСКОВОГО  
МОМЕНТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ МАЛОЇ ТА  
СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ**

*Спеціальність: 05.11.16 – Інформаційно-вимірвальні системи*

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник  
**Мокін Борис Іванович,**  
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2000

## ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП .....	8
<b>РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ</b>	
<b>ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>21</b>
1.1. Стан вітчизняних та зарубіжних досліджень інформаційно-вимірювальних систем механічних характеристик електродвигунів .....	21
1.2. Особливості визначення пускового моменту електродвигунів та узагальнена структура ІВС .....	23
1.3. Класифікація вимірювальних каналів пускового моменту та їх порівняльний аналіз .....	25
1.3.1. Вимірювальні канали пускового моменту за реакцією статора приводного двигуна .....	27
1.3.2. Вимірювальні канали пускового моменту за реакцією статора об'єкта вимірювання.....	30
1.3.3. Вимірювальні канали пускового моменту за реакцією ротора об'єкта вимірювання .....	32
1.3.4. Вимірювальні канали пускового моменту за реакцією торсіонного сенсора .....	33
1.3.5. Вибір критерію та порівняльний аналіз відомих вимірювальних каналів пускового моменту.....	34
1.4. Математична модель вимірювального каналу пускового моменту з асинхронним приводом .....	36
1.5. Методична похибка та недоліки вимірювального каналу пускового моменту з асинхронним приводом .....	40
1.6. Напрямок та задачі досліджень.....	43
<b>РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВКПМ ТА</b>	
<b>МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ</b>	
<b>ПУСКОВОГО МОМЕНТУ .....</b>	<b>45</b>

2.1. Розробка структурної схеми вимірювального каналу пускового моменту .....	46
2.2. Розробка математичних моделей об'єкта вимірювання та конструктивних елементів ВКПМ .....	47
2.2.1. Математична модель об'єкта вимірювання .....	47
2.2.2. Математична модель крокового двигуна .....	49
2.2.3. Математична модель торсіонного сенсора .....	55
2.2.4. Математична модель муфти спряження .....	60
2.3. Розробка математичної моделі вимірювального каналу пускового моменту .....	61
2.3.1. Моделювання вимірювального перетворення залежності пускового моменту від кута повороту ротора .....	65
2.3.2. Моделювання вимірювального перетворення мінімального пускового моменту .....	67
2.4. Методика розрахунку часу заспокоєння рухомої частини вимірювального каналу пускового моменту .....	70
<b>В и с н о в к и .....</b>	<b>72</b>
<b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІВС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПУСКОВОГО МОМЕНТУ ТА ЇЇ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....</b>	<b>74</b>
3.1. Розробка структурної схеми ІВС для визначення пускового моменту .....	74
3.2. Розробка рівняння перетворення первинного вимірювального перетворювача пускового моменту .....	76
3.2.1. Характеристика трансформаторних вимірювальних перетворювачів .....	77
3.2.2. Розробка вимірювального перетворювача пускового моменту у напругу на базі трансформаторного перетворювача .....	79
3.3. Швидкодіючий перетворювач змінної напруги у постійну напругу за середньовипрямленими значеннями амплітуди .....	83
3.4. Часові характеристики вимірювального перетворення пускового моменту .....	90
3.5. Розробка алгоритмів функціонування ІВС для визначення пускового моменту електродвигуна .....	93

3.5.1. Розробка алгоритму вимірювання залежності пускового моменту від кутового положення ротора .....	95
3.5.2. Розробка алгоритму вимірювання залежності пускового моменту від напруги живлення .....	97
<b>В и с н о в к и</b> .....	99
<b>РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІВС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПУСКОВОГО МОМЕНТУ</b> .....	100
4.1. Визначення та аналіз похибок вимірювального каналу пускового моменту .....	101
4.1.1. Вплив деформації торсіону на точність вимірювань .....	103
4.1.2. Похибка торсіонного сенсора.....	106
4.1.3. Похибка перетворювача змінної напруги у постійну (похибка ПСВЗ) .....	107
4.1.4. Похибка квантування (похибка АЦП).....	110
4.2. Загальна похибка вимірювання пускового моменту.....	113
4.3. Оцінка вірогідності контролю пускового моменту електричних двигунів .....	117
<b>В и с н о в к и</b> .....	122
<b>РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b> .....	123
5.1. Методика інженерного проектування та апаратно-програмна реалізація ІВС для визначення пускового моменту .....	123
5.1.1. Розробка методики інженерного проектування.....	123
5.1.2. Апаратно-програмна реалізація ІВС для визначення пускового моменту .....	130
5.2. Експериментальні дослідження асинхронного двигуна середньої потужності.....	135
5.3. Методика метрологічної атестації засобу вимірювання пускового моменту .....	137
5.4. Експериментальне дослідження похибок ІВС .....	142
<b>В и с н о в к и</b> .....	144
<b>ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ</b> .....	146
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	150

ДОДАТКИ .....	159
Додаток А Моделювання засобу вимірювання пускового моменту та його складових елементів .....	160
Додаток Б Розрахунок сумісного закону розподілу та помилок контролю пускового моменту.....	176
Додаток В Схема електрична принципова мікропроцесорного контролера.....	187
Додаток Г Програма для прошивки в мікропроцесорний контролер.....	188
Додаток Д Програма для проведення вимірювання пускового моменту та тестування ІВС .....	193
Додаток Е Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи .....	199

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АД	Асинхронний двигун
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
БККД	Блок керування кроковим двигуном
ВВ	Вимірювальний важіль
ВЗЗ	Від'ємний зворотній зв'язок
ВККП	Вимірювальний канал кутового положення
ВКН	Вимірювальний канал напруги
ВКПМ	Вимірювальний канал пускового моменту
ВП	Вимірювальний перетворювач
ГЗР	Гамма закон розподілу (гамма-розподіл)
ЕВН	Електронний варіатор напруги
ЕРС	Електрорушійна сила
ЗВ	Засіб вимірювання
ЗЗМ	Задавач зразкового моменту
ІВС	Інформаційно-вимірювальна система
КД	Кроковий двигун
КЗ	Дослід “короткого замикання”
МО	Математичне очікування випадкової величини
МПК	Мікропроцесорний контролер
МС	Муфта спряження
НЗР	Нормальний закон розподілу
ОВ	Об'єкт вимірювання
ОКЕ	Окремий якісний критерій ефективності
ОП	Операційний підсилювач
ПВЗ	Пристрій вибірка зберігання
ПВП	Первинний вимірювальний перетворювач
ПД	Приводний двигун
ПДР	Помилка другого роду (ризик замовника)
ПЕОМ	Персональна електронно-обчислювальна машина
ПЗП	Постійний запам'ятовуючий пристрій

ПЗР	Прямокутний закон розподілу, або закон рівномірної щільності
ППР	Помилка першого роду (ризик виготовлювача)
ПСВЗ	Перетворювач змінної напруги у постійну за середньовипрямленими значеннями
СВЗ	Середньовипрямлене значення
СЗ	Сенсор зусилля
СК	Сенсор кута
СКВ	Середнє квадратичне відхилення
ТС	Торсіонний сенсор
УКЕ	Узагальнений якісний критерій ефективності
ФНЧ	Фільтр нижніх частот
ХР	Хвильовий редуктор
ХХ	Дослід “холостого ходу”

## ВСТУП

Проведення випробувань електричних двигунів необхідне на усіх етапах виготовлення та використання. На стадії проектування проводять випробування макетних екземплярів для перевірки відповідності вихідних показників та характеристик умовам технічного завдання. На стадії виготовлення випробування проводять для окремих вузлів після проведення технологічних операцій. Після зборки електричного двигуна випробування проводять для перевірки відповідності вихідних показників технічним умовам. При експлуатації електричні двигуни підлягають поточному та капітальному ремонту. Після ремонту параметри та характеристики електричних двигунів повинні обов'язково контролюватись. Окрім того, у процесі проектування чи доводки необхідно проводити дослідницькі випробування.

Програма випробування електричного двигуна містить два основні досліді: дослід “холостого ходу” (ХХ) та дослід “короткого замикання” (КЗ). Дослід ХХ являє собою дослідження основних параметрів електродвигуна під час обертання його ротора без навантаження. Дослід дозволяє вимірювати частоту обертання ротора, усталене значення моменту, струм в обмотках, напругу та потужність. На сьогодні існують автоматизовані контрольно-вимірювальні системи для проведення досліді ХХ в повному обсязі. Зокрема, роботи по створенню та дослідженню таких систем виконувалися на кафедрі метрології та промислової автоматики (МПА) Вінницького державного технічного університету (ВДТУ).

Але не всі важливі характеристики електричного двигуна дозволяє вимірювати досліді ХХ. Одна з таких експлуатаційних характеристик – пусковий момент та його залежність від кутового положення ротора та напруги живлення електродвигуна. Пусковий момент електродвигуна залежить від конструктивного виконання двигуна та багатьох інших чинників, тому не може бути повноцінно розрахований і потребує прямого вимірювання у досліді КЗ. У більшості випадків основною причиною



відхилень пускового моменту вироблених двигунів від розрахункового пускового моменту є технологія їх виготовлення.

Технічні складності проведення дослідів КЗ на виробництві призвели до того, що даний вимірювальний експеримент проводять вручну і не в повному обсязі із значними витратами часу ( $\approx 36$  норма-годин на один двигун). На жаль, питанням автоматизації випробування електричних двигунів приділяється недостатньо уваги. Засоби вимірювання пускового моменту електродвигунів на сьогодні не випускаються.

Разом з тим, в більшості випадків електричний двигун є компонентом більш складних систем. Тому ризик застосування двигунів, які не пройшли випробування, значно зростає. Крім того, це явище призводить до використання двигунів з набагато вищими номінальними показниками пускового моменту, щоб знизити ризик збійної ситуації, що, у свою чергу, пов'язано з великими втратами електричної енергії, габаритними розмірами тощо.

**Актуальність теми.** Відсутність засобів вимірювання для визначення пускового моменту електричних двигунів на виробництві призводить до того, що визначення цього важливого параметра проводять вручну із значними витратами часу, з невисокою точністю і для одного двигуна з партії. Відомі автоматизовані засоби вимірювань характеризуються невисокою точністю (1,5%) в зв'язку з тим, що має місце методична похибка (виникає за рахунок повільного обертання ротора об'єкта під час вимірювання пускового моменту) та значна інструментальна похибка (зумовлена методологією вимірювання пускового моменту на корпусі приводного двигуна). Тому автоматизація визначення, підвищення точності вимірювання пускового моменту електричних двигунів та створення нових автоматизованих засобів, призначених для цього, є важливим та актуальним завданням. Особливо актуально стоїть питання вимірювання пускового моменту електричних двигунів малої та середньої потужності, які широко використовуються у побутовій техніці, периферійних пристроях, різноманітних системах позиціонування, керування тощо, де габаритні розміри електричного двигуна та електрична енергія, яким споживається, відіграють важливу роль. Підвищення точності ви-

значення пускового моменту має виняткове значення для електротехнічних підприємств, де технологічний процес виготовлення двигунів не досконалий, і тому для якісної сертифікації двигунів (потреба сьогодення) необхідно визначати пусковий момент кожного двигуна окремо.

Вирішити це завдання можливо лише використовуючи сучасні методи вимірювання, досягнення мікропроцесорної техніки. Дослідженню та створенню засобів вимірювання параметрів електричних машин зокрема та засобів вимірювання неелектричних величин в цілому присвячена велика кількість робіт вітчизняних та зарубіжних вчених. Значний внесок в розробку теорії таких засобів внесли вчені Б. Адкінс, І.М. Богаєнко, А.П. Варфоломєєв, Є.Т. Володарський, А.А. Войтех, Б. Геллер, О.Д. Гольдберг, В.І. Губарь, В.Б. Дудикевич, Г.К. Жерве, І.П. Копилов, М.Т. Костенко, І. Ковач, Р. Каресон, В. Кунзе, В.В. Кухарчук, С.М. Маєвський, В.Т. Маліков, Л.А. Назаренко, П.П. Орнатський, Л.А. Потапов, Л.М. Піатровський, В.О. Поджаренко, Р. Ріхтер, Р. Рюдєнберг, В.Ф. Сивокобиленко, Б.І. Стадник, П.Г. Столярчук, Ю.М. Туз, М.П. Цапенко, В.Д. Ціделко, Е.І. Цветков, В.Й. Чабан, Ю.І. Чучман та їх учні.

Але невирішеною залишилась проблема точності визначення пускового моменту електродвигунів, тому актуально вдосконалити метод визначення пускового моменту та розробити на його основі новий засіб, який дозволить відбракувати двигуни та здійснювати їх якісну сертифікацію згідно з світовими нормами.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 1995 – 2000 років. Протягом 1995 – 1997 років дослідження та наукові розробки проводились з метою написання магістерської дисертації здобувача, котра була захищена восени 1997 року. Протягом 1997 – 2000 років науково-дослідна робота проводилась відповідно до наукового напрямку кафедри та, у ролі виконавця, за держбюджетною темою № 84–Д–196, номер державної реєстрації 0198U004497.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка інформаційно-вимірювальної системи для визначення пускового

моменту електричних двигунів малої та середньої потужності на основі торсіонного первинного вимірювального перетворювача з більш високою точністю, порівняно з відомими засобами вимірювання пускового моменту.

Об'єктом дослідження в дисертаційній роботі є асинхронний електричний двигун малої та середньої потужності, який найбільш розповсюджений в техніці. Предметом дослідження є визначення пускового моменту об'єкта дослідження (асинхронного двигуна малої та середньої потужності), де точність визначення необхідно підвищити.

Для досягнення мети дисертаційної роботи необхідно вирішити такі задачі:

1. Зробити огляд існуючих вимірювальних каналів пускового моменту. Виділити причини невисокої точності визначення пускового моменту та визначитись з перспективними напрямками вирішення цієї проблеми. Розробити структурну схему інформаційно-вимірювальної системи визначення пускового моменту електродвигунів та виділити елементи, які зумовлюють точність та швидкодію системи в цілому.
2. Вдосконалити метод визначення пускового моменту. Розробити нову структурну схему вимірювального каналу пускового моменту та його математичну модель, в якій пусковий момент вимірюється безпосередньо у місці його виникнення торсіонним сенсором, а режим роботи приводного двигуна – покроковий, що дасть змогу вилучити методичну похибку та підвищити точність вимірювання.
3. Розробити математичну модель вимірювального каналу пускового моменту для динамічного та статичного режимів роботи, а також отримати аналітичні залежності для параметрів цих режимів, що дасть змогу реалізувати ІВС, в якій обмежений час проведення дослідів використовується без втрат.
4. Проаналізувати впливні величини та їх функції впливу на результат вимірювання пускового моменту, визначити домінуючі складові похибки, знайти закон розподілу загальної похибки вимірювання пускового моменту та розрахувати вірогідність контролю.

5. Розробити первинний вимірювальний перетворювач типу “момент – напруга”, який дозволить з високою точністю і швидкістю перетворювати пусковий момент у напругу.
6. Розробити ІВС на базі мікропроцесорного пристрою та програмне забезпечення до нього, що дозволить виконувати вимірювання пускового моменту електродвигунів в автоматизованому режимі з відображенням результатів вимірювання на ПЕОМ.
7. Розробити методика проектування запропонованої ІВС визначення пускового моменту, яка дасть змогу створювати подібні засоби вимірювання з різними діапазонами вимірювання та точністю. Вдосконалити задавач зразкового моменту для метрологічної атестації нового вимірювального каналу пускового моменту.
8. Провести експериментальні дослідження розробленої інформаційно-вимірювальної системи визначення пускового моменту та об'єкта вимірювання, які повинні підтвердити збіжність розроблених в роботі теоретичних досліджень з експериментальними результатами.

Для досягнення мети дисертаційної роботи використано такі методи досліджень: розв'язок лінійних та нелінійних диференціальних рівнянь аналітично та чисельними методами для моделювання режимів роботи ІВС; теорія ймовірностей та статистична обробка даних для визначення законів розподілу похибок вимірювання пускового моменту та розрахунку показників вірогідності контролю; експериментальні дослідження для перевірки відповідності розроблених теоретичних результатів; теорія вимірювань; теорія електромеханічного вимірювального перетворення тощо.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В дисертаційній роботі отримані такі наукові результати:

1. Вдосконалено метод визначення пускового моменту, який відрізняється тим, що для безпосереднього вимірювання інформативного параметра у місці його виникнення застосовано торсіонний сенсор, а для вилучення методичної похибки – покроковий режим роботи приводного двигуна. Доведено, що точність вимірювання пускового

моменту у запропонованій інформаційно-вимірювальній системі в 2 – 3 рази перевищує точність відомих.

2. Вперше розроблено математичну модель вимірювального каналу пускового моменту від кутового положення ротора з безпосереднім вимірюванням моменту на роторі об'єкта і описано процес руху рухомої частини вимірювального каналу системою нелінійних диференціальних рівнянь. Встановлено, що запропонована модель адекватно відтворює фізичні процеси, що протікають у вимірювальному каналі з торсіонним сенсором, як в статичному, так і в динамічному режимах його роботи.
3. Вперше одержано аналітичні залежності для визначення тривалості перехідного процесу для динамічного і функцію перетворення для статичного режимів роботи вимірювального каналу залежностей пускового моменту від кута повороту ротора і напруги живлення з торсіонним сенсором. Показано, що тривалість перехідного процесу під час вимірювання пускового моменту електричних двигунів малої та середньої потужності, розрахована за цими залежностями, забезпечує максимальну кількість вимірювань за один повний оберт ротора.
4. Оцінено функції чутливості впливних величин на результати вимірювання пускового моменту. Виділено три основні складові (похибка аналого-цифрового перетворення, похибка перетворення змінної напруги у постійну, похибка від дії інших впливів) і показано, що вони мають випадковий характер. Знайдено композицію законів розподілу для даних випадкових похибок, що дозволяє розрахувати показники вірогідності контролю мінімального пускового моменту.

**Практичне значення одержаних результатів.** Використання одержаних в роботі результатів дозволило розробити і впровадити як експериментальний зразок ІВС для визначення пускового моменту електродвигунів малої та середньої потужності, яка забезпечує вимірювання залежності  $M_{\text{п}} = f(\alpha)$  та  $M_{\text{п}} = f(U_{\text{к}})$  з високою точністю (максимальна зведена похибка 0,5%), швидкодією (загальний час проведення вимірювань не перевищує 10 секунд) та достатньою кількістю вимірних значень за

один повний оберт ротора об'єкта вимірювання (від 60 до 120 вимірювань). Це дозволить випробовувати на виробництві не один двигун з партії, а кожний, що, у свою чергу, значно зменшить ризик використання неякісних двигунів замовниками та дозволить виробнику двигунів без змін в технології виготовлення двигунів здійснювати їх якісну сертифікацію. В роботі запропоновано методики метрологічної атестації та проектування розробленої інформаційно-вимірювальної системи, удосконалено загальний алгоритм вимірювання пускового моменту.

Одержані практичні результати впроваджено на підприємстві “Паллар” (м. Вінниця). Результати, які стосуються побудови комп'ютерних вимірювальних каналів, впроваджено в навчальний процес у лабораторії вимірювальної техніки на кафедрі метрології та промислової автоматики Вінницького державного технічного університету для підготовки інженерних кадрів за спеціальностями 7.091401-01 “Комп'ютеризовані системи управління і автоматики”, 7.091401-02 “Системи управління в метрології та сертифікації”. Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно. Окремі результати отримані в співавторстві, у цих випадках особистий внесок автора у патентах на винахід, статтях та тезах наведено у супроводжуючих документах та нижче:

1. [37] Кухарчук В.В., Козловський А.В. Математична модель вимірювального перетворювача пускового моменту з кроковим двигуном // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1997. – № 3. – С. 11–15.

☑ Дисертантом розроблено математичну модель, яка описує роботу вимірювального каналу під час підключення його до електричної мережі з використанням лінеаризованої моделі крокового двигуна. Здійснено розв'язок отриманої системи та розроблено програмне забезпечення для моделювання.

2. [38] Козловський А.В., Кухарчук В.В. Моделювання контролю залежності пускового моменту в функції кутового положення ротору // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький).– 1999.– № 1.– С. 17–23.
  - ☑ Дисертантом запропоновано нелінійну математичну модель засобу вимірювання залежності пускового моменту від кутового положення ротора в покроковому режимі роботи приводного двигуна та отримано її розв’язок чисельними методами в середовищі Maple V5. Здійснено вибір нелінійної моделі крокового двигуна, яка дозволяє реалізувати перервний метод вимірювання пускового моменту.
3. [102] Кухарчук В.В., Козловський А.В., Поджаренко В.О. Розробка математичної моделі для метрологічної атестації засобу контролю пускового моменту // Вимірювальна техніка та метрологія (Державний університет “Львівська політехніка”). – 1999. – №55. – С.171–177.
  - ☑ Дисертантом доведено неможливість використання відомих зразкових засобів для метрологічної атестації вимірювальних каналів пускового моменту у покроковому режимі роботи. Запропоновано новий задавач зразкового моменту, який має час заспокоєння значно менший за відомі, що суттєво підвищує швидкодію і точність здійснення метрологічного експерименту.
4. [39] Поджаренко В.О., Козловський А.В. Розробка математичної моделі вимірювального перетворювача пускового моменту з торсіонним сенсором // Вимірювальна техніка та метрологія (Державний університет “Львівська політехніка”). – 2000. – №56. – С. 140–147.
  - ☑ Дисертантом запропонована нова архітектура побудови вимірювального каналу пускового моменту та його математична модель, в якій вимірювання пускового моменту відбувається безпосередньо на роторі об’єкта вимірювання за допомогою

торсіонного сенсора. Досліджено вплив деформації торсіону на точність вимірювання пускового моменту.

5. [52] Козловський А.В., Кухарчук В.В. Моделювання динамічних характеристик вимірювального перетворювача мінімального пускового моменту // Сборник трудов международной научно-технической конференции “Приборостроение – 97”. – Винница - Симеиз. – 1997. – Часть 1. – С. 139–144.

☑ Дисертантом запропоновані етапи вимірювального перетворення мінімального пускового моменту та визначені умови обрання сенсора зусилля. Знайдена статична функція перетворення засобу вимірювання з ємнісним сенсором зусилля.

6. [40] Рішення про видачу патенту України № 98063116, МПК G 01 L 3/10. Спосіб визначення пускового моменту електродвигуна / А.В. Козловський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко; Заявлено 16.06.1998.

☑ Дисертантом одержано аналітичні залежності для визначення тривалості перехідного процесу для динамічного режиму роботи вимірювального каналу. Розроблена методика розрахунку спрямована на підвищення швидкодії вимірювального каналу.

7. Ігнатенко О.Г., Козловський А.В., Кухарчук В.В., Овчінніков В.С., Поджаренко В.О. Навчально-лабораторний комплекс для вивчення принципів побудови комп'ютерно-вимірювальних систем // Республіканська науково-методична конференція “Нові технології підготовки спеціалістів з вищою освітою за триступеневою системою “бакалавр–інженер–магістр””: Тез. допов. – Вінниця, ВДТУ. – 1996. – С. 100.

☑ Дисертантом розроблено програмне забезпечення для навчально-лабораторного комплексу, який дозволяє дослідити метрологічні характеристики вимірювальних каналів інтелектуальних засобів вимірювань з первинними вимірювальними перетворювачами, що побудовані на різних фізичних ефектах.



**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних та регіональних конференціях:

1. *Навчально-лабораторний комплекс для вивчення принципів побудови комп'ютерно-вимірювальних систем* – Республіканська науково-методична конференція “Нові технології підготовки спеціалістів з вищою освітою за триступеневою системою “бакалавр–інженер–магістр” (ВДТУ, Вінниця, 10 – 12 жовтня 1995 року).
2. *Результати дослідження вимірювального каналу механічних величин* – XXV науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу співробітників та студентів ВДТУ (Вінниця, 26–27 березня 1996 року).
3. *Дослідження вимірювального перетворювача пускового моменту електричних машин* – XXVI науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу співробітників та студентів ВДТУ (Вінниця, 25–26 березня 1997 року).
4. *Исследование характеристик измерительного преобразователя пускового момента* – 1-й Международный молодежный форум “Электроника и молодежь в XXI веке” (Харьков, 22–24 апреля 1997 года).
5. *Моделювання динамічних характеристик вимірювального перетворювача мінімального пускового моменту* – Международная научно-техническая конференция “Приборостроение–97” (Винница–Симеиз, 1997 год).
6. *Разработка обобщенной схемы системы контроля пусковых характеристик электрических машин* – Международный симпозиум “Наука и предпринимательство” (Винница–Львов, 1998 год).
7. *Спосіб визначення пускового моменту електродвигуна* – Международная научно-техническая конференция “Приборостроение–98” (Винница–Симферополь, 1998 год).
8. *Лінеаризація та аналіз адекватності математичної моделі крокового двигуна* – Международный симпозиум “Наука и предпринимательство” (Винница–Львов, 1999 год).

9. *Аналіз адекватності лінеаризованої моделі крокового двигуна* – 5-та Міжнародна науково-технічна конференція “Контроль і управління в складних системах” (КУСС–99, Вінниця, 3–5 лютого, 1999 року).
10. *Використання торсіонного сенсору для контролю пускового моменту електродвигунів малої та середньої потужності* – ХХІХ науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету (ВДТУ, Вінниця, 14 – 15, 21 – 22 березня 2000 року).

Також результати роботи доповідались на семінарах кафедри “Електромеханічні системи автоматизації” Вінницького державного технічного університету.

**Публікації.** Основний зміст роботи опублікований у 12 друкованих працях, в тому числі 4 статті у наукових журналах, що входять до переліку ВАК України, 5 статей у збірках праць науково-технічних конференцій різного рівня, 1 рішення про видачу патенту України на винахід, тези 2 доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, основних висновків по роботі, списку використаних джерел (105 бібліографічних посилань, 9 сторінок) та 6 додатків (42 сторінки). Загальний обсяг дисертації, в якому викладено основний зміст, складає 145 сторінок і містить 40 рисунків, 13 таблиць. Повний обсяг дисертації – 200 сторінок.

- У вступі доведено актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі досліджень, наукова новизна одержаних результатів та їх практична цінність, оцінено особистий внесок здобувача у дисертацію.
- У першому розділі дисертації розглядається сучасний стан вітчизняних та зарубіжних досліджень ІВС механічних характеристик електродвигунів. Виявляється, що питання про вимірювання пускового моменту практично не досліджується в існуючих розробках. Розглянуті особливості вимірювання пускового моменту та доповнена класифікація існуючих вимірювальних каналів пускового моменту, наведено їх порівняльний аналіз. За допомогою якісного критерію ви-

значається напрямок розробки засобів вимірювання пускового моменту. Сформульовані мета та задачі досліджень.

- У другому розділі дисертації розроблено структурну схему вимірювального каналу пускового моменту з кроковим приводним двигуном та торсіонним первинним вимірювальним перетворювачем. Розроблено математичні моделі та проведено моделювання ОВ та конструктивних елементів засобу вимірювання (КД, ТС, МС). Розроблено загальну математичну модель засобу вимірювання. Запропонована методика розрахунку часу заспокоєння рухомої частини вимірювального каналу.
- У третьому розділі дисертації розроблено структурну схему інформаційно-вимірювальної системи для визначення пускового моменту електродвигунів. Сформульовані особливості конструктивних елементів структурної схеми, етапи перетворення сигналів. Розроблений первинний вимірювальний перетворювач типу “момент – напруга” та швидкодіючий перетворювач змінної напруги у постійну напругу за середньовипрямленими значеннями амплітуди (рівняння перетворення, оцінка похибок тощо). Створений загальний алгоритм проведення дослідів КЗ та детальні алгоритми проведення основних етапів дослідів.
- У четвертому розділі дисертації проаналізовано складові похибки вимірювання пускового моменту електричного двигуна малої та середньої потужності, які виникають при застосуванні розробленої ІВС, визначено домінуючі складові цієї похибки. Знайдено композицію законів розподілу складових похибки вимірювання пускового моменту. Розраховано показники вірогідності контролю пускового моменту в залежності від співвідношення між СКВ складової квантування та СКВ складової, що зумовлена випадковими завадами.
- У п'ятому розділі розроблена методика інженерного проектування ІВС для визначення пускового моменту, дано рекомендації, за яким обирають тип торсіону, приводного двигуна та інше. Розроблено комплекс апаратного та програмного забезпечення для здійснення вимірювання пускового моменту та тестування самого засобу вимі-

рювання. Запропоновано методику метрологічної атестації засобу вимірювання пускового моменту та новий задавач зразкового моменту. За допомогою задавача зразкового моменту отримані експериментальні значення похибки вимірювання, яка засвідчила добру збіжність експериментальних результатів з теоретичними.

*Автор вважає своїм обов'язком висловити щиро подяку професору кафедри метрології та промислової автоматики Вінницького державного технічного університету, доктору технічних наук, Василю Васильовичу Кухарчуку за допомогу у виконанні досліджень, обговоренні та оформленні результатів дисертації.*

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 1.1. Стан вітчизняних та зарубіжних досліджень інформаційно-вимірювальних систем механічних характеристик електродвигунів

Провідні зарубіжні фірми в цій галузі ведуть розробку та впровадження інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) для вимірювання механічних характеристик електродвигунів, до яких відносять: статичну механічну характеристику (залежність частоти обертання ротора від обертового моменту за умови, що момент прискорення дорівнює нулю); динамічну механічну характеристику (вимірювання моменту реакції на статорі двигуна та кутового прискорення при відомих махових масах); параметри, які дозволяють вимірювати досліди КЗ та ХХ.

Наприклад, фірмою СЕМ (Франція) [1, 2] впроваджено ІВС, яка проводить випробування АД в режимах ХХ та КЗ, під навантаження, а також на нагрів. Така система дозволяє одночасно випробовувати шість АД і передбачає можливість швидкого переходу з автоматичного режиму управління на ручний.

Надзвичайно перспективне використання ІВС для випробування потужних двигунів. Австрійською фірмою ELIN [3, 4] розроблена система діагностуючих випробувань, яка дозволяє звести до мінімуму змушені зупинки потужних електричних двигунів і одержати максимум інформації про їх стан.

Подібні системи, але з іншими діапазонами вимірювань (електродвигуни малої та середньої потужності), розроблені та впроваджені в Німеччині, Швейцарії, Австралії, США [5 –12], Чехії [13] та Польщі [14, 15]. Проте всі ці системи призначені для вимірювання статичної механічної характеристики і мають такі недоліки. Використання двигуна постійного струму, як навантажуючого пристрою для ОВ не в повній мірі забезпечує вимоги стійкої роботи ІВС у всьому діапазоні швидкостей. Природна жорсткість механічної характеристики двигуна постійного струму скла-

дає не менше 10...15% при номінальній швидкості і значно збільшується на низьких швидкостях. Це призводить до неоднозначності у визначенні поточного моменту АД. Крім того, трудомісткість та енергоємність спричиняють сильне нагрівання АД під час експерименту, а це, в свою чергу, є джерелом додаткових похибок вимірювання.

Харківські автори Л.В. Акімов, О.І. Літвінов, Ю.Г. Борзяк, І.І. Сошницький запропонували [16–19] квазістатичний метод вимірювання механічних характеристик АД, суть якого полягає у тому, що навантажуючий пристрій працює у мережі із змінною частотою. Автоматично змінюючи частоту та вимірюючи через певні інтервали часу обертовий момент та частоту обертання вала визначають механічну характеристику АД. Підбираючи величину прискорення зміни частоти навантажуючого пристрою, встановлюють тривалість експерименту, під час якого ОВ не встигає суттєво розігрітися. Це дозволяє зменшити температурні похибки і підвищити вірогідність експерименту. Суттєвою перевагою квазістатичних методів вимірювання статичної механічної характеристики є можливість фіксації “голкових” провалів у характеристиці, зумовлених наявністю синхронних моментів.

З аналізу існуючих ІВС для вимірювання механічних характеристик електродвигунів було встановлено, що жодна з них не дозволяє вимірювати одну з головних характеристик електродвигуна – залежність пускового моменту від кутового положення ротора та напруги живлення.

На сьогодні відома розробка автоматизованого засобу вимірювання (ЗВ) пускового моменту електродвигунів, яка розроблялась В.В. Кухарчуком, В.О. Поджаренком, В.Ю. Кучеруком на кафедрі метрології та промислової автоматики Вінницького державного технічного університету. Розроблений ЗВ дозволяє вимірювати залежність пускового моменту від кутового положення ротора [20, 21]. Головним недоліком засобу вимірювання пускового моменту, який запропонований цими авторами, є невисока точність визначення пускового моменту, причини цього будуть наведені далі.

## 1.2. Особливості визначення пускового моменту електродвигунів та узагальнена структура ІВС

Вимірювання пускового моменту електродвигунів можливе у досліді “короткого замикання”, де пусковий момент є базовим параметром, особливості визначення якого полягають у наступному. Спочатку необхідно виміряти залежність пускового моменту  $M_p$  в функції кутового положення ротора об’єкта вимірювання (ОВ) відносно статора  $\alpha$  за один повний оберт ротора. Потім ротор ОВ встановлюють в кутове положення з мінімальним пусковим моментом  $M_k$  і загальмовують його. Тоді, змінюючи напругу живлення  $U_k$  живлення ОВ за допомогою варіатора напруги, вимірюють такі залежності короткого замикання:  $M_k = f(U_k)$ ,  $I_k = f(U_k)$ ,  $P_k = f(U_k)$ , де  $I_k$  – струм обмоток ОВ,  $P_k$  – потужність. Сумісні вимірювання пускового моменту та кута повороту ротора ОВ  $\alpha$  – досить важлива вимірювальна процедура, точність якої суттєво впливає на якість здійснення у повному обсязі досліду КЗ під час випробування електродвигунів [22].

Під час вимірювання залежності пускового моменту від кута повороту ротора ОВ відносно статора важливо дотримуватися умов проведення досліду КЗ:

- Сковзання ротора  $S$  відносно статора в момент, коли здійснюється вимірювання пускового моменту, повинно дорівнювати одиниці, тобто ротор повинен бути “наглухо” загальмований.
- Повний оберт ротора ОВ необхідно виконати, по можливості, з якомога найменшим кутовим кроком, щоб не пропустити кутове положення з мінімальним пусковим моментом.
- За час проведення вимірювання залежності пускового моменту від кута повороту ротора ОВ відносно статора сам ОВ не повинен перегрітися, щоб не вийти з ладу. Цей час залежить від типу ОВ і в багатьох випадках не перевищує 10 сек.

Враховуючи умови проведення дослідів КЗ та принципи побудови ІВС, узагальнена структурна схема ІВС для вимірювання пускового моменту наведена на рис. 1.1 [23]. Складовими елементами якої є: ЕВН – електронний варіатор напруги; ОВ – об’єкт вимірювання; ВКН – вимірювальний канал напруги; ВККП – вимірювальний канал кутового положення; ВКПМ – вимірювальний канал пускового моменту; МПК – мікропроцесорний контролер; ПЕОМ – персональний комп’ютер.

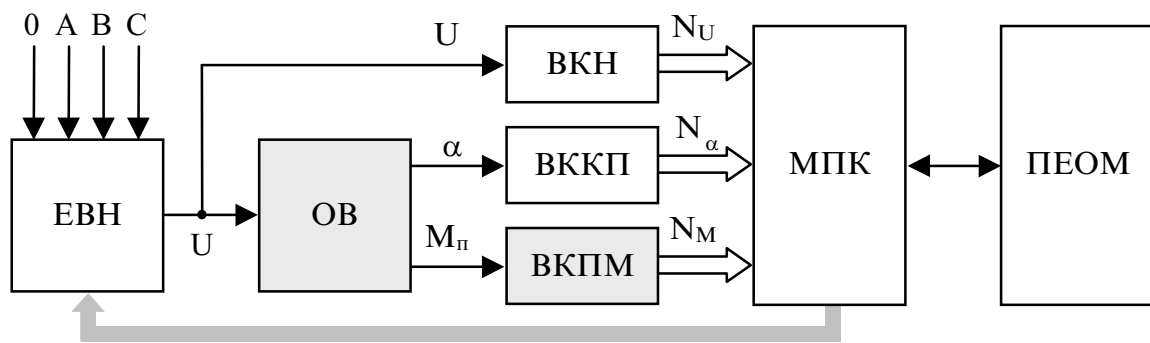


Рис. 1.1. Узагальнена структурна схема ІВС для вимірювання пускового моменту

Найсуттєвішим елементом в наведеній на рис. 1.1 структурній схемі ІВС є вимірювальний канал пускового моменту, від якості реалізації якого залежить точність вимірювання пускового моменту. Висока точність вимірювання пускового моменту електродвигуна та визначення його мінімуму має принципове значення при подальшому використанні двигуна в системах приводів тощо.

Якщо розрахунковий пусковий момент електродвигуна, який отримано на етапі його проектування та виготовлення, більший за мінімальне значення пускового моменту, яке виміряне на етапі його дослідження, – двигун вважається непрацездатним. Тобто, якщо двигун зупинився в кутовому положенні з мінімальним пусковим моментом і пусковий момент в цьому кутовому положенні менший за розрахунковий, то наступне вмикання двигуна не дозволить відновити обертання ротора, двигун почне швидко нагріватися, що призведе до пошкодження його обмоток та повного виходу з ладу.



### 1.3. Класифікація вимірювальних каналів пускового моменту та їх порівняльний аналіз

Без єдиної, узагальненої класифікації важко охопити все різноманіття засобів вимірювання пускового моменту електродвигунів, виробити загальний погляд на проблему визначення пускового моменту. Відомі роботи [24, 25], автори яких пропонують класифікації засобів вимірювання пускового моменту, але наведені класифікації є неповними і не зовсім зручними для використання при дослідженнях та розробці вимірювальних каналів пускового моменту.

Приймаючи до уваги вищесказане, класифікація вимірювальних каналів пускового моменту доповнена і наведена на рис. 1.2. У класифікацію введено нові ознаки: за способом вимірювання – за реакцією торсіону; за фізичним принципом дії – з приводом ротора ОВ; за типом приводного двигуна – кроковий двигун; за архітектурою побудови – мікропроцесорні. Доповнення, які зроблені автором, на рис. 1.2 позначено пунктирною лінією.

При вимірюванні пускового моменту електродвигунів визначають його різноманітні значення при різних положеннях ротора щодо статора. Залежність пускового моменту від кута повороту між статором і ротором визначається шляхом вимірювання значень  $M_n$  і  $\alpha$  при рівномірному обертанні статора або ротора один до одного на кут  $\alpha \geq 360^\circ$  (повний оберт). Кожному виміряному значенню пускового моменту відповідає визначене значення кута повороту  $\alpha$ .

Потім визначають мінімальний пусковий момент і кут повороту  $\alpha$ , що відповідає йому, і встановлюють ротор у положення  $M_k$ . У цьому положенні ротор випробуваного електродвигуна загальмовують і вимірюють напругу, струм, потужність.

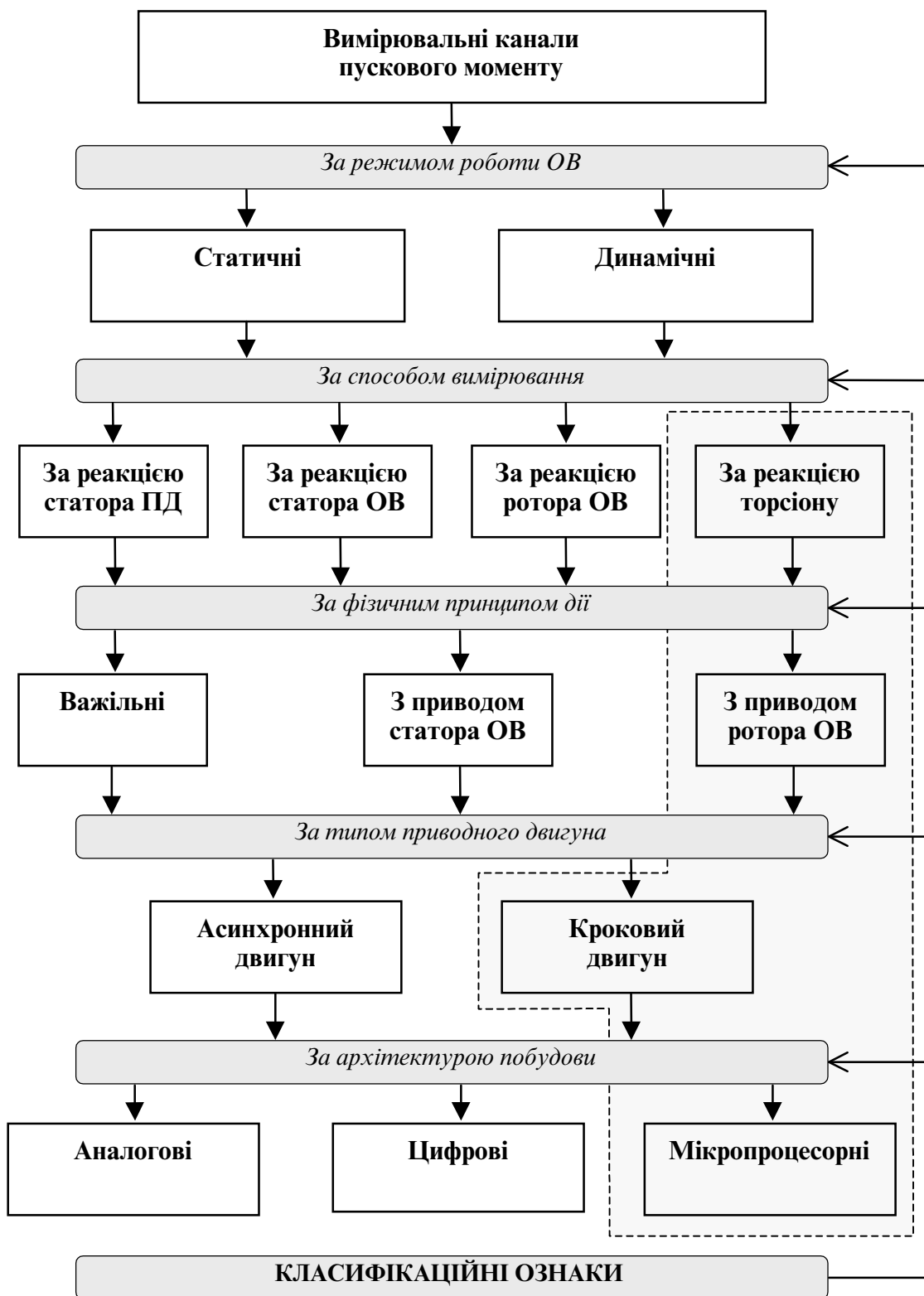


Рис. 1.2. Класифікація вимірювальних каналів пускового моменту

Отже, відомі вимірювальні канали пускового моменту за типом режиму роботи об'єкта вимірювання можна розділити на дві групи:

- Вимірювання залежності пускового моменту  $M_n$  від кута повороту ротора ОВ відносно статора  $\alpha$  (динамічний режим);
- Вимірювання пускового моменту на кутовому положенні ротора  $\alpha_k$ , якому відповідає мінімальний пусковий момент (статичний режим).

Різноманітні варіанти підключення первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів сили та кута повороту) до об'єкта вимірювання розділяють відомі вимірювальні канали  $M_n$  на чотири основні групи: за реакцією статора приводного двигуна (ПД); за реакцією статора об'єкта вимірювання; за реакцією ротора об'єкта вимірювання; за реакцією торсіону.

Структурні схеми виділених вимірювальних каналів пускового моменту електродвигуна та їх порівняльний аналіз наведені в табл. 1.1.

### **1.3.1. Вимірювальні канали пускового моменту за реакцією статора приводного двигуна**

Це одна з найбільш відомих схем гальмівних моментомерів, що містить об'єкт вимірювання (ОВ), муфту спряження (МС), приводний двигун (ПД), сенсор зусилля (СЗ), сенсор кута (СК) і мікропроцесорний контролер (МПК).

Приводний двигун приводить ( $S = 0,96 \dots 0,98$ ) в обертальний рух через муфту спряження ротор об'єкта вимірювання. Пусковий момент, що розвивається ОВ, передається від його ротора через муфту спряження на ротор приводного двигуна; від ротора ПД на його статор і через вимірювальний важіль (ВВ) на сенсор зусилля. Виміряні значення пускового моменту і кута повороту з виходів відповідних сенсорів надходять на входи МПК (див. табл. 1.1, схема 1).

