

**Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет**

В.Ю. Кучерук

**ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПОБУДОВИ СИСТЕМ
ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМОТОРІВ**

Монографія

“УНІВЕРСУМ-Вінниця”

2003

УДК 681.518.54:621.313
К95

Рецензенти:

Доктор технічних наук, професор Столярчук П.Г.

Доктор технічних наук, професор Осадчук В.С.

Доктор технічних наук, професор Дубовой В.М.

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького державного
технічного університету Міністерства освіти і науки України
(протокол № 8 від 27.03.2003р.)

Кучерук В.Ю.

**К95 Елементи теорії побудови систем технічного діагностування
електромоторів.** Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-
Вінниця, 2003.-195с.

Монографія містить елементи теорії побудови систем технічного
діагностування електромоторів. Особливу увагу приділено створенню
нових методів технічного діагностування електромоторів із за-
стосуванням узагальненого та комплексних показників якості. Розгля-
нуті питання отримання основних метрологічних характеристик вимі-
рювального перетворення параметрів діагностування електромоторів
за допомогою розкладання функції перетворення в ряд Тейлора.

Монографія розрахована на спеціалістів в галузі розробки сис-
тем технічного діагностування, аспірантів та студентів старших курсів
відповідних спеціальностей.

УДК 681.518.54:621.313

ISBN

© В.Кучерук, 2003

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1. ОГЛЯД ТЕОРІЙ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ	8
1.1. Концепція технічного діагностування електромоторів	8
1.2. Огляд та аналіз існуючих підходів до технічного діагностування електромоторів	20
1.2.1. Класифікація та аналіз діагностичних моделей електромоторів	20
1.2.1.1. Діагностична модель асинхронного двигуна	22
1.2.1.2. Діагностична модель синхронного двигуна	31
1.2.1.3. Діагностична модель двигуна постійного струму	36
1.2.2. Класифікація та аналіз методів визначення параметрів діагностування електромоторів	39
1.2.3. Класифікація методів та засобів технічного діагностування електромоторів	47
2. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ	51
2.1. Оцінювання якості електромоторів під час діагностування	51
2.2. Аналіз технічних станів електромоторів	60
2.3. Метод діагностування стану електромоторів за допомогою логічних функцій	60
2.3.1. Метод діагностування стану асинхронного двигуна	60
2.3.2. Метод діагностування стану синхронного двигуна	70
2.3.3. Метод діагностування стану двигуна постійного струму	74
2.4. Метод діагностування стану електромоторів за допомогою автоматичного класифікатора на базі нечітких множин	78
2.5. Прогнозування якості технологічного процесу під час виробництва та технічного діагностування електромоторів	86
3. МЕТОДИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ	94
3.1. Аналіз параметрів діагностування електромоторів	94
3.2. Вимірювальне перетворення параметрів діагностування електромоторів в режимах пуску і холостого ходу	99
3.2.1. Ідентифікація параметрів діагностування R_r , L_r , L_m роторного кола електромоторів за допомогою теорії чутливості	99

3.2.2. Ідентифікація роторних параметрів діагностування електромоторів за допомогою методу інваріантного поглиблення Н.Дістефано	111
3.3. Вимірювальне перетворення параметрів діагностування обмоток електромоторів	124
3.3.1. Аналіз доцільності діагностування обмоток електромоторів за добротністю	124
3.3.2. Фазовий метод вимірювання добротності обмоток електромоторів	132
3.3.3. Засіб вимірювального перетворення добротності та відносної кількості короткозамкнених витків.....	135
3.3.4. Ідентифікація параметрів діагностування обмоток електромоторів за допомогою теорії чутливості	138
4. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТУВАННЯ.....	150
4.1. Узагальнений підхід до оцінки метрологічних характеристик	150
4.2. Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювального перетворення добротності.....	153
4.3. Оцінка метрологічних характеристик вимірювального каналу ковзання.....	157
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	167
Додаток.....	183

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД	Асинхронний двигун
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
ДМ	Діагностична модель
ДПС	Двигун постійного струму
ЕМ	Електромотор
ЕМПЕ	Електромагнітний перетворювач енергії
ЕОМ	Електронно-обчислювальна машина
ІВС	Інформаційно-вимірювальна система
КЗ	Коротке замикання
КЗВ	Короткозамкнені витки
ККД	Коефіцієнт корисної дії
МС	Муфта спряження
ОД	Об'єкт діагностування
ПД	Параметри діагностування
СД	Синхронний двигун
СТД	Система технічного діагностування
ТД	Технічна діагностика
ТП	Тахометричний перетворювач
ХХ	Холостий хід
ФС	Фотоелектричний сенсор
ЦАП	Цифро-аналоговий перетворювач

ВСТУП

Сьогодні у світі щорічно випускають 7 мільярдів електромоторів, які споживають 70% загальної кількості електроенергії. Якість електромоторів є основним фактором їх конкурентоспроможності на світовому ринку. Необхідний рівень якості закладається на стадії розробки та проектування виробу, а також у процесі виробництва. Розвиток математичного моделювання електромоторів та широке застосування систем автоматизованого проектування дозволили успішно розв'язати задачі оптимального проектування ЕМ. Тому якість ЕМ в основному визначається рівнем технологічних процесів їх виготовлення та організацією вимірювальних систем, систем технічного діагностування їх стану на виробництві. Ефективність виробництва визначається правильним вибором як методології визначення окремих характеристик і параметрів ЕМ, так і методологією діагностування їх технічного стану в цілому. Ефективне діагностування технічного стану ЕМ у процесі виробництва, своєчасне прогнозування причин розлагодження технологічного процесу і засноване на цьому керування якістю виготовлення ЕМ дозволяє розв'язати актуальні задачі на виробництві. Зокрема, прогнозування стану ЕМ дозволяє раціонально спланувати проведення регламентних робіт, ремонт та заміну техніки.

Випробування та діагностування стану ЕМ являють собою надзвичайно трудомісткий процес із складною методикою визначення окремих параметрів і пов'язані із великими витратами часу та матеріальних ресурсів. Ця проблема ускладнюється тим, що серійно не випускаються засоби вимірювання основних параметрів діагностування ЕМ (кутова швидкість, момент інерції, параметри обмоток та ін.), які необхідні для укомплектування вимірювальних систем та систем технічного діагностування, не випускаються також і випробувальні стенди, і тому промислові випробування ЕМ недостатньо автоматизовані.

Розроблені на даний час методи та системи технічного діагностування ЕМ не є достатньо ефективними для приймально-здавальних випробуваннях ЕМ. Вони характеризуються складністю й низькою швидкістю, недосконалістю математичного забезпечення. Більшість систем технічного діагностування ЕМ дозволяють визначати лише окремі види браку та не дозволяють прогнозувати розлагодження технологічного процесу виготовлення ЕМ. Методи вимірювального перетворення параметрів діагностування ЕМ, які покладено в основу існуючих систем технічного діагностування, мають низьку точність. Існуючі підходи до технічного діагностування ЕМ не дозволяють у повному обсязі розв'язати задачу оцінки якості ЕМ при їх виготовленні та приймально-здавальних випробуваннях, здійснити аналіз даних вимі-

рювального перетворення параметрів діагностування, синтезувати сучасні схеми і алгоритми функціонування мікроконтролерних вимірювальних засобів. Тому постає питання необхідності розробки якісно нових теоретичних підходів до теорії побудови систем технічного діагностування ЕМ, створення нових методів визначення параметрів діагностування, синтезу сучасних структурних схем засобів вимірювального перетворення параметрів діагностування та впровадження їх у виробництво.

Вдячності. Автор вважає за честь щиро подякувати доктору технічних наук, професору Поджаренку В.О. за окреслення наукового напрямку, організаційну та консультативну допомогу; доктору технічних наук, професору Кухарчуку В.В. за консультації та слушні зауваження під час обговорення результатів роботи.

1. ОГЛЯД ТЕОРІЙ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ

1.1. Концепція технічного діагностування електромоторів

Існуючі електромотори (ЕМ) можна розділити на три класи: індуктивні ЕМ, в яких робочим полем є магнітне поле; ємнісні ЕМ, в яких перетворення електричної енергії в механічну і навпаки здійснюється електричним полем, і індуктивно-ємнісні ЕМ, в яких електромеханічне перетворення здійснюється магнітним і електричним полями.

В *індуктивних ЕМ* електромеханічне перетворення енергії виникає за рахунок зміни індуктивності (потокозчеплень) обмоток, а в *ємнісних ЕМ* – за рахунок зміни ємності. *Індуктивно-ємнісні ЕМ* в найпростішому випадку являють собою об'єднану в одну електромеханічну систему рухомих частин і електричних ланцюгів індуктивної та ємнісної машин.

Хоча ємнісні ЕМ появились раніше індуктивних, вони як силові ЕМ не знайшли промислового використання. Зроблені лише спроби створення індуктивно-ємнісних ЕМ з використанням магнітострикційного і п'єзоелектричного ефектів.

Всі різновиди індуктивних ЕМ за родом живлення діляться на ЕМ *змінного* і *постійного* струму. ЕМ змінного струму діляться на синхронні і асинхронні, колекторні ЕМ змінного струму. В синхронних ЕМ кутова швидкість ротора і кутова швидкість магнітного поля рівні одна одній. В асинхронних ЕМ кутова швидкість ротора не рівна кутовій швидкості магнітного поля. Колекторні ЕМ змінного струму відрізняються тим, що мають механічний перетворювач частоти і числа фаз – колектор, який з'єднаний з обмоткою статора чи ротора.

Під час розробки та виготовлення кожний ЕМ проходить різноманітні випробування. Державні стандарти визначають близько 50-ти видів випробувань – дослідницькі, контрольні, типові, приймально-здавальні, періодичні і т.д. Для готових зразків передбачається такі типи випробувань: кваліфікаційні, скорочені, приймально-здавальні, періодичні, інспекційні, типові, атестаційні, сертифікаційні.

Зміст діючих на підприємствах електротехнічної промисловості програм приймальних і приймально-здавальних випробувань наведено на рис. 1.1 – 1.3 [1-3].

Програму приймально-здавальних випробувань складають перші сім-вісім пунктів, але в масовому виробництві ЕМ обов'язковими для кожного ЕМ, що випускається, є тільки визначення струмів, втрат холостого ходу і випробування ізоляції обмоток відносно корпусу ЕМ і між обмотками на електричну міцність, а інші випробування допус-

Програма приймальних випробувань



1.	Вимірювання опору ізоляції обмоток по відношенню до корпусу машини і між обмотками.
2.	Вимірювання опорів обмоток при постійному струмі в практично холодному стані.
3.	Визначення коефіцієнта трансформації (для двигунів з фазним ротором).
4.	Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини і між обмотками на електричну міцність.
5.	Випробування міжвиткової ізоляції обмотки статора і фазного ротора на електричну міцність.
6.	Визначення струму і втрат холостого ходу.
7.	Визначення струму і втрат короткого замикання.
8.	Випробування при підвищеній частоті обертання.
9.	Випробування на нагрівання.
10.	Визначення коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта потужності і ковзання.
11.	Випробування при короткочасному перевантаженні по струму.
12.	Визначення максимального крутного моменту.
13.	Визначення мінімального крутного моменту в процесі пуску (для двигунів з короткозамкненим ротором).
14.	Визначення початкового пускового крутного моменту і початкового пускового струму (для двигунів з короткозамкненим ротором).
15.	Вимірювання вібрації.
16.	Вимірювання рівня шуму.



*Програма
приймально-
здавальних
випробувань*

Рис. 1.1. Зміст програм приймальних та приймально-здавальних випробувань асинхронних ЕМ

Програма приймальних випробувань



1.	Вимірювання опору ізоляції обмоток по відношенню до корпусу машини і між обмотками.
2.	Вимірювання опорів обмоток при постійному струмі в практично холодному стані.
3.	Випробування при підвищеній частоті обертання.
4.	Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини і між обмотками на електричну міцність.
5.	Випробування міжвиткової ізоляції обмотки якоря на електричну міцність.
6.	Визначення характеристики холостого ходу.
7.	Визначення характеристики усталеного трифазного короткого замикання (трифазних машин) чи однофазного короткого замикання (однофазних машин).
8.	Визначення струму і втрат короткого замикання при нерухомому роторі (для двигунів і синхронних компенсаторів).
9.	Вимірювання струму збудження в режимі ненавантаженого двигуна при номінальній напрузі і номінальному струмі якоря і визначення U-подібної характеристики (для машин із частотою 50 Гц і потужністю до 1000 кВА).
10.	Визначення номінального струму збудження, регульовальної характеристики і номінальної зміни напруги генератора.
11.	Визначення номінального струму збудження, регульовальної характеристики і номінальної зміни напруги двигуна.
12.	Випробування при короткочасному перевантаженні по струму.
13.	Визначення коефіцієнта корисної дії.
14.	Випробування на нагрівання.
15.	Випробування на механічну міцність при ударному струмі короткого замикання.
16.	Визначення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої лінійної напруги.
17.	Визначення індуктивних опорів і постійних часу обмоток (для машин потужністю більше 100 кВА).
18.	Визначення струму і втрат короткого замикання при нерухомому роторі (для двигунів і синхронних компенсаторів).
19.	Визначення початкового пускового, мінімального і номінального крутних моментів (для двигунів).
20.	Вимірювання вібрації.
21.	Вимірювання радіозавад.
22.	Вимірювання рівня шуму.

*Програма
приймально-
здавальних
випробувань*



Рис. 1.2. Зміст програм приймальних та приймально-здавальних випробувань синхронних ЕМ

Програма приймальних випробувань



1.	Вимірювання опору ізоляції обмоток по відношенню до корпусу машини і між обмотками.
2.	Вимірювання опорів обмоток при постійному струмі в практично холодному стані.
3.	Випробування при підвищеній частоті обертання.
4.	Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини і між обмотками на електричну міцність.
5.	Випробування міжвиткової ізоляції обмоток якоря на електричну міцність.
6.	Визначення струму збудження генератора чи частоти обертання двигуна при холостому ході (для двигунів з послідовним збудженням при незалежному збудженні).
7.	Перевірка комутації при номінальному навантаженні і короткочасному перевантаженні по струму (для машин потужністю більше 500 кВт допускається проводити в режимі короткого замикання).
8.	Визначення характеристики холостого ходу.
9.	Визначення зовнішньої характеристики генератора чи механічної (швидкісної) характеристики двигуна.
10.	Визначення регульовальної характеристики генератора чи двигуна для машин потужністю до 500 кВт.
11.	Випробування на нагрівання.
12.	Визначення області безіскрової роботи (для машин із додатковими полюсами).
13.	Визначення коефіцієнта корисної дії.
14.	Вимірювання вібрації.
15.	Вимірювання биття колектора.
16.	Вимірювання радіозавад.
17.	Вимірювання рівня шуму.



Програма
приймально-
здавальних
випробувань

Рис. 1.3. Зміст програм приймальних та приймально-здавальних випробувань ЕМ постійного струму

кається проводити вибірково, причому об'єм вибірки в таких випадках повинен встановлюватися в стандартах або технічних умовах на конкретні види ЕМ.

Розвиток ІВС, СТД у напрямку все більш широкого використання мікроконтролерів, персональних ЕОМ, ускладнення об'єктів вимірювання, і як наслідок, алгоритмів вимірювання та діагностування, вимагає використання інтелектуальних СТД. Сучасна елементна база дозволяє здійснювати більш ефективні вимірювальні та діагностичні алгоритми і процедури, проводити швидку обробку результатів вимірювань, тим самим суттєво підвищивши функціональні можливості і ефективність роботи СТД ЕМ.

Несформованість до теперішнього часу теорії побудови СТД ЕМ призводить до відсутності ефективних автоматизованих СТД ЕМ. Ця обставина не дозволяє у повній мірі розв'язати задачу аналізу технічного стану ЕМ як в статичному, так і в динамічному режимі роботи ЕМ, синтезувати сучасні структурні схеми та алгоритми функціонування СТД з покращеними метрологічними і діагностичними характеристиками, здійснювати повне випробовування експериментальних промислових зразків ЕМ.

Технічне діагностування ЕМ полягає у визначенні відносно діючих технічних умов ЕМ виду дефекту і його розташування. Це визначення здійснюється на основі фізичних змінних, які можуть бути виміряні безпосередньо або оцінені на основі діагностичних моделей. На рис. 1.4 наведено множину базових фізичних змінних, які використовуються в СТД ЕМ для оцінки стану ЕМ.

Зробити висновки за результатами приймально-здавальних випробувань (дослідів ХХ і КЗ) про відповідність ЕМ, що випробовуються, вимогам стандартів чи технічних умов, непросто. Це пояснюється тим, що у вказаних документах регламентовані лише номінальні показники ЕМ, наприклад, ККД, коефіцієнт потужності, кратність максимального моменту, кратність початкового пускового струму і початкового пускового моменту для асинхронних ЕМ.

Тому для проведення більш повного діагностування необхідно використовувати динамічний режим роботи ЕМ. У цьому режимі неминучі відхилення показників якості ЕМ від нормованих, які виражаються в змінах значень струмів в обмотках, частоти обертання, моменту інерції, механічної характеристики, моменту на валу, моменту опору, параметрів статорного і роторного кола, параметрів дисбалансу та інш. Тому представляється досить привабливим проводити діагностування ЕМ за цими даними.

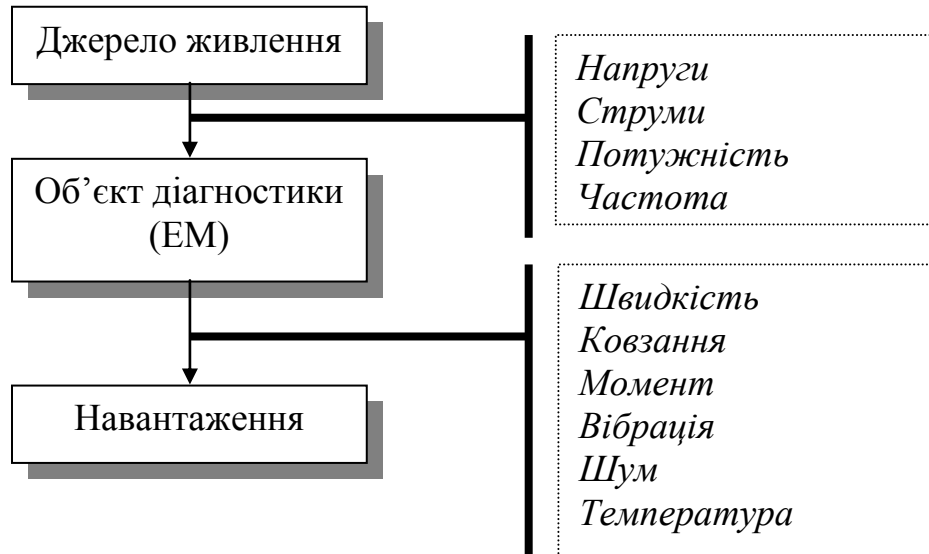


Рис. 1.4. Фізичні змінні, які використовуються для моніторингу і діагностики ЕМ

Для цього можна використати схему випробовувань, показану на рис. 1.5 – 1.7.

Із порівняльного аналізу рис. 1.1 – 1.3 і рис. 1.5 – 1.7 видно, що за рахунок проведення випробувань у динамічному режимі загальна кількість випробувань зменшилась за рахунок виконання цих випробувань в динамічному режимі.

Тому введення динамічного режиму крім суттєвого підвищення функціональних можливостей СТД ЕМ дозволяє також зменшити загальну кількість випробувань. При цьому треба зазначити, що зміст державних стандартів на випробування ЕМ не змінюється.

Отже, технічне діагностування ЕМ – це складний і досить трудомісткий процес із складними методиками визначення окремих параметрів. Автоматизувати запропоновану розширену програму випробувань можливо за допомогою ІВС, узагальнена модель якої наведена на рис. 1.8.

У цій моделі $\mathbf{x}(t)$ - вектор вимірюваних чи ідентифікованих параметрів ЕМ (наприклад, ω_r , L_m , L_s , R_r , J , M_0); $\mathbf{y}(t)$ - вектор результатів вимірювання; $\mathbf{v}(t)$ - вектор зовнішніх впливаючих факторів; $\mathbf{u}(t)$ - вектор стимулюючих сигналів для ЕМ; символи “ \circ ” означають точне значення величин; символи “ \wedge ” означають оцінене значення величин.

Відповідно до моделі, поданої на рис. 1.8, процес технічного діагностування ЕМ може бути описаний таким чином:

Програма приймальних випробувань



1.	Вимірювання опору ізоляції обмоток по відношенню до корпусу машини і між обмотками.
2.	Вимірювання опорів обмоток при постійному струмі в практично холодному стані.
3.	Визначення коефіцієнта трансформації (для двигунів з фазним ротором).
4.	Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини і між обмотками на електричну міцність.
5.	Випробування міжвиткової ізоляції обмотки статора і фазного ротора на електричну міцність.
6.	<u>Випробування в динамічному режимі роботи ЕМ (пуск, самогальмування).</u>
7.	Визначення струму і втрат короткого замикання.
8.	Випробування при підвищеній частоті обертання.
9.	Випробування на нагрівання.
10.	Випробування при короткочасному перевантаженні по струму.
11.	Вимірювання вібрації.
12.	Вимірювання рівня шуму.



Програма приймально-здавальних випробувань

Рис. 1.5. Зміст програм приймальних і приймально-здавальних випробувань асинхронних ЕМ з випробуваннями в динамічному режимі роботи ЕМ

Програма приймальних випробувань



1.	Вимірювання опору ізоляції обмоток по відношенню до корпусу машини і між обмотками.
2.	Вимірювання опорів обмоток при постійному струмі в практично холодному стані.
3.	Випробування при підвищеній частоті обертання.
4.	Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини і між обмотками на електричну міцність.
5.	Випробування міжвиткової ізоляції обмотки якоря на електричну міцність.
6.	<u>Випробування в динамічному режимі роботи ЕМ (пуск, самогальмування).</u>
7.	Визначення струму і втрат короткого замикання при нерухомому роторі (для двигунів і синхронних компенсаторів).
8.	Випробування при короткочасному перевантаженні по струму.
9.	Випробування на нагрівання.
10.	Випробування на механічну міцність при ударному струмі короткого замикання.
11.	Визначення індуктивних опорів і постійних часу обмоток (для машин потужністю більше 100 кВА).
12.	Визначення струму і втрат короткого замикання при нерухомому роторі (для двигунів і синхронних компенсаторів).
13.	Вимірювання вібрації.
14.	Вимірювання радіозавад.
15.	Вимірювання рівня шуму.



Програма
приймально-
здавальних
випробувань

Рис. 1.6. Зміст розширених програм приймальних і приймально-здавальних випробувань синхронних ЕМ з випробуваннями в динамічному режимі роботи ЕМ

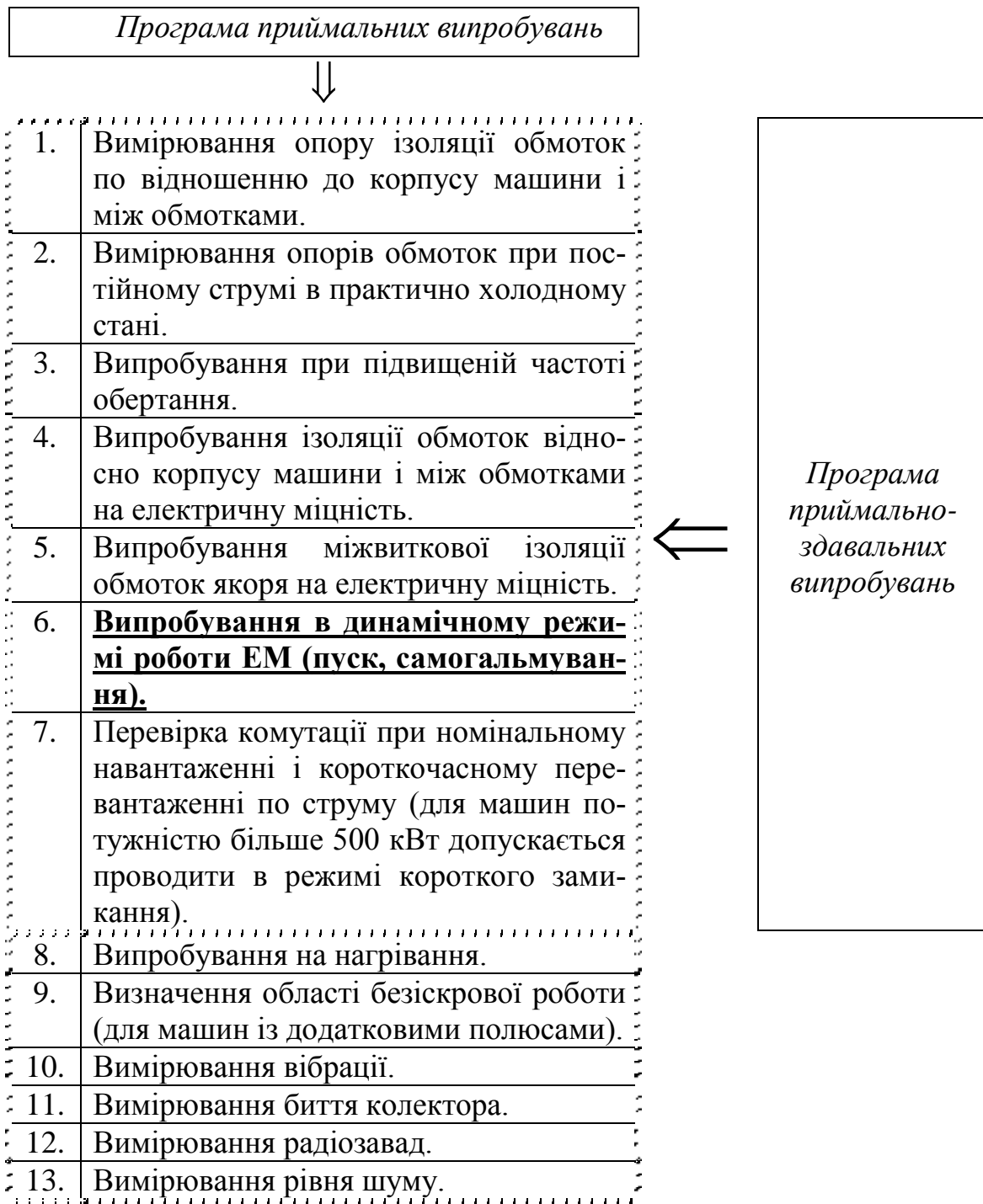


Рис. 1.7. Зміст розширених програм приймальних і приймально-здавальних випробувань ЕМ постійного струму з випробуваннями в динамічному режимі роботи ЕМ

- ОД, стимульований сигналами $\mathbf{u}^\circ(t)$, відповідає сигналами, конвертованими за допомогою сенсорів, перетворювачів, аналого-цифровими перетворювачів у вектор результатів вимірювання $\hat{\mathbf{y}}(t)$.

- Загальний результат вимірювання є визначеним на основі вектора результатів вимірювання $\hat{\mathbf{y}}(t)$, вимірних значень вектора зовнішніх впливаючих факторів $\hat{\mathbf{v}}(t)$ та точних значень стимулюючих сигналів $\mathbf{u}^\circ(t)$:

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{R} \left(\hat{\mathbf{y}}(t), \hat{\mathbf{v}}(t), \mathbf{u}^\circ(t) \right), \quad (1.1)$$

де \mathbf{R} - оператор оцінки стану або оператор ідентифікації;

$\hat{\mathbf{x}}(t)$ - вектор оцінених значень вектору параметрів ЕМ $\mathbf{x}^\circ(t)$.

Результат технічного діагностування \mathbf{S} визначається на основі вектора $\hat{\mathbf{x}}(t)$:

$$\mathbf{S} = \mathbf{D} \left(\hat{\mathbf{x}}(t) \right). \quad (1.2)$$

Рівняння (1.1) визначає основне рівняння оцінювання стану ЕМ, а рівняння (1.2) – основне рівняння діагностування.

На основі узагальненої моделі ІВС запропоновано структурну схему СТД ЕМ (рис. 1.9). Вона вміщує у собі такі вимірювальні канали: швидкості; струму в обмотках статора; напруги живлення ЕМ.

Канал вимірювання кутової швидкості включає в себе механічний зв'язок валу ОВ з сенсором швидкості обертання через муфту спряження, цифровий періодомір. Сигнал з цифрового періодоміра подається на системний канал персонального комп'ютера РС.

Канали вимірювання струму вміщують у собі первинні вимірювальні перетворювачі струму в напругу (шунти) та АЦП.

Канали вимірювання напруги вміщують у собі подільники напруги та АЦП.

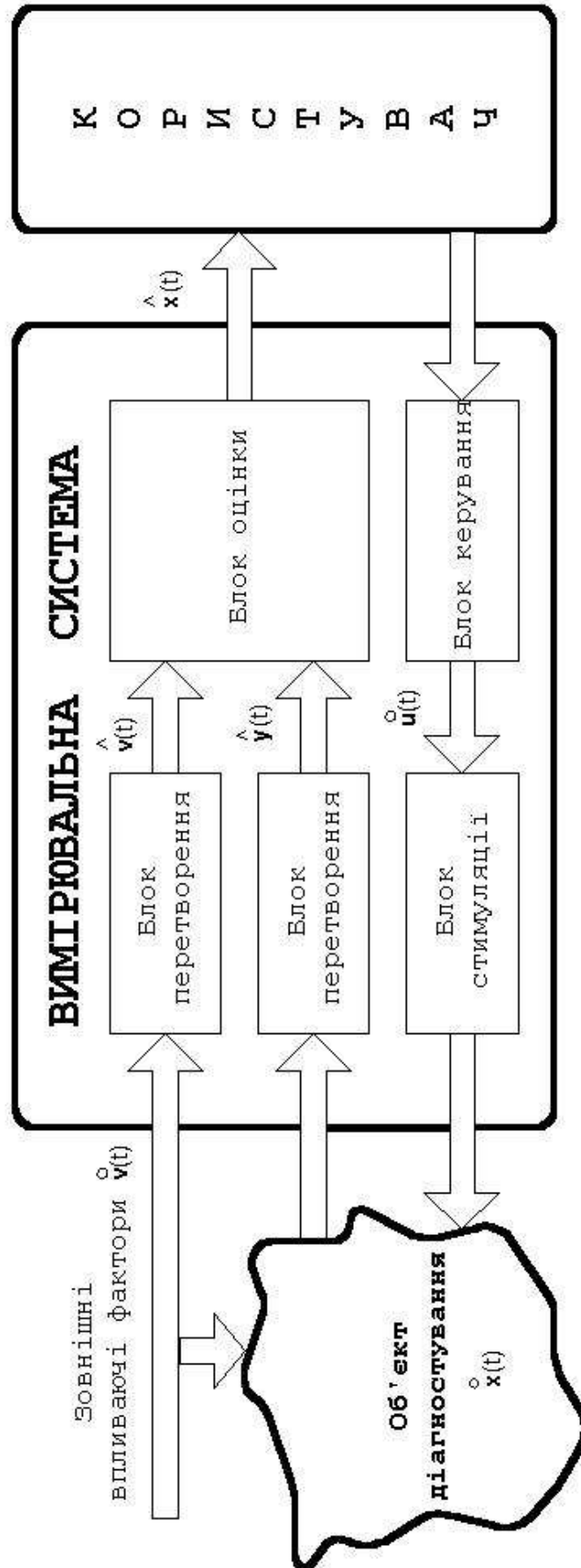


Рис. 1.8. Узагальнена модель ІВС для побудови СТД ЕМ

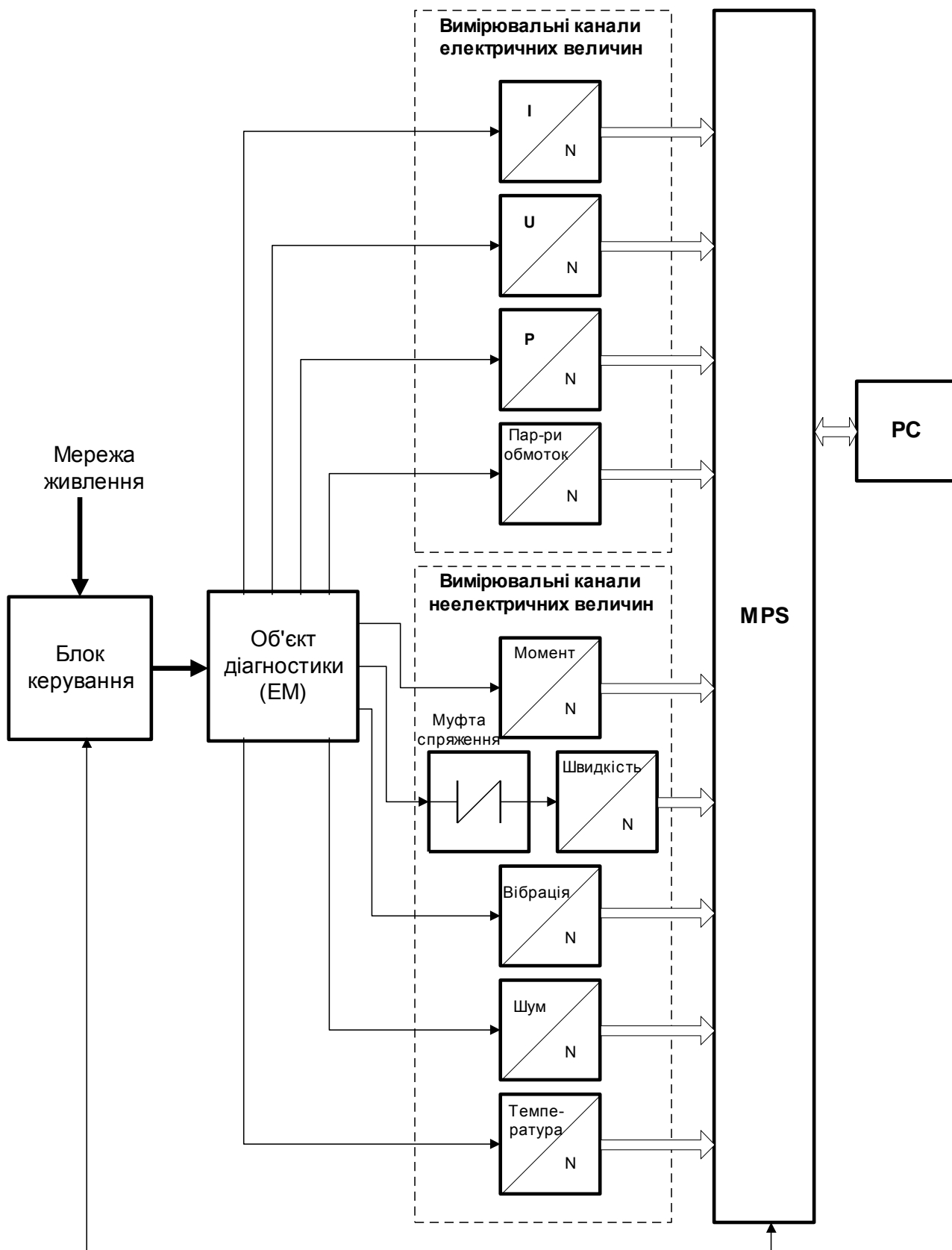


Рис. 1.9. Структурна схема СТД ЕМ

Вимірювання електричних параметрів (струму і напруги) досліджено достатньо добре. Досліджено різноманітні первинні перетворювачі, знайдено їх оптимальні характеристики [4-7]. Під час вибору сучасних прецизійних первинних перетворювачів електричних сигналів та АЦП похибка вимірювання струму та напруги зводиться до мінімуму.

Значно актуальніші мають дослідження вимірювального перетворення в каналі вимірювання кутової швидкості через його механічного спряження із валом ЕМ.

1.2. Огляд та аналіз існуючих підходів до технічного діагностування електромоторів

Розвиток теорії ЕМ спричинив адекватний розвиток теорій математичного моделювання, вимірювання параметрів, контролю і технічної діагностики ЕМ. В основі цих теорій закладено праці А.А.Войтеха, В.Гамати, О.Д.Гольдберга, Б.Геллера, Г.К.Жерве, І.П.Копилова, М.Т.Костенка, К.О.Круга, Л.М.Піатровського, В.Й.Чабана, Р.Ріхтера, на яких були сформовані напрямки вимірювальної техніки – тахометрія і моментометрія. Суттєвий внесок у формування і розвиток цих напрямків покладено І.М. Богаєнком, В.Б. Дудикевичем, В.Ф. Зотіним, Н.В. Кіріанакі, В.В. Кухарчуком, Л.А. Потаповим, В.О. Поджаренком, С.Ф. Сивокобиленком, Д.Й. Родькіним, Ю.М. Юферовим, Ю.І. Чучманом та їх учнями, на теоретичне підґрунтя яких опираються подальші дослідження.

1.2.1. Класифікація та аналіз діагностичних моделей електромоторів

Діагностична модель дозволяє виконати опис ЕМ для поставлених задач технічної діагностики. Необхідність обов'язкового модельного відтворення ОД за допомогою ДМ пояснює узагальнений алгоритм технічного діагностування як інформаційної процедури (рис. 1.10). Цей алгоритм відображає основні операції процедури діагностування по:

- відтворенню діагностичних параметрів ОД з використанням вимірювальних засобів або засобів контролю;
- порівнянню діагностичних параметрів ОД з показниками ДМ, що виступають як еталонні;
- прийняттю рішення відносно діагнозу для ОД.

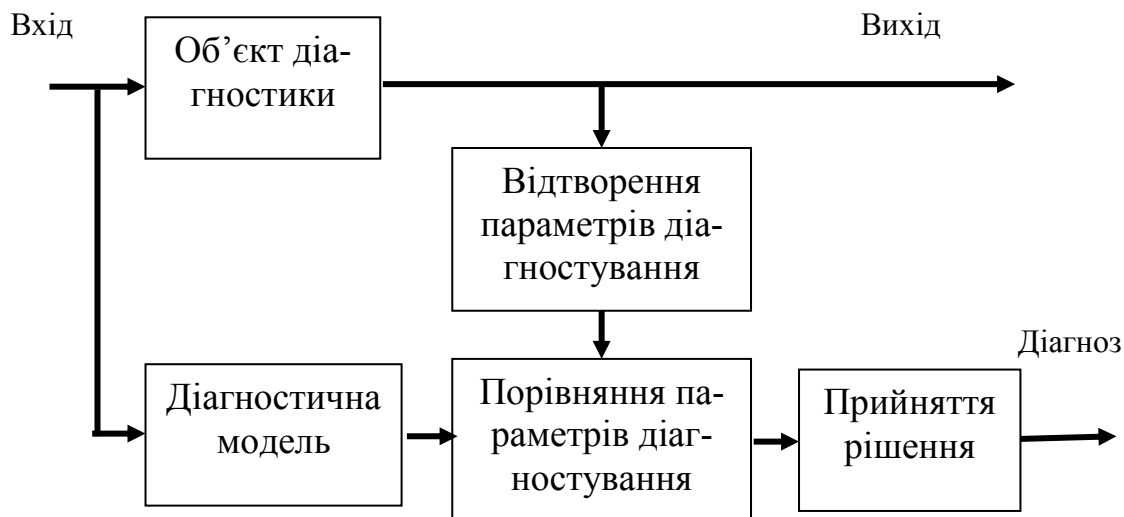


Рис. 1.10. Узагальнений алгоритм технічного діагностування ЕМ

На початку 30-х років в працях Е.Арнольда, Р.Ріхтера, М.Відмара, К.О.Круга та інших вчених була створена теорія усталених режимів роботи ЕМ.

Одна із перших робіт з перехідних процесів – це робота Р.Рюдєнберга. Теорія перехідних процесів, яка зародилась на початку 20-го століття, отримала бурхливий розвиток в 60-80-ті роки завдяки широкому використанню обчислювальної техніки.

Перші роботи з математичної теорії ЕМ появились усередині 20-40-х років. До них відносяться роботи Р.Парка, О.О.Горєва, Г.Крона, Г.М.Петрова. Фундаментальними роботами з математичної теорії ЕМ є роботи Г.Крона, який запропонував модель і рівняння узагальненої ЕМ.

В останні роки зусиллями багатьох вчених (Б.Адкінс, І.О.Глебов, Г.О.Сипайлов, Е.Я.Казовський, С.В.Страхов, В.В.Хрущев, І.П.Копилов, В.Й.Чабан) математична теорія ЕМ розвилась досить глибоко. Використання обчислювальної техніки дозволило аналізувати усталені процеси як окремий випадок перехідних процесів.

Історія розвитку електромеханіки свідчить про існування кількох підходів до математичного моделювання і побудови діагностичних моделей ЕМ [8-29]: *на базі теорії поля* (рівняння Максвелла); *на базі теорії кіл* (рівняння Кірхгофа); *комбінований* (рівняння Максвелла та Кірхгофа); *на базі окремих фізичних законів* (рівняння Лагранжа 2-го роду).

Найдосконалішим та найпоширенішим є комбінований підхід, в якому поєднуються рівняння поля та рівняння кіл, коли, виходячи з

картин поля у повітряному зазорі ЕМ, записують рівняння напруг, а через струми чи потোকостягнення – рівняння електромагнітного моменту.

У цьому випадку ЕМ представляється як ідеалізований симетричний електромагнітний перетворювач енергії (багатополіусник), що має рівний повітряний зазор, сталеві ділянки із нульовим магнітним опором, синусні обмотки [26] (рис. 1.11).

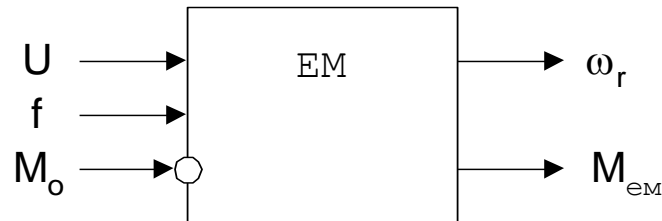


Рис. 1.11. ЕМ як електромеханічний багатополіусник

ЕМ як багатополіусник має два електричних виводи, які характеризуються напругою U і частотою f ; три механічні виводи: момент на валу $M_{ем}$, кутова швидкість ω_r та момент механічних втрат M_0 .

Загальний стан розвитку теорій технічної діагностики ЕМ важко охопити, не давши класифікацію існуючих діагностичних моделей ЕМ. Пропонується класифікація (рис. 1.12) діагностичних моделей ЕМ за такими найхарактернішими ознаками [30]: за видом представлення; за способом формування; за вмістом розвитку несправності; за глибиною опису процесу; за фізичним принципом; за способом рішення рівнянь Максвелла; за видом електричної схеми заміщення; за видом системи координат; за методом аналізу схеми заміщення.

Запропонована класифікація діагностичних моделей ЕМ містить у собі всі необхідні моделі для вирішення проблем створення СТД ЕМ.

1.2.1.1. Діагностична модель асинхронного двигуна

Диференціальні рівняння АД можливо записати в кількох різних формах. Найпоширенішою формою запису диференціальних рівнянь для АД є система координат $\alpha, \beta, 0$ [9]:

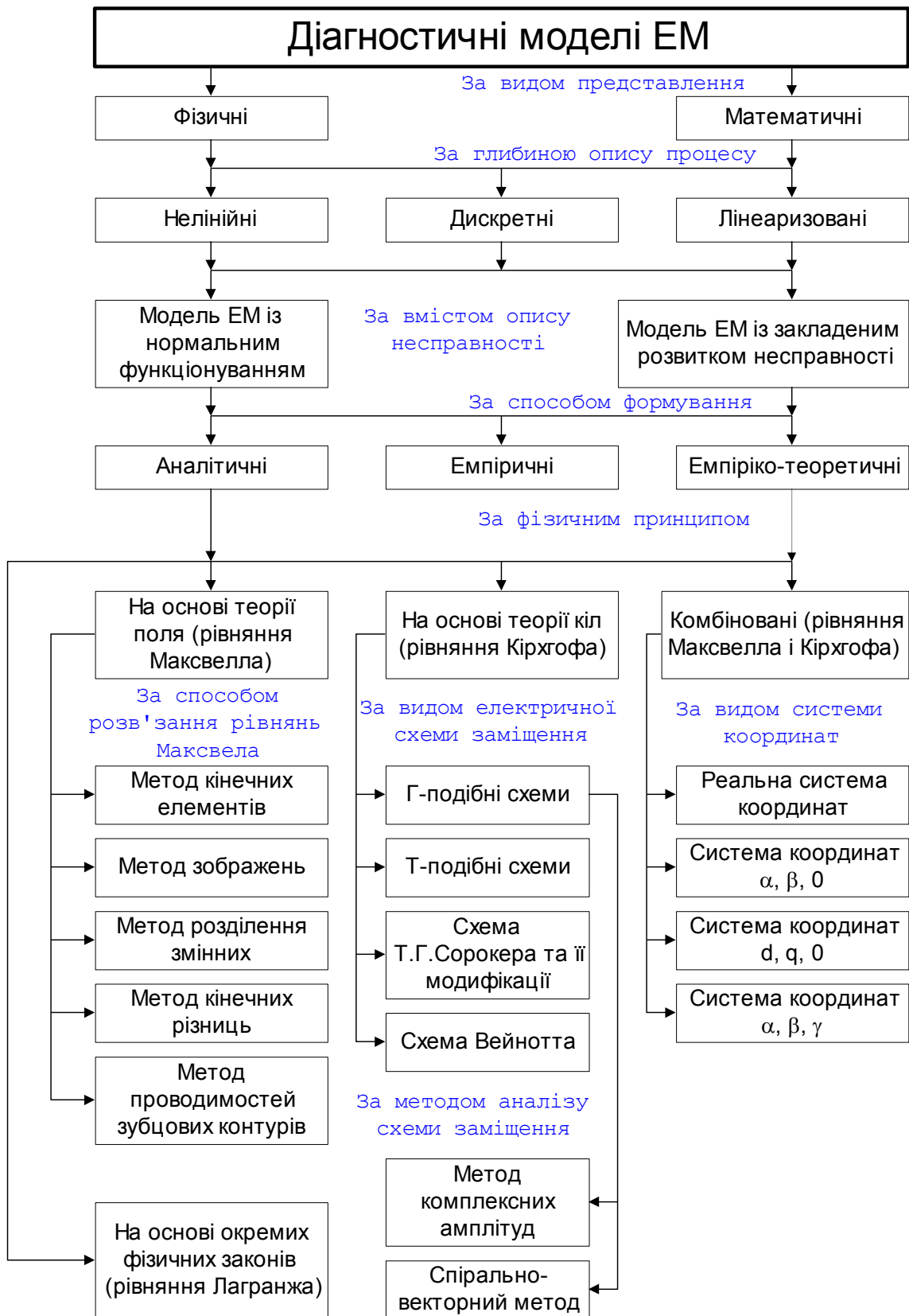


Рис. 1.12. Класифікація математичних моделей ЕМ

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_{s\alpha}; \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - i_{s\beta} R_{s\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = U_{r\alpha} - i_{r\alpha} R_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = U_{r\beta} - i_{r\beta} R_{r\beta} - \omega_r \psi_{r\alpha}, \end{array} \right. \quad (1.3)$$

де $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ - потокозчеплення статора і ротора в координатах $\alpha, \beta, 0$;

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

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ - струми в обмотках статора і ротора;

$R_{s\alpha}, R_{s\beta}, R_{r\alpha}, R_{r\beta}$ - активні опори статора і ротора;

ω_r - кутова швидкість обертання ротора.

Потокозчеплення в (1.3) зображуються у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{s\alpha} = L_{s\alpha} i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}; \\ \psi_{s\beta} = L_{s\beta} i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \\ \psi_{r\alpha} = L_{r\alpha} i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}; \\ \psi_{r\beta} = L_{r\beta} i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}, \end{array} \right. \quad (1.4)$$

де $L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}$ - індуктивності в обмотках статора і ротора;

L_m - взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора.

Дану математичну модель було вибрано як базову для проведення подальших досліджень, оскільки вона є найбільш поширеною та універсальною. Діагностичні моделі із закладеною несправністю мають складний вигляд і здебільшого призначені для діагностики якої-небудь однієї несправності.

Приймаючи узвичаєні допущення $L_s = L_{s\alpha} = L_{s\beta}$; $L_r = L_{r\alpha} = L_{r\beta}$; $R_s = R_{s\alpha} = R_{s\beta}$; $R_r = R_{r\alpha} = R_{r\beta}$ і підставивши (1.4) в (1.3), отримаємо:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_{s\alpha}i_{s\alpha} + \frac{d}{dt}(L_s i_{s\alpha}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{r\alpha}); \\ U_{s\beta} = R_{s\beta}i_{s\beta} + \frac{d}{dt}(L_s i_{s\beta}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{r\beta}); \\ U_{r\alpha} = R_{r\alpha}i_{r\alpha} + \frac{d}{dt}(L_r i_{r\alpha}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{s\alpha}) + \omega_r(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}); \\ U_{r\beta} = R_{r\beta}i_{r\beta} + \frac{d}{dt}(L_r i_{r\beta}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{s\beta}) - \omega_r(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}). \end{cases} \quad (1.5)$$

Розглядаючи ОД як АД із короткозамкненим ротором ($U_{r\alpha} = U_{r\beta} = 0$) та як систему із зосередженими параметрами, можна записати:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\alpha} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\alpha}; \\ U_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\beta} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\beta}; \\ 0 = R_r i_{r\alpha} + L_r \frac{d}{dt} i_{r\alpha} + L_m \frac{d}{dt} i_{s\alpha} + \omega_r(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}); \\ 0 = R_r i_{r\beta} + L_r \frac{d}{dt} i_{r\beta} + L_m \frac{d}{dt} i_{s\beta} - \omega_r(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}). \end{cases} \quad (1.6)$$

Провівши відповідні математичні перетворення, можна записати систему рівнянь (1.6) в матричній формі:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} L_r(U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) + L_m(R_r i_{r\alpha} + \omega_r(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta})) \\ L_r(U_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) + L_m(R_r i_{r\beta} - \omega_r(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha})) \\ -L_m(U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) - L_s(R_r i_{r\alpha} + \omega_r(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta})) \\ -L_m(U_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) - L_s(R_r i_{r\beta} - \omega_r(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha})) \end{bmatrix}, \quad (1.7)$$

$$\text{де } k = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2}.$$

Рівняння руху ротора АД має вигляд:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J}(M_e - M_0), \quad (1.8)$$

де M_e – електромагнітний момент АД:

$$M_e = \frac{mp}{2} L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}); \quad (1.9)$$

M_0 – момент опору на валу;

J – момент інерції ротора;

m – кількість фаз;

p – кількість пар полюсів.

У широкому діапазоні кутових швидкостей момент опору (тертя у підшипниках та аеродинамічний опір) M_0 зв'язаний із ω_r нелінійною залежністю [31]:

$$M_0(\omega_r) = \text{sgn}(\omega_r) \cdot \left[M_{\pi} + (M_{\text{НОМ}} - M_{\pi}) \cdot \left(\frac{\omega_r}{\omega_{\text{НОМ}}} \right)^2 \right], \quad (1.10)$$

де M_{π} – пусковий момент;

$M_{\text{НОМ}}$ - момент опору при номінальному навантаженні;

$\omega_{\text{НОМ}}$ - номінальна кутова швидкість;

$\text{sgn}(\dots)$ - функція знаку аргументу (рис. 1.13).

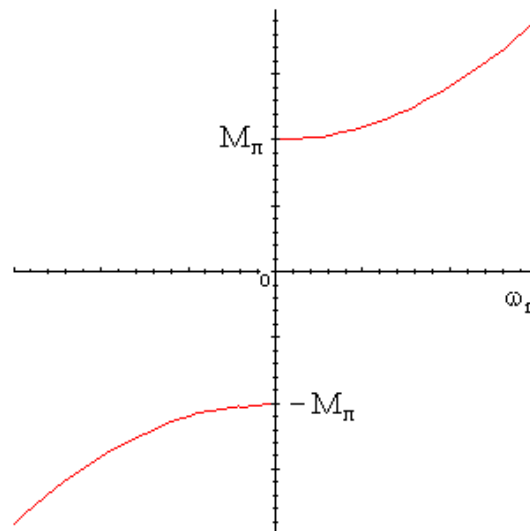


Рис. 1.13. Залежність моменту опору M_0 від кутової швидкості ω_r

Таким чином, математична модель АД запишеться у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{di_{s\alpha}(t)}{dt} = k \left[L_r (U_{s\alpha}(t) - R_s i_{s\alpha}(t)) + L_m (R_r i_{r\alpha}(t) + \omega_r(t) (L_r i_{r\beta}(t) + L_m i_{s\beta}(t))) \right]; \\
\frac{di_{s\beta}(t)}{dt} = k \left[L_r (U_{s\beta}(t) - R_s i_{s\beta}(t)) + L_m (R_r i_{r\beta}(t) - \omega_r(t) (L_r i_{r\alpha}(t) + L_m i_{s\alpha}(t))) \right]; \\
\frac{di_{r\alpha}(t)}{dt} = k \left[-L_m (U_{s\alpha}(t) - R_s i_{s\alpha}(t)) - L_s (R_r i_{r\alpha}(t) + \omega_r(t) (L_r i_{r\beta}(t) + L_m i_{s\beta}(t))) \right]; \\
\frac{di_{r\beta}(t)}{dt} = k \left[-L_m (U_{s\beta}(t) - R_s i_{s\beta}(t)) - L_s (R_r i_{r\beta}(t) - \omega_r(t) (L_r i_{r\alpha}(t) + L_m i_{s\alpha}(t))) \right]; \\
\frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (M_{em}(t) - M_0(\omega_r(t))); \quad k = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2}; \\
M_{em}(t) = \frac{mp}{2} \cdot L_m (i_{s\beta}(t) i_{r\alpha}(t) - i_{r\beta}(t) i_{s\alpha}(t)),
\end{array} \right. \quad (1.11)$$

де $U_{s\alpha}(t) = \sqrt{2}U_m \cos(\omega t)$;

$U_{s\beta}(t) = \sqrt{2}U_m \sin(\omega t)$;

U_m - напруга мережі живлення;

ω - кругова частота мережі живлення.