Структурні схеми вимірювальних каналів  
пускового моменту електродвигуна

№ схеми	Структурна схема	Порівняльний аналіз
1		<p><u>Недоліки:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Низька точність, обумовлена довгим ланцюгом перетворення.</li> </ol> <p><u>Переваги:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Технологічність;</li> <li>Можливість усунення дестабілізуючих факторів.</li> </ol>
2		<p><u>Недоліки:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Нетехнологічність;</li> <li>Некоректність методу, обумовлена використанням самого OB у якості вимірювального перетворювача.</li> </ol> <p><u>Переваги:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Простота.</li> </ol>
3		<p><u>Недоліки:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Складність конструкції MC;</li> <li>Обмежений діапазон за кутом повороту.</li> </ol> <p><u>Переваги:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Незначний вплив методичної похибки.</li> </ol>
4		<p><u>Недоліки:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Складність конструкції MC та торсіону (ТС).</li> </ol> <p><u>Переваги:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Підвищення точності вимірів;</li> <li>Прискорення проведення вимірів.</li> </ol>

Мікроконтролер, одержуючи значення  $M_{п}$  і  $\alpha$ , здійснює реєстрацію залежності  $M_{п} = f(\alpha)$ . При цьому на роботу вимірювального каналу, реалізованого по такій схемі, впливають дисипативні сили, що представляють собою сили тертя  $\xi_m$  у підшипниках приводного двигуна та об'єкта вимірювання; сили внутрішнього тертя, зумовлені неідеальністю жорсткого з'єднання муфти  $\xi_m$ ; сили тертя обертання ротора об повітря приводного двигуна  $\xi_v$  і об'єкта вимірювання.

Перераховані вище дисипативні сили  $\Delta Q_c$  створюють додатковий момент опору  $\Delta M_c$  і вносять систематичну похибку в результати вимірювання пускового моменту.

Крім того, приводний двигун створює нерівномірний гальмівний момент, що зумовлений такими причинами:

- по-перше, нерівномірністю гальмівного моменту від взаємодії зубців ротора (якоря) із полюсами статора;
- по-друге, нерівномірністю гальмівного моменту від відхилень напруги  $U_c$  і частоти  $f_c$  у промисловій мережі від номінальних значень.

Таким чином, нерівномірність гальмівного моменту, зумовлена конструктивними особливостями і дестабілізуючими впливами  $U_c$  і  $f_c$  на ПД та ОВ, вносить випадкову складову похибки в результати вимірювання пускового моменту електродвигуна.

Основним недоліком цього вимірювального каналу є довге коло вимірювання  $M_{п}$ , що складається з муфти спряження, ротора і статора ПД, сенсора зусилля і мікроконтролера. Кожна складова частина первинного вимірювального перетворення пускового моменту вносить свою додаткову похибку, у результаті чого величина, що вимірюється, на виході вимірювального каналу відрізняється від дійсного значення.

У якості істотної переваги вимірювального каналу слід зазначити його технологічність і можливість структурними методами усунення і зменшення впливу перерахованих вище систематичної і випадкової складових похибки.

### 1.3.2. Вимірювальні канали пускового моменту за реакцією статора об'єкта вимірювання

Структурна схема вимірювального каналу пускового моменту за реакцією статора ОВ подана на схемі 2 (див. табл. 1.1). Цей канал найбільш поширений, і його структурна схема складається з тих же функціональних блоків, що і вимірювальний канал пускового моменту за реакцією статора приводного двигуна. Проте в цьому випадку пусковий момент, що розвивається ОВ, передається від його ротора на статор ОВ і за допомогою вимірювального важеля, закріпленого на статорі, на сенсор зусилля.

Крім пускового моменту, на балансірну раму, де звичайно встановлюють ОВ, діє момент пружності  $\Delta M_y$ , що створюється силою пружності сенсора зусилля, і демпферний момент  $\Delta M_d$ . Вважаючи, що тертя в ножових опорах відсутнє, можна записати таке рівняння руху балансірної рами:

$$J_p \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M_{\pi} + \Delta M_y + \Delta M_d, \quad (1.1)$$

де  $J_p$  – сумарний момент інерції рами з закріпленням на ній ОВ;

$\varphi$  – кут повороту балансірної рами.

Момент від сили пружності виникає при відхиленні рами від положення рівноваги

$$\Delta M_y = -C \cdot \varphi, \quad (1.2)$$

де  $C$  – коефіцієнт жорсткості сенсора зусилля.

Момент, що створюється демпферним пристроєм,

$$\Delta M_d = -P \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \quad (1.3)$$

де  $P$  – коефіцієнт заспокоєння.

Вираз (1.1) з урахуванням (1.2) і (1.3) має такий вигляд:

$$J_p \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + P \cdot \frac{d\varphi}{dt} + C \cdot \varphi = M_n. \quad (1.4)$$

Рівняння (1.4) є диференціальним рівнянням динамічної ланки другого порядку, що має статичний коефіцієнт передачі

$$K(0) = \frac{\varphi}{M_n} = \frac{1}{C} \quad (1.5)$$

і частоту власних коливань

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{J_p}}. \quad (1.6)$$

Для одержання прийнятної динамічної похибки частота власних коливань засобу вимірювань повинна бути істотно більшою від верхньої межі частотного спектра моментів, що вимірюються. Це досягається збільшенням коефіцієнта  $C$ , оскільки зменшення  $J_p$  має конструктивні обмеження. Збільшення коефіцієнта жорсткості призводить до різкого зниження статичного коефіцієнта передачі.

Компромісним рішенням є вибір порівняно невеликого значення  $\omega_0$  і введення у вимірювальний перетворювач коригувальних елементів. Проте таке рішення може дати позитивний ефект лише для одного випробуваного двигуна. Це обумовлено залежністю  $J_p$  від розмірів і маси ОВ.

Крім цього, при вимірюванні коливань пускового моменту виникає необхідність у кріпленні до випробуваного двигуна вимірювального важеля і ретельного балансування ОВ перед кожним вимірюванням, що призводить:

- по-перше, до похибки за рахунок встановлення важеля на статорі ОВ, тому що останній характеризується технологічним розкидом габаритних розмірів;
- по-друге, до нетехнологічності методу, що призводить до значного збільшення часу підготування об'єкта вимірювання до випробувань;
- по-третє, до похибки за рахунок незбалансованості об'єкта вимірювання.

Незважаючи на це, вимірювальні канали пускового моменту за реакцією статора ОВ знайшли широке застосування в різноманітних науково-дослідних пристроях завдяки своїй універсальності і простоті, але промислові варіанти так і не були створені.

### **1.3.3. Вимірювальні канали пускового моменту за реакцією ротора об'єкта вимірювання**

Відмінність цієї структури від попередніх полягає в тому, що на вихідному валі приводного двигуна жорстко закріплена муфта для захоплення статора ОВ, а вимірювальний важіль закріплено на валі ротора об'єкта вимірювання (див. табл. 1.1, схема 3).

Приводний двигун обертає муфту спряження і скріплений із нею статор ОВ. При підключенні напруги  $U_c$  ротор об'єкта вимірювання прагне обертатися, і через вимірювальний важіль із сенсором зусилля відбувається вимірювання  $M_n$  у залежності від кутового положення  $\alpha$  (ротора щодо статора).

У різноманітних технічних рішеннях даного вимірювального каналу пусковий момент знімається з ротора випробуваного двигуна, виключаючи тим самим методичну похибку, яка властива попереднім методам, оскільки інерційний момент статора ОВ в декілька разів більший, ніж інерційний момент ротора.

Проте, згадана вище структура не знайшла широкого застосування в промисловості, тому що вона має два суттєвих недоліки:



- по-перше, широка номенклатура і складність конструкції муфт спряження – кожному типу ОВ повинна відповідати своя муфта спряження;
- по-друге, обмеження, що накладаються струмопідводами випробуваного електродвигуна, при вимірюванні залежності  $M_{п} = f(\alpha)$  на кут повороту більше, ніж  $180^\circ$ .

#### **1.3.4. Вимірювальні канали пускового моменту за реакцією торсіонного сенсора**

Ця схема вимірювання пускового моменту пропонується до застосування вперше і, на відміну від усіх раніше поданих схем, має в своєму складі муфту спряження складної конструкції, що містить у собі торсіонний сенсор (ТС).

Приводний двигун призводить в обертання через торсіонну МС із ТС ротор об'єкта вимірювання. Пусковий момент, що створюється ОВ реєструється ТС і передається на мікропроцесорний контролер (див. табл. 1.1, схема 4).

Вимірювальний перетворювач пускового моменту з ТС має суттєві переваги над усіма раніше наведеними схемами, а саме:

- виключає використання такого елемента структурної схеми як вимірювальний важіль, що має знижити методичну похибку;
- значно скорочується коло вимірювального перетворення при вимірюванні пускового моменту;
- з'являється можливість алгоритмічного корегування результатів вимірювання пускового моменту.

Зменшення похибки при застосуванні вимірювального каналу з торсіонним сенсором може призвести до широкого використання ІВС пускового моменту. Основним недоліком такої побудови вимірювальних каналів може бути лише складність реалізації муфти спряження.

### 1.3.5. Вибір критерію та порівняльний аналіз відомих вимірювальних каналів пускового моменту

Для оцінки та порівняння засобів вимірювання пускового моменту важливе значення має вибір оцінки їх ефективності. Загальні рекомендації, які необхідно враховувати при виборі критеріїв ефективності, полягають у наступному [26 – 31]:

- критерій повинен відображати основне призначення засобу вимірювання;
- критерій повинен бути критичним по відношенню до параметрів, які дозволяють його варіювати;
- володіти певною конструктивністю, яка дозволяє відносно просто визначити його чисельне значення;
- бути достатньо універсальним, дозволяти порівнювати ефективність систем одного призначення та вибрати кращий варіант.

В теперішній час використовується багато характеристик точності, швидкодії, надійності та вартості, кожна з яких може використовуватись як окремий показник якості засобу вимірювання. Найбільш простим і зручним для проведення аналізу і вибору базового вимірювального каналу для розробки засобу вимірювання пускового моменту є узагальнений якісний критерій ефективності (УКЕ) [26].

Якісний критерій характеризує, досягнута чи не досягнута ціль, яку поставлено перед засобом. Цей критерій ефективності можна трактувати як той, що має тільки два значення: 1 – якщо ціль досягнута, 0 – в протилежному випадку. Тоді УКЕ буде являти собою суму окремих якісних критеріїв ефективності (ОКЕ), які характеризують цілі, поставлені перед засобом вимірювання. Формула для розрахунку УКЕ має наступний вигляд:

$$\text{УКЕ} = \sum_{i=1}^{n_{\text{ОКЕ}}} a_i \cdot \text{ОКЕ}_i, \quad (1.7)$$

де  $a_i$  – вагові коефіцієнти;

$n_{oke}$  – загальна кількість ОКЕ.

Загальна ефективність  $E$  буде виражатись відношенням ефективності кожного з засобів вимірювання  $E_0$  до кількості ОКЕ  $n_{oke}$  або до засобу вимірювання з максимальним УКЕ  $E_M$ , тобто

$$E = \frac{E_0}{n_{oke}} \quad (1.8)$$

або

$$E = \frac{E_0}{E_M}. \quad (1.9)$$

При цьому обумовимо, що для досягнення якої-небудь окремої цілі засіб вимірювання повинен реалізовувати усі свої потенційні можливості. Це положення дозволяє проводити порівняльний аналіз засобів вимірювання на рівні реалізованих у них вимірювальних каналів. Вважаючи, що ЗВ повинен забезпечувати усі вимоги на одному рівні, можна допустити, що  $a_i = 1$ . Порівняльний аналіз відомих структурних схем вимірювальних каналів пускового моменту зведений у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Порівняльний аналіз структурних схем  
вимірювальних каналів пускового моменту

Назва критерію		Структурні схеми			
		1	2	3	4
1.	Технологічність	1	0	0	1
2.	Простота реалізації	1	1	0	0
3.	Висока точність	0	0	1	1
4.	Швидкодія	0	1	0	1
5.	Можливість алгоритмічного уточнення результатів	1	0	0	1
6.	Незначний вплив методичної похибки	0	0	1	1
7.	Широкий діапазон по куту повороту	1	0	0	1
8.	Коректність	1	0	1	1
$E_0$		<b>5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>7</b>
$E = E_0 / n_{oke}$ , де $n_{oke} = 8$		<b>0,625</b>	<b>0,250</b>	<b>0,375</b>	<b>0,875</b>

З проведеного порівняльного аналізу встановлено, що найбільш ефективним є засіб вимірювання пускового моменту, який базується на вимірювальному каналі, в якому пусковий момент реєструється за реакцією торсіонного сенсора (див. табл. 1.1, схема 4).

В результаті проведення порівняльного аналізу відомих вимірювальних каналів з запропонованим згідно з УКЕ встановлено, що запропонований вимірювальний канал значно кращий за відомі і буде використаний для побудови засобу вимірювання пускового моменту.

#### 1.4. Математична модель вимірювального каналу пускового моменту з асинхронним приводом

На сьогодні достатньо теоретично розроблена і практично реалізована схема вимірювального каналу пускового моменту (ВКПМ) з асинхронним приводом [32–35]. ВКПМ реалізовано за конструктивною схемою, яка представлена на рис. 1.3.

Складові елементи ВКПМ такі: об'єкт вимірювання 1, ротор якого з'єднаний жорстко за допомогою муфти спряження 2 з ротором приводного двигуна 3; приводний двигун встановлено балансірно на станині 4; на статорі ПД закріплений вимірювальний важіль 5, який діє на сенсор зусилля 6. Як ПД використано асинхронний двигун разом з хвильовим редуктором (ХР) 7.

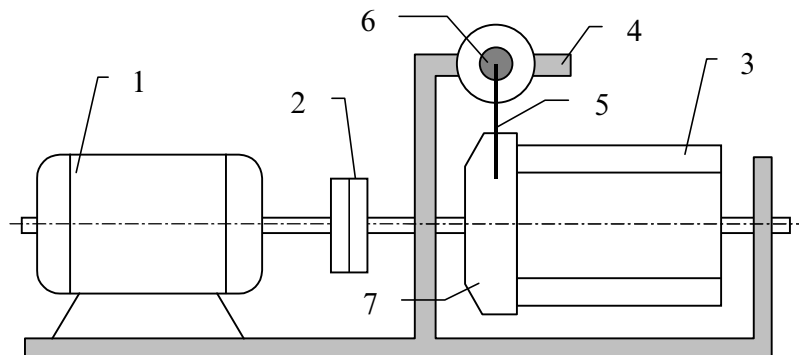


Рис. 1.3. Конструктивна схема ВКПМ з АД

В основу роботи наведеного ВКПМ покладено метод вимірювання пускового моменту за реакцією статора приводного двигуна. Математична модель ВКПМ з асинхронним двигуном будується на основі узагальненої структурної схеми вимірювального каналу, поданої на рис. 1.3, де в ролі приводного двигуна використовується асинхронний двигун [32]. На перетворювач діють зовнішні моменти: електромагнітний момент  $M_{em}$  асинхронного двигуна, що прикладений до його ротора і який діє на вхідний вал редуктора; момент  $M_p$  на виході редуктора, що прикладений за допомогою муфти спряження до ротора ОВ; пусковий момент  $M_{п ок}$ , що прикладений за допомогою МС до виходу редуктора.

На роботу перетворювача впливають також дисипативні моменти: момент опору в підшипниках ОВ  $M_{об}^п$  і підшипниках вимірювального каналу  $M_{вк}^п$ ; момент внутрішнього опору муфти спряження  $M_{мс}^п$ ; момент втрат в асинхронному приводі та редукторі  $M_{пд}^п$ .

Вхідною величиною, що діє на ВКПМ, є пусковий момент ОВ, що визначається за формулою [25]

$$M_{п ов} = k \cdot U_{кн}^2 + [a \cdot \sin(\omega_1 t) + b \cdot \cos(\omega_2 t)], \quad (1.10)$$

де  $k = \frac{p \cdot m \cdot R_p}{2\pi \cdot f_c \cdot [(R_p + R_c)^2 + (X_p + X_c)^2]}$  – постійна із формули Клосса;

$p$  – кількість пар полюсів ОВ;

$m$  – кількість фаз статора;

$f_c$  – частота поля статора;

$X_c, X_p$  – індуктивний опір фаз статора і ротора;

$R_c, R_p$  – активний опір статора і ротора;

$U_{кн}$  – номінальна напруга живлення ОВ;

$a, b, \omega_1, \omega_2$  – коефіцієнти, що залежать від конструкції ОВ.

При підключенні об'єкта вимірювання до електричної мережі його робота описується системою рівнянь [32]

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{di_{s\alpha}}{dt} = k_{ад} [L_r (U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) - L_m (U_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} + \omega_{пд} (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}))]; \\
\frac{di_{s\beta}}{dt} = k_{ад} [L_r (U_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) - L_m (U_{r\beta} - R_r i_{r\beta} + \omega_{пд} (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}))]; \\
\frac{di_{r\alpha}}{dt} = k_{ад} [-L_m (U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) - L_s (U_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} + \omega_{пд} (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}))]; \\
\frac{di_{r\beta}}{dt} = k_{ад} [-L_m (U_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) - L_s (U_{r\beta} - R_r i_{r\beta} + \omega_{пд} (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}))]; \\
M_{ем} = 0,5 \cdot m_{ад} \cdot p_{ад} \cdot L_m \cdot (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}); \\
\frac{d\omega_p}{dt} = i^* \cdot \frac{p}{J_p} \cdot (M_{ем} - M_p^*),
\end{array} \right. \quad (1.11)$$

де  $k_{ад} = \frac{1}{L_r \cdot L_s - L_m^2}$  – коефіцієнт, що залежить від конструкції АД;

$m_{ад}$  – кількість фаз АД;

$p_{ад}$  – кількість пар полюсів АД;

$R_s, R_r$  – активні опори обмоток статора і ротора АД;

$L_s, L_r$  – індуктивності в обмотках статора і ротора АД;

$L_m$  – взаємоіндуктивність між обмотками статора і ротора АД;

$U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}$  – проекції напруг статора і ротора на осі координат  $\alpha, \beta, 0$ ;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  – токи в обмотках статора і ротора АД;

$i^*$  – передатне число редуктора;

$\omega_p = \frac{\omega_{пд}}{i^*}$  – частота обертання вихідного вала редуктора;

$\omega_{пд}$  – частота обертання приводного двигуна;

$M_p^*$  – момент на виході редуктора.

Обертальний момент ПД визначається за формулою

$$M_{пд} = M_{ем} - M_{пд}^п. \quad (1.12)$$

Момент на виході ХР є сума складових моментів

$$M_p = M_{\Pi_{\text{ОВ}}} + (M_{\text{ОВ}}^{\Pi} + M_{\text{ВК}}^{\Pi} + M_{\text{ПД}}^{\Pi}) + M_{\text{МС}}^{\Pi}. \quad (1.13)$$

Припустимо, що зовнішні сили або моменти прикладені до зосереджених мас. Тоді обертальний момент на виході ХР визначається як

$$M_p^* = \frac{M_p}{i^* \cdot \eta} = \frac{M_{\Pi_{\text{ОВ}}} + (M_{\text{ОВ}}^{\Pi} + M_{\text{ВК}}^{\Pi} + M_{\text{ПД}}^{\Pi}) + M_{\text{МС}}^{\Pi}}{i^* \cdot \eta}, \quad (1.14)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт корисної дії редуктора.

Приведення моментів інерції ротора об'єкта вимірювання і муфти спряження до приводного двигуна здійснюється через квадрат передатного числа редуктора

$$J_p = J_{\text{ПД}} + \frac{J_{\text{ОВ}}}{i^{*2}} + \frac{J_{\text{МС}}}{i^{*2}}, \quad (1.15)$$

де  $J_{\text{ПД}}$  – момент інерції ПД;

$J_{\text{ОВ}}$  – момент інерції ОВ;

$J_{\text{МС}}$  – момент інерції МС.

Методика, яка б дозволяла враховувати особливості хвильового редуктора, у даний час відсутня. Тому зробимо припущення, що жорсткість ХР постійна. Тоді момент  $M_{\Pi}$  на корпусі приводного двигуна, з урахуванням раніше зроблених припущень, визначається як

$$M_{\Pi} = -M_{\text{ПД}} - M_p. \quad (1.16)$$

Використовуючи (1.12) і підставляючи значення  $M_p$  із (1.13), одержимо момент на корпусі приводного двигуна в наступному вигляді:

$$M_{\Pi} = M_{\text{ПД}} + M_{\Pi_{\text{ОВ}}} + \Delta M_c + M_{\text{МС}}^{\Pi}, \quad (1.17)$$

де  $\Delta M_c = M_{об}^п + M_{вк}^п + M_{пд}^п$  – моменти опору, що створюються дисипативними силами ОБ і ПД;

$M_{мс}^п = -e \cdot \cos(\alpha)$  – момент ексцентриситету муфти спряження;

$e$  – коефіцієнт, який залежить від конструкції та типу муфти.

Таким чином, математична модель ВКПМ з АД визначається рівняннями (1.11), (1.12) і (1.17).

### 1.5. Методична похибка та недоліки вимірювального каналу пускового моменту з асинхронним приводом

Суть вищенаведеного способу полягає в тому, що ротор електродвигуна, який випробовується – ОБ, обертають з заданою швидкістю за допомогою приводного двигуна і одночасно вимірюють кутове положення ротора та обертальний момент на ньому.

У виділеному вимірювальному каналі приводний двигун через муфту спряження обертає вал ротора випробовуваного двигуна з невеликою, наперед заданою швидкістю  $V_{пд}$ . Величина  $V_{пд}$  вибирається із наступних умов. З одного боку, швидкість  $V_{пд}$  повинна бути досить малою, для того, щоб наблизити умови вимірювання до умов здійснення досліду “короткого замикання” – сковзання  $S = 1$ . З другого боку,  $V_{пд}$  не може бути досить малою, тому що збільшується час  $t_b$  вимірювання залежності пускового моменту  $M_n$  в функції кутового положення ротора  $\alpha$ . Величина  $t_b$  не повинна перевищувати 10 секунд (для багатьох типів двигунів), тому що за даний проміжок часу випробуваний двигун нагрівається і температура його обмоток досягає робочого значення. Зменшення  $V_{пд}$  і, відповідно, збільшення  $t_b$  приводить до перегріву випробовуваного двигуна та виходу його з ладу.

Отже, для автоматизованого вимірювання залежності  $M_n = f(\alpha)$ , необхідно обертати ротор ОБ з невеликою швидкістю, величина якої ви-



значається параметром  $t_b$ . Дана обставина приводить до порушення умови виконання досліду “короткого замикання” –  $S \neq 1$ , що викликає появу методичної похибки  $\delta_M$ . Визначимо величину похибки  $\delta_M$  [36].

Пусковий момент на виході ОВ при  $S \neq 1$  ( $0 \leq S \leq 1$ ) визначається за формулою

$$M_{S \neq 1}^1 = \frac{pmU_{кн}^2 R_p}{2\pi f_c \left[ \left( \frac{R_p}{S} + R_c \right)^2 + (X_p + X_c)^2 \right] \cdot S} + a \cdot \sin(\omega_1 t) - b \cdot \cos(\omega_2 t). \quad (1.18)$$

Якщо виконується умова виконання досліду “короткого замикання”, тобто  $S = 1$ , формула (1.18) приймає вигляд

$$M_{S=1}^2 = \frac{pmU_{кн}^2 R_p}{2\pi f_c [(R_p + R_c)^2 + (X_p + X_c)^2]} + a \cdot \sin(\omega_1 t) - b \cdot \cos(\omega_2 t). \quad (1.19)$$

Тоді відносна методична похибка, що виникає за рахунок відхилення від умови досліду ( $S = 1$ ), визначається за формулою

$$\delta_M = \frac{M_{S \neq 1}^1 - M_{S=1}^2}{M_{S=1}^2} \cdot 100\%. \quad (1.20)$$

Остаточна формула для визначення методичної похибки має вигляд

$$\delta_M = \xi \cdot \frac{\frac{1}{\left[ \left( \frac{R_p}{S} + R_c \right)^2 + (X_p + X_c)^2 \right] \cdot S} - \frac{1}{\tau^2 + X^2}}{\xi \cdot \frac{1}{\tau^2 + X^2} + a \cdot \sin(\omega_1 t) - b \cdot \cos(\omega_2 t)} \cdot 100\%, \quad (1.21)$$

де  $\xi = \frac{pmU_{\text{кн}}^2 R_p}{2\pi f_c}$ ,  $\tau = R_p + R_c$ ,  $x = X_p + X_c$  – постійні складові для даного типу двигуна.

Графічне представлення залежності методичної похибки  $\delta_M$  від сковзання  $S$  для різних типів електричних двигунів наведено на рис. 1.4.

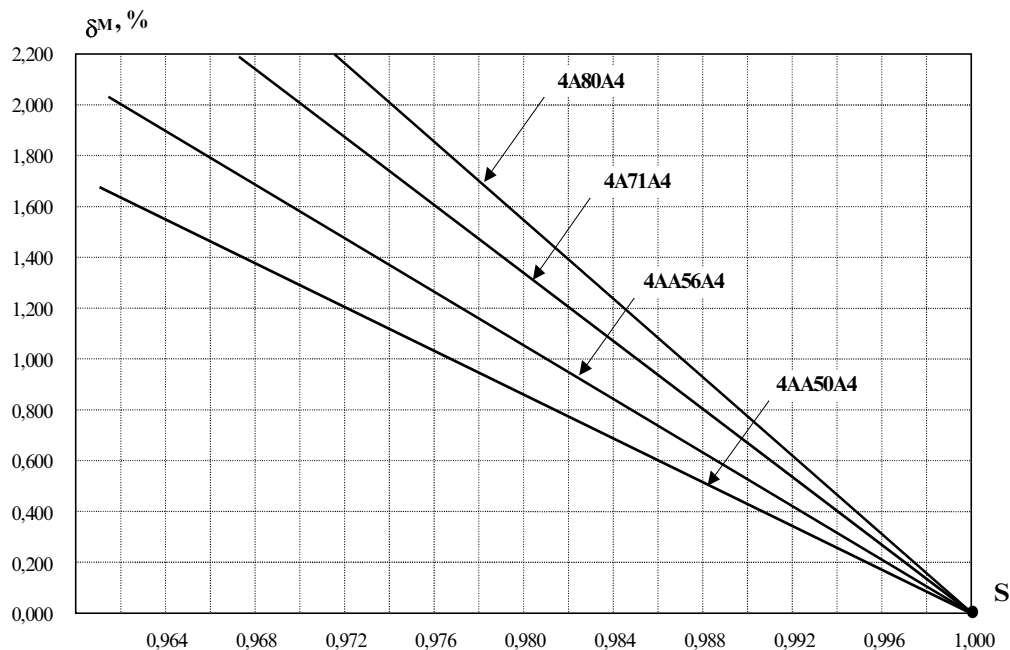


Рис. 1.4. Залежності  $\delta_M$  від  $S$  для різних типів електричних двигунів

З аналізу наведених залежностей (див. рис. 1.4) встановлено, що має місце суттєвий недолік – порушується умова проведення вимірювання пускового моменту у досліді КЗ. Вона полягає в тому, що під час вимірювання пускового моменту у будь-якому кутовому положенні ротора відносно статора сковзання ротора  $S \neq 1$ . Тобто ротор двигуна, який випробовується, повільно обертається. Нехтування умовою ( $S = 1$ ) веде до появи систематичної методичної похибки, яка не може бути усунена без принципових змін у засобі та методі вимірювання.

Крім методичної похибки, яку важко усунути, ВКПМ з АД має похибку, яка виникає в результаті того, що ротор ОБ з'єднаний з інерційною масою (складові: ПД та ВВ), яка більша за інерційну масу ротора

ОВ. Під час вимірювання пускового моменту ця обставина значно впливає на результат.

За результатами моделювання ВКПМ з АД [32–35] для різних типів двигунів встановлено, що відносна похибка становить від 7 до 12 відсотків, що не задовольняє сучасні вимоги до засобів вимірювань пускового моменту електричних машин.

### 1.6. Напрямок та задачі досліджень

Використання традиційних (ручні методики вимірювання  $M_p$  в огляді не розглядаються) та автоматизованих засобів вимірювання пускового моменту електродвигунів, які відомі на сьогодні, не дозволяють у повній мірі вирішити проблему підвищення точності. Це пов'язано з властивими їм недоліками. На основі викладеного вище уявляється, що перспективним напрямком досліджень є розробка ІВС пускового моменту електродвигуна, яка дозволила би зменшити похибки вимірювань (методичну та інструментальну складові похибки).

В результаті проведеного аналізу встановлено, що найбільш ефективним для реалізації ІВС є вимірювальний канал пускового моменту за реакцією торсіонного сенсора, який включено в розрив між ротором ОВ та ротором ПД.

Є очевидним, що побудові ІВС для визначення пускового моменту електродвигунів повинно передувати комплексне дослідження первинного перетворювача та об'єкта вимірювання. У відповідності з поставленою ціллю сформульовані такі задачі:

- дослідження математичної моделі об'єкта вимірювання – асинхронного двигуна малої та середньої потужності з метою визначення аналітичних співвідношень, що зв'язують пусковий момент та конструктивні параметри двигуна;

- розробка вимірювального каналу пускового моменту з покращеними метрологічними показниками на основі торсіонного первинного вимірювального перетворювача;
- розробка математичних моделей вимірювального каналу пускового моменту для двох режимів роботи: вимірювання залежності пускового моменту від кута повороту ротора ОВ відносно статора, вимірювання мінімального пускового моменту;
- розробка алгоритму проведення вимірювання пускового моменту, який дозволяв би підвищити точність;
- аналіз впливних величин та їх функцій впливу на результат вимірювання пускового моменту, визначення композиції законів розподілу складових похибок вимірювання пускового моменту, розрахунок вірогідності контролю;
- розробка інженерної методики проектування засобів вимірювання пускового моменту;
- розробка, дослідження та впровадження апаратних та програмних засобів для вимірювання пускового моменту;
- експериментальне дослідження розробленої ІВС визначення пускового моменту та об'єкта вимірювання з метою підтвердження збіжності отриманих теоретичних результатів з експериментальними.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВКПМ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ПУСКОВОГО МОМЕНТУ

Як було показано раніше, існуючі ВКПМ мають значну похибку вимірювання пускового моменту. Для побудови ВКПМ з покращеними метрологічними характеристиками використаємо структурну схему засобу вимірювання пускового моменту 4 (див. табл. 1.1), ефективність якої доведена у розділі 1.3.5 (див. табл. 1.2).

Щоб виключити методичну похибку засобу вимірювання пускового моменту, яка виникає тоді, коли сковзання ротора ОВ відносно статора під час реєстрації пускового моменту не дорівнює одиниці, необхідні принципові зміни у конструкції ВКПМ. Для вирішення цього питання пропонується в ролі приводного двигуна використовувати кроковий двигун (КД) з великою кількістю кутових положень [37, 38]. Використання в ролі приводного двигуна КД дає такі суттєві переваги:

- Тільки КД має сковзання  $S = 1$  у положенні рівноваги (кутове положення) після закінчення перехідних процесів – виконується умова досліду КЗ.
- Зникає необхідність використовувати сенсор кутового положення ротора ОВ відносно статора, так як керування КД само по собі передбачає чітке значення кута повороту.
- КД значно легше керувати, якщо порівнювати з АД, так як керуються КД двійковим кодом, який генерує мікроконтролер.
- Як буде показано далі, КД має більш просту математичну модель, що значно спрощує розробку пристроїв на базі КД.

Більш суттєвим недоліком існуючих ВКПМ є спосіб зняття інформативного параметра (пускового моменту). В розділі 1.4 показано, що в засобі вимірювання пускового моменту це робиться за допомогою вимірювального важеля, який діє на сенсор зусилля. В такому випадку ми маємо коло перетворень типу “ротор ОВ – статор ПД – вимірювальний важіль – сенсор зусилля”. На кожному з етапів виникають певні похибки та

впливи, які дуже важко врахувати. Крім того, ротор ОВ жорстко з'єднаний з інерційною масою (ПД, хвильовий редуктор та ВВ), яка значно більша за самий ротор ОВ, що негативно впливає на точність вимірювання та час проведення експерименту.

### 2.1. Розробка структурної схеми вимірювального каналу пускового моменту

Для вирішення цього питання пропонується використати торсіонний сенсор для зняття інформативного параметра (пускового моменту) безпосередньо з місця, де він виникає (з ротора ОВ). Використання ТС має такі суттєві переваги [39, 40]:

- Висока точність вимірювання пускового моменту завдяки усуненню з кола вимірювального перетворення конструктивних елементів, які вносять похибки (ПД, ВВ, ХР).
- Підвищення швидкодії за рахунок зменшення інерційної маси, яка обертається – зменшення часу перехідних процесів у перетворювачі.

З урахуванням зроблених пропозицій, конструктивна схема нового ВКПМ наведена на рис. 2.1.

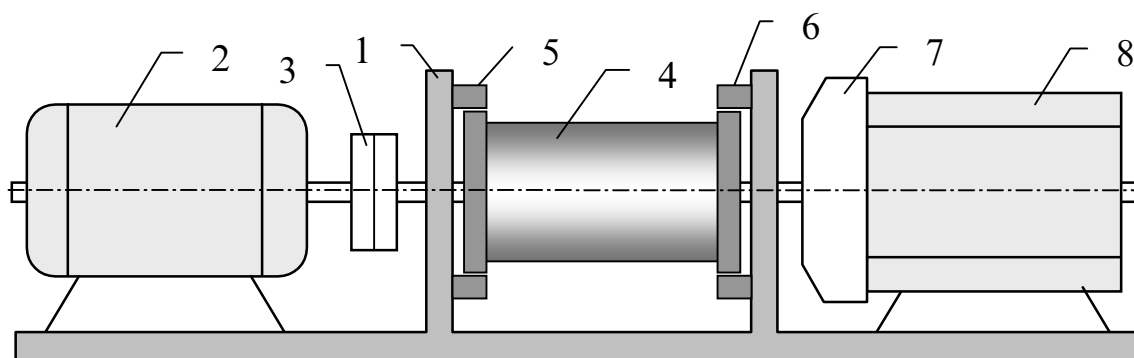


Рис. 2.1. Конструктивна схема ВКПМ з КД та ТС

Складові елементи нового ВКПМ (див. рис. 2.1) такі: на станині – 1 жорстко закріплені ОВ – 2 та ПД (використано КД) – 8; ротор ОВ через

МС – 3 з'єднаний з лівим торцем торсіону – 4; ротор КД через ХР – 7 з'єднаний з правим торцем торсіону – 4; з лівого та правого торців торсіону – 4 закріплені трансформаторні перетворювачі – 5 та 6 відповідно, які підключені за диференціальною схемою. Торсіон – 4 та трансформаторні перетворювачі – 5 та 6 разом утворюють торсіонний сенсор (ТС) з електричним інформативним вихідним сигналом.

Принцип дії ВКПМ наступний. На ОВ подається номінальна напруга живлення. Керуючий сигнал від МПК переводить КД у наступне кутове положення  $\alpha$ . Під впливом моментів ТС деформується – закручується на деякий кут  $\varphi$ . Зачекавши деякий час (час заспокоєння КД при зміні кутового положення та час заспокоєння торсіону), вимірюють значення пускового моменту та реєструють кутове положення ротора ОВ відносно статора. Потім весь наведений алгоритм повторюється знову, поки КД не зробить один повний оберт ротора відносно статора ОВ.

## **2.2. Розробка математичних моделей об'єкта вимірювання та конструктивних елементів ВКПМ**

Перед тим, як будувати математичну модель вимірювального каналу пускового моменту, необхідно розробити математичні моделі ОВ та конструктивних елементів: КД, ТС, МС і визначитись з їхніми основними параметрами. При наявності таких моделей стане можливим побудова математичної моделі вимірювального каналу пускового моменту.

### **2.2.1. Математична модель об'єкта вимірювання**

В ролі об'єкта вимірювання оберемо асинхронний двигун малої або середньої потужності. Пусковий момент асинхронного двигуна можна описати наступним виразом [32, 41]:

$$M_{\text{пов}} = k \cdot U_{\text{кн}}^2 + [a \cdot \sin(\omega_1 t) + b \cdot \cos(\omega_2 t)], \quad (2.1)$$

де  $k$  – постійна із формули Клосса, яку в загальному вигляді визначають за формулою

$$k = \frac{p \cdot m \cdot R_p}{2\pi f_c \left[ \left( \frac{R_p}{S} + R_c \right)^2 + (X_p + X_c)^2 \right] \cdot S}, \quad (2.2)$$

а з урахуванням того, що в ролі ПД використаємо КД, можна спростити (2.2) до наступного вигляду ( $S = 1$ ):

$$k = \frac{p \cdot m \cdot R_p}{2\pi \cdot f_c \cdot [(R_p + R_c)^2 + (X_p + X_c)^2]}. \quad (2.3)$$

Побудуємо теоретичну залежність пускового моменту для трьох типів асинхронних двигунів, параметри яких [42] наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Параметри асинхронних двигунів

№	Параметр	Тип асинхронного двигуна		
		4АА56А4	4А71А4	4А80А4
1.	$J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,00047	0,00097	0,0018
2.	$a$	-0,07	-0,09	-0,57
3.	$b$	0,05	-0,07	-1,12
4.	$p$	2	2	2
5.	$m$	3	3	3
6.	$R_1, \text{Ом}$	97,72	16,39	9,53
7.	$R_2, \text{Ом}$	72,48	15,08	5,619
8.	$X_1, \text{Ом}$	42,68	12,27	5,464
9.	$X_2, \text{Ом}$	76,90	24,33	9,2
10.	$\omega_1 = \omega_2, \text{с}^{-1}$	18	5,15	3,12

Графіки теоретичних залежностей пускового моменту від часу для обраних двигунів наведені на рис. 2.2.



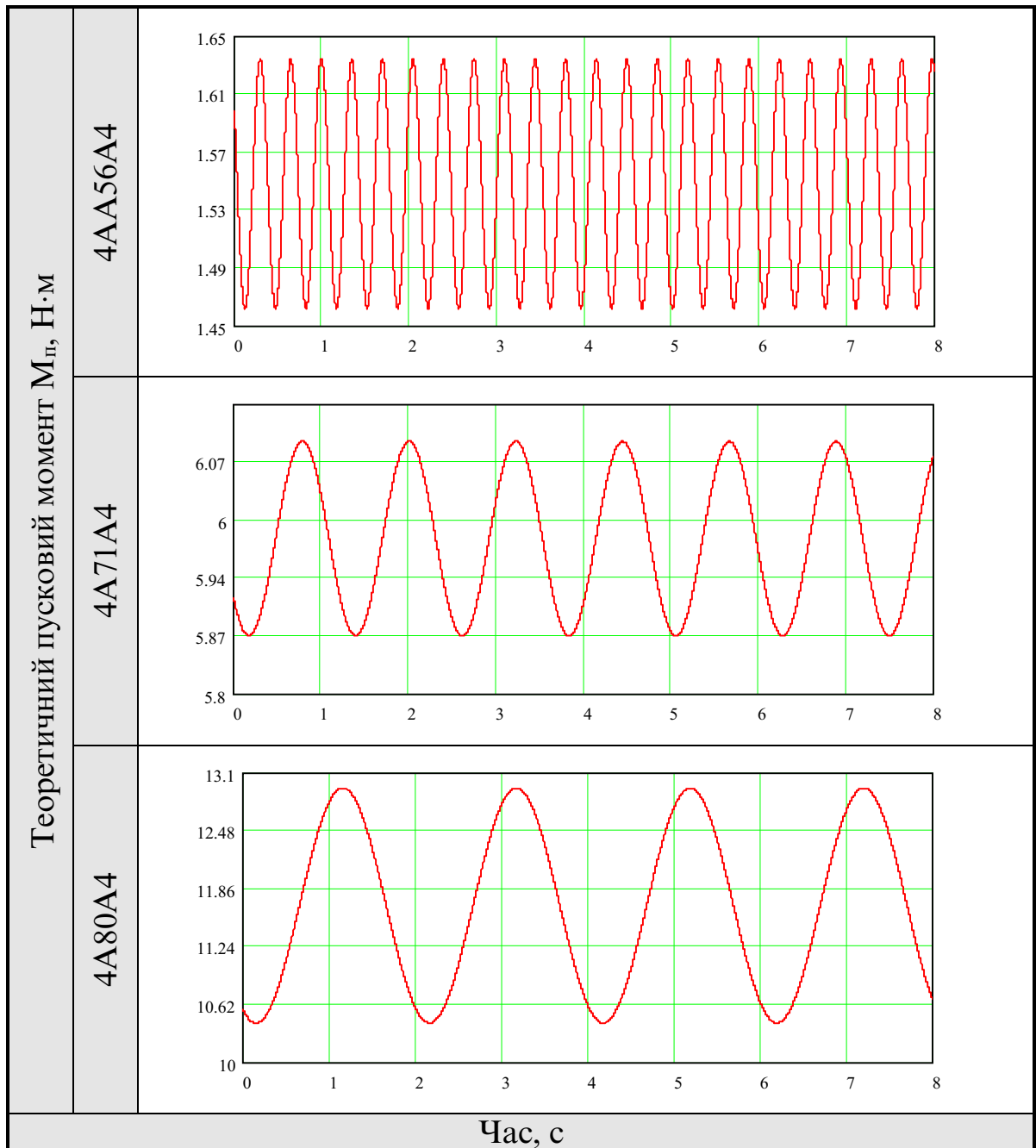


Рис. 2.2. Залежність теоретичного пускового моменту АД від часу

### 2.2.2. Математична модель крокового двигуна

Для аналізу коливальних явищ та згасань в КД з метою побудови математичної моделі будемо використовувати конструктивні моделі КД, наведені на рис. 2.3. На рис. 2.3, а показано КД із постійними магнітами,

але ця модель застосовується і до гібридного двигуна, а на рис. 2.3, б наведено однопакетний КД.

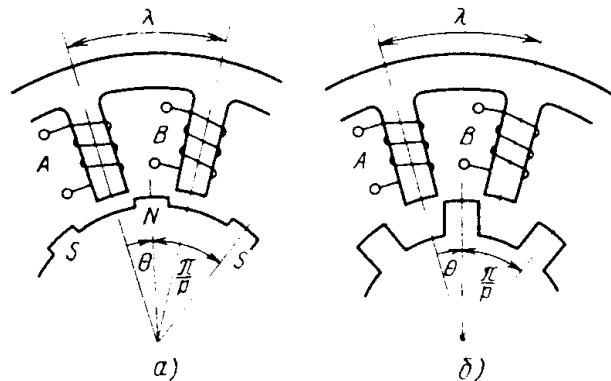


Рис. 2.3. Конструктивна модель КД

Рівняння руху ротора КД з постійними магнітами або гібридного двигуна описується диференціальним рівнянням вигляду [43]

$$J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \cdot \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi_m i_a \sin(p \cdot \theta) + pn\Phi_m i_b \sin[p \cdot (\theta - \lambda)] = 0, \quad (2.4)$$

де  $J$  – момент інерції;

$D$  – коефіцієнт в'язкого тертя;

$\theta$  – кут повороту ротора КД відносно статора;

$p$  – кількість пар полюсів;

$n$  – кількість витків обмоток;

$\Phi_m$  – взаємодукція;

$i_a, i_b$  – струм в обмотках А та В;

$\lambda$  – крок зубців статора КД.

Рівняння для напруги в обмотках статора КД мають вигляд

$$V - ri_a - L \cdot \frac{di_a}{dt} - M \cdot \frac{di_b}{dt} + \frac{d}{dt}(n\Phi_m \cdot \cos(p\theta)) = 0, \quad (2.5)$$

$$V - ri_b - L \cdot \frac{di_b}{dt} - M \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt}(n\Phi_m \cdot \cos(p \cdot (\theta - \lambda))) = 0, \quad (2.6)$$

де  $V$  – напруга живлення КД;  
 $L$  – власна індуктивність кожної фази;  
 $M$  – взаємна індуктивність;  
 $r$  – опір кола обмотки статора.

Об'єднавши рівняння (2.4 – 2.6) в систему, отримаємо математичну модель крокового двигуна, яка являє собою нелінійну систему диференціальних рівнянь, яку практично не можливо розв'язати аналітично

$$\begin{cases} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d^2\theta}{dt^2} + pn\Phi_m i_a \sin(p\theta) + pn\Phi_m i_b \sin(p(\theta - \lambda)) = 0; \\ V - r \cdot i_a - L \cdot \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_b}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p\theta)] = 0; \\ V - r \cdot i_b - L \cdot \frac{di_b}{dt} - M \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p \cdot (\theta - \lambda))] = 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

Щоб визначити вихідний момент крокового двигуна  $M_{ем}(t)$ , який є головною характеристикою при моделюванні вимірювальних перетворювачів на базі КД, необхідно доповнити систему рівнянь (2.7) наступним виразом:

$$M_{ем}(t) = nN_r \Phi_m \cdot [i_a(t) \cdot \sin(N_r \cdot \theta(t)) + i_b(t) \cdot \cos(N_r \cdot \theta(t))], \quad (2.8)$$

де  $N_r$  – кількість зубців ротора.

Тоді остаточна модель КД матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d^2\theta}{dt^2} + pn\Phi_m i_a \sin(p\theta) + pn\Phi_m i_b \sin(p(\theta - \lambda)) = 0; \\ V - r \cdot i_a - L \cdot \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_b}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p\theta)] = 0; \\ V - r \cdot i_b - L \cdot \frac{di_b}{dt} - M \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p \cdot (\theta - \lambda))] = 0; \\ M_{ем}(t) = nN_r \Phi_m \cdot [i_a(t) \cdot \sin(N_r \cdot \theta(t)) + i_b(t) \cdot \cos(N_r \cdot \theta(t))]. \end{cases} \quad (2.9)$$

Крім звичайної моделі КД (2.9) існує і лінеаризована модель КД, яка широко використовується для аналізу та побудови вимірювальних перетворювачів [44, 45].

Лінеаризація системи (2.7) можлива при наступних припущеннях та перетвореннях. Якщо по обмотках обох фаз тече постійний струм  $I_0$ , то положення рівноваги досягається при  $\theta = \lambda/2$ . Відхилення ротора від положення рівноваги позначимо через  $\delta\theta$ . Воно є функцією часу  $t$  та в подальшому аналізі мале. Виконуючи деякі перетворення та спрощення [43], отримаємо замість (2.4) – першого рівняння системи (2.7), лінійне диференціальне рівняння вигляду

$$\begin{aligned} J \cdot \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \cdot \frac{d(\delta\theta)}{dt} + 2p^2 n\Phi_m I_0 \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right) \cdot (\delta\theta) + \\ + pn\Phi_m \sin\left(\frac{p\lambda}{2}\right) \cdot (\delta i_a - \delta i_b) = 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Розв'язок рівняння (2.10) у вигляді перетворення Лапласа для стійкого кутового положення  $\theta_i$  отримаємо в такому вигляді:

$$\Theta = \frac{\left\{ s^2 + \left( \frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) \cdot s + \left( \frac{r}{L_p} \cdot \frac{D}{J} + k_p \omega_{np}^2 \right) \right\} \cdot \theta_i}{s^3 + \left( \frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) \cdot s^2 + \left( \frac{r}{L_p} \cdot \frac{D}{J} + \omega_{np}^2 (1 + k_p) \right) \cdot s + \left( \frac{r}{L_p} \right) \cdot \omega_{np}^2}, \quad (2.11)$$

де  $L_p = L - M$  – коефіцієнт, який залежить від типу КД;

$$k_p = \frac{n\Phi_m \sin^2\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}{L_p I_0 \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right)} - \text{коефіцієнт, який залежить від типу КД;}$$

$$\omega_{np}^2 = \frac{2p^2 \Phi_m n I_0 \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}{J} - \text{коефіцієнт, який залежить від типу КД.}$$

Зворотне перетворення Лапласа рівняння (2.11) типу  $\theta(t) = L^{-1}[\Theta]$  описує зміну кута повороту ротора КД у часі, тобто дозволяє знайти час перехідного процесу, який виникає у КД під час позиціонування в наступне кутове положення. Якщо кроковий двигун обертається з постійною частотою  $\omega_{\text{пд}}$ , то, згідно з теорією моменту КД [43], отримаємо вираз для моменту, який створюється на роторі у вигляді

$$M_{\text{ем}} = \frac{N_r n \Phi_m}{\sqrt{r^2 + \omega_{\text{пд}}^2 L^2}} \cdot V \sin(\rho + \nu) - \frac{n^2 N_r \Phi_m^2 \omega_{\text{пд}} r}{r^2 + \omega_{\text{пд}}^2 L^2}, \quad (2.12)$$

де  $\rho$  – кут моменту;

$$\nu = \arctg\left(\frac{r}{\omega_{\text{пр}} \cdot L}\right) - \text{коректуючий коефіцієнт.}$$

Маючи (2.11) та (2.12), запишемо лінеаризовану модель КД у наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta(s) = \frac{\left\{ s^2 + \left( \frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) \cdot s + \left( \frac{r}{L_p} \frac{D}{J} + k_p \omega_{\text{пр}}^2 \right) \right\} \cdot \theta_i}{s^3 + \left( \frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) \cdot s^2 + \left( \frac{r}{L_p} \frac{D}{J} + \omega_{\text{пр}}^2 (1 + k_p) \right) \cdot s + \left( \frac{r}{L_p} \right) \omega_{\text{пр}}^2}; \\ M_{\text{ем}} = \frac{N_r n \Phi_m}{\sqrt{r^2 + \omega_{\text{пд}}^2 L^2}} \cdot V \sin\left\{ \rho + \arctg\left( \frac{r}{\omega_{\text{пд}} \cdot L} \right) \right\} - \frac{n^2 N_r \Phi_m^2 \omega_{\text{пд}} r}{r^2 + \omega_{\text{пд}}^2 L^2}. \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Для аналізу адекватності лінеаризованої моделі виконаємо моделювання обох моделей (2.9) та (2.13) в середовищі символічної математики Maple V5. Першу нелінійну систему (2.9) розв'яжемо чисельним багатокроковим методом Гіра з похибкою 0,001%, а другу, лінеаризовану систему (2.13), розв'яжемо аналітично. Моделювання виконаємо на прикладі крокового двигуна типу ШД88-1.6-0.18.

Напруга живлення крокового двигуна має вигляд прямокутного імпульсу, що відповідає умовам зміни положення ротора відносно стато-

ра КД на одне кутове положення. Тривалість імпульсу – 0,06 секунди, що забезпечує завершення коливань ротора КД під час позиціонування у нове кутове положення. Результати моделювання див. на рис. 2.4.

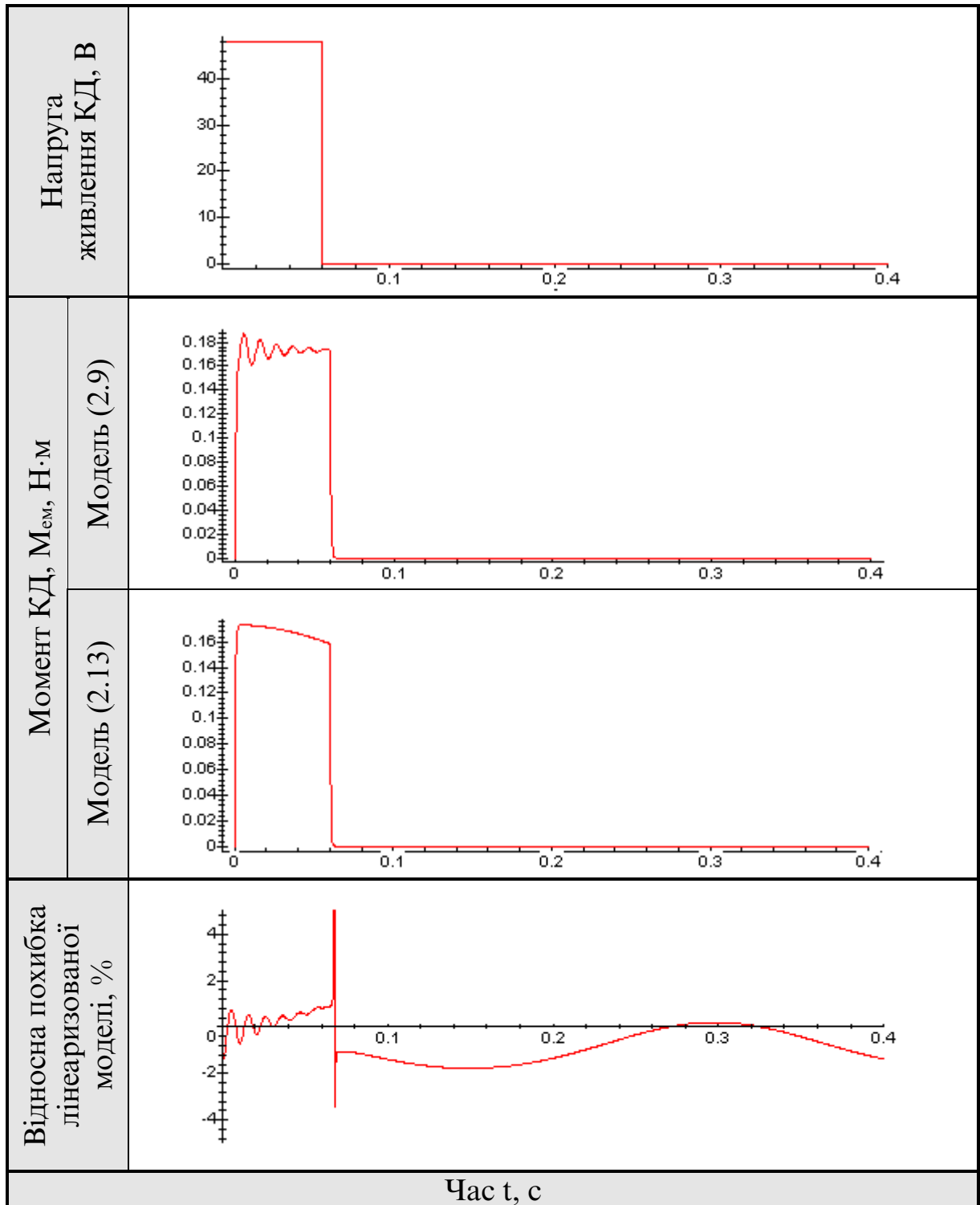


Рис. 2.4. Результати моделювання крокового двигуна

Для визначення відносної похибки лінеаризованої моделі КД відносно нелінійної використано наступну розрахункову формулу:

$$\delta_{\text{лін.моделі}}(t) = \frac{M_{\text{ем}}^{\text{нл}}(t) - M_{\text{ем}}^{\text{л}}(t)}{M_{\text{ем}}^{\text{нл}}(t)} \cdot 100\%, \quad (2.14)$$

де  $M_{\text{ем}}^{\text{нл}}(t)$  – момент нелінійної моделі КД;

$M_{\text{ем}}^{\text{л}}(t)$  – момент лінеаризованої моделі КД.

З аналізу результатів моделювання КД видно, що лінеаризована модель відтворює реальні процеси у КД з невеликою відносною похибкою  $\approx 2\%$  після закінчення перехідного процесу у двигуні, але самий перехідний процес відображається лінеаризованою моделлю досить наближено, зберігаючи лише рівень параметра, який моделюється.

### 2.2.3. Математична модель торсіонного сенсора

Звичайно, пружний елемент конструктивно присутній у будь-якому вимірювальному перетворювачі або засобі вимірювань механічного параметра. Вхідною величиною пружного елемента є сила або момент, а вихідною – лінійне або кутове переміщення. Пружний елемент, який виконує перетворення типу “момент – кут”, називається торсіонним сенсором (ТС), а засіб вимірювання на його основі – торсіонометром. Деформації, які виникають у торсіонах, за звичай, реєструються наступним вимірювальним перетворювачем, від типу та конструкції якого залежить безпосередньо вихідний сигнал торсіонометру [46].

Розглянемо деякі типи торсіонних перетворювачів, які найчастіше використовують для вимірювання обертальних та пускових моментів різних пристроїв. Такі торсіони являють собою суцільні, порожнисті та комбіновані вали різного профілю [47].

При розрахунках пружних елементів намагаються забезпечити їх максимальну чутливість. Однак, перешкодою для цього є поява в небезпечних місцях конструкції неприпустимо великих напруг. Тому початком для розрахунку пружних елементів є опис їх за допомогою рівнянь, які зв'язують значення моменту на торсіоні з механічними деформаціями.

Серед матеріалів, з яких зроблено торсіон, будемо розглядати лише ізотропні матеріали. Властивості ізотропних матеріалів описуються лише двома незалежними параметрами: модулем пружності –  $E_{\text{мат}}$  та коефіцієнтом Пуасона –  $\mu$ . Для розрахунків пружних елементів, які відчувають закручування, використовують модуль зсуву  $G$ , який визначають за формулою

$$G = \frac{E_{\text{мат}}}{2 \cdot (1 + \mu)}. \quad (2.15)$$

Якщо торсіон являє собою суцільний вал, то розрахункова формула для цього типу торсіону має вигляд

$$\varphi_1 = \frac{2 \cdot M_{\Sigma} \cdot l_T}{G \cdot \pi \cdot R_T^4}, \quad (2.16)$$

де  $\varphi_1$  – кут, на який скручується торсіон типу “суцільний вал”;

$M_{\Sigma}$  – сумарний момент, який прикладено до торсіону;

$l_T$  – довжина торсіону;

$R_T$  – зовнішній радіус торсіону.

Якщо торсіон являє собою порожнистий вал, то розрахункова формула для цього типу торсіону має вигляд

$$\varphi_2 = \frac{2 \cdot M_{\Sigma} \cdot l_T}{G \cdot \pi \cdot (R_T^4 - r_T^4)}, \quad (2.17)$$

де  $\varphi_2$  – кут, на який скручується торсіон типу “порожнистий вал”;



$r_T$  – внутрішній радіус торсіону.

Якщо торсіон являє собою вал прямокутного перетину, то розрахункова формула для цього типу торсіону має вигляд

$$\varphi_3 = \frac{M_\Sigma \cdot l_T \cdot k_n}{3 \cdot b \cdot h^3 \cdot G}, \text{ причому } h \ll b, \quad (2.18)$$

де  $\varphi_3$  – кут, на який скручується торсіон прямокутного перетину;

$k_n$  – коефіцієнт, який отримують з табл. 2.2;

$b$  – висота торсіону;

$h$  – ширина торсіону.

Таблиця 2.2

Коефіцієнти для прямокутного торсіону

<b>b / h</b>	0	0,1	0,3	1,0
<b><math>k_n</math></b>	1,000	1,067	1,233	1,370

Для значного зменшення габаритних розмірів торсіонного сенсора використовують торсіони складної конструкції. Одна з таких найбільш ефективних конструкцій – “телескопічний” вал. Конструктивно цей вал являє собою порожнистий вал, у середині якого знаходиться ще один порожнистий вал, але меншого діаметру і так далі. Розрахунок такого вала подібний до розрахунку звичайного порожнистого вала, але ведеться для кожного з валів системи окремо. З урахуванням (2.17) можна записати розрахункову формулу цього типу торсіонів у вигляді

$$\varphi_4 = \frac{2 \cdot M_\Sigma \cdot l_T}{G \cdot \pi} \cdot \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{(R_{iT}^4 - r_{iT}^4)}, \quad (2.19)$$

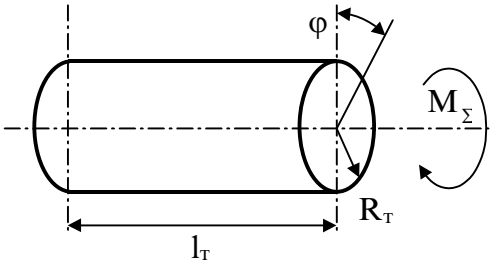
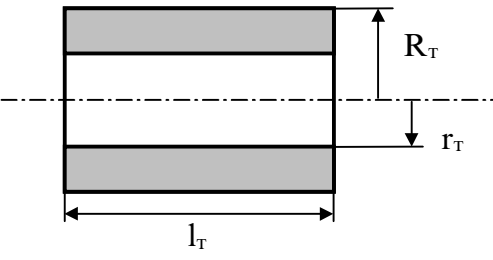
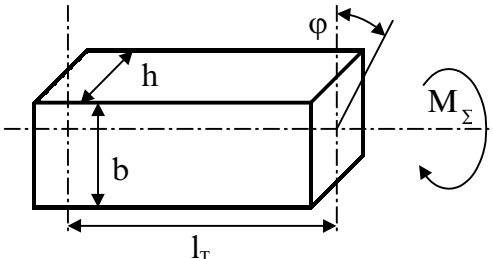
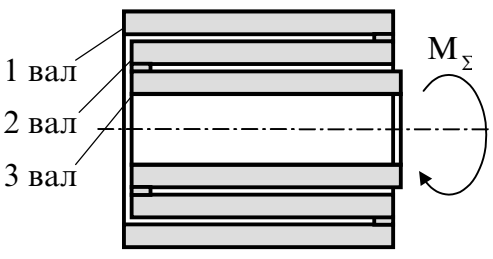
де  $N_B$  – кількість валів у системі “телескопічний” вал;

$R_{iT}$  – зовнішній радіус  $i$ -го вала;

$r_{iT}$  – внутрішній радіус  $i$ -го вала.

Загальний вигляд розглянутих торсіонів та їх математичні моделі наведені у табл. 2.3.

Типи торсіонних сенсорів для вимірювання  
обертальних та пускових моментів

Тип торсіону	Зовнішній вигляд	Математична модель
Суцільний вал		$\varphi_1 = \frac{2 \cdot M_{\Sigma} \cdot l_T}{G \cdot \pi \cdot R_T^4}$
Порожнистий вал		$\varphi_2 = \frac{2 \cdot M_{\Sigma} \cdot l_T}{G \cdot \pi \cdot (R_T^4 - r_T^4)}$
Прямокутний вал		$\varphi_3 = \frac{M_{\Sigma} \cdot l_T \cdot k_n}{3 \cdot b \cdot h^3 \cdot G},$ причому $h \ll b$
Телескопічний вал		$\varphi_4 = \frac{2 \cdot M_{\Sigma} \cdot l_T}{G \cdot \pi} \times$ $\times \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{(R_{iT}^4 - r_{iT}^4)}$

Щоб вибрати тип торсіону та розрахувати його, необхідно визначитися з вхідними даними. В нашому випадку вхідними даними будуть такі параметри: максимальний пусковий момент  $OB - M_{\max}$ , максимально допустимий при цьому кут закручення торсіону –  $\varphi_{\max}$  та тип матеріалу, з якого виготовлено торсіон.

Якщо розглядати як ОБ електричні двигуни малої та середньої потужності, можна обмежитись максимальним значенням пускового моменту на рівні  $M_{\max} = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Під час вимірювання залежності  $M_{\text{п}} = f(\alpha)$  ротор ОБ позиціонується у чіткі кутові положення приводним двигуном. За рахунок того, що торсіон деформується (закручується), виникає зсув ротора ОБ з встановленого кутового положення  $\alpha$  на кут закручування торсіону  $\varphi$ . Далі у роботі та в [39] доведено, що коли максимальний кут закручування торсіону не перевищує  $0,01^\circ$ , то відносна похибка не перевищує  $0,025\%$ . Тому для моделювання торсіону визначимо максимальний кут закручування торсіону на рівні  $\varphi_{\max} = 0,01^\circ$ .

Матеріалом, з якого виготовлено торсіон, виберемо спеціальну високоякісну метрологічну сталь типу 38ХГСА [48]. Метрологічна сталь такого типу практично вільна від явища гістерезису.

На рис. 2.5 наведено результати моделювання чотирьох згаданих типів торсіонів, а порівняльний аналіз торсіонів за габаритними розмірами у табл. 2.4.

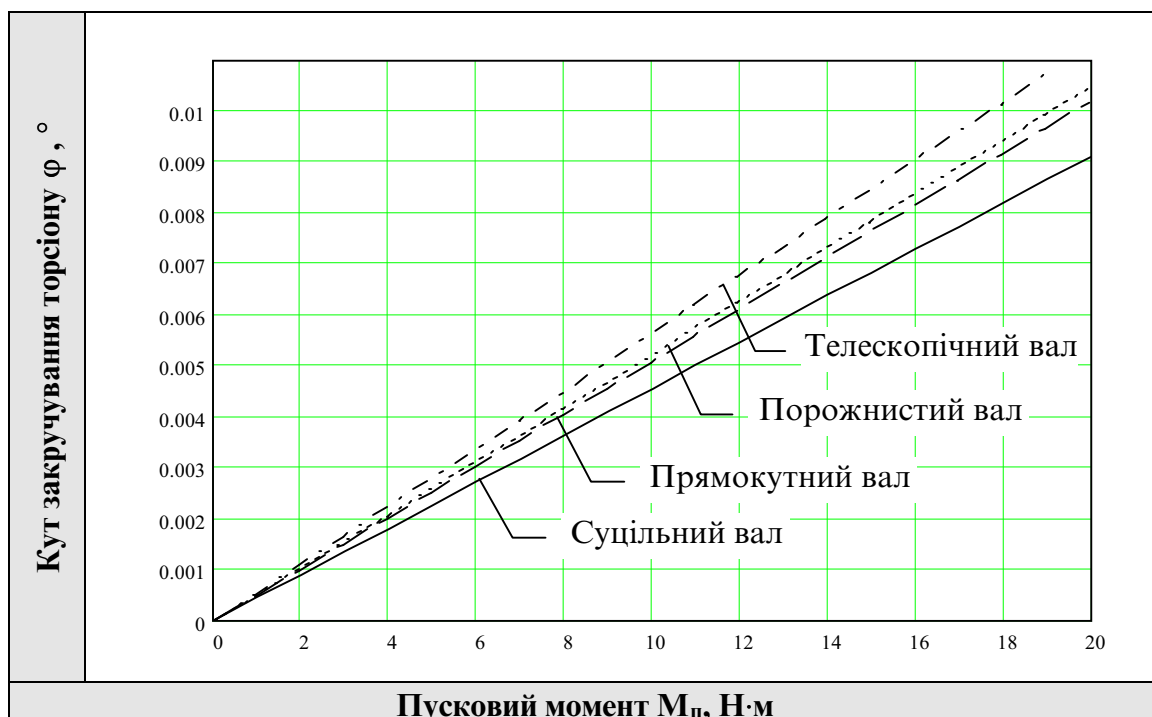


Рис. 2.5. Моделювання торсіонів

## Порівняльний аналіз торсіонів

Тип торсіону	Габаритні розміри, мм		
	Довжина	Висота	Ширина
Суцільний вал	150	Ø 40	Ø 40
Порожнистий вал	150	Ø 40	Ø 40
Прямокутний вал	150	42	13
Телескопічний вал	35	Ø 50	Ø 50

З аналізу рис. 2.5 та табл. 2.4 видно, що при майже однакових статичних характеристиках всіх типів торсіонів торсіон “телескопічний” вал значно менший за габаритними розмірами. А тому, торсіон “телескопічний” вал має і менший момент інерції, що дуже важливо при побудові ВКПМ, так як використання такого торсіону дозволяє зменшити тривалість перехідного процесу всього вимірювального каналу ІВС для визначення пускового моменту.

#### 2.2.4. Математична модель муфти спряження

У результаті зміщення осей обертання вала ротора ОВ та вихідного вала редуктора (див. рис. 2.1) виникає  $M_{mc}^n$ . Причиною цього моменту є ексцентриситет, тобто незбіжність осей спряжених елементів кінематичної пари. Момент ексцентриситету муфти спряження визначається за формулою [49]

$$M_{mc}^n = -e \cdot \cos(\alpha), \quad (2.20)$$

де  $e$  – коефіцієнт (амплітуда муфти спряження), який залежить від конструкції та типу муфти.

Вплив моменту ексцентриситету муфти на результат вимірювання пускового моменту залежить від типу ОВ і може бути оцінений за відомим співвідношенням  $\delta_{mc} = M_{mc}^n / M_{п ов} \cdot 100\%$ . Графічне представлення

моменту ексцентриситету муфти спряження та його вплив на різні типи двигунів наведено на рис. 2.6.

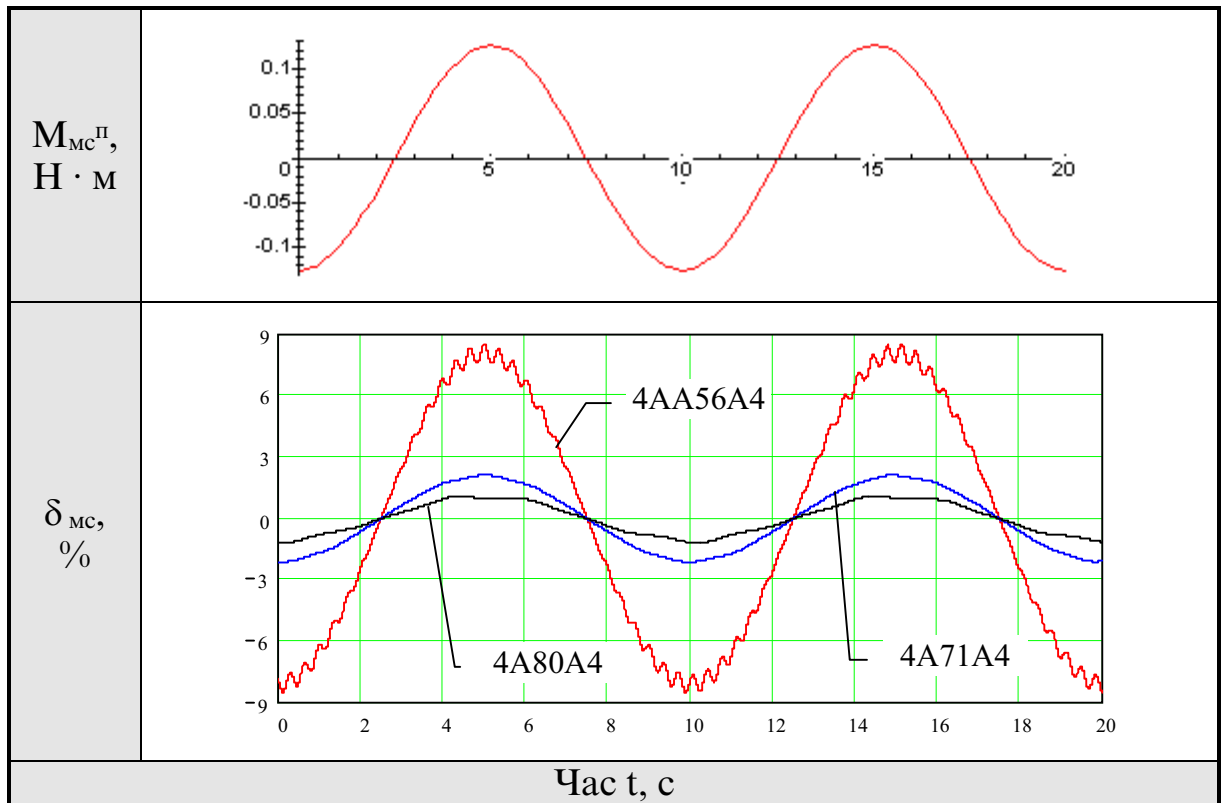


Рис. 2.6. Момент ексцентриситету муфти спряження та його вплив на результат вимірювання  $M_{II}$  для різних типів двигунів

Як видно з рис. 2.6, вплив муфти спряження на процес вимірювання пускового моменту не значний і зменшується з ростом пускового моменту ОВ.

### 2.3. Розробка математичної моделі вимірювального каналу пускового моменту

Загальний вигляд структурної схеми вимірювального каналу пускового моменту (ВКПМ з КД та ТС), який пропонується, наведено на рис. 2.1. Під час підключення ОВ та ПД до живлення у перетворювачі

виникають такі моменти: електромагнітний момент  $M_{ем}$  приводного (крокового) двигуна, що прикладено до вхідного вала хвильового редуктора; момент  $M_p$  на виході ХР, що діє на правий край ТС; пусковий момент  $M_{п ок}$ , що прикладено до лівого краю ТС.

Вхідною величиною, що діє на ВКПМ, є пусковий момент асинхронного двигуна – ОВ, що визначається за формулою (2.1).

Для того, щоб більш точно відтворити процеси, які виникають у вимірнювальному каналі, використаємо як модель ПД нелінійну модель КД, яка має вигляд (2.9).

Виходячи з попереднього, пропонується наступна електромеханічна модель, яка описує роботу ВКПМ під час підключення до електричної мережі [39]

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi_m i_a \sin(p\theta) + pn\Phi_m i_b \sin(p(\theta - \lambda)) = 0; \\ V - r \cdot i_a - L \cdot \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_b}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p\theta)] = 0; \\ V - r \cdot i_b - L \cdot \frac{di_b}{dt} - M \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p \cdot (\theta - \lambda))] = 0; \\ M_{ем}(t) = nN_r \Phi_m \cdot [i_a(t) \cdot \sin(N_r \cdot \theta(t)) + i_b(t) \cdot \cos(N_r \cdot \theta(t))]; \\ J^* \cdot \frac{d\omega_p(t)}{dt} = i^* \cdot [M_{ем}(t) - M_p^*(t)], \end{array} \right. \quad (2.21)$$

де  $J^*$  – зведений момент інерції рухомої частини ВКПМ;

$i^*$  – передаточне число хвильового редуктора.

Представимо ротор ОВ, муфту спряження, ротор КД, редуктор та ТС у вигляді матеріальних точок, що мають певні моменти інерції, а ідеалізовані безінерційні зв'язки між ними не мають маси і характеризуються пружністю та дисипативними властивостями. Тоді зведення моментів інерції мас, які зосереджені на валу, до торсіону виконуються через квадрат передаточного числа редуктора

$$J^* = J_{тс} + \frac{J_{пд}}{i^{*2}} + \frac{J_{мс}}{i^{*2}} + \frac{J_{ов}}{i^{*2}}, \quad (2.22)$$

де  $J_{TC}$  – момент інерції ТС;  
 $J_{ПД}$  – момент інерції ПД;  
 $J_{МС}$  – момент інерції МС;  
 $J_{ОВ}$  – момент інерції ОВ.

Методики, які дозволяли б враховувати особливості хвильової передачі редуктора, в теперішній час відсутні. Тому зробимо припущення, що жорсткість ХР постійна [50]. У зв'язку з цим, для визначення розподілу моментів у ХР складемо рівняння балансу моментів та потужностей у вигляді

$$\begin{cases} M_{\Pi} + M_{ем} + M_p = 0; \\ M_{\Pi} \cdot \omega_{кд} + M_{ем} \cdot \omega_{кд} + M_p \cdot \omega_p = 0, \end{cases} \quad (2.23)$$

де  $\omega_{кд}$  – частота обертання вхідного вала (ротор КД) редуктора;

$\omega_p = \frac{\omega_{кд}}{i^*}$  – частота обертання вихідного вала редуктора.

Тоді сумарний момент на торсіонному сенсори  $M_{\Pi}$ , з урахуванням раніше зроблених припущень, визначається так:

$$M_{\Pi}(t) = M_{ем}(t) \cdot i^* \cdot \eta + M_{\Pi ОВ}(t) + M_{МС}(t). \quad (2.24)$$

Сумарний момент  $M_{\Pi}$ , який виникає на торсіонному датчику, деформує його. В наслідок чого торсіон закручується, тобто один край торсіону зміщується відносно другого краю на фіксований кут  $\varphi$ . Динаміку руху торсіону описує диференціальне рівня наступного вигляду [51]:

$$J^* \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + P \cdot \frac{d\varphi}{dt} + C \cdot \varphi = M_{\Pi}, \quad (2.25)$$

де  $P$  – постійна демпфування;

$C$  – коефіцієнт жорсткості торсіонного сенсора.

Коефіцієнт жорсткості для торсіонного сенсора типу телескопічний вал розраховується за формулою

$$C = \frac{G \cdot \pi}{2 \cdot l_T \cdot \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{(R_{iT}^4 - r_{iT}^4)}}. \quad (2.26)$$

Надалі для зручності перетворимо (2.25) у загальноновживаний вигляд

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \frac{d\varphi}{dt} + \omega^2 \cdot \varphi = \frac{M_{\Pi}}{J^*}, \quad (2.27)$$

де  $\omega^2 = C/J^*$  – власна частота вільних коливань;

$\varepsilon = P/(2\sqrt{J^* \cdot C})$  – ступінь заспокоєння вільних коливань.

Перехід з динаміки у статику дозволяє отримати з (2.25) рівняння перетворення торсіону. Залежність кута  $\varphi$ , на який закручується торсіонний датчик, від прикладеного до торсіону моменту  $M_{\Pi}$  розраховується за формулою

$$C \cdot \varphi = M_{\Pi}. \quad (2.28)$$

Моделювання ВКПМ складається з двох окремих етапів (особливості досліді КЗ): моделювання вимірювального перетворення залежності пускового моменту від кута повороту ротора ОВ та моделювання вимірювального перетворення мінімального пускового моменту. Виконаємо моделювання ВКПМ, використовуючи такі типи складових елементів: ОВ – асинхронний двигун 4АА56А4; ПД – кроковий двигун ШД88-1.6-0.18; торсіонний датчик – телескопічний вал (3 рівні), виконаний з метрологічної сталі типу 38ХГСА.



### 2.3.1. Моделювання вимірювального перетворення залежності пускового моменту від кута повороту ротора

Оскільки математична модель ВКПМ (2.21) являє собою систему нелінійних диференціальних рівнянь, яку неможливо розв'язати аналітично, використаємо для моделювання середовище символічної математики Maple V5. Розв'язок системи (2.21) отримаємо чисельним багатокроковим методом Гіра з абсолютною похибкою ітерацій 0,001 (детальний розрахунок наведено у додатку А).

Тоді з урахуванням (2.22) та (2.24) маємо залежність сумарного моменту  $M_{\Sigma}(t)$ , який виникає на торсіонному сенсорі, від часу. Графічно цю залежність представлено на рис. 2.7.

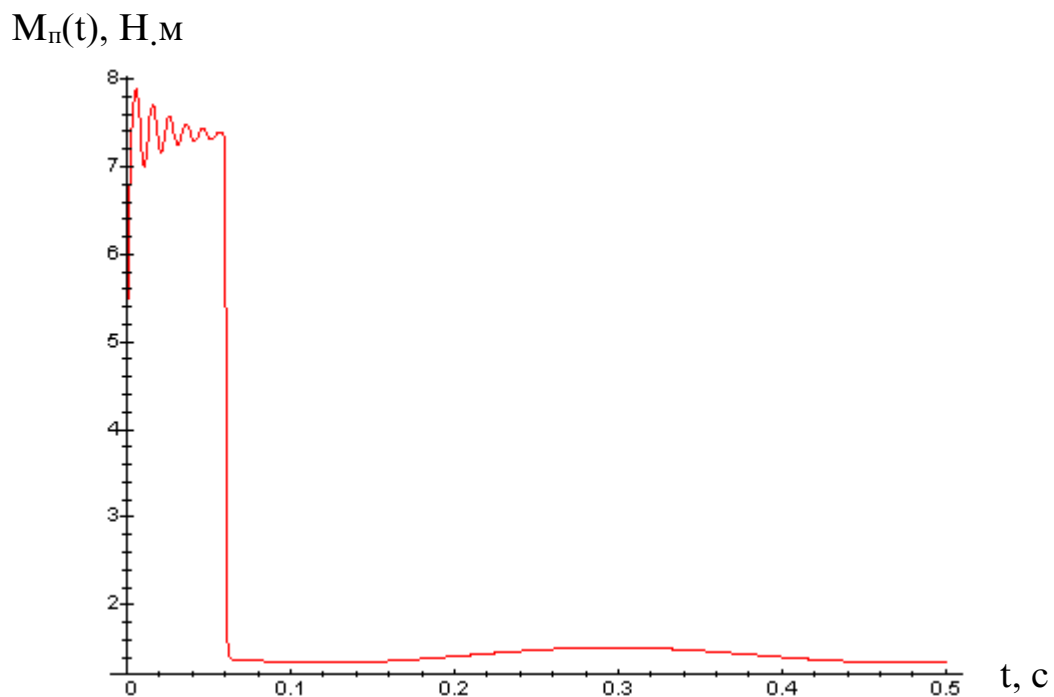


Рис. 2.7. Залежність сумарного моменту на торсіоні від часу

Аналізуючи залежність (див. рис. 2.7), бачимо, що у проміжок часу, коли виконується позиціонування КД у нове кутове положення ( $t_{\text{засп}}$  дорівнює 0,06 секунди), момент на торсіонному сенсорі досить значний. Необхідно зачекати, поки закінчиться перехідний процес у КД, а потім виконувати вимірювання пускового моменту  $M_{\Sigma}$ .

Для визначення відносної похибки моделі порівняємо результати моделювання ВКПМ з теоретичною залежністю пускового моменту ОВ. Для такого розрахунку скористаємося такою формулою:

$$\delta_{\text{ВКПМ}} = \left| \frac{M_{\text{п}}(t) - M_{\text{п ОВ}}(t)}{M_{\text{п ОВ}}(t)} \right| \cdot 100 \% . \quad (2.29)$$

Графічне представлення відносної похибки моделі ВКПМ наведено на рис. 2.8. З аналізу видно, що після завершення перехідного процесу у вимірювальному каналі відносна похибка моделі ВКПМ не перевищує 7...8%.

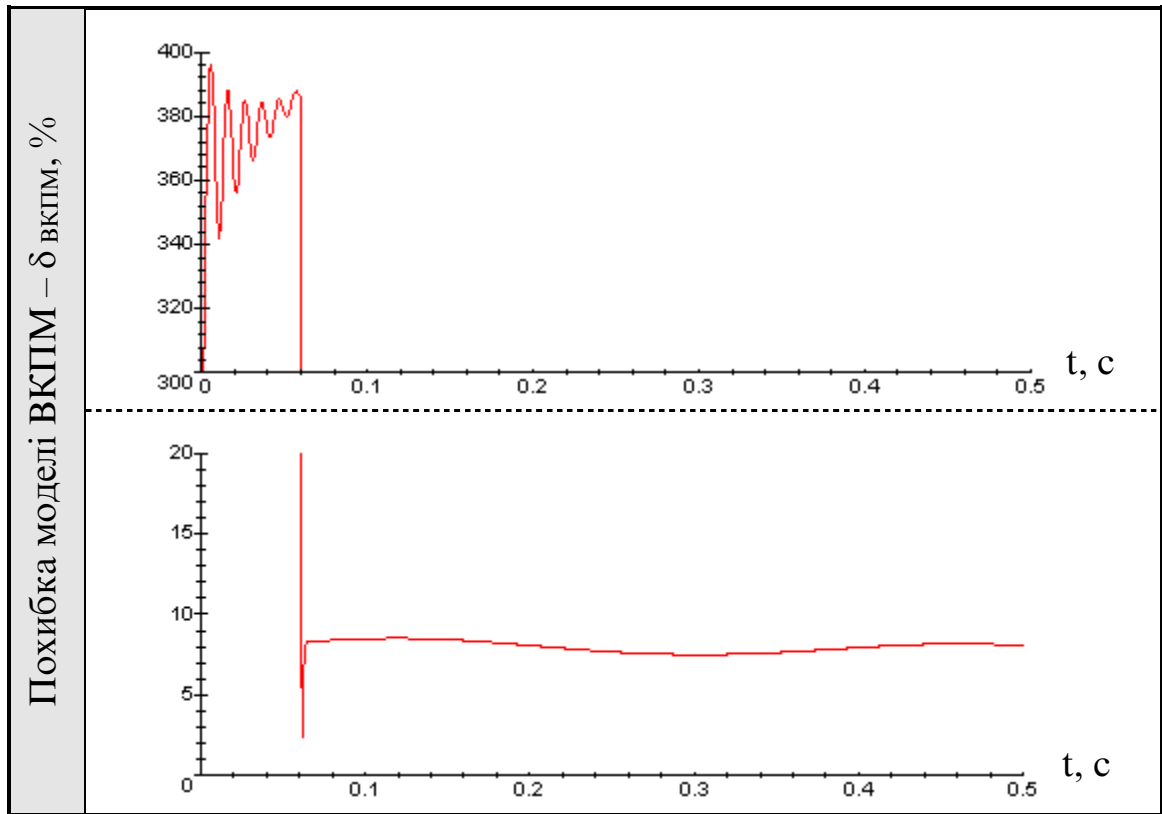


Рис. 2.8. Похибка моделі ВКПМ

### 2.3.2. Моделювання вимірювального перетворення мінімального пускового моменту

Після того, як визначено кутове положення з мінімальним пусковим моментом, ротор ОВ встановлюють в це кутове положення і загальмовують його. Тоді, змінюючи напругу живлення  $U_k$  ОВ за допомогою варіатора напруги, вимірюють такі залежності КЗ:  $M_k = f(U_k)$ ,  $I_k = f(U_k)$ ,  $P_k = f(U_k)$ .

Динаміку ВКПМ у цьому режимі описує рівняння (2.27). Для моделювання представимо його у вигляді

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\omega\varepsilon \frac{d\varphi}{dt} + \omega^2\varphi = \frac{k \cdot U_{кн}^2 + A}{J^*}, \quad (2.30)$$

де  $A = \sqrt{a^2 + b^2}$  – коефіцієнт, який залежить від параметрів ОВ.

Аналітичний розв'язок (2.30) представляє собою залежність кута закручування торсіону  $\varphi$  від часу. Отримаємо цей розв'язок у вигляді

$$\varphi(t) = \frac{k \cdot U_{кн}^2 + A}{C} \times \left\{ 1 - e^{-\varepsilon\omega t} \cdot \left[ \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) + \cos(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) \right] \right\}. \quad (2.31)$$

Рівняння (2.31) дає змогу побудувати та проаналізувати залежність кута закручування торсіону від часу та напруги живлення ОВ. Графічно ця залежність представлена на рис. 2.9.

З аналізу рис. 2.9 видно, що час заспокоєння торсіону не перевищує 0,006...0,007 сек. при живленні ОВ напругою від 50 до 220 В. У деяких випадках можливе випробовування ОВ на зниженій напрузі, що дає змогу суттєво зменшити час заспокоєння торсіону.

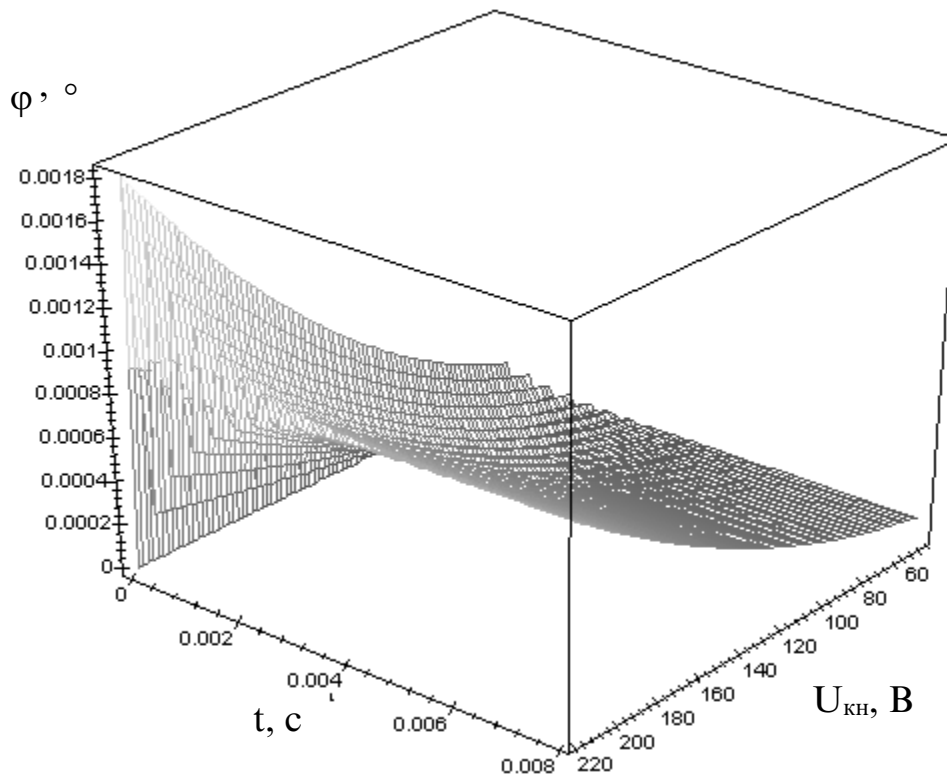


Рис. 2.9. Залежність кута закручування торсіону від  $t$  та  $U_{KH}$

Для того, щоб отримати перехідну характеристику, подамо на вхід вимірювального каналу одиничну функцію та розв'яжемо отримане диференціальне рівняння

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\omega\varepsilon \frac{d\varphi}{dt} + \omega^2\varphi = \frac{l(t)}{J^*}. \quad (2.32)$$

Розв'язок (2.32) подамо у наступному вигляді:

$$h(t) = \left\{ 1 - e^{-\varepsilon\omega t} \cdot \left[ \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) + \cos(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) \right] \right\}. \quad (2.33)$$

Щоб отримати імпульсну характеристику, подамо на вхід вимірювального каналу  $\delta$ -функцію та розв'яжемо диференційне рівняння

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\omega\varepsilon \frac{d\varphi}{dt} + \omega^2\varphi = \frac{\delta(t)}{J^*}. \quad (2.34)$$

Розв'язок (2.34) отримаємо у наступному вигляді:

$$d(t) = \frac{e^{-\varepsilon\omega t} \cdot \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2} \cdot \omega t)}{J^* \cdot \sqrt{1-\varepsilon^2} \cdot \omega}. \quad (2.35)$$

Графічне представлення перехідної та імпульсної характеристик вимірювального каналу наведено на рис. 2.10.