Система (1.11) являє собою систему жорстких нелінійних диференціальних рівнянь, розв'язок яких можна отримати лише числовими методами, наприклад, методом Рунге-Кутта із змінним кроком інтегрування в середовищі символічної математики Maple V R5 [32] (рис. 1.14).

Розв'язок системи (1.11) дозволяє отримати також енергетичні характеристики ЕМ (рис. 1.14):

- втрати в обмотках статора $Q_s(t) = R_s (i_{s\alpha}(t) + i_{s\beta}(t))^2$;
- втрати в обмотках ротора $Q_r(t) = R_r (i_{r\alpha}(t) + i_{r\beta}(t))^2$;
- електромагнітна потужність $P_{em}(t) = \omega_r(t) \cdot M_{em}(t)$;
- потужність в обмотках статора $P_s(t) = P_{em}(t) + Q_s(t)$;
- потужність, що передана на ротор $P_r(t) = P_{em}(t) - Q_r(t)$;
- коефіцієнт корисної дії ЕМ $\eta(t) = \frac{P_r(t)}{P_s(t)}$.

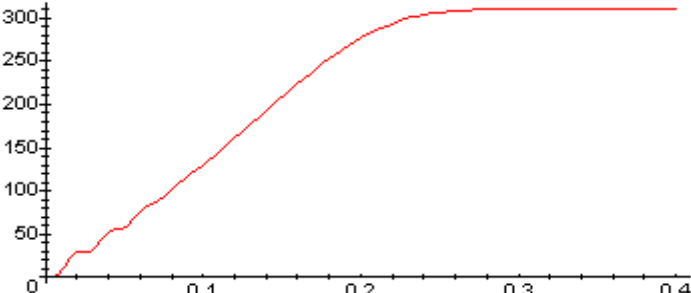
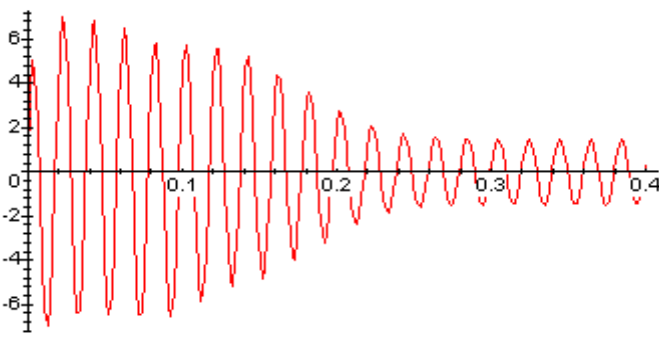
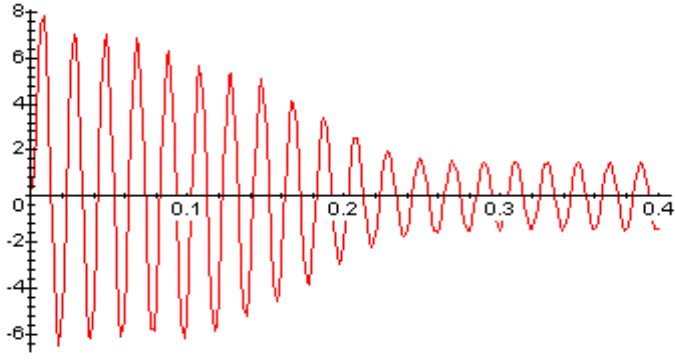
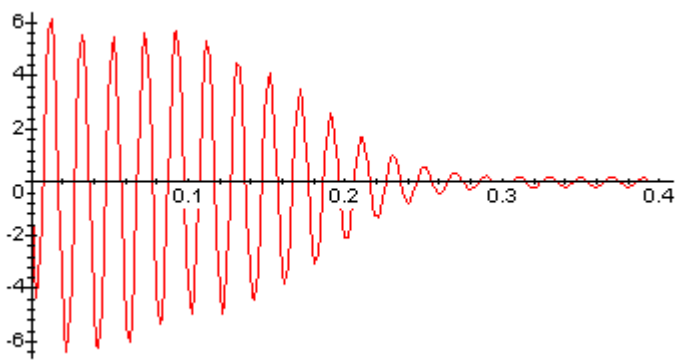
Залежність	Графічне представлення залежності
$\omega_r(t)$	
$i_{s\alpha}(t)$	
$i_{s\beta}(t)$	
$i_{r\alpha}(t)$	

Рис. 1.14. Результати моделювання АМ типу 4А71А4

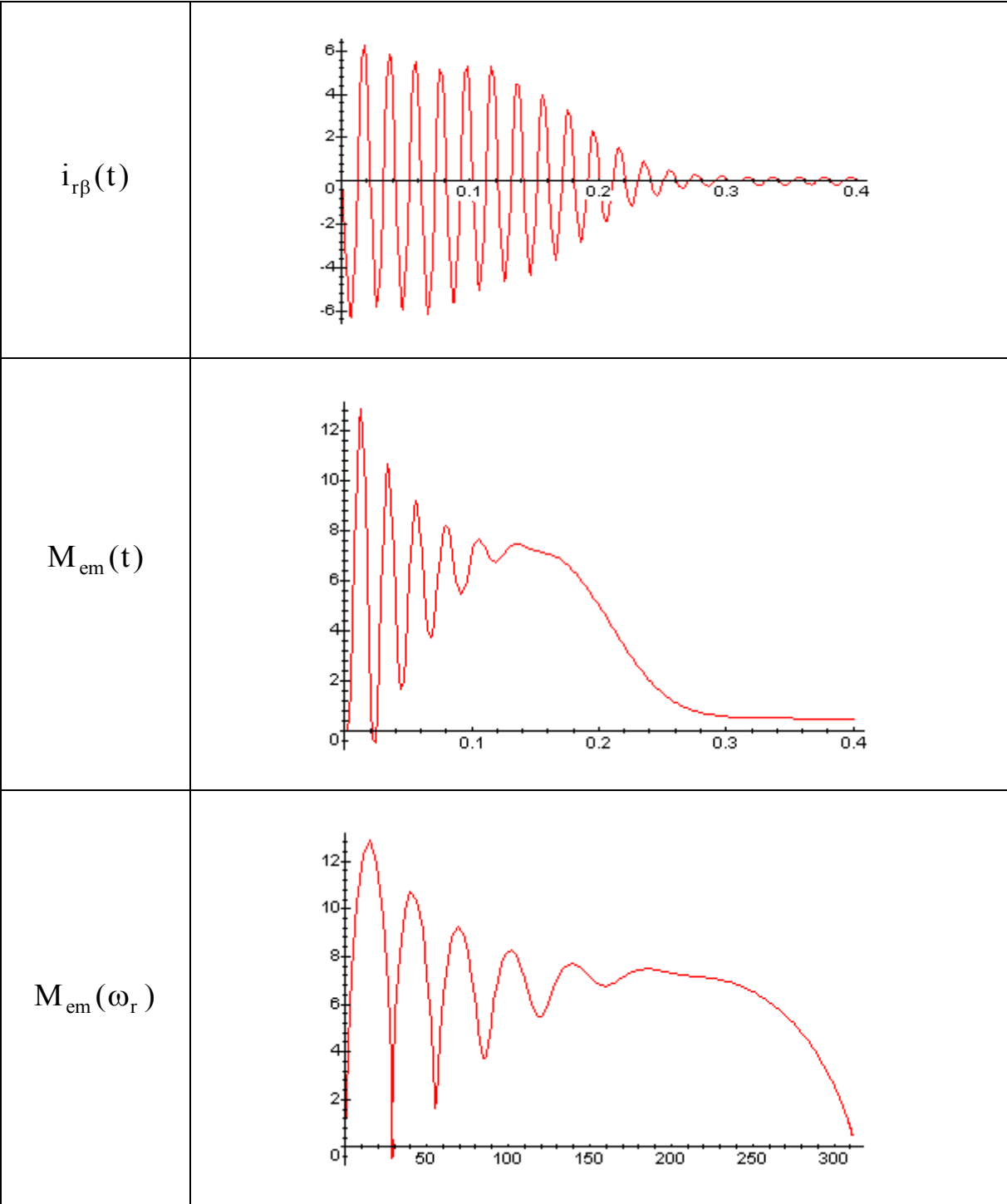


Рис. 1.14. Продолжения

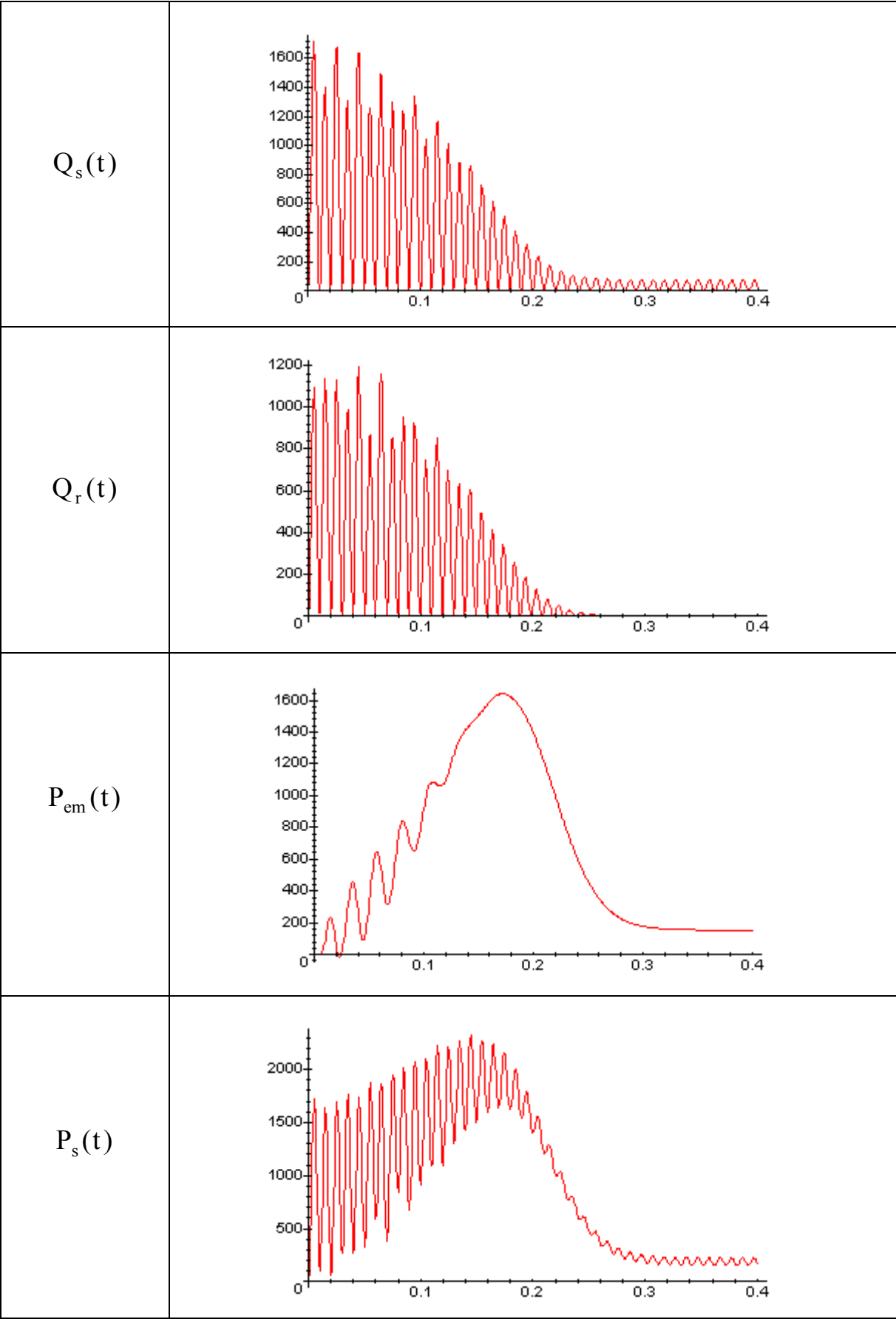


Рис. 1.14. Продовження

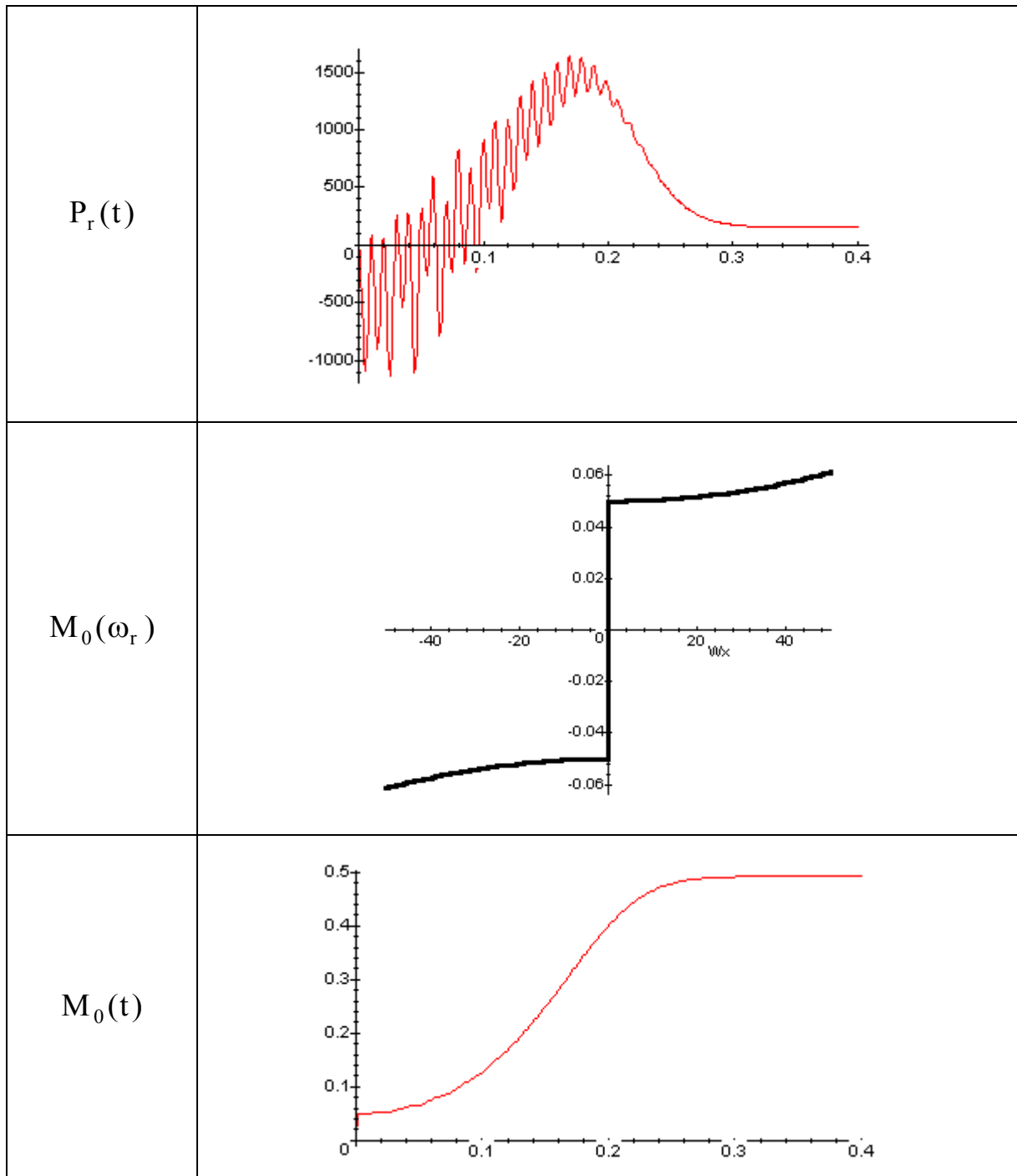


Рис. 1.14. Продовження

1.2.1.2. Діагностична модель синхронного двигуна

В усталеному режимі в СД $\omega_r = \omega_c$. В СД можливі коливання, коли кутова швидкість при постійному навантаженні і постійній напрузі коливається відносно усталеної швидкості. Звичайно частота коливань на один-два порядки нижча частоти мережі і визначається параметрами СД. Щоб зменшити амплітуду і частоту коливань, в СД вводять демпферну обмотку.

При аналізі процесів перетворення енергії в СД розглядають загальмовану машину з приведеними обмотками [33-36].

СД ділять на явно- і неявнополюсні. Хоча явнополюсні СД мають різні опори по осях d і q (рис. 1.15), з точки зору процесів електромеханічного перетворення енергії це симетричні ЕМ. СД явно- і неявнополюсні при аналізі потрібно розглядати як багатообмоткові і враховувати наявність обмоток якоря, збудження і демпферної обмотки (рис. 1.15). У найпростішому випадку СД – триобмоткова.

Рівняння СД прийнято записувати для системи координат d, q , зв'язаних з обмотками ротора. Для машин з приведеними обмотками записуються такі рівняння [34]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \omega_r + R_a i_d; \\ U_q = \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \omega_r + R_a i_q; \\ U_f = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + R_f i_f; \\ 0 = \frac{d\psi_{dd}}{dt} + R_{dd} i_{dd}; \\ 0 = \frac{d\psi_{dq}}{dt} + R_{dq} i_{dq}, \end{array} \right. \quad (1.12)$$

де R_a - активний опір обмоток якоря;

R_f - активний опір обмоток збудження;

R_{dd}, R_{dq} - активний опір демпферної обмотки в повздовжній та поперечній осях;

U_d, U_q, U_f - напруги обмотки якоря в повздовжній та поперечній осях і обмотки збудження відповідно.

Потокозчеплення обмоток

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_d = L_d i_d + M_{ad} i_f + M_{ad} i_{dd}; \\ \psi_q = L_q i_q + M_{aq} i_{dq}; \\ \psi_f = L_f i_f + M_{ad} i_d + M_{ad} i_{dd}; \\ \psi_{dd} = L_{dd} i_{dd} + M_{ad} i_d + M_{ad} i_f; \\ \psi_{dq} = L_{dq} i_{dq} + M_{ad} i_q, \end{array} \right. \quad (1.13)$$

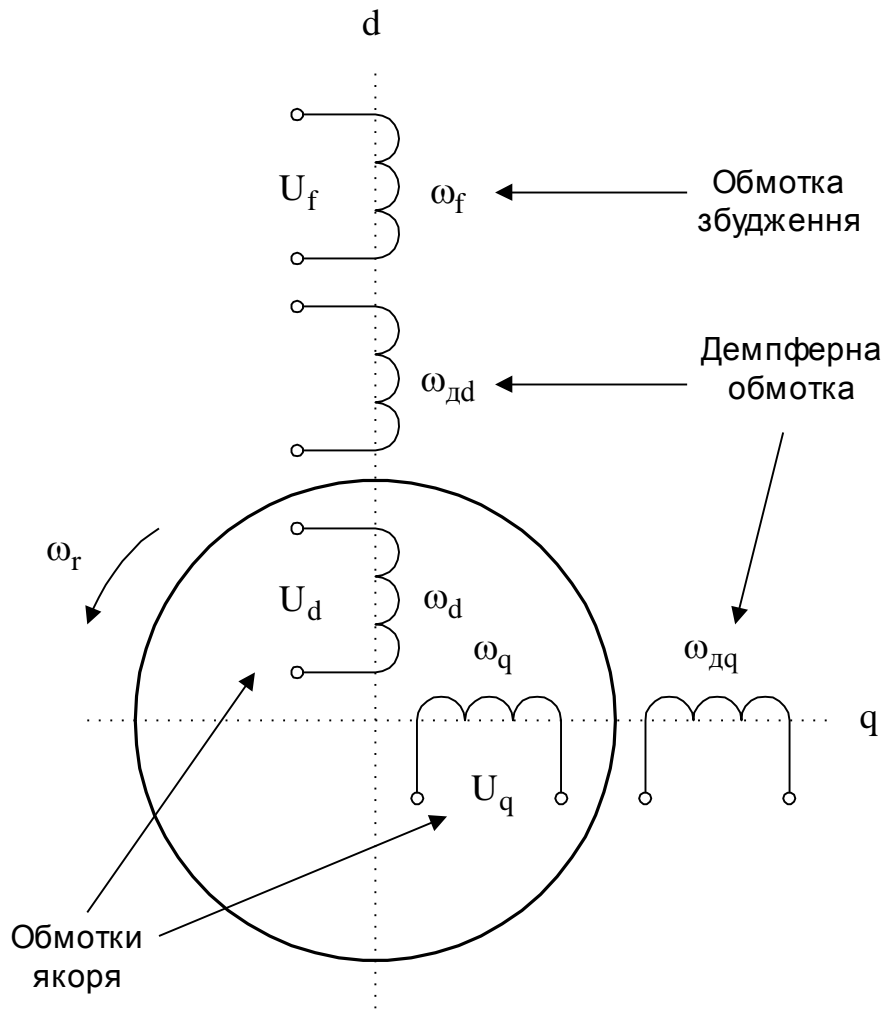


Рис. 1.15. Просторова модель СД

де $L_d, L_q, L_f, L_{dd}, L_{dq}$ - індуктивності обмоток якоря, обмотки збудження і демпферної обмотки по осях d і q відповідно;

M_{ad}, M_{aq} - взаємні індуктивності обмоток по осях d і q відповідно.

Електромеханічний момент M_e визначається через струми і потокозчеплення або через струми

$$M_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d; \quad (1.14)$$

$$M_e = M(i_f i_q + i_q i_{dd} - i_d i_{dq}), \quad (1.15)$$

де $M = M_{aq} = M_{ad}$, що має місце в неявнополюсному СД.

Сукупність рівнянь напруг (1.12) і рівняння моменту (1.14) чи (1.15) описує процеси електромеханічного перетворення енергії в СД.

Підставивши (1.13) в (1.12) та провівши відповідні математичні перетворення, можна записати систему рівнянь (1.12) у матричній формі:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{дd} \\ i_{дq} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \times \begin{bmatrix} U_d + L_q i_q \omega_r + M_{aq} i_{дq} \omega_r - R_a i_d \\ U_q - L_d i_d \omega_r - M_{aq} i_f \omega_r - M_{ad} i_{дd} \omega_r - R_a i_q \\ U_f - R_f i_f \\ -R_{дq} i_{дq} \\ -R_{дd} i_{дd} \end{bmatrix}, (1.16)$$

де

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{ad} & 0 & M_{ad} \\ 0 & L_q & 0 & M_{aq} & 0 \\ M_{ad} & 0 & L_f & 0 & M_{ad} \\ 0 & M_{aq} & 0 & L_{дq} & 0 \\ M_{ad} & 0 & M_{ad} & 0 & L_{дd} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{M_{ad}^2 - L_f L_{дd}}{k} & 0 & \frac{(L_{дd} - M_{ad})M_{ad}}{k} & 0 & \frac{(L_f - M_{ad})M_{ad}}{k} \\ 0 & \frac{-L_{дq}}{k_1} & 0 & \frac{M_{aq}}{k_1} & 0 \\ \frac{(L_{дd} - M_{ad})M_{ad}}{k} & 0 & \frac{M_{ad}^2 - L_d L_{дd}}{k} & 0 & \frac{(L_d - M_{ad})M_{ad}}{k} \\ 0 & \frac{M_{aq}}{k_1} & 0 & \frac{-L_q}{k_1} & 0 \\ \frac{(L_f - M_{ad})M_{ad}}{k} & 0 & \frac{(L_d - M_{ad})M_{ad}}{k} & 0 & \frac{M_{ad}^2 - L_d L_f}{k} \end{bmatrix};$$

$$k = -2M_{ad}^3 + M_{ad}^2 (L_d + L_f + L_{дd}) - L_d L_f L_{дd}; \quad k_1 = M_{aq}^2 - L_q L_{дq}.$$

Рівняння руху ротора СД аналогічне (1.8).

Таким чином, математична модель СД запишеться у вигляді:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{di_d(t)}{dt} &= \frac{1}{k} \left[\left(M_{ad}^2 - L_f L_{\Delta d} \right) \left(U_d(t) + L_q i_q(t) \omega_r(t) + M_{aq} i_{\Delta q}(t) \omega_r(t) - R_a i_d(t) \right) - \right. \\
&\quad \left. - M_{ad} \left(M_{ad} - L_{\Delta d} \right) \left(U_f(t) - R_f i_f(t) \right) \right]; \\
\frac{di_q(t)}{dt} &= \frac{1}{k_1} \left[L_{\Delta q} \left(U_q(t) - L_d i_d(t) \omega_r(t) - M_{ad} i_f(t) \omega_r(t) - M_{ad} i_{\Delta q}(t) \omega_r(t) - R_a i_q(t) \right) + \right. \\
&\quad \left. + M_{aq} R_{\Delta q} i_{\Delta q}(t) \right]; \\
\frac{di_f(t)}{dt} &= -\frac{1}{k} \left[M_{ad} \left(M_{ad} - L_{\Delta q} \right) \left(U_d(t) + L_q i_q(t) \omega_r(t) + M_{aq} i_{\Delta q}(t) \omega_r(t) - R_a i_d(t) \right) + \right. \\
&\quad \left. + \left(L_d L_{\Delta d} - M_{ad}^2 \right) \left(U_f(t) - R_f i_f(t) \right) + M_{ad} \left(L_d - M_{ad} \right) R_{ad} i_{\Delta d}(t) \right]; \\
\frac{di_{\Delta d}(t)}{dt} &= -\frac{1}{k_1} \left[\left(U_q(t) - L_d i_d(t) \omega_r(t) - M_{ad} i_f(t) \omega_r(t) - M_{ad} i_{\Delta q}(t) \omega_r(t) - R_a i_q(t) \right) \times \right. \\
&\quad \left. \times M_{aq} + L_q R_{\Delta q} i_{\Delta q}(t) \right]; \\
\frac{di_{\Delta q}(t)}{dt} &= \frac{1}{k} \left[-M_{ad} \left(M_{ad} - L_f \right) \left(U_d(t) + L_q i_q(t) \omega_r(t) + M_{aq} i_{\Delta q}(t) \omega_r(t) - R_a i_d(t) \right) + \right. \\
&\quad \left. + M_{ad} \left(L_d - M_{ad} \right) \left(U_f(t) - R_f i_f(t) \right) + \left(L_d L_f - M_{ad}^2 \right) R_{\Delta d} i_{\Delta d}(t) \right]; \\
\frac{d\omega_p(t)}{dt} &= \frac{p}{J} \left(M_e(t) - M_0 \left(\omega_r(t) \right) \right); \quad M_e(t) = M \left(i_f(t) i_q(t) + i_q(t) i_{\Delta d}(t) - i_d(t) i_{\Delta q}(t) \right); \\
k &= -2M_{ad}^3 + M_{ad}^2 \left(L_d + L_f + L_{\Delta d} \right) - L_d L_f L_{\Delta d}; \quad k_1 = M_{aq}^2 - L_q L_{\Delta q}; M = M_{aq} = M_{ad}.
\end{aligned} \right. \quad (1.17)$$

Розв'язок системи (1.17) можна отримати чисельними методами в середовищі символічної математики Maple V R5 (рис. 1.16 – 1.17).

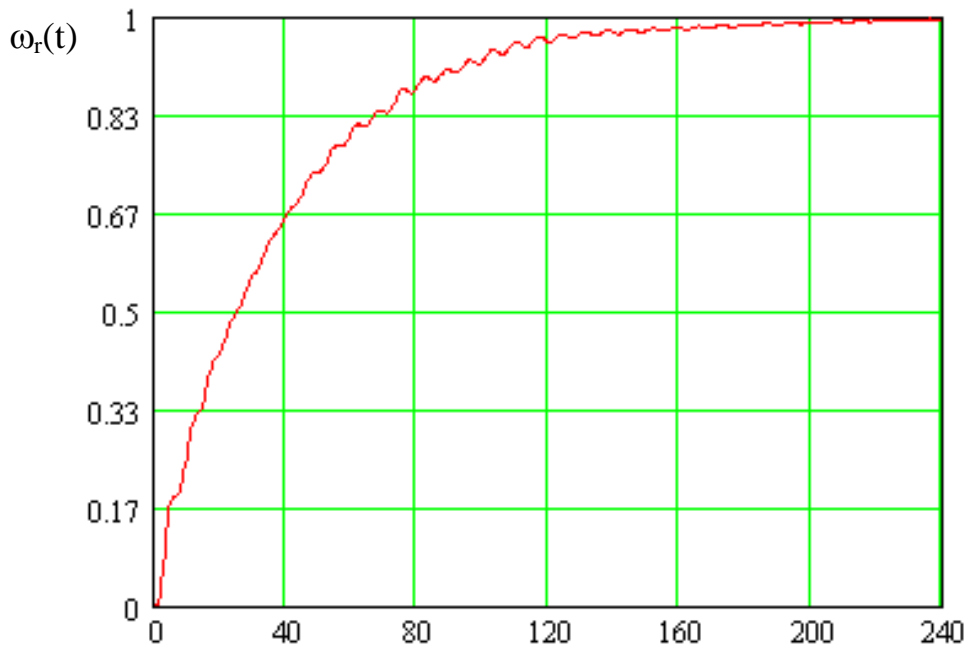


Рис. 1.16. Кутова швидкість СД

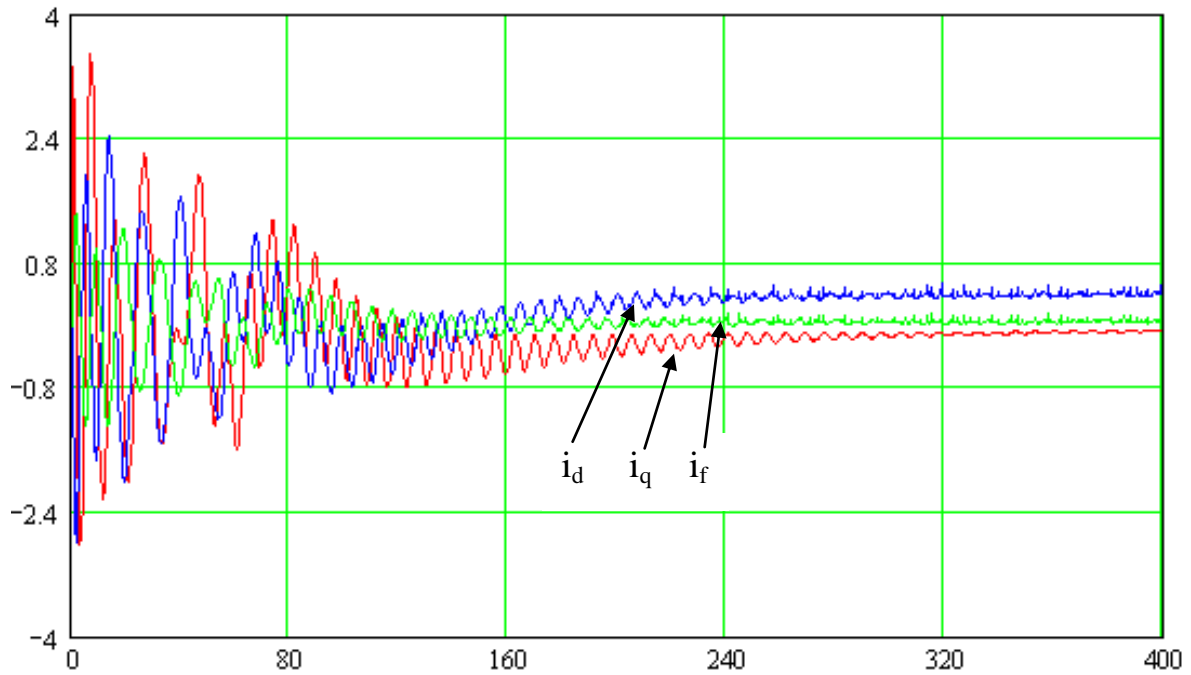


Рис. 1.17. Струми i_d, i_q, i_f СД

1.2.1.3. Діагностична модель двигуна постійного струму

Розглянемо діагностичну модель ДПС на прикладі двигуна паралельного збудження. В цьому ЕМ є два контури: контур обмотки збудження і контур якоря, що складається із послідовно з'єднаних обмоток – компенсаційної, додаткових полюсів і якоря. Рівняння рівноваги напруг контурів ДПС прийнято записувати в системі нерухомих координат α, β [24, 37, 38]:

$$\begin{cases} U = R_b i_b + \frac{d\psi_{вш}}{dt}; \\ U = R i_a + \frac{d\psi}{dt} + \omega_r \psi_{ад}, \end{cases} \quad (1.18)$$

де U – напруга, прикладена до контактів ДПС;

i_a, i_b - струми, що протікають в обмотках;

R_b, R - активні опори контурів обмоток збудження і якоря, причому $R_b = R_{ш} + R_{рег}$, $R = R_k + R_d + R_a$;

$R_{ш}, R_k, R_d, R_a$ - активні опори шунтової, компенсаційної обмоток і обмоток додаткових полюсів та якоря;

$R_{рег}$ - опір регулювання;

$\psi_{вш}$ - потокозчеплення обмотки паралельного збудження;

ψ - повне потокозчеплення обмоток контуру якоря ідеалізованого ЕМ.

Потокозчеплення обмоток ДПС паралельного збудження

$$\begin{cases} \psi_{вш} = L_{ш}i_{в}; \\ \psi_{ад} = L_{ад}i_{в}; \\ \psi = Li_a; \\ L = (L_{к} + L_{д} + L_{а}) + 2(L_{кд} - L_{ка} - L_{да}), \end{cases} \quad (1.19)$$

де $L_{ш}$ – повна індуктивність обмотки паралельного збудження;

$L_{к}, L_{д}, L_{а}$ – повні індуктивності обмоток: компенсаційної, додаткових полюсів і якоря;

$L_{кд}, L_{ка}, L_{да}$ – взаємні індуктивності обмоток: компенсаційної і додаткових полюсів, додаткових полюсів і обмотки збудження.

$L_{ад}$ – взаємна індуктивність обмотки якоря по повздовжній осі і обмотки збудження.

Електромеханічний момент M_e визначається через струми і потокозчеплення

$$M_e = \psi_{ад}i_a. \quad (1.20)$$

Таким чином, математична модель ДПС запишеться у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{di_{в}(t)}{dt} = \frac{U(t) - R_{в}i_{в}(t)}{L_{ш}}; \\ \frac{di_a(t)}{dt} = \frac{U(t) - Ri_a(t) - \omega_r(t)L_{ад}i_{в}(t)}{L}; \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{p}{J} [M_e(t) - M_0(\omega_r(t))]; \\ M_e(t) = L_{ад}i_{в}(t)i_a(t). \end{cases} \quad (1.21)$$

Розв'язок системи (1.21) отримано чисельними методами в середовищі символної математики Maple V R5 [32] (рис. 1.17).

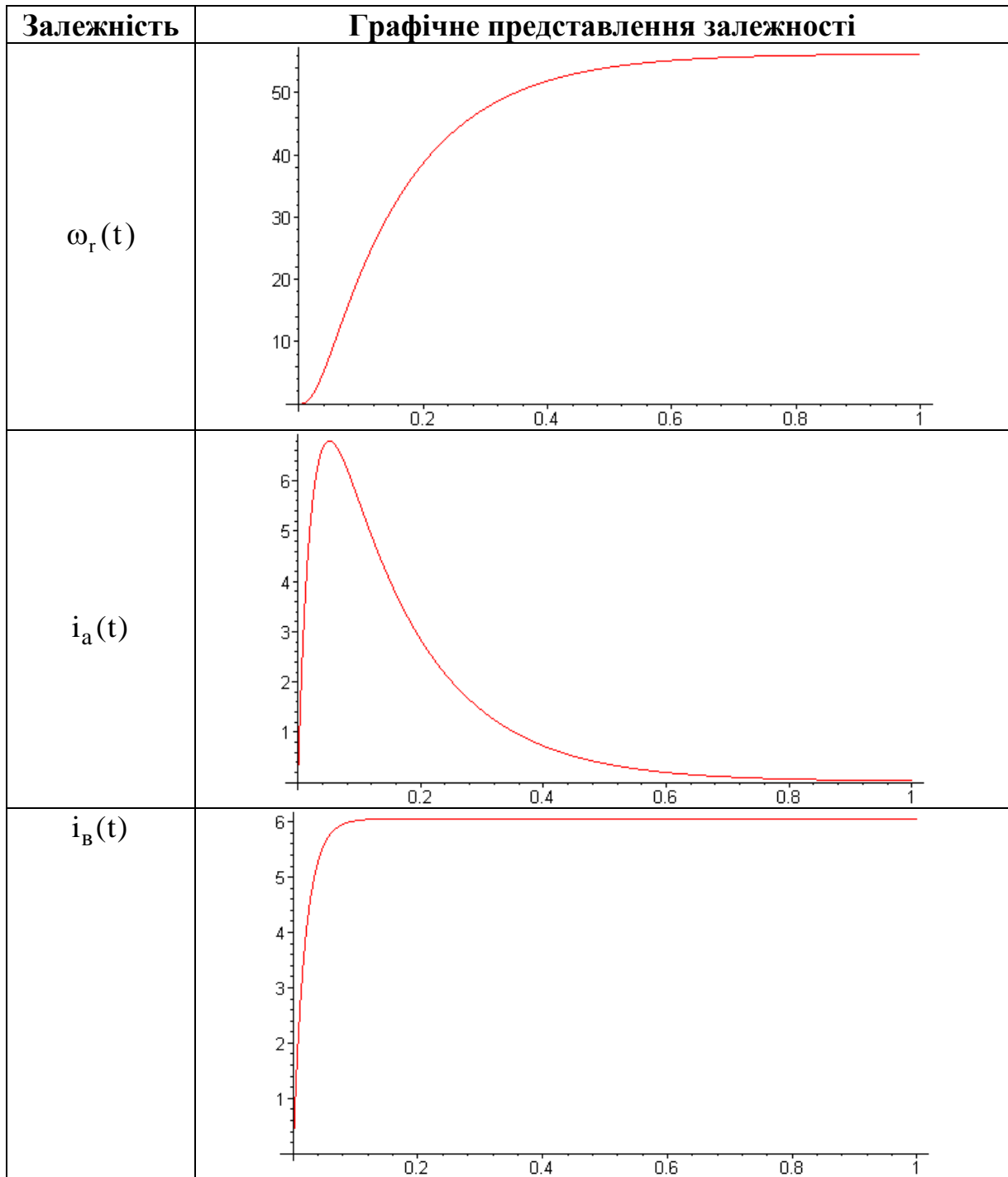


Рис. 1.18. Результати моделювання ДПС типу 03АТ8С4004

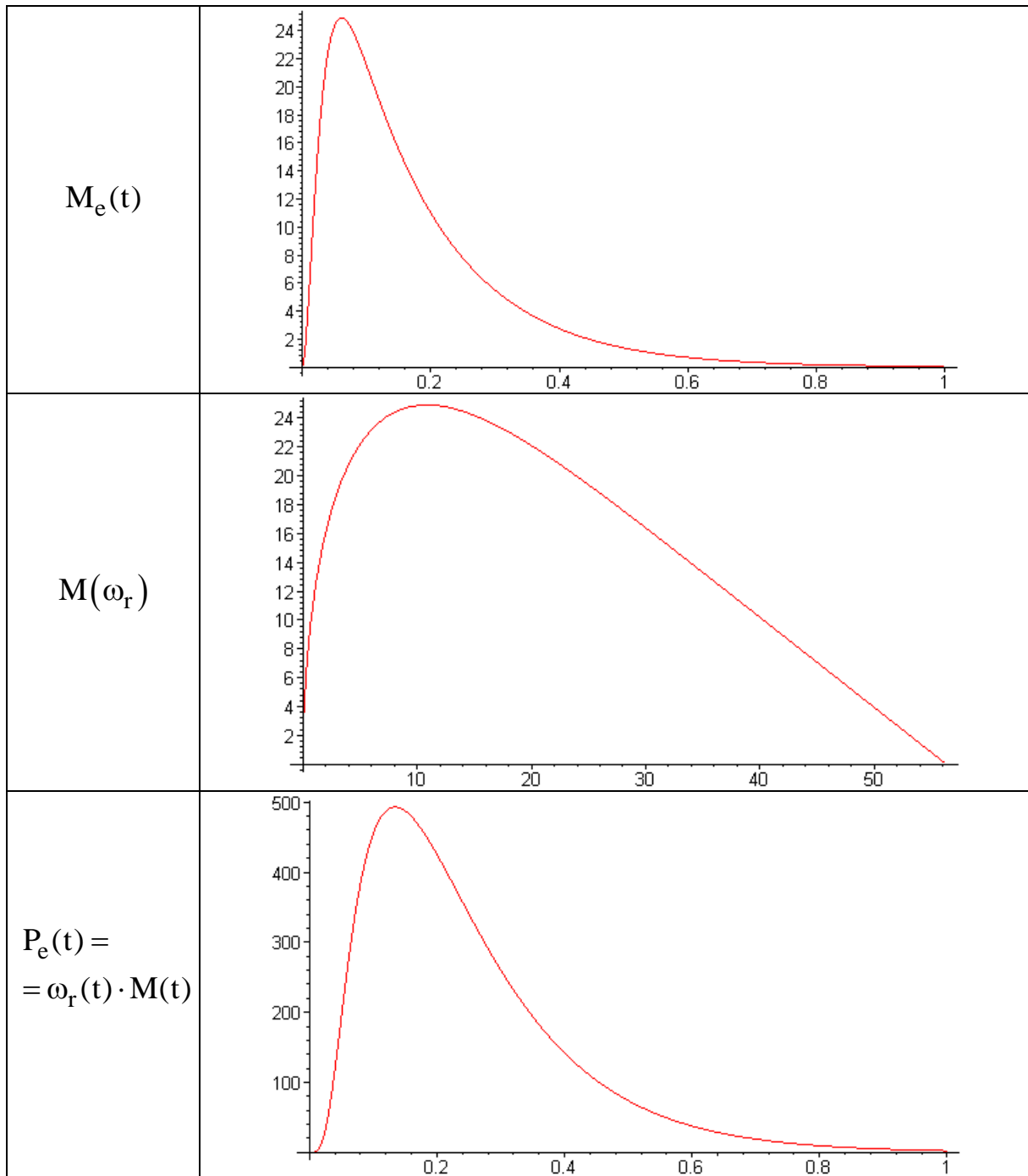


Рис. 1.18. Продовження

1.2.2. Класифікація та аналіз методів визначення параметрів діагностування електромоторів

Загальний аналіз існуючих методів визначення параметрів діагностування ЕМ досить важко охопити, не давши їх класифікацію. Пропонується класифікація [39] (рис. 1.19) методів визначення параметрів діагностування ЕМ за такими класифікаційними ознаками: за

видом вимірювання; за видом випробовування; за видом інформативного параметра.

За видом вимірювання методи визначення параметрів діагностування ЕМ розділяються на методи прямого вимірювання, опосередкованого вимірювання.

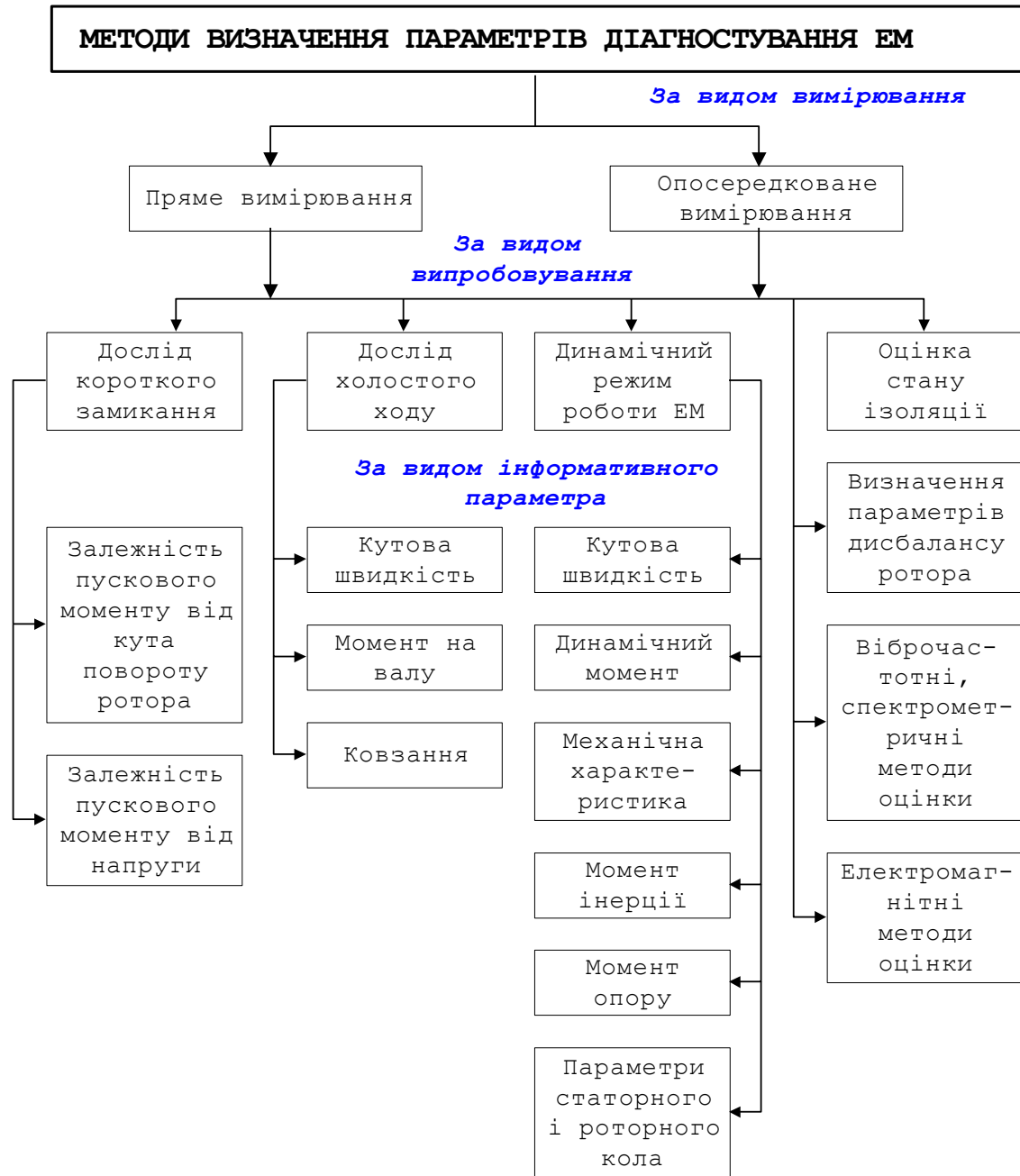


Рис. 1.19. Класифікація методів визначення параметрів діагностування ЕМ

За видом випробовування методи визначення параметрів діагностування ЕМ розділяються на дослід короткого замикання; дослід хо-

лостого ходу; динамічний режим роботи ЕМ; оцінку стану ізоляції; методи визначення параметрів дисбалансу ротора; віброчастотні, спектрометричні, теплові, електромагнітні методи.

Основними джерелами вібрації та шуму ЕМ є: кінцевий дисбаланс (неврівноваженість) ротора, наявність еліпсу цапфи валу, наявність електромагнітних сил (магнітного шуму) і аеродинамічних сил. Крім того, вібрації та шум виникають від підшипників кочення та щіток.

Знаючи амплітуди та частоти окремих складових коливального процесу, тобто його спектр, можна виявити джерела цих коливань за допомогою функцій кореляції. Поведінка функції автокореляції

$$K_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt$$

може відображати стан ЕМ. Наприклад,

при появі дефекту, зв'язаного із збудженням періодичного процесу з періодом T , акустичний сигнал $x(t)$ можна представити як суму періодичної $A(t)$ та шумової $Z(t)$ компонент: $x(t) = A(t) + Z(t)$. При значеннях τ , що перевищують інтервал кореляції τ_0 шумового процесу, функція автокореляції стає періодичною з періодом T . За значеннями нормованої функції кореляції можна визначити відношення енергії періодичної компоненти до енергії всього сигналу, тобто може бути сформована ознака дефекту, що спричинюється змінами співвідношень періодичної та шумової компонент в акустичному сигналі.

З діагностичною метою використовують [1, 2] також властивості функцій взаємної кореляції $K_{xy}(\tau)$ коливальних процесів $x(t)$ і $y(t)$, що виміряні в двох точках конструкції ЕМ. За результатами аналізу можна міркувати про вклад різних джерел збудження вібрації в загальний коливальний процес.

Перетворення Фур'є від функції взаємної кореляції

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_{xy}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau$$

(взаємна спектральна щільність потужнос-

ті) використовується для формування діагностичних ознак за рахунок оцінювання передатної функції ЕМ $H(j\omega)$ при відхиленні її від норми. Якщо з проявом дефекту змінюється характер передатної функції ЕМ (зміщуються власні частоти, змінюється амплітуда чи фазовий зсув), то будь-який з цих параметрів може бути використаний як діагностичний.

За видом інформативного параметра методи визначення параметрів діагностування ЕМ розділяються на:

1. При виконанні досліду короткого замикання: *залежність пускового моменту від кута повороту ротора; залежність пускового моменту від напруги живлення.*

2. При виконанні досліду холостого ходу: *кутова швидкість; ковзання; момент на валу.*

3. При виконанні динамічного режиму роботи ЕМ: *кутова швидкість $\omega_r(t)$; динамічний момент $M_e(t)$; момент інерції J ; момент опору $M_0(\omega_r)$; механічна характеристика $M_e(\omega_r)$; параметри статорного і роторного кола.*

Для визначення параметрів діагностування ЕМ в динамічних режимах їх роботи можуть використовуватися різні методи прямого вимірювання, опосередкованого вимірювання, ідентифікації параметрів.

Методи вимірювання кутової швидкості, їх класифікація та ІВС для їх реалізації докладно розглядаються в роботах [40-52].

Методи визначення динамічного моменту, моменту інерції, моменту опору, механічної характеристики, їх класифікація та ІВС для їх реалізації докладно розглядаються в роботах [53-86].

В теперішній час опубліковано ряд праць, в яких порушується питання розробки методів визначення діагностичних параметрів статорного і роторного кола. Параметри статорного кола можна безпосередньо виміряти (пряме вимірювання), в той час як параметри роторного кола виміряти неможливо, і для їх оцінки необхідно використовувати апарат теорії ідентифікації (опосередковане вимірювання). На рис. 1.20 наведена класифікація методів ідентифікації параметрів ЕМ.

Ідентифікація у загальному сприйнятті полягає у визначенні параметрів системи на основі даних експериментальних спостережень. Ця проблема допускає кілька формулювань в залежності від природи моделі, існуючої інформації тощо.

Розглянемо об'єкт, який зазнає динамічні впливи. Використання різних методів моделювання приведе до системи диференціальних рівнянь

$$\frac{d\mathbf{U}}{dt} = f(\mathbf{U}, \mathbf{a}), \quad (1.22)$$

що описує зміну стану системи у часі за допомогою зручним чином вибраних змінних стану \mathbf{U} . В (1.22) величини \mathbf{a} є коефіцієнтами рівнянь, які зв'язані із параметрами об'єкту. В практиці звичайно вважається, що всі коефіцієнти \mathbf{a} відомі, тому основною задачею є інтегрування рівняння стану (1.22) чи вивчення стійкості системи під час дії різних зовнішніх факторів. Але відомо, що це класичне допущення

(про можливість визначення коефіцієнтів) справедливе тільки для відносно простих моделей.