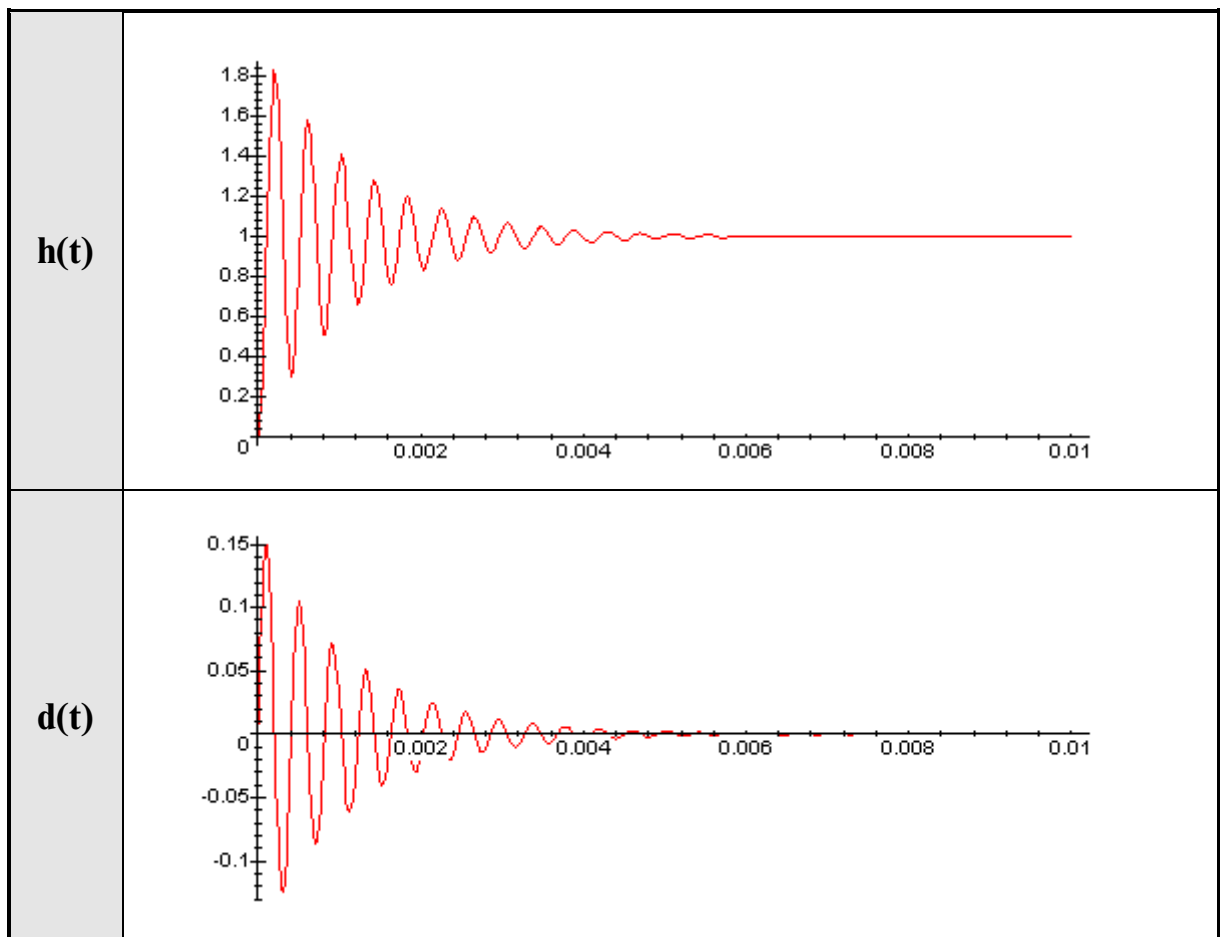


Рис. 2.10. Перехідна та імпульсна характеристики

Якщо порівняти імпульсну та перехідну характеристики вимірювального каналу за реакцією статора ПД [52] з отриманими для вимірю-

вального каналу за реакцією торсіону, то можна сказати, що вони за часом заспокоєння майже однакові.

#### 2.4. Методика розрахунку часу заспокоєння рухомої частини вимірювального каналу пускового моменту

Суттєвим параметром, що характеризує інерційні властивості запропонованого вимірювального каналу, є час перехідного процесу, який виникає у рухомій частині вимірювального перетворювача. Цей час заспокоєння  $t_{засп}$  буде впливати як на кількість кутових положень, де вимірюється пусковий момент, так і на результати вимірювань мінімального пускового моменту [36].

Запишемо рівняння (2.30), що описує процес руху рухомої частини перетворювача, у вигляді

$$\frac{d\varphi^2(t)}{dt^2} + 2\varepsilon\omega \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} + \omega^2 \cdot \varphi(t) = \frac{M_0 + a \cdot \sin(\omega_0 t) + b \cdot \cos(\omega_0 t)}{J^*}, \quad (2.36)$$

де  $M_0 = k \cdot U_{кн}^2$  – постійна складова моменту;

$\omega_0 = \omega_1 = \omega_2$  – коефіцієнти, що залежать від конструкції ОВ.

Розв'язок рівняння (2.36) подамо у вигляді [53]

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(t) = \left\{ \begin{array}{l} e^{-\varepsilon\omega t} \cdot [C_1 \cdot \cos(\omega\sqrt{1-\varepsilon^2} \cdot t) + C_2 \cdot \sin(\omega\sqrt{1-\varepsilon^2} \cdot t)] + \\ + \left\langle \frac{M}{J^* \cdot \omega^2} + A_1 \cdot \sin(\omega_0 t) + B_1 \cdot \cos(\omega_0 t) \right\rangle \end{array} \right\}; \\ A_1 = \frac{b}{J^*} \cdot 2\varepsilon\omega\omega_0 - \frac{a}{J^*} \cdot (\omega^2 - \omega_0^2); \quad B_1 = \frac{b}{J^*} \cdot (\omega^2 - \omega_0^2) - \frac{a}{J^*} \cdot 2\varepsilon\omega\omega_0; \\ C_1 = -\frac{M}{J^* \cdot \omega^2} - B_1; \quad C_2 = \left( -\frac{M}{J^* \cdot \omega^2} - B_1 \right) \cdot \varepsilon\omega - A_1\omega_0. \end{array} \right. \quad (2.37)$$

Користуючись зовнішнім виглядом (2.36) та (2.37), згідно з методикою [54] отримаємо необхідні формули для розрахунку часу перехідного процесу (часу заспокоєння рухомої частини ВП).

Величина першого (найдовшого) періоду згасаючих коливань складає

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega} \cdot (1 - \varepsilon^2)^{-\frac{1}{2}}. \quad (2.38)$$

Для розрахунку найбільших (амплітудних) значень перехідного процесу необхідно виконати наступну розрахункову послідовність, яка дозволить знайти кількість періодів коливального процесу, амплітуда яких перевищує нормоване значення. Розрахункова послідовність має такий вигляд [40]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \arctg \left( \frac{\omega \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}}{1 + \varepsilon \cdot \omega} \right); \\ \Downarrow t_0 = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}} \cdot \left( \arctg \frac{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}{\varepsilon} - \gamma \right); \\ a_0 = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \cdot e^{-\varepsilon \omega t_0}; \\ X_i = a_0 \cdot e^{-\frac{\varepsilon \pi}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \cdot i} \cdot (-1)^i \cdot \sin(\omega \sqrt{1 - \varepsilon^2} \cdot t_0 + \gamma), i = 0 \dots \infty, \end{array} \right. \quad (2.39)$$

де  $\gamma$ ,  $t_0$ ,  $a_0$  – проміжні змінні, які не мають самостійного змісту;

$X_i$  – найбільші (амплітудні) значення перехідного процесу.

Якщо  $\delta_{\text{засп}}$  – це нормоване значення відносної похибки, то час заспокоєння рухомої частини можна отримати за такою формулою [40]:

$$t_{\text{засп}} = T_1 \cdot i \left[ |X_i| \leq M \cdot \frac{\delta_{\text{засп}}}{100\%}, i = 0 \dots \infty \right], \quad (2.40)$$

де  $i$  – номер періоду згасаючих коливань, коли крива перехідного процесу не перевищує межі нормованої похибки.

Розглянемо процес визначення часу заспокоєння ротора у ВП, якщо в ролі ОВ використано АД типу 4АА56А4. На рис. 2.11 представлено графічну залежність амплітудних значень перехідного процесу  $X_i$  від номера періоду.

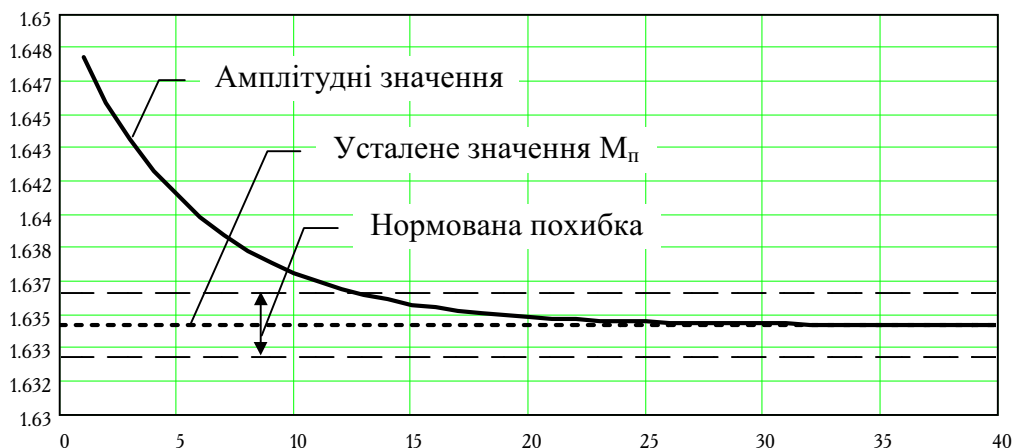


Рис. 2.11. Залежність  $X_i$  від номера періоду

Якщо нормована відносна похибка  $\delta_{засп}$  дорівнює 0,2%, то номер періоду, з якого амплітудне значення перехідного процесу не перевищує встановленої похибки, дорівнює 15 (див. рис. 2.11). Тоді, використавши формули (2.38) та (2.40), отримаємо значення часу заспокоєння рухомої частини ВП –  $t_{засп} = 0,006077$  секунди. Порівнявши знайдене значення часу заспокоєння з перехідною характеристикою (див. рис. 2.10), бачимо досить добру збіжність визначеного параметру з реальним процесом у перетворювачі.

## Висновки

У другому розділі дисертації отримано такі результати:

1. Розроблено нову структурну схему вимірювального каналу пусково-го моменту з кроковим приводним двигуном та торсіонним первинним перетворювачем, яка дозволить покращити точність вимірю-



вання пускового моменту у порівнянні з відомими ВКПМ. Сформований принцип перетворення пускового моменту електродвигуна в інформативний параметр (напругу), який можна вимірювати.

2. Проаналізована відома математична модель об'єкта вимірювання (асинхронного двигуна малої та середньої потужності); виконане моделювання ОВ.
3. Розроблені та проаналізовані математичні моделі конструктивних елементів вимірювального каналу:
  - приводного двигуна (крокового двигуна) – розроблено нелінійну та лінеаризовану моделі: з аналізу результатів моделювання КД видно, що лінеаризована модель відтворює реальні процеси у КД з невеликою відносною похибкою  $\approx 2\%$  після закінчення перехідного процесу у двигуні, але самий перехідний процес відображається лінеаризованою моделлю досить наближено, зберігаючи лише рівень параметра, який моделюється;
  - торсіонного перетворювача – розглянуті різні типи торсіонів, придатні для вимірювання пускового моменту та їх математичні моделі; обґрунтовано вибір торсіону типу “телескопічний” вал;
  - муфти спряження – визначено вплив ексцентриситету муфти спряження на вимірювання пускового моменту;
4. Розроблено та промодельовано математичну модель ВКПМ. Моделювання виконано для двох режимів:
  - моделювання вимірювального перетворення залежності пускового моменту від кута повороту ротора ОВ відносно статора, похибка моделі не перевищує 7...8% після закінчення перехідного процесу;
  - моделювання вимірювального перетворення мінімального пускового моменту.
5. Розроблено методику розрахунку часу заспокоєння рухомої частини вимірювального перетворювача, яка має добру збіжність з реальним процесом у перетворювачі.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА ІВС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПУСКОВОГО МОМЕНТУ ТА ЇЇ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Позитивний результат моделювання вимірювального каналу пускового моменту, який отримано у попередньому розділі, дозволяє перейти до побудови інформаційно-вимірювальної системи для визначення пускового моменту. Необхідно особливу увагу приділити етапам перетворення інформативного параметра (пускового моменту) та алгоритму, який для цього використовується.

#### **3.1. Розробка структурної схеми ІВС для визначення пускового моменту**

З урахуванням конструктивної схеми вимірювального каналу пускового моменту (див. рис. 2.1), розроблено структурну схему засобу вимірювання пускового моменту, яка представлена на рис. 3.1.

Структурна схема засобу вимірювання пускового моменту складається з ВКПМ та мікропроцесорного контролера, який взаємодіє з ПЕОМ типу ІВМ РС.

Розглянемо послідовність вимірювального перетворення для запропонованого засобу. По команді з ПЕОМ через інтерфейс RS-232 мікропроцесорний контролер (МПК) формує 8-ми бітовий двійковий код  $N_{[8]}$ , який діє на вхід електронного варіатора напруги (ЕВН). Згідно з кодом, ЕВН формує задану високо стабільну напругу живлення на ОВ. Після того, як ОВ заживлено, МПК формує 4-х бітовий двійковий код  $N_{[4]}$ , який діє на вхід блока керування кроковим двигуном (БККД), який у свою чергу формує імпульсну послідовність для керування ПД. ПД робить перехід на один крок, а МПК вимірює початкове кутове положення ротора ОВ  $\alpha$ .

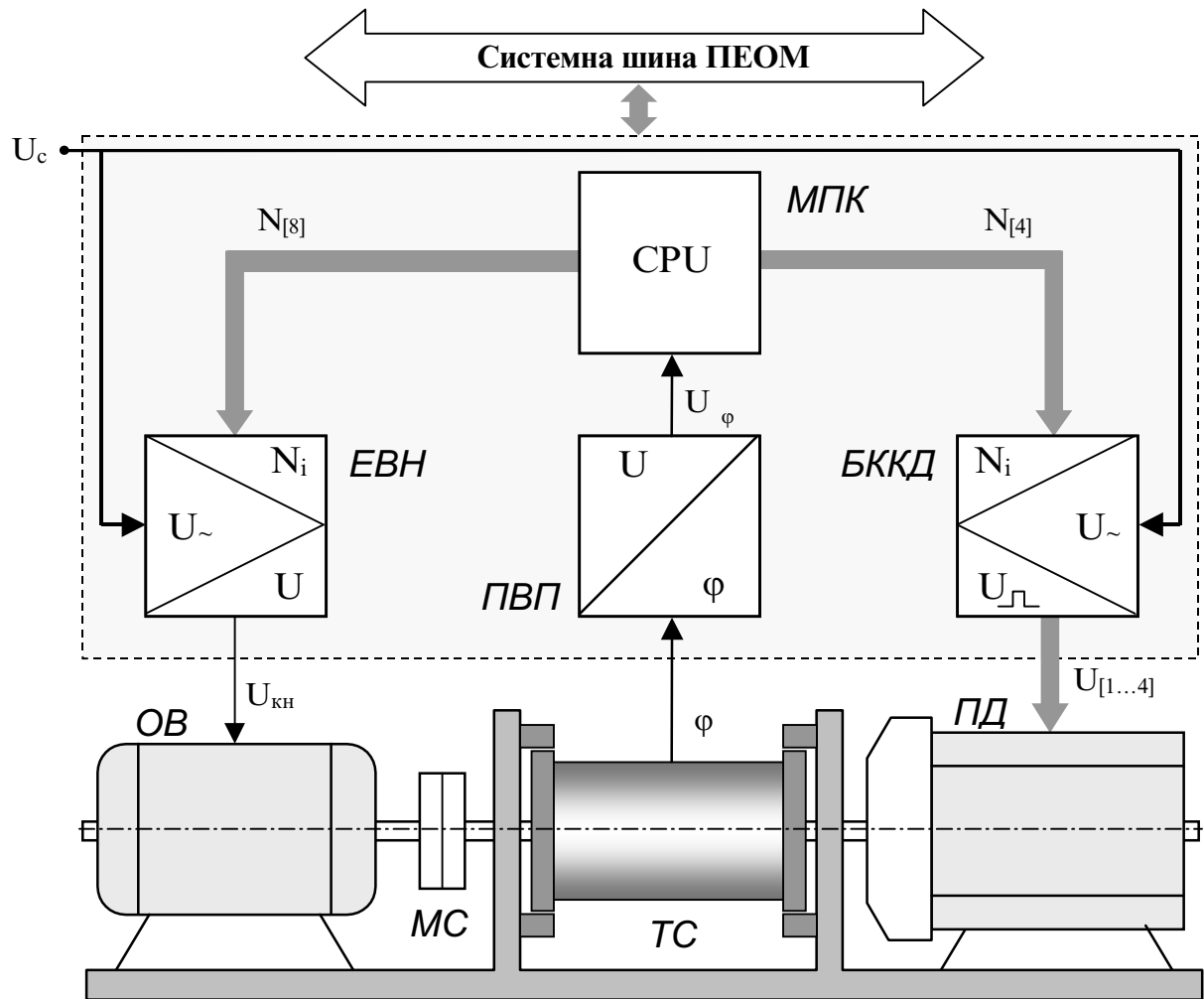


Рис. 3.1. Структурна схема ІВС для визначення пускового моменту

Під впливом пускового моменту  $OB$ , ротор якого жорстко загальмовано через  $MC$  та  $TC$ , починає закручувати  $TC$  на кут  $\phi$ , який пропорційний сумарному моменту, який прикладений до торсіону. МПК очікує завершення перехідного процесу у ВКПМ та, за допомогою первинного вимірювального перетворювача (ПВП), який перетворює кут закручування  $\phi$  у напругу, вимірює величину пускового моменту  $OB$  у кутовому положенні  $\alpha$ .

Потім все повторюється: БККД переводить ротор  $OB$  у наступне кутове положення, і знов вимірюється величина пускового моменту. Цей процес повторюється, поки ротор  $OB$  не зробить повний оберт, що дозволяє виконати перший етап досліду КЗ – отримати залежність пускового моменту  $OB$  від кутового положення ротора  $M_{II} = f(\alpha)$ . Слід зауважи-

ти, що кількість кутових положень, де вимірюється величина пускового моменту, тобто крок, залежить від тривалості перехідного процесу (часу заспокоєння) у ВКПМ та від допустимого значення часу знаходження ОВ у загальмованому стані.

Коли отримано залежність  $M_{\text{п}} = f(\alpha)$ , МПК визначає мінімальне значення пускового моменту та кутове положення ротора ОВ, яке йому відповідає, та переводить ротор ОВ у кутове положення з мінімальним пусковим моментом.

Далі МПК починає виконувати другу частину досліду КЗ: визначення залежності пускового моменту ОВ від напруги живлення. МПК формує на вході ЕВН двійковий код  $N_{[8]}$ , який змінює напругу живлення ОВ від 0 В до номінальної та вимірює значення пускового моменту при кожній зміні напруги живлення. Рівень зміни напруги живлення на кожному кроці також залежить від часу заспокоєння ВКПМ та від допустимого значення часу знаходження ОВ у загальмованому стані.

Усі результати, отримані при виконанні досліду КЗ, передаються через інтерфейс RS-232 у ПЕОМ, де виконується процес обробки та аналізу результатів вимірювання.

### **3.2. Розробка рівняння перетворення первинного вимірювального перетворювача пускового моменту**

Складовою частиною будь-якого вимірювального перетворювача пускового моменту є перетворювач пускового моменту  $M_{\text{п}}$  в електричний сигнал, пропорційний  $M_{\text{п}}$ . Для випадку, коли в ролі реєструючого елемента використано пружний елемент (торсіон), ми маємо первинний перетворювач кута закручування торсіону в напругу. Слід мати на увазі, що діапазон кута закручування торсіону від 0 до  $0,01^\circ$ , що потребує високої чутливості первинного перетворювача.

Для вимірювання кутових зміщень використовують різноманітні типи перетворювачів (сенсорів) [51, 55–66]: електроконтактні, ємнісні, трансформаторні, фотоелектричні, індукційні та магнітопружні.

Перші з двох перерахованих сенсорів не знайшли широкого застосування: електроконтактні із-за нестабільності спрацювань та наявності механічного контакту, а ємнісні із-за низької захищеності від перешкод, складності узгодження з вимірювальним пристроєм, внаслідок високого вихідного опору.

Фотоелектричні, індукційні та магнітопружні сенсори також не зовсім підходять для вимірювання пускового моменту, тому що вищезгадані сенсори для своєї роботи потребують рівномірного обертання навколо своєї вісі. А кутове зміщення реєструється фазовим методом по периферійній неоднорідності.

Найдоцільнішим у даному випадку є використання в ролі первинного перетворювача трансформаторного сенсора, який відрізняється високою стабільністю амплітуди сигналів, має низький вихідний опір та високу чутливість.

### **3.2.1. Характеристика трансформаторних вимірювальних перетворювачів**

Трансформаторний вимірювальний перетворювач представляє собою трансформатор, в якому під впливом вхідного сигналу змінюється взаємна індуктивність, що призводить до зміни вторинної вихідної напруги.

Розрізняють два типи трансформаторних перетворювачів: зі змінним магнітним опором та з постійним магнітним опором і рухомою обмоткою. До перетворювачів з постійним магнітним опором і рухомою обмоткою відносять феродинамічні трансформаторні перетворювачі та обертові трансформатори. Схема феродинамічного перетворювача кута повороту наведена на рис. 3.2.

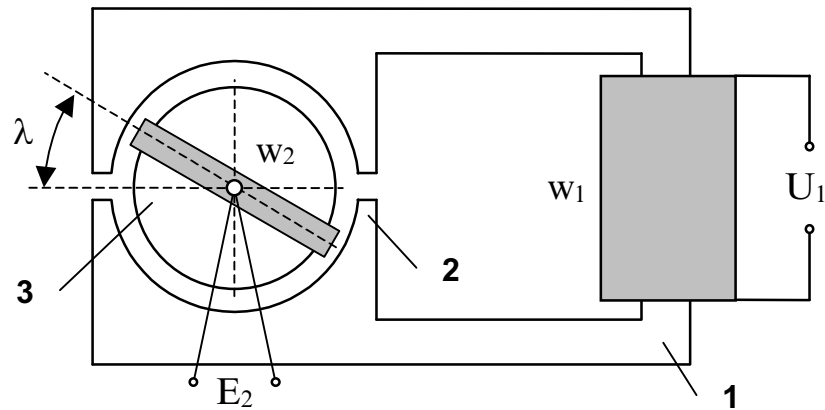


Рис. 3.2. Феродинамічний перетворювач кута повороту

Перетворювач складається з П-подібного магнітопроводу 1 з полюсними кінцівками 2. На магнітопроводі розміщена обмотка збудження  $w_1$ . Вторинна рухома обмотка  $w_2$  розміщена між полюсними кінцівками. Всередині обмотки  $w_2$  для зменшення магнітного опору вставляється циліндричне феромагнітне осердя 3. Повітряний зазор між осердям та полюсними кінцівками однаковий, також однакова у повітряному зазорі і магнітна індукція.

Обмотка  $w_1$  вмикається в коло змінної напруги  $U_1$ , яке має частоту  $\omega$ , та створює магнітний потік. Частина цього потоку проходить через обмотку  $w_2$  та наводить у ній ЕРС  $U_2$ . Коли повертається обмотка, наведена ЕРС змінюється.

Згідно з законом Кірхгофа, напруга, яка прикладена до первинної обмотки, визначається за формулою

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{R}_1 = j \cdot \omega \cdot w_1 \cdot \underline{\Phi}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{R}_1, \quad (3.1)$$

де  $\underline{E}_1$  – ЕРС самоіндукції;

$\underline{\Phi}_1$  – магнітний потік, створений обмоткою  $w_1$ ;

$\underline{R}_1$  – активний опір обмотки.

Якщо активний опір обмотки не значний, то ним можна знехтувати, і напруга врівноважується ЕРС  $\underline{E}_1$ . Тоді можна записати

$$\underline{\Phi}_1 = \underline{U}_1 / j \cdot \omega \cdot w_1 . \quad (3.2)$$

Частина цього потоку проходить через вторинну обмотку  $w_2$  та наводить у ній ЕРС. Цей потік знаходять за формулою

$$\underline{\Phi}_2 = 2 \cdot \lambda \cdot \underline{\Phi}_1 / \pi , \quad (3.3)$$

де  $\lambda$  – кут повороту рамки (див. рис. 3.2).

ЕРС, яка виникає у вторинній обмотці, визначається за формулою

$$\underline{E}_2 = j \cdot \omega \cdot w_2 \underline{\Phi}_2 = \left( \frac{2 \cdot \lambda}{\pi} \right) \cdot \left( \frac{w_2}{w_1} \right) \cdot \underline{U}_1, \quad \lambda \in \left[ 0; \frac{\pi}{2} \right]. \quad (3.4)$$

З (3.4) видно, що ЕРС вторинної обмотки пропорційна куту повороту рамки  $\lambda$ . Залежність (3.4) є рівнянням перетворення феродинамічного перетворювача кута повороту.

Похибки подібних перетворювачів пов'язані зі зміною у часі температури, частоти та амплітуди напруги живлення. Зміна будь-якого з перерахованих параметрів викликає зміну опору обмоток, що зумовлює протікання струму у вторинній обмотці. Ці мультиплікативні похибки зменшуються разом зі зменшенням струму, який споживається у вторинній обмотці. Похибка відсутня, коли вимірюється ЕРС компенсаційним шляхом.

### **3.2.2. Розробка вимірювального перетворювача пускового моменту у напругу на базі трансформаторного перетворювача**

Для побудови первинного вимірювального перетворювача пускового моменту у вихідну напругу, для подальшої обробки в МПК пропо-

нується використати разом з торсіонним сенсором два трансформаторні феродинамічні перетворювачі кута повороту. Принцип побудови запропонованого перетворювача наведено на рис. 3.3.

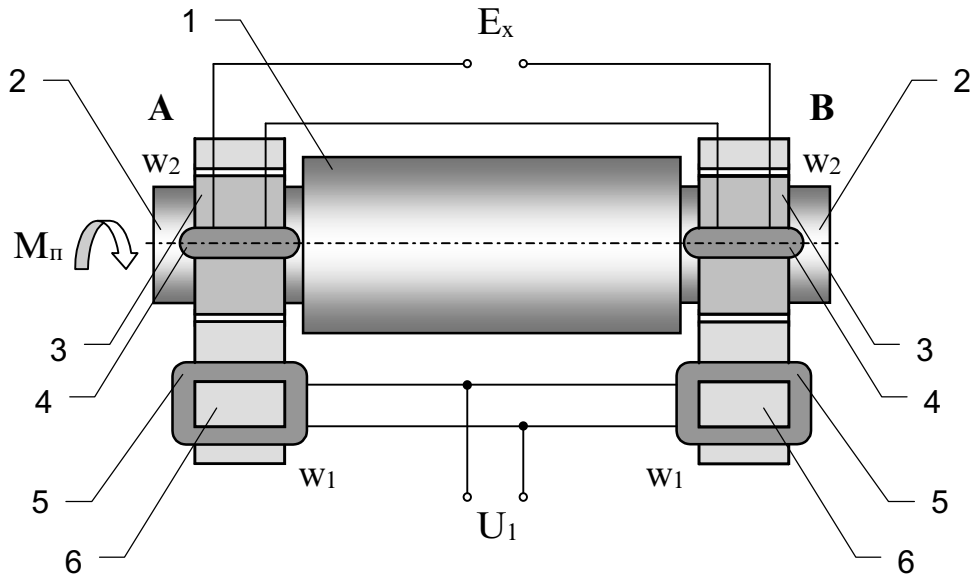


Рис. 3.3. Первинний перетворювач пускового моменту в напругу

Перетворювач містить у собі такі складові елементи: торсіонний сенсор типу “телескопічний вал” – 1, до якого з двох боків жорстко закріплено вали – 2, пружні властивості яких набагато перевищують пружні властивості матеріалу, з якого виготовлено торсіон; на валах 2 жорстко закріплені циліндричні феромагнітні осердя – 3, а на них, крізь монтажні отвори у валах змонтовані вторинні обмотки – 4 з кількістю витків  $w_2$ ; вторинні обмотки 4 знаходяться в середині магнітопроводів – 6, у нижніх частинах яких змонтовані первинні обмотки збудження – 5 з кількістю витків  $w_1$ .

Тобто в конструкції використано два абсолютно однакові трансформаторні перетворювачі кута повороту (на рис. 3.3 позначені – А та В), де вторинні обмотки розміщені в одній площині. Напруга живлення  $U_1$  підводиться до обох первинних обмоток збудження. Під впливом пускового моменту  $OB$  деформується (закручується) торсіон, і виникає кутова різниця між площинами вторинних обмоток на кут  $\varphi$ .



Згідно з рівнянням перетворення трансформаторного перетворювача (3.4) можна записати залежність для знаходження кутових положень обох вторинних обмоток

$$\lambda_1 = \underline{E}_{2A} \cdot \left( \frac{\pi \cdot w_1}{2 \cdot w_2 \cdot U_1} \right), \quad (3.5)$$

$$\lambda_2 = \underline{E}_{2B} \cdot \left( \frac{\pi \cdot w_1}{2 \cdot w_2 \cdot U_1} \right). \quad (3.6)$$

де  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  – кути повороту обмоток А та В;

$\underline{E}_{2A}$  – ЕРС, яка виникає у вторинній обмотці трансформатора А;

$\underline{E}_{2B}$  – ЕРС, яка виникає у вторинній обмотці трансформатора В.

Кут закручування торсіону, який пропорційний пусковому моменту електродвигуна, можна визначити за такою формулою:

$$\varphi = |\lambda_1 - \lambda_2| = |\underline{E}_{2A} - \underline{E}_{2B}| \cdot \left( \frac{\pi \cdot w_1}{2 \cdot w_2 \cdot U_1} \right). \quad (3.7)$$

Якщо вторинні обмотки трансформаторів А та В увімкнуті послідовно (див. рис. 3.3), тобто за диференціальною схемою [39], то отримуємо на виході перетворювача напругу  $E_x$ , яка пропорційна куту  $\varphi$  між площинами вторинних обмоток. З урахуванням того, що  $E_x = |\underline{E}_{2A} - \underline{E}_{2B}|$ , можна записати рівняння перетворення розробленого перетворювача у наступному вигляді:

$$E_x(\varphi) = \varphi \cdot \left( \frac{2 \cdot w_2 \cdot U_1}{\pi \cdot w_1} \right). \quad (3.8)$$

З аналізу отриманої статичної характеристики (3.8) видно, що залежність амплітуди вихідної змінної напруги  $E_x$  прямопропорційна куту

$\varphi$ , на який закручується торсіон під час дії на нього пускового моменту  $M_{\Pi}$  електродвигуна.

Використання диференціальної схеми підключення двох трансформаторних перетворювачів дає змогу значно підвищити точність вимірювального перетворення, зменшує складові похибки та дає змогу в подальшому алгоритмічно корегувати результати вимірювання пускового моменту.

Промодельємо розроблений вимірювальний перетворювач, використавши торсіон типу “телескопічний вал”, параметри якого були наведені (див. табл. 2.4), а рівняння перетворення має вигляд (2.19).

Як трансформаторні феродинамічні перетворювачі кута повороту використаємо два абсолютно однакові перетворювачі, параметри яких наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

## Параметри трансформаторних перетворювачів

Параметр	Позначення	Значення
Напруга живлення первинної обмотки трансформаторів А та В	$U_1, \text{В}$	$\sim 220$
Кількість витків первинної обмотки трансформаторів А та В	$w_{1A} = w_{1B} = w_1$	40
Кількість витків вторинної обмотки трансформаторів А та В	$w_{2A} = w_{2B} = w_2$	400

Маючи рівняння перетворення ТС (2.19) та рівняння перетворення трансформаторного перетворювача (3.8), отримаємо рівняння перетворення первинного вимірювального перетворювача пускового моменту електродвигуна у вихідну напругу у вигляді

$$E_x = M_{\Sigma} \cdot \left( \frac{4 \cdot I_T \cdot w_2 \cdot U_1}{G \cdot \pi^2 \cdot w_1} \right) \cdot \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{(R_{iT}^4 - r_{iT}^4)}. \quad (3.9)$$

Якщо вважати, що перехідний процес у вимірювальному каналі пускового моменту вже закінчився, то можна записати  $M_{\Sigma} = M_{\Pi}$ . Стати-

чну характеристику первинного вимірювального перетворювача пускового моменту наведено на рис. 3.4.

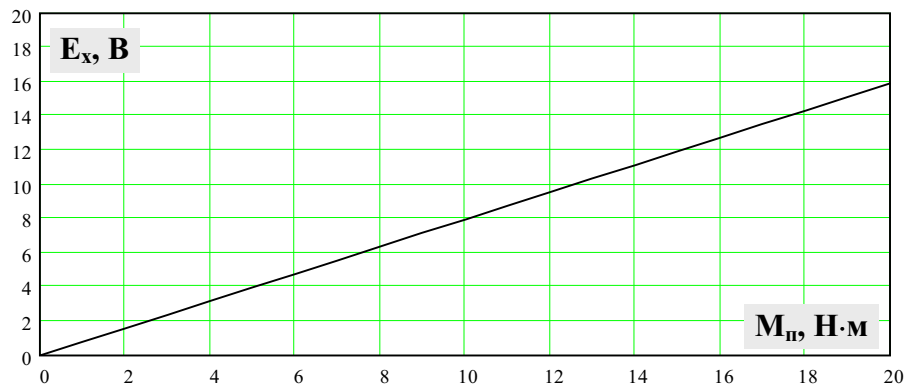


Рис. 3.4. Статична характеристика ПВП пускового моменту у напругу

З аналізу рис. 3.4 та формули (3.9) встановлено, що залежність вихідної напруги первинного вимірювального перетворювача лінійна та прямопропорційна пусковому моменту, який діє на вхід перетворювача.

Перевагами розробленого вимірювального перетворювача, який далі будемо називати “момент – напруга”, порівняно з відомими є:

- технологічність виготовлення перетворювача;
- висока точність та швидкість вимірювального перетворення;
- лінійність статичної характеристики;
- можливість алгоритмічної корекції похибки, яка може виникнути із-за механічного зсуву площин вторинних обмоток трансформаторів;
- висока стабільність амплітуди вихідного сигналу;
- низький вихідний опір.

### 3.3. Швидкодіючий перетворювач змінної напруги у постійну напругу за середньовипрямленими значеннями амплітуди

У попередньому розділі розроблено первинний вимірювальний перетворювач пускового моменту у напругу. Електричний сигнал на ви-

ході цього перетворювача має змінний характер, тому для подальшої обробки цього сигналу в МПК необхідно його перетворити у постійну напругу. Слід звернути увагу і на те, що час перетворення перетворювача змінної напруги у постійну повинен бути якомога менший, тому що час проведення усього досліду КЗ обмежений.

Більшість високоточних перетворювачів змінної напруги у постійну за середньовипрямленими значеннями (ПСВЗ) містять послідовно з'єднані одно- або двонапівперіодний операційний детектор та фільтр нижніх частот (ФНЧ) [67]. При цьому випрямлення відбувається внаслідок зміни з частотою вхідного сигналу коефіцієнта передачі операційного детектора (наприклад, за допомогою діодних ключів в колі від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ) операційного підсилювача (ОП)), який визначається співвідношенням опорів масштабних резисторів. Основний недолік таких ПСВЗ – пряма залежність коефіцієнта передачі пристрою від співвідношення опорів резисторів, що обмежує точність перетворення. Крім того, такі ПСВЗ достатньо складні, так як в доповнення до операційного детектора вони містять ще ФНЧ і схему вилучення напруги зміщення ОП операційного детектора.

Для випрямлення змінного сигналу можна використовувати і принцип комутації конденсатора (конденсаторів) у колі ВЗЗ ОП. В таких ПСВЗ із-за асиметрії глибини ВЗЗ для позитивних та негативних напівхвиль на конденсаторі (конденсаторах) виділяється постійна складова, яка пропорційна напрузі, що перетворюється [67]. Принцип комутації конденсатора дозволяє конструювати ПСВЗ, в яких перетворення змінної напруги в змінний струм та перетворення випрямленого струму у вихідну постійну напругу відбувається на одних і тих самих резисторах, і коефіцієнт передачі мало залежить від співвідношення резисторів.

Ця ідея реалізована в структурних схемах ПСВЗ, в яких на вхід пристрою при однонапівперіодному випрямленні увімкнено один резистор [68] (див. рис. 3.5, схема А), та при двонапівперіодному випрямленні – два резистори [69, 70], на які одночасно діють вхідна змінна та вихідна постійна напруга, причому випрямлення сигналу відбувається у резуль-

таті комутації конденсатора (конденсаторів) у колі ВЗЗ ОП (див. рис. 3.5, схеми А, Б, В, Г).

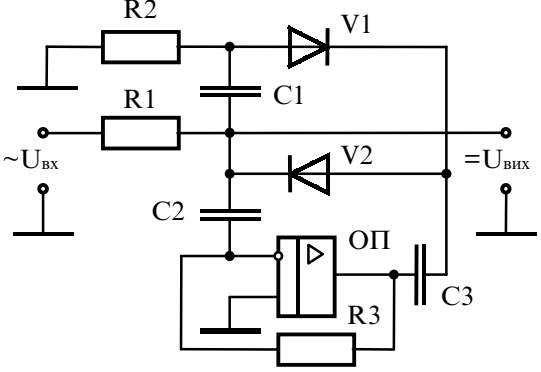
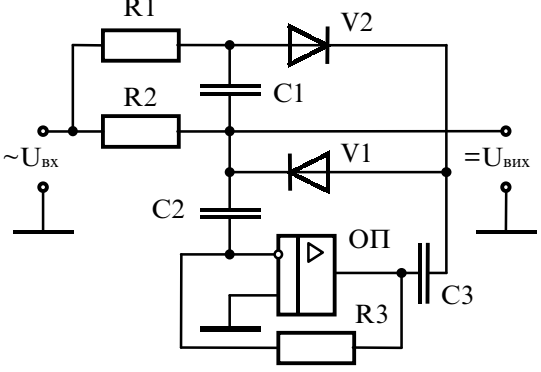
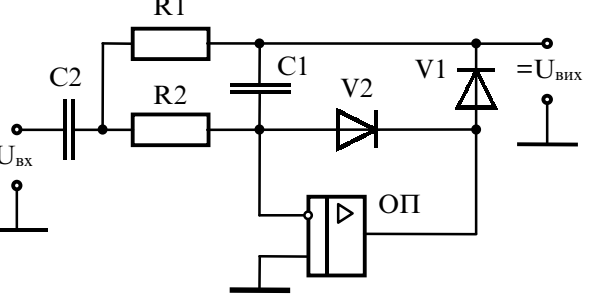
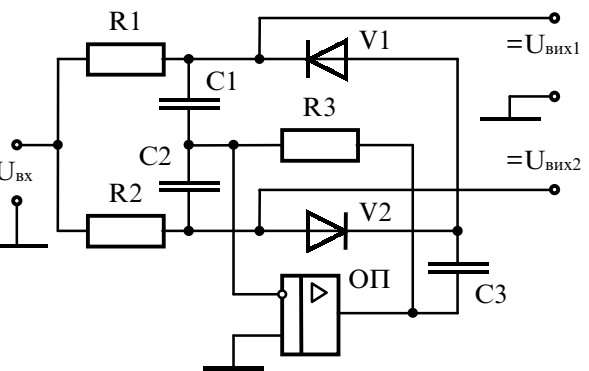
Тип	Схема	Особливості
А		<p><u>Переваги:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• висока точність</li> <li>• стабільність коефіцієнта перетворення</li> </ul> <p><u>Недоліки:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• дуже низька швидкість перетворення (до 10 секунд)</li> </ul>
Б		<p><u>Переваги:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• широкий діапазон частот</li> <li>• похибка не перевищує 0,1%</li> </ul> <p><u>Недоліки:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• низька швидкість перетворення (не перевищує 3 секунд)</li> </ul>
В		<p><u>Переваги:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• похибка не перевищує 0,03%</li> </ul> <p><u>Недоліки:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• відносно велика низькочастотна похибка</li> </ul>
Г		<p><u>Переваги:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• похибка не перевищує 0,03%</li> <li>• відсутність низькочастотної похибки</li> <li>• універсальність</li> </ul> <p><u>Недоліки:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• недостатня швидкість перетворення</li> </ul>

Рис. 3.5. Структурні схеми ПСВЗ та їх аналіз

Однонапівперіодний ПСВЗ (див. рис. 3.5, схема А) працює таким чином. На вхідному резисторі R1 діє змінна напруга, так як другий вивід цього резистора через конденсатор C2 з'єднаний з інвертуючим входом ОП і ОП сам охоплений через C3 колом ВЗЗ. У зв'язку з тим, що вхідний струм ОП можна вважати рівним нулю, то змінний струм, який виникає у резисторі R1 від вхідної напруги, тече до виходу ОП, випрямляючись у напівперіодах діодами V1 та V2. Постійна складова струму через діод V2 може замикатися по загальній шині тільки через вхідний резистор R1, так як інша схема відокремлена конденсаторами C1 та C2. Таким чином на вхідному резисторі виникає постійна напруга, пропорційна СВЗ вхідного сигналу.

Висока точність та стабільність коефіцієнта передачі цього ПСВЗ пояснюється перетворенням вхідної змінної напруги в постійний струм та перетворенням випрямленого струму у вихідну постійну напругу на опорі одного і того ж резистора R1. Переваги цього перетворювача полягають у вилученні пульсацій самим детектором, так як за змінним струмом інвертуючий вхід ОП зв'язаний з виходом перетворювача, і відсутності похибки від напруги зміщення ОП, так як ОП служить тільки як підсилювач змінної напруги і відокремлений від випрямляючої частини схеми роздільними конденсаторами.

Двонапівперіодні ПСВЗ (див. рис. 3.5, схеми Б, В, Г) працюють аналогічно. Тільки коефіцієнт передачі цих перетворювачів вищий, так як випрямлений постійний струм визначається провідністю не одного, а двох резисторів R1 та R2, паралельно з'єднаних по змінному струму.

В ПСВЗ (рис. 3.5, схема Б) вихідна постійна напруга виділяється на конденсаторі C2 та залежить від співвідношення резистора R1 до опору паралельно з'єднаних по змінному струму резисторів R1 та R2, на яких діє вхідна змінна напруга. Коефіцієнт передачі цього ПСВЗ

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{R1}{R2} \right), \quad (3.10)$$

де  $U_{\text{вих}}$  – вихідна постійна напруга;

$U_{\text{вх}}$  – СВЗ вхідної змінної напруги.

Якщо резистори  $R_1$  та  $R_2$  мають однакові номінальні значення, то співвідношення опорів резисторів дорівнює

$$R_1/R_2 = 1 + \delta_R, \quad (3.11)$$

де  $\delta_R$  – відносна похибка неузгодженості резисторів  $R_1$  та  $R_2$ .

Таким чином, коефіцієнт передачі цього ПСВЗ, з урахуванням (3.10), матиме вигляд

$$K = 1 + \delta_R/2. \quad (3.12)$$

ПСВЗ цього типу ефективно вилучає пульсацію та на його виході відсутня напруга зміщення. Діапазон робочих частот від 20 Гц до 100 кГц, в якому похибка не перевищує 0,1%. Час встановлення перетворювача не перевищує 3 секунд.

Більш високу точність коефіцієнта передачі забезпечує ПСВЗ (рис. 3.5, схема В), в якому вихідна постійна напруга являє собою суму постійних складових напруг на резисторах  $R_1$  та  $R_2$ . Коефіцієнт передачі цього ПСВЗ дорівнює

$$K = \frac{(1 + R_1/R_2)^2}{2 \cdot R_1/R_2}, \quad (3.13)$$

який, з урахуванням (3.11), можна представити у вигляді

$$K = 2 \cdot \left[ 1 + \frac{\delta_R^2}{2 \cdot (1 + \delta_R)} \right]. \quad (3.14)$$

Розклавши  $(1 + \delta_R)^{-1}$  в ряд Тейлора, отримаємо остаточну формулу для коефіцієнта передачі:

$$K = 2 \cdot \left[ 1 + \frac{\delta_R^2}{2} - \frac{\delta_R^3}{2} + \frac{\delta_R^4}{2} - \dots \right]. \quad (3.15)$$

Отже, похибка перетворення, яка зумовлена похибкою співвідношення  $R1/R2$ , значно зменшується і матиме наступний вигляд:

$$\delta = \frac{\delta_R^2}{2} - \frac{\delta_R^3}{2} + \frac{\delta_R^4}{2} - \dots \approx \frac{\delta_R^2}{2}. \quad (3.16)$$

Таким чином, можна створити високоточний ПСВЗ, точність коефіцієнта передачі якого не обмежена точністю масштабних резисторів. Недолік описаного ПСВЗ – відносно велика низькочастотна похибка, яка зумовлена несиметричним включенням конденсатора  $C1$  в коло ВЗЗ ОП для різних напівперіодів вхідного сигналу. Відносна похибка цього ПСВЗ – 0,03%.

Значно меншою низькочастотною похибкою характеризується ПСВЗ (рис. 3.5, схема Г) [70], що пояснюється симетричністю структурної схеми для позитивного та негативного напівперіодів сигналу. Необхідно тільки виконати умову  $R1 = R2$ ,  $C1 = C2$ . Ця схема має два виходи з різнополярними вихідними напругами. Коефіцієнт передачі по першому виходу такий, як у ПСВЗ (рис. 3.5, схема Б), вираз (3.10). Якщо вихідну напругу знімати диференціально між вихідними клемми перетворювача, то коефіцієнт передачі співпадає з коефіцієнтом передачі ПСВЗ (рис. 3.5, схема В), вираз (3.13), тобто при  $R1 \approx R2$  коефіцієнт передачі має номінальне значення 2 і не залежить від опорів цих резисторів.