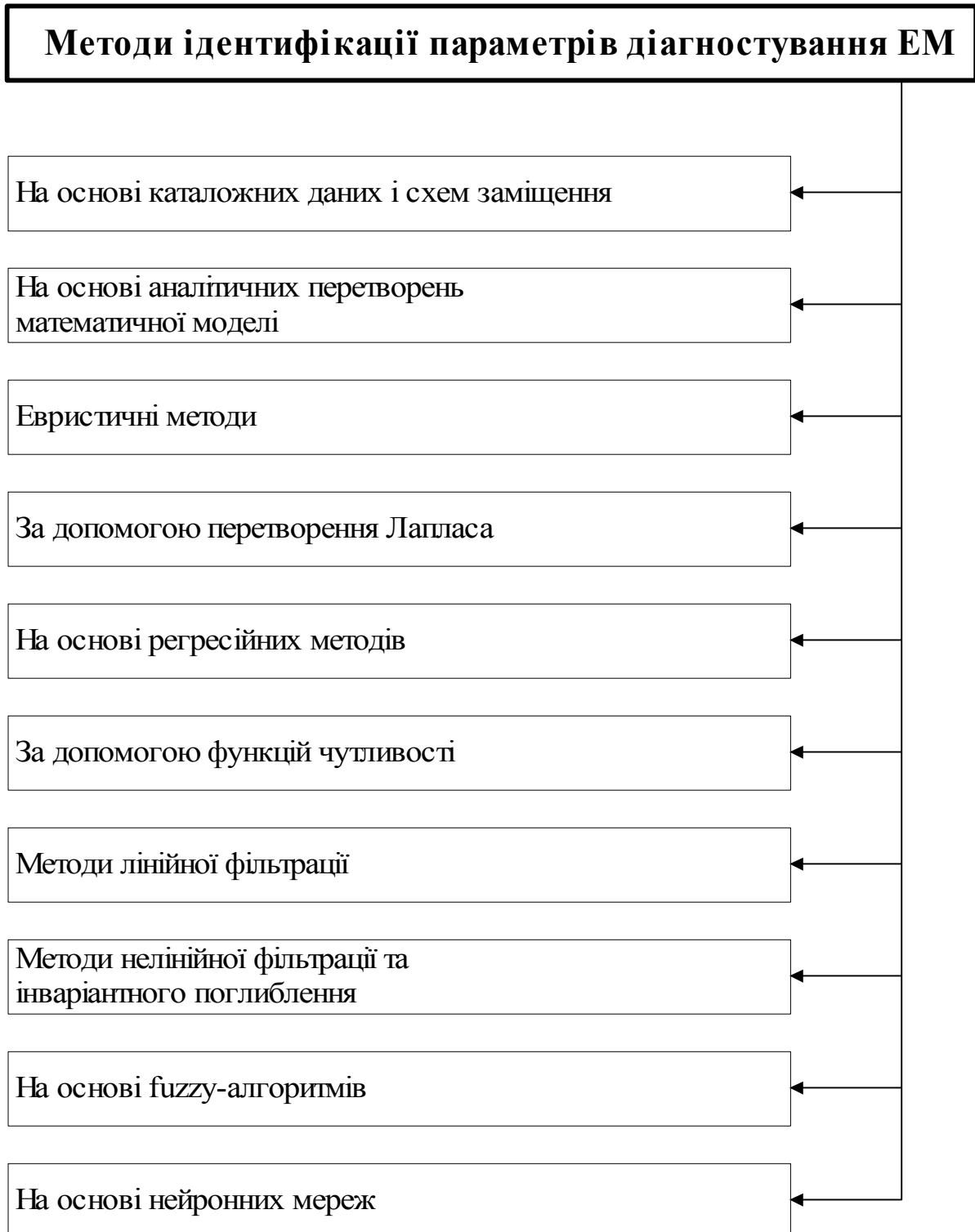


Рис. 1.20. Класифікація методів ідентифікації параметрів діагностування ЕМ

Виникає інтерес формулювання зворотної задачі: для даної моделі (1.22) знайти такий набір параметрів \mathbf{a} , щоб отримати найкраще узгодження з експериментальними даними. Так сформульована задача ідентифікації зводиться до задачі найкращої відповідності в просторі функцій. Ясно, що задача ідентифікації є зворотною задачею і тому пов'язана із рядом труднощів аналітичного і обчислювального характеру. По-перше, тільки вузький клас зворотних задач допускає повне аналітичне обернення; по-друге, чисельне рішення цієї задачі – недостатньо пророблена область.

Зворотна задача є некоректно поставленою за Тихоновим [87]. Математичне формулювання коректно поставленого розв'язання рівняння (1.22) таке. Задача визначення розв'язку \mathbf{a} із простору Ω_a за вихідними даними \mathbf{U} із простору Ω_U називається коректно поставленою, якщо виконуються такі умови:

1. Для всякого елементу U існує розв'язок $\mathbf{a} \in \Omega_a$.
2. Розв'язок визначається однозначно.
3. Задача стійка.

При цьому задача знаходження розв'язку $\mathbf{a} = \Psi(\mathbf{U})$ називається стійкою, якщо для будь-якого числа $\varepsilon > 0$ можна знайти таке число $\delta(\varepsilon) > 0$, що із нерівності $\rho_U(\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2) \leq \delta(\varepsilon)$ випливає нерівність $\rho_a(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2) \leq \varepsilon$, де $\mathbf{a}_1 = \Psi(\mathbf{U}_1)$, $\mathbf{a}_2 = \Psi(\mathbf{U}_2)$; $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2 \in \Omega_U$; $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \in \Omega_a$; ρ_U, ρ_a - відповідні відстані в нормованих просторах Ω_U, Ω_a . Задачі, які не задовольняють хоча б одній із перерахованих вище умов, є некоректно поставленими. Для розв'язку некоректно поставлених задач використовується, наприклад, метод регуляризації Тихонова [87].

Ідентифікація на основі каталожних даних і схем заміщення [88-92]. Ідентифікація на основі аналітичних перетворень математичної моделі ЕМ [93, 94]. Загальна суть даних методів полягає в тому, що виходячи із схеми заміщення чи математичної моделі ЕМ, визначаються параметри, які підлягають вимірюванню і проводяться перетворення вихідної математичної моделі ЕМ до форми $\mathbf{a} = \Psi(\mathbf{U})$ з наступними розрахунками \mathbf{a} .

Для таких методів характерне використання повної апріорної інформації про стан ЕМ. До недоліків цих методів можна віднести відсутність апарату зменшення впливу похибок вимірювання на результати ідентифікації, ускладнену оцінку кінцевої похибки ідентифікації параметрів. У цьому випадку потрібно підвищувати точність вимірювання апріорної інформації.

Евристичні методи ідентифікації [95-99]. Найпростішими методами ідентифікації параметрів ЕМ є евристичні (пошукові) методи

ідентифікації. В них відсутнє строге математичне формулювання, і їх необхідно використовувати лише в тих випадках, коли інші методи ідентифікації є неефективними і математичні формулювання неадекватні через суттєву нелінійність математичної моделі.

Суть евристичних методів основана на знаходженні мінімуму деякого функціонала якості. Мінімізація може здійснюватися різними методами (методами прямого пошуку, методами градієнтного пошуку).

Завдяки своїй спрощеній схемі евристичні процедури можуть довго сходитися до істинних значень параметрів.

У випадку ідентифікації нелінійних систем (багатомодальності функціоналу якості) евристичні процедури повинні включати у себе пошук глобального мінімуму, і тому мають досить низьку збіжність і значний об'єм обчислень.

Ідентифікація за допомогою перетворення Лапласа [100]. Математичний апарат операторного перетворення Лапласа можна застосувати до нелінійної жорсткої системи диференціальних рівнянь ЕМ лише за умови $\omega_r = \text{const}$, тобто в усталеному режимі роботи ЕМ. За цієї умови можна знайти аналітичне розв'язання системи диференціальних рівнянь ЕМ.

Із практики відомо, що ЕМ навіть в усталеному режимі роботи має нерівномірність частоти обертання, яка зумовлена конструктивними особливостями ЕМ. Це спричинює додаткову похибку при ідентифікації параметрів ЕМ.

Ідентифікація за допомогою регресійних методів [101]. Дані методи засновані на регресійних процедурах з використанням методів найменших квадратів. Нелінійні системи лінеаризуються та ідентифікуються методом лінійної регресії за умови повільно змінюваної вихідної величини. Можливе використання для опису нелінійної системи апроксимацією поліномами і ортогональними поліномами Чебишева, але цей підхід має ряд недоліків, пов'язаних з похибкою апроксимації і неявним фізичним смислом коефіцієнтів поліномів.

Ідентифікація за допомогою функцій чутливості [102-106]. Загальна схема параметричної ідентифікації динамічної системи (1.22) з використанням функцій чутливості полягає в апроксимації (1.22) першим наближенням [107]

$$\mathbf{U}(\mathbf{a} + \Delta\mathbf{a}, t) = \mathbf{U}(\mathbf{a}, t) + \mathbf{S}(t) \cdot \Delta\mathbf{a}, \quad (1.23)$$

де $S(t) = \left. \frac{\partial f(\mathbf{U}, \mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} \right|_{\Delta \mathbf{a}=0}$ - матриця чутливості, яка є розв'язком рівняння

чутливості $\dot{S} = \frac{\partial f(\mathbf{U}, \mathbf{a})}{\partial \mathbf{U}} \cdot S + \frac{\partial f(\mathbf{U}, \mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}}$ з наступним визначенням із

(1.23) додаткового руху $\Delta \mathbf{a}$. Для отримання оцінки $\Delta \mathbf{a}$ на кожному кроку ітерації використовуються процедури типу найменших квадратів.

До недоліків даного методу ідентифікації параметрів ЕМ можна віднести недостатнє обґрунтування допустимості першого наближення $\Delta \mathbf{U}(t, \mathbf{a}) \approx \Delta^{(1)} \mathbf{U}(t, \mathbf{a})$ у випадку жорсткої нелінійної системи диференціальних рівнянь ЕМ та необхідність спільного розв'язку математичної моделі ЕМ та системи функцій чутливості.

Ідентифікація за допомогою методів лінійної фільтрації [79] заснована на використанні фільтрів Вінера, Калмана до визначення параметрів лінеаризованих математичних моделей ЕМ.

До переваг цих методів можна віднести врахування похибок вимірювання вхідних параметрів, до недоліків – додаткова похибка визначення параметрів ЕМ внаслідок лінеаризації математичної моделі.

Ідентифікація за допомогою методів інваріантного поглиблення та нелінійної фільтрації [108, 110]. Ці методи можна використовувати для ідентифікації параметрів, а також для одночасного послідовного оцінювання стану лінійних і нелінійних спостережуваних систем.

Збіжність ідентифікації даними методами до фактичних значень можна забезпечити в досить широкому діапазоні початкових оцінок, але при цьому вимагаються апріорні дані про діапазон, всередині якого знаходяться значення параметрів.

Ідентифікація основана на інтегруванні за часом системи нелінійних диференціальних рівнянь, розв'язок яких повинен сходиться до оцінок параметрів і змінних часу. Оскільки вимірювання входять у праву частину математичної моделі ОД, то чим триваліше процес вимірювань, тим точніше розв'язок сходиться до істинних значень параметрів.

Оскільки ці методи можуть забезпечити оптимальне оцінювання параметрів і всіх змінних стану, він є одним із найпотужніших математичних методів ідентифікації.

Методи ідентифікації на основі fuzzy-алгоритмів [111, 112] використовують процедуру “fuzzyfication”, процедуру “defuzzyfication”, правила fuzzy-логіки для визначення параметрів ЕМ. Fuzzy-правила алгоритму ідентифікації визначаються як

If $(\Delta U_{1(k)} \text{ and } \Delta U_{2(k)} \text{ and } \dots \text{ and } \Delta U_{m(k)})$ then $\Delta \mathbf{a}_{n(k)}$,

де k – крок ітерації, n – певний елемент вектора \mathbf{a} .

Такі правила дуже важко визначити для жорстких систем і застосувати для ідентифікації систем із числом елементів векторів U і a більшим ніж 2, тому цей алгоритм ідентифікації застосовують лише для ідентифікації невеликої кількості параметрів ЕМ.

Методи ідентифікації на основі нейронних мереж [112, 113] використовують штучні нейронні мережі, які складаються із паралельно працюючих окремих нейронів. Нейрони зважено підсумовують і самозбуджують активності інших нейронів при перевищенні відомого порогу величини вхідного сигналу. Таким чином, знання, що є у нейронній мережі, складаються в розподіленні ваги сигналів між нейронами. Ці ваги встановлюються наперед у фазі навчання за простими, незалежними від конкретної задачі правилами.

Нейронні мережі застосовуються здебільшого для ідентифікації дискретизованих систем. У випадку нелінійної жорсткої системи ЕМ появляється додаткова похибка, зв'язана із неадекватністю дискретизованої математичної моделі реальному ОД. Крім того, у зв'язку із великим об'ємом обчислень і необхідністю попереднього навчання нейронної мережі її застосовують для ідентифікації невеликої кількості параметрів.

1.2.3. Класифікація методів та засобів технічного діагностування електромоторів

Пропонується класифікація відомих [114-132] методів та засобів ТД ЕМ за такими класифікаційними ознаками (рис. 1.21): за призначенням; за режимом роботи; за ступенем автоматизації; за характером використання; за способом впливу на ОД; за видом відображення технічного стану ЕМ у вигляді діагнозу; за способом спостереження фізичних середовищ; за параметрами діагностування.

За призначенням методи та засоби ТД ЕМ розділяються на *поточні* і *прогнозуючі*. Поточне діагностування – визначення стану, правильності і можливості виконання ОД певних функцій до наступної діагностики. Мета прогнозуючого діагностування – отримання вихідних даних для прогнозування можливих змін ОД чи процесу і передбачення несправностей, які можуть виникнути.

За режимом роботи методи та засоби ТД ЕМ розділяються на *постійно діючі (неперервні)*, *періодично діючі* і *разові*. Постійно діюче діагностування характеризується постійним контролем за вибраними параметрами. При періодично діючому діагностуванні контроль здійснюється через певні проміжки часу. Разове діагностування використовують в разі недостатньої інформації від постійного і періодичного діагностування.

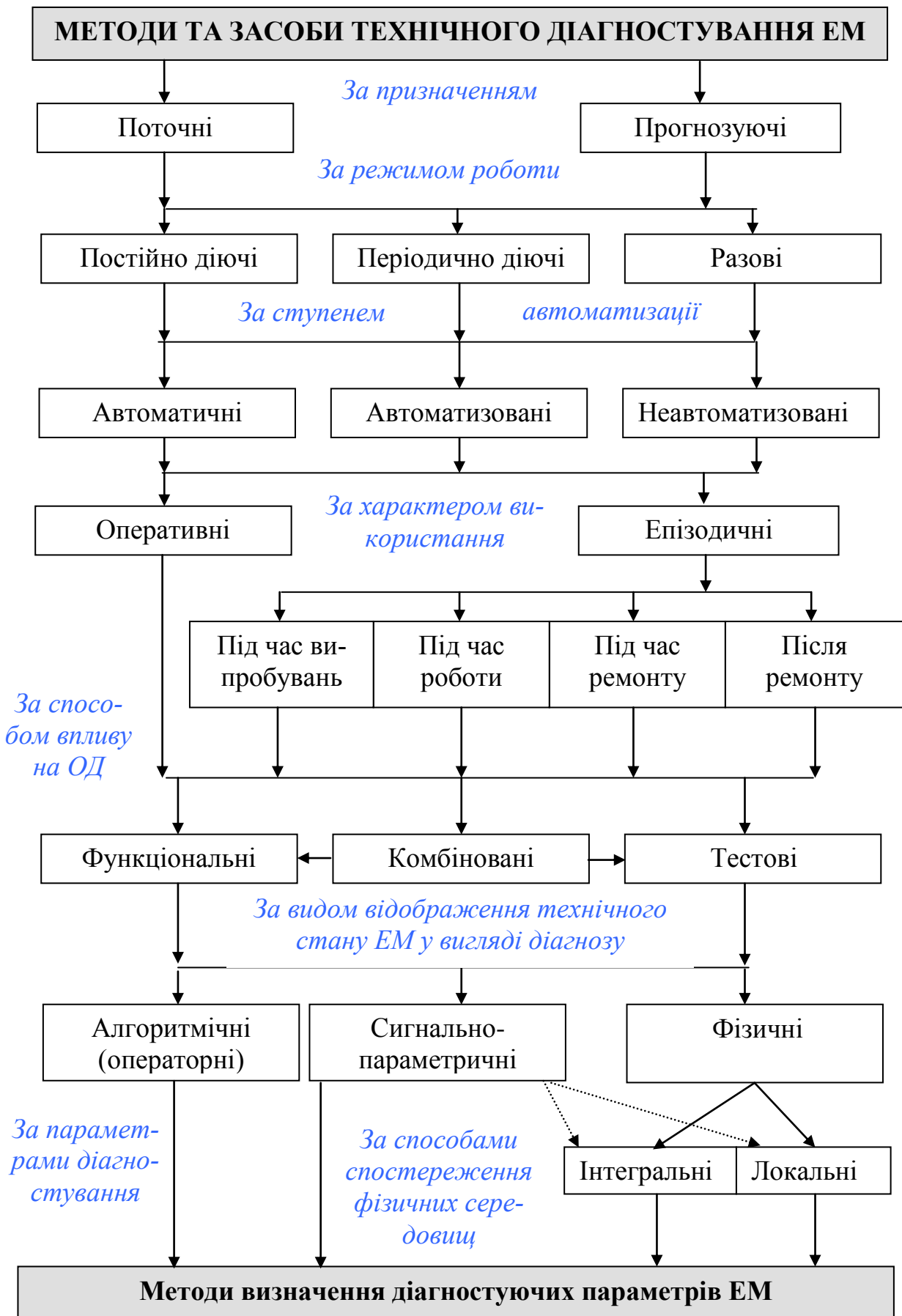


Рис. 1.21. Класифікація методів та засобів ТД ЕМ

За характером використання методи та засоби ТД ЕМ діляться на оперативні та епізодичні під час випробувань, під час ремонту, після ремонту.

За способом впливу на ОД методи та засоби ТД ЕМ діляться на функціональні, тестові, комбіновані.

Функціональне діагностування дає можливість на виявити порушення правильності функціонування окремих вузлів працюючому ОД. Недолік – виявлення правильності функціонування лише в даний момент часу і в даному режимі. При цьому можуть бути не виявлені несправності ОД в іншому режимі роботи.

Тестове діагностування дає можливість отримати повну інформацію про стан ОД, але воно придатне лише під час проведення випробувань, профілактики чи ремонту.

Комбіноване діагностування являє собою поєднання функціональних і тестових методів та засобів ТД. Вони дають найбільш повне уявлення про технічний стан ОД як під час експлуатації, так і під час випробувань та ремонті.

За видом відображення технічного стану ЕМ у вигляді діагнозу розрізняються алгоритмічні (операторні), сигнально-параметричні та фізичні методи та засоби ТД.

Алгоритмічні (операторні) методи та засоби ТД використовують перевірку правильності функціонування ОД на основі оцінки логічних ознак при контролі.

Сигнально-параметричні методи та засоби ТД використовують перевірку правильності функціонування ОД з вимірюванням чи контролем робочих параметрів.

Фізичні методи та засоби ТД використовують інформаційні можливості фізичних ефектів у ОД під час його тестування спеціальними тестовими впливами.

За способом спостереження фізичних середовищ розрізняються локальні та інтегральні методи та засоби ТД. Ці особливості стосуються вибору способів дій тестування відносно ОД та способів відображення фізичних ефектів, що виникають у фізичному середовищі під їх впливом у вигляді сигналів-відгуків.

Аналіз існуючих методів та засобів технічного діагностування ЕМ у відповідності із запропонованою класифікацією дозволяє дійти таких висновків:

1. Нині достатньо теоретично розроблені і апробовані методи та засоби визначення залежності пускового моменту від кутового положення ротора; залежності пускового моменту від напруги живлення; струму і напруги в обмотках статора; механічної характеристики.

2. Вимірювальний канал кутової швидкості є основним для визначення таких параметрів ЕМ: кутове прискорення, динамічний момент, момент інерції, параметри дисбалансу ротора. Відомі методи вимірювального перетворення цих параметрів характеризуються невисокою точністю та низькою швидкодією через вплив муфти спряження та використання операцій диференціювання і згладжування значень кутової швидкості.

3. У теперішній час достатньо теоретично розроблені, експериментально апробовані математичні моделі практично всіх характеристик і параметрів ЕМ. Математичні моделі ЕМ з урахуванням залежності моменту опору M_0 від кутової швидкості ω_r не використовуються для діагностування стану ЕМ. Це веде до зменшення точності оцінки динамічного моменту, механічної характеристики, моменту інерції, параметрів статорного і роторного кола. Використання залежності $M_0(\omega_r)$ (1.10) дозволить суттєво підвищити точність визначення вказаних параметрів.

4. Встановлено, що для подальшого вдосконалення методів діагностування стану ЕМ при визначенні параметрів діагностування, які неможливо виміряти, найефективніше використання методів ідентифікації на основі інваріантного поглиблення та нелінійної фільтрації за допомогою функцій чутливості та на основі аналітичних перетворень математичної моделі ЕМ. Відомі теоретичні підходи, які покладено в основу методів ідентифікації внутрішніх параметрів ЕМ, не дозволяють достатньо точно визначити параметри діагностування, що потребує їх подальшого вдосконалення.

5. Відомі теоретичні підходи до технічного діагностування стану ЕМ не дозволяють комплексно оцінити стан ЕМ за загальною функцією якості, однозначно локалізувати несправність ЕМ. Крім того, вони не дозволяють за загальною функцією якості провести прогнозування розлагодження технологічного процесу виготовлення ЕМ.

6. Відсутні загальні підходи до проектування автоматизованих систем технічного діагностування ЕМ, які повинні складатись із алгоритмічного, апаратного, програмного і метрологічного забезпечення. Тому розробка таких засобів здійснюється інтуїтивно.

7. Результатом проведеного аналізу сучасного стану розвитку систем технічного діагностування ЕМ є висновок про необхідність подальшого розвитку теоретичних основ побудови систем технічного діагностування ЕМ з покращеними метрологічними характеристиками, розробки нових методів та алгоритмів вимірювального перетворення параметрів діагностування та нових автоматизованих засобів технічного діагностування ЕМ вищої швидкодії, точності і достовірності.

2. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ

2.1. Оцінювання якості електромоторів під час діагностування

У теперішній час багато публікацій присвячено оцінюванню показників якості під час проектування ЕМ [134-139], але питанню загального оцінювання якості під час їх технічного діагностування та випробовуваннях приділяється мало уваги.

Крім показників надійності – важливих показників якості, стандарти на ЕМ передбачають показники, які умовно називають номінальними: ККД η , коефіцієнт потужності $\cos\phi$, максимальний обертовий момент M_{\max} , початковий пусковий момент $M_{\text{пуск}}$, початковий пусковий струм $I_{\text{пуск}}$, ковзання s , мінімальний обертовий момент в процесі пуску M_{\min} , момент інерції ротора J (для асинхронних двигунів).

Номінальні показники визначають за результатами періодичних випробовувань. Але останнім підлягають лише незначна кількість ЕМ (дві, три ЕМ кожного типорозміру на початку їх виробництва або при кардинальній зміні конструкції). Всі ЕМ, які випускаються в подальшому, підлягають дуже скороченим приймально-здавальним випробовуванням. Крім вимірювання опору обмоток і випробовування електричної міцності ізоляції обмоток, в процесі приймально-здавальних випробовувань проводять два досліді: холостого ходу ХХ і короткого замикання КЗ. За результатами дослідів ХХ, КЗ і випробовувань обмоток приймають рішення про відповідність номінальних показників ЕМ вимогам стандартів.

У [3] запропоновано під час приймально-здавальних випробовувань ЕМ проводити деякі випробовування в динамічному режимі роботи ЕМ, в якому неминучі виявлення відхилень показників якості від нормованих, які виражаються у змінах значень струмів в обмотках, частоти обертання, моменту інерції, моменту опору, моменту на валу, форми механічної характеристики, параметрів статорного і роторного кола, параметрів дисбалансу. Тому представляється досить привабливим проводити діагностування двигунів за цими параметрами. При цьому кількість і склад параметрів, які підлягають визначенню згідно державних стандартів на випробовування, не змінюється.

З точки зору технічної діагностики зручно як модель використовувати залежність показників якості від параметрів діагностування, які розбиті на певні функціональні групи [140]. Показники якості ОД під час приймально-здавальних випробовувань зобразимо у вигляді ієрархічних моделей (рис. 2.1 – 2.3), попередньо прийнявши для них такі умови [141]:

1) Показники, які враховуються для оцінювання якості ЕМ під час випробовувань, повинні бути ідентичні показникам, які враховуються під час проектування.

2) Склад показників якості повинен відображати основні експлуатаційні характеристики ЕМ.

3) Показники якості повинні бути визначені таким чином, щоб простіше було визначати залежність між підвищенням якості ЕМ і зміною при цьому будь-якої експлуатаційної характеристики.



Рис. 2.1. Ієрархічна модель асинхронного двигуна

Рівень I характеризує узагальнений показник якості. Рівень II – комплексні показники якості. Рівень III – показники якості основних параметрів ЕМ.

При такій ієрархічній побудові показників якості задача зводиться до того, щоб оцінити вплив певного параметру ЕМ на узагальнений показник якості при випробовуваннях.

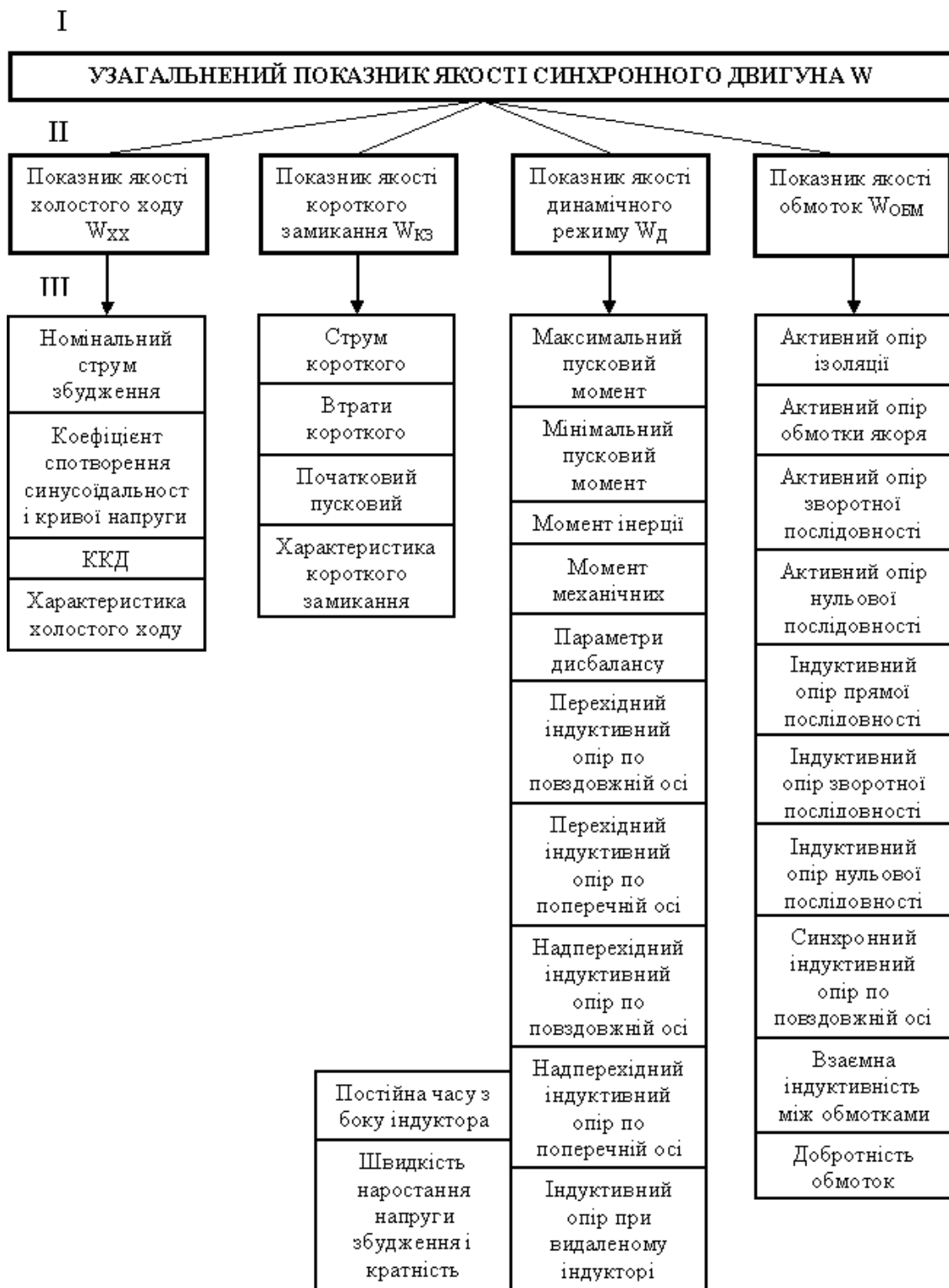


Рис. 2.2. Ієрархічна модель синхронного двигуна

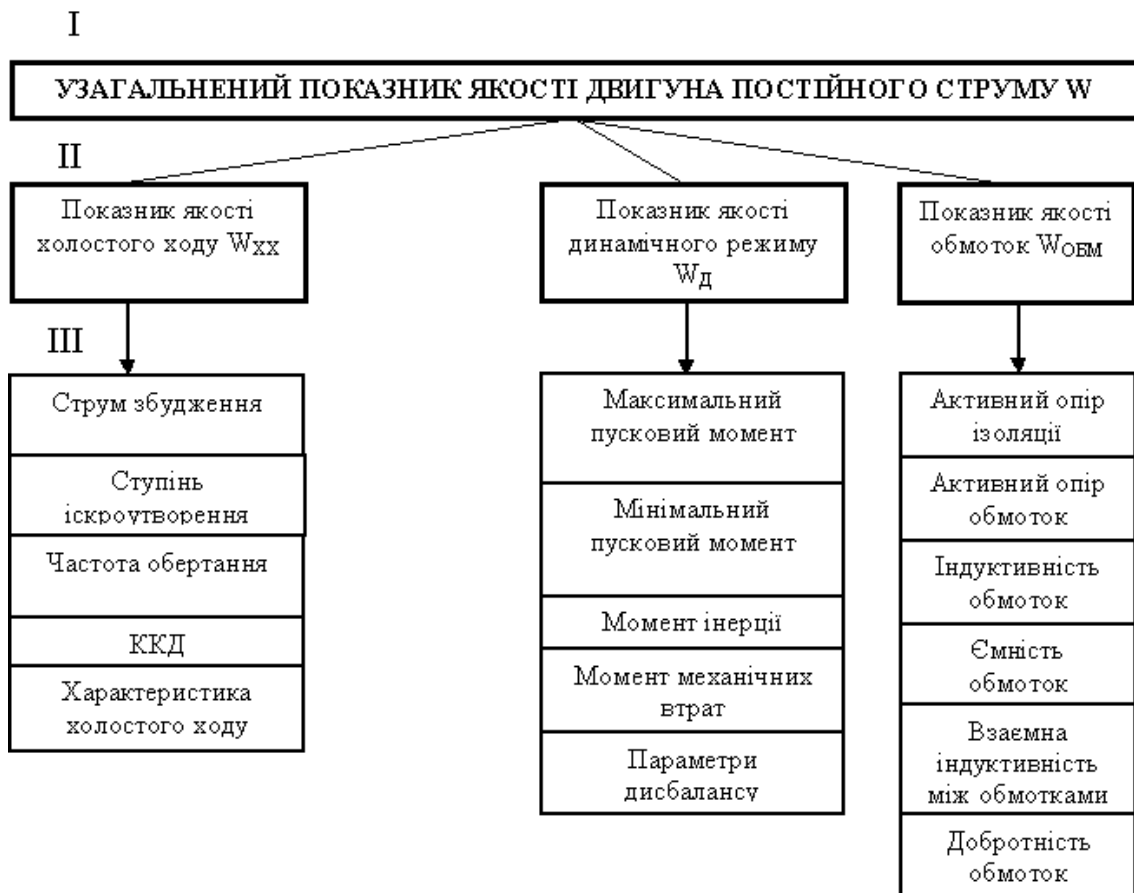


Рис. 2.3. Ієрархічна модель двигуна постійного струму

Залежності показників якості від параметрів діагностування можуть визначати логічний або аналітичний тип моделі контролю в технічному діагностуванні.

Логічна модель визначає якісну форму залежності показників якості від параметрів. У логічній моделі всі показники якості можуть приймати лише два значення: “придатний” (1) і “непридатний” (0). Поєднання всіх показників якості, що мають значення 1, відповідає працездатному стану об’єкта. Несправний стан об’єкта характеризується множиною значень показників якості, в якій хоча б один із показників прийняв значення 0. Таким чином, стан об’єкту контролю у цілому також описується логічною змінною, яка приймає значення 1 при працездатному об’єкті і 0 – при непрацездатному. Такий опис достатній з точки зору прийняття рішення про працездатність ОД.

Основним недоліком логічної моделі контролю є те, що в силу якісного зв’язку показників якості з параметрами вона не може дати повної інформації про вплив умов експлуатації і зберігання на якість функціонування ОД, а також проводити класифікацію ОД за категоріями якості.

В аналітичній моделі показники якості характеризуються неперервністю, тобто малі зміни значень параметрів приводять до малих змін показників якості. Правильно вибраний показник якості як функція параметрів повинен мати екстремальне значення. Екстремуму показника якості відповідають номінальні значення параметрів. Тому будь-яке відхилення параметрів ЕМ від своїх номінальних значень приводить до погіршення значення показника якості. Аналітична модель дає кількісний зв'язок показників якості з параметрами. Цей кількісний зв'язок дає більшу інформацію при контролі, яку можна використовувати не тільки для прийняття рішення про придатність ОД, але й для аналізу впливу умов зберігання і експлуатації на властивості ОД, а також для діагностування несправностей.

Кількісна оцінка узагальненого показника якості W може формуватися експертними методами як в [140 - 142]:

$$W = a_1 \cdot W_{XX} + a_2 \cdot W_{K3} + a_3 \cdot W_D + a_4 \cdot W_{OБM}, \quad (2.1)$$

де $a_1 \dots a_4$ - вагові коефіцієнти.

При експертних методах оцінювання на формування узагальненого судження (оцінку якості) впливає власний досвід експертів, інтуїтивне відчуття важливості тих чи інших параметрів, різниця в оцінці однакових ОД різними групами експертів, що особливо небажано в тих випадках, коли процес проведення експертизи достатньо тривалий, а склад експертної групи міняється [140].

Один із шляхів усунення такої неоднозначності – встановлення єдиних правил формування показників якості.

Правило 1. Правило співрозмірності масштабів вимірювань:

$$\begin{aligned} 0 \leq f(W_{XX}, W_{K3}, W_D, W_{OБM}) &\leq 1; \\ 0 \leq W_{XX} &\leq 1; \\ 0 \leq W_{K3} &\leq 1; \\ 0 \leq W_D &\leq 1; \\ 0 \leq W_{OБM} &\leq 1; \\ 0 \leq W_{\text{пар. } i} &\leq 1, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де $W_{\text{пар. } i}$ - показник якості i -го параметру.

Всі показники якості змінюються в інтервалі від 0 до 1.

Правило 2. Правило нижньої межі показника якості:

$$f(W_i, 0) = 0, \quad (2.3)$$

тобто при нульовій оцінці будь-якого показника якості показник якості, який розташований вище по ієрархії, приймає значення нуля.

Правило 3. *Правило верхньої межі показника якості:*

$$f(W_i) = 1 \text{ при } W_1 = W_2 = \dots = W_i = 1, \quad (2.4)$$

тобто при одиничній оцінці всіх показників якості, показник якості, який розташований вище по ієрархії, приймає значення одиниці.

Правило 4. *Перше правило взаємної незалежності показників якості:*

$$f(f(W_1, \dots, W_i)) = f(f(W_1), \dots, f(W_i)). \quad (2.5)$$

Правило 5. *Друге правило взаємної незалежності показників якості:*

$$f(f(W_1, W_2), \dots, W_{i-1}, W_i) = f(W_1, W_2, \dots, f(W_{i-1}, W_i)). \quad (2.6)$$

Правило 5 аналогічне відомому правилу “від зміни місць доданків сума не змінюється”.

Правило 6. *Правило ідентичності вимірювань:*

$$i = \text{const}. \quad (2.7)$$

Взаємне порівняння технічних рішень і оцінювання якості ОД можливе лише у тому випадку, коли показники якості ідентичні для всіх порівнюваних об'єктів, як за методами діагностування і контролю, так і за кількістю параметрів діагностування.

Аналіз сформульованих правил формування показників якості показує, що найпростішою функцією, яка задовольняє їм, є функція

$$\begin{aligned} W &= W_{XX} \cdot W_{K3} \cdot W_D \cdot W_{OБM}; \\ W_{XX} &= W_{\text{пар. XX } 1} \cdot \dots \cdot W_{\text{пар. XX } k}; \\ W_{K3} &= W_{\text{пар. K3 } 1} \cdot \dots \cdot W_{\text{пар. K3 } l}; \\ W_D &= W_{\text{пар. D } 1} \cdot \dots \cdot W_{\text{пар. D } m}; \\ W_{OБM} &= W_{\text{пар. OБM } 1} \cdot \dots \cdot W_{\text{пар. OБM } n}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де k, l, m, n - кількість параметрів, які формують відповідно показники якості $W_{XX}, W_{KЗ}, W_D, W_{ОБМ}$, тобто $W = \prod_i W_i$.

Ця функція достатньо зручна для практичного використання. Графічно представити функцію (2.8) найпростіше як залежність $W = W_1 \cdot W_2$ (рис. 2.4).

Такими в загальному вигляді є принципи формування узагальненого та комплексних показників якості. Формування узагальненого показника якості здійснюється на основі комплексних показників якості та показників якості основних параметрів діагностування.

Формалізація вибору показників якості основних параметрів діагностування – задача більш складна, оскільки прийняття тих чи інших показників залежить від особливостей об'єкту оцінювання. До показника якості основних параметрів діагностування формулюються такі вимоги:

- показник якості – це симетрична унімодальна функція відносно поля допуску параметра діагностування;
- в межах поля допуску показник якості змінюється від 0 до 1 в залежності від відхилення вимірюваного значення параметра діагностування від номінального;
- за межами поля допуску показник якості приймає нульове значення.

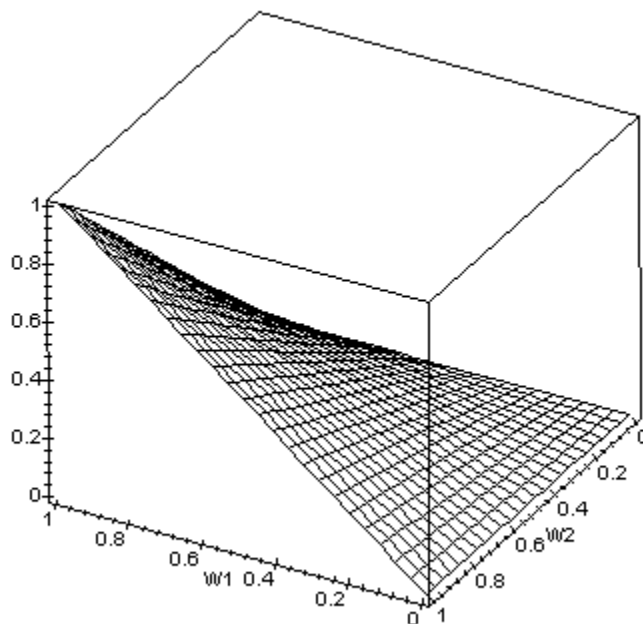


Рис. 2.4. Просторове зображення функції $W = W_1 \cdot W_2$

В основу методики визначення показників якості основних параметрів діагностування, які задовольняють вищевказаним вимогам, покладено функцію Іордана [141, 143]:

$$f_{\varepsilon}(y) = \frac{\cos y}{\sqrt{1 + \varepsilon \cdot \sin^2 y}}. \quad (2.9)$$

Основна властивість цієї функції полягає в тому, що із зміною її параметра ε в діапазоні $-1 < \varepsilon \leq \infty$ при $-\frac{\pi}{2} \leq y \leq +\frac{\pi}{2}$ форма функції змінюється від прямокутної до дельта-функції Дірака (рис. 2.4).

Для того, щоб використати функцію Іордана для формування показників якості основних параметрів, потрібно формувати її у межах поля допуску $\pm \Delta P$ параметра P і максимум функції ($f_{\varepsilon}(P) = 1$) повинен відповідати номінальному значенню параметру $P_{\text{ном}}$, що контролюється (рис. 2.5).

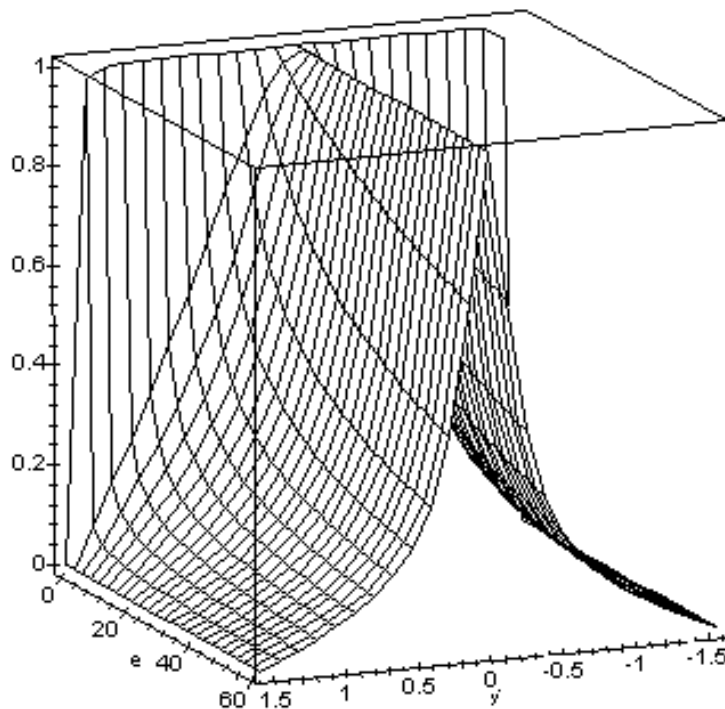


Рис. 2.4. Просторове зображення функції Іордана $f_{\varepsilon}(\varepsilon, y)$

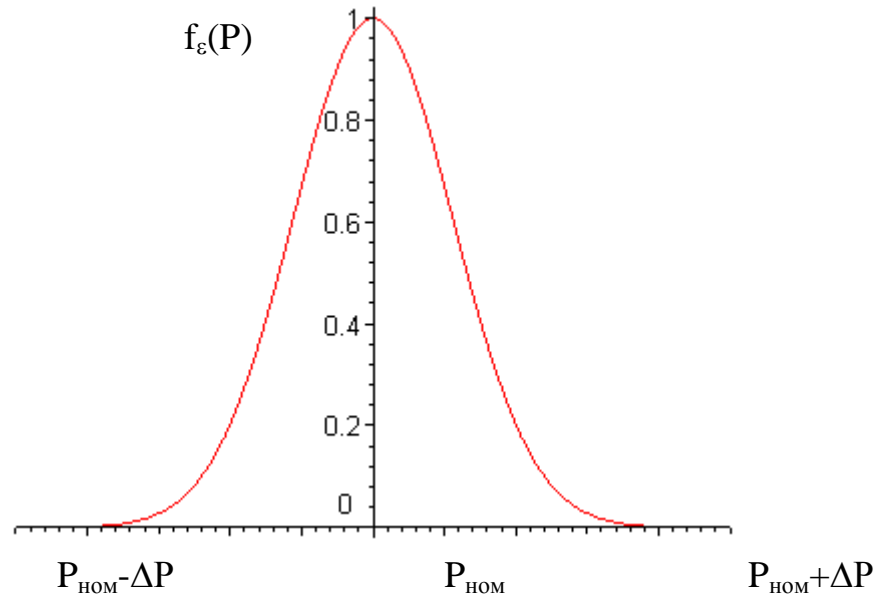


Рис. 2.5. Формування показника якості параметра P за допомогою функції Йордана

Для цього функцію Йордана потрібно перетворити. Можна показати, що необхідним вимогам задовольняє така функція:

$$f_{\varepsilon}(P) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot \Delta P} \cdot (P - P_{\text{НОМ}})\right)}{\sqrt{1 + \varepsilon \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{2 \cdot \Delta P} \cdot (P - P_{\text{НОМ}})\right)}}, \quad (2.10)$$

де поле допуску $\pm \Delta P$ задається в одиницях вимірювання параметру, або

$$f_{\varepsilon}(P) = \frac{\cos\left(\frac{50\pi}{P_{\text{НОМ}} \cdot D_P} \cdot (P - P_{\text{НОМ}})\right)}{\sqrt{1 + \sin^2\left(\frac{50\pi}{P_{\text{НОМ}} \cdot D_P} \cdot (P - P_{\text{НОМ}})\right)}}, \quad (2.11)$$

де поле допуску $\pm D_P$ задається у відсотках.

Вибір показника якості ε залежить від жорсткості вимог, що висуваються до проведення ТД.

Після визначення узагальненого показника якості EM , що діагностуються, можна присвоїти категорії якості. Категорії якості присвоюються в залежності від коефіцієнта рівня якості і лімітуючих

показників [140]: вища категорія при $W \geq 0.95$; перша категорія при $0.95 > W \geq 0.9$; друга категорія при $W < 0.9$.

Таким чином, запропонована ієрархічна модель ОД при ТД, в яку входять узагальнений, комплексні показники якості, та показники якості основних ПД ЕМ. Визначено єдині правила формування показників якості, на основі яких синтезовано функцію якості. Показники якості основних параметрів запропоновано визначати за допомогою модифікованої функції Йордана.

Запропонована методика оцінювання якості ЕМ дозволяє суттєво підвищити загальну якість діагностування та оцінку якості ЕМ, проводити їх сортування за категоріями якості, прогнозувати вплив технологічного процесу на якість виготовлення ЕМ.

2.2. Аналіз технічних станів електромоторів

На основі аналізу літературних джерел [117, 118, 144-157] зроблено аналіз та сформовано перелік можливих несправностей ЕМ та причин їх виникнення (Додаток). За допомогою даного переліку виконано узагальнення основних технічних станів ЕМ під час приймально-здавальних випробувань (табл. 2.1 – 2.3).

Для побудови системи технічного діагностування АД використано 14 найбільш поширених технічних станів Q_i ($i = 0, 1, \dots, 14$), зведених в табл. 2.1. Стан Q_0 відповідає справному стану АД.

Для побудови системи технічного діагностування СД використано 17 найбільш поширених технічних станів Q_i ($i = 0, 1, \dots, 17$), зведених у табл. 2.2. Стан Q_0 відповідає справному стану СД.

Для побудови системи технічного діагностування ДПС використано 15 найбільш поширених технічних станів Q_i ($i = 0, 1, \dots, 15$), зведених у табл. 2.3. Стан Q_0 відповідає справному стану ДПС.

2.3. Метод діагностування стану електромоторів за допомогою логічних функцій

2.3.1. Метод діагностування стану асинхронного двигуна

Розглянемо питання побудови методу технічного діагностування АД за допомогою логічних функцій [158, 159].

Таблиця 2.1.

Основні технічні стани АД

Умовне позначення	Технічний стан АД
Q ₀	Справний двигун
Q ₁	Збільшений розмір повітряного зазору
Q ₂	Занижена число витків обмотки статора
Q ₃	Відступ у висоті вусика пазів ротора
Q ₄	Відступ у випалі листів магнітопроводу
Q ₅	Невідповідність марки сталі
Q ₆	Завищене число витків обмотки статора
Q ₇	Завищений опір обмотки статора
Q ₈	Неякісна заливка ротора
Q ₉	Підвищені втрати в сталі
Q ₁₀	Підвищені механічні втрати в підшипниках
Q ₁₁	Порушення в хімічному складі алюмінієвого сплаву
Q ₁₂	Невідповідність в обмоточних даних
Q ₁₃	Взаємне зміщення пакетів статора і ротора
Q ₁₄	Зменшений розмір повітряного зазору

Таблиця 2.2.

Основні технічні стани СД

Умовне позначення	Технічний стан СД
Q ₀	Справний двигун
Q ₁	Збільшений розмір повітряного зазору
Q ₂	Занижена число витків обмотки статора
Q ₃	Відступ у висоті вусика пазів ротора
Q ₄	Відступ у випалі листів магнітопроводу
Q ₅	Невідповідність марки сталі
Q ₆	Завищене число витків обмотки статора
Q ₇	Завищений опір обмотки статора
Q ₈	Неякісна заливка ротора
Q ₉	Підвищені втрати в сталі
Q ₁₀	Підвищені механічні втрати в підшипниках
Q ₁₁	Порушення в хімічному складі алюмінієвого сплаву
Q ₁₂	Невідповідність в обмоточних даних
Q ₁₃	Взаємне зміщення пакетів статора і ротора
Q ₁₄	Зменшений розмір повітряного зазору
Q ₁₅	Занижена число витків демпферної обмотки
Q ₁₆	Завищене число витків демпферної обмотки
Q ₁₇	Завищений опір демпферної обмотки

Основні технічні стани ДПС

Умовне позначення	Технічний стан ДПС
Q ₀	Справний двигун
Q ₁	Збільшений розмір повітряного зазору
Q ₂	Занижена число витків обмотки якоря
Q ₃	Занижена число витків в котушках головних полюсів
Q ₄	Занижена число витків в котушках збудження
Q ₅	Відступ у випалі листів магнітопроводу
Q ₆	Невідповідність марки сталі
Q ₇	Завищене число витків обмотки якоря
Q ₈	Завищене число витків в котушках головних полюсів
Q ₉	Завищене число витків в котушках збудження
Q ₁₀	Неправильне розташування щіток
Q ₁₁	Неправильне розташування головних і додаткових полюсів
Q ₁₂	Підвищені механічні втрати в підшипниках
Q ₁₃	Порушення в хімічному складі алюмінієвого сплаву
Q ₁₄	Несправність у регуляторі збудження
Q ₁₅	Зменшений розмір повітряного зазору

Для даних технічних станів АД (табл. 2.1) складена табл. 2.4 логічної відповідності їм 18-ти параметрів асинхронних двигунів, які розбиті на 4 групи: 1) параметри холостого ходу (струм I_{xx} , ККД η , кутова швидкість ω_r , $\cos\varphi_{xx}$); 2) параметри короткого замикання (пусковий струм I_p , пусковий момент M_p , $\cos\varphi_{кз}$); 3) параметри динамічного режиму (максимальний момент M_{max} , момент інерції J , момент опору M_0 , параметри механічної характеристики $M(\omega_r)$, параметри дисбалансу); 4) параметри обмоток (активний опір ізоляції R_{i3} , активний опір статорної та роторної обмоток $R_{обм}$, індуктивність статорної та роторної обмоток $L_{обм}$, ємність статорної та роторної обмоток $C_{обм}$, добротність статорної та роторної обмоток $Q_{обм}$).

Аналіз табл. 2.4 дозволяє для кожної із груп показників записати логічні рівняння діагностування:

1. Показники якості обмоток

Стани АД, що розрізняються:

$$\begin{aligned}
 Q_1^1 &\in \{Q_1\}; & Q_2^1 &\in \{Q_2, Q_6\}; & Q_3^1 &\in \{Q_4, Q_5\}; & (2.12) \\
 Q_4^1 &\in \{Q_7\}; & Q_5^1 &\in \{Q_8\}.
 \end{aligned}$$

Таблиця 2.4.

Таблиця станів асинхронного двигуна

Стани	1. Показники якості обмоток						2. Показники якості динамічного режиму				
	R _{i3}	R _{обм}	L _{обм}	C _{обм}	L _п	Q _{обм}	M _{max}	M(ω _r)	J	M ₀	Дисб.
	a ₁	A ₂	a ₃	a ₄	A ₅	a ₆	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
Q ₀	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Q ₁	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
Q ₂	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₃	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q ₄	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Q ₅	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Q ₆	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₇	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Q ₈	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Q ₉	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q ₁₀	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Q ₁₁	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Q ₁₂	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q ₁₃	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
Q ₁₄	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Стани	3. Показники якості холостого ходу				4. Показники якості короткого замикання			<i>Примітка:</i> Число “1” відповідає попаданню в зону допуску, а число “0” – непопаданню в зону допуску відповідного параметра діагностування АД.
	I _{хх}	cosφ _{хх}	η	ω _r	I _п	M _п	cosφ _{кз}	
	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	d ₁	d ₂	d ₃	
Q ₀	1	1	1	1	1	1	1	
Q ₁	0	0	1	1	0	1	1	
Q ₂	0	1	1	0	0	1	1	
Q ₃	1	0	0	1	0	1	0	
Q ₄	1	0	1	1	1	1	0	
Q ₅	1	1	0	1	1	1	1	
Q ₆	1	1	1	0	1	0	1	
Q ₇	1	1	1	0	1	1	1	
Q ₈	1	1	0	0	1	0	1	
Q ₉	1	1	0	0	1	1	1	
Q ₁₀	1	0	0	1	1	1	0	
Q ₁₁	1	1	0	1	1	1	1	
Q ₁₂	1	0	1	0	1	1	0	
Q ₁₃	1	0	1	1	0	1	1	
Q ₁₄	1	0	0	1	0	1	0	

Логічні рівняння діагностування:

$$\begin{aligned}
 Q_1^1 &= a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6}; & Q_2^1 &= a_1 \cdot \overline{a_2} \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6}; \\
 Q_3^1 &= a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a_3} \cdot a_4 \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6}; & Q_4^1 &= a_1 \cdot \overline{a_2} \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \overline{a_6};
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

$$Q_5^1 = \overline{a_1} \cdot \overline{a_2} \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6}.$$

Мінімізована функція ознаки несправності:

$$F^1 = \bigvee_{i=1}^6 Q_i^1 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \vee a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a_3} \cdot a_4 \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \vee \overline{a_1} \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \overline{a_6} \vee \overline{a_1} \cdot a_2 \cdot \overline{a_3} \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \overline{a_6} \vee \overline{a_1} \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_6. \quad (2.14)$$

2. Показники якості динамічного режиму

Стани АД, що розрізняються:

$$Q_1^2 \in \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_9, Q_{12}\}; \quad Q_2^2 \in \{Q_8\}; \quad (2.15)$$

$$Q_3^2 \in \{Q_{10}\}; \quad Q_4^2 \in \{Q_{11}\}; \quad Q_5^2 \in \{Q_{13}\}.$$

Логічні рівняння діагностування:

$$Q_1^2 = \overline{b_1} \cdot \overline{b_2} \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5; \quad Q_2^2 = b_1 \cdot b_2 \cdot \overline{b_3} \cdot b_4 \cdot \overline{b_5}; \quad (2.16)$$

$$Q_3^2 = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot \overline{b_4} \cdot b_5; \quad Q_4^2 = \overline{b_1} \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5;$$

$$Q_5^2 = \overline{b_1} \cdot b_2 \cdot \overline{b_3} \cdot b_4 \cdot \overline{b_5}.$$

Мінімізована функція ознаки несправності:

$$F^2 = \bigvee_{i=1}^5 Q_i^2 = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot \overline{b_4} \cdot b_5 \vee \overline{b_1} \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5 \vee b_2 \cdot \overline{b_3} \cdot b_4 \cdot \overline{b_5}. \quad (2.17)$$

3. Показники якості холостого ходу

Стани АД, що розрізняються:

$$Q_1^3 \in \{Q_1\}; \quad Q_2^3 \in \{Q_2\}; \quad Q_3^3 \in \{Q_3, Q_{10}, Q_{14}\}; \quad (2.18)$$

$$Q_4^3 \in \{Q_4, Q_{13}\}; \quad Q_5^3 \in \{Q_5, Q_{11}\};$$

$$Q_6^3 \in \{Q_6, Q_7\}; \quad Q_7^3 \in \{Q_8, Q_9\}; \quad Q_8^3 \in \{Q_{12}\}.$$

Логічні рівняння діагностування:

$$Q_1^3 = \overline{c_1} \cdot \overline{c_2} \cdot c_3 \cdot c_4; \quad Q_2^3 = \overline{c_1} \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot \overline{c_4}; \quad Q_3^3 = c_1 \cdot \overline{c_2} \cdot \overline{c_3} \cdot c_4; \quad (2.19)$$

$$Q_4^3 = c_1 \cdot \bar{c}_2 \cdot c_3 \cdot c_4; \quad Q_5^3 = c_1 \cdot c_2 \cdot \bar{c}_3 \cdot c_4; \quad Q_6^3 = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot \bar{c}_4; \\ Q_7^3 = c_1 \cdot c_2 \cdot \bar{c}_3 \cdot \bar{c}_4; \quad Q_8^3 = c_1 \cdot \bar{c}_2 \cdot c_3 \cdot \bar{c}_4.$$

Мінімізована функція ознаки несправності:

$$F^3 = \bigvee_{i=1}^8 Q_i^3 = c_1 \cdot \bar{c}_2 \cdot c_3 \vee c_1 \cdot c_2 \cdot \bar{c}_3 \vee \bar{c}_2 \cdot c_3 \cdot c_4 \vee c_2 \cdot c_3 \cdot \bar{c}_4 \vee c_1 \cdot \bar{c}_3 \cdot c_4. \quad (2.20)$$

4. Показники якості короткого замикання

Стани АД, що розрізняються:

$$Q_1^4 \in \{Q_1, Q_2, Q_{13}\}; \quad Q_2^4 \in \{Q_3, Q_{14}\}; \quad (2.21) \\ Q_3^4 \in \{Q_4, Q_{10}, Q_{12}\}; \quad Q_4^4 \in \{Q_6, Q_8\}.$$

Логічні рівняння діагностування:

$$Q_1^4 = \bar{d}_1 \cdot d_2 \cdot d_3; \quad Q_2^4 = \bar{d}_1 \cdot d_2 \cdot \bar{d}_3; \quad Q_3^4 = d_1 \cdot d_2 \cdot \bar{d}_3; \quad Q_4^4 = d_1 \cdot \bar{d}_2 \cdot d_3. \quad (2.22)$$

Мінімізована функція ознаки несправності:

$$F^4 = \bigvee_{i=1}^4 Q_i^4 = d_2 \cdot \bar{d}_3 \vee \bar{d}_1 \cdot d_2 \vee d_1 \cdot \bar{d}_2 \cdot d_3. \quad (2.23)$$

Знак інверсії означає непопадання в зону допуску (ПД в зоні допуску - логічна одиниця, ПД поза зоною допуску – логічний нуль).

На рис. 2.6-2.9 наведені розроблені алгоритми діагностування АД. За результатами діагностування в кожному з режимів робиться припущення про ймовірний стан ОД.

При аналізі причин браку можливий нечіткий діагноз, оскільки та сама причина може привести до відхилень одночасно кількох параметрів АД. Тому діагностування потрібно проводити у такій послідовності дій:

1. Формування табличних множин для кожної причини браку Q_k :

$$\mathbf{A}_{Тк} = \{a_{i \text{ табл.}k}; \quad i = \overline{1, 6, 1}\}; \quad \mathbf{B}_{Тк} = \{b_{i \text{ табл.}k}; \quad i = \overline{1, 5, 1}\}; \quad (2.24)$$

$$\mathbf{C}_{Тк} = \{c_{i \text{ табл.}k}; \quad i = \overline{1, 4, 1}\}; \quad \mathbf{D}_{Тк} = \{d_{i \text{ табл.}k}; \quad i = \overline{1, 3, 1}\};$$

$$\mathbf{Z}_{Тк} = \mathbf{A}_{Тк} \cup \mathbf{B}_{Тк} \cup \mathbf{C}_{Тк} \cup \mathbf{D}_{Тк} \text{ для } k = \overline{1, 14, 1}.$$

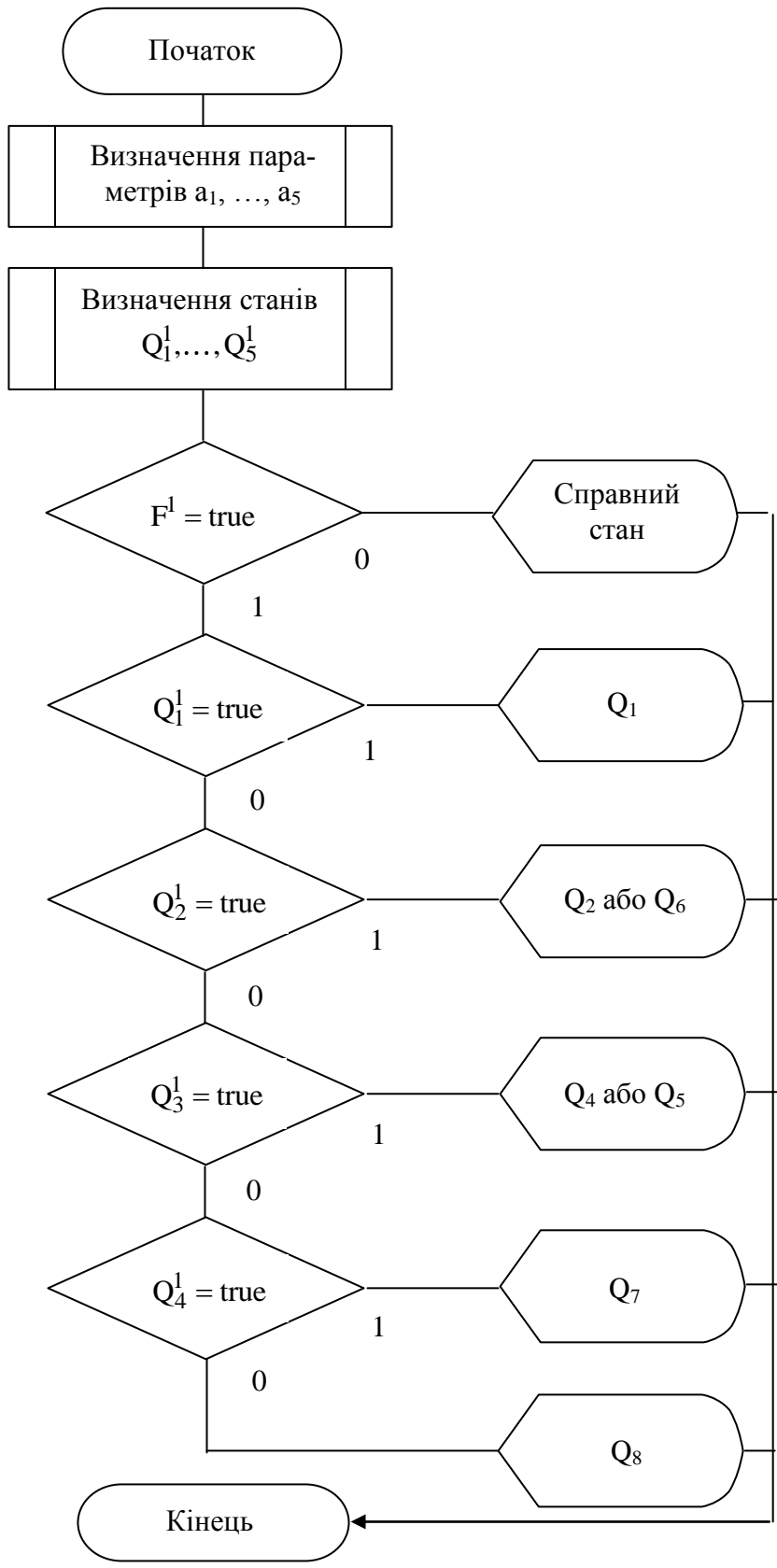


Рис. 2.6. Алгоритм діагностування стану АД при визначенні ПД при випробуванні обмоток

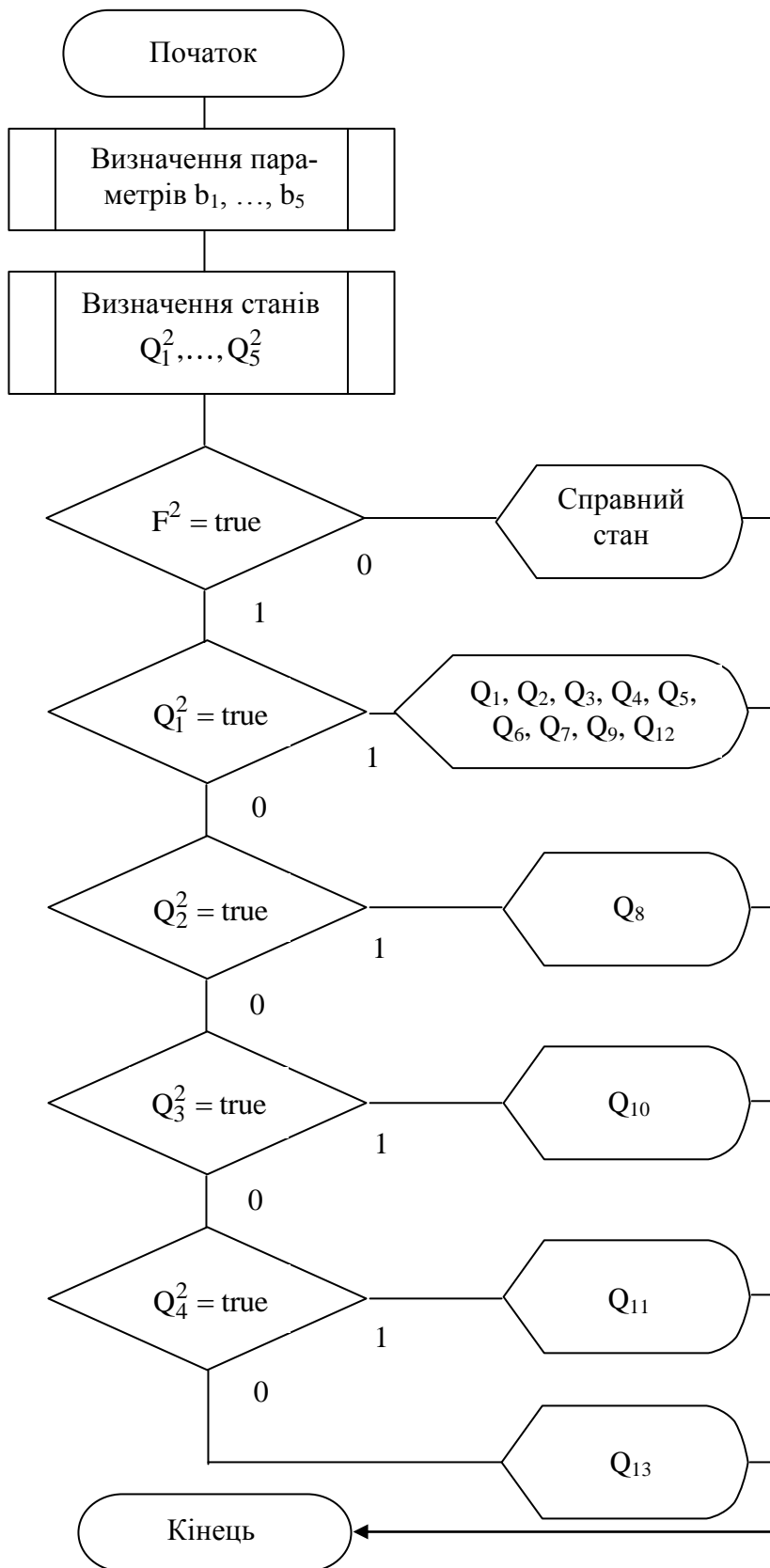


Рис. 2.7. Алгоритм діагностування стану АД при визначенні ПД в динамічному режимі

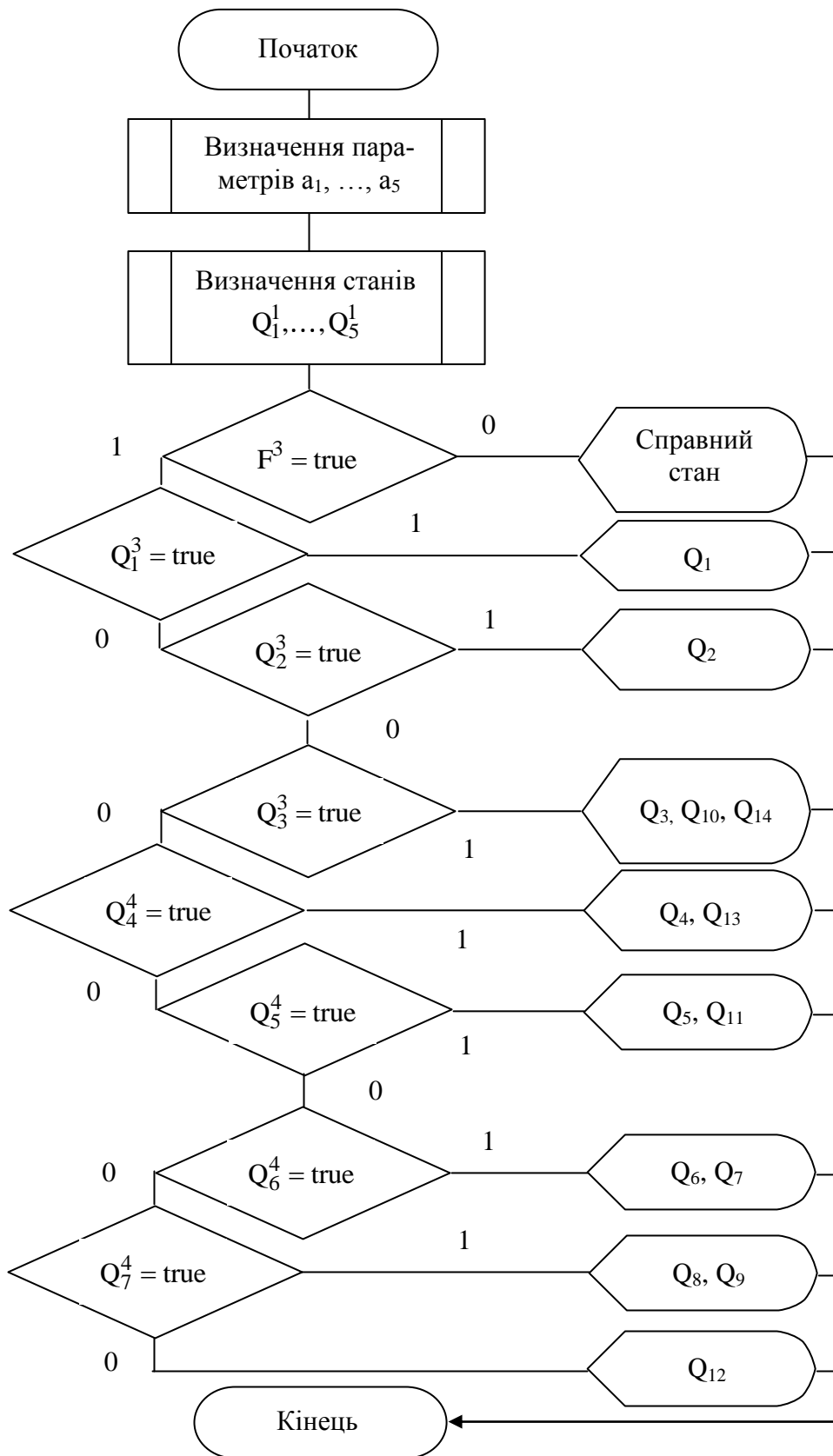


Рис. 2.8. Алгоритм діагностування стану АД при визначенні ПД в режимі холостого ходу

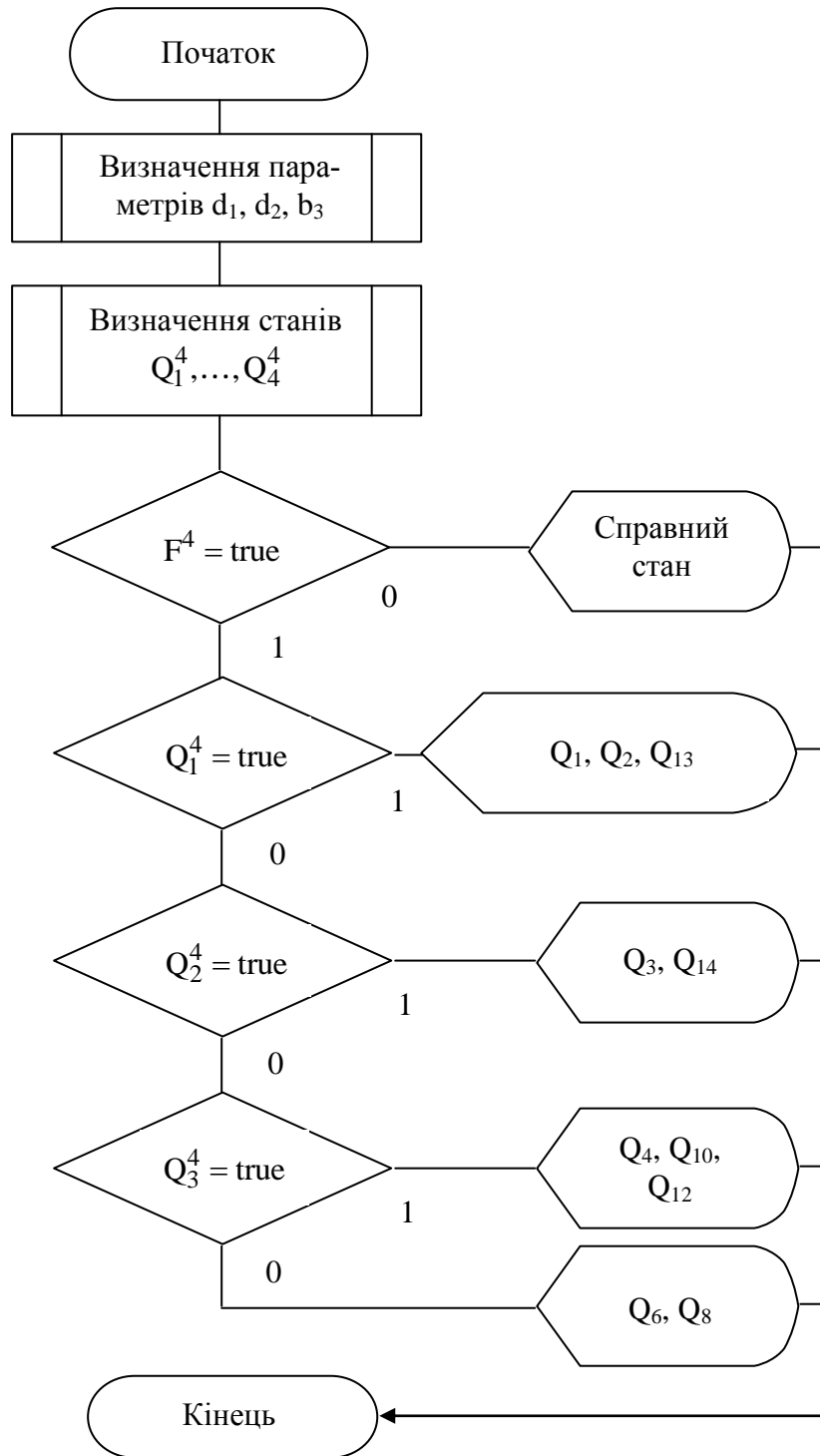


Рис. 2.9. Алгоритм діагностування стану АД при визначенні ПД в режимі короткого замикання

2. Визначення параметрів АД і формування експериментальних множин:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_k &= \{a_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 6, 1}\}; \mathbf{B}_k = \{b_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 5, 1}\}; \\ \mathbf{C}_k &= \{c_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 4, 1}\}; \mathbf{D}_k = \{d_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 3, 1}\}; \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{A}_k \cup \mathbf{B}_k \cup \mathbf{C}_k \cup \mathbf{D}_k \text{ для } k = \overline{1, 14, 1}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

3. Знаходження найбільш ймовірної причини браку:

$$\mathbf{Z}_k \cap \mathbf{Z}_{T_k} \rightarrow \min \{...\}, \quad k = \overline{1, 14, 1}. \quad (2.26)$$

При $\mathbf{Z}_k \cap \mathbf{Z}_{T_k} = \emptyset$ формується чіткий діагноз.

2.3.2. Метод діагностування стану синхронного двигуна

Розглянемо питання побудови методу технічного діагностування СД за допомогою логічних функцій.

Для даних технічних станів СД (табл. 2.2) складена табл. 2.5 логічної відповідності їм 20-ти параметрів синхронних двигунів, які розбиті на 4 групи: 1) параметри холостого ходу (струм I_{xx} , ККД η , кутова швидкість ω_r , $\cos\varphi_{xx}$); 2) параметри короткого замикання (пусковий струм I_p , пусковий момент M_p , $\cos\varphi_{кз}$); 3) параметри динамічного режиму (максимальний момент M_{max} , момент інерції J , момент опору M_0 , параметри механічної характеристики $M(\omega_r)$, параметри дисбалансу); 4) параметри обмоток (активний опір ізоляції $R_{із}$, активний опір статорної та роторної обмоток $R_{обм}$, індуктивність статорної та роторної обмоток $L_{обм}$, ємність статорної та роторної обмоток $C_{обм}$, добротність статорної та роторної обмоток $Q_{обм}$, індуктивність демпферної обмотки L_d , активний опір демпферної обмотки R_d).

Аналіз табл. 2.5 дозволяє для кожної із груп показників записати логічні рівняння діагностування:

1. Показники якості обмоток

Стани СД, що розрізняються:

Таблиця 2.5.

Таблиця станів синхронного двигуна

Стани	1. Показники якості обмоток								2. Показники якості динамічного режиму				
	R_{I3}	$R_{обм}$	$L_{обм}$	$C_{обм}$	L_m	$Q_{обм}$	L_d	R_d	M_{max}	$M(\omega_r)$	J	M_0	Дисб.
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
Q ₀	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Q ₁	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1
Q ₂	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₃	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
Q ₄	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₅	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₆	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₇	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₈	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Q ₉	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q ₁₀	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Q ₁₁	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Q ₁₂	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q ₁₃	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
Q ₁₄	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Q ₁₅	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
Q ₁₆	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
Q ₁₇	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Стани	3. Показники якості холостого ходу				4. Показники якості короткого замикання		
	I_{xx}	$\cos\varphi_{xx}$	η	ω_r	I_n	M_n	$\cos\varphi_{кз}$
	c_1	c_2	c_3	c_4	d_1	d_2	d_3
Q ₀	1	1	1	1	1	1	1
Q ₁	0	0	1	1	0	1	1
Q ₂	0	1	1	0	0	1	1
Q ₃	1	0	0	1	0	1	0
Q ₄	1	0	1	1	1	1	0
Q ₅	1	1	0	1	1	1	1
Q ₆	1	1	1	0	1	0	1
Q ₇	1	1	1	0	1	1	1
Q ₈	1	1	0	0	1	0	1
Q ₉	1	1	0	0	1	1	1
Q ₁₀	1	0	0	1	1	1	0
Q ₁₁	1	1	0	1	1	1	1
Q ₁₂	1	0	1	0	1	1	0
Q ₁₃	1	0	1	1	0	1	1
Q ₁₄	1	0	0	1	0	1	0
Q ₁₅	0	0	0	1	0	0	0
Q ₁₆	0	0	0	1	0	0	0
Q ₁₇	1	0	0	1	0	0	0

Примітка: Число “1” відповідає попаданню в зону допуску, а число “0” – непопаданню в зону допуску відповідного параметра діагностування СД.

Логічні рівняння діагностування:

$$\begin{aligned} Q_1^1 &\in \{Q_1\}; Q_2^1 \in \{Q_2, Q_6\}; Q_3^1 \in \{Q_4, Q_5\}; \\ Q_4^1 &\in \{Q_7\}; Q_5^1 \in \{Q_8\}; Q_6^1 \in \{Q_3\}; Q_7^1 \in \{Q_{15}, Q_{16}\}; \\ Q_8^1 &\in \{Q_{17}\}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Логічні рівняння діагностування:

$$\begin{aligned} Q_1^1 &= a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a_5} \cdot a_6 \cdot a_7 \cdot a_8; Q_2^1 = a_1 \cdot \overline{a_2} \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \cdot \overline{a_7} \cdot \overline{a_8}; \\ Q_3^1 &= a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \cdot \overline{a_7} \cdot \overline{a_8}; Q_4^1 = a_1 \cdot \overline{a_2} \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot \overline{a_6} \cdot \overline{a_7} \cdot \overline{a_8}; \\ Q_5^1 &= \overline{a_1} \cdot \overline{a_2} \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \cdot \overline{a_7} \cdot \overline{a_8}; Q_6^1 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_6 \cdot \overline{a_7} \cdot \overline{a_8}; \\ Q_7^1 &= \overline{a_1} \cdot \overline{a_2} \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \cdot a_7 \cdot a_8; Q_8^1 = a_1 \cdot \overline{a_2} \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \cdot \overline{a_7} \cdot a_8. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Мінімізована функція ознаки несправності:

$$\begin{aligned} F^1 &= \bigvee_{i=1}^8 Q_i^1 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a_5} \cdot a_6 \cdot a_7 \cdot a_8 \vee a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \cdot \overline{a_7} \cdot \overline{a_8} \vee \\ &\vee a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot a_5 \cdot \overline{a_6} \cdot \overline{a_7} \cdot \overline{a_8} \vee a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_6 \cdot \overline{a_7} \cdot \overline{a_8} \vee \\ &\vee a_2 \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \cdot \overline{a_7} \cdot \overline{a_8} \vee \overline{a_1} \cdot \overline{a_2} \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot a_6 \cdot a_8. \end{aligned} \quad (2.29)$$

2. Показники якості динамічного режиму

Стани СД, що розрізняються:

$$\begin{aligned} Q_1^2 &\in \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_9, Q_{12}\}; Q_2^2 \in \{Q_8\}; \\ Q_3^2 &\in \{Q_{10}\}; Q_4^2 \in \{Q_{11}\}; Q_5^2 \in \{Q_{13}\}; Q_6^2 = \{Q_{15}, Q_{16}, Q_{17}\}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Логічні рівняння діагностування:

$$\begin{aligned} Q_1^2 &= \overline{b_1} \cdot \overline{b_2} \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5; Q_2^2 = b_1 \cdot b_2 \cdot \overline{b_3} \cdot b_4 \cdot \overline{b_5}; \\ Q_3^2 &= b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot \overline{b_4} \cdot b_5; Q_4^2 = \overline{b_1} \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5; \\ Q_5^2 &= \overline{b_1} \cdot b_2 \cdot \overline{b_3} \cdot b_4 \cdot \overline{b_5}; Q_6^2 = b_1 \cdot b_2 \cdot \overline{b_3} \cdot \overline{b_4} \cdot \overline{b_5}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Мінімізована функція ознаки несправності:

$$F^2 = \bigvee_{i=1}^6 Q_i^2 = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot \overline{b_4} \cdot b_5 \vee \overline{b_1} \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5 \vee b_2 \cdot \overline{b_3} \cdot b_4 \cdot \overline{b_5} \vee \overline{b_1} \cdot b_2 \cdot \overline{b_3} \cdot \overline{b_5}. \quad (2.32)$$

3. Показники якості холостого ходу

Стани СД, що розрізняються:

$$\begin{aligned} Q_1^3 &\in \{Q_1\}; Q_2^3 \in \{Q_2\}; Q_3^3 \in \{Q_3, Q_{10}, Q_{14}, Q_{17}\}; \\ Q_4^3 &\in \{Q_4, Q_{13}\}; Q_5^3 \in \{Q_5, Q_{11}\}; Q_6^3 \in \{Q_6, Q_7\}; \\ Q_7^3 &\in \{Q_8, Q_9\}; Q_8^3 \in \{Q_{12}\}; Q_9^3 = \{Q_{15}, Q_{16}\}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Логічні рівняння діагностування:

$$\begin{aligned} Q_1^3 &= \overline{c_1} \cdot \overline{c_2} \cdot c_3 \cdot c_4; Q_2^3 = \overline{c_1} \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot \overline{c_4}; Q_3^3 = c_1 \cdot \overline{c_2} \cdot \overline{c_3} \cdot c_4; \\ Q_4^3 &= c_1 \cdot \overline{c_2} \cdot c_3 \cdot c_4; Q_5^3 = c_1 \cdot c_2 \cdot \overline{c_3} \cdot c_4; Q_6^3 = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot \overline{c_4}; \\ Q_7^3 &= c_1 \cdot c_2 \cdot \overline{c_3} \cdot \overline{c_4}; Q_8^3 = c_1 \cdot \overline{c_2} \cdot c_3 \cdot \overline{c_4}; Q_9^3 = \overline{c_1} \cdot \overline{c_2} \cdot \overline{c_3} \cdot c_4. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Мінімізована функція ознаки несправності:

$$F^3 = \bigvee_{i=1}^9 Q_i^3 = c_1 \cdot c_2 \cdot \overline{c_3} \vee c_4 \cdot \overline{c_2} \vee c_2 \cdot c_3 \cdot \overline{c_4} \vee c_1 \cdot c_3 \cdot \overline{c_4}. \quad (2.35)$$

4. Показники якості короткого замикання

Стани СД, що розрізняються:

$$\begin{aligned} Q_1^4 &\in \{Q_1, Q_2, Q_{13}\}; Q_2^4 \in \{Q_3, Q_{14}\}; \\ Q_3^4 &\in \{Q_4, Q_{10}, Q_{12}\}; Q_4^4 \in \{Q_6, Q_8\}; Q_5^4 = \{Q_{15}, Q_{16}, Q_{17}\}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Логічні рівняння діагностування:

$$\begin{aligned} Q_1^4 &= \overline{d_1} \cdot d_2 \cdot d_3; Q_2^4 = \overline{d_1} \cdot d_2 \cdot \overline{d_3}; Q_3^4 = d_1 \cdot d_2 \cdot \overline{d_3}; Q_4^4 = d_1 \cdot \overline{d_2} \cdot d_3; \\ Q_5^4 &= \overline{d_1} \cdot \overline{d_2} \cdot \overline{d_3}. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Мінімізована функція ознаки несправності:

$$F^4 = \bigvee_{i=1}^5 Q_i^4 = d_2 \cdot \overline{d_3} \vee \overline{d_1} \cdot d_2 \vee d_1 \cdot \overline{d_2} \cdot d_3 \vee \overline{d_1} \cdot \overline{d_3}. \quad (2.38)$$

За результатами діагностування в кожному з режимів робиться припущення про ймовірний стан ОД.

При аналізі причин браку можливий нечіткий діагноз, оскільки та сама причина може привести до відхилень одночасно кількох параметрів СД. Тому діагностування потрібно проводити у такій послідовності дій:

1. Формування табличних множин для кожної причини браку Q_k :

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{T_k} &= \{a_{i \text{ табл.}k}; i = \overline{1, 8, 1}\}; \mathbf{B}_{T_k} = \{b_{i \text{ табл.}k}; i = \overline{1, 5, 1}\}; \\ \mathbf{C}_{T_k} &= \{c_{i \text{ табл.}k}; i = \overline{1, 4, 1}\}; \mathbf{D}_{T_k} = \{d_{i \text{ табл.}k}; i = \overline{1, 3, 1}\}; \\ \mathbf{Z}_{T_k} &= \mathbf{A}_{T_k} \cup \mathbf{B}_{T_k} \cup \mathbf{C}_{T_k} \cup \mathbf{D}_{T_k} \text{ для } k = \overline{1, 17, 1}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

2. Визначення параметрів СД і формування експериментальних множин:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_k &= \{a_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 8, 1}\}; \mathbf{B}_k = \{b_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 5, 1}\}; \\ \mathbf{C}_k &= \{c_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 4, 1}\}; \mathbf{D}_k = \{d_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 3, 1}\}; \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{A}_k \cup \mathbf{B}_k \cup \mathbf{C}_k \cup \mathbf{D}_k \text{ для } k = \overline{1, 17, 1}. \end{aligned} \quad (2.40)$$

3. Знаходження найбільш ймовірної причини браку:

$$\mathbf{Z}_k \cap \mathbf{Z}_{T_k} \rightarrow \min \{...\}, \quad k = \overline{1, 17, 1}. \quad (2.41)$$

При $\mathbf{Z}_k \cap \mathbf{Z}_{T_k} = \emptyset$ формується чіткий діагноз.

2.3.3. Метод діагностування стану двигуна постійного струму

Розглянемо питання побудови методу технічного діагностування ДПС за допомогою логічних функцій.

Для даних технічних станів ДПС (табл. 2.3) складена табл. 2.6 логічної відповідності їм 15-ти параметрів двигунів постійного струму, які розбиті на 4 групи (дослід короткого замикання для ДПС не проводиться): 1) параметри холостого ходу (струм збудження I_{36} , ККД

η , кутова швидкість ω_r , степiнь iскроутворення $N_{i\text{скр}}$); 2) параметри динамiчного режиму (максимальний момент M_{max} , мiнимальний момент M_{min} , момент iнерцiї J , момент опору M_0 , параметри дисбалансу); 3) параметри обмоток (активний опiр iзоляцiї R_{i3} , активний опiр обмоток $R_{\text{обм}}$, iндуктивнiсть обмоток $L_{\text{обм}}$, емнiсть обмоток $C_{\text{обм}}$, взаємна iндуктивнiсть мiж обмотками L_m , добротнiсть обмоток $Q_{\text{обм}}$).

Аналіз табл. 2.6 дозволяє для кожної із груп показників записати логiчні рiвняння дiагностування:

1. Показники якостi обмоток

Стани ДПС, що розрiзняються:

$$\begin{aligned} Q_1^1 &\in \{Q_1, Q_{15}\}; & Q_2^1 &\in \{Q_2, Q_3, Q_4, Q_7, Q_8, Q_9\}; \\ Q_3^1 &\in \{Q_5, Q_6\}; & Q_4^1 &\in \{Q_{10}, Q_{11}, Q_{12}, Q_{13}, Q_{14}\}. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Логiчні рiвняння дiагностування:

$$\begin{aligned} Q_1^1 &= a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot \overline{a_5} \cdot a_6; & Q_2^1 &= a_1 \cdot \overline{a_2} \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6}; \\ Q_3^1 &= a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a_3} \cdot a_4 \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6}; & Q_4^1 &= a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_6. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Мiнiмiзована функцiя ознаки несправностi:

$$\begin{aligned} F^1 &= \bigvee_{i=1}^4 Q_i^1 = a_1 \cdot \overline{a_2} \cdot \overline{a_3} \cdot \overline{a_4} \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \vee a_1 \cdot a_2 \cdot \overline{a_3} \cdot a_4 \cdot \overline{a_5} \cdot \overline{a_6} \vee \\ &\vee a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_6. \end{aligned} \quad (2.44)$$

2. Показники якостi динамiчного режиму

Стани ДСП, що розрiзняються:

$$\begin{aligned} Q_1^2 &\in \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8, Q_9, Q_{10}, Q_{14}\}; \\ Q_2^2 &\in \{Q_{11}\}; & Q_3^2 &\in \{Q_{12}\}; & Q_4^2 &\in \{Q_{13}\}; & Q_5^2 &\in \{Q_{15}\} \end{aligned} \quad (2.45)$$

Логiчні рiвняння дiагностування:

$$\begin{aligned} Q_1^2 &= \overline{b_1} \cdot \overline{b_2} \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5; & Q_2^2 &= \overline{b_1} \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5; \\ Q_3^2 &= \overline{b_1} \cdot \overline{b_2} \cdot \overline{b_3} \cdot \overline{b_4} \cdot b_5; & Q_4^2 &= \overline{b_1} \cdot \overline{b_2} \cdot \overline{b_3} \cdot b_4 \cdot \overline{b_5}; & Q_5^2 &= b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot \overline{b_5}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Мiнiмiзована функцiя ознаки несправностi:

Таблиця 2.6.

Таблиця станів двигуна постійного струму

Стани	1. Показники якості обмоток						2. Показники якості динамічного режиму				
	R _{i3}	R _{обм}	L _{обм}	C _{обм}	L _{тп}	Q _{обм}	M _{max}	M _{min}	J	M ₀	Дисб.
	a ₁	a ₂	A ₃	a ₄	a ₅	a ₆	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
Q ₀	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Q ₁	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
Q ₂	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₃	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₄	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₅	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Q ₆	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Q ₇	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₈	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₉	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q ₁₀	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q ₁₁	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Q ₁₂	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
Q ₁₃	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
Q ₁₄	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q ₁₅	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0

Стани	3. Показники якості холостого ходу			
	I _{зб}	N _{іскр}	η	ω _r
	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
Q ₀	1	1	1	1
Q ₁	1	1	0	0
Q ₂	0	1	0	0
Q ₃	0	1	0	1
Q ₄	1	1	0	0
Q ₅	1	1	0	1
Q ₆	1	1	0	1
Q ₇	0	1	0	0
Q ₈	0	1	0	0
Q ₉	0	1	0	0
Q ₁₀	1	0	0	1
Q ₁₁	1	1	0	1
Q ₁₂	0	1	0	0
Q ₁₃	1	1	0	1
Q ₁₄	0	0	0	0
Q ₁₅	1	1	0	1

Примітка: Число “1” відповідає попаданню в зону допуску, а число “0” – непопаданню в зону допуску відповідного параметра діагностування ДПС.

$$F^2 = \bigvee_{i=1}^5 Q_i^2 = \overline{b_1} \cdot \overline{b_2} \cdot \overline{b_3} \cdot \overline{b_4} \cdot b_5 \vee \overline{b_1} \cdot \overline{b_2} \cdot \overline{b_3} \cdot b_4 \cdot \overline{b_5} \vee b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot \overline{b_5} \vee \overline{b_1} \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5. \quad (2.47)$$

3. Показники якості холостого ходу

Стани ДСП, що розрізняються:

$$Q_1^3 \in \{Q_1, Q_4\}; \quad Q_2^3 \in \{Q_2, Q_7, Q_8, Q_9, Q_{12}\}; \quad Q_3^3 \in \{Q_3\}; \quad (2.48)$$

$$Q_4^3 \in \{Q_5, Q_6, Q_{11}, Q_{13}, Q_{15}\}; \quad Q_5^3 \in \{Q_{14}\}.$$

Логічні рівняння діагностування:

$$Q_1^3 = c_1 \cdot c_2 \cdot \overline{c_3} \cdot \overline{c_4}; \quad Q_2^3 = \overline{c_1} \cdot c_2 \cdot \overline{c_3} \cdot \overline{c_4}; \quad Q_3^3 = \overline{c_1} \cdot c_2 \cdot \overline{c_3} \cdot c_4; \quad (2.49)$$

$$Q_4^3 = c_1 \cdot c_2 \cdot \overline{c_3} \cdot c_4; \quad Q_5^3 = \overline{c_1} \cdot \overline{c_2} \cdot \overline{c_3} \cdot \overline{c_4}.$$

Мінімізована функція ознаки несправності:

$$F^3 = \bigvee_{i=1}^5 Q_i^3 = c_2 \cdot \overline{c_3} \vee \overline{c_1} \cdot \overline{c_3} \cdot \overline{c_4}. \quad (2.50)$$

За результатами діагностування в кожному з режимів робиться припущення про ймовірний стан ОД.

При аналізі причин браку можливий нечіткий діагноз, оскільки та сама причина може привести до відхилень одночасно кількох параметрів ДПС. Тому діагностування потрібно проводити у такій послідовності дій:

1. Формування табличних множин для кожної причини браку Q_k :

$$\mathbf{A}_{Tk} = \{a_{i \text{ табл.}k}; \quad i = \overline{1, 6, 1}\}; \quad \mathbf{B}_{Tk} = \{b_{i \text{ табл.}k}; \quad i = \overline{1, 5, 1}\}; \quad (2.51)$$

$$\mathbf{C}_{Tk} = \{c_{i \text{ табл.}k}; \quad i = \overline{1, 4, 1}\};$$

$$\mathbf{Z}_{Tk} = \mathbf{A}_{Tk} \cup \mathbf{B}_{Tk} \cup \mathbf{C}_{Tk} \text{ для } k = \overline{1, 15, 1}.$$

2. Визначення параметрів ДПС і формування експериментальних множин:

$$\mathbf{A}_k = \{a_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 6, 1}\}; \mathbf{B}_k = \{b_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 5, 1}\}; \quad (2.52)$$

$$\mathbf{C}_k = \{c_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 4, 1}\};$$

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{A}_k \cup \mathbf{B}_k \cup \mathbf{C}_k \text{ для } k = \overline{1, 15, 1}.$$

3. Знаходження найбільш ймовірної причини браку:

$$\mathbf{Z}_k \cap \mathbf{Z}_{T_k} \rightarrow \min \{...\}, \quad k = \overline{1, 15, 1}. \quad (2.53)$$

При $\mathbf{Z}_k \cap \mathbf{Z}_{T_k} = \emptyset$ формується чіткий діагноз.

2.4. Метод діагностування стану електромоторів за допомогою автоматичного класифікатора на базі нечітких множин

Класифікацією називається процес віднесення ОД до одного із класів b_1, b_2, \dots, b_m з урахуванням його властивостей (або параметрів стану) x_1, x_2, \dots, x_n (рис. 2.10).

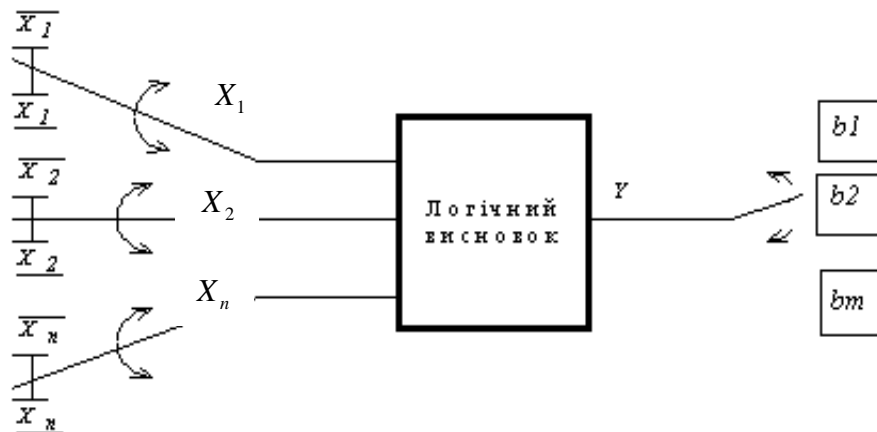


Рис. 2.10. Блок схема системи нечіткого автоматичного класифікатора

Теоретичною основою автоматичних класифікаторів в даному випадку виступає нечітка логіка. На відміну від системи нечіткого логічного висновку з неперервним виходом, автоматичний класифікатор має дискретний вихід [112].

Для побудови системи класифікації на нечіткій логіці необхідно знати:

1. Множину класів $\{b_1, b_2, \dots, b_m\}$.
2. Перелік властивостей об'єкта, що класифікується $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$.
3. Нечітку базу знань – сукупність правил типу

$$\bigcup_{p=1,k} \bigcap_{i=1,n} (x_i = a_i^{jp} \text{ з вагою } c_{30}) \longrightarrow y = b_j, \text{ при } j=1,m,$$

за якими здійснюється класифікація.

4. Перелік нечітких термів a_i^{jp} для лінгвістичного оцінювання властивості x_i .

5. Функції належності $\mu_{a_i^{jp}}(x_i)$ нечітких термів a_i^{jp} .

Об'єкту діагностування X з характеристиками $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ відповідає клас $b \in \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$, для якого:

$$\mu_b(X) = \max(\mu_{b_j}(X)). \quad (2.54)$$

Для побудови автоматичного класифікатора за основу приймається система нечіткого логічного висновку типу Сугенто. Система нечіткого логічного висновку називається системою типу Сугенто, якщо при відомій базі знань вектору $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ фіксованих значень факторів впливу ставиться у відповідність значення вихідної змінної y , яке розраховується за формулою:

$$y = \text{defuz} \left(\sum_{j=1}^m \mu_j / y_j \right). \quad (2.55)$$

Розглянемо кожний фактор окремо, для того щоб визначити діапазони зміни цих факторів, визначити кількість термів, необхідних для лінгвістичної оцінки кожного фактору та для вибору функцій належності кожного терму. Для кожного впливаючого фактора оберемо функцію належності Гауса за формулою:

$$\mu^+(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c} \right)^2}; \quad \varepsilon(x) = 1 - \mu^+(x), \quad (2.56)$$

де $\mu^+(x)$ – функція належності змінної x ;

b – параметр функції належності, який відповідає координаті максимуму;

c – параметр стиснення-розтягування функції належності;

$\varepsilon(x)$ – функція зворотна до функції належності.

Функція $\varepsilon(x)$ характеризує терм, що показує невідповідність певного параметра його нормі.

Розглянемо побудову нечіткого класифікатора для оцінки стану АД [160]. Нечіткі класифікатори для СД та ДПС будуються аналогічно.

Дані про діапазон, терм множини, параметри координати максимуму та стиснення-розтягнення функції належності для АД типу 4A71A4 наведені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7.

Параметри функції належності для АД типу 4A71A4

Умовне позначення	Терм-множина	B	c	Діапазон
a ₁	Norm/Fail	$3 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	1-5 МОм
a ₂	Norm/Fail	10.5	0.8	8-13 Ом
a ₃	Norm/Fail	$19 \cdot 10^{-3}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	18-20 мГн
a ₄	Norm/Fail	$0.3 \cdot 10^{-6}$	$0.3 \cdot 10^{-7}$	0.1-05 мкФ
a ₅	Norm/Fail	$19 \cdot 10^{-3}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	18-20 мГн
a ₆	Norm/Fail	20.5	0.6	18-23
b ₁	Norm/Fail	12.5	0.6	10-15 Нм
b ₂	Norm/Fail	4.5	0.08	4-5 Нм
b ₃	Norm/Fail	0.0012	0.00006	0.0009-0.0015 кГм ²
b ₄	Norm/Fail	0.2	0.009	0.1-0.3 Нм
b ₅	Norm/Fail	1.5	0.09	1-2 Н
c ₁	Norm/Fail	22.5	0.4	20-25 А
c ₂	Norm/Fail	0.5	0.04	0.08-0.2
c ₃	Norm/Fail	80	1.9	70-90 %
c ₄	Norm/Fail	1450	13.4	1400-1500 об/хв
d ₁	Norm/Fail	42.5	0.4	40-45 А
d ₂	Norm/Fail	11	0.2	10-12 Нм
d ₃	Norm/Fail	0.14	0.01	0.08-0.2

Ієрархічний взаємозв'язок між параметрами і технічним станом АД представимо у вигляді дерева нечіткого логічного висновку (рис. 2.11). Вершини дерева інтерпретуються в такий спосіб:

- корінь дерева – показник, що діагностується;

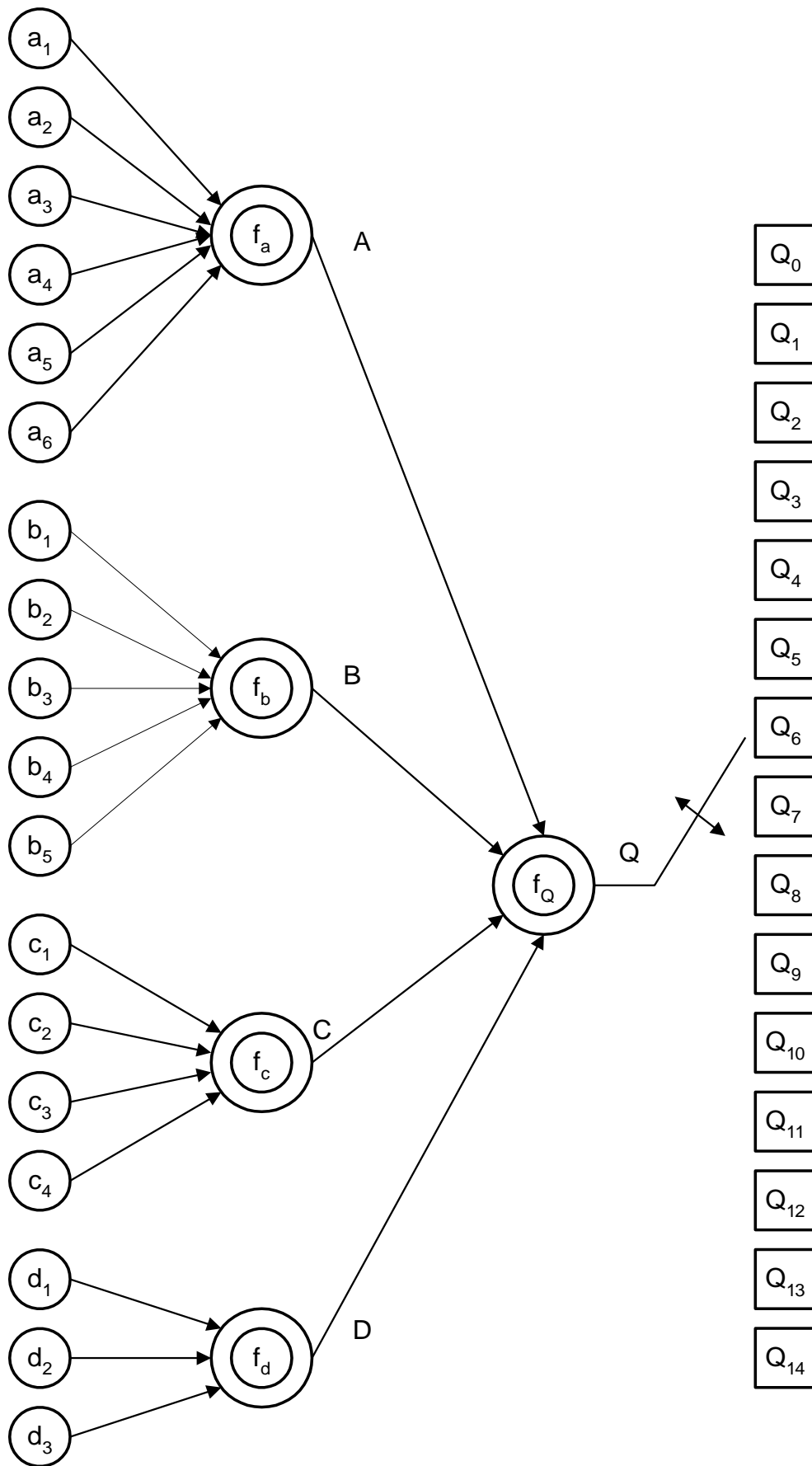


Рис. 2.11. Дерево нечіткого логічного висновку

- термінальні вершини – частинні параметри стану;
- нетермінальні вершини (подвійні кола) – нечіткі бази знань.