На основі схем ПСВЗ (рис. 3.5) був побудований високоточний швидкодіючий вимірювальний ПСВЗ (див. рис. 3.6) [71].

В його склад також увійшла схема компенсації змінного струму, який протікає через резистор  $R3$ , для зменшення низькочастотної складової похибки та вихідний підсилювач постійної напруги з диференціальним входом. Коло компенсації низькочастотної похибки містить ОП2, резистори  $R4$ ,  $R5$  та  $R6$ , конденсатор  $C7$  та діоди  $V3$  і  $V4$ . На виході



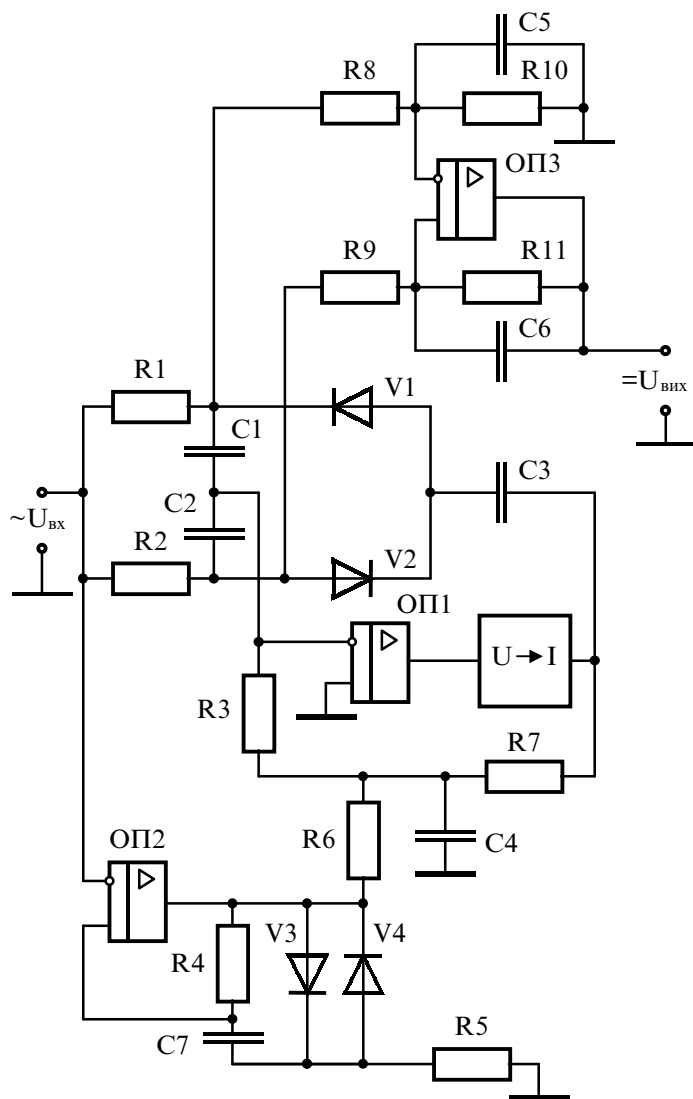


Рис. 3.6. Високоточний швидкодіючий вимірювальний ПСВЗ

рокополосний ОП К544УД2 з додатковим струмовим виходом на біполярних транзисторах. Запропонований ПСВЗ має такі характеристики: номінальний коефіцієнт передачі дорівнює одиниці (аналогічний схемі на рис. 3.5, схема Г); середнє квадратичне відхилення похибки перетворення – 0,01%; діапазон робочих частот – від 10 Гц до 1 МГц; час перетворення не перевищує 0,07...0,1 секунди.

Показники вищезгаданого ПСВЗ задовольняють умови побудови ВКПМ, який розробляється у цій дисертаційній роботі.

ОП2 створюється змінна напруга, яка знаходиться в протифазі з напругою на виході ОП1, але має таку ж амплітуду. Кращому придушенню змінного струму в резисторі R3 сприяє конденсатор C4. Важливо відмітити, що зняття вихідної напруги через диференціальний підсилювач ОП3 типу К140УД17 дозволяє не тільки збільшити коефіцієнт передачі та його точність, але й значно покращити швидкодію перетворювача, так як різниця вихідних напруг на конденсаторах C1 та C2 встановлюється в десятки разів швидше, ніж напруга окремо на кожному конденсаторі. В ролі ОП1 в детекторі застосовано ши-

### 3.4. Часові характеристики вимірювального перетворення пускового моменту

Для подальшої розробки ВКПМ та його алгоритму роботи розглянемо більш детально етапи перетворення інформативного параметра (пускового моменту електродвигуна  $M_{\text{п}}$ ) у вихідний електричний сигнал, а саме – часові характеристики цього перетворення, тому що вони суттєво впливають на сумарний час проведення вимірювального експерименту.

Після того, як сформована напруга живлення електронним варіатором напруги на ОВ, МПК формує імпульсну послідовність, яка переводить ротор приводного КД у наступне кутове положення. Процес позиціонування КД у стійке кутове положення займає деякий час, який залежить від навантаження на роторі ПД, інерційних властивостей цього навантаження, типу приводного КД та часових характеристик імпульсів керування цим двигуном. Крім того, процес закручування торсіону займає деякий час, який впливає на загальний час заспокоєння рухомої частини ВКПМ.

Час заспокоєння приводного КД  $t_{\text{пд}}$  отримують з результатів моделювання ВКПМ. Згідно з рекомендаціями [43] тривалість імпульсної послідовності для керування КД задають такою, щоб вона була не меншою за розраховану при розв'язанні моделі ВКПМ. У нашому випадку (див. рис. 2.7) цей час  $t_{\text{пд}}$  становить 0,06 секунди.

Час заспокоєння торсіонного сенсора  $t_{\text{засп}}$  також залежить від багатьох чинників, його розраховують за формулою (2.40) та методикою, яка розроблена у розділі 2.4.

Процес вимірювання пускового моменту по куту, на який закрутився торсіон, можна починати через проміжок часу  $t_1$ , який взагалі є функцією виду  $t_1 = f(t_{\text{пд}}, t_{\text{засп}}, t_{\text{ов}})$ . Але максимально можливий проміжок часу  $t_1$  визначають за формулою

$$t_1 = t_{\text{пд}} + t_{\text{засп}}. \quad (3.17)$$

Процес вимірювання пускового моменту у встановленому кутовому положенні також займає певний проміжок часу. Кут закручування торсіону  $\varphi$  перетворюється за допомогою розробленого ПВП типу “момент – напруга” у змінну напругу  $E_x$  на його виході (див. рис. 3.3). Далі змінна напруга перетворюється у постійну. Цей процес перетворення можна виконати двома шляхами. Перший шлях – це використати високоточний швидкодіючий вимірювальний ПСВЗ (див. рис. 3.6), час вимірювального перетворення  $t_{вп}$  якого не перевищує 0,07...0,1 секунди. Другий шлях – це завести вихід ПВП типу “момент – напруга” безпосередньо на вхід швидкодіючого АЦП, який за один період гармонічних коливань інформативної напруги дозволяє оцифрувати таку кількість точок кривої, що можна буде програмно у МПК розрахувати СВЗ інформативної напруги. В такому випадку час перетворення буде залежати від кількості цих точок та швидкодії АЦП. Підсумками вищенаведеному буде час вимірювання пускового моменту  $t_2$  для першого випадку:

$$t_2 = t_{вп} + t_{ацп} + t_{др}, \quad (3.18)$$

а для другого випадку:

$$t_2 = t_{ацп} \cdot N_x + t_{др}, \quad (3.19)$$

де  $t_{ацп}$  – час перетворення в АЦП;

$N_x$  – кількість точок, в яких відбувається процес оцифровки;

$t_{др}$  – час виконання програмного драйверу, але цей час можна не враховувати, якщо буде використано сучасний мікропроцесор чи мікроЕОМ.

Знаючи проміжки часу  $t_1$  та  $t_2$ , можна розрахувати кількість кутових положень ротора ОВ та крок зміни цих кутових положень за формулою

$$n_{\varphi} = \frac{t_{кз}}{t_1 + t_2}, \quad (3.20)$$

$$\varphi_n = \frac{2 \cdot \pi}{n_\varphi}, \quad (3.21)$$

де  $t_{кз}$  – максимальний проміжок часу, на який ОВ може бути загальмований (час проведення дослідів КЗ);

$n_\varphi$  – максимальна кількість кутових положень, в яких можна виміряти значення пускового моменту;

$\varphi_n$  – крок зміни кутових положень ротора ОВ.

Розрахунок вищенаведених параметрів для двох варіантів реалізації перетворення змінної напруги у постійну наведений у табл. 3.2. За максимальний час проведення дослідів КЗ прийняте типові значення для багатьох типів електродвигунів малої та середньої потужності – 10 сек. З аналізу результатів, наведених у табл. 3.2, видно, що обидва варіанти різняться не дуже. Кількість кутових положень, в яких вимірюється значення пускового моменту від 60 до 120 для отримання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$  [24, 25].

Таблиця 3.2

## Кількісні (часові) характеристики дослідів КЗ

Параметр	Варіант з ПСВЗ	Варіант без ПСВЗ
$t_{пд}$ , сек	0,06	0,06
$t_{засп}$ , сек	0,006077	0,006077
$t_{вп}$ , сек	0,07	–
$t_{щп}$ , сек	0,001 (1 кГц)	0,001 (1 кГц)
$N_x$	–	20
$n_\varphi$	73	116
$\varphi_n$ , рад	0,086 ( $\approx 4,9^\circ$ )	0,054 ( $\approx 3,1^\circ$ )

У випадках, коли кількість кутових положень ротора ОВ, в яких вимірюється пусковий момент, недостатня або час вимірювання занадто великий, необхідно використати алгоритм вимірювання пускового моменту за два етапи – швидкодіючий алгоритм.

Пропонується максимально допустимий час проведення досліду КЗ  $t_{кз}$  поділити навпіл. Першу частину цього часу  $0,5 \cdot t_{кз}$  використовують для вимірювання пускового моменту за один повний оберт ротора ОВ з великим кутовим кроком. Тобто виконують “грубе” вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$ , яке дозволяє знайти кутове положення ротора, де імовірніше знаходиться мінімальний пусковий момент ОВ. Другу частину часу  $0,5 \cdot t_{кз}$  використовують для “точного” вимірювання пускового моменту на ділянці біля кутового положення з мінімальним пусковим моментом.

Вимірювання за два етапи дозволяє підвищити точність вимірювання при достатній швидкодії. Запропонований алгоритм вимірювання зовсім не торкається апаратної частини ІВС, а лише впливає на програмне забезпечення. Можливість реалізації такого алгоритму вимірювання є ще однією перевагою використання в ролі ПД крокового двигуна.

### **3.5. Розробка алгоритмів функціонування ІВС для визначення пускового моменту електродвигуна**

Розробка узагальненого алгоритму функціонування ІВС для визначення пускового моменту (див. рис. 3.7) базується на загальних засадах досліду КЗ [22], структурній схемі засобу вимірювання пускового моменту (див. рис. 3.1) та наведених часових характеристиках цього вимірювання (див. розділ 3.4.).

В узагальненому алгоритмі функціонування ІВС для визначення пускового моменту можна виділити три основних етапи:

- Етап 1 – Вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$ ;
- Етап 2 – Визначення мінімального пускового моменту і встановлення ротора ОВ в кутове положення, що йому відповідає;
- Етап 3 – Вимірювання залежності  $M_{п} = f(U_{к})$ .

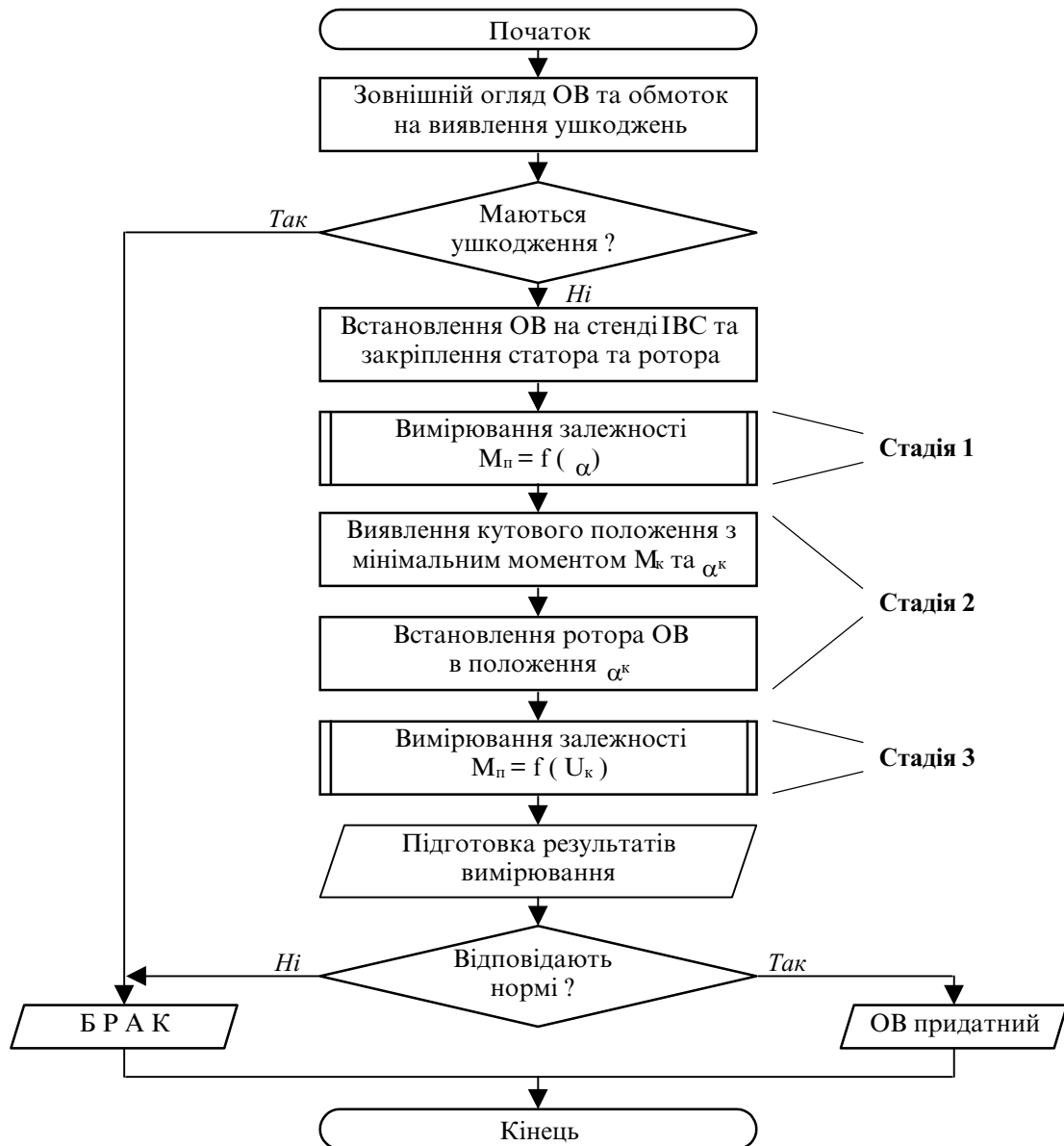


Рис. 3.7. Узагальнений алгоритм функціонування ІВС для визначення пускового моменту

Підготовчим етапом для проведення вимірювання пускового моменту електродвигуна можна вважати зовнішній огляд ОБ та, в разі відсутності ушкоджень, закріплення його на стенді ІВС. Зовнішній огляд націлений на виявлення механічних ушкоджень статора чи ротора ОБ та цілісності обмоток. Двигун, який має хоча б одне ушкодження, не може бути визнаний придатним до використання. Закріплення ОБ на стенді ІВС також дуже важлива операція, так як від якості цієї операції суттєво залежить результат вимірювання. Статор ОБ закріплюється на станині ІВС жорстко, а ротор з'єднується з валом ПД за допомогою МС.

Після того, як ОВ закріплено на стенді ІВС, виконується перший етап дослідження – вимірювання залежності пускового моменту від кутового положення ротора ОВ  $M_{п} = f(\alpha)$ .

### 3.5.1. Розробка алгоритму вимірювання залежності пускового моменту від кутового положення ротора

Вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$  можна виконати за двома вимірювальними схемами: традиційною та швидкодіючою. Алгоритм вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$  за традиційною схемою наведений на рис. 3.8.

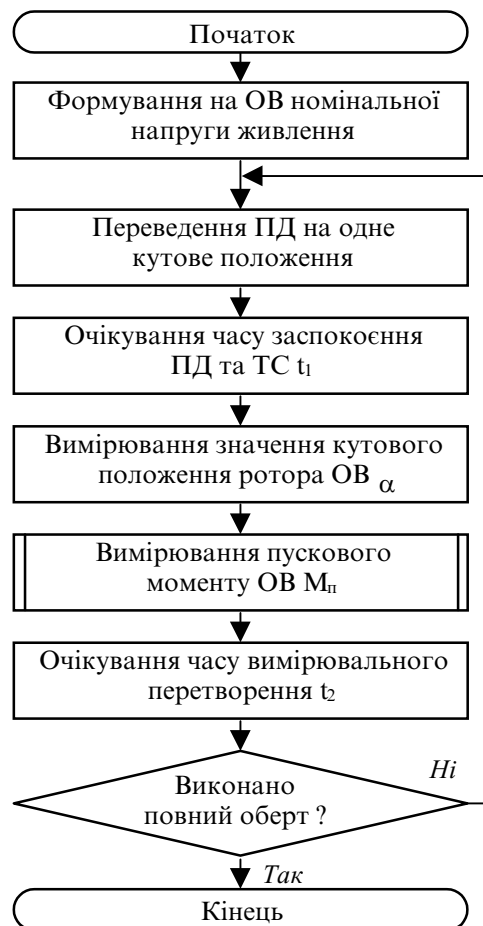


Рис. 3.8. Традиційний алгоритм вимірювання  $M_{п} = f(\alpha)$

Алгоритм вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$  за швидкодіючою схемою наведений на рис. 3.9.

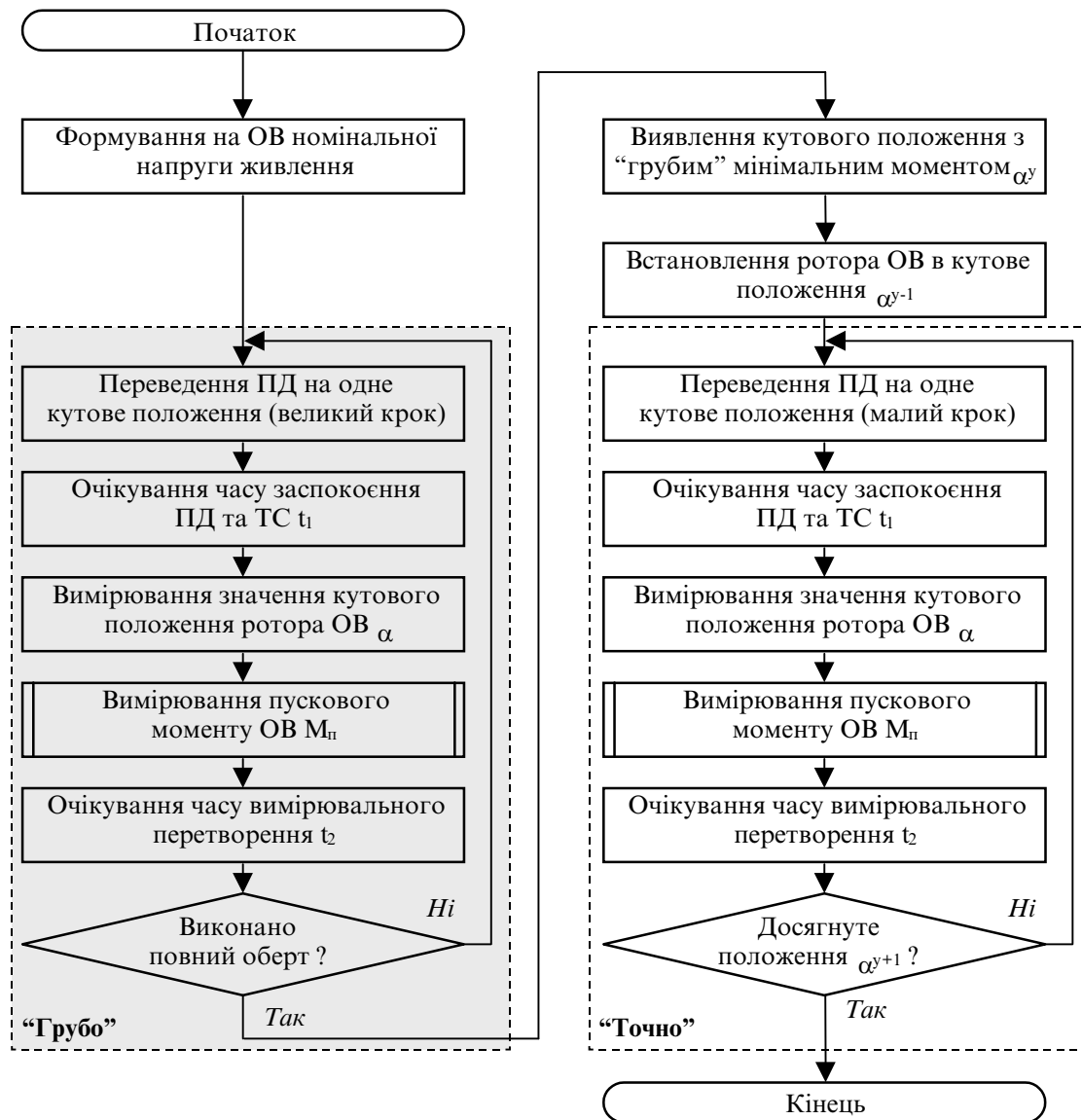


Рис. 3.9. Швидкодіючий алгоритм вимірювання  $M_{п} = f(\alpha)$

Аналізуючи алгоритми, які наведені на рис. 3.8 та 3.9, можна сказати, що швидкодіючий алгоритм більш складний для реалізації, тому рекомендується його використовувати лише тоді, коли традиційний алгоритм не дає позитивного результату.

Після того, як знайдено залежність  $M_{п} = f(\alpha)$ , визначене мінімальне значення пускового моменту та кут, який відповідає цьому пусковому



моменту, ротор ОБ переводять у це кутове положення та виконують наступний етап дослідження – вимірювання залежності  $M_{п} = f(U_{к})$ .

### 3.5.2. Розробка алгоритму вимірювання залежності пускового моменту від напруги живлення

Алгоритм вимірювання залежності пускового моменту від напруги живлення ОБ  $M_{п} = f(U_{к})$  наведений на рис. 3.10.

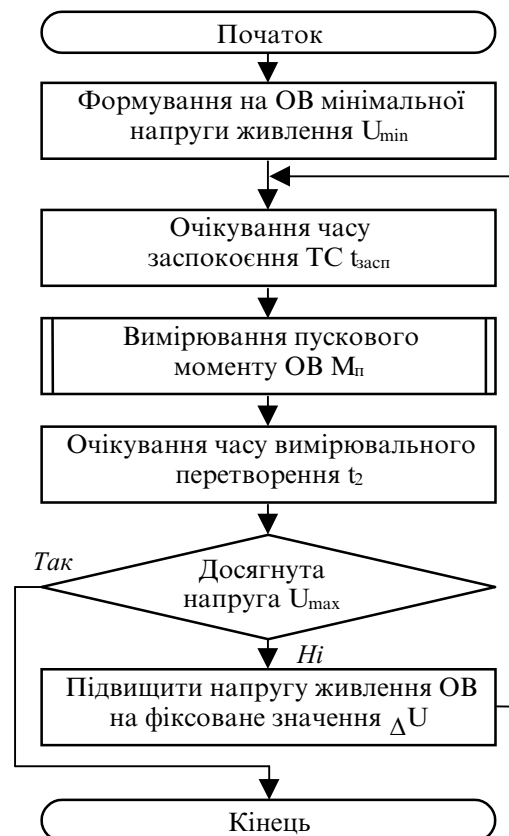


Рис. 3.10. Алгоритм вимірювання  $M_{п} = f(U_{к})$

Діапазон зміни напруги живлення ОБ для багатьох типів двигунів від 50 В до 250 В. Крок зміни напруги живлення ОБ обирають з таких умов, щоб двигун не перегрівся.

Порівняльна характеристика алгоритмів, які використовуються на етапах вимірювання пускового моменту електродвигунів, наведена у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

## Порівняльна характеристика алгоритмів

Етап вимірювання	Алгоритм	Характеристика
$M_{п} = f(\alpha)$	Традиційний алгоритм з використанням в ролі ПД крокового двигуна	<ul style="list-style-type: none"> <li>висока точність</li> <li>простота реалізації</li> </ul>
	Швидкодіючий алгоритм з використанням в ролі ПД крокового двигуна	<ul style="list-style-type: none"> <li>висока точність</li> <li>складність алгоритму</li> <li>висока швидкодія</li> </ul>
	Традиційний алгоритм з використанням в ролі ПД асинхронного двигуна	<ul style="list-style-type: none"> <li>висока швидкодія</li> <li>низка точність</li> </ul>
	Швидкодіючий алгоритм з використанням в ролі ПД асинхронного двигуна	<ul style="list-style-type: none"> <li>висока швидкодія</li> <li>складність реалізації</li> <li>складність алгоритму</li> </ul>
$M_{п} = f(U_{к})$	Алгоритм зі зміною напруги живлення ОВ від 50 В до 250 В	<ul style="list-style-type: none"> <li>повільний нагрів ОВ</li> <li>більша швидкодія</li> </ul>
	Алгоритм зі зміною напруги живлення ОВ від 250 В до 50 В	<ul style="list-style-type: none"> <li>швидкий нагрів ОВ</li> <li>менша швидкодія</li> </ul>

У попередніх розділах дисертації зазначалося, що використання в ролі первинного перетворювача типу “момент – напруга” розробленого сенсора (див. рис. 3.3) дозволяє алгоритмічно корегувати похибку вимірювання, яка може виникнути із-за механічного зсуву площин вторинних обмоток трансформаторів ПВП. Такий зсув обмоток можливий на стадії виготовлення ПВП та за рахунок гістерезисних явищ у ТС, які можуть з’явитися з часом. Операція корегування результату вимірювання не відноситься до алгоритму виконання досліду КЗ, тому її не виділено на узагальненому алгоритмі. Але, щоб уникнути подібних явищ, необхідно після встановлення та закріплення ОВ на стенді ІВС виміряти напругу  $U_{зсуву}$  на виході ПВП до подання напруги живлення на ОВ. Ця операція не впливає на конструкцію ВКПМ і повинна бути врахована при написанні програми для МПК. На стадії підготовки результатів вимірювання пускового моменту враховують значення  $U_{зсуву}$  для корегування остаточного результату вимірювання.

## В и с н о в к и

У третьому розділі дисертації отримано такі результати:

1. Розроблено структурну схему ІВС для визначення пускового моменту електродвигунів, проаналізовано послідовність вимірювального перетворення інформативного параметра (пускового моменту).
2. Розроблено первинний вимірювальний перетворювач типу “момент – напруга”:
  - запропонована конструкція ПВП на базі торсіонного сенсора та двох феродинамічних трансформаторних перетворювачів кута повороту, які включені за диференціальною схемою;
  - отримано рівняння перетворення та статичну характеристику розробленого перетворювача, які носять лінійний характер;
  - переваги використання розробленого перетворювача: технологічність виготовлення, висока точність та швидкість вимірювального перетворення, можливість алгоритмічної корекції похибки вимірювання.
3. Проаналізовано існуючі схеми та обгрунтовано вибір схеми швидкодіючого перетворювача змінної напруги у постійну напругу за середньовипрямленими значеннями амплітуди.
4. Оцінені часові характеристики вимірювального перетворення пускового моменту та розроблено методику їх розрахунку. Розраховані часові показники дозволяють для електричних двигунів малої та середньої потужності отримати значення пускового моменту у 60...120 кутових положеннях при вимірюванні залежності  $M_{п} = f(\alpha)$ .
5. Створено узагальнений алгоритм проведення дослідів КЗ. Розроблені алгоритми проведення основних етапів дослідів: вимірювання залежності  $M_{п} = f(\alpha)$ ; вимірювання залежності  $M_{п} = f(U_{к})$ . Порівняно запропоновані алгоритми з відомим та доведено їх перевагу.

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІВС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПУСКОВОГО МОМЕНТУ

Для отримання значення пускового моменту електричного двигуна необхідно виконати цілий ряд вимірювальних перетворень. Структурна схема перетворень наведена на рис. 3.1. Похибки, які виникають у кожному з виділених елементів, а також наявність зовнішніх величин, які мають вплив на ІВС, зумовлюють похибку вимірювання пускового моменту.

Взагалі, сумарна похибка вимірювання пускового моменту – це функція від багатьох змінних  $\delta_{\Sigma} = f(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$ . Нижче наведені основні (найвпливовіші) складові похибки вимірювання пускового моменту, які виникають у різних елементах структурної схеми, або впливають на них ззовні:

1. Нестабільність амплітуди та частоти напруги живлення, яка впливає на ОВ та ПВП.
2. Температура навколишнього середовища, яка впливає на пружні властивості ТС.
3. Зміщення ротора ОВ зі стійкого кутового положення, яке визначається ПД, під час вимірювання пускового моменту у цьому кутовому положенні, за рахунок деформації торсіону.
4. Похибка, яка виникає на етапі виготовлення ПВП типу “момент – напруга” за рахунок кутового зміщення площин вторинних обмоток трансформаторів.
5. Похибка, яка виникає за рахунок перетворення змінної напруги у постійну в ПСВЗ.
6. Похибка квантування, яка виникає у АЦП.
7. Інші похибки різноманітної природи та походження, а також дестабілізуючі фактори навколишнього середовища.

#### 4.1. Визначення та аналіз похибок вимірювального каналу пускового моменту

Місце впливу кожної з перерахованих похибок на елементи структурної схеми зображено на рис. 4.1.

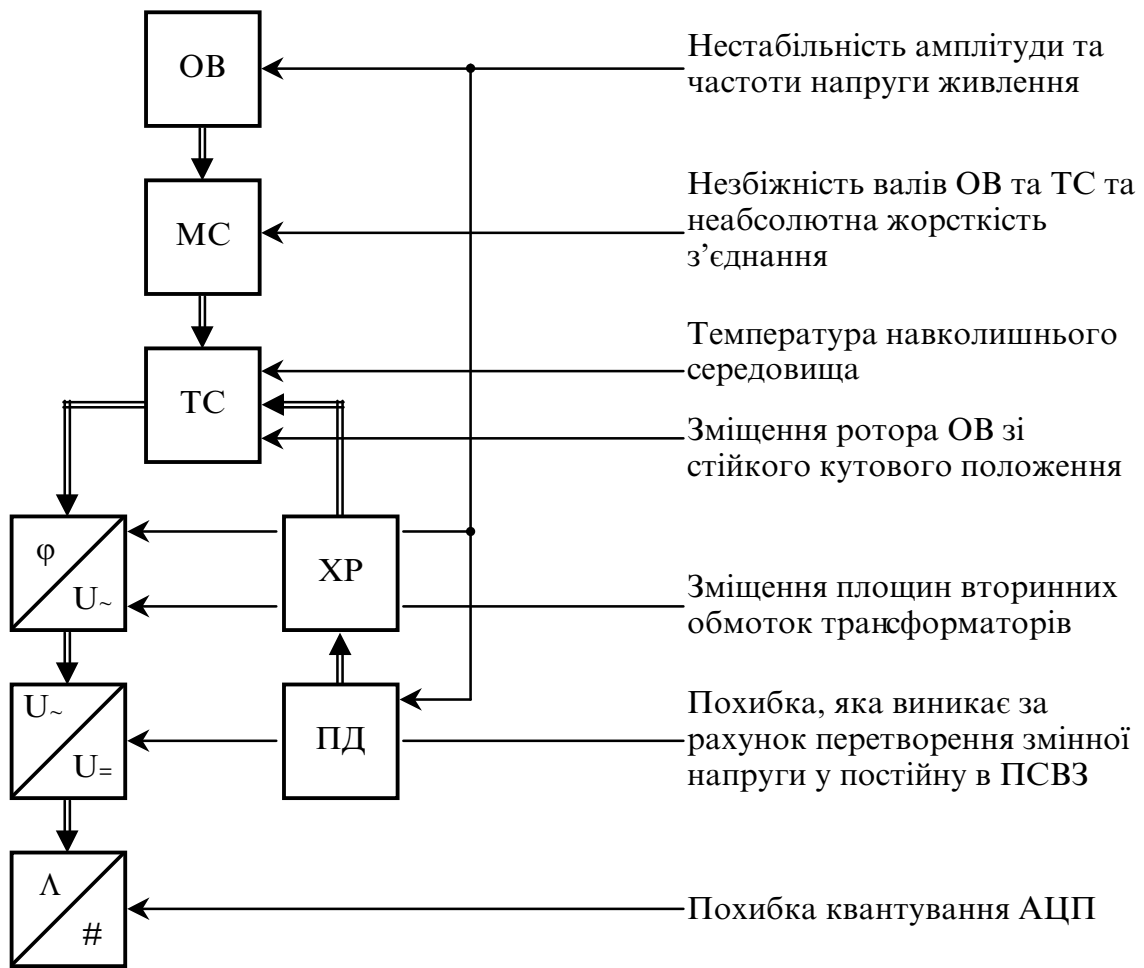


Рис. 4.1. Похибки, які впливають на результат вимірювання пускового моменту, та їх місце виникнення

Проаналізуємо кожну із складових похибок вимірювання пускового моменту та дамо рекомендації для їх усунення, врахування та зменшення.

Нестабільність амплітуди та частоти напруги живлення суттєво впливає на значення пускового моменту **OB** та **ПВП** типу “момент – напруга”, тому що значення амплітуди живлення безпосередньо входить у

рівняння перетворення ОВ та ПВП. Розглянемо вплив нестабільності напруги живлення на пусковий момент ОВ. Згідно з (2.1) пусковий момент ОВ є функцією від часу та напруги живлення  $M_{\text{п ов}} = f(U_{\text{кн}}, t)$ . Якщо вважати, що номінальна напруга живлення  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ , а можливий діапазон зміни напруги у промисловій мережі  $U^* = 187 \dots 242 \text{ В}$ , то формула для розрахунку похибки, яка виникає із-за нестабільності напруги живлення ОВ, має вигляд

$$\delta_U(U^*, t) = \frac{M_{\text{п ов}}(U_{\text{ном}}, t) - M_{\text{п ов}}(U^*, t)}{M_{\text{п ов}}(U_{\text{ном}}, t)} \cdot 100\%, \quad U^* \in [184; 242] \text{ В}. \quad (4.1)$$

Залежність пускового моменту двигуна 4AA56A для різних напруг живлення та похибка, яка виникає в результаті цього і розрахована за формулою (4.1), представлені на рис. 4.2.

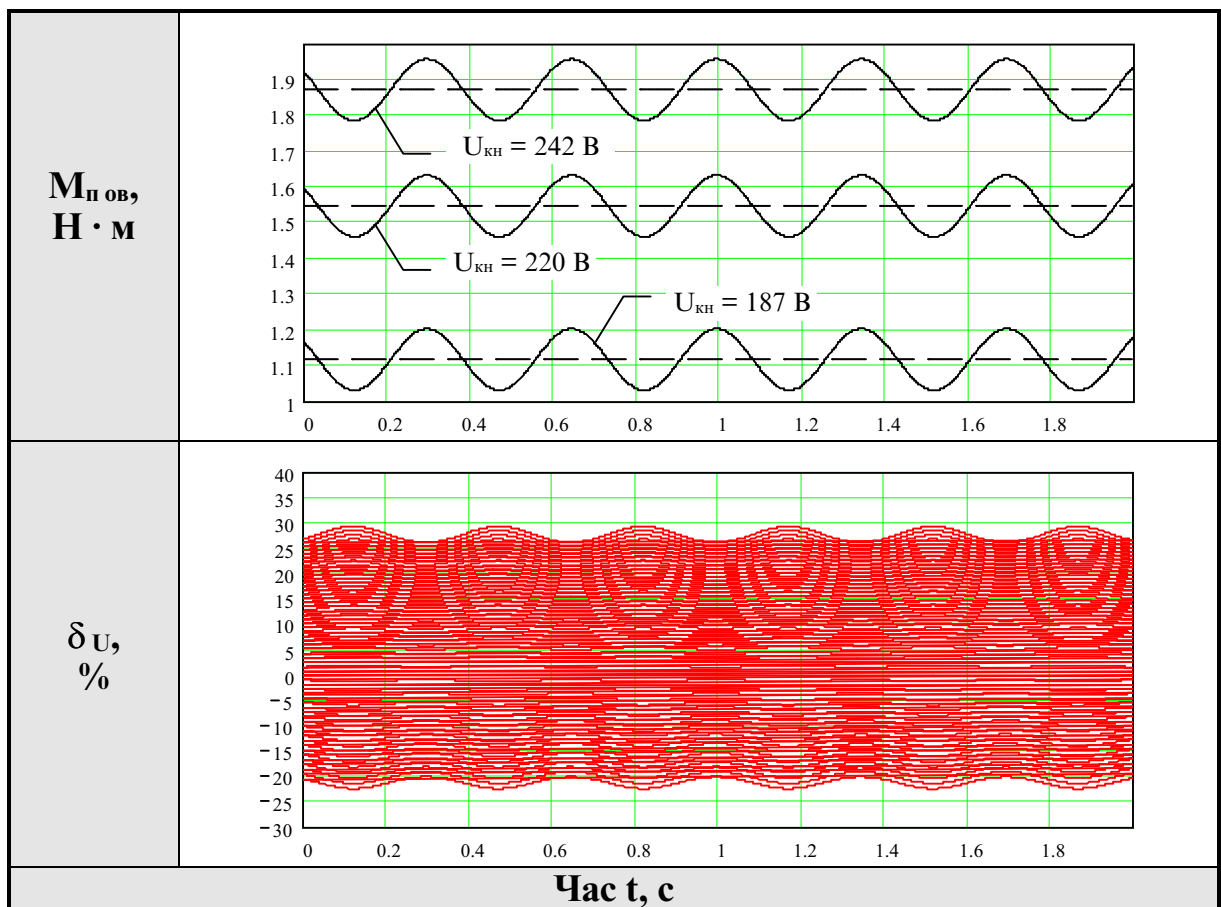


Рис. 4.2. Вплив зміни  $U_{\text{кн}}$  на  $M_{\text{п ов}}$  та похибка в результаті цього

З аналізу залежностей, що наведені на рис. 4.2, встановлено, що похибка внаслідок змін напруги живлення ОВ може бути до 30%, а це свідчить про значний вплив даного явища на результати вимірювання пускового моменту.

Існує багато схем і самих пристроїв, які виконують функцію стабільного джерела живлення [72]. Пропонується живлення ОВ здійснювати через ЕВН, який має на виході стабільну напругу, значення якої може бути запрограмоване.

Похибка, яка виникає на етапі виготовлення ПВП типу “момент – напруга”, за рахунок кутового зміщення площин вторинних обмоток трансформаторів також є однією з найсуттєвіших, тому що зміщення площин вторинних обмоток трансформаторів може бути набагато більшим за кут деформації торсіону при вимірюванні  $M_{п}$ . Однак, цю похибку найлегше усунути шляхом введення нової операції в алгоритм проведення вимірювання  $M_{п}$ . Достатньо виміряти значення напруги на виході ПВП типу “момент – напруга” звичайним шляхом перед заживленням ОВ (тобто у вільному стані) та врахувати це значення при підготовці результатів вимірювання. За таких обставин можна не накладати жорсткі умови на точність виготовлення ПВП типу “момент – напруга”. Похибка носить інструментальний характер і визначається в процесі метрологічної атестації вимірювального каналу пускового моменту.

#### **4.1.1. Вплив деформації торсіону на точність вимірювань**

У кожному кутовому положенні КД  $\alpha$  торсіонний сенсор деформується на деякий кут  $\varphi$ . Внаслідок цього виміряне значення кутового положення відрізняється від дійсного на величину кута деформації торсіону і становить  $(\alpha + \varphi)$ . Таке явище зумовлює інструментальну похибку в засобі вимірювань. Величина кута деформації торсіону  $\varphi$  залежить від прикладеного до торсіону моменту та конструкції торсіону. Змінюючи

конструкцію торсіону або його параметри, можна підібрати такі значення, коли деформація буде незначною. Але чим менше значення  $\varphi$ , тим складніше його фіксувати вимірювальною системою.

Щоб визначитися з цим питанням, необхідно знати, який час ОВ може знаходитись у стані короткого замикання, щоб не вийти з ладу за час вимірювання залежності  $M_{\Pi} = f(\alpha)$ . Маючи значення цього проміжку часу  $t_{\text{кз}}$  (за звичай 10 секунд), можна записати залежність часу  $t$  (час одного повного оберту ОВ) від кутового положення  $\alpha$

$$t = \alpha \cdot \frac{t_{\text{кз}}}{2 \cdot \pi}, \quad \alpha \in [0 \dots 2\pi]. \quad (4.2)$$

Тоді з рівняння (2.1), з урахуванням (4.2), можна отримати залежність для дійсного (без урахування деформації торсіону) значення пускового моменту ОВ від кутового положення ротора у вигляді

$$M_{\Pi}^{\text{д}}(\alpha) = k \cdot U_{\text{кн}}^2 + \left[ \begin{array}{l} a \cdot \sin\left(\omega_1 \cdot \alpha \cdot \frac{t_{\text{кз}}}{2 \cdot \pi}\right) + \\ + b \cdot \cos\left(\omega_2 \cdot \alpha \cdot \frac{t_{\text{кз}}}{2 \cdot \pi}\right) \end{array} \right], \quad \alpha \in [0 \dots 2\pi]. \quad (4.3)$$

Маючи рівняння перетворення торсіону (2.19), отримаємо залежність величини кута закручування торсіону  $\varphi$  від кутового положення ротора ОВ

$$\varphi(\alpha) = M_{\Pi}^{\text{д}}(\alpha) \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{т}}}{G \cdot \pi} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{в}}} \frac{1}{(R_{i\text{т}}^4 - r_{i\text{т}}^4)}, \quad \alpha \in [0 \dots 2\pi]. \quad (4.4)$$

Тоді залежність вимірюваного значення пускового моменту від кута повороту ОВ можна знайти, використавши (4.3) та (4.4) у вигляді



$$M_{\Pi}^B(\alpha) = k \cdot U_{\text{кн}}^2 + \left[ \begin{array}{l} a \cdot \sin\left(\omega_1 \cdot (\alpha + \varphi(\alpha)) \cdot \frac{t_{\text{кз}}}{2 \cdot \pi}\right) + \\ + b \cdot \cos\left(\omega_2 \cdot (\alpha + \varphi(\alpha)) \cdot \frac{t_{\text{кз}}}{2 \cdot \pi}\right) \end{array} \right], \alpha \in [0 \dots 2\pi]. \quad (4.5)$$

Маючи вирази (4.3) та (4.5), знаходимо відносну похибку, яка виникає за рахунок деформації торсіону за формулою

$$\delta_{\varphi} = \left| \frac{M_{\Pi}^B(\alpha) - M_{\Pi}^D(\alpha)}{M_{\Pi}^D(\alpha)} \right| \cdot 100 \%. \quad (4.6)$$

Моделювання даної похибки показує: якщо максимальний пусковий момент двигуна 4AA56A4 – 1,63 [Н·м], а параметри торсіону підібрати так, що максимальний кут деформації  $0,01^\circ$ , то методична похибка не перевищує 0,025% (див. рис. 4.3). При цьому напруга на виході торсіону прийнятна для вимірювання.

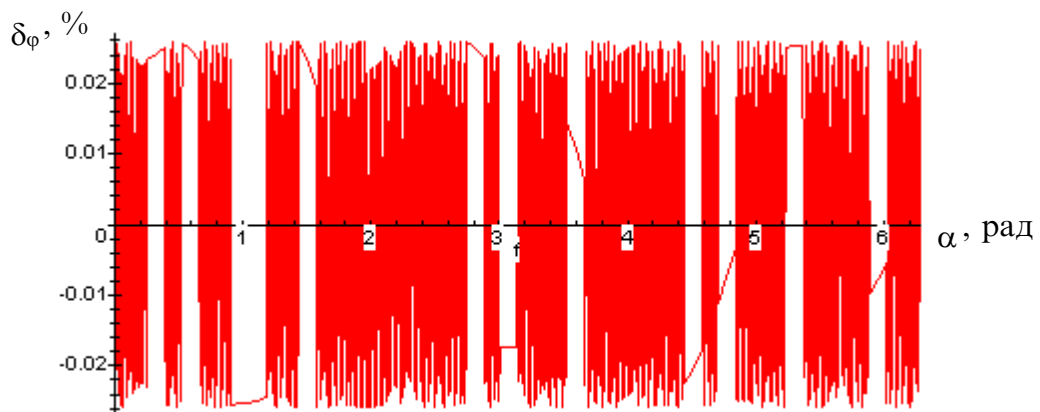


Рис. 4.3. Методична похибка внаслідок деформації торсіону

Виходячи з результатів аналізу та моделювання цієї похибки, можна стверджувати, що її вплив на точність вимірювання пускового моменту незначний і нею можна знехтувати.