Наведеному дереву відповідає така система співвідношень:

$$Q = f_Q(A, B, C, D), \quad (2.57)$$

$$A = f_a(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6), \quad (2.58)$$

$$B = f_b(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5), \quad (2.59)$$

$$C = f_c(c_1, c_2, c_3, c_4), \quad (2.60)$$

$$D = f_d(d_1, d_2, d_3). \quad (2.61)$$

Частинні та інтегральні параметри стану розглядаються як лінгвістичні змінні. За входами і виходом системи необхідно побудувати базу знань, яка буде їх зв'язувати. Всі правила генеруються на основі експертних знань розробника ЕМ. На кожний вихідний терм накладається по чотири правила. Ці правила є прозорі і не суперечать одне одному (табл. 2.8).

Оскільки система діагностування АД ієрархічна, то структура розбита на декілька підсистем. Перші чотири підсистеми відповідають групам впливних факторів, і роблять частковий висновок про стан АД, а остання, п'ята – на основі часткових робить остаточний висновок про придатність або непридатність ОД і вказує на можливу причину непридатності.

Структура нечітких систем для групи факторів А, В, С, D наведені на рис. 2.12 – 2.15.

Структура нечіткої системи для висновків Q – параметрів АД наведена на рис. 2.16. Вона містить чотири впливні фактори, тобто виходи попередніх часткових нечітких систем, вихідний параметр Q, представлені у вигляді нечітких множин.

Оскільки вихідний параметр дискретний, то для реалізації вибрана система Сугенто.

Наведемо тестові приклади.

Приклад 1. Вхідні дані:

- 1) параметри обмоток: a_1 - norm, a_2 - norm, a_3 - norm, a_4 - norm, a_5 - norm, a_6 - norm;
- 2) параметри динамічного режиму: b_1 – norm, b_2 - norm, b_3 - norm, b_4 - norm, b_5 - norm;
- 3) параметри холостого ходу: c_1 - norm, c_2 - norm, c_3 - norm, c_4 - norm;
- 4) параметри короткого замикання: d_1 - norm, d_2 - norm, d_3 - norm.

Висновок: “Справний двигун”.

Таблиця 2.8.

База знань

<i>База знань про співвідношення (2.47)</i>						
a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	A
Norm	Norm	Norm	Norm	Norm	Norm	A ₀
Norm	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	A ₁
Norm	Norm	Fail	Norm	Fail	Fail	A ₂
Norm	Fail	Norm	Norm	Norm	Fail	A ₃
Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	A ₄
Norm	Norm	Norm	Norm	Fail	Norm	A ₅
<i>База знань про співвідношення (2.48)</i>						
b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	B	
Norm	Norm	Norm	Norm	Norm	B ₀	
Fail	Fail	Norm	Norm	Norm	B ₁	
Norm	Norm	Fail	Norm	Fail	B ₂	
Norm	Norm	Norm	Fail	Norm	B ₃	
Fail	Norm	Norm	Norm	Norm	B ₄	
Fail	Norm	Fail	Norm	Norm	B ₅	
<i>База знань про співвідношення (2.49)</i>						
c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	C		
Norm	Norm	Norm	Norm	C ₀		
Fail	Fail	Norm	Norm	C ₁		
Fail	Norm	Norm	Fail	C ₂		
Norm	Fail	Fail	Norm	C ₃		
Norm	Fail	Norm	Norm	C ₄		
Norm	Fail	Fail	Norm	C ₅		
Norm	Norm	Norm	Fail	C ₆		
Norm	Norm	Fail	Fail	C ₇		
Norm	Fail	Norm	Fail	C ₈		
<i>База знань про співвідношення (2.50)</i>						
d ₁	d ₂	d ₃	D			
Norm	Norm	Nor	D ₀			
Fail	Norm	Norm	D ₁			
Fail	Norm	Fail	D ₂			
Norm	Norm	Fail	D ₃			
Norm	Fail	Norm	D ₄			
<i>База знань про співвідношення (2.46)</i>						
A	B	C	D	Q		
A ₀	B ₀	C ₀	D ₀	Q ₀		
A ₀	B ₁	C ₁	D ₁	Q ₁		
A ₁	B ₁	C ₂	D ₁	Q ₂		
A ₀	B ₁	C ₃	D ₂	Q ₃		
A ₂	B ₁	C ₄	D ₃	Q ₄		

Продовження таблиці 2.8

A_2	B_1	C_5	D_0	Q_5
A_1	B_1	C_6	D_4	Q_6
A_3	B_1	C_6	D_0	Q_7
A_4	B_2	C_7	D_4	Q_8
A_0	B_1	C_7	D_0	Q_9
A_0	B_3	C_6	D_3	Q_{10}
A_0	B_4	C_5	D_0	Q_{11}
A_0	B_1	C_8	D_3	Q_{12}
A_0	B_5	C_4	D_1	Q_{13}
A_0	B_0	C_3	D_2	Q_{14}

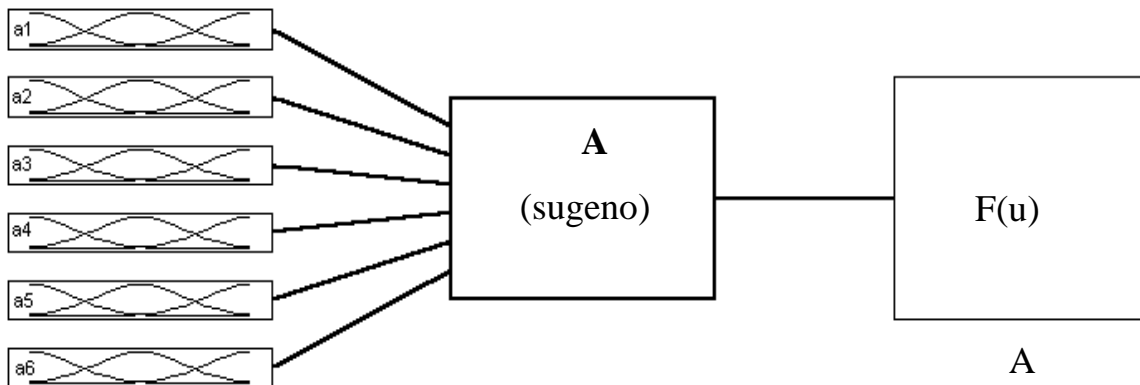


Рис. 2.12. Структура нечіткого часткового висновку А

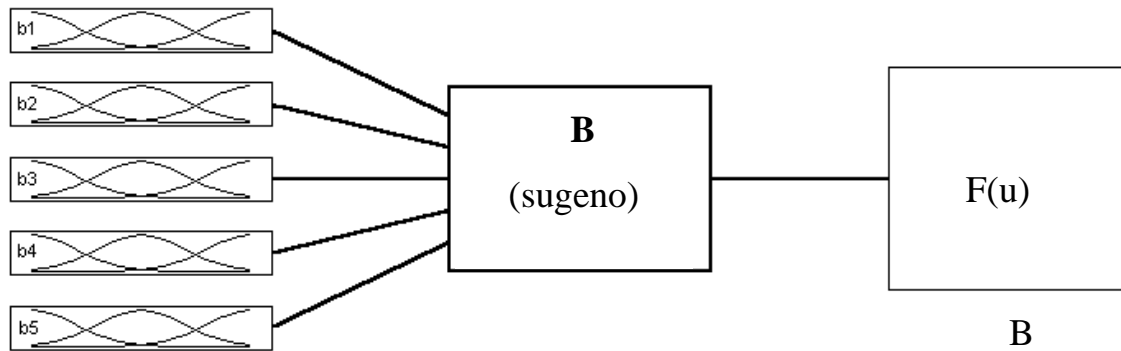


Рис. 2.13. Структура нечіткого часткового висновку В

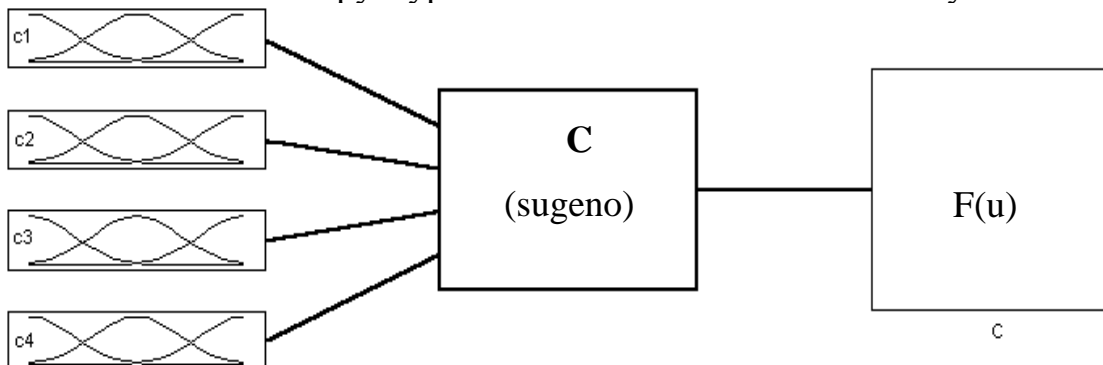


Рис. 2.14. Структура нечіткого часткового висновку С

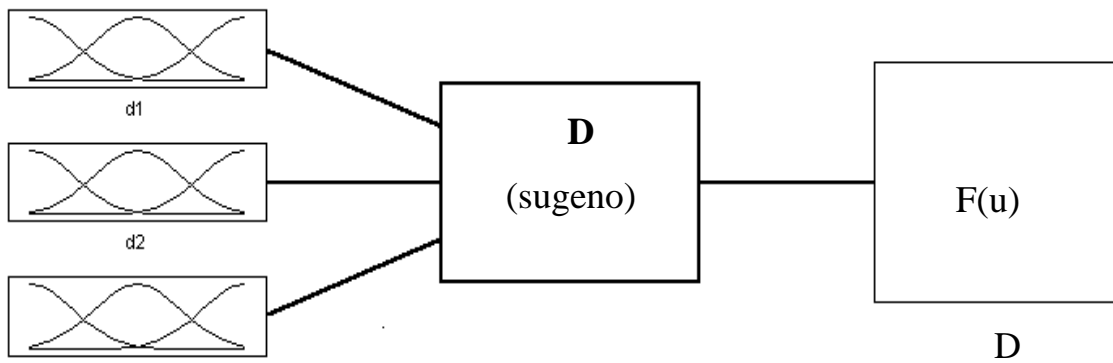


Рис. 2.15. Структура нечіткого часткового висновку D

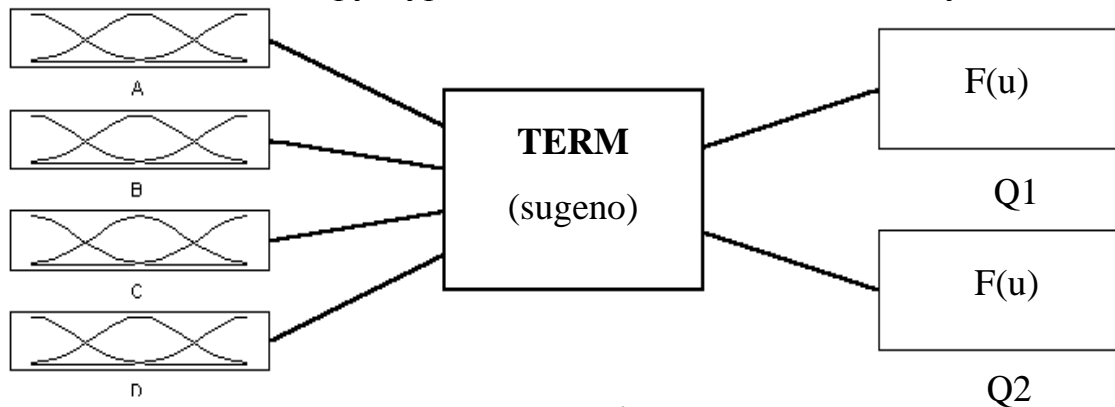


Рис. 2.16. Структура нечіткого висновку Q

Приклад 2.

Вхідні дані:

- 1) параметри обмоток: a_1 - norm, a_2 - norm, a_3 - fail, a_4 - norm, a_5 - fail, a_6 - norm;
- 2) параметри динамічного режиму: b_1 - fail, b_2 - fail, b_3 - norm, b_4 - norm, b_5 - norm;
- 3) параметри холостого ходу: c_1 - norm, c_2 - norm, c_3 - fail, c_4 - norm;
- 4) параметри короткого замикання: d_1 - norm, d_2 - norm, d_3 - norm.

Висновок: "Невідповідність марки сталі".

Вхідні дані:

- 1) параметри обмоток: a_1 - norm, a_2 - norm, a_3 - fail, a_4 - norm, a_5 - fail, a_6 - norm;
- 2) параметри динамічного режиму: b_1 - fail, b_2 - norm, b_3 - fail, b_4 - norm, b_5 - norm;
- 3) параметри холостого ходу: c_1 - norm, c_2 - fail, c_3 - norm, c_4 - norm;
- 4) параметри короткого замикання: d_1 - fail, d_2 - norm, d_3 - fail.

Висновок: "Взаємне зміщення пакетів статора і ротора".

2.5. Прогнозування якості технологічного процесу під час виробництва та технічного діагностування електромоторів

Ефективне діагностування технічного стану ЕМ в процесі виробництва, своєчасне прогнозування причин розлагодження технологічного процесу і засноване на цьому керування якістю виготовлення ЕМ дозволяє вирішувати актуальні задачі на виробництві. Зокрема, прогнозування стану ЕМ дозволяє раціонально спланувати проведення регламентних робіт, ремонт і заміну техніки тощо. Важливе значення прогнозування в процесі діагностування привело до виділення його в особливий вид діагностування, який отримав назву *прогнозуючого діагностування* [161]. Результати прогнозуючого діагностування можна використати для керування технологічним процесом та його окремими модулями, оптимізуючи ефективність функціонування технологічного процесу.

Потрібно відмітити, що прогнозуюча діагностика відрізняється від звичайної діагностики тільки тим, що прийняття рішень про придатність робиться для наступного моменту часу. За результатами спостереження параметрів ЕМ на певному проміжку часу проводиться екстраполяція значень параметрів на майбутній момент часу і відповідно обчислюється майбутнє значення показника якості. Алгоритми прийняття рішень при прогнозуючій діагностиці такі ж самі, що і при поточній діагностиці. Прогнозуюча діагностика переходить в поточну діагностику при нульовому часі екстраполяції. Ця обставина дозволяє розглядати прогнозуючу діагностику як більш загальну, окремий випадок якої є поточна діагностика [161].

Прогнозування стану ЕМ може здійснюватися аналітичними, ймовірнісними та статистичними методами класифікації [162, 163].

Нехай стан ЕМ описується деякою багатовимірною (векторною) функцією станів $\psi(\xi_1, \dots, \xi_n) = \psi(\bar{\xi})$, яка спостерігається в моменти часу t_0, t_1, \dots, t_k , що набуває значення $\psi_0(\bar{\xi}), \psi_1(\bar{\xi}), \dots, \psi_k(\bar{\xi})$.

При аналітичному прогнозуванні за множиною цих значень $\{\psi_t(\bar{\xi})\}$ аналітичними методами визначаються значення цієї функції $\psi_{k+1}(\bar{\xi}), \psi_{k+2}(\bar{\xi}), \dots, \psi_{k+m}(\bar{\xi})$ у моменти $t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_{k+m}$, й за результатами обрахунків формуються сигнали керування технологічним процесом.

При ймовірнісному прогнозуванні, знаючи значення множини параметрів $\{\xi_j\}$, $j = \overline{1, n}$ в кожен з моментів t_i ($i = \overline{1, k}$), значення

функції $\psi_i(\xi_j)$ та її функцію розподілу ймовірностей $P_i(\psi)$, можна спрогнозувати

$$P_{k+1}(\varepsilon) \equiv \Pr \left\{ \left| \psi_{k+1}^*(\xi_j) - \psi_{k+1}(\xi_j) \right| < \varepsilon \right\},$$

де $\psi_{k+1}^*(\xi_j)$ - допустиме значення функції $\psi_{k+1}(\xi_j)$ у момент часу t_{k+1} ;

$\psi_{k+1}(\xi_j)$ - оптимальне номінальне значення цієї функції в момент t_{k+1} ($l = \overline{1, m}$);

ε - допустима похибка прогнозування;

$\Pr \{ \dots \}$ - ймовірність вказаної в дужках події.

При прогнозуванні методами статистичної класифікації множина станів ЕМ розподіляється на класи станів. До одного й того ж класу підбираються всі ті стани, при яких спостерігається однакова ефективність функціонування ЕМ. Очікуваний стан ЕМ за допомогою різноманітних методів розпізнавання відносять до одного з цих класів. Розпізнавання базується на різних методах розпізнавання образів [164-166].

Оцінювання загального стану ЕМ здійснюється засобами контролювання станів. Існує певна класифікація засобів контролювання за принципами побудови та правилами функціонування [167-169].

При оцінюванні узагальненого інформаційного стану ЕМ та при його прогнозуванні засоби контролювання та прогнозування забезпечують вимірювання поточних значень параметрів $\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_n(t)$, що є аргументами функції стану $\psi(\bar{\xi})$.

Кількість вимірюваних параметрів та точність їх вимірювання, обсяг апріорних значень є визначальними при виборі методу оцінювання й прогнозування стану ОД, його точності та складності практичної реалізації. Вимірювання параметрів $\{\xi_j\}$, $j = \overline{1, n}$ - це завдання багатоканальної інформаційно-вимірювальної системи, яка є важливою ланкою системи контролювання й прогнозування стану ОД, а отже, й системи керування технологічним процесом.

Важливо для забезпечення надійного оцінювання стану ЕМ аргументовано вибирати сукупність параметрів $\{\xi_j\}$, $j = \overline{1, n}$ та необхідну точність їх вимірювання. Загальної теорії розв'язання цієї задачі на сьогодні не існує, проте одне із загальних положень полягає в тому, аби кількість вимірюваних параметрів та вимоги щодо забезпечення необхідної точності їх вимірювань звести до мінімуму, забезпечуючи

необхідну точність засобів контролювання, прогнозування стану ЕМ [168].

Передовсім доцільно добирати до вимірювання ті параметри ЕМ, які б якомога повніше знімали невизначеність його інформаційного стану, тобто містили найбільшу кількість інформації про нього.

Мінімально необхідний обсяг даних вимірювання звичайно апріорно невідомий, оскільки апріорно невідомі сумісні щільності ймовірностей параметрів $P(\xi_1, \dots, \xi_n)$ й кількість ступенів свободи контрольованих параметрів. До того ж, і сумісні закони розподілу й кількості ступенів свободи змінюються у часі в широких межах, оскільки контрольовані параметри $\{\xi_j\}$, $j = \overline{1, n}$ нестационарні. Тому мінімальний обсяг вимірюваних даних теж часозмінний.

З інформаційної точки зору вимірюванням значень окремих параметрів при оцінюванні стану ЕМ знімається його невизначеність, яку кількісно описують ентропією сукупності n контрольованих параметрів [170-172]:

$$H(\bar{\xi}) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} p(\xi_1, \dots, \xi_n) \cdot \log_2 p(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1 \dots d\xi_n,$$

де $p(\xi_1, \dots, \xi_n)$ - сумісна щільність ймовірностей вимірюваних параметрів.

Якщо всі параметри незалежні, то

$$H(\bar{\xi}) = \sum_i H_i(\xi_i),$$

де $H_i(\xi_i) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(\xi_i) \cdot \log_2 p(\xi_i) d\xi_i$;

$H_i(\xi_i)$, $p(\xi_i)$ - ентропія та щільність ймовірностей i -го контрольованого параметра відповідно.

Поставимо задачу прогнозування якості технологічного процесу виробництва ЕМ відповідно [173]. На технічний стан ЕМ впливають фактори (рис. 2.17): \mathbf{X} - зміни у властивостях процесів виробництва ЕМ; \mathbf{Y} - випадкові зовнішні та внутрішні завади. Для вимірювань вибрано сукупність $\xi = \mathbf{A} \cup \mathbf{B} \cup \mathbf{C} \cup \mathbf{D}$ прогнозуючих параметрів ЕМ, які суттєво залежать від \mathbf{X} і дозволяють (при певних засобах прогнозування, які реалізують алгоритм прогнозування) передбачити майбутній технічний стан Q_k ЕМ. На значення прогнозуючих параметрів в

загальному випадку впливають завади Y . При вимірюванні параметрів можливі похибки вимірювань Z , внаслідок чого замість вектору ξ істинних значень отримується вектор вимірених значень $\xi \neq \xi^*$. На результати прогнозування, можливо, впливають похибки прогнозування V . Таким чином, майбутній технічний стан Q_k ЕМ залежить від кількох випадкових векторних аргументів [174]:

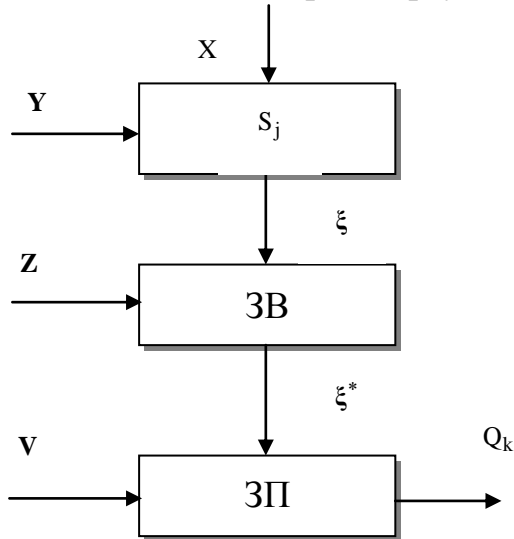


Рис. 2.17. Однолінійна схема системи прогнозування, яка вміщує АД S_j , засоби вимірювання ЗВ та засоби прогнозування ЗП

$$Q_k = f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{V}). \quad (2.62)$$

Залежність (2.62) є моделлю процесу прогнозування. Імовірнісний характер цієї моделі визначається тим, що $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{V}$ є суттєво випадковими функціями. Отримати залежність (2.62) в аналітичній формі для ЕМ як складної електромеханічної системи, неможливо.

У зв'язку з цим необхідно використати прийоми спрощення як самої моделі, так і процедур її обробки. Розділимо загальну задачу прогнозування на дві самостійні задачі –

задачу вимірювань прогнозуючих параметрів або параметрів діагностування, коли використовується модель

$$\xi^* = \varphi(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}), \quad (2.63)$$

і задачу отримання прогнозу (результату прогнозування) за моделлю

$$Q_k = \psi(\xi^*, \mathbf{V}). \quad (2.64)$$

Як модель прогнозування (2.64) пропонується використати функцію показників якості ЕМ (2.8).

Для екстраполяції дрейфу вектора вимірених значень ξ^* можна використати поліноміальну залежність від часу із випадковими величинами [173]:

$$U_i(t) = \sum_{k=1}^{h+1} U_{ik} \cdot t^{k-1}, \quad (2.65)$$

де i – номер параметра;
 $h + 1$ - порядок поліному;
 U_{ik} - випадкові коефіцієнти, що характеризують:
 U_{i1} - початкове значення,
 U_{i2} - швидкість зміни;
 U_{i3} - прискорення.

Як правило, достатньо обмежитися другим порядком поліному:

$$U_i(t) = U_{i1} + U_{i2} \cdot t + U_{i3} \cdot t^2. \quad (2.66)$$

Стрибок у зміні параметрів сигналізує про суттєве розлагодження технологічного процесу. Моделлю, що описує стрибки у значеннях параметрів, може слугувати випадковий процес, в якому поява стрибків проходить у випадкові моменти часу, а значення параметрів після стрибка є випадковими величинами. Для побудови цієї моделі необхідно знати закони розподілу ймовірностей моментів появи стрибків і значень параметрів. Характеристики цих законів розподілу достатньо точно знайти неможливо. Тому необхідно обмежитися такою спрощеною моделлю стрибків. Закон розподілу ймовірностей часу появи стрибків приймається пуассонівським, а значення параметру після стрибка вважається відомим. Тоді математичне очікування певного параметра можна записати у вигляді:

$$U_i(t) = e^{-\lambda t} (U_{i1} + U_{i2} \cdot t + U_{i3} \cdot t^2) + (1 - e^{-\lambda t}) a, \quad (2.67)$$

де $e^{-\lambda t}$ - ймовірність того, що стрибка за час t не буде;
 $(1 - e^{-\lambda t})$ - ймовірність хоча б одного стрибка за час t ;
 a - значення параметра після стрибка.

При екстраполяції значень параметрів і функції показників якості ЕМ бажано провести згладжування коливань $U(t)$, наприклад, методом найменших квадратів.

Висновки

1. Запропонована ієрархічна модель ЕМ як об'єкту діагностування, яка має три рівня ієрархії. Для показників якості ЕМ, які роз-

биті на функціональні групи, прийнято ряд умов: показники, які враховуються для оцінки якості ЕМ при випробовуваннях, повинні бути ідентичні показникам, які враховуються при проектуванні; склад показників якості повинен відображати основні експлуатаційні характеристики ЕМ; показники якості повинні бути визначені таким чином, щоб простіше було б визначати залежність між підвищенням якості ЕМ і зміною при цьому будь-якої експлуатаційної характеристики. Рівень I характеризує узагальнений показник якості. Рівень II – комплексні показники якості. Рівень III – показники якості основних параметрів АД. Така ієрархічна побудова показників якості дозволяє звести задачу оцінки якості ЕМ при діагностуванні до оцінки впливу певних параметрів ЕМ на узагальнений показник якості при випробовуваннях.

2. Визначено єдині правила формування показників якості, що дозволило синтезувати загальну функцію якості ЕМ: правило співрозмірності масштабів вимірювань; правило нижньої межі показника якості; правило верхньої межі показника якості; перше правило взаємної незалежності показників якості; друге правило взаємної незалежності показників якості; правило ідентичності вимірювань.

3. Показники якості основних параметрів діагностування ЕМ запропоновано визначати за допомогою функції Йордана (2.25), що дозволило формалізувати основні вимоги до них: показник якості – це симетрична унімодальна функція відносно поля допуску параметра; в межах поля допуску показник якості змінюється від 0 до 1 в залежності від відхилення вимірюваного значення параметра від номінального; за межами поля допуску показник якості приймає нульове значення. Запропонована методика оцінки якості ЕМ дозволяє суттєво підвищити загальну якість діагностування та оцінку якості ЕМ, проводити їх сортування за категоріями якості, прогнозувати вплив технологічного процесу на якість виготовлення ЕМ.

4. Запропоновано метод технічного діагностування АД на основі логічних функцій, який використовує ПД АД, отримані в чотирьох режимах випробувань: випробування обмоток; динамічний режим; режим холостого ходу; режим короткого замикання. Формулювання таблиці станів АД дозволило синтезувати логічні моделі та алгоритми діагностування у кожному з режимів випробувань. При аналізі причин браку можливий нечіткий діагноз, оскільки одна і та ж сама причина може привести до відхилень одночасно кількох параметрів АД. Тому запропоновано процедуру діагностування, яка враховує нечіткість заповнення таблиці станів АД.

5. Запропоновано метод технічного діагностування СД на основі логічних функцій, який використовує ПД СД, отримані в чотирьох

режимах випробувань: випробування обмоток; динамічний режим; режим холостого ходу; режим короткого замикання. Формулювання таблиці станів СД дозволило синтезувати логічні моделі діагностування у кожному з режимів випробувань. При аналізі причин браку можливий нечіткий діагноз, оскільки одна і та ж сама причина може привести до відхилень одночасно кількох параметрів СД. Тому запропоновано процедуру діагностування, яка враховує нечіткість заповнення таблиці станів СД.

6. Запропоновано метод технічного діагностування ДПС на основі логічних функцій, який використовує ПД АД, отримані в трьох режимах випробувань: випробування обмоток; динамічний режим; режим холостого ходу. Формулювання таблиці станів ДПС дозволило синтезувати логічні моделі діагностування у кожному з режимів випробувань. При аналізі причин браку можливий нечіткий діагноз, оскільки одна і та ж сама причина може привести до відхилень одночасно кількох параметрів ДПС. Тому запропоновано процедуру діагностування, яка враховує нечіткість заповнення таблиці станів ДПС.

7. Запропоновано метод технічного діагностування ЕМ на основі автоматичного класифікатора на базі нечітких множин. Для побудови автоматичного класифікатора за основу було взято систему нечіткого логічного висновку типу Сугенто, що дозволило визначити необхідну кількість термів, вибрати функції належності кожного терму, побудувати дерево нечіткого логічного висновку та базу знань автоматичного класифікатора. Оскільки система діагностування АД ієрархічна, то структура бази знань розбита на декілька підсистем. Перші чотири підсистеми відповідають групам впливних факторів, і роблять частковий висновок про стан АД, а остання, п'ята – на основі часткових робить остаточний висновок про придатність або непридатність ОД і вказує на можливу причину непридатності. Розроблені методи технічного діагностування стану асинхронного двигуна можуть бути використані в прогнозуванні тенденцій розлагодження технологічного процесу (попередження браку, формування суджень і рекомендацій для проведення організаційно-технічних заходів підтримки технологічної дисципліни на потрібному рівні), яке відноситься до найбільш важливих елементів керування якістю виробництва ЕМ. Запропонований підхід до побудови нечіткого класифікатора може бути використаний і для діагностування СД та ДПС.

8. Розглянуто особливості прогнозування якості технологічного процесу при виробництві ЕМ, запропоновано аналітичну модель прогнозування на основі функцій показників якості та функції Йордана. Як модель дрейфу параметрів запропоновано використати їх поліноміальну залежність від часу в процесі проведення випробувань. Це до-

зволяє ефективно діагностувати технічний стан ЕМ в процесі виробництва та приймально-здавальних випробуваннях, своєчасно прогнозувати причини розлагодження технологічного процесу і заснувати на цьому керування якістю виготовлення ЕМ. Зокрема, прогнозування стану ЕМ дозволяє раціонально спланувати проведення регламентних робіт, ремонт і заміну техніки тощо.

3. МЕТОДИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ

3.1. Аналіз параметрів діагностування електромоторів

Однією із важливих задач дослідження математичних моделей ЕМ є задача визначення впливу параметрів діагностування ЕМ на його вихідні характеристики. Розв'язання цієї задачі дозволяє відповісти на питання про можливість визначення чи вимірювання певних ПД ЕМ. Така задача стосовно ПД ЕМ у відомій літературі не розглядалась, а її розв'язання дуже важливо для побудови ефективних алгоритмів вимірювального перетворення.

Вплив механічних параметрів ЕМ на його вихідні характеристики розглянуто в [175]. Тому тут розглянемо лише вплив електричних ПД ЕМ. Проведемо аналіз для параметрів діагностування роторного кола R_r , L_r , L_m АД. Будемо розглядати режим пуску. Параметри R_s , L_s не розглядаються, оскільки вони можуть бути безпосередньо виміряні. Для дослідження впливу ПД ЕМ використаємо апарат теорії чутливості [107]. Внутрішні ПД ЕМ запишемо у вигляді вектора

$$\mathbf{A} = [A_1; A_2; A_3]^T = [R_r; L_r; L_m]^T. \quad (3.1)$$

Дослідимо їх вплив на струми статора $i_{s\alpha}(t)$, $i_{s\beta}(t)$ та кутову швидкість обертання $\omega_r(t)$, оскільки ці характеристики ЕМ найбільш досяжні для вимірів.

Використавши (3.1) та задавши вектор стану

$$\mathbf{I} = [I_1; I_2; I_3; I_4; I_5]^T = [i_{s\alpha}; i_{s\beta}; i_{r\alpha}; i_{r\beta}; \omega_r]^T, \quad (3.2)$$

запишемо математичну модель ЕМ у формі $\frac{d}{dt} \mathbf{I} = \mathbf{F}(\mathbf{I}, \mathbf{A}, t)$:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{c} \frac{A_2(U_{s\alpha} - R_s I_1) + A_3(A_1 I_3 + I_5(A_2 I_4 + A_3 I_2))}{L_s A_2 - A_3^2} \\ \frac{A_2(U_{s\beta} - R_s I_2) + A_3(A_1 I_4 - I_5(A_2 I_3 + A_3 I_1))}{L_s A_2 - A_3^2} \\ -\frac{A_3(U_{s\alpha} - R_s I_1) - L_s(A_1 I_3 + I_5(A_2 I_4 + A_3 I_2))}{L_s A_2 - A_3^2} \\ -\frac{A_3(U_{s\beta} - R_s I_2) - L_s(A_1 I_4 - I_5(A_2 I_3 + A_3 I_1))}{L_s A_2 - A_3^2} \\ \frac{p}{J} \cdot \left(\frac{mp}{2} \cdot A_3 \cdot (I_2 I_3 - I_1 I_4) - M_0(I_5) \right) \end{array} \right] = [F_1; F_2; F_3; F_4; F_5]^T. \\
& \hspace{15em} (3.3)
\end{aligned}$$

Провівши необхідні математичні перетворення, визначимо частинні похідні $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{I}}$, $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{A}}$ та функції чутливості $\frac{\partial \mathbf{U}(t)}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{I}} \cdot \mathbf{U}(t) + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{A}}$:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{I}} = \\
& \left[\begin{array}{ccccc} \frac{-A_2 R_s}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{A_3^2 I_5}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{A_1 A_3}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{A_2 A_3 I_5}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{A_3(A_2 I_4 + A_3 I_2)}{L_s A_2 - A_3^2} \\ \frac{-A_3^2 I_5}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{-A_2 R_s}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{-A_2 A_3 I_5}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{A_1 A_3}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{-A_3(A_2 I_3 + A_3 I_1)}{L_s A_2 - A_3^2} \\ \frac{A_3 R_s}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{-L_s I_5 A_3}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{-L_s A_1}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{-L_s I_5 A_2}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{-L_s(A_2 I_4 + A_3 I_2)}{L_s A_2 - A_3^2} \\ \frac{L_s I_5 A_3}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{A_3 R_s}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{L_s I_5 A_2}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{-L_s A_1}{L_s A_2 - A_3^2} & \frac{L_s(A_2 I_3 + A_3 I_1)}{L_s A_2 - A_3^2} \\ \frac{-\frac{p^2 m}{2J} A_3 I_4}{2J} & \frac{\frac{p^2 m}{2J} A_3 I_3}{2J} & \frac{\frac{p^2 m}{2J} A_3 I_2}{2J} & \frac{-\frac{p^2 m}{2J} A_3 I_1}{2J} & 0 \end{array} \right]
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial A_1} = \frac{A_3 I_3}{L_s A_2 - A_3^2};$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial A_2} = \frac{A_3 \left(U_{s\alpha} A_3 - R_s I_1 A_3 + A_3^2 I_5 I_4 + L_s A_1 I_3 + L_s I_5 A_3 I_2 \right)}{\left(L_s A_2 - A_3^2 \right)^2};$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial A_3} = \frac{A_1 I_3 + I_5 (A_2 I_4 + A_3 I_2) + I_5 A_3 I_2}{L_s A_2 - A_3^2} +$$

$$+ 2 \frac{\left(A_2 (U_{s\alpha} - R_s I_1) + A_3 (A_1 I_3 + I_5 (A_2 I_4 + A_3 I_2)) \right) A_3}{\left(L_s A_2 - A_3^2 \right)^2};$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial A_1} = \frac{A_3 I_4}{L_s A_2 - A_3^2};$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial A_2} = \frac{A_3 \left(-U_{s\beta} A_3 + R_s I_2 A_3 + A_3^2 I_5 I_3 - L_s A_1 I_4 + L_s I_5 A_3 I_1 \right)}{\left(L_s A_2 - A_3^2 \right)^2};$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial A_3} = \frac{A_1 I_4 - I_5 (A_2 I_3 + A_3 I_1) - I_5 A_3 I_1}{L_s A_2 - A_3^2} +$$

$$+ 2 \frac{\left(A_2 (U_{s\beta} - R_s I_2) + A_3 (A_1 I_4 - I_5 (A_2 I_3 + A_3 I_1)) \right) A_3}{\left(L_s A_2 - A_3^2 \right)^2};$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial A_1} = \frac{-L_s I_3}{L_s A_2 - A_3^2};$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial A_2} = \frac{L_s \left(U_{s\alpha} A_3 - R_s I_1 A_3 + A_3^2 I_5 I_1 + L_s A_1 I_3 + L_s I_5 A_3 I_2 \right)}{\left(L_s A_2 - A_3^2 \right)^2};$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial A_3} = \frac{-U_{s\alpha} + R_s I_1 - L_s I_5 I_2}{L_s A_2 - A_3^2} +$$

$$+ \frac{2 \left(-A_3 (U_{s\alpha} - R_s I_1) - L_s (A_1 I_3 + I_5 (A_2 I_4 + A_3 I_2)) \right) A_3}{\left(L_s A_2 - A_3^2 \right)^2};$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial A_1} = \frac{-L_s I_4}{L_s A_2 - A_3^2};$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial A_2} = \frac{-L_s \left(-U_{s\beta} A_3 + R_s I_2 A_3 + A_3^2 I_5 I_3 - L_s A_1 I_4 + L_s I_5 A_3 I_1 \right)}{\left(L_s A_2 - A_3^2 \right)^2};$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial A_3} = \frac{-U_{s\beta} + R_s I_2 + L_s I_5 I_1}{L_s A_2 - A_3^2} + \frac{(-A_3(U_{s\beta} - R_s I_2) - L_s(A_1 I_4 - I_5(A_2 I_3 + A_3 I_1)))A_3}{(L_s A_2 - A_3^2)^2};$$

$$\frac{\partial F_5}{\partial A_1} = 0; \quad \frac{\partial F_5}{\partial A_2} = 0; \quad \frac{\partial F_5}{\partial A_3} = \frac{p^2 m}{2J} \cdot (I_2 I_3 - I_1 I_4).$$

Елементи матриці функцій чутливості виражаться:

$$\frac{\partial u_{11}}{\partial t} = \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (-A_2 R_s u_{11} + A_3^2 I_5 u_{21} + A_3 A_1 u_{31} + A_3 I_5 A_2 u_{41} + A_3(A_2 I_4 + A_3 I_2)u_{51} + A_3 I_3);$$

$$\frac{\partial u_{12}}{\partial t} = \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (-A_2 R_s u_{12} + A_3^2 I_5 u_{22} + A_3 A_1 u_{32} + A_3 I_5 A_2 u_{42} + A_3(A_2 I_4 + A_3 I_2)u_{52} + A_3 \left(\frac{-U_{s\alpha} A_3 + R_s I_1 A_3 - A_3^2 I_5 I_4 - L_s A_1 I_3 - L_s I_5 A_3 I_2}{L_s A_2 - A_3^2} \right));$$

$$\frac{\partial u_{13}}{\partial t} = \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (-A_2 R_s u_{13} + A_3^2 I_5 u_{23} + A_3 A_1 u_{33} + A_3 I_5 A_2 u_{43} + A_3(A_2 I_4 + A_3 I_2)u_{53} + A_1 I_3 + I_5(A_3 I_4 + A_3 I_2) + A_3 I_5 I_2 + 2 \frac{(A_2(U_{s\alpha} - R_s I_1) + A_3(A_1 I_3 + I_5(A_2 I_4 + A_3 I_2)))A_3}{L_s A_2 - A_3^2});$$

$$\frac{\partial u_{21}}{\partial t} = \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (-A_3^2 I_5 u_{11} - A_2 R_s u_{21} - A_3 I_5 A_2 u_{31} + A_3 A_1 u_{41} - A_3(A_2 I_4 + A_3 I_1)u_{51} + A_3 I_4);$$

$$\frac{\partial u_{22}}{\partial t} = \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (-A_3^2 I_5 u_{12} - A_2 R_s u_{22} - A_3 I_5 A_2 u_{32} + A_3 A_1 u_{42} - A_3(A_2 I_4 + A_3 I_1)u_{52} + A_3 \left(\frac{-U_{s\beta} A_3 + R_s I_2 A_3 + A_3^2 I_5 I_3 - L_s A_1 I_4 + L_s I_5 A_3 I_1}{L_s A_2 - A_3^2} \right));$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{23}}{\partial t} = & \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (-A_3^2 I_5 u_{13} - A_2 R_s u_{23} - A_3 I_5 A_2 u_{33} + A_3 A_1 u_{43} - \\ & - A_3 (A_2 I_4 + A_3 I_1) u_{53} + A_1 I_4 - I_5 (A_2 I_3 + A_3 I_1) - I_5 A_3 I_1 + \\ & + 2 \frac{(A_2 (U_{s\beta} - R_s I_2) + A_3 (A_1 I_4 - I_5 (A_2 I_3 + A_3 I_1))) A_3}{L_s A_2 - A_3^2}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{31}}{\partial t} = & \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (A_3 R_s u_{11} - L_s I_5 A_3 u_{21} - L_s A_1 u_{31} - L_s I_5 A_2 u_{41} - \\ & - L_s (A_2 I_4 + A_3 I_2) u_{51} - L_s I_3); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{32}}{\partial t} = & \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (A_3 R_s u_{12} - L_s I_5 A_3 u_{22} - L_s A_1 u_{32} - L_s I_5 A_2 u_{42} - \\ & - L_s (A_2 I_4 + A_3 I_2) u_{52} + \\ & \frac{L_s (U_{s\alpha} A_3 - R_s I_1 A_3 + A_3^2 I_5 I_1 + L_s A_1 I_3 + L_s I_5 A_3 I_2)}{L_s A_2 - A_3^2}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{33}}{\partial t} = & \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (A_3 R_s u_{13} - L_s I_5 A_3 u_{23} - L_s A_1 u_{33} - L_s I_5 A_2 u_{43} - \\ & - L_s (A_2 I_4 + A_3 I_2) u_{53} - U_{s\alpha} + R_s I_1 - L_s I_5 I_2 + \\ & + 2 \frac{(-A_3 (U_{s\alpha} - R_s I_1) - L_s (A_1 I_3 + I_5 (A_2 I_4 + A_3 I_2))) A_3}{L_s A_2 - A_3^2}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{41}}{\partial t} = & \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (L_s I_5 A_3 u_{11} + A_3 R_s u_{21} + L_s I_5 A_2 u_{31} - L_s A_1 u_{41} + \\ & + L_s (A_2 I_3 + A_3 I_1) u_{51} - L_s I_4); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{42}}{\partial t} = & \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (L_s I_5 A_3 u_{12} + A_3 R_s u_{22} + L_s I_5 A_2 u_{32} - L_s A_1 u_{42} + \\ & + L_s (A_2 I_3 + A_3 I_1) u_{52} - \\ & \frac{L_s (-U_{s\beta} A_3 + R_s I_2 A_3 + A_3^2 I_5 I_3 - L_s A_1 I_4 + L_s I_5 A_3 I_1)}{L_s A_2 - A_3^2}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{43}}{\partial t} = & \frac{1}{L_s A_2 - A_3^2} \cdot (L_s I_5 A_3 u_{13} + A_3 R_s u_{23} + L_s I_5 A_2 u_{33} - L_s A_1 u_{43} + \\ & + L_s (A_2 I_3 + A_3 I_1) u_{53} - U_{s\beta} + R_s I_2 + L_s I_5 I_1 + \\ & + 2 \frac{(-A_3 (U_{s\beta} - R_s I_2) - L_s (A_1 I_4 - I_5 (A_2 I_3 + A_3 I_1))) A_3}{L_s A_2 - A_3^2}); \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u_{51}}{\partial t} = \frac{p^2 mA_3}{2J} \cdot (-I_4 u_{11} + I_3 u_{21} + I_2 u_{31} - I_1 u_{41});$$

$$\frac{\partial u_{52}}{\partial t} = \frac{p^2 mA_3}{2J} \cdot (-I_4 u_{12} + I_3 u_{22} + I_2 u_{32} - I_1 u_{42});$$

$$\frac{\partial u_{53}}{\partial t} = \frac{p^2 mA_3}{2J} \cdot (-I_4 u_{13} + I_3 u_{23} + I_2 u_{33} - I_1 u_{43} + I_2 I_3 - I_1 I_4).$$

На рис. 3.1 – 3.9 зображені розраховані функції чутливості на пусковій ділянці роботи ЕМ. Аналіз результатів розрахунків функцій чутливості дозволяє зробити такі висновки:

- параметри вектору стану \mathbf{A} можна оцінити на пусковій ділянці роботи ЕМ;
- функції чутливості струмів $i_{s\alpha}(t), i_{s\beta}(t)$ за параметрами вектора \mathbf{A} носять коливальний характер. Тому для оцінки стану ЕМ по $i_{s\alpha}(t), i_{s\beta}(t)$ необхідно використовувати малий крок дискретизації по t , щоб забезпечити стійкість процесу ідентифікації;
- функції чутливості $\omega_r(t)$ по параметрам вектору \mathbf{A} не носять коливального характеру, більш регулярні, тому інформації $\omega_r(t)$ потрібно надати більшу перевагу в процесі ідентифікації параметрів вектору \mathbf{A} , наприклад, за допомогою вагових коефіцієнтів в цільовій функції ідентифікації.

3.2. Вимірювальне перетворення параметрів діагностування електромоторів в режимах пуску і холостого ходу

3.2.1. Ідентифікація параметрів діагностування R_r, L_r, L_m роторного кола електромоторів за допомогою теорії чутливості

Розглядаються питання ідентифікації внутрішніх ПД ротора (R_r, L_r, L_m), оскільки ПД статора (R_s, L_s) можна безпосередньо виміряти.

Прийmemo вихідну математичну модель ЕМ як (1.11). Тоді задача ідентифікації ПД ЕМ зводиться до знаходження значень вектора \mathbf{A} при спостереженні неповного вектора стану \mathbf{I} [107].

Для i -тої компоненти вектора \mathbf{I} з достатньою для практики точністю можна прийняти:

$$I_i(t) = I_i^H(t) + \sum_{j=1}^1 u_{ij}(t) \cdot a_j, \quad (3.4)$$

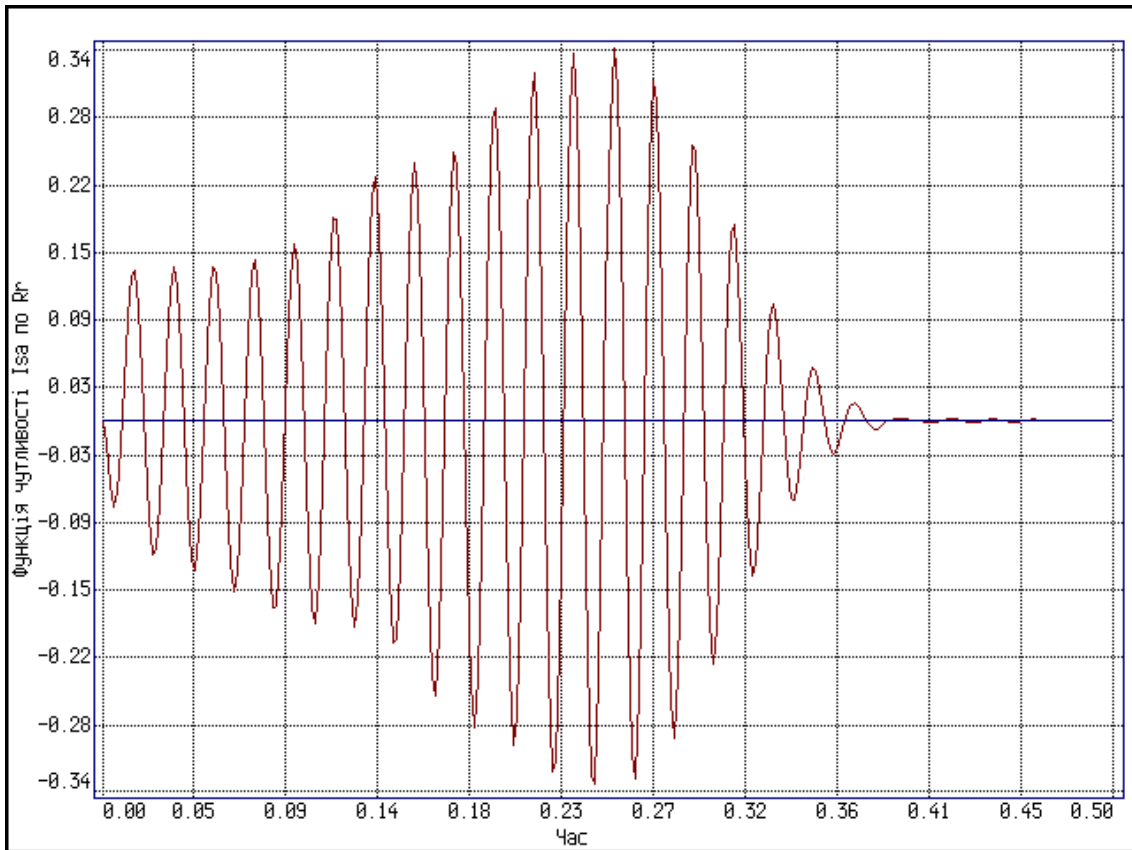


Рис. 3.1. Функція чутливості $\partial I_{s\alpha}(t)/\partial R_r$

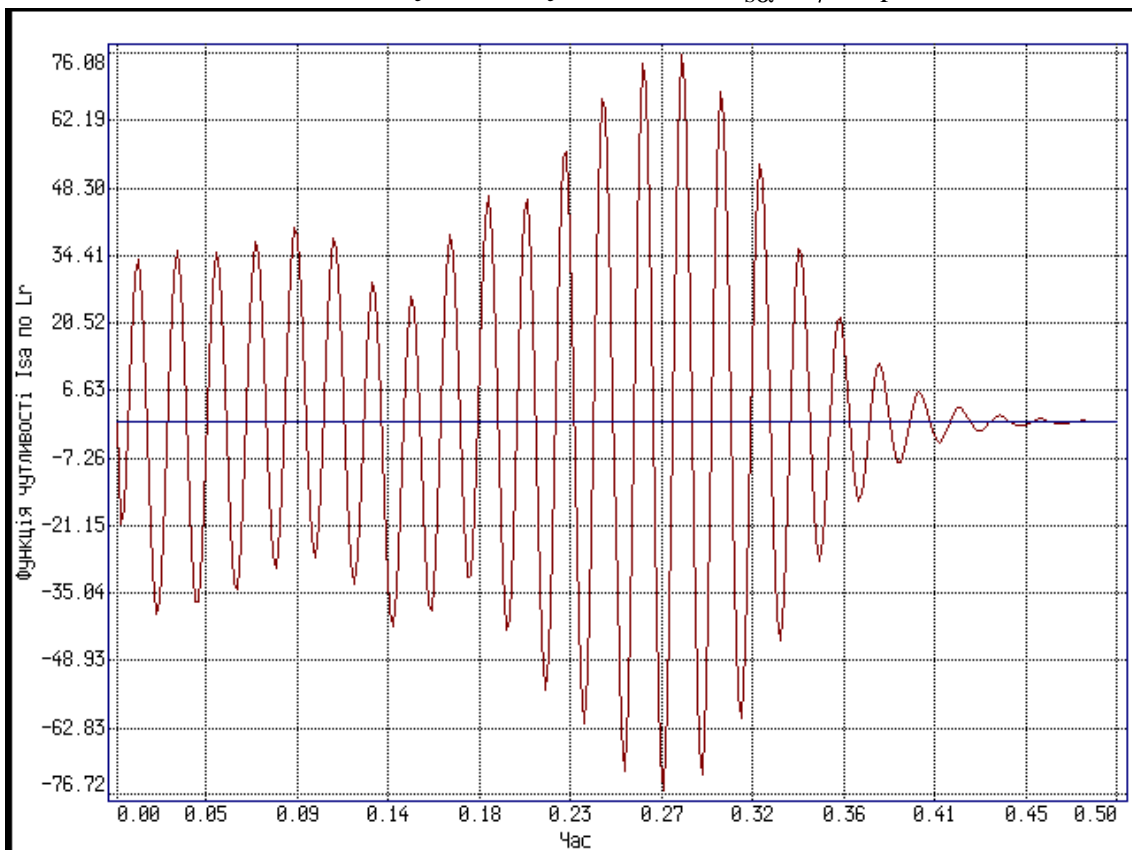


Рис. 3.2. Функція чутливості $\partial I_{s\alpha}(t)/\partial L_r$

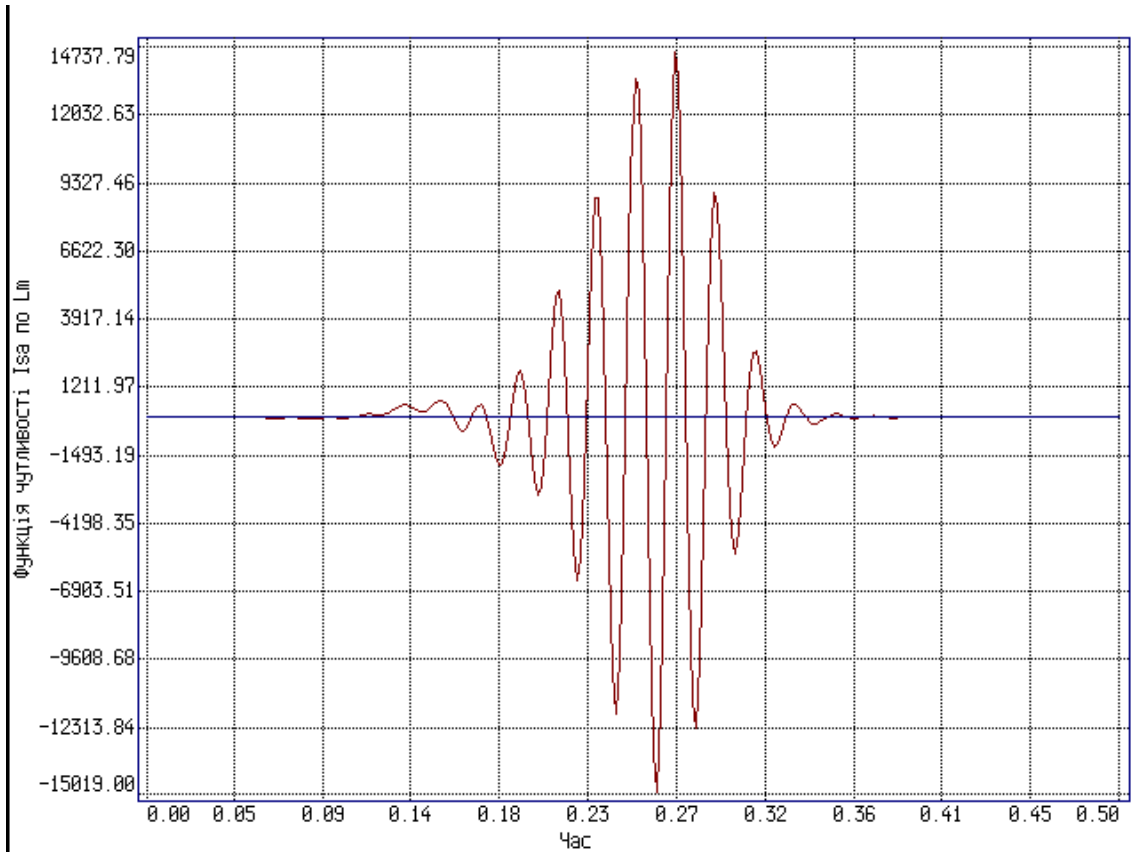


Рис. 3.3. Функція чутливості $\partial I_{sa}(t)/\partial L_m$

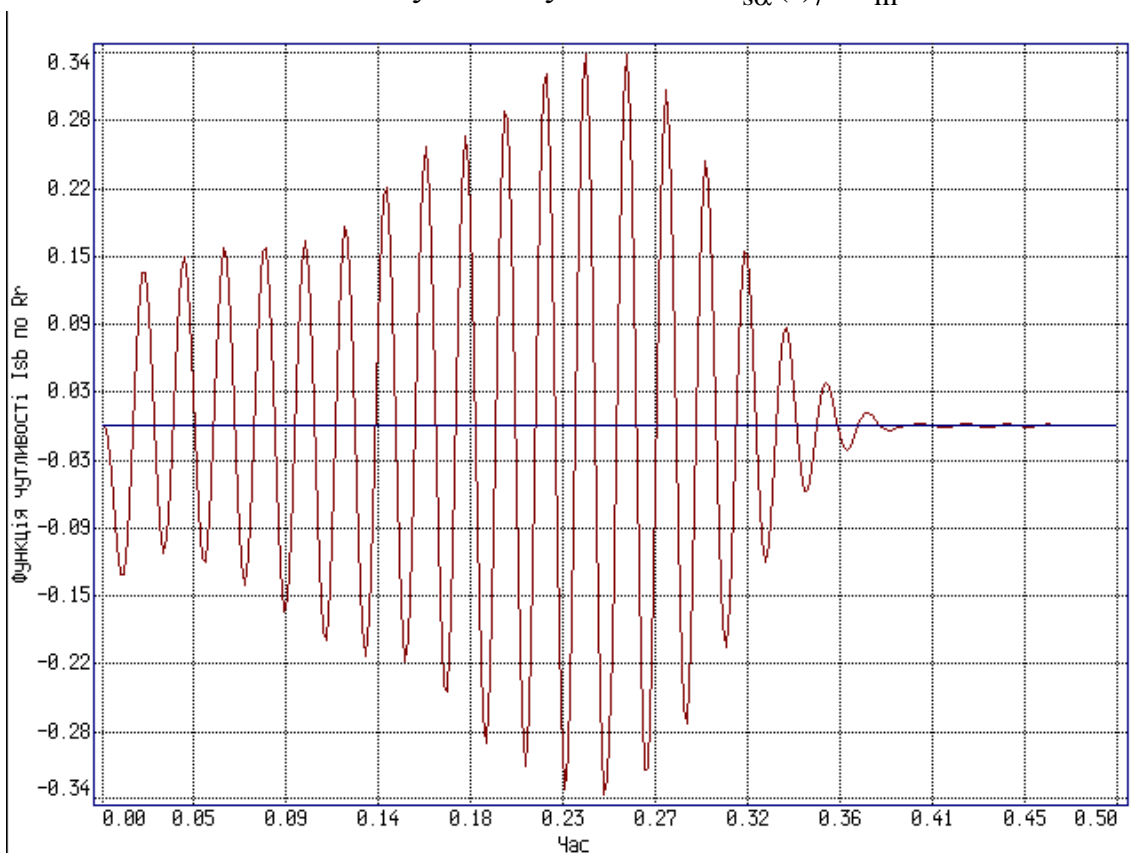


Рис. 3.4. Функція чутливості $\partial I_{sb}(t)/\partial R_r$

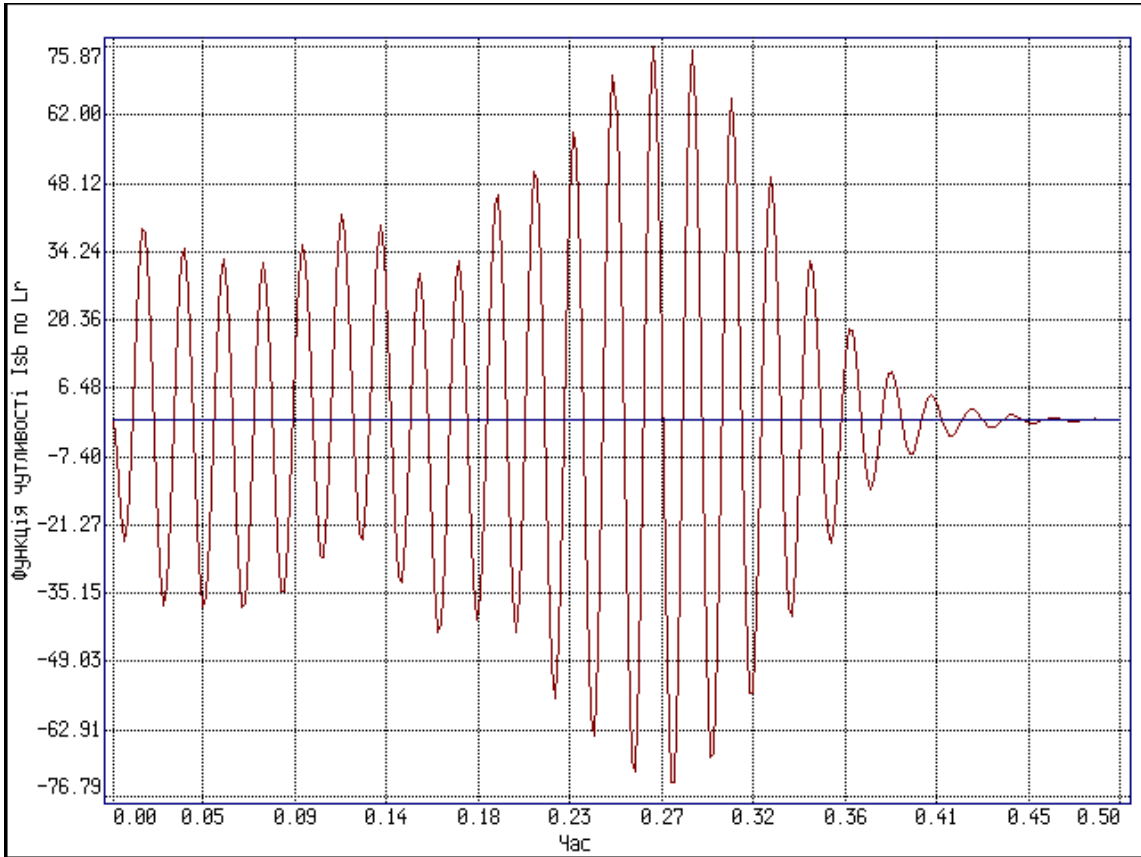


Рис. 3.5. Функція чутливості $\partial I_{s\beta}(t)/\partial L_r$

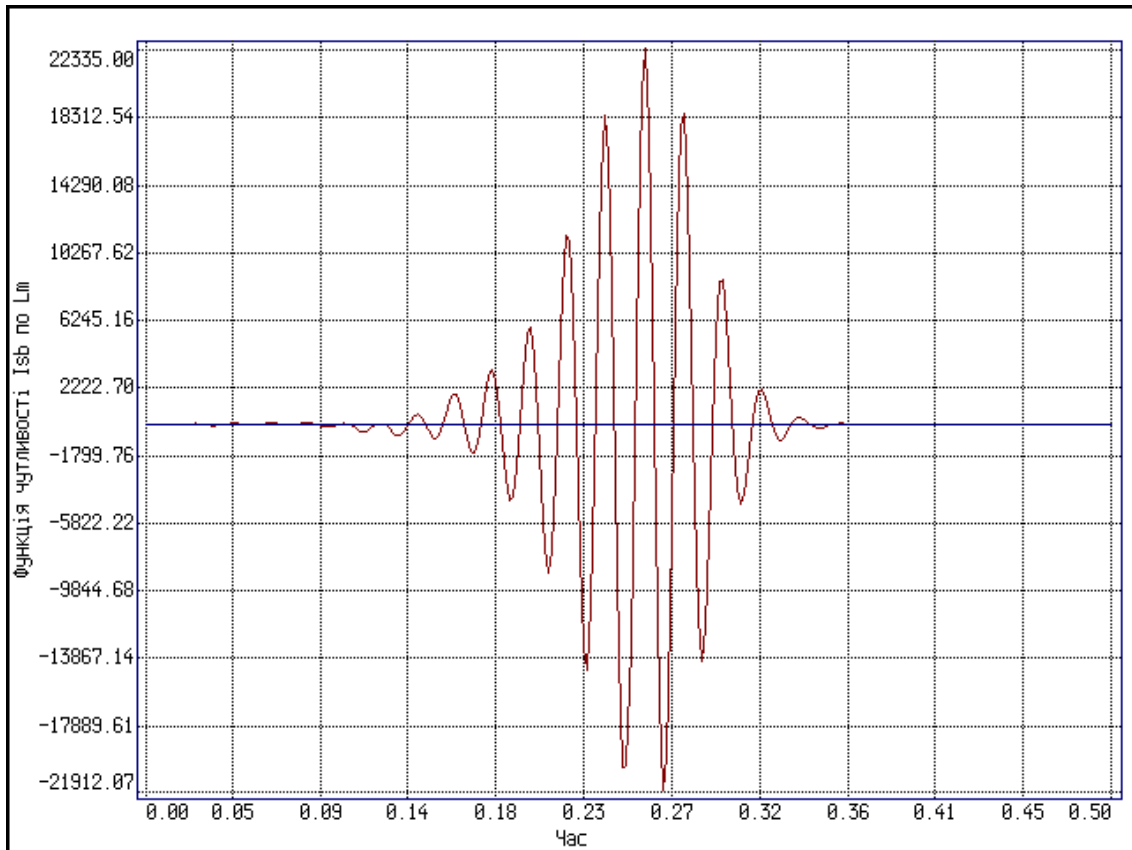


Рис. 3.6. Функція чутливості $\partial I_{s\beta}(t)/\partial L_m$

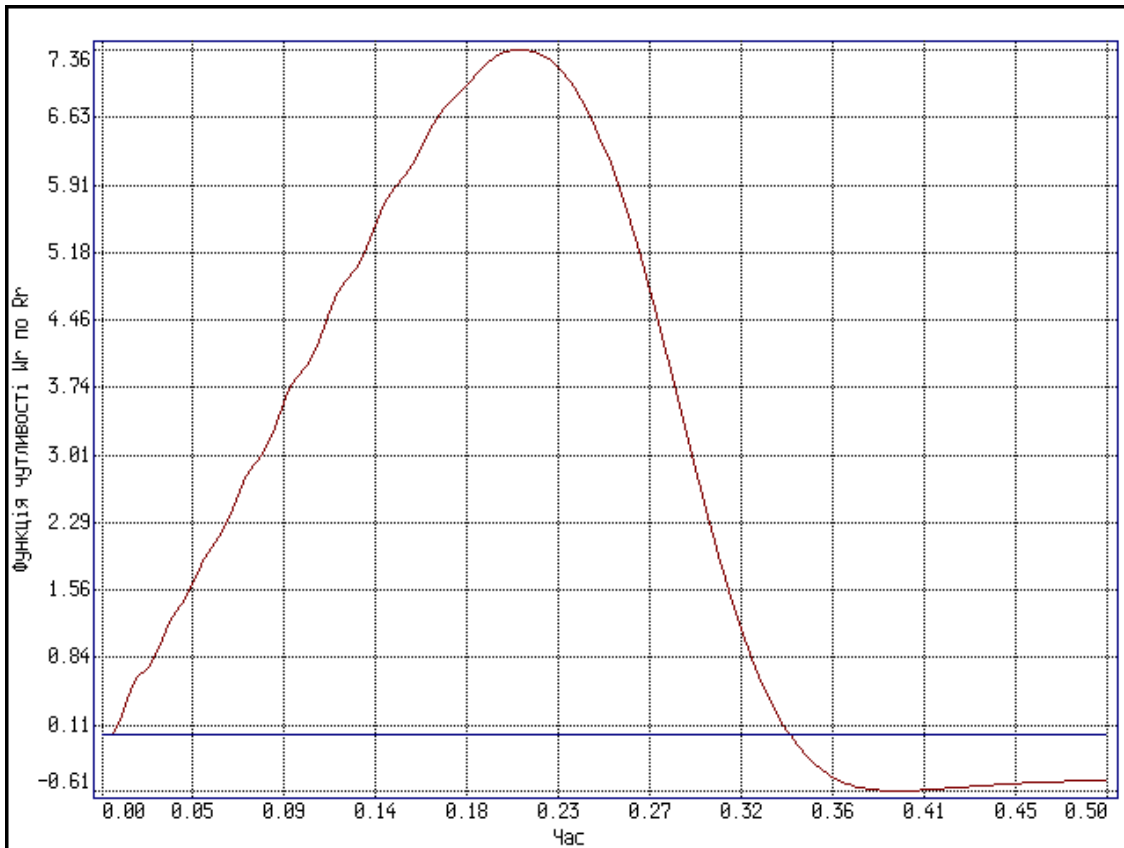


Рис. 3.7. Функція чутливості $\partial\omega_r(t)/\partial R_r$

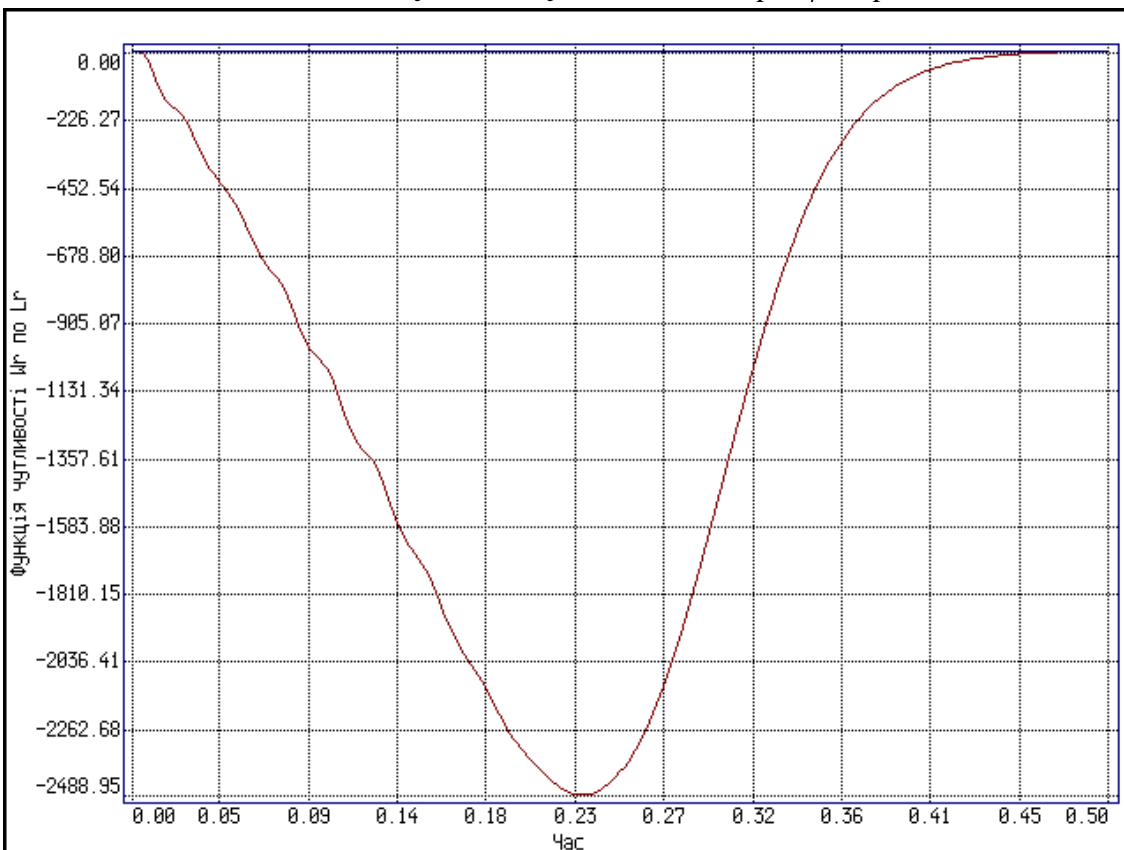


Рис. 3.8. Функція чутливості $\partial\omega_r(t)/\partial L_r$

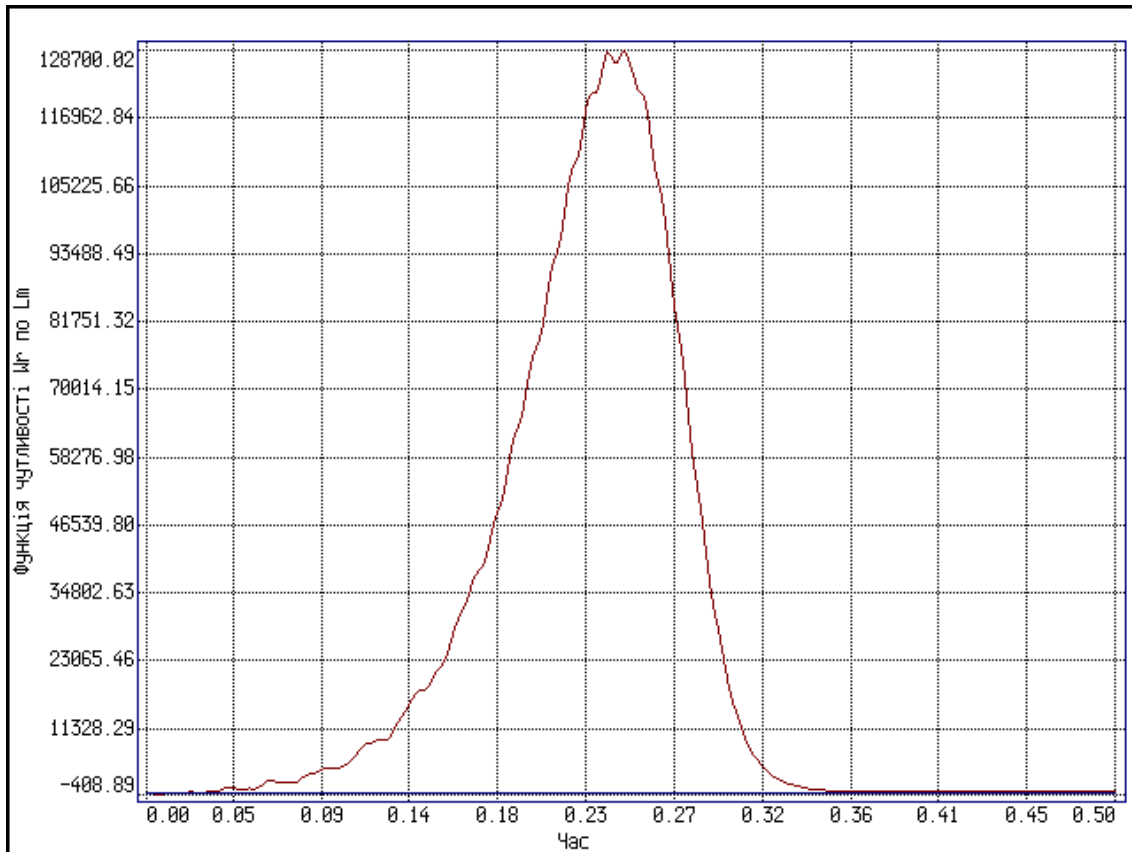


Рис. 3.9. Функція чутливості $\partial\omega_r(t)/\partial L_m$

де $I_i^H(t)$ - номінальний рух системи (1.11), який зумовлений номінальними значеннями параметрів \mathbf{A}^H ;

$u_{ij}(t)$ - функція чутливості координати $I_i(t)$ до зміни параметра A_j ;

l – розмірність вектора \mathbf{A} ;

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}^H - \mathbf{A}. \quad (3.5)$$

Функції чутливості $u_{ij}(t)$ визначаються як:

$$\frac{\partial u_{ij}(t)}{\partial t} = \sum_{\mu=1}^n \left(\frac{\partial F_1}{\partial I_{\mu}} \right)^H \cdot u_{\mu i}(t) + \left(\frac{\partial F_1}{\partial A_j} \right)^H, \quad u_{ij}(0) = 0. \quad (3.6)$$

В матричній формі запису рівняння (1.11), (3.6) будуть мати вигляд:

$$\mathbf{I}(t) = \mathbf{I}^H(t) + \mathbf{u}(t) \cdot \mathbf{a}; \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}(t)}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{I}} \cdot \mathbf{u}(t) + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{A}}; \mathbf{u}(0) = 0. \quad (3.8)$$

Номинальний рух $\mathbf{I}^H(t)$ визначиться із рівняння

$$\frac{d\mathbf{I}^H(t)}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{I}^H, \mathbf{A}^H, t), \mathbf{I}^H(0) = 0. \quad (3.9)$$

У процесі спільного розв'язання рівнянь (3.8) і (3.9) розраховується номінальний рух $\mathbf{I}^H(t)$ і матриця чутливостей $\mathbf{u}(t)$ в множині точок t_1, t_2, \dots, t_r . Далі, на основі отриманих даних про $\mathbf{I}^H(t)$, $\mathbf{u}(t)$ і результатів спостережень $\mathbf{I}(t)$ в точках t_1, t_2, \dots, t_r визначаються невідомі значення всіх компонент вектора \mathbf{a} .

Використаємо квадратичний критерій якості ідентифікації

$$Q = \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) - \sum_{j=1}^l u_{ij}(t_k) \cdot a_j \right]^2 \quad (3.10)$$

і необхідну умову мінімуму Q

$$\frac{dQ}{da_\mu} = 2 \cdot \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) - \sum_{j=1}^l u_{ij}(t_k) \cdot a_j \right] \cdot u_{i\mu}(t_k) = 0; \quad (3.11)$$

$\mu = 1, 2, \dots, l,$

де s – кількість вимірних ПД, що забезпечують можливість знаходження всіх компонент вектора \mathbf{a} із системи лінійних рівнянь

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^l \left[\sum_{k=1}^r u_{ij}(t_k) \cdot u_{i\mu}(t_k) \right] \cdot a_j = \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) \right] \cdot u_{i\mu}(t_k), \quad (3.12)$$

$\mu = 1, 2, \dots, l.$

Частинні похідні $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{I}}$, $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{A}}$ та функції чутливості розраховуються як в п. 3.1,

$$\mathbf{I} = [i_{s\alpha}; i_{s\beta}; \omega_r]^T; \mathbf{A} = [R_r; L_r; L_m]^T. \quad (3.13)$$

Система (3.12) запишеться:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left[\sum_{k=1}^r u_{ij}(t_k) \cdot u_{i\mu}(t_k) \right] \cdot a_j = \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) \right] \cdot u_{i\mu}(t_k), \quad (3.14)$$

$$\mu = 1, 2, \dots, l.$$

Після певних математичних перетворень систему рівнянь (3.14) можна записати:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i1}^2(t_k) \right] \cdot a_1 + \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i2}(t_k) \cdot u_{i1}(t_k) \right] \cdot a_2 + \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i3}(t_k) \cdot u_{i1}(t_k) \right] \cdot a_3 = \\ & = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) \right] \cdot u_{i1}(t_k); \\ & \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) \cdot u_{i2}(t_k) \right] \cdot a_1 + \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i2}^2(t_k) \right] \cdot a_2 + \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i2}(t_k) \cdot u_{i3}(t_k) \right] \cdot a_3 = \\ & = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) \right] \cdot u_{i2}(t_k); \\ & \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) \cdot u_{i3}(t_k) \right] \cdot a_1 + \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i2}(t_k) \cdot u_{i3}(t_k) \right] \cdot a_2 + \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i3}^2(t_k) \right] \cdot a_3 = \\ & = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) \right] \cdot u_{i3}(t_k). \end{aligned} \right. \quad (3.15)$$

У матричній формі систему рівнянь (3.15) можна записати:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{ccc} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i1}^2(t_k) & \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i2}(t_k) \cdot u_{i1}(t_k) & \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i3}(t_k) \cdot u_{i1}(t_k) \\ \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) \cdot u_{i2}(t_k) & \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i2}^2(t_k) & \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i2}(t_k) \cdot u_{i3}(t_k) \\ \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) \cdot u_{i3}(t_k) & \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i2}(t_k) \cdot u_{i3}(t_k) & \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r u_{i3}^2(t_k) \end{array} \right] \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) \right] \cdot u_{i1}(t_k) \\ \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) \right] \cdot u_{i2}(t_k) \\ \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^r \left[I_i(t_k) - I_i^H(t_k) \right] \cdot u_{i3}(t_k) \end{bmatrix} \quad (3.16) \end{aligned}$$

або

$$\mathbf{X} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{Y}. \quad (3.17)$$

Розв'язок системи (3.17) відносно елементів вектора \mathbf{a} матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_x = X_{3,1}X_{1,2}X_{2,3} + X_{1,1}X_{3,3}X_{2,2} + X_{1,3}X_{2,1}X_{3,2} - X_{1,1}X_{3,2}X_{2,3} - X_{1,2}X_{2,1}X_{3,3} - X_{1,3}X_{3,1}X_{2,2}; \\ a_1 = \frac{Y_2X_{1,3}X_{3,2} - X_{2,3}Y_1X_{3,2} - X_{3,3}X_{1,2}Y_2 + X_{3,3}Y_1X_{2,2} + Y_3X_{1,2}X_{2,3} - Y_3X_{1,3}X_{2,2}}{a_x}; \\ a_2 = \frac{Y_3X_{2,1}X_{1,3} - X_{2,1}Y_1X_{3,3} + X_{3,3}X_{1,1}Y_2 - X_{1,1}Y_3X_{2,3} - Y_2X_{3,1}X_{1,3} + Y_1X_{2,3}X_{3,1}}{a_x}; \\ a_3 = \frac{Y_2X_{3,1}X_{1,2} - X_{1,1}Y_2X_{3,2} - X_{1,2}X_{2,1}Y_3 + X_{1,1}Y_3X_{2,2} + Y_1X_{2,1}X_{3,2} - Y_1X_{3,1}X_{2,2}}{a_x}. \end{array} \right. \quad (3.18)$$

Реальні значення ПД розраховуються як

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^H + \mathbf{a}. \quad (3.19)$$

Із використанням розробленого математичного апарату ідентифікації можна запропонувати алгоритм ідентифікації, зображений на рис. 3.10.

Дослідження розробленого методу ідентифікації проведено за допомогою його моделювання. Алгоритм моделювання здійснено в такій послідовності:

1. Генерування значень $\mathbf{I}^H(t)$, $\mathbf{u}^H(t)$ при номінальних значеннях параметрів R_r^H , L_r^H , L_m^H .
2. Генерація (імітація вимірювань) значень $\mathbf{I}(t)$, $\mathbf{u}(t)$ при значеннях параметрів R_r , L_r , L_m із відносними відхиленнями

$$\delta_{R_r} = \frac{R_r^H - R_r}{R_r^H} \times 100\%; \delta_{L_r} = \frac{L_r^H - L_r}{L_r^H} \times 100\%; \delta_{L_m} = \frac{L_m^H - L_m}{L_m^H} \times 100\%.$$

3. Здійснення розрахунків за формулами (3.22)-(3.24) з підрахунком відносних похибок ідентифікації

$$\delta_{R_r}^i = \frac{|a_1|}{R_r} \times 100\%; \delta_{L_r}^i = \frac{|a_2|}{L_r} \times 100\%; \delta_{L_m}^i = \frac{|a_3|}{L_m} \times 100\%.$$

Дослідження алгоритму ідентифікації здійснено для ЕМ типу 4A71A4. Результати досліджень наведені на рис. 3.11 – 3.13.

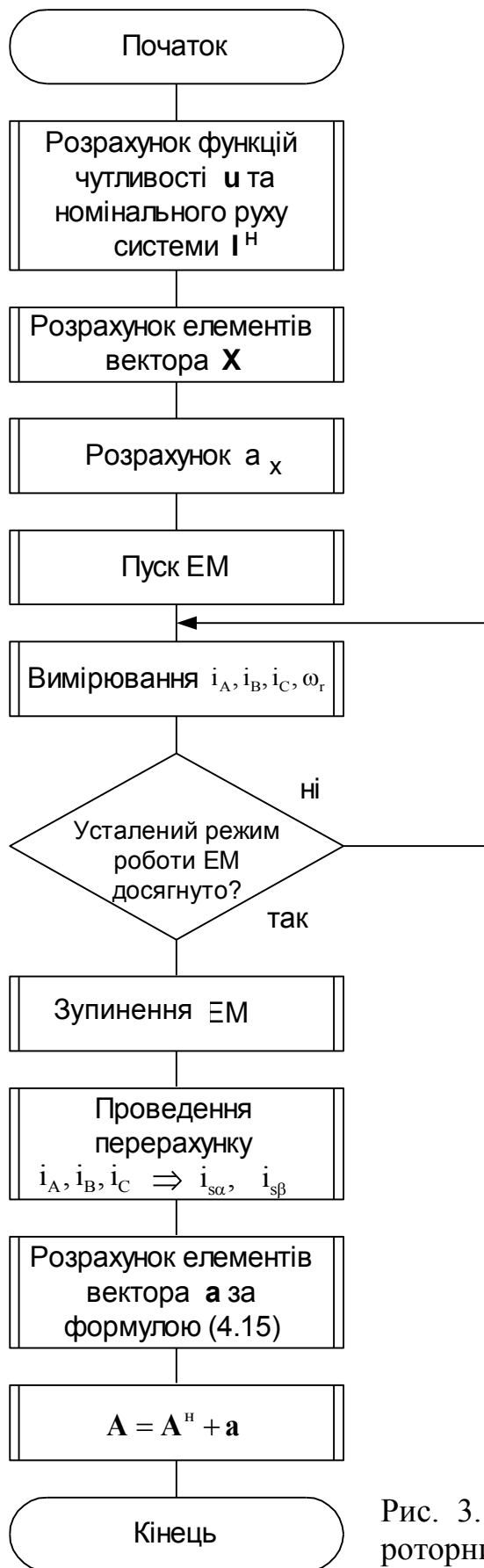


Рис. 3.10. Алгоритм ідентифікації роторних ПД ЕМ за допомогою функцій чутливості

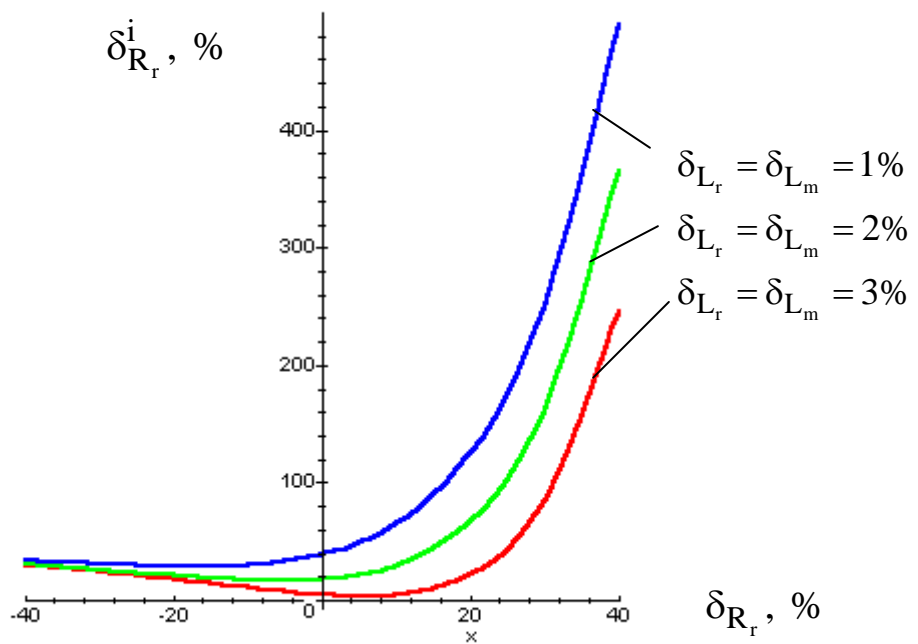


Рис. 3.11. Залежність відносної похибки ідентифікації ПД R_r $\delta_{R_r}^i$ від відносного відхилення δ_{R_r}

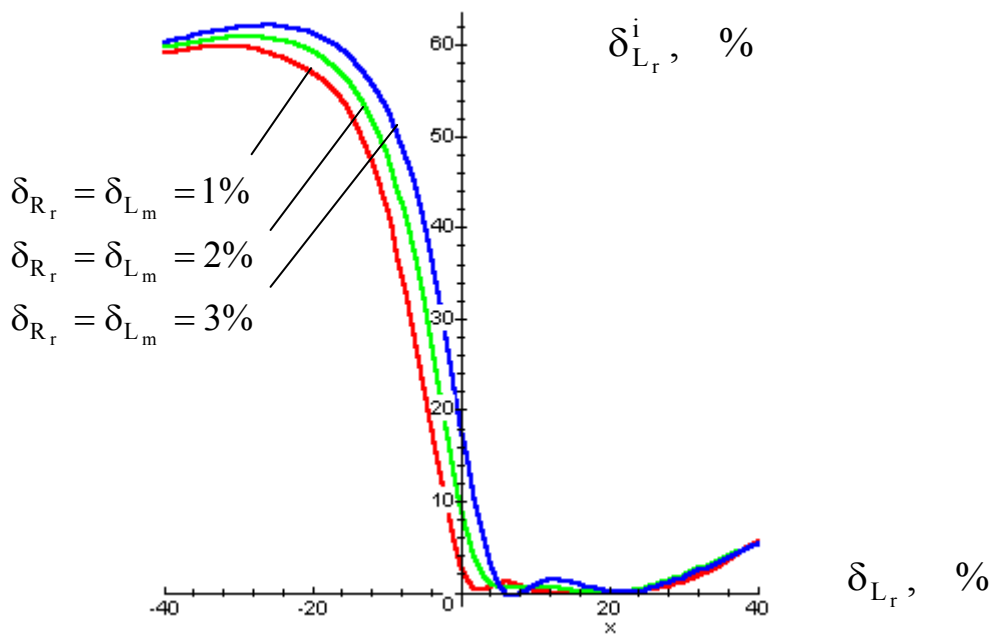


Рис. 3.12. Залежність відносної похибки ідентифікації ПД L_r $\delta_{L_r}^i$ від відносного відхилення δ_{L_r}

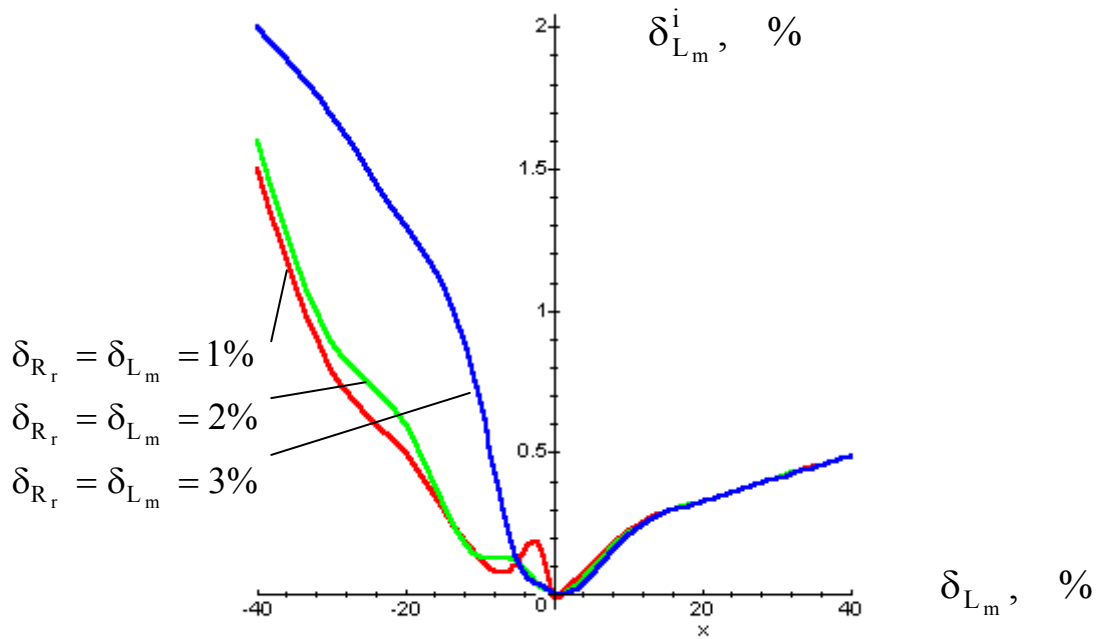


Рис. 3.13. Залежність відносної похибки ідентифікації ПД L_m $\delta_{L_m}^i$ від відносного відхилення δ_{L_m}

Аналіз результатів моделювання алгоритму ідентифікації за допомогою функцій чутливості показує:

1. Алгоритм ідентифікації працює досить швидко, оскільки в процесі ідентифікації необхідно проводити обчислення лише за формулами (3.22) – (3.24). Підрахунки $\mathbf{I}^H(t)$, $\mathbf{u}^H(t)$ здійснюються попередньо.
2. Найменшу похибку ідентифікації даний алгоритм дає при ідентифікації взаємної індуктивності L_m . Похибки ідентифікації R_r та L_r мають великі значення. Це приводить до висновку про необхідність ідентифікації параметрів R_r та L_r іншими методами ідентифікації.
3. Залежності відносних похибок ідентифікації від відносних відхилень параметрів носять суттєво нелінійний характер. Це пояснюється мультимодальністю цільової функції ідентифікації і великою жорсткістю математичної моделі ЕМ.

3.2.2. Ідентифікація роторних параметрів діагностування електромоторів за допомогою методу інваріантного поглиблення Н.Дістефано

Припустимо, що проведені спостереження однієї чи кількох компонент вектора стану \mathbf{I} протягом часу T , які вміщують похибки. Для цих спостережень і динамічних рівнянь процесу

$$\frac{d\mathbf{I}}{dT} = \mathbf{g}(\mathbf{I}). \quad (3.20)$$

Слідуючи Н.Дістефано [176], визначимо:

- оптимальну оцінку стану в час t ;
- поліпшення цієї оцінки в міру збільшення кількості спостережень.

Якщо $t < T$, то задача називається інтерполяцією або згладжуванням. При $t = T$ вона називається задачею фільтрування, а коли $t > T$ – задачею передбачення.

В задачах ідентифікації, де основна мета полягає у визначенні набору констант a_i , зручно оперувати з цими константами як з додатковими координатами стану, які задовольняють очевидним диференціальним рівнянням

$$\frac{da_i}{dt} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (3.21)$$

Тоді константи a_i можна включити в розширений вектор стану. Ясно, що фільтр розширеного вектора стану дає не тільки оптимальну оцінку вектору стану, а й оптимальну оцінку вектора \mathbf{a} – основну мету ідентифікації. Слідуючи Беллману [177], розв'язується задача фільтрування, використовуючи ідеї інваріантного поглиблення. Визначимо вектор спостережень \mathbf{w} :

$$\mathbf{w} = [w_1; w_2; w_3; w_4]^T = [i_A; i_B; i_C; \omega_r]^T = \mathbf{\Gamma}\mathbf{I} + \boldsymbol{\eta}, \quad (3.22)$$

де $\mathbf{\Gamma}$ - прямокутна матриця повного рангу;

$\boldsymbol{\eta}$ - вектор похибок спостережень.

На основі цих спостережень в інтервалі $[0; T]$ визначається оптимальна оцінка вектора стану \mathbf{I} при $t = T$ така, щоб мінімізувати функцію квадратичної похибки $f(\mathbf{I}(T), T)$, задану у вигляді

$$f(\mathbf{I}(T), T) = \int_0^T (\mathbf{w} - \Gamma \mathbf{I}, \mathbf{w} - \Gamma \mathbf{I}) dt + (\mathbf{I}(0) - \mathbf{b}, -\Lambda(\mathbf{I}(0) - \mathbf{b})), \quad (3.23)$$

де \mathbf{b} - найкраща апріорна оцінка $\mathbf{I}(0)$;

Λ - невироджена матриця, яка встановлює міру впевненості у даній оцінці.

Згідно [176], мінімізація (3.23) досягається при розв'язанні диференціальних рівнянь оптимального нелінійного фільтру

$$\frac{d\mathbf{e}}{dT} = \mathbf{g}(\mathbf{e}) + \mathbf{Q}(T)\Gamma^T(\mathbf{w} - \Gamma\mathbf{e}); \quad \mathbf{e}(0) = \mathbf{b}, \quad (3.24)$$

а матриця коригуючих коефіцієнтів $\mathbf{Q}(T)$ задовольняє рівнянню

$$\frac{d\mathbf{Q}}{dT} = \mathbf{g}_c(\mathbf{e})\mathbf{Q} + \mathbf{Q}\mathbf{g}_c^T(\mathbf{e}) - \mathbf{Q}\Gamma^T\Gamma\mathbf{Q}; \quad \mathbf{Q}(0) = \Lambda^{-1}, \quad (3.25)$$

де $\mathbf{c} = \mathbf{I}(T)$;

$\mathbf{e} = \arg \min f(\mathbf{c}, T)$;

$\mathbf{g}_c(\mathbf{e})$ - якобіан $\mathbf{g}(\mathbf{e})$ по \mathbf{c} ;

“Т зверху” – знак транспонування.

Задача ідентифікації за Н.Дістефано зводиться до розв'язання системи із двох диференціальних рівнянь (3.24) і (3.25).

Виведемо рівняння для похибки фільтра Н.Дістефано [178]. Позначимо через $\tilde{\mathbf{I}} = \mathbf{I} - \mathbf{e}$ похибку оцінки фільтра. Підставимо в рівняння (3.24) замість вектора спостережень \mathbf{w} його вираз (3.22) і вирахуємо з рівняння (3.20) рівняння (3.24). Тоді похибка оцінки фільтра $\tilde{\mathbf{I}}$ має таку динаміку

$$\frac{d\tilde{\mathbf{I}}}{dT} = -\mathbf{Q}(T)\Gamma^T\Gamma\tilde{\mathbf{I}} + \mathbf{g}(\mathbf{I}) - \mathbf{g}(\mathbf{e}) - \mathbf{Q}(T)\Gamma^T\boldsymbol{\eta}(T) \quad (3.26)$$

з нульовою початковою умовою, оскільки $\mathbf{e}(0) = \mathbf{b} \cong \mathbf{I}(0)$.

Лінеаризуючи вектор-функцію \mathbf{g} в точці \mathbf{e} в рівнянні (3.26), приходимо до виразу

$$\frac{d\tilde{\mathbf{I}}}{dT} = -\left[\mathbf{Q}(T)\Gamma^T\Gamma - \mathbf{g}_c(\mathbf{e})\right]\tilde{\mathbf{I}} - \mathbf{Q}(T)\Gamma^T\boldsymbol{\eta}(T). \quad (3.27)$$

Загальний розв'язок рівняння (3.26) має вигляд:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \int_0^T \mathbf{X}(T)\mathbf{X}^{-1}(S)\mathbf{Q}(S)\mathbf{\Gamma}^T \boldsymbol{\eta}(S)dS, \quad (3.28)$$

де $\mathbf{X}(T)$ - розв'язок рівняння

$$\frac{d\mathbf{X}(T)}{dT} = -\left[\mathbf{Q}(T)\mathbf{\Gamma}^T \mathbf{\Gamma} - \mathbf{g}_c(\mathbf{e})\right]\mathbf{X}(T). \quad (3.29)$$

Таким чином, задача ідентифікації ПД з одночасним знаходженням похибки ідентифікації за Н.Дістефано полягає у розв'язанні системи рівнянь (3.24), (3.25), (3.28), (3.29) [179-180].

Ідентифікацію за допомогою методу інваріантного поглиблення будемо проводити для параметрів R_r і L_r ; параметр L_m добре ідентифікується за допомогою методу, описаного в п. 3.4.1.

Представимо математичну модель ЕМ (1.11) у формі Коші

$$\mathbf{A} \frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{B}\mathbf{i} + \mathbf{u}_m, \quad (3.30)$$

де

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_m & -R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & 0 & \omega_r L_r & -R_r \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{i} = [i_{s\alpha}; i_{s\beta}; i_{r\alpha}; i_{r\beta}]^T; \quad \mathbf{u}_m = [u_{s\alpha}; u_{s\beta}; u_{r\alpha}; u_{r\beta}]^T.$$

Зворотна матриця \mathbf{A}^{-1} матиме вигляд:

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} & 0 & \frac{-L_m}{L_s L_r - L_m^2} & 0 \\ 0 & \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} & 0 & \frac{-L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ \frac{-L_m}{L_s L_r - L_m^2} & 0 & \frac{L_s}{L_s L_r - L_m^2} & 0 \\ 0 & \frac{-L_m}{L_s L_r - L_m^2} & 0 & \frac{L_s}{L_s L_r - L_m^2} \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

Помножимо рівняння (3.30) на \mathbf{A}^{-1} :

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{i} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}_m, \quad (3.32)$$

де

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \times \begin{bmatrix} -L_r R_s & L_m^2 \omega_r & L_m R_r & L_m L_r \omega_r \\ -L_m^2 \omega_r & -L_r R_s & -L_m L_r \omega_r & L_m R_r \\ L_m R_s & -L_s L_m \omega_r & -L_s R_r & -L_s L_r \omega_r \\ L_s L_m \omega_r & L_m R_s & L_s L_r \omega_r & -L_s R_r \end{bmatrix}.$$

Для короткозамкненого асинхронного ЕМ $u_{r\alpha} = u_{r\beta} = 0$. Тоді $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}_m$ запишеться:

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}_m = \begin{bmatrix} \frac{L_r u_{s\alpha}}{L_s L_r - L_m^2} \\ \frac{L_r u_{s\beta}}{L_s L_r - L_m^2} \\ \frac{-L_m u_{s\alpha}}{L_s L_r - L_m^2} \\ \frac{-L_m u_{s\beta}}{L_s L_r - L_m^2} \end{bmatrix}. \quad (3.33)$$

Розширимо вектор стану \mathbf{u} п'ятим рівнянням математичної моделі ЕМ (1.11) та параметрами R_r і L_r :

$$\mathbf{u} = [u_1; u_2; u_3; u_4; u_5; u_6; u_7]^T = [i_{s\alpha}; i_{s\beta}; i_{r\alpha}; i_{r\beta}; \omega_r; R_r; L_r]^T, \quad \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{g}(\mathbf{u}, u_{s\alpha}, u_{s\beta}), \quad \mathbf{u} \in \mathfrak{R}^7, \quad \mathbf{g}: \mathfrak{R}^7 \times \mathfrak{R}^7 \rightarrow \mathfrak{R}^7, \quad (3.34)$$

де \mathbf{g} - така вектор-функція:

$$g_1 = \frac{-L_s R_s u_1 + L_m^2 u_5 u_2 + L_m u_6 u_3 + L_m u_7 u_5 u_4 + u_7 u_{s\alpha}}{L_s u_7 - L_m^2};$$

$$\begin{aligned}
g_2 &= \frac{-L_m^2 u_5 u_1 - u_7 R_s u_2 - L_m u_7 u_5 u_3 + L_m u_6 u_4 + u_7 u_{s\beta}}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_3 &= \frac{L_m R_s u_1 - L_s L_m u_5 u_2 - L_s u_6 u_3 - L_s u_7 u_5 u_4 - L_m u_{s\alpha}}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_4 &= \frac{L_s L_m u_5 u_1 + L_m R_s u_2 + L_s u_7 u_5 u_3 - L_s u_6 u_4 - L_m u_{s\beta}}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_5 &= \frac{p}{J} \left(\frac{mp}{2} L_m (u_2 u_3 - u_1 u_4) - M_0 \right); \quad g_6 = g_7 = 0.
\end{aligned}$$

Найдемо елементи матриці \mathbf{g}_c :

$$\begin{aligned}
g_{c1,1} &= \frac{\partial g_1}{\partial u_1} = \frac{-L_s R_s}{L_s u_7 - L_m^2}; \quad g_{c1,2} = \frac{\partial g_1}{\partial u_2} = \frac{L_m^2 u_5}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c1,3} &= \frac{\partial g_1}{\partial u_3} = \frac{L_m u_6}{L_s u_7 - L_m^2}; \quad g_{c1,4} = \frac{\partial g_1}{\partial u_4} = \frac{L_m u_7 u_5}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c1,5} &= \frac{\partial g_1}{\partial u_5} = \frac{L_m (u_2 L_m + u_7 u_4)}{L_s u_7 - L_m^2}; \quad g_{c1,6} = \frac{\partial g_1}{\partial u_6} = \frac{L_m u_3}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c1,7} &= \frac{\partial g_1}{\partial u_7} = -\frac{L_m^3 u_5 u_4 + u_{s\alpha} L_m^2 - L_s^2 R_s u_1 + L_s L_m^2 u_5 u_2 + L_s L_m u_6 u_3}{(L_s u_7 - L_m^2)^2}; \\
g_{c2,1} &= \frac{\partial g_2}{\partial u_1} = \frac{L_m^2 u_5}{L_s u_7 - L_m^2}; \quad g_{c2,2} = \frac{\partial g_2}{\partial u_2} = \frac{-u_7 R_s}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c2,3} &= \frac{\partial g_2}{\partial u_3} = \frac{-L_m u_7 u_5}{L_s u_7 - L_m^2}; \quad g_{c2,4} = \frac{\partial g_2}{\partial u_4} = \frac{L_m u_6}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c2,5} &= \frac{\partial g_2}{\partial u_5} = \frac{-L_m (u_1 L_m + u_7 u_3)}{L_s u_7 - L_m^2}; \quad g_{c2,6} = \frac{\partial g_2}{\partial u_6} = \frac{L_m u_4}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c2,7} &= \frac{\partial g_2}{\partial u_7} = \frac{L_m (R_s u_2 L_m + L_m^2 u_5 u_3 - L_m u_{s\beta} + L_s L_m u_5 u_1 - L_s u_6 u_4)}{(L_s u_7 - L_m^2)^2}; \\
g_{c3,1} &= \frac{\partial g_3}{\partial u_1} = \frac{L_m R_s}{L_s u_7 - L_m^2}; \quad g_{c3,2} = \frac{\partial g_3}{\partial u_2} = \frac{-L_s L_m u_5}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c3,3} &= \frac{\partial g_3}{\partial u_3} = \frac{-L_s u_6}{L_s u_7 - L_m^2}; \quad g_{c3,4} = \frac{\partial g_3}{\partial u_4} = \frac{-L_s u_7 u_5}{L_s u_7 - L_m^2};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_{c3,5} &= \frac{\partial g_3}{\partial u_5} = \frac{-L_s(u_2 L_m + u_7 u_4)}{L_s u_7 - L_m^2}; & g_{c3,6} &= \frac{\partial g_3}{\partial u_6} = \frac{-L_s u_3}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c3,7} &= \frac{\partial g_3}{\partial u_7} = \frac{L_s(u_5 u_4 L_m^2 - L_m R_s u_1 + L_s L_m u_5 u_2 + L_s u_6 u_3 + L_m u_{s\alpha})}{(L_s u_7 - L_m^2)^2}; \\
g_{c4,1} &= \frac{\partial g_4}{\partial u_1} = \frac{L_s L_m u_5}{L_s u_7 - L_m^2}; & g_{c4,2} &= \frac{\partial g_4}{\partial u_2} = \frac{L_m R_s}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c4,3} &= \frac{\partial g_4}{\partial u_3} = \frac{L_s u_7 u_5}{L_s u_7 - L_m^2}; & g_{c4,4} &= \frac{\partial g_4}{\partial u_4} = \frac{-L_s u_6}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c4,5} &= \frac{\partial g_4}{\partial u_5} = \frac{L_s(u_1 L_m + u_7 u_3)}{L_s u_7 - L_m^2}; & g_{c4,6} &= \frac{\partial g_4}{\partial u_6} = \frac{-L_s u_4}{L_s u_7 - L_m^2}; \\
g_{c4,7} &= \frac{\partial g_4}{\partial u_7} = -\frac{L_s(u_5 u_3 L_m^2 + L_m L_s u_1 u_5 + R_s L_m u_2 - L_s u_6 u_4 - L_m u_{s\beta})}{(L_s u_7 - L_m^2)^2}; \\
g_{c5,1} &= \frac{\partial g_5}{\partial u_1} = -\frac{1}{2} \frac{p^2 m}{J} L_m u_4; & g_{c5,2} &= \frac{\partial g_5}{\partial u_2} = \frac{1}{2} \frac{p^2 m}{J} L_m u_3; \\
g_{c5,3} &= \frac{\partial g_5}{\partial u_3} = \frac{1}{2} \frac{p^2 m}{J} L_m u_2; & g_{c5,4} &= \frac{\partial g_5}{\partial u_4} = -\frac{1}{2} \frac{p^2 m}{J} L_m u_1.
\end{aligned}$$

Інші елементи матриці \mathbf{g}_c дорівнюють нулю.