#### 4.1.2. Похибка торсіонного сенсора

Жорсткість  $C_{тс}$  на закручування пружного елемента (торсіонного сенсора) є характеристикою, яка визначає кут закручування пружного елемента

$$C_{тс} = M_{\Sigma} / \varphi. \quad (4.7)$$

Відхилення жорсткості на закручування пружного елемента відносно розрахункової може бути зумовлене:

- неточним виготовленням геометричних розмірів (діаметр, довжина) пружного елемента;
- дією факторів, які впливають на пружний елемент в процесі експлуатації ВКПМ (зміна геометричних розмірів, вплив навколишнього середовища та інше).

Похибка виготовлення геометричних розмірів, яка задається припущеннями на розміри пружного елемента, дуже мала, тому її можна не враховувати [73].

Відхилення жорсткості пружного елемента від розрахункової в результаті відхилень в складі матеріалу та технології його виготовлення, а також із-за механічної та термічної обробки пружного елемента враховується на етапі градування ВКПМ. Похибка, зумовлена цими явищами, є систематичною.

Доцільно розглянути дію дестабілізуючих факторів на жорсткість пружного елемента. Основним з таких факторів є температура навколишнього середовища, дія якої впливає на геометричні розміри пружного елемента та модуль пружності матеріалу.

Наведена у [73] оцінка відносної температурної похибки визначається за формулою

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = -\Delta V \cdot (3K_1 + K_2), \quad (4.8)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу вала;  
 $K_2$  – коефіцієнт термічної зміни модуля пружності матеріалу;  
 $\Delta V$  – зміна температури.

Коефіцієнт термічної зміни модуля пружності – величина від’ємна. Для одного і того ж матеріалу, в залежності від механічної та термічної обробки, знаходиться за даними [74] для сталей в межах діапазону  $(0,25\dots0,33) \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт лінійного розширення для металів дорівнює  $1,2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ .

В [74] зазначається, що теоретично та експериментально встановлено співвідношення між  $K_2$  та  $K_1$  у вигляді

$$\frac{K_1}{K_2} = -m = \text{Const.} \quad (4.9)$$

Враховуючи те, що  $m = -40 \times 10^{-3}$ , можна зробити висновок про те, що більша частина температурної похибки ( $\approx 80\%$ ) зумовлена зміною модуля пружності матеріалу, тому при розробці ВКПМ, що працюють в широкому діапазоні температур, необхідно знати значення коефіцієнта термопружності матеріалу з метою введення поправок в результати вимірювання. Величина поправки на один градус із середнім значенням  $K_2$  дорівнює  $2,64 \times 10^{-2} \%$ . Тобто вплив температури на результати вимірювання пускового моменту дуже незначний, тоді коли ми маємо справу з малими кутами деформації торсіону.

#### **4.1.3. Похибка перетворювача змінної напруги у постійну (похибка ПСВЗ)**

Швидкодіючий вимірювальний ПСВЗ, який наведено на рис. 3.6, має похибку перетворення змінної напруги у постійну, яка зумовлена ба-

гатьма завадами різного походження. До них можна віднести похибки, які несе в собі вхідний інформативний сигнал; похибки, які виникають у вузлах самого ПСВЗ; неідентичність та неідеальність елементної бази, шуми та різноманітні наведення. Сумарний закон розподілу цієї похибки згідно з [75 – 77] наближується до нормального. В подальшому, для спрощення розрахунків, будемо вважати, що сумарний вплив цих завад незначний і ними можна знехтувати.

Суттєвою похибкою, яка значно впливає на процес перетворення змінної напруги у постійну, є незбіжність номіналів резисторів  $R_1$ ,  $R_2$  та конденсаторів  $C_1$ ,  $C_2$ .

Якщо розбіжність конденсаторів впливає лише на форму випрямленого вихідного сигналу, то розбіжність номіналів резисторів зумовлює появу похибки, яку знаходять за формулою (3.11).

Щоб ПСВЗ був дійсно високоточний, необхідно використати елементну базу з максимально ідентичними параметрами. Сучасна елементна база може задовольнити накладені на ПСВЗ вимоги (виробляються резистори з лазерною підгонкою, точність яких становить 0,001%), і тоді похибка, яка виникає за рахунок неідентичності елементної бази, стає значно меншою, порівняно з іншими складовими, що дає змогу не враховувати її у подальших розрахунках.

Але сама схемотехнічна реалізація ПСВЗ зумовлює появу випадкової складової похибки, яка присутня у формі випрямленого вихідного сигналу, див. рис. 4.4. Така форма вихідної напруги (присутня незначна пульсація) залежить від фізичних процесів заряду та розряду конденсаторів, тому не може бути покращена. Випадковість цієї похибки зумовлена тим, що процеси перетворення сигналу в ПСВЗ та в АЦП між собою несинхронізовані, тобто квантування сигналу на виході ПСВЗ може відбуватися у будь-який час.

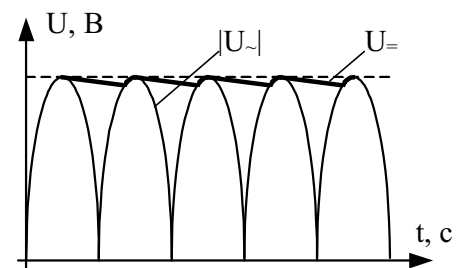


Рис. 4.4. Форма вихідного сигналу ПСВЗ

Якщо розглянути один період пульсації вихідного сигналу, видно, що значення вихідної напруги протягом періоду повільно спадає та стрімко зростає. Також з рис. 4.4. видно, що похибка перетворення у ПСВЗ має тільки позитивне значення.

Щоб визначити закон розподілу похибки, яка зумовлена пульсацією вихідного сигналу, в [71] були проведені експериментальні дослідження даного ПСВЗ, цим встановлено, що закон розподілу цієї похибки наближується до гамма-розподілу. Формула, яка описує цей закон розподілу, має вигляд [78]

$$p(\delta_p) = \begin{cases} 0, & \delta_p \leq 0, \\ C_\gamma \cdot \delta_p^{(\alpha-1)} \cdot e^{-\beta\delta_p}, & x > 0, \alpha > 0, \beta > 0, \end{cases} \quad (4.10)$$

де  $\delta_p$  – похибка вимірювання пускового моменту, що зумовлена пульсацією вихідного сигналу ПСВЗ;

$C_\gamma$ ,  $\alpha$  та  $\beta$  – коефіцієнти гамма-розподілу, які задають так, щоб виконувалась умова  $\int_0^\infty p(\delta_p) \cdot d\delta_p = 1$  за формулою

$$C_\gamma = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}. \quad (4.11)$$

Для гамма-розподілу також справедлива наступна умова:

$$m(\delta_p) = \alpha/\beta, \quad (4.12)$$

де  $m(\delta_p)$  – математичне очікування похибки вимірювання  $M_p$ , яка зумовлена пульсацією вихідного сигналу ПСВЗ.

#### 4.1.4. Похибка квантування (похибка АЦП)

Похибка квантування аналого-цифрового перетворення згідно з [79 – 82] має дві складові. Перша складова – це динамічна похибка, що зумовлена квантуванням вхідної величини АЦП за часом. В результаті зміни вхідного сигналу результат перетворення буде невизначений на інтервалі перетворення. При використанні пристрою вибірки зберігання (ПВЗ) динамічну складову можна значно зменшити. Для випадку, який розглядається, частота вихідного сигналу не перевищує 1 кГц. Сучасні АЦП [83], виконані в одному корпусі з ПВЗ, дозволяють при кількості двійкових розрядів до 16 досягти часу перетворення менше 2 мкс. Це дає змогу під час використання таких АЦП знехтувати динамічною похибкою при подальших розрахунках.

Друга складова – це похибка одного відліку або похибка квантування. Вона складається з похибки цифрового представлення, що обумовлена наявністю квантування за рівнем (кінцева кількість дозволених рівнів сигналу) та інструментальної похибки АЦП. Інструментальна похибка зумовлена наявністю шумів та випадкових завад як у вхідному сигналі, так і в вузлах АЦП, що виникають в процесі виготовлення та експлуатації. Виникнення цієї похибки обумовлене багатьма факторами та її закон розподілу наближається до нормального. В подальшому, для спрощення розрахунків, будемо вважати, що інструментальна похибка відсутня. Похибка квантування  $\delta_D$  при великій кількості розрядів вихідного коду може бути описана прямокутним законом розподілу (закон рівномірної щільності) [84], що відповідає рівній щільності ймовірності похибки квантування в межах  $\pm h/2$ , де  $h$  – крок квантування. Величина кванту жорстко пов'язана з максимальним значенням вхідної напруги АЦП та кількістю двійкових розрядів АЦП

$$h = \frac{U_{D \max}}{2^n}, \quad (4.13)$$

де  $n$  – кількість розрядів АЦП;

$U_{D \max}$  – максимальне значення вхідної напруги АЦП.

Якщо максимальному значенню вхідної напруги АЦП  $U_{D \max}$  відповідає максимальне значення пускового моменту  $M_{\Pi \max}$  (для нашого випадку це значення  $20 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ), яке можна вимірювати даним засобом, то можна записати вираз для абсолютної похибки визначення пускового моменту, що зумовлена квантуванням вихідного сигналу ПВП

$$\delta_D = \frac{M_{\Pi \max}}{2^{n+1}}. \quad (4.14)$$

Значення відносного СКВ цієї похибки розраховують за формулою [75]

$$\sigma_D = \frac{M_{\Pi \max}}{2^{n+1} \cdot \sqrt{3} \cdot M_{\Pi}}. \quad (4.15)$$

Результати розрахунку значення відносного СКВ цієї похибки при різних значеннях кількості розрядів АЦП наведено на рис 4.5.

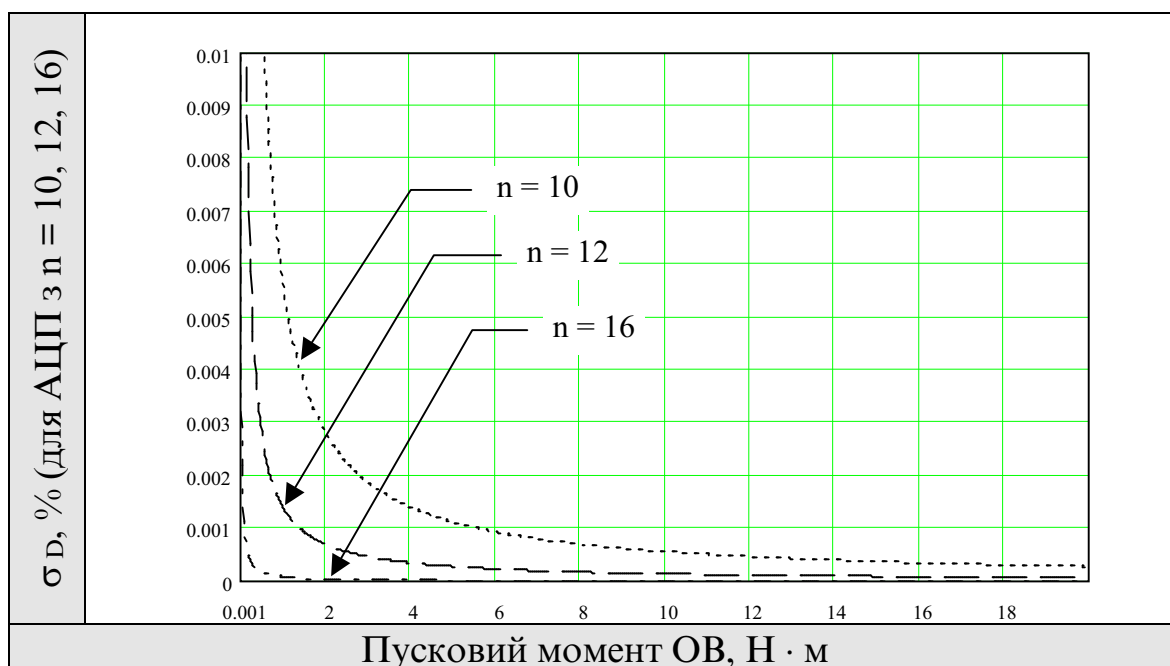


Рис. 4.5. Залежність відносного СКВ похибки, що зумовлена квантуванням вихідного сигналу

Закон розподілу похибки, яка зумовлена квантуванням вихідного сигналу [84], описується наступним виразом:

$$p(\delta_D) = \frac{1}{h} = \frac{2^n}{M_{п\max}}, \delta_D \in \left[ -\frac{M_{п\max}}{2^{n+1}}, \frac{M_{п\max}}{2^{n+1}} \right]. \quad (4.16)$$

Крім розглянутих вище складових похибки, на результати вимірювання пускового моменту можуть впливати інші похибки різноманітної природи та походження. До них можна віднести:

- незбіжність вала ОВ з вхідним валом кінематичної схеми засобу вимірювання пускового моменту;
- неабсолютна жорсткість з'єднання валів, яка виникає у муфті спряження;
- різноманітні електричні та електромагнітні завади, які можуть вплинути на ОВ та ПД;
- вологість та хімічний склад навколишнього середовища;
- сили тертя в опорах, підшипниках ОВ, ПД, ХР;
- помилки позиціювання приводного КД;
- внутрішні ушкодження ОВ, ПД та недоліки виготовлення, які не можна виявити.

Серед цих незалежних випадкових факторів, які разом впливають на результат вимірювання пускового моменту, не можна виділити домінуючого. Тоді, згідно з центральною граничною теоремою [75 – 77], коли кількість незалежних випадкових завод велика (більше п'яти), маємо нормальний закон розподілу загальної похибки вимірювання від випадкових завод з нульовим математичним очікуванням (всі фактори рівнозначні і не можна виявити домінуючого), який описується виразом

$$p(\delta_S) = \frac{1}{\sigma_S \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\delta_S^2}{2 \cdot \sigma_S^2}\right), \quad (4.17)$$



де  $\delta_s$  – похибка вимірювання пускового моменту, що зумовлена дією випадкових завад;  
 $\sigma_s$  – значення СКВ цієї похибки.

#### 4.2. Загальна похибка вимірювання пускового моменту

За результатами розділу 4.1. можна виділити такі складові частини загальної похибки вимірювання пускового моменту, які суттєво впливають на результат і повинні бути враховані обов'язково:

- похибка вимірювання  $M_p$ , що зумовлена пульсацією вихідного сигналу ПСВЗ (закон розподілу похибки – гамма-розподіл (ГЗР));
- похибка вимірювання  $M_p$ , що зумовлена квантуванням АЦП вихідного сигналу ПВП (закон розподілу похибки – прямокутний (ПЗР));
- похибка вимірювання  $M_p$ , що зумовлена дією випадкових завад (закон розподілу похибки – нормальний з нульовим математичним очікуванням (НЗР)).

Значення параметрів гамма-розподілу нам відомі з [71], параметри прямокутного розподілу можуть бути розраховані за наведеними у розділі 4.1.4. формулами для конкретного значення розрядності АЦП (використано 12-ти розрядне АЦП), а параметри нормального розподілу, який описує дію випадкових завад, нам не відомі.

Тому, згідно з рекомендаціями [85], доцільно розглянути три випадки, кожний з яких відрізняється співвідношенням СКВ відомого закону розподілу до СКВ невідомого закону розподілу. Тобто розглядають випадки, коли значення СКВ закону розподілу, параметри якого не відомі, суттєво відрізняється у менший бік, більший бік та співпадає з СКВ закону, параметри якого відомі.

Розглянемо три випадки співвідношення СКВ складових законів розподілу загальної похибки вимірювання пускового моменту:  $\sigma_s \ll \sigma_D$ ,  $\sigma_s \approx \sigma_D$ ,  $\sigma_s \gg \sigma_D$ .

На рис. 4.6 наведені графічні залежності трьох законів розподілу, які є складовими частинами закону розподілу загальної похибки вимірювання пускового моменту.

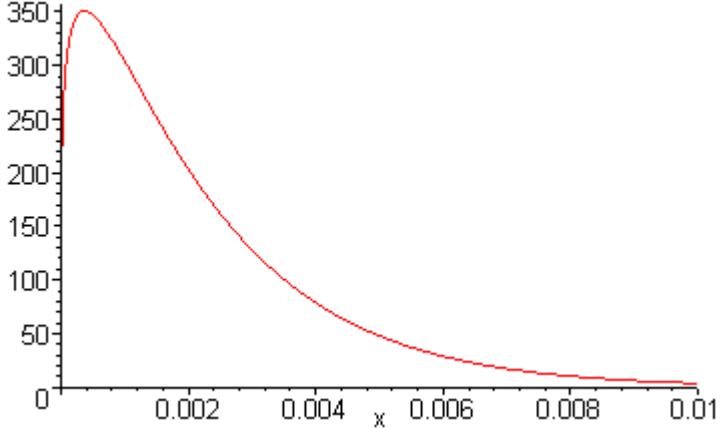
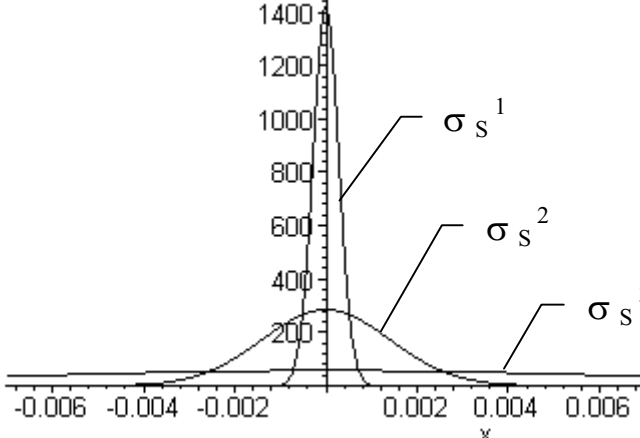
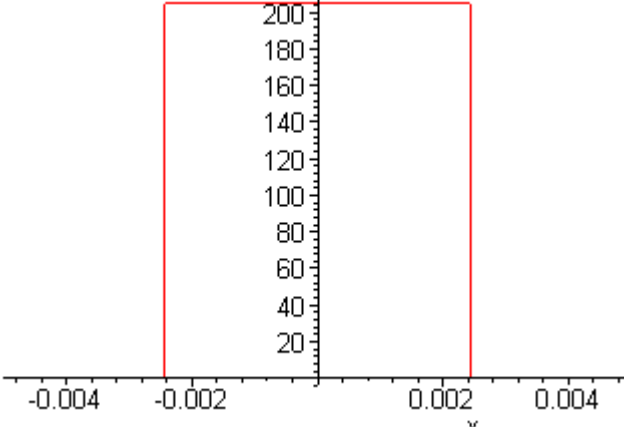
Тип	Закон розподілу	Параметри
ГЗР		$\sigma_P = 0,002$
НЗР		$\sigma_S^1 = 0,00028$ $\sigma_S^2 = 0,0014$ $\sigma_S^3 = 0,007$
ПЗР		$\sigma_D = 0,0014$

Рис. 4.6. Закони розподілу, які є складовими частинами похибки вимірювання пускового моменту

Закон розподілу загальної похибки вимірювання пускового моменту є композицією законів розподілу похибки квантування, пульсації вихідного сигналу та похибки, що зумовлена різноманітними випадковими завадами. Він визначається як згортка законів розподілу складових загальної похибки [75, 85, 86] за формулою

$$p(y) = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(y-x) \cdot p_2(x) dx, \quad (4.18)$$

де  $p(y)$  – результуючий закон розподілу (згортка);  
 $p_1(x)$  та  $p_2(x)$  – початкові закони розподілу.

Згортка законів розподілу відбувається поступово. Спочатку звернемо нормальний закон розподілу з прямокутним, а потім результуючий закон звернемо з гамма-розподілом. За формулою (4.18) запишемо аналітичні вирази для виконання цієї операції

$$p(\delta_*) = p(\delta_S) * p(\delta_D) = \frac{2^n}{M_{п\max} \cdot \sigma_S \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(\delta_S - x)^2}{2 \cdot \sigma_S^2}\right) dx, \quad (4.19)$$

$$p(\delta_M) = p(\delta_P) * p(\delta_*) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{-\infty}^{\infty} (\delta_P - x)^{(\alpha-1)} \cdot e^{-\beta(\delta_P-x)} \cdot p(\delta_*) \cdot dx, \quad (4.20)$$

де  $p(\delta_*)$  – композиція нормального закону розподілу з прямокутним;  
 $p(\delta_M)$  – загальний закон розподілу похибки вимірювання пускового моменту електродвигуна.

Отримати аналітичні вирази для виразів (4.19) та (4.20) неможливо, тому для чисельного розв'язку цих інтегралів та побудови графіків використано математичне середовище Maple V5.

На рис. 4.7 наведені залежності законів розподілу випадкових величин  $\delta_*$  (перша композиція) та  $\delta_M$  (друга композиція – загальний закон розподілу похибки вимірювання пускового моменту) для трьох випадків,

які відрізняються ступенем впливу випадкових завад:  $\sigma_S \ll \sigma_D$ ,  $\sigma_S \approx \sigma_D$ ,  $\sigma_S \gg \sigma_D$ .

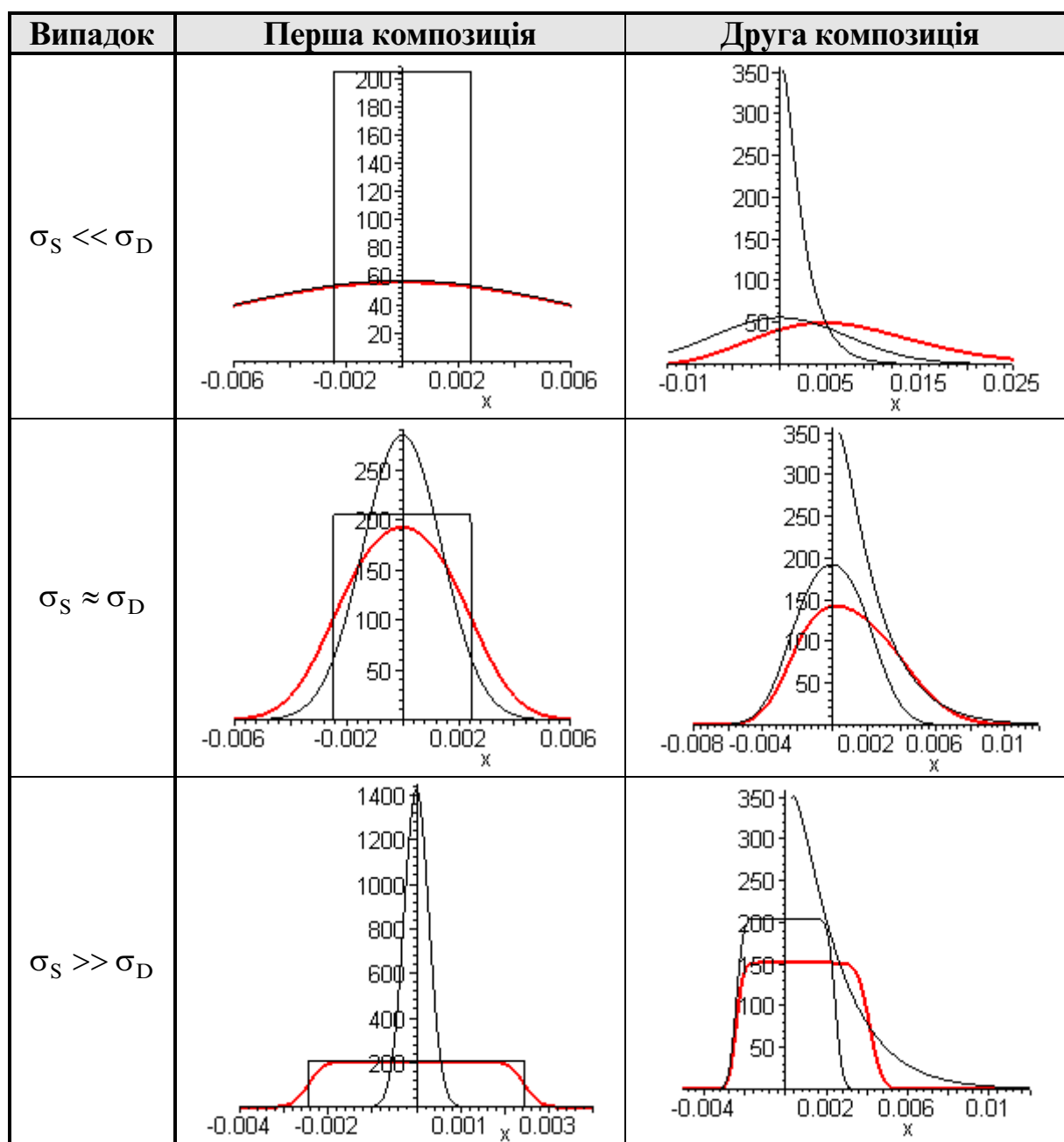


Рис. 4.7. Залежності законів розподілу  
випадкових величин  $\delta_*$  та  $\delta_M$

Середньоквадратичне значення загальної похибки вимірювання пускового моменту визначається [78]

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_S^2 + \sigma_D^2}, \quad (4.21)$$

де  $\sigma_M$  – СКВ загальної похибки вимірювання пускового моменту.

### 4.3. Оцінка вірогідності контролю пускового моменту електричних двигунів

В процесі виробництва виготовлені двигуни перевіряють на відповідність параметрів електричного двигуна технічним характеристикам, які були задані в процесі його проектування. Пусковий момент електричного двигуна – це обов’язковий параметр, який контролює виробник. За допомогою ІВС для визначення пускового моменту вимірюють залежність пускового моменту від кутового положення ротора ОВ, знаходять мінімальний пусковий момент з вимірянних значень, який і приймають за пусковий момент електродвигуна.

Якщо вимірний пусковий момент ОВ менший за розрахунковий, тобто той, який задано на етапі проектування, то використання цього електродвигуна пов’язане з великим ризиком. Двигун, який зупиняється в кутовому положенні з таким мінімальним пусковим моментом, при наступному заживленні не може почати обертати навантаження, яке знаходиться на його роторі, як кажуть електромеханіки, машина не “розгортається”. При заживлених обмотках та нерухомому роторі електричний двигун виходить з ладу.

Похибка вимірювального каналу пускового моменту може суттєво вплинути на результат контролю. За рахунок похибки вимірювання можна забракувати годний двигун, або бракований двигун видати за годний до експлуатації. Тому оцінка вірогідності контролю пускового моменту є досить важливим етапом в процесі розробки ІВС.

У загальному вигляді помилки контролю та загальна безумовна ймовірність прийняття помилкового рішення визначається наступними виразами [87 – 89].

Помилка першого роду (ППР) або “хибна тривога” визначається за формулою

$$\alpha_M = \int_{-k_a \cdot \Delta}^{\Delta} \left[ \int_{-\infty}^{\bar{X}_2 - y} p(y, t) dt + \int_{\bar{X}_1 - y}^{\infty} p(y, t) dt \right] dy, \quad (4.22)$$

де  $y$  – центроване значення контрольованого параметра, яке визначають за формулою  $y = y' - \bar{y}'$ ;

$y'$  – контрольований параметр;

$\bar{y}'$  – номінальне значення контрольованого параметра;

$p(y, t)$  – сумісна щільність ймовірностей випадкових величин центрованого значення контролюемого параметра та загальної похибки вимірювання  $t$ ;

$\Delta$  – допустиме відхилення контрольованого параметру.

$k_a$  – коефіцієнт асиметрії полів допуску.

Вираз (4.22) справедливий за умови, що математичне очікування закону розподілу ймовірності контрольованого параметра співпадає з його номінальним значенням. Сумісна двовимірна щільність ймовірності двох неперервних випадкових величин за умови їх незалежності, у відповідності з [90], дорівнює добутку щільностей розподілу ймовірностей окремих величин, що входять до системи

$$p(y, t) = p(t) \cdot p(y). \quad (4.23)$$

Величини  $\bar{X}_1$  та  $\bar{X}_2$  визначаються за виразами

$$\bar{X}_1 = \Delta + c_2'' - c_1, \quad (4.24)$$

$$\bar{X}_2 = -k_a \cdot \Delta - c_2' - c_1, \quad (4.25)$$

де  $c_1$  – математичне очікування похибки вимірювання, систематична похибка;

$c_2, c_2''$  – контрольні прирости полів допуску за нижньою та верхньою межами.

Помилка другого роду (ПДР), або “пропуск сигналу” визначається за формулою

$$\beta_M = \int_{-\infty}^{-k_a \cdot \Delta} \left[ \int_{\bar{X}_2 - y}^{\bar{X}_1 - y} p(y, t) dt \right] dy + \int_{\Delta}^{\infty} \left[ \int_{\bar{X}_2 - y}^{\bar{X}_1 - y} p(y, t) dt \right] dy. \quad (4.26)$$

Загальна безумовна ймовірність помилкового рішення про якість ОВ визначається

$$P_0 = \alpha_M + \beta_M. \quad (4.27)$$

Розглянемо помилки контролю пускового моменту електродвигуна в процесі використання розробленого ВКПМ. Закон зміни пускового моменту ОВ залежить від багатьох причин, таких як точність виготовлення обмоток статора та ротора, симетричність ротора і статора та інших, серед яких важко виділити домінуючу. Це дозволяє прийняти закон розподілу центрованого значення контрольованого параметра (пускового моменту) за нормальний у такому вигляді:

$$p(\bar{M}) = \frac{1}{\sigma_{\bar{M}} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\bar{M}^2}{2 \cdot \sigma_{\bar{M}}^2}\right), \quad (4.28)$$

де  $\bar{M} = M - M_{\text{ном}}$  – центроване значення пускового моменту;

$M_{\text{ном}}$  – номінальне значення пускового моменту;

$\sigma_{\bar{M}}$  – СКВ центрованого значення пускового моменту.

Сумісну двовимірну щільність ймовірності вимірювання пускового моменту та похибки його вимірювання представимо у вигляді

$$\begin{aligned}
 p(\bar{M}, \delta_M) &= p(\bar{M}) \cdot p(\delta_M) = p(\bar{M}) \cdot [p(\delta_S) * p(\delta_D) * p(\delta_P)] = \\
 &= \frac{1}{\sigma_{\bar{M}} \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \exp\left(-\frac{\bar{M}^2}{2 \cdot \sigma_{\bar{M}}^2}\right) \cdot [p(\delta_S) * p(\delta_D) * p(\delta_P)]. \quad (4.29)
 \end{aligned}$$

Помилка першого роду контролю пускового моменту у відповідності з (4.22) визначається

$$\alpha_M = \int_{-\Delta_M}^{\Delta_M} \left[ \int_{-\infty}^{-\Delta_M - \bar{M}} p(\bar{M}, \delta_M) d\delta_M + \int_{\Delta_M - \bar{M}}^{\infty} p(\bar{M}, \delta_M) d\delta_M \right] d\bar{M}. \quad (4.30)$$

Помилка другого роду контролю пускового моменту у відповідності з (4.26) визначається

$$\beta_M = \int_{-\infty}^{-\Delta_M} \left[ \int_{-\Delta_M - \bar{M}}^{\Delta_M - \bar{M}} p(\bar{M}, \delta_M) d\delta_M \right] d\bar{M} + \int_{\Delta_M}^{\infty} \left[ \int_{-\Delta_M - \bar{M}}^{\Delta_M - \bar{M}} p(\bar{M}, \delta_M) d\delta_M \right] d\bar{M}. \quad (4.31)$$

Розраховані за допомогою пакета Maple V5 залежності помилок контролю пускового моменту першого і другого роду та ймовірності прийняття помилкового рішення від параметра  $\mu$

$$\mu = \frac{\sigma_S}{\sigma_D}, \quad (4.32)$$

який визначає співвідношення між СКВ похибки вимірювання пускового моменту, що зумовлена випадковими завадами, та СКВ похибки вимірювання пускового моменту, що зумовлена квантуванням АЦП вихідного сигналу ПВП, наведені на рис. 4.8.



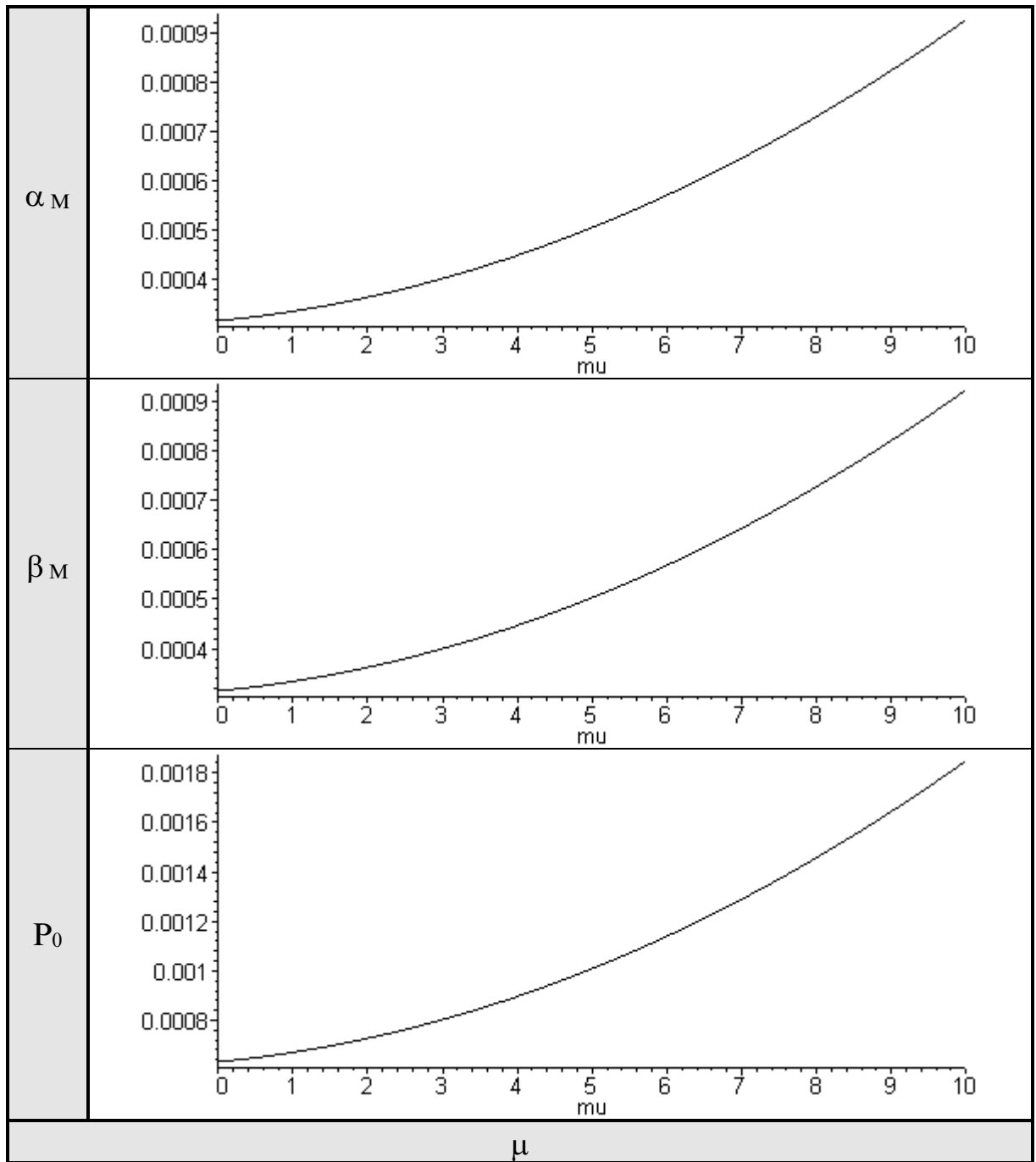


Рис. 4.8. Залежності помилок контролю від параметра  $\mu$

При розрахунках було прийнято, що коефіцієнт асиметрії полів допущень дорівнює одиниці, контрольні прирости полів допуску за нижньою та верхньою межами дорівнюють нулю, поле допущень  $\Delta = 1,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (що відповідає 7%). Детальний розрахунок наведений у додатку Б.

## В и с н о в к и

У четвертому розділі дисертації отримано такі результати:

1. Проаналізовано складові похибки вимірювання пускового моменту електричного двигуна малої та середньої потужності, які виникають під час застосування розробленої ІВС.
2. Серед багатьох завад виділено основні, які суттєво впливають на вимірювання пускового моменту: похибка, що зумовлена пульсацією вихідного сигналу ПСВЗ; похибка, що зумовлена квантуванням АЦП; похибка, що зумовлена дією випадкових завад. Для інших завад, які мають місце, дано рекомендації щодо їх зменшення, врахування, або доведено, що вони не значні і можуть не враховуватись.
3. Знайдено композицію законів розподілу складових похибки вимірювання пускового моменту при різних співвідношеннях СКВ складової, що зумовлена квантуванням АЦП, та СКВ складової, що зумовлена різноманітними випадковими завадами.
4. Розраховано показники вірогідності контролю пускового моменту в залежності від співвідношення між СКВ складової квантування та СКВ складової, що зумовлена випадковими завадами.

## РОЗДІЛ 5

### ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У заключному розділі дисертації розглянемо питання, які дозволять проектувати ІВС для визначення пускового моменту, питання метрологічної атестації засобу вимірювання та наведемо результати експериментального дослідження розробленої ІВС для визначення пускового моменту.

#### **5.1. Методика інженерного проектування та апаратно-програмна реалізація ІВС для визначення пускового моменту**

Розробка методики інженерного проектування, запропонованої ІВС для визначення пускового моменту електродвигунів, дозволить проектувати подібні засоби вимірювання з наперед заданими параметрами для потреб конкретного виробника електричних двигунів тощо. Якщо проектується ІВС, до складу якої входять мікропроцесорний контролер та ПЕОМ, слід розглянути два етапи проектування: проектування апаратних засобів та розробка програмного забезпечення для ІВС.

##### **5.1.1. Розробка методики інженерного проектування**

При проектуванні ІВС для визначення пускового моменту електричних двигунів малої та середньої потужності, який розроблений в дисертаційній роботі, необхідно визначитися з початковими даними, які повинен отримати проектувальник. Обов'язковими початковими даними

для проектування подібних засобів вимірювань пускового моменту повинні бути:

- Вхідний діапазон можливих значень зміни пускового моменту ОВ –  $M_{\min} \dots M_{\max}$  [Н · м];
- Максимальний час, протягом якого ОВ може бути загальмовано (режим короткого замикання) –  $t_{кз}$  [с] та необхідна кількість кутових положень при вимірюванні залежності  $M_{п} = f(\alpha) - n_{\phi}$ ;
- Вірогідність контролю пускового моменту, яку необхідно забезпечити у засобі вимірювань, який проектується –  $P_{\text{конт.}}$ ;
- Конструктивні особливості ОВ, які планується випробовувати за допомогою засобу вимірювання.

Задамося типовими початковими даними (див. табл. 5.1), які необхідні для проектування розробленої ІВС, щоб детально проілюструвати всі етапи проектування.

Таблиця 5.1

Початкові дані для проектування ІВС

$M_{\min}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$M_{\max}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$t_{кз}, \text{с}$	$P_{\text{конт.}}$	$n_{\phi}$
0	20	10	0,9989	60

Загальну методику проектування засобу вимірювань пускового моменту можна розділити на такі етапи:

1) Знаходження загальної безумовної ймовірності помилкового рішення про якість ОВ. Використовуємо наступну формулу:

$$P_0 = 1 - P_{\text{контр.}} = 1 - 0,9989 = 0,0011. \quad (5.1)$$

2) Визначення значень параметра  $\mu$  та помилок контролю  $\alpha_M$  і  $\beta_M$ . Згідно з теоретичною залежністю, яка наведена на рис. 5.1 (відповідно до рис. 4.8), за відомою ймовірністю помилкового рішення  $P_0 = 0,0011$  знаходимо параметр  $\mu = 5,60$  і за його значенням графічно знаходимо помилки контролю  $\alpha_M = 0,00055$  та  $\beta_M = 0,00054$  (див. рис. 5.1).

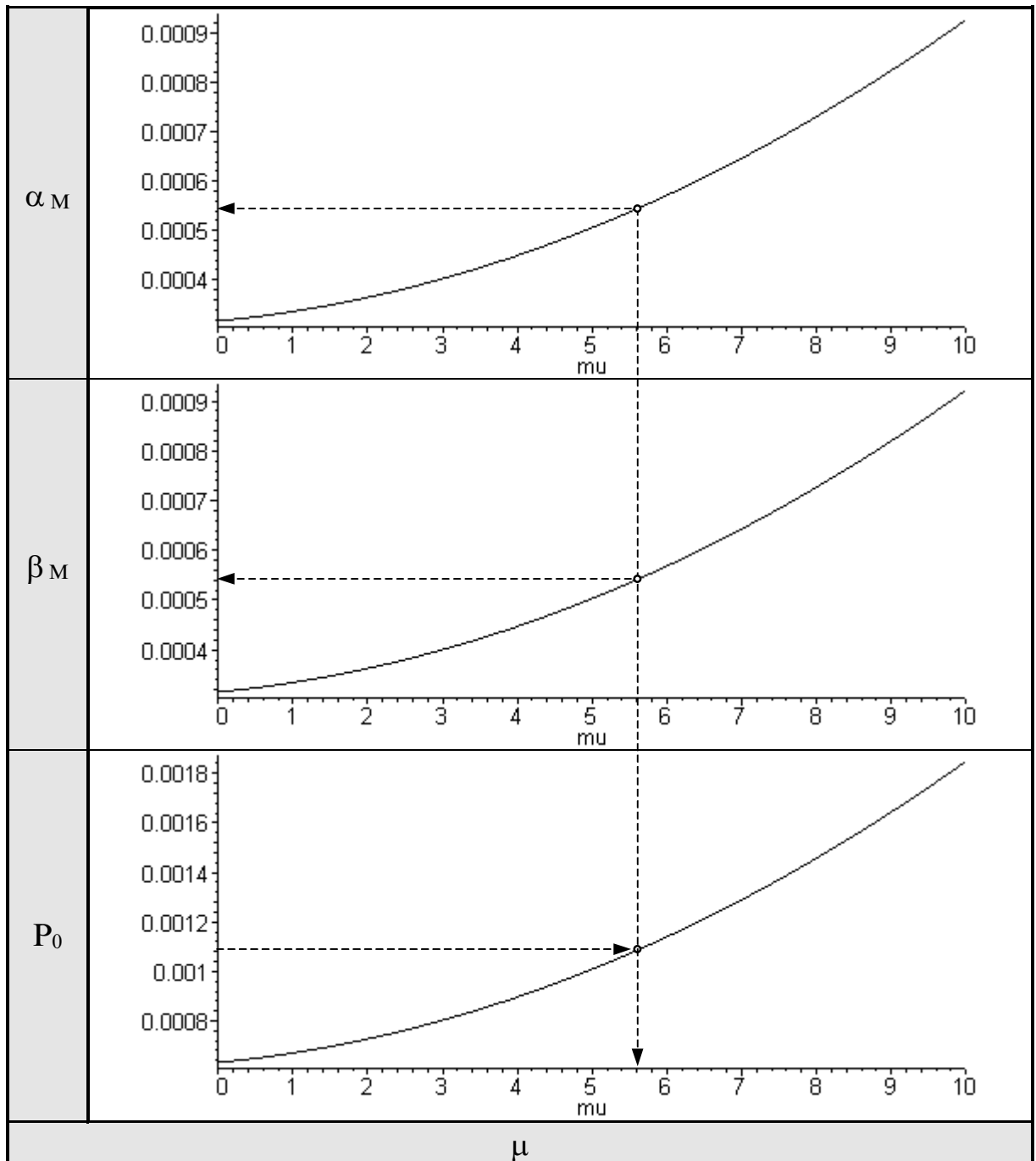


Рис. 5.1. Визначення параметрів  $\mu$ ,  $\alpha_M$  та  $\beta_M$  за відомим  $P_0$

3. Визначення значень СКВ складових загальної похибки вимірювання пускового моменту. Згідно з теоретичним дослідженням приймаємо, що  $\sigma_P \approx 0,002$  [Н · м], а  $\sigma_S$  тоді можна визначити за емпіричною формулою

$$\sigma_S = (2...5) \cdot \sigma_P = 4 \cdot 0,002 = 0,008 [\text{Н} \cdot \text{м}]. \quad (5.2)$$

Тоді за формулою (4.32) можна визначити значення СКВ складової похибки, яка виникає за рахунок квантування АЦП,

$$\sigma_D = \sigma_S / \mu = \frac{0,008}{5,60} = 0,0014 [\text{Н} \cdot \text{м}]. \quad (5.3)$$

4. *Розрахунок необхідної кількості розрядів АЦП.* Виконавши необхідні перетворення (4.14), можна записати вираз для знаходження необхідної кількості розрядів АЦП  $n$  (округлюють до більшого цілого)

$$n = \frac{\ln\left(\frac{|M_{\max} - M_{\min}|}{\sigma_D}\right)}{\ln 2} - 1 = \frac{\ln\left(\frac{|20 - 0|}{0,0014}\right)}{\ln 2} - 1 \approx 12. \quad (5.4)$$

5. *Розрахунок основних часових параметрів вимірювального перетворення.* Для вибору конкретного типу АЦП, приводного двигуна та для правильної організації етапів алгоритму вимірювання пускового моменту необхідно розрахувати час підготовки до вимірювання –  $t_1$  та час вимірювання пускового моменту –  $t_2$ . Якщо  $n_\varphi = 60$  це задана кількість кутових положень, в яких вимірюється пусковий момент, то згідно з (3.20) можна записати, що

$$t_1 = t_2 = \frac{t_{\text{кз}}}{2 \cdot n_\varphi} = \frac{10}{2 \cdot 60} = 0,0833 [\text{с}]. \quad (5.5)$$

Час перетворення, який використовує ПСВЗ, залежить від його схемотехнічної реалізації. Якщо використовується ПСВЗ, наведений в дисертації (див. рис. 3.6), то його час перетворення відомий і дорівнює  $t_{\text{вп}} = 0,07...0,1$  секунди. Тоді за формулою (3.18) можна визначити максимальний час перетворення АЦП

$$t_{\text{ацп}} = t_2 - t_{\text{вп}} = 0,0833 - 0,08 = 0,0033 \text{ [с]}. \quad (5.6)$$

Маючи значення необхідної розрядності АЦП, яке розраховане на етапі 4, та максимальний час перетворення АЦП, можна вибрати конкретний тип АЦП.