Запишемо для рівняння (3.27) матрицю повного рангу Γ . Для цього використаємо рівняння переходу із системи координат α, β, θ в реальну систему координат [14]:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким чином, задача ідентифікації за допомогою методу інваріантного поглиблення Н.Дістефано зводиться до розв'язання системи із трьох диференціальних рівнянь (3.24), (3.25), (3.28), (3.29). Але ці рівняння мають складний матричний вигляд, що робить практично неможливим їх спрощення. Згідно [181], розв'язання систем диференціальних матричних рівнянь зводиться до розв'язання системи дифере-

нціальних рівнянь відносно елементів матриць. Тобто, розв'язання системи диференціальних рівнянь нелінійного фільтру Н.Дістефано відносно матричних змінних розмірністю (7×1) , (7×7) та (7×1) відповідно зводиться до розв'язання системи із $(7 \times 1) + (7 \times 7) + (7 \times 1) = 63$ диференціальних рівнянь. Проте конкретний вигляд цих рівнянь невідомий, тому необхідно в процесі розрахунків обчислювати праву частину системи рівнянь (3.24), (3.25), (3.28), (3.29) у матричному вигляді, потім елементи матриці правої частини розподіляти за відповідними рівняннями.

Розв'язання системи (3.24), (3.25), (3.28), (3.29) може здійснюватися методом Рунге-Кутта четвертого порядку з постійним кроком h . Суть його полягає в циклічних розрахунках $I_{j(i+1)}$ на кожному кроку за формулами:

$$\begin{aligned} K_{1j} &= hF_j(t_i, I_{ji}); \quad K_{2j} = hF_j\left(t_i + \frac{h}{2}, I_{ji} + \frac{K_{1j}}{2}\right); \\ K_{3j} &= hF_j\left(t_i + \frac{h}{2}, I_{ji} + \frac{K_{2j}}{2}\right); \quad K_{4j} = hF_j(t_i + h, I_{ji} + K_{3j}); \\ I_{j(i+1)} &= I_{ji} + (K_{1j} + 2K_{2j} + 2K_{3j} + K_{4j})/6, \end{aligned}$$

де F_j - права частина кожного із рівнянь.

На рис. 3.14 зображено розроблений алгоритм проведення ідентифікації параметрів R_r і L_r за допомогою методу інваріантного поглиблення. Для спрощення опису алгоритму в ньому використовуються векторні змінні та константи, які використані при розробці математичного апарату, а також: i – крок інтегрування; $T_{\text{поч}}$ – початковий момент часу; $T_{\text{кін}}$ – кінцевий момент часу; \mathbf{Z} – вектор правих частин; \mathbf{S} , \mathbf{N} , \mathbf{M} – допоміжні матриці; ε - похибка ідентифікації; $\varepsilon_{\text{зад}}$ – задана похибка.

Для чисельного дослідження алгоритму ідентифікації вибрано ЕМ 4A71A4 із параметрами $p=2$, $m=3$, $R_s=16.39$ Ом, $R_r=15.08$ Ом, $L_s=0.663$ Гн, $L_r=0.7015$ Гн, $L_m=0.624$ Гн, $J=0.011$ кГм². Шум η моделюється випадковою величиною з нормальним законом розподілу. Приклад роботи алгоритму ідентифікації наведено на рис. 3.15 – 3.19.

Аналіз результатів моделювання дає змогу дійти висновку, що даний алгоритм ідентифікації забезпечує збіжність і достатню точність для досить широкого діапазону початкових значень параметрів ротора. Але для його успішної роботи необхідний досить малий крок дискретизації по часу. Збіжність алгоритму залежить від вибору початкових значень. Це спричинюється тим, що математична модель ЕМ класифікується як жорстка система диференціальних рівнянь.

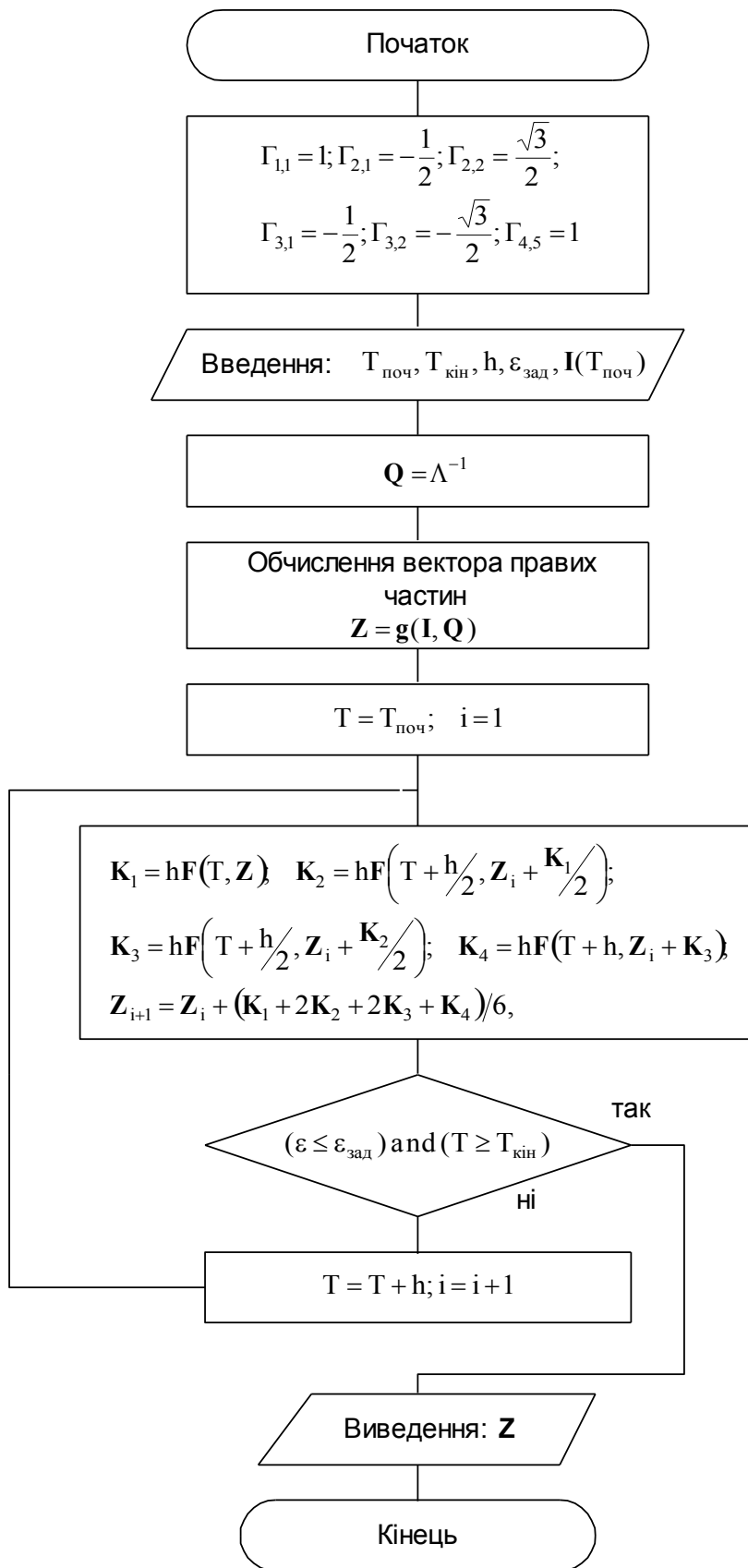


Рис. 3.14, а. Узагальнений алгоритм ідентифікації параметрів ротора за методом інваріантного поглиблення

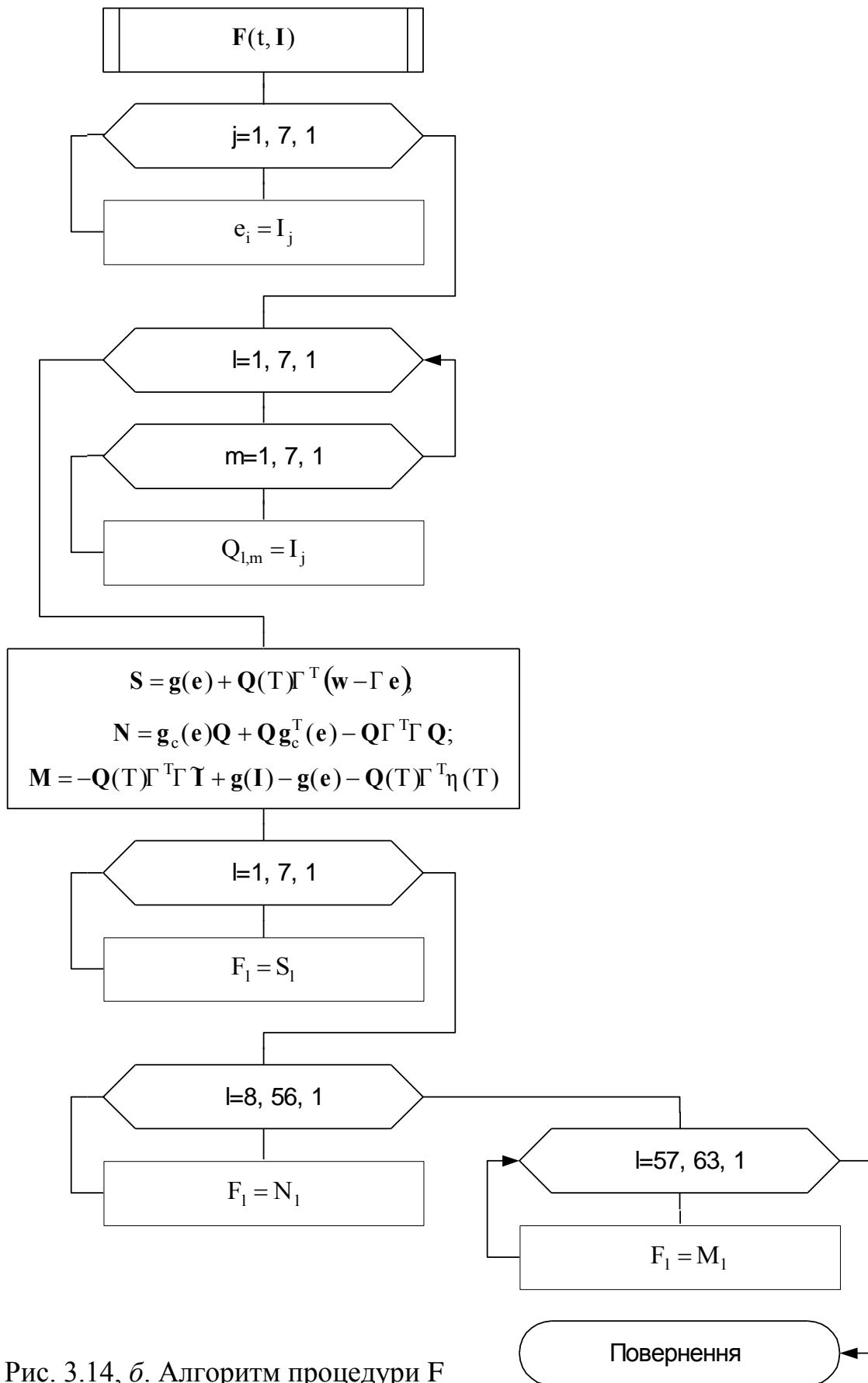


Рис. 3.14, б. Алгоритм процедури F

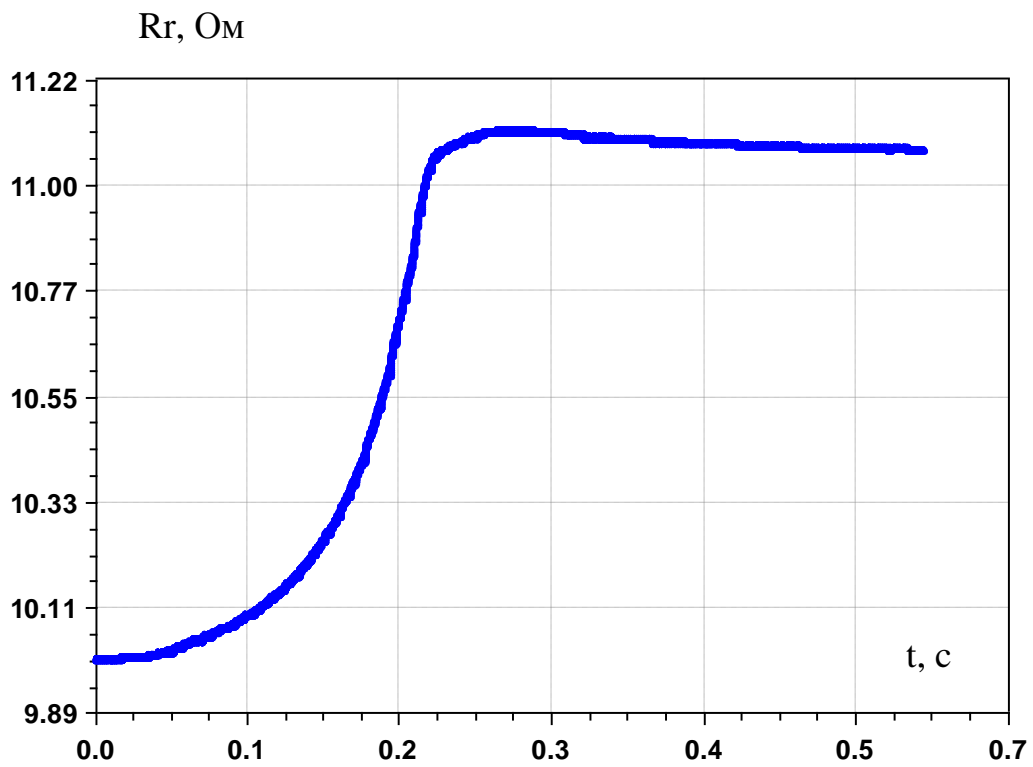


Рис. 3.15. Ідентифікація активного опору R_r

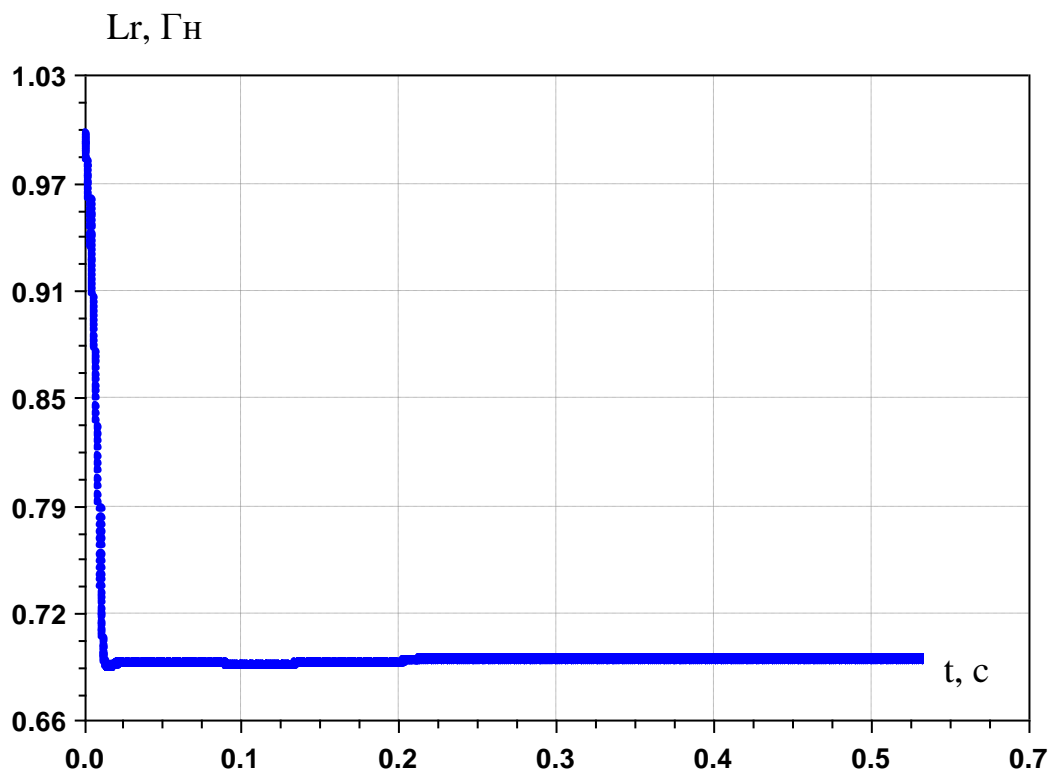


Рис. 3.16. Ідентифікація індуктивності L_r

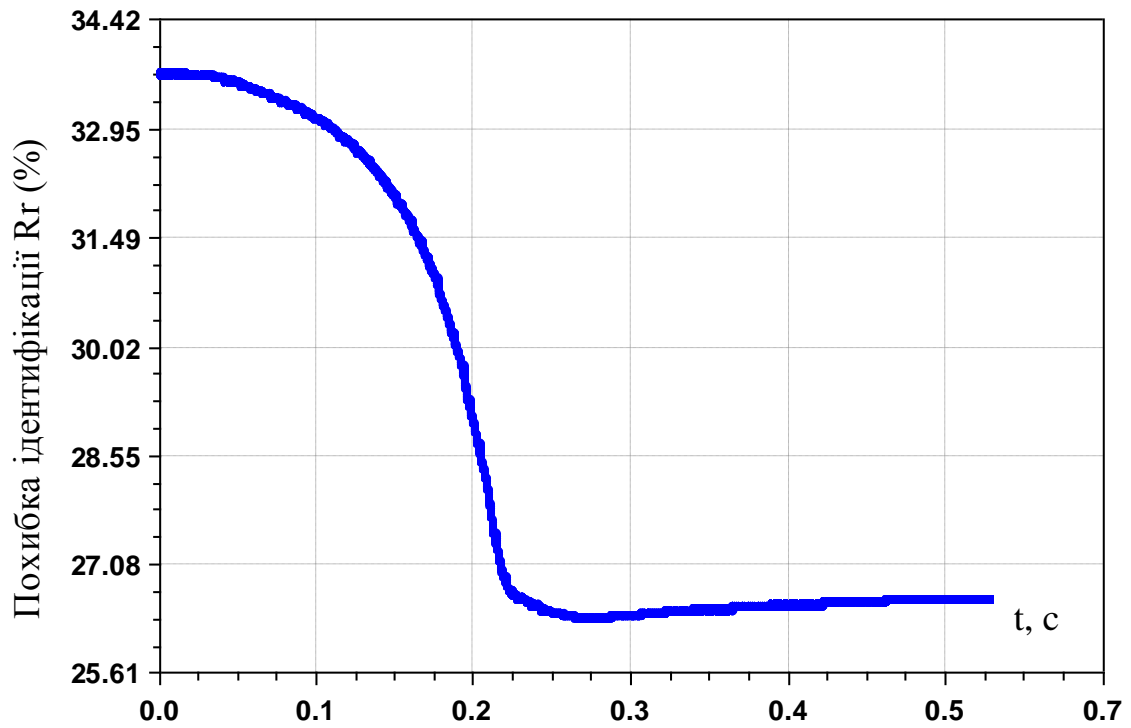


Рис. 3.17. Похибка ідентифікації опору R_r

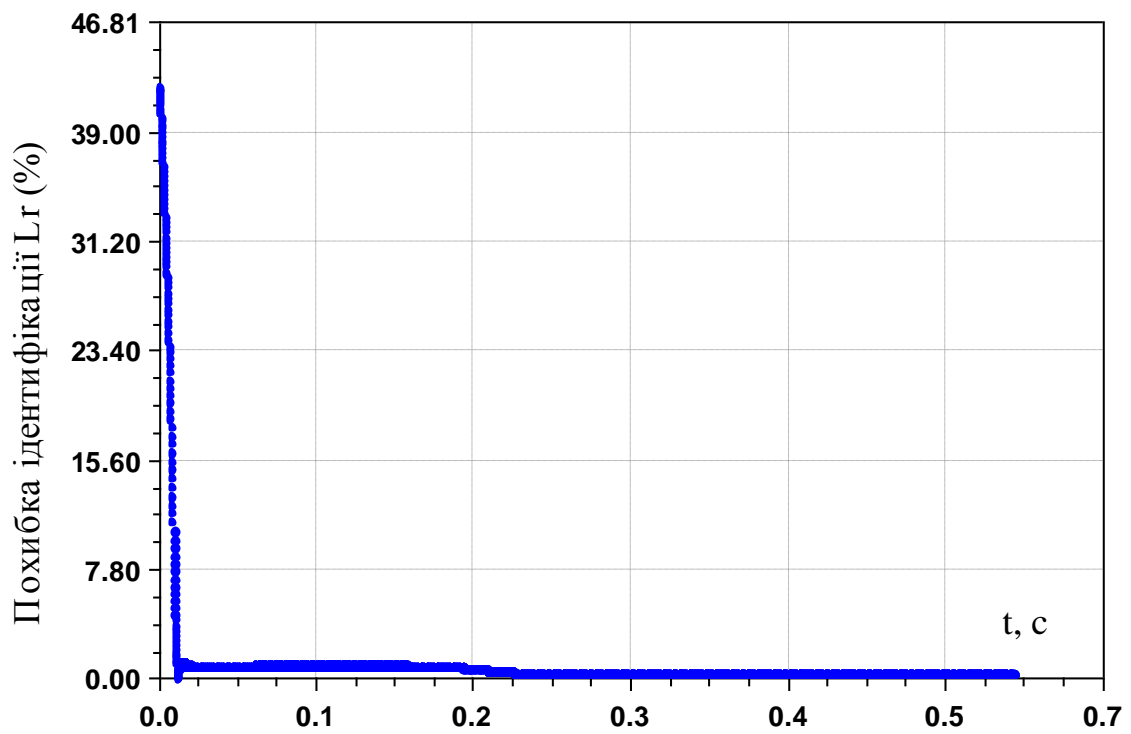


Рис. 3.18. Похибка ідентифікації індуктивності L_r

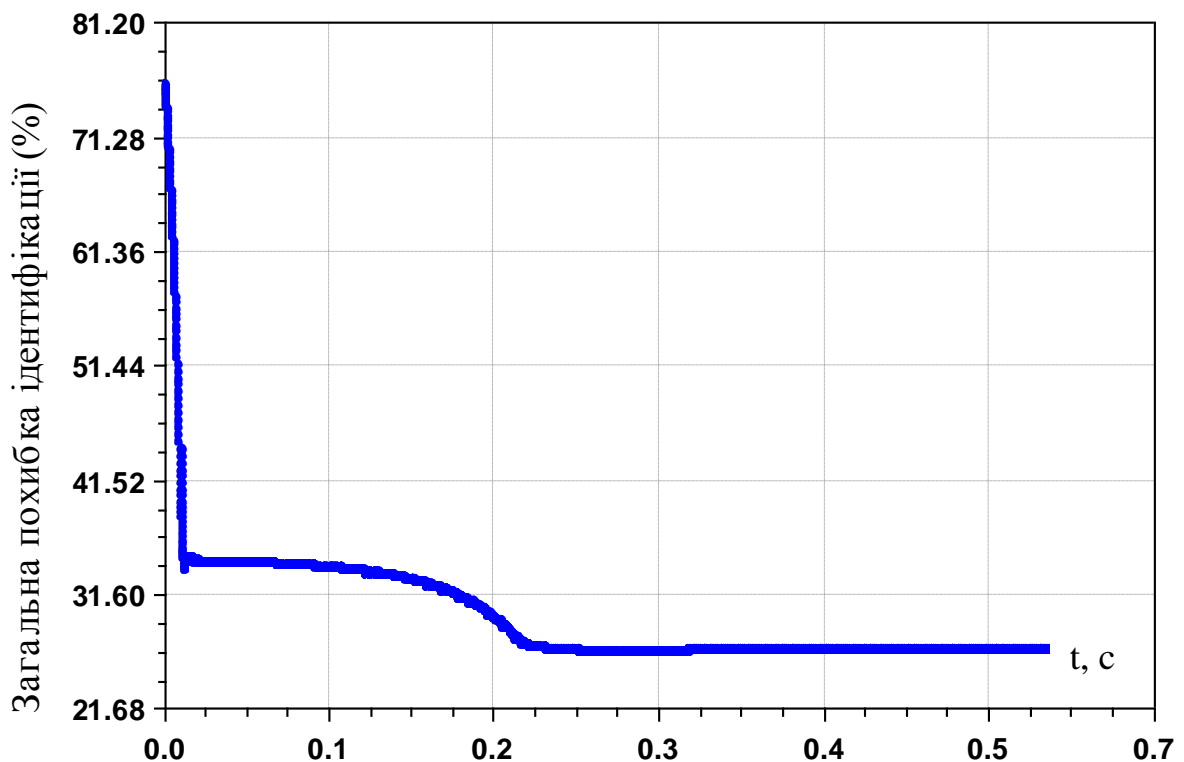


Рис. 3.19. Сумарна похибка ідентифікації

За аналізом результатів ідентифікації параметрів діагностування роторного кола за допомогою функцій чутливості та методу інваріантного поглиблення, а також результатів досліджень, викладених у розділах 2 і 3, запропоновано узагальнений метод ідентифікації параметрів діагностування електродвигунів в динамічному режимі та алгоритм його роботи, наведений на рис. 3.20.

Спочатку проводиться пуск ЕМ і в динамічному режимі вимірюються струми в обмотках статора $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$, напруги на обмотках статора $U_A(t)$, $U_B(t)$, $U_C(t)$ і кутова швидкість $\omega_{rп}(t)$. По закінченні перехідного процесу ЕМ вимикається і в процесі її самогальмування проводяться вимірювання кутової швидкості $\omega_{rГ}(t)$. Після повної зупинки ЕМ проводиться визначення моменту інерції ротору J і моменту механічних втрат $M_0(\omega_r)$.

Після визначення J і $M_0(\omega_r)$ проводиться ідентифікація R_r , L_r і L_m за допомогою функцій чутливості. Ідентифікований параметр L_m приймається як знайдений, а ідентифіковані параметри R_r , L_r приймаються як початкова оцінка для їх подальшої ідентифікації за методом інваріантного поглиблення.

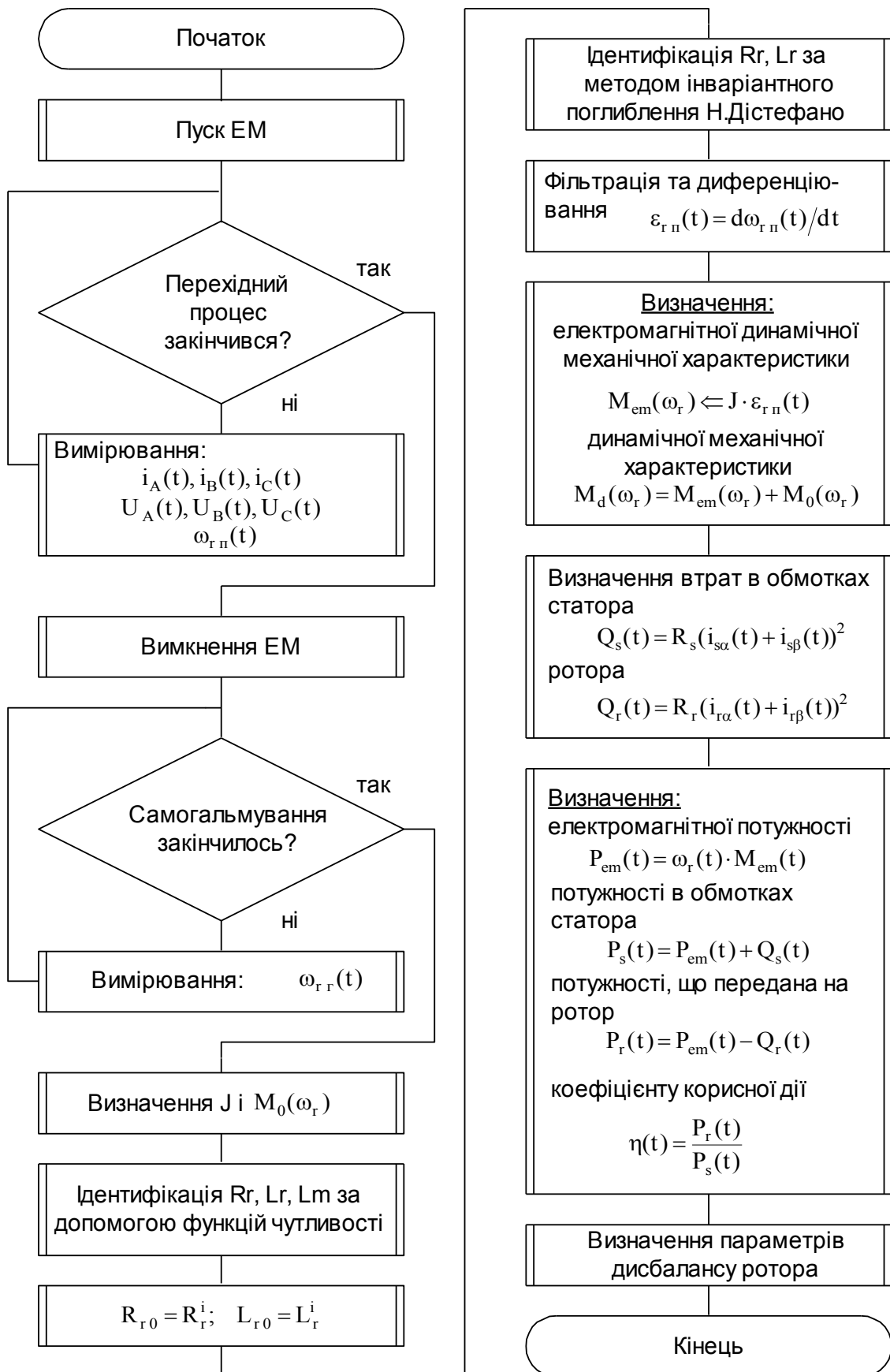


Рис. 3.20. Узагальнений алгоритм визначення ПД ЕМ

Після ідентифікації проводяться фільтрація і диференціювання кутової швидкості $\omega_{гп}(t)$ і визначення: електромагнітної динамічної механічної характеристики; динамічної механічної характеристики; втрат в обмотках статора і ротора; електромагнітної потужності; потужності в обмотках статора; потужності, що передана на ротор; коефіцієнта корисної дії; параметрів дисбалансу ротора.

3.3. Вимірювальне перетворення параметрів діагностування обмоток електромоторів

3.3.1. Аналіз доцільності діагностування обмоток електромоторів за добротністю

Якість ЕМ в значній мірі визначається якістю обмоток [153, 182]. Судячи з результатів статистичних досліджень причин виходу з ладу ЕМ [183], більшість відмов у функціонуванні ще нових обмоток відбувається через своєчасно не виявлені дефекти. Відмови по вузлах ЕМ розподіляються таким чином: 50-95% відмов відбувається через ушкодження обмотки статора (пробій міжвиткової ізоляції); підшипники 10-40%; інші вузли і деталі 5-10%.

Обмотки ЕМ виготовлюються на висококомеханізованому чи автоматизованому обладнанні. Висока швидкість обробки проводів обмотки і часта наступна деформація обмотки ведуть до великого навантаження ізоляції. Таким чином, найбільш характерним видом браку є наявність короткозамкнених витків в обмотках. У зв'язку з цим представляє практичну цінність визначення ступеня впливу на параметри обмотки кількості КЗВ.

Для визначення параметрів обмотки еквівалентну схему обмотки ЕМ як індуктивного елемента необхідно зобразити у вигляді повної еквівалентної схеми, наведеної на рис. 3.21 [183]. Вона складена ви-

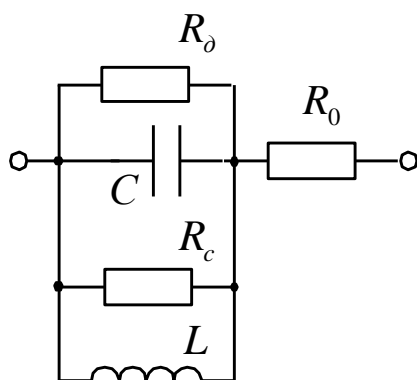


Рис. 3.21. Повна еквівалентна схема обмотки ЕМ

ходячи з таких фізичних міркувань. Власна ємність обмотки, еквівалентна розподіленій міжвитковій ємності обмотки, підключається до входних затискачів. Обмотка має втрати кількох видів, які еквівалентуються відповідними опорами.

Втрати в обмотці пропорційні квадрату струму. Тому вони можуть бути підраховані послідовним вмиканням у загальне коло опору R_0 . Втрати в магні-

топроводі визначаються індукцією, яка, в свою чергу, визначається величиною напруги, що створює магнітний потік, зчеплений із витками обмотки. Тому опір R_c , який враховує втрати в магнітопроводі, підключається в еквівалентній схемі паралельно до індуктивності.

Втрати в ізоляції, зумовлені ємністю обмотки, $\text{tg } \delta$ і напругою, прикладеною до ємності, представляються опором R_d , який вмикається паралельно до ємності. У результаті утворюється повна еквівалентна схема обмотки ЕМ, яка дозволяє досліджувати величину добротності Q обмотки з кількісної сторони.

Уточнимо поняття добротності. Добротність обмотки – відношення реактивної енергії, запасеної в обмотці, до активної (відповідно реактивної потужності до активної або реактивної складової повного опору до активної складової).

Виходячи з даної еквівалентної схеми обмотки і визначення поняття добротності обмотки можна одержати вираз для добротності Q :

$$Q = \frac{\omega L}{R_0} \left[(1 - \omega^2 CL) + \frac{\omega^2 L^2}{(1 - \omega^2 CL) \cdot r} \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R_0} \right) \right]^{-1}, \quad (3.35)$$

де R_0, L, C – відповідно активний опір, індуктивність і власна ємність обмотки;

$r = \frac{R_c R_d}{R_c + R_d}$, де R_c та R_d – опори втрат у магнітопроводі та ізоляції;

$$R_c = \frac{U^2}{P_c}; R_d = \frac{U^2}{P_d}; U \text{ – напруга на обмотці};$$

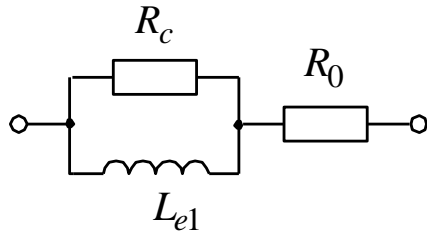
P_c, P_d – відповідно потужність втрат у магнітопроводі та в ізоляції;

ω – кругова частота.

Для нормальної роботи обмоток потрібно, щоб робоча частота обмотки була значно нижчою від резонансної, тобто $\omega \ll \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Інакше індуктивність і добротність обмотки будуть значно знижені внаслідок впливу власної компенсуючої ємності. Тому необхідно виконання умови $\omega^2 CL \ll 1$.

При виконанні даної умови обмотку можна представити за допомогою спрощеної еквівалентної схеми (рис. 3.22).

Виходячи з конфігурації кола, визначаються її еквівалентні індуктивність L_{e1} та добротність Q_1 [183]:



$$L_{e1} = \frac{LQ_c^2}{1 + Q_c^2}; \quad (3.36)$$

$$Q_1 = \frac{Q_c}{1 + \frac{1}{Q_k Q_c} + \frac{Q_c}{Q_k}}, \quad (3.37)$$

Рис. 3.22. Спрощена еквівалентна схема обмотки

де $Q_k = \omega L / R_0$ – доброт-

ність обмотки;

$Q_c = R_c / \omega L$ – добротність магнітопроводу.

При наявності КЗВ обмотку розглядають як трансформатор із короткозамкненою вторинною обмоткою (рис. 3.23), де R'_1 – приведений до первинних витків опір вторинної обмотки. Представляючи паралельний опір R'_1 і R_c одним еквівалентним опором R_{e1} , отримуємо схему (рис. 3.23), за своєю структурою аналогічною еквівалентній схемі, зображеній на рис. 3.22. Параметри цієї схеми виражаються таким чином [184]:

$$R_{e2} = \frac{R'_1 R_c}{R'_1 + R_c}; \quad L_{e2} = \frac{LQ_c^2}{(1 + Q_c^2) \left(1 + \frac{2Q_k Q_c k}{1 + Q_c^2} \right)} = \frac{LQ_c^2}{1 + Q_c^2 + 2Q_k Q_c k}; \quad (3.38)$$

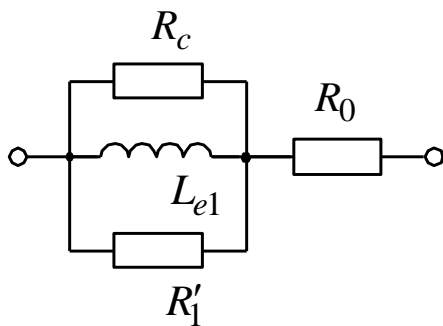


Рис. 3.23. Еквівалентна схема обмотки з КЗВ

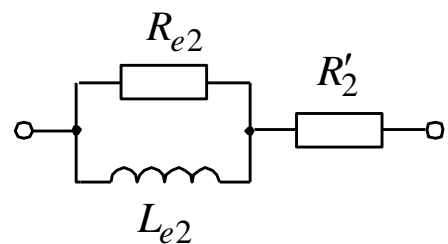


Рис. 3.24. Спрощена еквівалентна схема обмотки із КЗВ

$$Q_2 = \frac{Q_c}{\left(1 + \frac{1}{Q_k Q_c} + \frac{Q_c}{Q_k (1 + k Q_k Q_c)} \right) (1 + k Q_k Q_c)} \times \quad (3.39)$$

$$\times \frac{1}{1 + \frac{kQ_c Q_k (1 + kQ_c Q_k + Q_c^2)}{1 + kQ_c Q_k + Q_c^2 + Q_c Q_k (1 + kQ_c Q_k)}}.$$

Після спрощення (3.39) отримаємо:

$$Q_2 = \frac{Q_c}{k^2 Q_c Q_k + k \left[2 + Q_k Q_c + Q_c^2 \right] + \frac{1}{Q_k Q_c} + \frac{Q_c}{Q_k} + 1}. \quad (3.40)$$

При $k=0$ вираз (3.40) переходить у вираз (3.37). У виразах (3.38), (3.40) враховано, що якщо R_0 та R'_1 , виразити через опір одного витка r_0 , то

$$R_0 = W r_0; \quad R'_2 = \frac{r_0 (W - W_k)^2}{W_k},$$

де W і W_k - кількість витків обмотки і короткозамкнених витків відповідно.

Враховуючи, що $W_k \ll W$, отримаємо:

$$R'_2 \cong \frac{r_0 W^2}{W_k} = \frac{R_0}{k}, \quad (3.41)$$

де $k = W_k/W$ - відносне число короткозамкнених витків. Тоді

$$R_{e2} = \frac{R_c}{1 + kQ_k Q_c}, \quad (3.42)$$

оскільки $R_c/R = Q_k Q_c$.

Виразимо із (3.40) відносне число короткозамкнених витків k . Дійсний розв'язок квадратного рівняння відносно k

$$k^2 Q_c Q_k + k \left[2 + Q_k Q_c + Q_c^2 \right] + \frac{1}{Q_k Q_c} + \frac{Q_c}{Q_k} + 1 = \frac{Q_c}{Q_2}$$

матиме вигляд:

$$k = \frac{-2 - Q_k Q_c - Q_c^2 + Q_c (Q_k + Q_c)}{2Q_k Q_c}. \quad (3.43)$$

Вираз (3.43) може бути використаний для визначення відносного числа короткозамкнених витків k .

На рис. 3.25 представлено залежність $Q_1 = f(Q_k, Q_c)$, а на рис. 3.26 – залежності для різної кількості відносного числа короткозамкнених витків k $Q_2 = f(Q_k, Q_c)$ і $Q_1 - Q_2 = f(Q_k, Q_c)$ відповідно. Аналіз рис. 3.25-3.26 показує суттєвий вплив кількості відносної кількості короткозамкнених витків k на добротність обмотки.

Для практики випробовувань велику цінність має випробовування обмотки статора після монтажу, оскільки саме при монтажі може бути пошкоджена ізоляція обмотки. Дослідимо можливість використання спрощеної формули $Q \cong Q_k$ для визначення добротності обмотки із магнітопроводом.

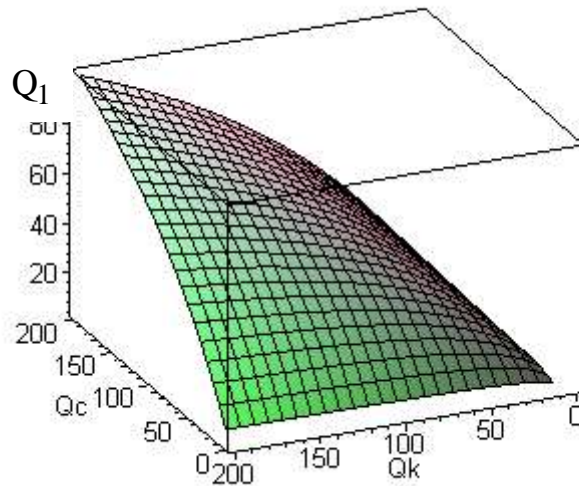


Рис. 3.25. Тривимірна залежність $Q_1 = f(Q_k, Q_c)$

На рис. 3.27 наведено розраховані залежності Q_1 та Q_k від робочої частоти ω . Слід зазначити, що характер зміни функції $Q_1(\omega)$ істотно залежить від матеріалу магнітопроводу. На рис. 3.28 наведені розрахунки відносного відхилення

$$\delta_{Q_1}(\omega) = \frac{|Q_1(\omega) - Q_k(\omega)|}{Q_1(\omega)} \cdot 100\%. \quad (3.44)$$

Результати моделювання показують, що при малій потужності втрат у магнітопроводі P_c в діапазоні частот $\omega = 0 \div 50$ Гц можна припустити, що $Q \cong Q_k$. За таких умов впливом добротності магнітопроводу Q_c на результуючу добротність Q можна знехтувати й еквівалентна схема заміщення обмотки з магнітопроводом стає ідентична еквівалентній схемі заміщення обмотки без магнітопроводу.

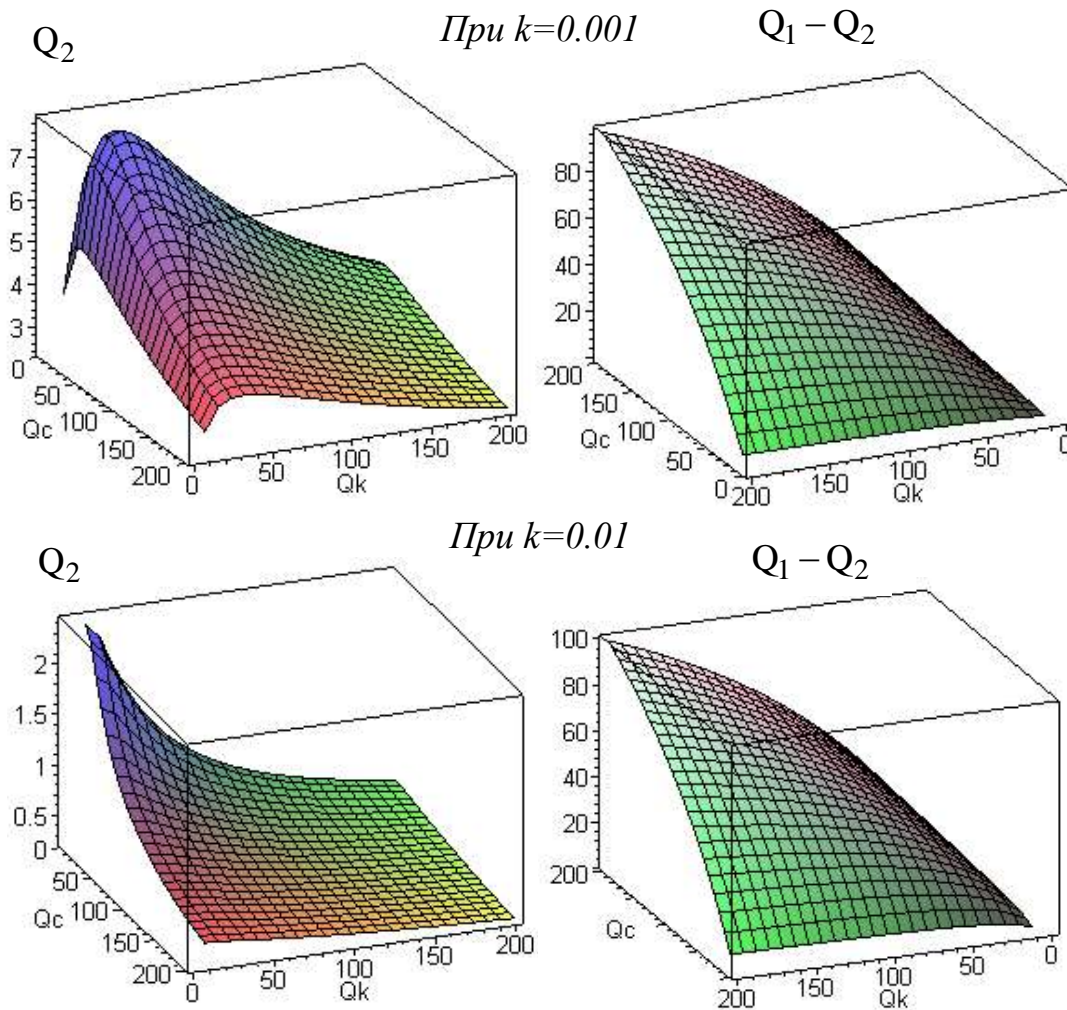


Рис. 3.26. Тривимірні залежності для різної відносної кількості короткозамкнених витків k $Q_2 = f(Q_k, Q_c)$ і $Q_1 - Q_2 = f(Q_k, Q_c)$

При врахуванні впливу магнітопроводу на результуючу добротність можна провести еквівалентне перетворення схеми обмотки із КЗВ (рис. 3.24), представивши її у вигляді найпростішої котушки індуктивності, зображеної на рис. 3.28. Параметри котушки індуктивності виражаються формулами:

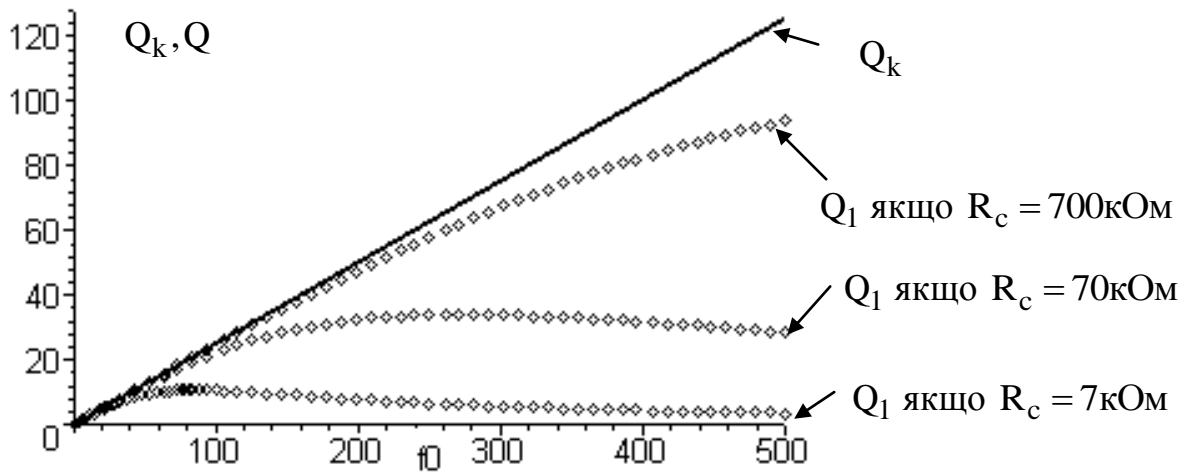


Рис. 3.27. Залежності $Q_k(\omega)$ та $Q_1(\omega)$

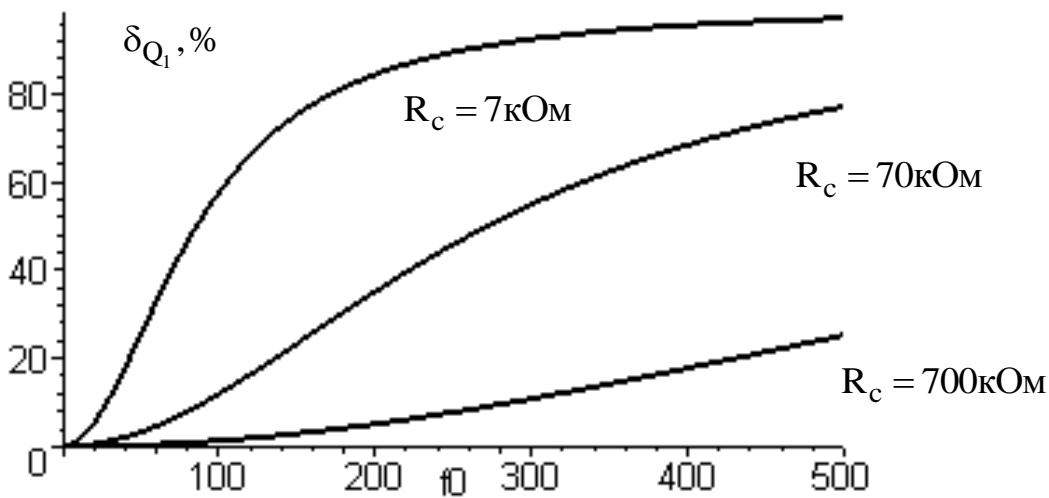


Рис. 3.28. Відносне відхилення $\delta_{Q_1}(\omega)$

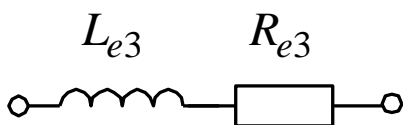


Рис. 3.28. Еквівалентна схема обмотки із КЗВ у вигляді найпростішої котушки індуктивності

$$R_{e3} = R'_2 + \frac{\omega^2 L_{e2}^2 R_{e2}}{R_{e2}^2 + (\omega L_{e2})^2}; \quad (3.45)$$

$$L_{e3} = \frac{R_{e2}^2 L_{e2}}{R_{e2}^2 + (\omega L_{e2})^2}. \quad (3.46)$$

При цьому

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} R_{e3}(\omega) = R'_2, \quad \lim_{\omega \rightarrow 0} L_{e3}(\omega) = L_{e2}.$$

Для теоретичного обґрунтування вибору добротності обмотки як інформативного параметра при її тестуванні наведемо такі викладки. По визначенню добротність – відношення реактивної потужності P_R до потужності активних втрат P_A . Збільшення числа КЗВ приводить до таких нерівностей:

$$\frac{dP_P}{dk} < 0; \quad \frac{dP_A}{dk} > 0. \quad (3.47)$$

Перша нерівність впливає з того, що при збільшенні числа КЗВ індуктивність обмотки падає, а друга – із фактичного збільшення втрат в обмотці. Тоді, оскільки добротність обмотки падає при зростанні числа КЗВ, одержимо:

$$\frac{dQ_1}{dk} = \frac{d}{dk} \left(\frac{P_P}{P_A} \right) = -\frac{1}{P_A} \left(\left| \frac{dP_P}{dk} \right| + Q_1 \frac{dP_A}{dk} \right). \quad (3.48)$$

З урахуванням того, що $P_A = P_P/Q$, одержимо:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = - \left(\left| \frac{\Delta P_P}{P_P} \right| + \frac{\Delta P_A}{P_A} \right). \quad (3.49)$$

Аналіз формули (3.49) показує, що чутливість по Q_1 визначається сумою чутливостей по P_P та P_A .