З теоретичного дослідження відомо, що час заспокоєння торсіонного сенсора  $t_{\text{засп}}$  набагато менший за час заспокоєння приводного двигуна  $t_{\text{пд}}$ , тобто, згідно з (3.17), можна вважати, що

$$t_{\text{пд}} \leq t_1 \text{ або } t_{\text{пд}} = (0,8 \dots 0,9) \cdot t_1 = 0,9 \cdot 0,0833 = 0,07497 \text{ [с]}. \quad (5.7)$$

Визначивши таким чином  $t_{\text{пд}}$ , можна вибрати приводний двигун, користуючись наступними вимогами:

- пусковий момент на виході редуктора, який встановлено на валу приводного двигуна, повинен бути більший за верхню межу вимірювання пускового моменту ОВ;
- кількість можливих кутових положень крокового двигуна разом з редуктором за один повний оберт вихідного вала редуктора повинна бути більшою або дорівнювати параметру  $n_{\phi}$ ;

тобто можна сформулювати такі вимоги для вибору ПД:

$$t_{\text{пд}} \leq 0,07497 \text{ [с]}, M_{\text{пд}} \cdot i^* \geq 20 \text{ [Н} \cdot \text{м]}, n_{\text{пд}} \cdot i^* \geq 60, \quad (5.8)$$

де  $M_{\text{пд}}$  – пусковий момент ПД;

$n_{\text{пд}}$  – кількість кутових положень ПД за один оберт;

$i^*$  – передаточне число хвильового редуктора.

*б. Розрахунок параметрів торсіонного сенсора.* Тип торсіону та його геометричні параметри впливають на рівняння перетворення ПВП типу “момент – напруга”. В дисертації доведено, що торсіон типу “телескопічний вал” (див. табл. 2.3) має найменші геометричні розміри у

порівнянні з іншими, тому доцільно при проектуванні використовувати саме цей тип торсіону.

За формулою (2.19) задають параметри торсіону таким чином, щоб максимальний кут його деформації  $\varphi_{\max}$  дорівнював  $0,01^\circ$ . Це дасть змогу в подальшому не враховувати похибку, яка виникає за рахунок зсуву ротора ОВ з кутового положення, в якому виконують вимірювання пускового моменту. Формула для визначення параметрів торсіону така:

$$\frac{\varphi_{\max}}{M_{\max}} = \frac{2 \cdot l_T}{G \cdot \pi} \cdot \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{(R_{iT}^4 - r_{iT}^4)}, \quad (5.9)$$

де  $N_B$  – кількість валів у системі “телескопічний” вал (рекомендована кількість валів – 3);

$R_{iT}$  – зовнішній радіус  $i$ -го вала;

$r_{iT}$  – внутрішній радіус  $i$ -го вала;

$l_T$  – довжина торсіону;

$G$  – модуль зсуву.

Серед матеріалів, з яких необхідно виготовити торсіон, будемо розглядати лише ізотропні матеріали. Властивості ізотропних матеріалів описуються лише двома незалежними параметрами: модулем пружності –  $E_{\text{мат}}$  та коефіцієнтом Пуасона –  $\mu_{\text{мат}}$ . Для розрахунків пружних елементів, які відчувають закручування, використовують модуль зсуву  $G$ , який розраховують за формулою

$$G = \frac{E_{\text{мат}}}{2 \cdot (1 + \mu_{\text{мат}})}. \quad (5.10)$$

Матеріалом, з якого буде виготовлено торсіон, рекомендовано обирати спеціальну високоякісну метрологічну сталь (наприклад, типу 38ХГСА [48]). Метрологічна сталь такого типу практично вільна від явища гістерезису.

Розраховані параметри торсіону наведені в табл. 5.2.



Таблиця 5.2

## Розраховані параметри торсіону типу “телескопічний вал”

Параметри		Значення
Довжина торсіону – $l_t$ , мм		35
Кількість валів у системі “телескопічний” вал – $N$		3
1-й вал системи	Зовнішній радіус – $R_{1t}$ , мм	25
	Внутрішній радіус – $r_{1t}$ , мм	20
2-й вал системи	Зовнішній радіус – $R_{2t}$ , мм	20
	Внутрішній радіус – $r_{2t}$ , мм	15
3-й вал системи	Зовнішній радіус – $R_{3t}$ , мм	15
	Внутрішній радіус – $r_{3t}$ , мм	10
Матеріал торсіону – метрологічна сталь типу 38ХГСА	Модуль пружності – $E_{\text{мат}}$	$1,6 \cdot 10^{11}$
	Коефіцієнт Пуасона – $\mu_{\text{мат}}$	0,0676
	Модуль зсуву – $G$	$7,493 \cdot 10^{10}$

7. *Розрахунок параметрів первинного вимірювального перетворювача.* Головна мета при визначенні параметрів ПВП полягає в тому, щоб вихідний діапазон вихідної напруги після ПСВЗ співпадав з вхідним діапазоном напруг обраного на 5 етапі АЦП. Якщо  $U_{D \max}$  – це максимальне значення вхідної напруги АЦП, то, згідно з (3.8), параметри ПВП визначають за формулою

$$U_{D \max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \varphi_{\max} \cdot \left( \frac{2 \cdot w_2 \cdot U_1}{\pi \cdot w_1} \right). \quad (5.11)$$

де  $U_1$  – напруга живлення первинної обмотки ПВП;

$w_1$  та  $w_2$  – кількість витків первинної та вторинної обмоток обох трансформаторів ПВП.

Обравши напругу живлення первинної обмотки ПВП типу “момент – напруга”, варіюють значеннями кількостей обмоток  $w_1$  та  $w_2$ , щоб виконувався вираз (5.11). Якщо  $U_{D \max} = 5$  В,  $U_1 = 220$ В, співвідношення  $w_2/w_1 \approx 5$ , тоді  $w_1 = 40$ , а  $w_2 = 200$ .

8. *Розрахунок необхідної ємності оперативної пам'яті МПК, в якій будуть зберігатись виміряні значення пускового моменту.* Розрахункова формула має такий вигляд:

$$V_{\text{ОЗП}} = n_{\phi} \cdot 2 = 60 \cdot 2 = 120 \text{ [байт]}. \quad (5.12)$$

Виконавши необхідні розрахунки ВКПМ та обравши конкретні складові елементи, переходять до наступної стадії проектування ІВС.

### **5.1.2. Апаратно-програмна реалізація ІВС для визначення пускового моменту**

Архітектура побудови ІВС для визначення пускового моменту має у своєму складі ВКПМ, МПК та ПЕОМ (див. рис. 1.1). Тому необхідно розподілити функції між мікроконтролером та комп'ютером.

Мікроконтролер повинен забезпечувати керування процесом вимірювання і накопичення вимірювальної інформації, тому за ним необхідно закріпити такі функції:

- керування кроковим двигуном;
- керування електронним варіатором напруги;
- виконання процесу вимірювання пускового моменту;
- накопичення вимірювальної інформації;
- прийом команд від ПЕОМ;
- пересилка вимірювальної інформації у ПЕОМ.

ПЕОМ повинна керувати мікроконтролером, тобто задавати режими його роботи та, отримавши вимірювальну інформацію від МПК, обробити її та представити користувачу у зручному вигляді. Тому ПЕОМ повинна виконувати такі функції:

- керувати режимами роботи МПК;
- отримувати від МПК вимірювальну інформацію;
- обробляти отриману вимірювальну інформацію;
- виконувати тестування ІВС на працездатність;

- представляти користувачу результати випробувань у зручному вигляді, а також зберігати результати вимірювань для подальшої обробки.

Мікропроцесорний засіб вимірювання пускового моменту в автоматизованому режимі побудовано на базі однокристальної мікро-ЕОМ типу PIC16C874 виробництва корпорації Microchip® [91]. Принципова схема контролера наведена у додатку В.

Однокристальна мікро-ЕОМ типу PIC16C874 представляє собою високоінтегрований RISC-процесор здатний працювати на частотах до 20 МГц з виконанням команд за один такт, що у декілька разів швидше у порівнянні з іншими процесорами даного класу, та містить у собі:

- 8К слів (по 14 біт) пам'яті програм типу FLASH;
- 368 байт пам'яті даних (оперативна пам'ять);
- 256 байт пам'яті даних (електрично незалежна пам'ять);
- 8 каналний 12-розрядний швидкодіючий АЦП (час перетворення 0,001 с);
- універсальний синхронно-асинхронний приймач-передавач, який сумісний зі стандартом RS-232 (COM).
- 3 16-бітних таймери / лічильники;
- 2 модулі широтно-імпульсної модуляції та інше.

Параметри обраної мікро-ЕОМ повністю задовольняють потреби, які визначені у попередньому розділі. Фірмою-виробником дана мікро-ЕОМ рекомендується для використання в контрольно-вимірювальній техніці та для систем автоматичного керування [92, 93]. Крім того, вартість даної мікросхеми дуже незначна у порівнянні з аналогічними мікросхемами інших виробників (Motorola, Intel, Philips).

Засіб вимірювання пускового моменту виконано як зовнішній прилад, який з'єднується засобами інтерфейсу RS-232 [94, 95] з ПЕОМ та потребує для своєї роботи стабільне джерело живлення з електронним варіатором напруги. Засіб керує приводним двигуном, об'єктом вимірювання, процесом вимірювання пускового моменту та передачею даних у ПЕОМ.

Розроблений засіб вимірювання пускового моменту виконує дослід КЗ у повному обсязі в автоматизованому режимі, що забезпечується двома програмами. Перша програма – це програма, яка керує роботою контролера і міститься в його ПЗП. Ця програма написана мовою програмування C++ [96, 97] і наведена в додатку Г. Для транслювання програми у бінарний файл, який прошивається у ПЗП контролера, використано спеціальний компілятор корпорації Microchip®, який можна замовити на офіційній Web-сторінці в мережі Internet. Такий процес програмування ПЗП дуже зручний та швидкий, тому що програмування на асемблері забирає дуже багато часу та потребує знання особливостей RISC-процесорів.

Алгоритм роботи програми контролера відповідає алгоритму проведення досліду КЗ, який наведено на рис. 3.7. Режимом роботи контролера керує зовнішня програма з ПЕОМ, яка написана алгоритмічною мовою Borland Delphi 5.0 [98 – 100] та наведена в додатку Д. Для взаємодії з контролером використовується протокол обміну. Розрізняють два протоколи:

- протокол обміну даними для режиму “Вимірювання пускового моменту” наведений у табл. 5.3.
- протокол обміну даними для режиму “Тестування засобу вимірювання” наведений у табл. 5.4.

Програма для ПЕОМ має зручний інтерфейс користувача (зовнішній вигляд робочого поля програми наведений на рис. 5.2) та дозволяє виконувати такі операції для налагодження та проведення вимірювання пускового моменту:

- Вибір комунікаційного порту, до якого підключено засіб вимірювання пускового моменту (COM1...COM4).
- Задавання максимального часу, на який може бути загальмовано ОВ під час проведення досліду КЗ. Цей параметр впливає на загальну кількість кутових положень, в яких буде виконане вимірювання пускового моменту за один повний оберт ротора двигуна.

Таблиця 5.3

Протокол обміну даними між контролером та ПЕОМ  
для режиму “Вимірювання пускового моменту”

ПЕОМ	Напрямок	Контролер	Коментар
0x 1C	→		Початок проведення досліду КЗ
Low (N)	→		N – кількість кутових положень, в яких вимірюється пусковий момент
High (N)	→		
n	→		
	←	0x C1	Відповідь про готовність вимірювання залежності пускового моменту від кутового положення ротора ОВ
	←	$\begin{cases} \text{Low}(M_1) \\ \text{High}(M_1) \\ \vdots \\ \text{Low}(M_N) \\ \text{High}(M_N) \end{cases}$	Передача N вимірних значень пускового моменту в ПЕОМ
	←	0x C2	Відповідь про готовність вимірювання залежності пускового моменту від напруги живлення ОВ
	←	$\begin{cases} \text{Low}(M_1) \\ \text{High}(M_1) \\ \vdots \\ \text{Low}(M_X) \\ \text{High}(M_X) \end{cases}$	Передача X вимірних значень пускового моменту в ПЕОМ (X = 200)

Таблиця 5.4

Протокол обміну даними між контролером та ПЕОМ  
для режиму “Тестування засобу вимірювання”

ПЕОМ	Напрямок	Контролер	Коментар
0x FC	→		Початок тестування засобу вимірювання
Low (Y)	→		Y – випадкове кутове положення ротора
High (Y)	→		
	←	0x CF	Відповідь про готовність тестування засобу вимірювання
	←	$\begin{cases} \text{Low}(M_1) \\ \text{High}(M_1) \\ \vdots \\ \text{Low}(M_X) \\ \text{High}(M_X) \end{cases}$	Передача X вимірних значень пускового моменту в ПЕОМ (X = 1000)

- Отримання залежності пускового моменту від кутового положення ротора ОБ.
- Визначення мінімального пускового моменту електродвигуна та кута, який цьому моменту відповідає.
- Отримання залежності пускового моменту електродвигуна від напруги живлення ОБ.
- Тестування засобу вимірювання (багаторазові вимірювання моменту, який створює ЗЗМ у випадковому кутовому положенні).

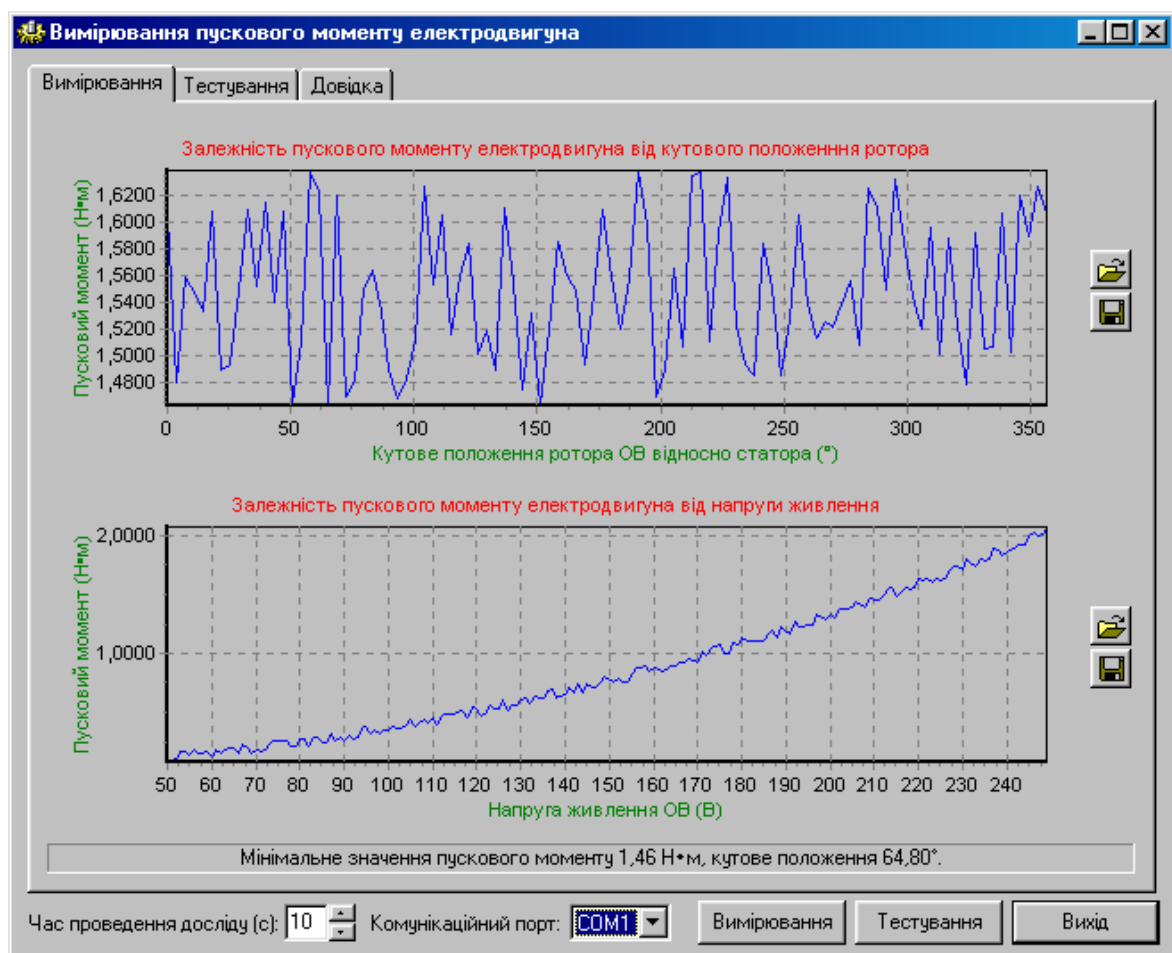


Рис. 5.2. Зовнішній вигляд програми для ПЕОМ

Для контролю стану засобу вимірювання передбачено чотири світлодіодних індикатори, які відображають поточний стан контролера:

1. “Засіб вимірювання працює нормально” – загоряється тоді, коли після ввімкнення засіб вимірювання переходить в режим очікування команд від програми з ПЕОМ;
2. “Працює приводний двигун” – загоряється тоді, коли приводний двигун виконує позиціонування у нове кутове положення;
3. “Вимірювання” – загоряється тоді, коли виконується вимірювання значення пускового моменту;
4. “Передача даних” – загоряється тоді, коли виконується передача даних від контролера у ПЕОМ.

## 5.2. Експериментальні дослідження асинхронного двигуна середньої потужності

В ході експериментів проводилося дослідження пускового моменту АД типу 4АА56А4. На рис. 5.3 наведено фрагмент залежності пускового моменту від часу, який отримано на першому етапі досліді КЗ.

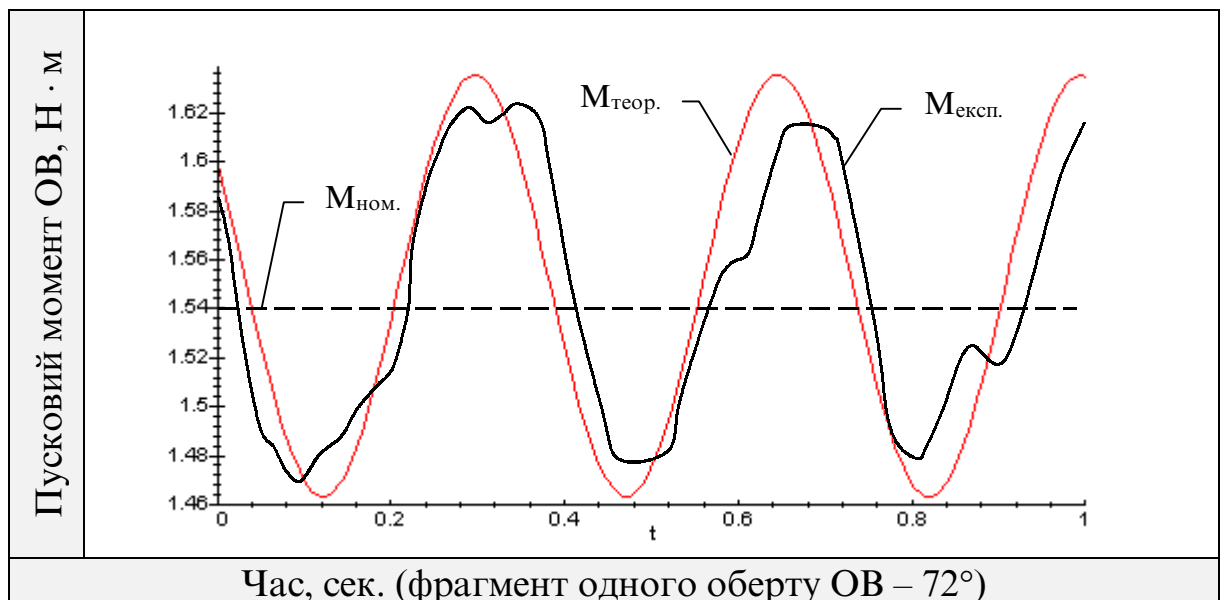


Рис. 5.3. Залежність теоретичного та вимірюваного пускового моментів ОБ від часу

На рис. 5.3  $M_{\text{ном.}}$  – номінальне значення пускового моменту двигуна, яке визначається за паспортними даними,  $M_{\text{теор.}}$  – теоретичне значення пускового моменту двигуна, яке можна розрахувати за формулою (2.1),  $M_{\text{експ.}}$  – експериментальне значення пускового моменту, яке отримано за допомогою розробленої ІВС. Розрахуємо похибку, яка характеризує розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень за формулою

$$\delta_{M(\alpha)} = \frac{M_{\text{теор.}} - M_{\text{експ.}}}{M_{\text{експ.}}} \cdot 100 \% . \quad (5.13)$$

Значення цієї похибки знаходиться в межах 2...10 %. Аналізуючи наведені залежності, можна сказати, що експериментальна крива непогано наближається до теоретичної кривої, а за максимальними значеннями не перевищує сформований теоретичною кривою діапазон.

Другий етап дослідження КЗ – це визначення залежності пускового моменту ОВ в кутовому положенні ротора з мінімальним пусковим моментом, який знайдено на попередньому етапі, від напруги живлення ОВ. Графік цієї залежності наведено на рис. 5.4, де  $M(U)_{\text{теор.}}$  – теоретична залежність пускового моменту від напруги живлення ОВ, а  $M(U)_{\text{експ.}}$  – експериментальна залежність пускового моменту від напруги живлення ОВ.

Розрахуємо похибку і для цього етапу дослідження КЗ за формулою

$$\delta_{M(U)} = \frac{M(U)_{\text{теор.}} - M(U)_{\text{експ.}}}{M(U)_{\text{експ.}}} \cdot 100 \% . \quad (5.14)$$

Значення цієї похибки знаходиться в межах 1,5...5 %. Аналізуючи наведені залежності (див. рис. 5.4), можна сказати, що експериментальна крива також непогано наближається до теоретичної кривої, але це твердження справедливе лише для конкретного двигуна, який випробовується.



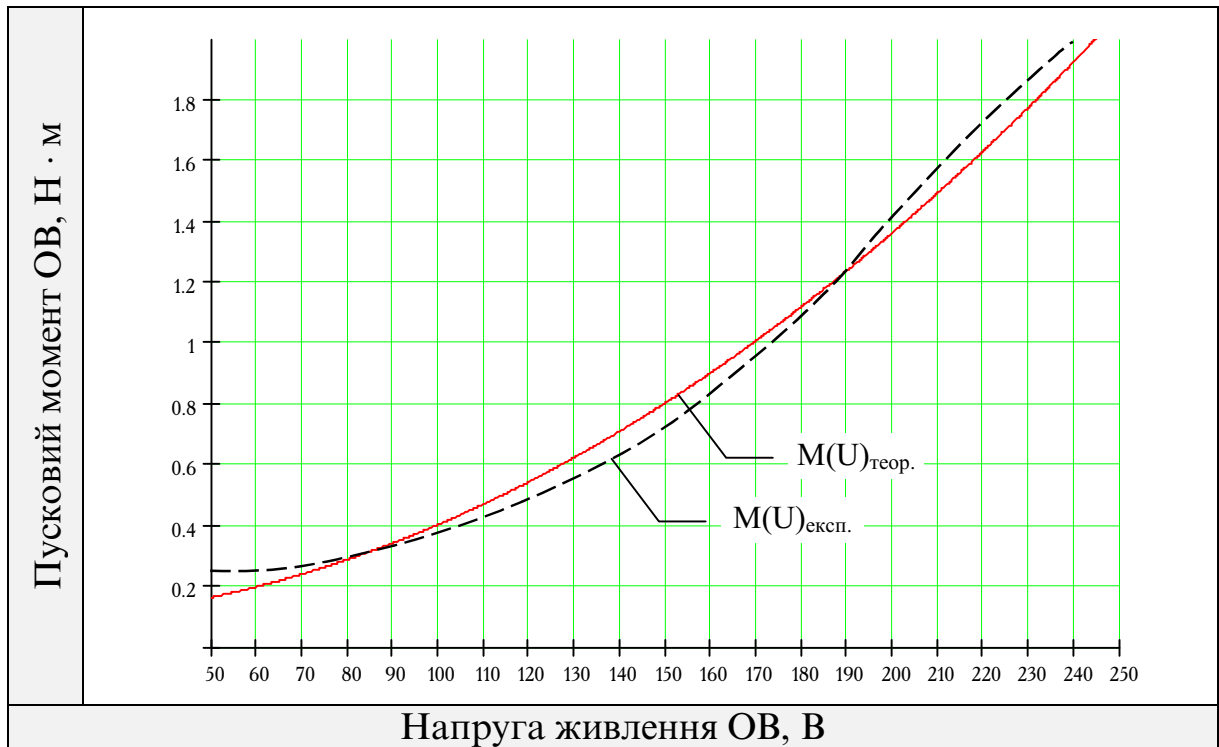


Рис. 5.4. Залежність теоретичного та виміряного пускового моментів ОБ від напруги живлення

### 5.3. Методика метрологічної атестації засобу вимірювання пускового моменту

На сьогодні відомий спосіб метрологічної атестації засобів вимірювання пускового моменту, в основу побудови якого покладено метод зразкових мір. В ролі задавача зразкового моменту використано пристрій, який має у своєму складі такі елементи: зразковий тягар  $Q$ , який підвішений на металевій струні. Вільний кінець струни закріплено на диску, радіус  $R$  якого відомо з високою точністю. Тоді зразковий момент опосередковано визначається як добуток  $M_d = Q \cdot R \cdot g$ , де  $g$  – прискорення вільного падіння.

Метрологічні випробування у даному випадку, засновані на дії зразкового моменту  $M_d$  на вхід засобу вимірювання. Співставляючи вимірні значення моменту на вході вимірювального перетворювача з ве-

личиною зразкового моменту, визначають метрологічні характеристики засобів вимірювання пускового моменту. Реалізація зразкового моменту у вигляді задавача, що має у своєму складі атестований диск, на який намотується струна з зразковим тягарем, відтворює зразковий момент з похибкою, яка за рахунок коливань струни та зменшення її ваги в процесі експерименту може досягати 1,5...2% [101]. Тому галузь застосування даного задавача – метрологічна атестація засобів вимірювання, в яких величина нормованої зведеної похибки  $\gamma_{зв} \geq 5\%$ .

Крім того, атестація за допомогою зразкового тягара, який підвішено на металевій струні, для приводного КД не зовсім зручна. Бо при переході з одного кутового положення КД в наступне в металевій струні виникають коливання, тривалість яких може складати десятки секунд. Тому даний зразковий засіб застосовують тільки під час атестації вимірювальних каналів з асинхронним приводним двигуном [101].

Для атестації розробленого засобу вимірювання пускового моменту виникає необхідність використання іншого задавача зразкового моменту. В ролі такого пристрою – задавача зразкового моменту (ЗЗМ) – пропонується вимірювальний важіль (довжина важеля відома і дорівнює  $l$ ), який з одного боку закріплюється до вихідного вала редуктора приводного двигуна, а на протилежному боці знаходиться зразковий тягар  $Q_3$  [102]. На рис. 5.5 показано зовнішній вигляд ЗЗМ, який встановлюється замість ОВ на конструктивній схемі ВКПМ.

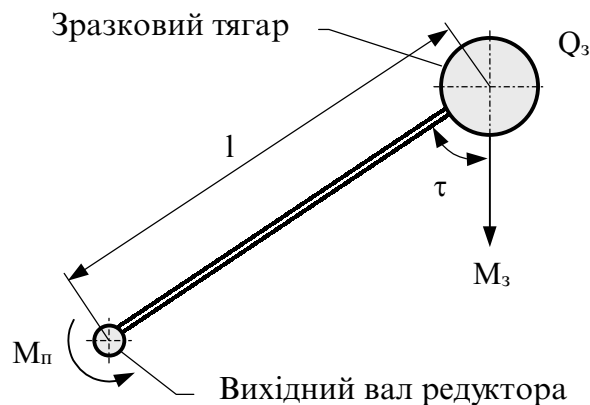


Рис. 5.5. Зовнішній вигляд ЗЗМ

Тоді в процесі покрокового обертального руху на вихідному валі хвильового редуктора створюється зразковий момент, який дорівнює

$$M_{o3}(\tau) = M_3 \cdot \sin(\tau), \quad (5.15)$$

де  $M_3 = Q_3 \cdot g \cdot l$  – зразковий обертальний момент (Н · м);

$\tau$  – кут між важелем та напрямком дії сили тяжіння.

Врахувавши (5.15) та використавши нелінійну модель крокового двигуна (2.9), математична модель для метрологічної атестації засобу вимірювання пускового моменту матиме вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d^2\theta}{dt^2} + pn\Phi_m i_a \sin(p\theta) + pn\Phi_m i_b \sin(p(\theta - \lambda)) = 0; \\ V - r \cdot i_a - L \cdot \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_b}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p\theta)] = 0; \\ V - r \cdot i_b - L \cdot \frac{di_b}{dt} - M \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p \cdot (\theta - \lambda))] = 0; \\ M_{em}(t) = nN_r \Phi_m \cdot [i_a(t) \cdot \sin(N_r \cdot \theta(t)) + i_b(t) \cdot \cos(N_r \cdot \theta(t))]; \\ \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} + \omega^2 \cdot \varphi(t) = \frac{M_{o3}(\tau)}{J^*}; \\ M_{o3}(\tau) = M_3 \cdot \sin(\tau); \\ M_y(t) = i^* \cdot \eta \cdot M_{em}(t) - M_c(t), \end{array} \right. \quad (5.16)$$

де  $M_y$  – сумарний момент, який деформує торсіонний сенсор;

$M_c$  – момент, який створює ЗЗМ на торсіонному сенсорі.

Перші чотири рівняння системи (5.16) являють собою нелінійну математичну модель крокового двигуна, яку було розв'язано раніше чисельними методами у середовищі символічної математики Maple V5 та отримано  $M_{em}(t)$  як функцію часу.

П'яте диференціальне рівняння в системі (5.16), що описує процес руху рухомої частини вимірювального перетворювача засобу вимірювання, представляє собою неоднорідне рівняння з постійними коефіцієнтами, розв'язок якого отримаємо аналітично у вигляді

$$\varphi(t) = \frac{M_3 \cdot \sin(\tau)}{C} \times \left\{ 1 - e^{-\varepsilon \omega t} \cdot \left[ \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \cdot \sin(\sqrt{1 - \varepsilon^2} \omega t) + \cos(\sqrt{1 - \varepsilon^2} \omega t) \right] \right\}. \quad (5.17)$$

З урахуванням функції перетворення торсіонного сенсора, згідно з (2.26) та (2.28), через коефіцієнт

$$K_1 = \frac{G \cdot \pi}{2 \cdot l_T \cdot \sum_{i=1}^{N_B} \frac{1}{(R_{iT}^4 - r_{iT}^4)}} \quad (5.18)$$

остаточний розв'язок диференційного рівняння (5.17) має вигляд

$$M_c(t) = K_1 \cdot \varphi(t) \quad (5.19)$$

Графічно залежність моменту на торсіонному сенсорі від часу та кута між важелем та напрямком дії сили тяжіння при моделюванні ЗЗМ ( $Q_3 = 1$  кг,  $l = 0,1$  м) представлено на рис. 5.6.

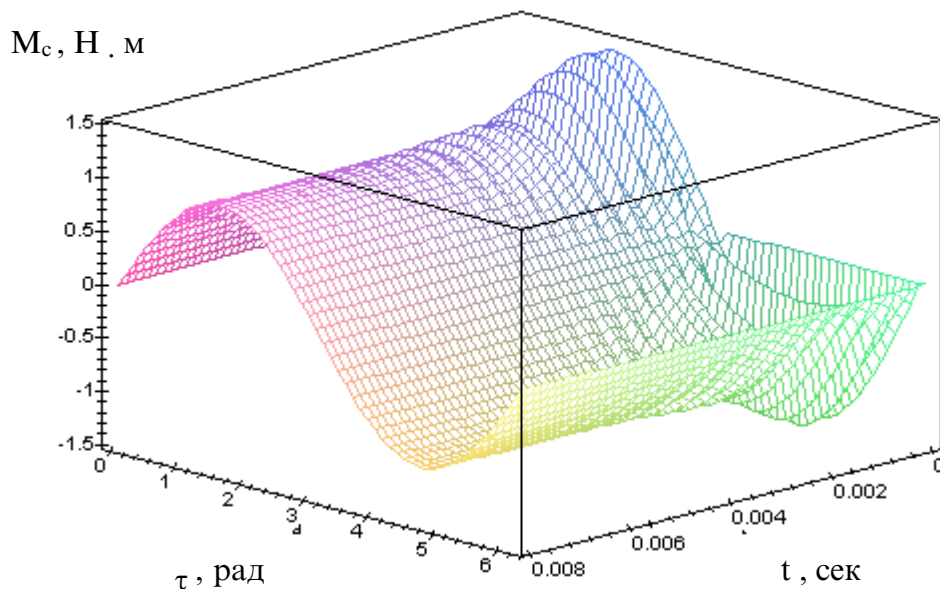


Рис. 5.6. Залежність  $M_c$  від  $t$  та  $\tau$

Розглянемо більш детально процеси, які виникають у метрологічному засобі під час атестації вимірювального каналу пускового моменту. На рис. 5.7 наведено зразковий момент  $M_{03}(\tau)$ , який діє на ВКПМ, та момент, який виникає на ТС та вимірюється ВКПМ  $M_y(t)$ .

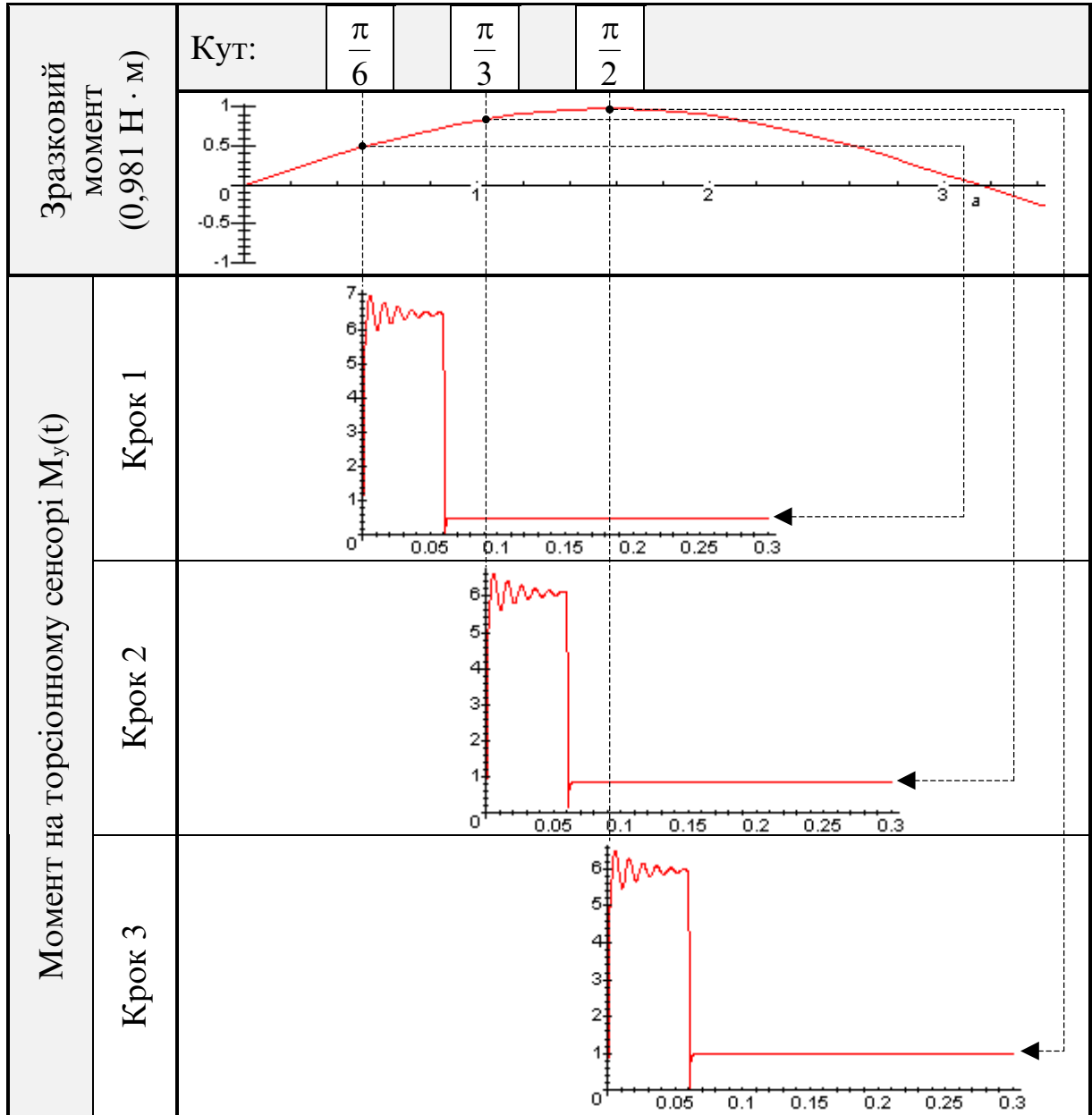


Рис. 5.7. Результати моделювання метрологічної моделі

З аналізу наведених залежностей (див. рис. 5.7) видно, що після закінчення перехідного процесу в засобі для метрологічної атестації ВКПМ момент на торсіонному сенсорі відповідає зразковому моменту, який створює запропонований ЗЗМ.

Порівняльна характеристика результатів показує, що в останній моделі відсутня випадкова складова похибки  $\Delta$  за рахунок коливань моменту. В даному випадку сумарна складова похибки визначається переважно систематичною складовою

$$\bar{\Delta} = M_{\text{MC}}(t) + M_{\text{BB}}(t) = e \cdot \cos(\Omega t) + Q_{\text{BB}} \cdot g \cdot l \cdot \sin(\tau), \quad (5.20)$$

де  $M_{\text{MC}}(t)$  – момент від ексцентриситету муфти спряження;

$M_{\text{BB}}(t)$  – додатковий момент, що створює вимірювальний важіль в процесі обертання навколо вісі ротора приводного двигуна;

$Q_{\text{BB}}$  – маса самого важеля.

Для зменшення впливу систематичної складової похибки необхідно застосувати метод дворазових спостережень [103, 104]. Тобто, виконати вимірювання не за один, а за два оберти приводного двигуна: причому, протягом першого оберту без зразкового тягара, а протягом другого оберту із зразковим тягарем.

Крім того, необхідно врахувати і ту обставину, що в момент включення приводного двигуна виникає перехідний процес [105], і в цьому проміжку часу вихідний сигнал суттєво відрізняється від вхідного, що може викликати суттєву похибку. Тому вимірювання зразкового моменту необхідно починати після завершення перехідного процесу.

#### 5.4. Експериментальне дослідження похибок ІВС

Для експериментального дослідження похибок вимірювання пускового моменту ОВ використано задавач зразкового моменту, який розроблено у попередньому розділі. Цей задавач зразкового моменту відтворює значення пускового моменту з нормованою зведеною похибкою  $\gamma_{\text{зв}} \geq 0,5\%$  [102].

Щоб визначити похибку вимірювання  $M_{п}$ , у випадковому положенні ротора ПД було виконане багаторазове вимірювання (1000 вимірів) пускового моменту, який створював задавач зразкового моменту, за допомогою розробленої ІВС та спеціального тестового режиму у середовищі розробленого програмного забезпечення.

Експеримент проводився за наступними умовами: величина зразкового моменту –  $2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; кутове положення обране випадково та зафіксоване ПД; проміжок часу між вимірами – 0,3 секунди; загальна кількість вимірів – 1000; значення вихідного сигналу реєструється програмно та накопичується для подальшого аналізу.

Маючи значення величини зразкового моменту, можна розрахувати значення абсолютних похибок вимірювання пускового моменту у заданому кутовому положенні ротора за формулою

$$\Delta M_i = M_i - M_{ззм}, \quad i \in [1 \dots N_x], \quad (5.21)$$

де  $\Delta M_i$  – значення абсолютної похибки вимірювання  $M_{п}$ ;

$M_i$  – виміряне значення пускового моменту;

$M_{ззм}$  – момент, який створює задавач зразкового моменту;

$N_x$  – кількість зроблених вимірів.

Середньоквадратичне значення загальної похибки вимірювання пускового моменту визначимо за виразом [85]

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} (\Delta M_i - \bar{x})^2}{N_x - 1}}, \quad (5.22)$$

де  $\bar{x}$  – координата центру розподілу, яка визначається за формулою

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \Delta M_i}{N_x}. \quad (5.23)$$

За розрахунками СКВ загальної похибки вимірювання пускового моменту дорівнює 0,0032 Н · м. Якщо відомі СКВ загальної похибки вимірювання пускового моменту, СКВ похибки, що зумовлена пульсацією вихідного сигналу ПСВЗ, СКВ похибки, що зумовлена квантуванням АЦП вихідного сигналу, можна визначити СКВ похибки, яка зумовлена дією випадкових завад за формулою, згідно з (4.21)

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_M^2 - \sigma_P^2 - \sigma_D^2}. \quad (5.24)$$

Розраховане значення СКВ похибки, яка зумовлена дією випадкових завад, дорівнює 0,0021 Н · м, що свідчить про те, що експериментальне значення  $\sigma_s$  попадає у діапазон, який досліджувався теоретично у четвертому розділі дисертації.

Якщо розроблена ІВС для визначення пускового моменту електродвигунів використовується для контролю якості продукції на електротехнічному заводі, необхідно визначити помилки контролю.

За формулою (4.32) розрахований параметр  $\mu = 1,50$ , за яким, графічним шляхом (див. рис. 5.1) були отримані експериментальні значення помилок контролю пускового моменту, а саме: помилка першого роду – 0,00036; помилка другого роду – 0,00038; загальна безумовна ймовірність помилкового рішення – 0,00074. Одержані результати свідчать про добру збіжність експериментальних досліджень з результатами, які отримано теоретично.

## **В и с н о в к и**

В п'ятому розділі дисертації отримано такі результати:

1. Розроблена методика інженерного проектування ІВС для вимірювання пускового моменту. Дано рекомендації, за якими обирають тип торсіону, приводного двигуна та інше. Проектування містить



два етапи: розробка апаратних засобів та розробка програмного забезпечення, які проілюстровано на конкретному прикладі.

2. Розроблено принципову електричну схему вимірювального каналу пускового моменту на базі мікропроцесорного контролера, яку реалізовано на сучасній елементній базі з використанням RISC-процесора PIC16C874.
3. Розроблено програмне забезпечення для ПЕОМ та МПК, що дозволяє здійснювати вимірювання пускового моменту ОВ та проводити тестування самого засобу вимірювання.
4. Проведено експериментальне дослідження асинхронного двигуна типу 4AA56A4, отримано основні залежності досліду КЗ. Похибка, яка характеризує розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень, для вимірювання залежності  $M_n = f(\alpha)$  становила 2...10%, для вимірювання залежності  $M_n = f(U_k) - 1,5...5\%$ .
5. Запропоновано методику метрологічної атестації засобу вимірювання пускового моменту та новий задавач зразкового моменту для здійснення цієї процедури у діапазоні 0,12...20 Н · м. Зведена похибка вимірювального каналу пускового моменту 0,5 %, що в 2 – 3 рази точніше за відомі засоби.
6. За допомогою задавача зразкового моменту отримано експериментальне значення похибки вимірювання пускового моменту у випадковому кутовому положенні ротора ОВ та похибки контролю, що засвідчило добру збіжність експериментальних досліджень з теоретичними.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Визначення пускового моменту електродвигунів є складною і трудомісткою вимірювальною процедурою. Складність полягає в здійсненні сумісних вимірювань пускового моменту від кутового положення ротора, знаходженні мінімального пускового моменту і вимірюванні залежності мінімального пускового моменту від напруги живлення. Здійснення таких вимірювань можливе за допомогою ІВС, основним елементом якої є вимірювальний канал пускового моменту. Відомі вимірювальні канали пускового моменту характеризуються достатньою швидкістю, але мають невисоку точність. З метою підвищення точності виникає задача вилучення методичної складової похибки і зменшення інструментальної, які притаманні відомим засобам. Для розв'язку цієї задачі необхідно вдосконалити відомі методи вимірювань і розробити нові вимірювальні канали, в яких інформативний параметр вимірюється безпосередньо у місці його виникнення.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи є такими:

*У галузі теоретичних та експериментальних досліджень:*

1. Дістала подальший розвиток відома класифікація вимірювальних каналів пускового моменту, яку доповнено новими класифікаційними ознаками: за способом вимірювання – “за реакцією торсіону”; за фізичним принципом дії – “з приводом ротора ОВ”; за типом приводного двигуна – “кроковий двигун”; за архітектурою побудови – “мікропроцесорні”. Нова класифікація дозволить більш повно охопити вимірювальні канали пускового моменту.
2. Вдосконалено метод визначення пускового моменту, який відрізняється тим, що для безпосереднього вимірювання інформативного параметра у місці його виникнення застосовано торсіонний сенсор, а для вилучення методичної похибки – покроковий режим роботи

приводного двигуна. Точність вимірювання пускового моменту зростає в 2 – 3 рази порівняно з відомими засобами.

3. Розроблено математичну модель вимірювального каналу пускового моменту для вимірювання залежності пускового моменту від кутового положення ротора об'єкта вимірювання у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь, яку розв'язано чисельними методами у середовищі символічної математики Maple V5. Встановлено, що запропонована модель адекватно відтворює фізичні процеси, що протікають у вимірювальному каналі, а похибка не перевищує 7...8%.
4. Розроблено математичну модель вимірювального каналу пускового моменту для вимірювання залежності мінімального пускового моменту від напруги живлення електродвигуна у вигляді диференціального рівняння з постійними коефіцієнтами, розв'язок якого отримано аналітично.
5. Вперше одержано аналітичні залежності для визначення тривалості перехідного процесу рухомої частини перетворювача для динамічного режиму роботи вимірювального каналу, що дало змогу реалізувати ІВС, в якій кількість вимірювань залежності  $M_n = f(\alpha)$  максимальна і обмежений час дослідження КЗ використовується без втрат.
6. Визначено та проаналізовано вплив різноманітних завод на похибку вимірювання пускового моменту при використанні розробленої ІВС. Визначено домінуючі (найвпливовіші) складові похибки вимірювання пускового моменту ОВ. Для інших похибок доведено їх незначний вплив або запропоновані шляхи усунення та врахування. Вперше знайдено закони розподілу похибок вимірювання пускового моменту електричних двигунів, сумісний закон розподілу загальної похибки та розраховано показники вірогідності контролю для випадку, коли ІВС використовується для контролю якості продукції електротехнічного заводу.

*У галузі практичного використання:*

1. Розроблено структурну схему інформаційно-вимірювальної системи для визначення пускового моменту електричних двигунів, в якій основним елементом є вимірювальний канал пускового моменту, метрологічні показники якого визначають точність та швидкодію ІВС у цілому.
2. Вперше розроблено структурну схему вимірювального каналу пускового моменту, яка відрізняється від відомих тим, що інформативний сигнал (пусковий момент) вимірюється безпосередньо там, де він виникає – на роторі ОВ торсіонним сенсором. А покроковий режим роботи приводного двигуна дає змогу виконати головну умову досліду КЗ – сковзання ротора під час вимірювання пускового моменту дорівнює одиниці.
3. Розроблено первинний вимірювальний перетворювач пускового моменту типу “момент – напруга” на базі торсіонного сенсора і двох однакових трансформаторних перетворювачів кута повороту. Перевагами розробленого перетворювача є висока точність та швидкість вимірювального перетворення, лінійність статичної характеристики, технологічність виготовлення.
4. За результатами теоретичних досліджень розроблено мікропроцесорний вимірювальний канал пускового моменту з відображенням результатів на ПЕОМ та програмне забезпечення для нього, що дозволяє проводити вимірювання пускового моменту в автоматизованому режимі та проводити тестування вимірювальних каналів розробленої ІВС.
5. Удосконалено алгоритми проведення вимірювання пускового моменту, що дозволяє зменшувати час вимірювання за рахунок двох етапів вимірювання: “грубо” та “точно”.
6. Розроблена методика інженерного проектування подібних ІВС для визначення пускового моменту. Дано рекомендації, за якими обира-

ють тип торсіону, приводного двигуна та інше. Результати проектування проілюстровано на конкретному прикладі.

7. Розроблено методика метрологічної атестації запропонованої інформаційно-вимірювальної системи, яка базується на новому, більш точному, задавачі зразкового моменту.
8. Виконане експериментальне дослідження електричного двигуна типу 4AA56A4. Похибка, яка характеризує розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень, для вимірювання залежності  $M_{\text{п}} = f(\alpha)$  становить 2...10%, для вимірювання залежності  $M_{\text{п}} = f(U_{\text{к}})$  – 1,5...5%.
9. Створено пакет прикладних програм у середовищі Maple V5 для моделювання динамічного та статичного режимів роботи запропонованої інформаційно-вимірювальної системи.

Розроблена в дисертації інформаційно-вимірювальна система для вимірювання пускового моменту електродвигунів малої та середньої потужності, програмне та метрологічне забезпечення може використовуватись і для випробування інших типів двигунів та механізмів, що створюють обертальний момент.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Thiphagne J. Plateforme automatique de controle de moteurs // Techniques CEM. – 1978. – № 103. – P. 28–35.
2. Teissier D., Godfroid H. Plate-forme automatisee pour assais de machines a courant alternatif triphase // Reva de Electricite. – 1984. – P. 658–665.
3. Schopper E. Das ELIN-Diagnose ssystem fur elektrische Grabmaschine // ELIN-Zeit schrift. – 1984. – P. 53–62.
4. Wenger S. ELIN inspection and daignostic system for roteting electrical machines // ELIN. – 1986. – P. 3–67.
5. Bunzel E. Ausgewahlte Problema bei Messungen an elektrischen Maschinen // Elektric. – 1984. – № 6. – P. 227–230.
6. Michalik W., Kunze W. Hard und Soft waregestaltung eines mikrorechnergestutzten Asynchronmaschinenprufstandes // Wissenshaf tliche Beitrage. – 1985. – № 3. – P. 16–19.
7. Prufeinrichtungen fur elektrische Maschinen // Elektrische Maschinen BRD. – 1984. – № 9. – P. 269–273.
8. Cassidy B. Motor test centre-Australian designed // Electrical Engineer. – 1984. – № 8. – P. 27–30.
9. Al Haun. Automated Electric Motor Testing Boosts Productivity // Assembly Engineering. – 1982. – № 12. – P. 20–22.
10. Diehl W. Microprocessor base engine dynamometre date acquisition system // IEEE IECT `79, Annual Conference 5-th, 1979, Proceedings. – P. 210–213.
11. Friedlander. Testing Large Motors by Computer // Electrical World. – 1980. – Vol. 193, № 10. – P. 54–56.
12. MacCormack A., Kieffer V. Fanload Automatic Motor Test Board // US Patent. – 1983.
13. Skotalek I., Hudec M. Automatizace mereni elektrickich stroju tocivych // Elektrotechnik. – 1986. – Vol. 41, № 2. – P. 37–43.

14. Nowinski S., Boreta B., Korbel T. Minikomputerowy system automatyzacji badan silnikow elektrycznych // Wiadomosci Elektrotechniczne LIV. – 1986. – № 7–8. – P. 162–166.
15. Jakubiec J., Filipski P. Minikomputerowy system ladania silnikow asynchronicznych w zestawie Mera 305 “САМАС” // Biuletyn Techyczny Mera. – 1979. – № 6. – P. 14–16.
16. Акимов Л.В., Литвинов О.И., Спанцирети Н.П. Устройство для экспресс-динамометрических испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Электротехника. – 1975. – № 3. – С. 47–50.
17. Акимов Л.В., Борзяк Ю.Г., Литвинов О.И., Сосницкий И.И. Совершенствование динамометрических испытаний асинхронных двигателей // Электротехника. – 1978. – № 9. – С. 45–46.
18. Акимов Л.В., Борзяк Ю.Г., Колесник А.Д., Литвинов О.И., Сосницкий И.И. Исследование асинхронных двигателей перспективных серий // Электротехника. – 1981. – № 10. – С. 29–32.
19. Акимов Л.В., Борзяк Ю.Г., Литвинов О.И., Сосницкий И.И. Идентификация характеристик асинхронных двигателей электроприводов общепромышленного назначения // Сб. Электротехническая промышленность. Сер. “Электрические машины”. – М.: Информэлектро, Вып. 1(131), 1982.
20. Кучерук В.Ю. Аналіз існуючих засобів вимірювання механічних характеристик електричних машин // Вимірювальна техніка та метрологія (Державний університет “Львівська політехніка”). – 1999. – № 54. – С. 125–138.
21. Пат. 21636А України, МПК G 01 L 3/10. Спосіб визначення пускового моменту електродвигуна / Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Кулаков П.І., Лещенко А.В. – № 97020694; Заявл. 18.02.97; Опубл. 30.04.98, Бюл. № 2 Держпатенту України. – 6 с.
22. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. В.В. Ключева. – Кн. 2. – М.: Машиностроение, 1982. – 560 с.
23. Козловский А.В. Разработка обобщенной схемы системы контроля пусковых характеристик электрических машин // Сборник трудов

- міжнародного симпозиума “Наука и підприємательство”. – Вінниця-Львов. – 1998. – С. 288–291.
24. Обзор методов и средств контроля пускового момента электрических машин / Поджаренко В.В., Кухарчук В.В.; ВПИ. – Винница, 1985. – 20 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ, № 1855.
  25. Кухарчук В.В. Разработка методов и средств контроля качественных характеристик (пускового момента) электродвигателей: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.11.13 / ВПИ. – Винница, 1988. – 20 с.
  26. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
  27. Каверкин И.Я., Цветков Э.И. Анализ и синтез измерительных систем. – М.: Энергия, 1974.
  28. Кузьмин И.В. Оценка эффективности и оптимизации автоматических систем контроля и управления. – М.: Советское радио, 1971.
  29. Росин М.Ф., Булыгин В.С. Статистическая динамика и теория эффективности систем управления. – М.: Машиностроение, 1981.
  30. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследований операций. – М.: Наука, 1971.
  31. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследований операций. – М.: Мир, 1971.
  32. Кухарчук В.В. Математична модель вимірювального перетворювача пускового моменту електричних машин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1995. – № 1. – С. 5–9.
  33. Вимірювання і комп’ютерно-вимірювальна техніка: Навч. посіб. / В.А. Поджаренко, В.В. Кухарчук. – К.: УМК ВО, 1991. – 240 с.
  34. Кухарчук В.В. Дослідження метрологічних характеристик вимірювального перетворювача пускового моменту // Тез. доп. міжнародної НТК “Приборостроение-95”. – Львів, 1995. – С. 87.
  35. Кухарчук В.В., Поджаренко В.О. Автоматизація процесу вимірювання пускового моменту електричних машин // Автоматизація технологічних процесів та промислова екологія. – 1996. – № 1. – С. 26–35.



36. Козловський А.В. Спосіб визначення пускового моменту електродвигуна // Сборник трудов международной научно-технической конференции “Приборостроение-98”. – Винница-Симферополь: Ученые записки Симферопольского госуниверситета. – 1998. – С. 208–213.
37. Кухарчук В.В., Козловський А.В. Математична модель вимірювального перетворювача пускового моменту з кроковим двигуном // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1997. – № 3. – С. 11–15.
38. Козловський А.В., Кухарчук В.В. Моделювання контролю залежності пускового моменту в функції кутового положення ротору // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький). – 1999. – № 1. – С. 17–23.
39. Поджаренко В.О., Козловський А.В. Розробка математичної моделі вимірювального перетворювача пускового моменту з торсіонним сенсором // Вимірювальна техніка та метрологія (Державний університет “Львівська політехніка”). – 2000. – №56. – С. 140–147.
40. Рішення про видачу патенту України № 98063116, МПК G 01 L 3/10. Спосіб визначення пускового моменту електродвигуна / А.В. Козловський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко; Заявлено 16.06.1998.
41. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
42. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Кравкин А.Э., Шлаф М.М., Афнин В.И., Соболенская Е.А. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – С. 504.
43. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
44. Козловський А.В. Аналіз адекватності лінеаризованої моделі крокового двигуна // Книга за матеріалами п'ятої міжнародної науково-технічної конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС–99). У 3-х томах. Том 2. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 1999. – С. 160–164.

45. Козловський А.В. Лінеаризація та аналіз адекватності математичної моделі крокового двигуна // Сборник трудов международного симпозиума “Наука и предпринимательство”. – Винница-Львов. – 1999. – С. 147–150.
46. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
47. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учебн. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 320 с.
48. Осипович Л.А. Датчики физических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – 159 с. – (Б-ка приборостроителя).
49. Полішко С.П., Трубенко О.Д. Точність засобів вимірювання: Навч. посібник. – К.: Вища школа, 1992. – 173 с.
50. Иванов М.Н. Волновые зубчатые передачи. – М. Высш. школа, 1981. – 234 с.
51. Рыбальченко Ю.И. Магнитоупругие датчики крутящего момента. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с. – (Б-ка приборостроителя).
52. Козловський А.В., Кухарчук В.В. Моделювання динамічних характеристик вимірювального перетворювача мінімального пускового моменту // Сборник трудов международной научно-технической конференции “Приборостроение – 97”. – Винница - Симеиз. – 1997. – Часть 1. – С. 139–144.
53. Кухарчук В.В. Узагальнена математична модель вимірювального перетворення пускового моменту асинхронних машин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – №1. – С. 11–19.
54. Высшая математика / Под ред. П.Ф. Овчинникова. – К. Вища школа, 1989. – 679 с.
55. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов. / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров; Под. общ. ред. Н.Н. Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

56. Лиманов И.А. Электромагнитные преобразователи перемещений с распределенными параметрами. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 56 с.
57. Конюхов Н.Е. и др. Электромагнитные датчики механических величин. – М.: Машиностроение, 1987. – 265 с.
58. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений: Учеб. пособие. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
59. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин: Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 191 с.
60. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник / Под. ред. Авдеев Б.Я. и др. – 6-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
61. Боднер В.А., Алферов А.В. Измерительные приборы: Учебник: в 2 т. – М.: Изд-во стандартов, 1986. Т. 1. – 392 с.
62. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1981. – 200 с.
63. Домрачев В.Г. и др. Схемотехника цифровых преобразователей перемещения: Справ. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 392 с.
64. Воронцов Л.Н., Кярндорф С.Ф. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
65. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин / Под. ред. Полищука Е.С. – К.: Выща школа, 1984. – 359 с.
66. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи: Учебн. пособие. – К.: Выща школа, 1981. – 296 с.
67. Волгин Л.И. Измерительные преобразователи переменного напряжения в постоянное. – М. Сов. радио, 1997.
68. А. с. № 692488 СССР / Т.А. Пунгас (СССР) // Открытия. Изобретения. – 1980. – № 44.
69. А. с. № 809453 СССР / Т.А. Пунгас (СССР) // Открытия. Изобретения. – 1981. – № 8.
70. А. с. № 1431020 СССР / О.И. Мяртенс (СССР) // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 38.

71. Мяртенс О.И., Пунгас Т.А. Сравнительный анализ преобразователей средневыпрямленного значения переменного тока // Радиотехнические измерения. – 1990. – № 3. – С. 45–47.
72. Четти П. Проектирование источников электропитания / Пер. с англ. С.Ф. Коняхина; Под. ред. В.С. Моина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 238 с.
73. Максимов Л.М. Временная стабильность и температурные погрешности образцовых динамометров // Измерительная техника. – 1963. – №11.
74. Ж. Марше. Операционные усилители и их применение. – М.: Энергия, 1974.
75. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1962.
76. Фрумкин В.Д., Рубичев Н.А., Котляр А.Б. Достоверность контроля средств радиоизмерений и контрольные допуски. – М.: Издательство стандартов, 1975. – 88 с.
77. Фрумкин В.Д., Рубичев Н.А. Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1987. – 168 с.
78. Румшицкий Л.З. Элементы теории вероятностей. – М.: Гос. издат. физико-математической литературы, 1960. – 155 с.
79. Гитис Э.И., Пискулов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоиздта, 1981. – 360 с.
80. Моисеев В.С. Системное проектирование преобразователей информации. – Л.: Машиностроение, 1982. – 255 с.
81. Федорков Б.Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
82. Высокопроизводительные преобразователи формы информации / А.И. Кондалев, В.А. Багацкий, В.А. Романов, В.А. Фабричев. – К.: Наук. думка, 1987. – 280 с.
83. Интегральные микросхемы: Микросхемы для аналого-цифрового преобразования и средств мультимедиа. Выпуск №2. – М.: ДОДЭКА, 1996. – 384 с.

84. Гитис Э.И., Пискулов Е.А. Аналогоцифровые преобразователи: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
85. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1985. – 248 с.
86. Теория вероятностей (Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы) / Ю.В. Прохоров, Ю.А. Розанов. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва “Наука”, 1973.
87. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества. – К.: Техніка, 1981. – 152 с.
88. Кузьмин И.В., Кедрус В.А. Основы теории информации и кодирования. – К.: Издательское объединение “Вища школа”, 1977. – 280 с.
89. Сиднеев И.М. О выборе параметров, определяющих состояние технического устройства при автоматическом контроле // Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. – М. – 1963. – вып. 1020.
90. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные применения. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
91. Офіційна Web-сторінка корпорації Microchip® в мережі Internet: <http://www.microchip.com/picmicro/16f87x/index.htm>.
92. Microchip. Embedded Control Handbook. – Printed in the USA: Microchip®. – 1997. – Vol. 1.
93. Микроконтроллеры. Выпуск 1 – Однокристалльные микроконтроллеры PIC17C4x, PIC17C75x, M3820. – М.: ДОДЭКА, 1998. – 384 с.
94. Maxim. New Releases Data Book. – Printed in the Great Britain: Maxim®. – 1999. – Vol. 8.
95. Офіційна Web-сторінка фірми Maxim® Inc. в мережі Internet: <http://www.maxim-ic.com/>.
96. Эллис М., Страуструп Б. Справочное руководство по языку программирования C++ с комментариями. – М.: “Мир”, 1992. – 314 с.
97. Абель П. Язык ассемблера для IBM PC и программирования / Пер. с англ. Ю.В. Сальникова. – М.: Высш. шк., 1992. – 447 с.
98. Дарахвелидзе П.Г., Марков Е.П. Delphi – средства визуального программирования: – СПб.: VВH – Санкт-Петербург, 1996. – 352 с.

99. Сван, Том. Секреты 32-разрядного программирования в Delphi. – К.: Диалектика, 1997. – 480 с.
100. Федоров А., Рогаткин Дм. Borland Pascal в среде Windows. – К.: Диалектика, 1993. – 656 с.
101. Поджаренко В.О., Кухарчук В.В. Математична модель для метрологічної атестації вимірювального перетворювача пускового моменту // Вимірювальна техніка та метрологія (Державний університет “Львівська політехніка”). – 1998. – №53. – С.119–124.
102. Кухарчук В.В., Козловський А.В., Поджаренко В.О. Розробка математичної моделі для метрологічної атестації засобу контролю пускового моменту // Вимірювальна техніка та метрологія (Державний університет “Львівська політехніка”). – 1999. – №55. – С.171–177.
103. Таланчук П.М., Скрипник Ю.О., Дубровний В.О. Високоточні засоби вимірювання фізичних величин із самоналагоджуванням і автокорекцією похибок. – К.: ІЗМН, 1996. – 672 с.
104. Скрипник Ю.О., Бондар В.М., Бевз В.І. Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології. – К.: ІЗМН, 1996. – 608 с.
105. Кухарчук В.В., Поджаренко В.О. Дослідження та аналіз перехідного процесу вимірювального перетворювача пускового моменту з асинхронним приводом // Труды Междунар. конф. “Современная контрольно-испытательная техника промышленных изделий и их сертификация”. – Мукачево. – 1997. – Т.2. – С. 136–139.

**ДОДАТКИ**

**Додаток А**  
**Моделювання засобу вимірювання пускового моменту**  
**та його складових елементів**

Файл “Prilog\_A” (сторінка 1 из 16)



Файл “Prilog\_A” (страница 2 из 16)

Файл “Prilog\_A” (страница 3 из 16)

Файл “Prilog\_A” (страница 4 из 16)

Файл “Prilog\_A” (страница 5 из 16)

Файл “Prilog\_A” (страница 6 из 16)

Файл "Prilog\_A" (страница 7 из 16)

Файл “Prilog\_A” (страница 8 из 16)

Файл “Prilog\_A” (страница 9 из 16)



Файл "Prilog\_A" (страница 10 из 16)

Файл "Prilog\_A" (страница 11 из 16)

Файл "Prilog\_A" (страница 12 из 16)

Файл "Prilog\_A" (страница 13 из 16)

Файл "Prilog\_A" (страница 14 из 16)

Файл "Prilog\_A" (страница 15 из 16)

Файл "Prilog\_A" (страница 16 из 16)

**Додаток Б**  
**Розрахунок сумісного закону розподілу та**  
**помилки контролю пускового моменту**

Файл "Prilog\_V" (сторінка 1 из 11)



Файл "Prilog\_B" (страница 2 из 11)

Файл "Prilog\_B" (страница 3 из 11)

Файл "Prilog\_B" (страница 4 из 11)

Файл "Prilog\_V" (страница 5 из 11)

Файл "Prilog\_V" (страница 6 из 11)

Файл “Prilog\_B” (страница 7 из 11)

Файл "Prilog\_V" (страница 8 из 11)

Файл "Prilog\_B" (страница 9 из 11)



Файл "Prilog\_V" (страница 10 из 11)

Файл "Prilog\_V" (страница 11 из 11)

**Додаток В****Схема електрична принципова мікропроцесорного контролера**

Файл "Prilog\_V" (страница 1 из 1)

## Додаток Г

## Програма для прошивки в мікропроцесорний контролер

```

// Початок файлу Main.cpp
// Файл-заголовок для 16C874
#include "16c874.h"

//=====================================================
#define motor_delay      60          // час заспокоєння ПД
#define ADC_delay        1          // час перетворення АЦП
#define variator_delay   5          // час реакції варіатора напруги
#define Reductor_Spins  20          // коефіцієнт передачі редуктора
#define Motor_Steps     200         // кількість кроків ПД
#define ClkFreq          10000000   // тактова частота
#define TXSTA_INIT      0x90
#define RCSTA_INIT      0x90
#define baud(x)          ((10*ClkFreq/(64*X)+5)/10 -1)

//=====================================================
// Результат оцифрування АЦП
unsigned int ADC_result
// Мінімальне значення пускового моменту
unsigned int ADC_result_Min
// Прийнятий від ПЕОМ байт (команда / дані)
char Serial_In_Data
// Стан керування кроковим двигуном
char Step_State
// Стан світлодіодів
char LED_State
// Кількість кроків двигуна, що пропускаються при вимірюванні моменту
char Motor_Step_Jump
// Кількість кроків ПД від точки фіксації мінімуму
int Motor_Step_Min
// Кількість точок, де вимірюється момент
int Points_Quantity

//=====================================================
void init(void)
{
    // Ініціалізація OPTION регістра
    OPTION = 0b11001111;
    // Ініціалізація INTCON регістра (глобальне переривання заборонене)
    INTCON = 0b00000000;
    // Ініціалізація регістрів PIE1 и PIE2 (переривання від периферії)
    PIE1 = 0b00000000; // заборонено всі переривання
    PIE2 = 0b00000000; // заборонено всі переривання
    // Ініціалізація регістрів ADCONx
    ADCON0 = 0b00000000; // вибір нульового каналу для оцифрування
    ADCON0.0 = 1; // дозволити роботу АЦП на даному каналі
    // Ініціалізація регістрів TRISx (виводи портів як входи або виходи)
    TRISA = 0b00000001;
    TRISB = 0b00000000;
    TRISC = 0b11000000;
    TRISD = 0b11111111;
    // Припинення таймера watchdog (не використовується)
    CLRWDT();
    // Ініціалізація програмних перемінних
    Step_State = 0x03; // початкове положення крокового двигуна
    LED_State = 0x10; // запалити світлодіод "Робота"
    PORTD = LED_State | Step_State; // ініціалізація світлодіодів і двигуна
    // Дозвіл переривань...
    INTCON.ADIE = 1; // переривання від АЦП

```

```

INTCON.SCIE = 1; // переривання від послідовного порту
INTCON.GIE = 1; // глобальне переривання
#asm
; Ініціалізація послідовного порту
movlb 0 ; SPBRG, TXSTA та RCSTA розташовані в банку 0
movlw baud(9600)
movwf SPBRG ; тактовий генератор проініціалізований
movlw TXSTA_INIT
movwf TXSTA ; передача - 8 біт, асинхронний режим
movlw RCSTA_INIT
movwf RCSTA ; прийом - 8 біт, послідовний порт дозволений
; прийом - дозволений

#endasm
}

//=====================================================
void Delay_1ms(char Delay)
{
// Затримка Delay мілісекунд
char i,j;
for(i = 0; i < Delay; i++)
{
for(j = 0; j < 125; j++)
#asm
nop
#endasm
}
}

//=====================================================
void Motor_Step(char Direction)
{
// Керування кроковим двигуном
if (Direction) // переміщення в прямому напрямку
switch (Step_State)
{
case 0x03 : Step_State = 0x06; break;
case 0x06 : Step_State = 0x0C; break;
case 0x0C : Step_State = 0x09; break;
case 0x09 : Step_State = 0x03; break;
}
else // переміщення в зворотному напрямку
switch (Step_State)
{
case 0x03 : Step_State = 0x09; break;
case 0x09 : Step_State = 0x0C; break;
case 0x0C : Step_State = 0x06; break;
case 0x06 : Step_State = 0x03; break;
}
// Поміняти стан світлодіода "Двигун"
LED_State = LED_State ^ 0x20;
// Перемістити двигун на один крок
PORTD = LED_State | Step_State;
Delay_1ms(motor_delay);
}

//=====================================================
unsigned int Get_Adc_Result(void)
{
// Отримання поточного значення моменту ОБ
// Поміняти стан світлодіода "Вимірювання"
LED_State = LED_State ^ 0x40;
// Поміняти стан світлодіода "Вимірювання"
PORTD = LED_State | Step_State;
unsigned int ADC_Data;

```

```

ADCON0.0 = 1; // включити АЦП
char i;
while(i++ <= 5) {} // очікування виходу АЦП в робочий режим
ADCON0.2 = 1; // почати перетворення
while(ADCON0.2) {} // очікування кінця перетворення
ADCON0.0 = 0; // виключити АЦП
ADC_Data = ADRESH * 256 + ADRESL; // отримання результату перетворення
return ADC_Data; // повернення результату перетворення
}

//=====================================================//
void Send_Serial_Data_byte(char DATA);
{
// Посилання даних у ПЕОМ байтами
// Поміняти стан світлодіода "Зв'язок"
LED_State = LED_State ^ 0x80;
// Поміняти стан світлодіода "Зв'язок"
PORTD = LED_State | Step_State;
#asm
movlb 1 TXIFLb
btfss PIR,1
goto TXIFLb
movlb 0
movfpr DATA, TXREG // передача байта даних
#endasm
}

//=====================================================//
void Send_Serial_Data(unsigned int DATA)
{
// Відправлення даних в ПЕОМ словами
// Поміняти стан світлодіода "Зв'язок"
LED_State = LED_State ^ 0x80;
// Поміняти стан світлодіода "Зв'язок"
PORTD = LED_State | Step_State;
#asm
movlb 1 TXIFL
btfss PIR,1
goto TXIFL
movlb 0
movfpr DATA, TXREG // передача молодшої частини
movlb 1 TXIFH
btfss PIR,1
goto TXIFH
movlb 0
movfpr DATA+1, TXREG // передача старшої частини
#endasm
}

//=====================================================//
void Get_Serial_Data(void)
{
// Прийом даних із ПЕОМ
// Поміняти стан світлодіода "Зв'язок"
LED_State = LED_State ^ 0x80;
// Поміняти стан світлодіода "Зв'язок"
PORTD = LED_State | Step_State;
#asm
movlb 1 Rcv
btfss PIR,0
goto Rcv
movlb 0
movfpr RCREG, Serial_In_Data // прийнятий байт
#endasm
}

```

```

//=====================================================
void Start_measurement(void)
{
    // Процедура вимірювання пускового моменту (повний оберт)
    // Мінімальне значення пускового моменту
    ADC_result_Min = 0xFFFF;
    // Дане положення двигуна з мінімальним моментом (гіпотеза)
    Motor_Step_Min = 0;
    // Дане положення двигуна з мінімальним моментом (гіпотеза)
    Motor_Spin_Min = 0;
    Get_Serial_Data();
    // Кількість точок виміру (молодша частина)
    Points_Quantity = Serial_In_Data;
    Get_Serial_Data();
    // Кількість точок виміру (старша частина)
    Points_Quantity+1 = Serial_In_Data;
    Get_Serial_Data();
    // Кількість кроків двигуна, що пропускаються
    Motor_Step_Jump = Serial_In_Data;
    // Відправити ознаку повного оберту
    Send_Serial_Data_byte(0xC1);
    // Встановити напругу на варіаторі - 220В
    PORTB = 220;
    Delay_1ms(variator_delay);
    int i;
    char j;
    for(i = 0; i < Points_Quantity; i++)
    {
        ADC_result = Get_Adc_Result(); // одержати поточне значення моменту
        Send_Serial_Data(ADC_result); // відправити отримане значення в ПЕОМ
        if( ADC_result < ADC_result_Min )
        {
            // Нове мінімальне значення моменту
            ADC_result_Min = ADC_result;
            // Дане положення двигуна з мінімальним моментом
            Motor_Step_Min = 0;
        }
        else
            Motor_Step_Min++;
        for(j = 0; j < Motor_Step_Jump; j++)
            // Зробити Motor_Step_Jump кроків крокового двигуна
            Motor_Step(1);
    }
    // Відключення живлення двигуна
    PORTB = 0;
    // Повернення ОВ у положення з мінімальним пусковим моментом
    // Повернутися на Motor_Step_Min кроків
    for(i = 0; i < Motor_Step_Min; i++)
        for(j = 0; j < Motor_Step_Jump; j++)
            // Зробити крок крокового двигуна в зворотному напрямку
            Motor_Step(0);
    // Відправити ознаку початку вимірів в одній точці
    Send_Serial_Data_byte(0xC2);
    // Зміна напруги на двигуні в положенні з мінімальним моментом
    for(i = 50; i < 251; i++)
    {
        // Зміна напруги на варіаторі в діапазоні 50-250В
        PORTB = i; // встановити напругу на варіаторі
        Delay_1ms(variator_delay);
        ADC_result = Get_Adc_Result(); // одержати поточне значення моменту
        Send_Serial_Data(ADC_result); // відправити отримане значення в ПЕОМ
    }
    LED_State = LED_State & 0x1F; // погасить додаткові світлодіоди
    PORTD = LED_State | Step_State; // погасить додаткові світлодіоди
}

```





## Додаток Д

### Програма для проведення вимірювання пускового моменту та тестування ІВС

```
(* === Файл Control.dpr =====*)
program Control;

uses
  Forms,
  Main in 'Main.pas' {MainForm},
  ComPorts in 'ComPorts.pas';

{$R *.RES}

begin
  Application.Initialize;
  Application.Title := 'Вимірювання пускового моменту електродвигуна';
  Application.CreateForm(TMainForm, MainForm);
  Application.Run;
end.

(* === Файл Main.pas =====*)
unit Main;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, ComCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart, ImgList,
  Buttons;

type
  TMainForm = class(TForm)
    PageControl: TPageControl;
    TabSheet1: TTabSheet;
    TabSheet2: TTabSheet;
    KZEdit: TEdit;
    KZUpDown: TUpDown;
    KZLabel: TLabel;
    ComLabel: TLabel;
    ComComboBox: TComboBox;
    CalcButton: TButton;
    TestButton: TButton;
    CloseButton: TButton;
    ImageList: TImageList;
    OpenFileDialog: TOpenDialog;
    SaveDialog: TSaveDialog;
    Calc1Chart: TChart;
    Series1: TLineSeries;
    TestChart: TChart;
    LineSeries1: TLineSeries;
    Load1SpeedButton: TSpeedButton;
    Save1SpeedButton: TSpeedButton;
    Load2SpeedButton: TSpeedButton;
    Save2SpeedButton: TSpeedButton;
    Load3SpeedButton: TSpeedButton;
    Save3SpeedButton: TSpeedButton;
    CalcPanel: TPanel;
    CalcLabel: TLabel;
    TestPanel: TPanel;
  end;
end.
```

```

TestLabel: TLabel;
TabSheet3: TTabSheet;
RichEdit1: TRichEdit;
Calc2Chart: TChart;
LineSeries2: TLineSeries;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure FormDestroy(Sender: TObject);
procedure CalcButtonClick(Sender: TObject);
procedure TestButtonClick(Sender: TObject);
procedure CloseButtonClick(Sender: TObject);
procedure Load1SpeedButtonClick(Sender: TObject);
procedure Save1SpeedButtonClick(Sender: TObject);
procedure Load2SpeedButtonClick(Sender: TObject);
procedure Save2SpeedButtonClick(Sender: TObject);
procedure Load3SpeedButtonClick(Sender: TObject);
procedure Save3SpeedButtonClick(Sender: TObject);
private
  procedure UpdateCalcLabel(N: Integer);
  procedure UpdateTestLabel;
  procedure LoadGraphFile(Series: TChartSeries; XMin, XMax: Integer);
  procedure SaveGraphFile(Series: TChartSeries);
end;

var
  MainForm: TMainForm;

resourcestring
  sErrorLink = 'Помилка зв'язку з контролером.';
  sCalcMsg = 'Мінімальне значення пускового моменту %f Н•м, кутове положення %f°.';
  sTestMsg = 'Максимальне значення %2.8f, мінімальне %2.8f, математичне очікування %2.8f Н•м.';

implementation

{$R *.DFM}

uses ComPorts;

const
  ReductorSpin = 20;
  MotorStep = 200;
  CalcMax1Values = ReductorSpin * MotorStep;
  CalcMax2Values = 200;
  TestMaxValues = 1000;
  CalcTime = 0.137077;
  MomentMax = 20;
  ADCMax = 2048;

  CmdCalcStart = $1C;
  CmdCalcConfirm1 = $C1;
  CmdCalcConfirm2 = $C2;
  CmdTestStart = $FC;
  CmdTestConfirm = $CF;

var
  Calc1Array : array[1..CalcMax1Values] of WORD;
  Calc2Array : array[1..CalcMax2Values] of WORD;
  TestArray : array[1..TestMaxValues] of WORD;

procedure TMainForm.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Randomize;
  ComComboBox.ItemIndex := 0;
end;

```

```

procedure TMainForm.FormDestroy(Sender: TObject);
begin
  ComClose;
end;

procedure TMainForm.CloseButtonClick(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;

procedure TMainForm.CalcButtonClick(Sender: TObject);
var I, N: Integer;
begin
  N := Trunc(StrToInt(KZEdit.Text) / CalcTime);
  ComOpen(ComComboBox.Text);
  ComWriteByte(CmdCalcStart);
  ComWriteWord(N);
  ComWriteByte(CalcMax1Values div N);
  if ComReadByte <> CmdCalcConfirm1 then raise Exception.Create(sErrorLink);
  for I := 1 to N do Calc1Array[I] := ComReadWord;
  if ComReadByte <> CmdCalcConfirm2 then raise Exception.Create(sErrorLink);
  for I := 1 to CalcMax2Values do Calc2Array[I] := ComReadWord;
  for I := 1 to N do
    Calc1Chart.SeriesList[0].Add(Calc1Array[I] * MomentMax / ADCMax);
  for I := 1 to CalcMax2Values do
    Calc2Chart.SeriesList[0].Add(Calc2Array[I] * MomentMax / ADCMax);
  UpdateCalcLabel(N);
end;

procedure TMainForm.TestButtonClick(Sender: TObject);
var I: Integer;
begin
  ComOpen(ComComboBox.Text);
  ComWriteByte(CmdCalcStart);
  ComWriteWord(Random(ReducatorSpin * MotorStep));
  if ComReadByte <> CmdTestConfirm then raise Exception.Create(sErrorLink);
  for I := 1 to TestMaxValues do TestArray[I] := ComReadWord;
  for I := 1 to TestMaxValues do
    TestChart.SeriesList[0].Add(TestArray[I] * MomentMax / ADCMax);
  UpdateTestLabel;
end;

procedure TMainForm.UpdateCalcLabel(N: Integer);
var I, X: Integer; M: Double;
begin
  M := $FFFF; X := 0;
  with Calc1Chart.SeriesList[0].ValuesLists[1] do
    for I := 0 to N - 1 do if Value[I] < M then
      begin M := Value[I]; X := I; end;
  CalcLabel.Caption := Format(SCalcMsg, [M, 360 / N * X]);
end;

procedure TMainForm.UpdateTestLabel;
var I: Integer; MI, MA, MO: Double;
begin
  MA := 0; MI := $FFFF; MO := 0;
  with TestChart.SeriesList[0].ValuesLists[1] do
    for I := 0 to TestMaxValues - 1 do
      begin
        if Value[I] < MI then MI := Value[I];
        if Value[I] > MA then MA := Value[I];
        MO := MO + Value[I];
      end;
  MO := MO / TestMaxValues;
  TestLabel.Caption := Format(STestMsg, [MA, MI, MO]);

```

```

end;

procedure TMainForm.LoadGraphFile(Series: TChartSeries; XMin, XMax: Integer);
var List: TStringList; I: Integer; Step: Double;
begin
  if not OpenFileDialog.Execute then Exit;
  List := TStringList.Create;
  try
    List.LoadFromFile(OpenDialog.FileName);
    Series.Clear;
    Step := (XMax - XMin) / List.Count;
    for I := 0 to List.Count - 1 do
      Series.AddXY(XMin + Step * I, StrToFloat(List[I]));
    end;
  finally
    List.Free;
  end;
end;

procedure TMainForm.SaveGraphFile(Series: TChartSeries);
var List: TStringList; I: Integer;
begin
  if not SaveDialog.Execute then Exit;
  List := TStringList.Create;
  try
    for I := 0 to Series.Count - 1 do
      List.Add(FloatToStr(Series.ValuesLists[1].Value[I]));
    end;
    List.SaveToFile(SaveDialog.FileName);
  finally
    List.Free;
  end;
end;

procedure TMainForm.Load1SpeedButtonClick(Sender: TObject);
begin
  LoadGraphFile(Calc1Chart.SeriesList[0], 0, 360);
  UpdateCalcLabel(Calc1Chart.SeriesList[0].ValuesLists[1].Count);
end;

procedure TMainForm.Save1SpeedButtonClick(Sender: TObject);
begin
  SaveGraphFile(Calc1Chart.SeriesList[0]);
end;

procedure TMainForm.Load2SpeedButtonClick(Sender: TObject);
begin
  LoadGraphFile(Calc2Chart.SeriesList[0], 50, 250);
end;

procedure TMainForm.Save2SpeedButtonClick(Sender: TObject);
begin
  SaveGraphFile(Calc2Chart.SeriesList[0]);
end;

procedure TMainForm.Load3SpeedButtonClick(Sender: TObject);
begin
  LoadGraphFile(TestChart.SeriesList[0], 0, 1000);
  UpdateTestLabel;
end;

procedure TMainForm.Save3SpeedButtonClick(Sender: TObject);
begin
  SaveGraphFile(TestChart.SeriesList[0]);
end;

end.

```

```
(* === Файл ComPorts.pas =====*)
unit ComPorts;

interface

procedure ComOpen(const Port: string);
procedure ComClose;
function ComReadByte: Byte;
procedure ComWriteByte(Value: Byte);
function ComReadWord: Word;
procedure ComWriteWord(Value: Word);

resourcestring
  sErrorOpenCom = 'Помилка відкриття комунікаційного порту (%s).!';
  sErrorReadCom = 'Помилка читання з комунікаційного порту.!';
  sErrorWriteCom = 'Помилка запису до комунікаційного порту.!';

implementation

uses Windows, SysUtils;

var
  ComHandle: THandle = INVALID_HANDLE_VALUE;
  Overlapped: TOverlapped;

procedure ComOpen(const Port: string);
var FDCB: TDCB;
begin
  if ComHandle <> INVALID_HANDLE_VALUE then CloseHandle(ComHandle);

  ComHandle := CreateFile(PChar(Port), GENERIC_READ or GENERIC_WRITE,
    0, nil, OPEN_EXISTING, FILE_FLAG_OVERLAPPED, 0);

  if ComHandle = INVALID_HANDLE_VALUE then
    raise Exception.CreateFmt(sErrorOpenCom, [Port]);

  GetCommState(ComHandle, FDCB);
  with FDCB do
  begin
    BaudRate := CBR_9600;
    Parity := NOPARITY;
    StopBits := ONESTOPBIT;
    ByteSize := 8;
  end;

  SetCommMask(ComHandle, EV_RXCHAR);
  SetupComm(ComHandle, 4096, 4096);
end;

procedure ComClose;
begin
  if ComHandle <> INVALID_HANDLE_VALUE then CloseHandle(ComHandle);
  ComHandle := INVALID_HANDLE_VALUE;
end;

function ComReadByte: Byte;
var Count: DWORD;
begin
  if not ReadFile(ComHandle, Result, SizeOf(Result), Count, @Overlapped)
  then raise Exception.Create(sErrorReadCom);
end;

function ComReadWord: WORD;
```

```
var Count: DWORD;
begin
  if not ReadFile(ComHandle, Result, SizeOf(Result), Count, @Overlapped)
    then raise Exception.Create(sErrorReadCom);
end;

procedure ComWriteByte(Value: Byte);
var Count: DWORD;
begin
  if not WriteFile(ComHandle, Value, SizeOf(Value), Count, @Overlapped)
    then raise Exception.Create(sErrorWriteCom);
end;

procedure ComWriteWord(Value: WORD);
var Count: DWORD;
begin
  if not WriteFile(ComHandle, Value, SizeOf(Value), Count, @Overlapped)
    then raise Exception.Create(sErrorWriteCom);
end;

initialization
  Overlapped.hEvent := CreateEvent(nil, True, True, nil);

finalization
  CloseHandle(Overlapped.hEvent);

end.
```

## Додаток Е

### Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор підприємства “Паллар”

Паламарчук Є.А.

10 жовтня 1999 року

## А К Т

про впровадження результатів дисертаційної роботи

**Козловського Андрія Володимировича**

**“Розробка інформаційно-вимірювальної системи для визначення пускового моменту електродвигунів малої та середньої потужності”**

Комісія в складі директора фірми, к.т.н. Є.А. Паламарчука, інженера В.В. Чекаліна, склала цей акт про те, що у 1998 – 1999 роках підприємством “Паллар” використовувались результати, що отримані у дисертаційній роботі аспіранта Вінницького державного технічного університету Козловського А.В.

Результати, що використовувались, полягають у наступному:

- виготовлено розроблений аспірантом первинний вимірювальний перетворювач пускового моменту типу “момент – напруга” для перетворення пускового моменту електродвигуна у змінну напругу;
- створено макетний зразок інформаційно-вимірювальної системи для вимірювання пускового моменту електродвигунів, мікропроцесорний контролер, програмне забезпечення для проведення автоматизованого вимірювання пускового моменту електричних двигунів, які входять до складу обладнання, ремонт якого виконувався на підприємстві.

---

Директор підприємства  
“Паллар”, к.т.н.

Є.А. Паламарчук

Інженер

В.В. Чекалін

“ЗАТВЕРДЖУЮ”  
Перший проректор ВДТУ

*Гرابко В.В.*

10.12.1998 року

## **А К Т**

*про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Козловського Андрія Володимировича  
“Розробка інформаційно-вимірювальної системи для  
визначення пускового моменту електродвигунів  
малої та середньої потужності”*

Члени створеної комісії в складі завідувача кафедри МПА, д.т.н., професора Поджаренка В.О., декана ФАКСУ, професора Васюри А.С. склали цей акт про те, що у 1998 році у лабораторії вимірювальної техніки кафедри метрології та промислової автоматики факультету автоматики та комп'ютерних систем управління Вінницького державного технічного університету у навчальний процес впроваджено розроблений аспірантом А.В. Козловським комп'ютерний вимірювальний канал та програмне забезпечення до нього, який дозволяє дослідити метрологічні характеристики вимірювальних каналів інтелектуальних засобів вимірювань з первинними вимірювальними перетворювачами, що побудовані на різних фізичних ефектах для підготовки інженерних кадрів за спеціальностями 7.091401-01 “Комп'ютеризовані системи управління і автоматики”, 7.091401-02 “Системи управління в метрології та сертифікації”.

*Декан ФАКСУ, проф.*

*А.С. Васюра*

*Завідувач кафедри МПА,  
д.т.н., проф.*

*В.О. Поджаренко*