Розрахуємо чутливості $\partial L_{e2}(k)/\partial k$ та $\partial Q_2(k)/\partial k$:

$$\Phi_L(k) = \frac{\partial L_{e2}}{\partial k} = -2 \frac{(1+Q_c)^2 Q_k Q_c}{(1+Q_c^2 + 2Q_k Q_c k)^2}; \quad (3.50)$$

$$\Phi_Q(k) = \frac{\partial Q_2(k)}{\partial k} = \frac{-Q_k Q_c (Q_k Q_c + 1 + Q_c^2) (2Q_k Q_c k + Q_k Q_c + Q_c^2 + 2)}{(Q_k^2 Q_c^2 k^2 + (2Q_k Q_c + Q_c^2 Q_k^2 + Q_c^3 Q_k) k + Q_c Q_k + 1 + Q_c^2)^2}. \quad (3.51)$$

Результати розрахунків відносних відхилень $L_{e2}(k)/L_{e2}(0)$ і $Q_2(k)/Q_2(0)$ представлені на рис. 3.29, а $\Phi_L(k)/\Phi_L(0)$ і $\Phi_Q(k)/\Phi_Q(0)$ - на рис. 3.30.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки:

1. Ступінь зміни індуктивності обмотки залежно від числа КЗВ має невелике значення. Ця обставина робить визначення короткозамкнених витків за індуктивністю малоефективним.

2. Величина добротності значно чутливіша до числа КЗВ, ніж величина індуктивності.

3. Функція чутливості добротності при малих значеннях КЗВ нелінійна і має великий нахил. Велика чутливість добротності до чис-

ла КЗВ дозволяє здійснювати ідентифікацію малої кількості КЗВ, що важко здійснити іншими методами.

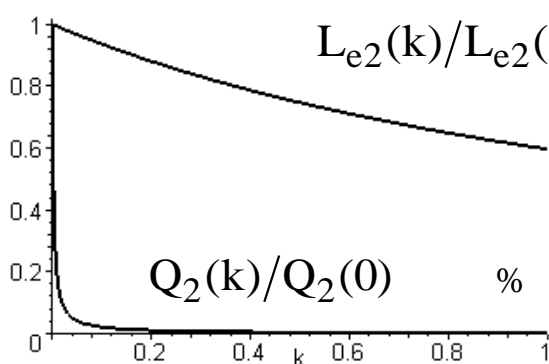


Рис. 3.29. Відносні відхилення $L_{e2}(k)/L_{e2}(0)$ і $Q_2(k)/Q_2(0)$

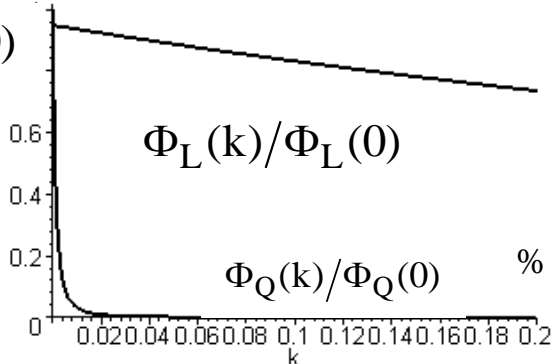


Рис. 3.30. Відносні відхилення $\Phi_L(k)/\Phi_L(0)$ і $\Phi_Q(k)/\Phi_Q(0)$

3.3.2. Фазовий метод вимірювання добротності обмоток електромоторів

Розглянемо схему вимірювального перетворювача [185, 186] (рис. 3.41), що містить такі елементи:

R – розділювальний резистор;

C_0 – зразковий конденсатор;

Z_X – комплексний опір досліджуваної котушки індуктивності;

R_X, L_X - активний опір і індуктивність досліджуваної котушки індуктивності відповідно.

Проведемо аналіз запропонованої схеми, використовуючи метод комплексних амплітуд.

Еквівалентний опір кола визначається

$$\begin{aligned} \dot{Z}_E &= R + R_X - jX_{CO} + jX_{CX} = (R + R_X) + j(X_{LX} - X_{CO}) = \\ &= \sqrt{(R + R_X)^2 + (X_{LX} - X_{CO})^2} \exp\left(j \arctg \frac{X_{LX} - X_{CO}}{R + R_X}\right), \end{aligned} \quad (3.52)$$

а еквівалентний опір досліджуваної котушки індуктивності

$$\dot{Z}_X = R + jX_{LX} = \sqrt{R^2 + X_{LX}^2} \exp\left(j \arctg \frac{X_{LX}}{R}\right). \quad (3.53)$$

Знайдем відношення напруг $\dot{U} = \dot{U}_{ZX} + \dot{U}_{CO}$ та \dot{U}_{ZX}

$$\frac{\dot{U}_{ZX} + \dot{U}_{CO}}{\dot{U}_{ZX}} = 1 + \frac{\dot{U}_{CO}}{\dot{U}_{ZX}}. \quad (3.54)$$

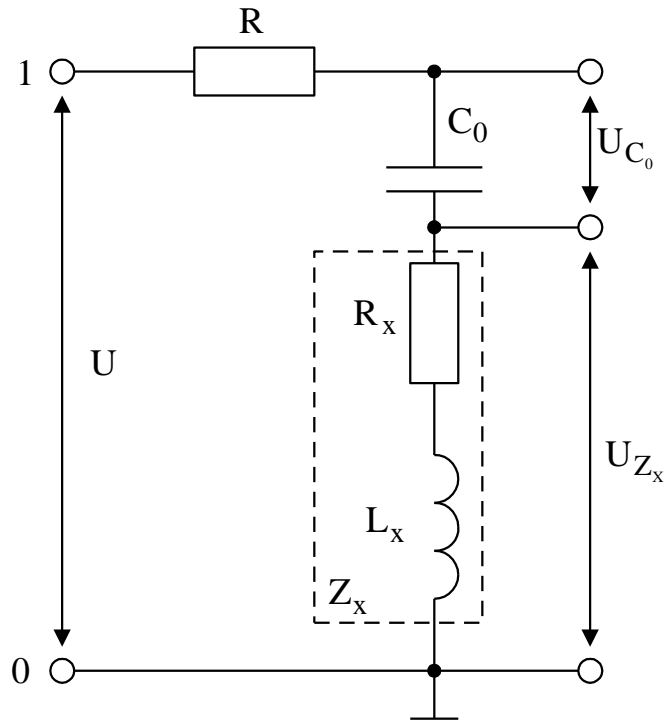


Рис. 3.41. Схема вимірювального перетворювача добротності

Напряга \dot{U}_{ZX} дорівнює

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ZX} = \dot{E} \frac{\dot{Z}_X}{\dot{Z}_E} &= \frac{E_m \exp(j0^\circ) \sqrt{R_X^2 + X_{LX}^2} \exp\left(j \arctg \frac{X_{LX}}{R_X}\right)}{\sqrt{(R + R_X)^2 + (X_{LX} - X_{C0})^2} \exp\left(j \arctg \frac{X_{LX} - X_{C0}}{R + R_X}\right)} = \\ &= \frac{E_m \sqrt{R_X^2 + X_{LX}^2}}{\sqrt{(R + R_X)^2 + (X_{LX} - X_{C0})^2}} \exp\left(j \left(\arctg \frac{X_{LX}}{R_X} - \arctg \frac{X_{LX} - X_{C0}}{R + R_X} \right)\right). \end{aligned} \quad (3.55)$$

Напряга \dot{U}_{C0} дорівнює

$$\begin{aligned} \dot{U}_{C0} &= \frac{E_m \exp(j0^\circ) X_{C0} \exp\left(-\frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{(R + R_X)^2 + (X_{LX} - X_{C0})^2} \exp\left(j \arctg \frac{X_{LX} - X_{C0}}{R + R_X}\right)} = \\ &= \frac{E_m X_{C0}}{\sqrt{(R + R_X)^2 + (X_{LX} + X_{C0})^2}} \exp\left(-j \left(\arctg \frac{X_{LX} - X_{C0}}{R + R_X} + \frac{\pi}{2} \right)\right). \end{aligned} \quad (3.56)$$

Різниця фаз φ_X між напругами \dot{U}_{C0} та \dot{U}_{ZX} визначається

$$\begin{aligned} \varphi_X = \varphi_1 - \varphi_2 &= -\operatorname{arctg} \frac{X_{LX} - X_{CO}}{R + R_X} - \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{X_{LX}}{R_X} + \operatorname{arctg} \frac{X_{LX} - X_{CO}}{R + R_X} = \\ &= -\operatorname{arctg} \frac{X_{LX}}{R_X} - \frac{\pi}{2} = -\operatorname{arctg} Q - \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (3.57)$$

Звідси

$$Q = \operatorname{ctg}(\varphi_X). \quad (3.58)$$

Таким чином, вимірюючи фазовий зсув φ_X між напругами \dot{U}_{CO} та \dot{U}_{ZX} , можна визначити добротність котушки індуктивності, а отже, і добротність Q обмотки ЕМ. На рис. 3.42 зображено статичну характеристику вимірювального перетворювача добротності, а на рис. 3.43 – функцію чутливості цієї характеристики до зміни добротності. Аналіз показує, що такий метод найбільш придатний для вимірювання добротності в межах $Q \in [0.1..15]$ при частоті генератора 50 Гц, у яких знаходяться і номінальні значення добротностей обмоток ЕМ.

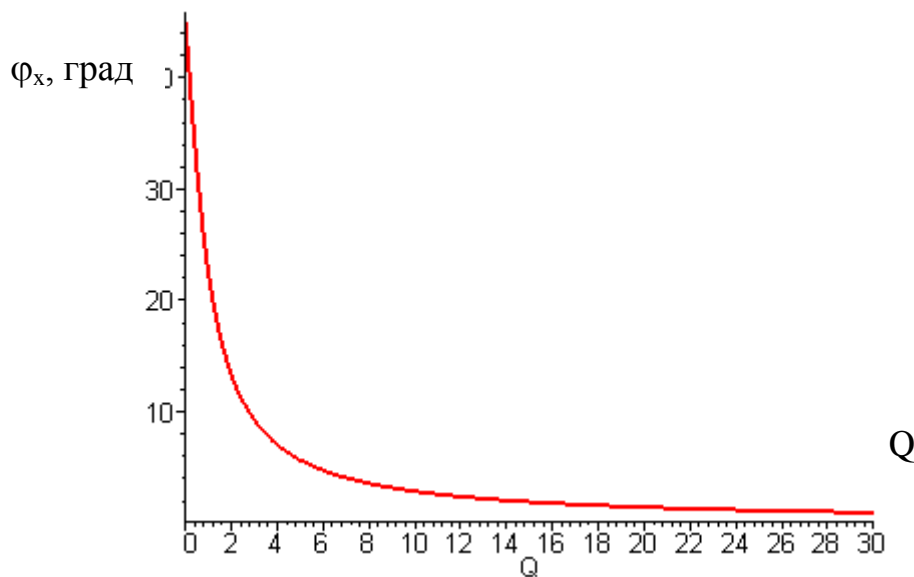


Рис. 3.42. Статична характеристика вимірювального перетворювача Q

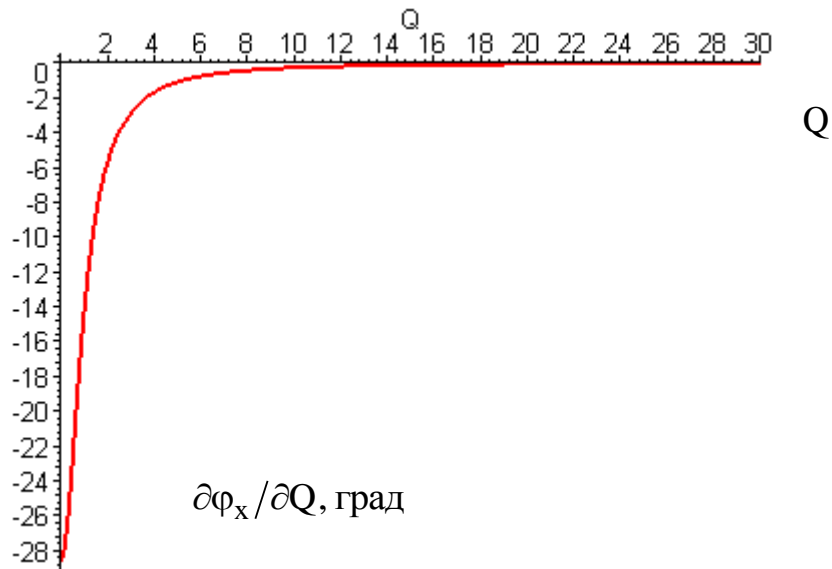


Рис. 3.43. Функція чутливості статичної характеристики вимірювального перетворювача до зміни Q

3.3.3. Засіб вимірювального перетворення добротності та відносної кількості короткозамкнених витків

На основі проведених досліджень можна сформуванати узагальнену структурну схему (рис. 3.44), в якій реалізовано вимірювання зсуву фаз двох напруг методом зіставлення [187–189]. Цифрові фазометри зіставлення вимірюють зсув фаз за значенням проміжку часу між моментами проходження відповідних фронтів синусоїд через нульові значення (перетворення фази в інтервал часу). Формувачі керуючих імпульсів $F1$ та $F2$ у моменти проходження миттєвих значень напруг через нульові значення генерують керуючі імпульси, які відкривають ключ SW на час t_x , пропорційний вимірюваному зсуву фаз φ_x . Цей проміжок часу вимірюється заповненням t_x імпульсами, що квантуються, від генератора імпульсів G частотою f_0 , число яких зчитується двійковим лічильником $CT2$. Тоді залежність $\varphi_x = f(t_x)$ визначиться

$$\varphi_x = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega t_1 - \omega t_2 = 2\pi f_q t_x, \quad (3.59)$$

де f_q – частота вхідної напруги генератора G .

Тривалість часового проміжку t_x , пропорційного φ_x , визначиться:

$$t_X = \frac{\varphi_X}{2\pi f_q} = \frac{\text{arccctg}(Q)}{2\pi f_q}. \quad (3.60)$$

Кількість імпульсів на виході двійкового лічильника СТ рівна

$$N_x = \frac{t_X}{T_0} = t_X f_0 = \frac{f_0}{2\pi f_q} \text{arccctg}(Q). \quad (3.61)$$

Рівняння (3.61) є загальним рівнянням вимірювального перетворення добротності. Процесор CPU керує перемиканням аналогового ключа К, за допомогою якого проводиться перемикання на вимірювання добротності випробуваної обмотки Q_x , зразкової обмотки без магнітопроводу Q_k та зразкової обмотки із магнітопроводом Q_1 . Добротність магнітопроводу виражається з формули (3.37):

$$Q_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{Q_1^2 Q_k^2 - 4Q_1^2 + 4Q_1 Q_k - Q_1 Q_k}}{Q_1 - Q_k}. \quad (3.62)$$

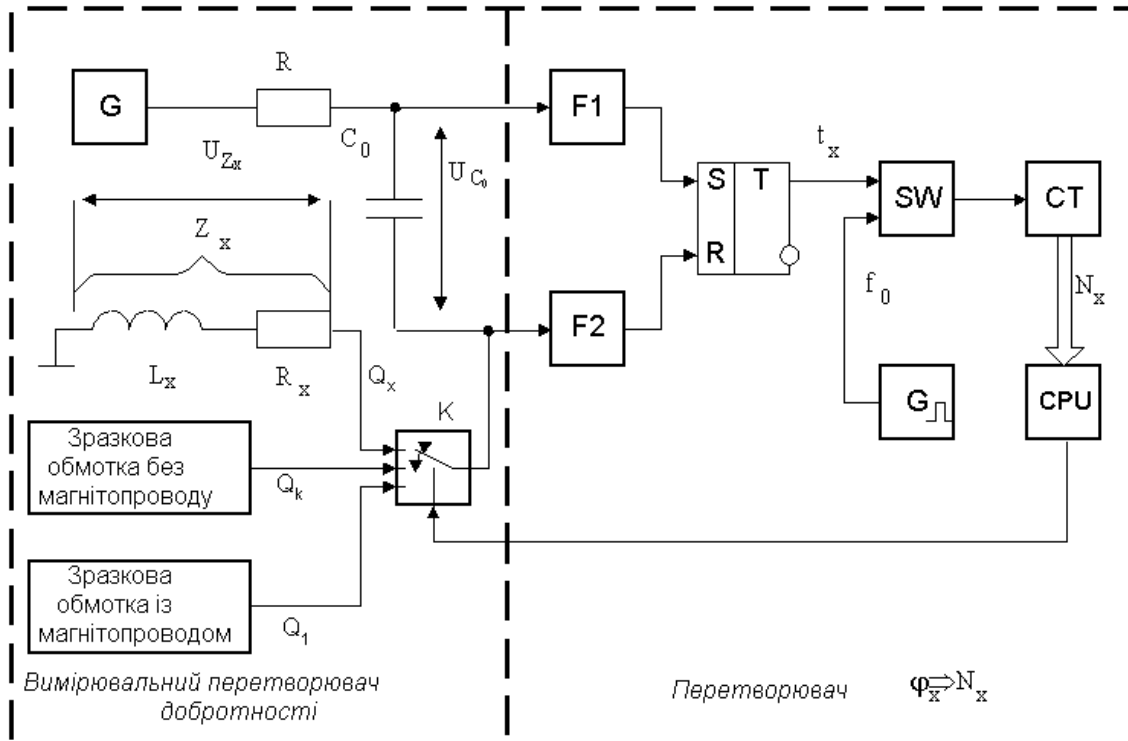


Рис. 3.44. Узагальнена структурна схема засобу вимірювального перетворення добротності

Тоді відносне число КЗВ k визначиться за допомогою (3.43).

На рис. 3.45 зображено сім'ю статичних характеристик засобу вимірювального перетворення добротності при різних значеннях частоти квантування f_0 при $f_q=50$ Гц.

Функція чутливості статичної характеристики (3.61) виражається формулою

$$S = -\frac{1}{1+Q^2} \frac{f_0}{2\pi f_q}. \quad (3.63)$$

Поверхня $S(Q, f_0)$ функцій чутливості (3.63) наводиться на рис. 3.55. Аналіз рис. 3.46 показує, що ефективний діапазон вимірювального перетворення добротності складає 0.1-15 одиниць Q .

Аналіз представлених результатів показує, що для покращення метрологічних характеристик вимірювального перетворення Q та k істотним є вибір значення частоти квантування f_0 .

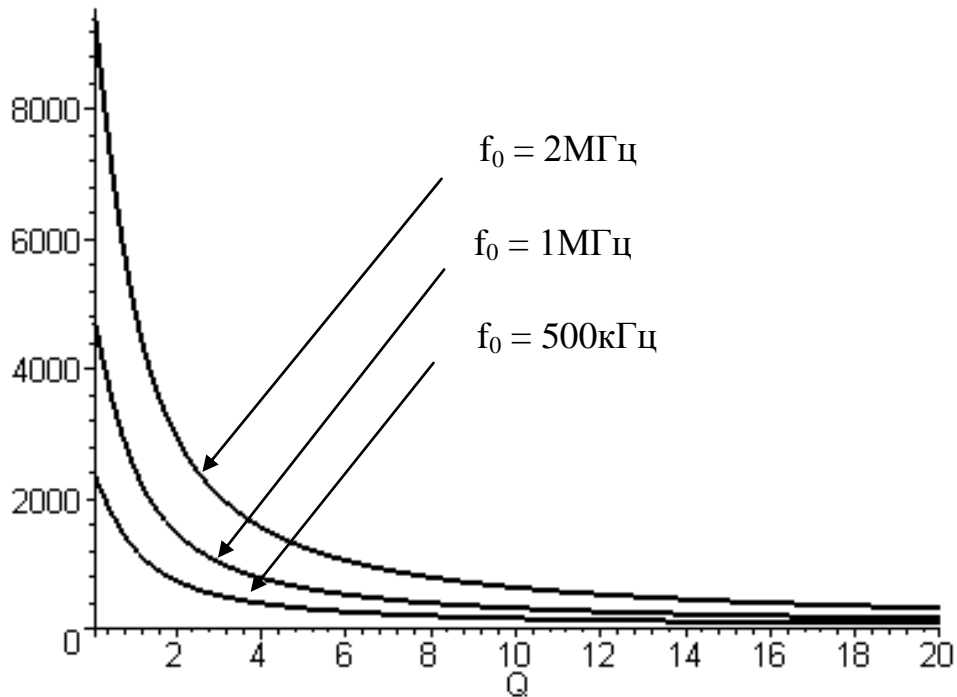


Рис. 3.45. Сімейство статичних характеристик засобу вимірювального перетворення добротності

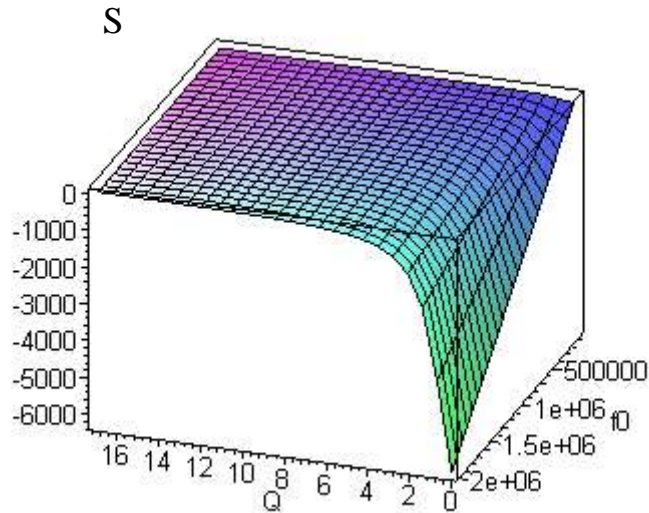


Рис. 3.46. Поверхня $S(Q, f_0)$ функцій чутливості (3.63)

3.3.4. Ідентифікація параметрів діагностування обмоток електромоторів за допомогою теорії чутливості

Для аналізу параметрів обмоток використаємо її одноланцюгову схему заміщення відносно виводів [190], наведену на рис. 3.47, в якій: R_d - опір відомої величини, Ом; L - індуктивність обмотки, Гн; R_1 - активний опір обмотки, Ом; R - активний опір проводів, Ом; $C1$ - ємність обмотки, Ф.

Як тестовий сигнал використаємо сигнал включення $U(t) = U_0 \cdot 1(t)$. Як вихідний сигнал будемо спостерігати напругу $U_c(t)$. Опір R_d уведений в схему для того, щоб при подачі тестового сигналу обмежити швидкість наростання заряду ємності $C1$.

Допустимо, що $R \ll R_1, R_d$. Електромагнітні процеси в даній схемі можуть бути описані системою

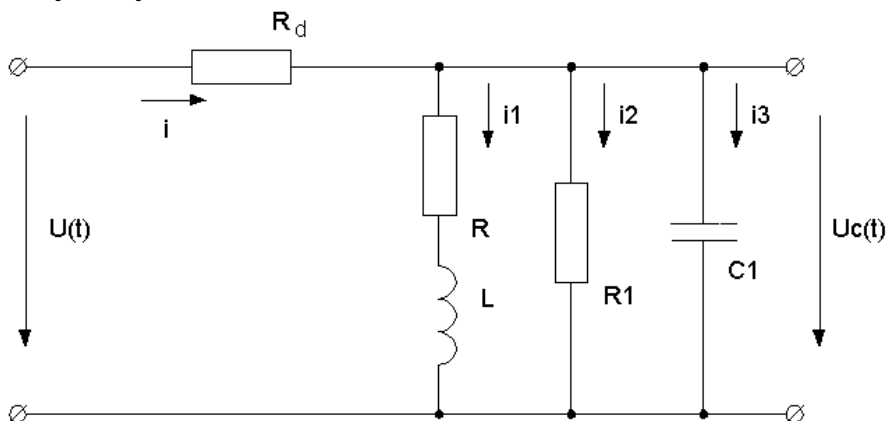


Рис. 3.47. Одноланцюгова схема заміщення обмотки ЕМ відносно виводів

$$\begin{cases} i(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t); i(t)R_d + U_c(t) = U_0; \\ L \frac{di_1(t)}{dt} = U_c(t); i_2(t)R_1 = U_c(t); i_3(t) = C_1 \frac{dU_c(t)}{dt}. \end{cases} \quad (3.64)$$

Систему рівнянь (3.64) можна звести у форму

$$\begin{cases} \frac{dU_c(t)}{dt} = \frac{1}{C_1} \cdot \left[\frac{U_0 - U_c(t)}{R_d} - i_1(t) - \frac{U_c(t)}{R_1} \right]; \\ \frac{di_1(t)}{dt} = \frac{U_c(t)}{L}. \end{cases} \quad (3.65)$$

Визначимо вектор стану обмоток ЕМ:

$$\mathbf{I} = [I_1; I_2]^T = [U_c; i_1]^T. \quad (3.66)$$

Запишемо параметри діагностування обмоток ЕМ у вигляді вектора (R_d та L приймаємо за відомі, оскільки їх можна просто виміряти):

$$\mathbf{A} = [A_1; A_2]^T = [R_1; C_1]^T. \quad (3.67)$$

Використавши (3.66) та (3.67), запишемо математичну модель (3.65) у формі $\frac{d}{dt}\mathbf{I} = \mathbf{F}(\mathbf{I}, \mathbf{A}, t)$ [107]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_2} \cdot \left[\frac{U_0 - I_1(t)}{R_d} - I_2(t) - \frac{I_1(t)}{A_1} \right] \\ \frac{I_1(t)}{L} \end{bmatrix} = [F_1; F_2]^T. \quad (3.68)$$

Тоді задача ідентифікації параметрів діагностування обмоток ЕМ полягає в знаходженні значень вектору \mathbf{A} при спостереженні неповного вектора стану \mathbf{I} . Для i -тої компоненти вектора \mathbf{I} з достатньою для практики точністю можна прийняти

$$I_i(t) = I_i^H(t) + \sum_{j=1}^1 u_{ij}(t) \cdot a_j, \quad (3.69)$$

де $I_i^H(t)$ - номінальний рух системи (3.68), який зумовлений номінальними значеннями параметрів A^H ;

$u_{ij}(t)$ - функція чутливості координати $I_i(t)$ до зміни параметра A_j ;

l – розмірність вектора A ;

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}^H - \mathbf{A}. \quad (3.70)$$

Функції чутливості $u_{ij}(t)$ визначаються як

$$\frac{\partial u_{ij}(t)}{\partial t} = \sum_{\mu=1}^n \left(\frac{\partial F_i}{\partial I_{\mu}} \right)^H \cdot u_{\mu i}(t) + \left(\frac{\partial F_i}{\partial A_j} \right)^H, \quad u_{ij}(0) = 0. \quad (3.71)$$

У матричній формі запису рівняння (3.69), (3.71) будуть мати вигляд:

$$\mathbf{I}(t) = \mathbf{I}^H(t) + \mathbf{u}(t) \cdot \mathbf{a}; \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}(t)}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{I}} \cdot \mathbf{u}(t) + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{A}}; \quad \mathbf{u}(0) = 0. \quad (3.73)$$

Номінальний рух $\mathbf{I}^H(t)$ визначиться із рівняння

$$\frac{d\mathbf{I}^H(t)}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{I}^H, \mathbf{A}^H, t), \quad \mathbf{I}^H(0) = 0. \quad (3.74)$$

У процесі спільного розв'язання рівнянь (3.73) і (3.74) розраховується номінальний рух $\mathbf{I}^H(t)$ і матриця чутливостей $\mathbf{u}(t)$ на множині точок t_1, t_2, \dots, t_r . Далі, на основі отриманих даних про $\mathbf{I}^H(t)$, $\mathbf{u}(t)$ і результатів спостережень $\mathbf{I}(t)$ в точках t_1, t_2, \dots, t_r визначаються невідомі значення всіх компонент вектора \mathbf{a} .

Використаємо квадратичний критерій якості ідентифікації [73]

$$Q = \sum_{k=1}^r \left[I_i^*(t_k) - I_i^H(t_k) - \sum_{j=1}^l u_{ij}(t_k) \cdot a_j \right]^2 \quad (3.75)$$

і необхідну умову мінімуму Q

$$\frac{dQ}{da_\mu} = 2 \cdot \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^r \left[I_i^*(t_k) - I_i^H(t_k) - \sum_{j=1}^l u_{ij}(t_k) \cdot a_j \right] \cdot u_{i\mu}(t_k) = 0; \quad (3.76)$$

$$\mu = 1, 2, \dots, l,$$

де $\mathbf{I}^*(t) = [U_c(t)]$ - компоненти вектора стану \mathbf{I} , які вимірюються;

s - кількість вимірних параметрів, що забезпечують можливість знаходження всіх компонент вектора \mathbf{a} з системи лінійних рівнянь

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^l \left[\sum_{k=1}^r u_{ij}(t_k) \cdot u_{i\mu}(t_k) \right] \cdot a_j = \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^r \left[I_i^*(t_k) - I_i^H(t_k) \right] \cdot u_{i\mu}(t_k), \quad (3.77)$$

$$\mu = 1, 2, \dots, l.$$

Частинні похідні $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{I}^*}$, $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{A}}$ та функції чутливості розраховують-

ся як

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{I}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{A_2} \cdot \left[\frac{1}{R_d} + \frac{1}{A_1} \right] & -\frac{1}{A_2} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.78)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \frac{I_1}{A_1^2 A_2} & -\frac{1}{A_2^2} \cdot \left[\frac{U_0 - I_1}{R_d} - I_2 - \frac{I_1}{A_1} \right] \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.79)$$

Тоді математичну модель обмоток разом із функціями чутливості можна записати:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_1(t)}{dt} = \frac{1}{A_2} \cdot \left[\frac{U_0 - I_1(t)}{R_d} - I_2(t) - \frac{I_1(t)}{A_1} \right]; \\ \frac{dI_2(t)}{dt} = \frac{I_1(t)}{L}; \\ \frac{du_{11}(t)}{dt} = -\left[\frac{1}{R_d} + \frac{1}{A_1} \right] \cdot \frac{u_{11}(t)}{A_2} - \frac{u_{21}(t)}{A_2} + \frac{I_1(t)}{A_1^2 A_2}; \\ \frac{du_{12}(t)}{dt} = -\left[\frac{1}{R_d} + \frac{1}{A_1} \right] \cdot \frac{u_{11}(t)}{A_2} - \frac{u_{21}(t)}{A_2} - \frac{1}{A_2^2} \cdot \left[\frac{U_0 - I_1(t)}{R_d} - I_2(t) - \frac{I_1(t)}{A_1} \right]; \\ \frac{du_{21}(t)}{dt} = \frac{u_{12}(t)}{L}; \\ \frac{du_{22}(t)}{dt} = \frac{u_{12}(t)}{L}. \end{array} \right. \quad (3.80)$$

За допомогою програмного пакету Maple знайдено аналітичний розв'язок системи рівнянь (3.80) при нульових початкових умовах:

$$\begin{aligned}
I_1(t) &= 2A_1U_0K_3\sqrt{\frac{L}{K_1}} \cdot \sin(K_2); \\
I_2(t) &= A_1U_0 \cdot \left[\frac{1}{R_dA_1} - \frac{K_3}{A_1} \sqrt{\frac{L}{K_1}} \cdot \sin(K_2) - 4R_dA_1A_2 \frac{K_3}{K_1} \cos(K_2) + \right. \\
&+ LA_1 \frac{K_3}{K_1R_d} \cos(K_2) + 2L \frac{K_3}{K_1} \cos(K_2) + LR_d \frac{K_3}{K_1A_1} \cos(K_2) - \\
&\left. - \frac{K_3}{R_d} \sqrt{\frac{L}{K_1}} \cdot \sin(K_2) \right]; \\
u_{11}(t) &= \frac{R_dLU_0}{A_2} \cdot \left[\frac{1}{R_d^2A_1^2} - \frac{K_3}{R_dA_1^2} \sqrt{\frac{L}{K_1}} \cdot \sin(K_2) - 4 \frac{A_2K_3}{K_1} \cdot \cos(K_2) + \right. \\
&+ L \frac{K_3}{K_1R_d^2} \cos(K_2) + 2L \frac{K_3}{K_1R_dA_1} \cos(K_2) + L \frac{K_3}{K_1A_1^2} \cos(K_2) - \\
&- \frac{K_3}{A_1R_d^2} \sqrt{\frac{L}{K_1}} \sin(K_2) + 4 \frac{R_dA_1^3A_2K_3}{K_1^2} \sqrt{\frac{K_1}{L}} \cdot \sin(K_2) - \\
&- 2 \frac{A_1^2K_3}{LK_1} t \cdot \cos(K_2) - 4 \frac{K_3A_1A_2}{K_1^2} \sqrt{K_1L} \cdot \sin(K_2) + 2 \frac{K_3}{R_dK_1} t \cdot \cos(K_2) - \\
&\left. - 4 \frac{R_dA_2K_3}{K_1^2} \sqrt{K_1L} \cdot \sin(K_2) + 2 \frac{K_3}{A_1K_1} t \cdot \cos(K_2) \right]; \\
u_{12}(t) &= \frac{-L^2U_0}{A_1A_2} \cdot \left[4 \frac{R_d^2A_1A_2K_3}{K_1^2} \sqrt{\frac{K_1}{L}} \cdot \sin(K_2) - 2 \frac{R_dK_3}{LK_1} t \cdot \cos(K_2) + \right. \\
&+ 4 \frac{A_1^2A_2R_dK_3}{K_1^2} \sqrt{\frac{K_1}{L}} \cdot \sin(K_2) - 2 \frac{A_1K_3}{LK_1} t \cdot \cos(K_2) - \\
&- 4 \frac{R_d^2A_1^4A_2K_3}{LK_1^2} \sqrt{\frac{K_1}{L}} \cdot \sin(K_2) + 2 \frac{R_dA_1^3K_3}{L^2K_1} t \cdot \cos(K_2) + \\
&\left. + 2 \frac{A_1^2K_3}{L\sqrt{LK_1}} \cdot \sin(K_2) \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{21}(t) = u_{22}(t) = & \frac{-LU_0}{A_1A_2} \cdot \left[-\frac{K_3}{A_1^2} \sqrt{\frac{L}{K_1}} \cdot \sin(K_2) - 2\frac{K_3}{A_1R_d} \sqrt{\frac{L}{K_1}} \cdot \sin(K_2) - \right. \\
& -4\frac{A_1A_2K_3}{K_1} \cdot \cos(K_2) - 4\frac{R_dA_2K_3}{K_1} \cdot \cos(K_2) + \frac{LA_1K_3}{R_d^2K_1} \cdot \cos(K_2) + \\
& +3\frac{LK_3}{R_dK_1} \cdot \cos(K_2) + 3\frac{LK_3}{A_1K_1} \cdot \cos(K_2) + \frac{LR_dK_3}{A_1^2K_1} \cdot \cos(K_2) - \\
& -\frac{K_3}{R_d^2} \sqrt{\frac{L}{K_1}} \cdot \sin(K_2) - 2\frac{A_1^2A_2K_3}{K_1^2} \sqrt{LK_1} \cdot \sin(K_2) - \\
& -4\frac{R_dA_1A_2K_3}{K_1^2} \sqrt{LK_1} \cdot \sin(K_2) + 2\frac{R_dA_1^4A_3K_3}{K_1^2} \sqrt{\frac{K_1}{L}} \cdot \sin(K_2) - \\
& -2\frac{R_d^2A_2K_3}{K_1^2} \sqrt{LK_1} \cdot \sin(K_2) - \frac{K_3t}{R_d\sqrt{LK_1}} \sin(K_2) - \frac{K_3t}{A_1\sqrt{LK_1}} \sin(K_2) + \\
& +\frac{A_1^2K_3t}{L\sqrt{LK_1}} \sin(K_2) + \frac{A_1K_3t}{R_dK_1} \cdot \cos(K_2) + \frac{R_dK_3t}{A_1K_1} \cdot \cos(K_2) - \\
& -\frac{R_dA_1^2K_3t}{LK_1} \cdot \cos(K_2) + 2\frac{R_d^2A_1^3K_3A_2}{K_1^2} \sqrt{\frac{K_1}{L}} \cdot \sin(K_2) + 2\frac{K_3t}{K_1} \cdot \cos(K_2) - \\
& \left. -\frac{A_1^3K_3t}{LK_1} \cdot \cos(K_2) + \frac{1}{R_d^2A_1} + \frac{1}{R_dA_1^2} \right],
\end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned}
K_1 &= 4A_2R_d^2A_1^2 - LA_1^2 - 2LR_dA_1 - LR_d^2, \\
K_2 &= \frac{t}{2A_1A_2R_d} \sqrt{\frac{K_1}{L}}, \quad K_3 = e^{-\frac{1}{2} \frac{A_1+R_d}{A_1A_2R_d} \cdot t}.
\end{aligned}$$

На рис. 3.48, 3.49 наведено зображення поверхонь, які ілюструють характер зміни напруги U_c від часу t та значень R_d , U_0 .

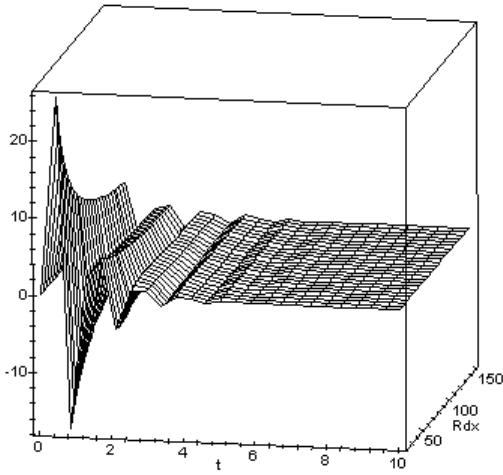


Рис. 3.48. Залежність
 $U_c = f(R_d, t)$

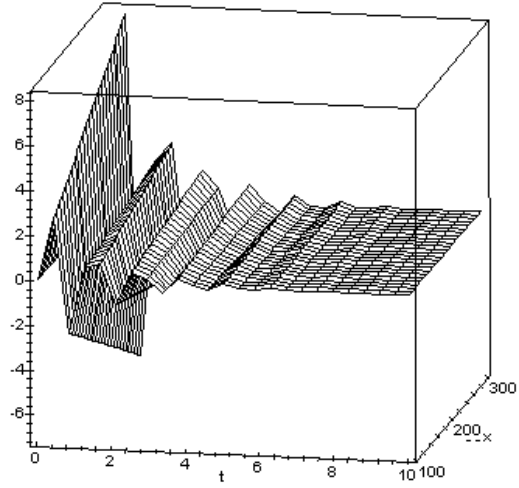


Рис. 3.49. Залежність
 $U_c = f(U_0, t)$

Система (3.77) запишеться:

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left[\sum_{k=1}^r u_{ij}(t_k) \cdot u_{i\mu}(t_k) \right] \cdot a_j = \sum_{k=1}^r \left[I_1^*(t_k) - I_1^H(t_k) \right] \cdot u_{1\mu}(t_k), \quad (3.81)$$

$\mu = 1, 2, \dots, 1.$

Після певних математичних перетворень систему рівнянь (3.81) можна записати:

$$\left[\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}^2(t_k) \right] \cdot a_1 + \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i2}(t_k) \cdot u_{i1}(t_k) \right] \cdot a_2 = \sum_{k=1}^r \left[I_1^*(t_k) - I_1^H(t_k) \right] \cdot u_{11}(t_k); \quad (3.82)$$

$$\left[\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) \cdot u_{i2}(t_k) \right] \cdot a_1 + \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i2}^2(t_k) \right] \cdot a_2 = \sum_{k=1}^r \left[I_1^*(t_k) - I_1^H(t_k) \right] \cdot u_{12}(t_k);$$

В матричній формі систему рівнянь (3.82) можна записати:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}^2(t_k) & \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i2}(t_k) \cdot u_{i1}(t_k) \\ \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) \cdot u_{i2}(t_k) & \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i2}^2(t_k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^r \left[I_1^*(t_k) - I_1^H(t_k) \right] \cdot u_{11}(t_k) \\ \sum_{k=1}^r \left[I_1^*(t_k) - I_1^H(t_k) \right] \cdot u_{12}(t_k) \end{bmatrix}. \quad (3.83)$$

Розв'язок системи (3.83) відносно елементів вектора **a** матиме вигляд:

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i2}^2(t_k) \sum_{k=1}^r [I_1^*(t_k) - I_1^H(t_k)] u_{i1}(t_k) - \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) u_{i2}(t_k) \sum_{k=1}^r [I_1^*(t_k) - I_1^H(t_k)] u_{i2}(t_k)}{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}^2(t_k) \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i2}^2(t_k) - \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) u_{i2}(t_k) \right)^2} \quad (3.84)$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}^2(t_k) \sum_{k=1}^r [I_1^*(t_k) - I_1^H(t_k)] u_{i2}(t_k) - \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) u_{i2}(t_k) \sum_{k=1}^r [I_1^*(t_k) - I_1^H(t_k)] u_{i1}(t_k)}{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}^2(t_k) \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i2}^2(t_k) - \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^r u_{i1}(t_k) u_{i2}(t_k) \right)^2}$$

Реальні значення параметрів діагностування розраховуються як

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^H + \mathbf{a}. \quad (3.85)$$

Дослідження розробленого методу ідентифікації параметрів діагностування обмоток проведено за допомогою його моделювання. Алгоритм моделювання здійснено в такій послідовності:

1. Генерація значень $\mathbf{I}^H(t)$, $\mathbf{u}^H(t)$ при номінальних значеннях параметрів R_1^H , C_1^H .
2. Генерація (імітація вимірювань) значень $\mathbf{I}^*(t)$, $\mathbf{u}(t)$ при значеннях параметрів R_1 , C_1 із відносними відхиленнями

$$\delta_{R_1} = \frac{R_1^H - R_1}{R_1^H} \times 100\%; \quad \delta_{C_1} = \frac{C_1^H - C_1}{C_1^H} \times 100\%.$$

3. Здійснення розрахунків за формулами (3.84)-(3.85) з підрахунком відносних похибок ідентифікації

$$\delta_{R_1}^{id} = \frac{|a_1|}{R_1} \times 100\%; \quad \delta_{C_1}^{id} = \frac{|a_2|}{C_1} \times 100\%.$$

Дослідження алгоритму ідентифікації здійснено для АМ типу 4А71А4. Результати досліджень наведені на рис. 3.50–3.51.

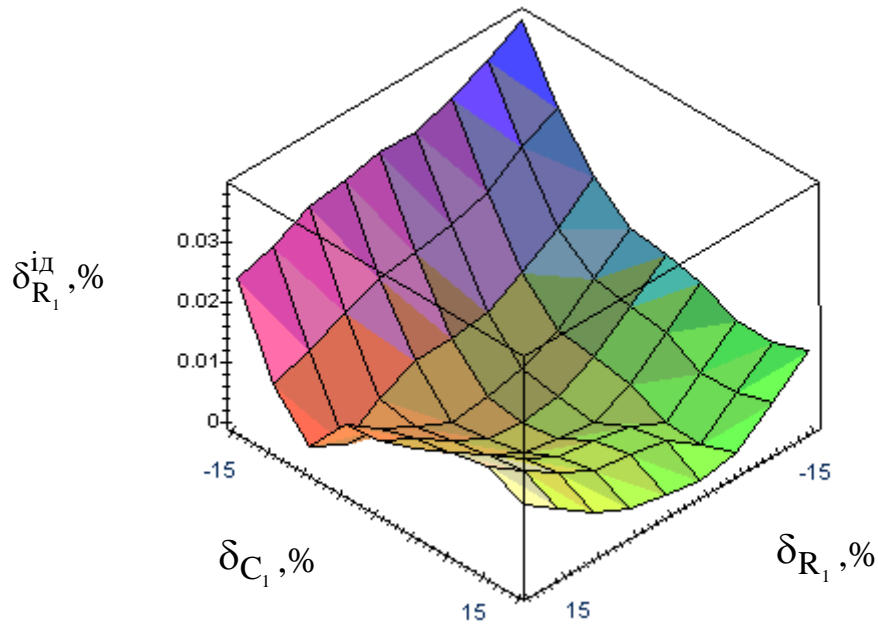


Рис. 3.50. Залежність відносної похибки ідентифікації ПД R_1 $\delta_{R_1}^{id}$ від відносних відхиленнях δ_{R_1} та δ_{C_1}

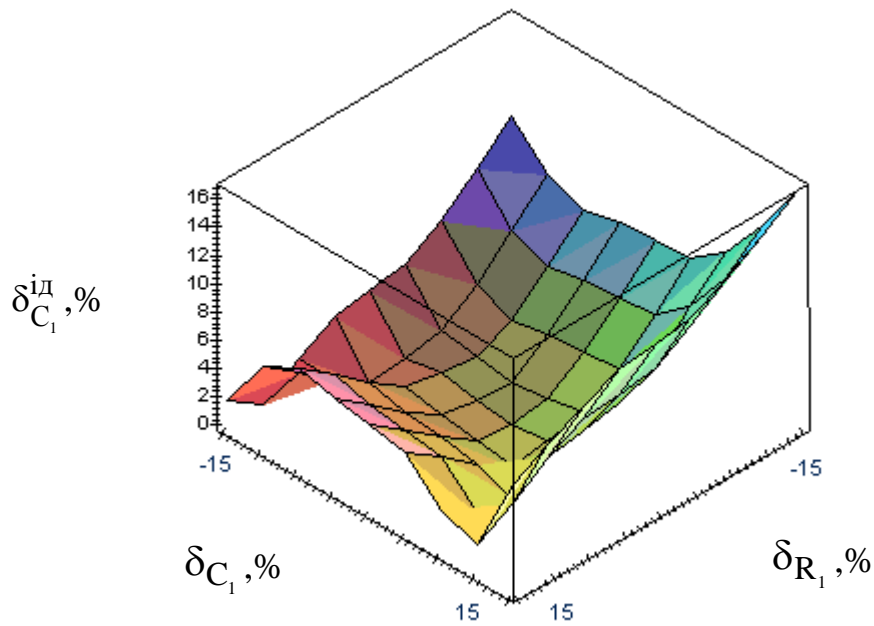


Рис. 3.51. Залежність відносної похибки ідентифікації ПД C_1 $\delta_{C_1}^{id}$ від відносних відхиленнях δ_{R_1} та δ_{C_1}

Висновки

1. За допомогою теорії чутливості проаналізовано вплив внутрішніх параметрів ЕМ (параметрів роторного кола R_r , L_r , L_m) на їхні вихідні характеристики. Аналіз розрахованих функцій чутливості дозволив зробити висновок про умови ідентифікації цих параметрів. Функції чутливості струмів $i_{s\alpha}(t)$, $i_{s\beta}(t)$ за параметрами вектора \mathbf{A} носять коливальний характер. Тому для оцінки стану ЕМ по $i_{s\alpha}(t)$, $i_{s\beta}(t)$ необхідно використовувати малий крок дискретизації по t , щоб забезпечити стійкість процесу ідентифікації. Функції чутливості $\omega_r(t)$ за параметрами вектора \mathbf{A} не носять коливального характеру, більш регулярні, тому інформації $\omega_r(t)$ потрібно надати більшу перевагу в процесі ідентифікації параметрів вектора \mathbf{A} , наприклад, за допомогою вагових коефіцієнтів в цільовій функції ідентифікації.

2. Розроблено метод та алгоритм ідентифікації таких ПД: активного опору обмоток ротора R_r , індуктивності обмоток ротора L_r , взаємної індуктивності між статором і ротором L_m за допомогою теорії чутливості. Суть методу полягає в попередньому розрахунку функцій чутливості та параметрів руху ЕМ при номінальних значеннях ПД, а потім – розрахунку відхилень виміряних параметрів руху від номінальних. Дослідження розробленого методу ідентифікації проведено за допомогою його математичного моделювання. Аналіз результатів моделювання показав, що запропонований алгоритм ідентифікації працює досить швидко, оскільки в процесі ідентифікації необхідно проводити лише обчислення відхилень від номінального руху ЕМ. Підрахунки номінального руху ЕМ $\mathbf{I}^H(t)$, $\mathbf{u}^H(t)$ здійснюються попередньо. Залежності відносних похибок ідентифікації від відносних відхилень параметрів носять суттєво нелінійний характер. Це пояснюється мультимодальністю цільової функції ідентифікації і великою жорсткістю математичної моделі ЕМ. Найменшу похибку ідентифікації даний алгоритм дає при ідентифікації взаємної індуктивності L_m . Похибки ідентифікації R_r та L_r мають великі значення. Це приводить до висновку про необхідність ідентифікації параметрів R_r та L_r іншими методами ідентифікації.

3. Розроблено метод та алгоритм ідентифікації таких ПД: активного опору обмоток ротора R_r , індуктивності обмоток ротора L_r , взаємної індуктивності між статором і ротором L_m за методом інваріантного поглиблення Н.Дістефано. Для підвищення точності ідентифікації виведено рівняння (3.28) для похибки фільтра Н.Дістефано, яке дозволяє постійно під час обчислень контролювати похибку визначення ПД ЕМ. Суть розробленого методу ідентифікації з одночасним контролем похибки ідентифікації полягає у розв'язанні системи диферен-

ційних рівнянь (3.24), (3.25), (3.28), (3.29). Аналіз результатів моделювання дає змогу дійти висновку, що даний алгоритм ідентифікації забезпечує збіжність і достатню точність для досить широкого діапазону початкових значень параметрів ротора. Але для його успішної роботи необхідний досить малий крок дискретизації по часу. Збіжність алгоритму залежить від вибору початкових значень. Це спричинюється тим, що математична модель ЕМ класифікується як жорстка система диференціальних рівнянь.

4. Виходячи з аналізу результатів ідентифікації ПД роторного кола за допомогою функцій чутливості та методу інваріантного поглиблення, а також результатів досліджень, викладених у розділах 2 і 3, запропоновано узагальнений метод ідентифікації ПД ЕМ в динамічному режимі та алгоритм його роботи, який полягає в почерговому використанні методів ідентифікації за допомогою теорії чутливості та методу інваріантного поглиблення Н.Дістефано. Виміряні значення кутової швидкості, струмів в обмотках статора $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ та напруги на обмотках статора $U_A(t), U_B(t), U_C(t)$ використовуються як вхідні дані для ідентифікації за допомогою теорії чутливості. Результати ідентифікації за цим методом використовуються як вхідні дані для ідентифікації за методом інваріантного поглиблення. Таким чином, уточнюються ПД ЕМ, особливо L_m .

5. Розглянуто питання про доцільність діагностування обмоток ЕМ за величиною добротності Q . Доказано, що величина Q найчутливіша до наявності короткозамкнених витків. За допомогою Q можна визначати малу кількість КЗВ. Виведено рівняння для визначення кількості КЗВ (3.43).

6. Запропоновано фазовий метод вимірювального перетворення Q , який полягає у застосуванні зразкового конденсатора для створення фазового зсуву між двома вихідними напругами вимірювального перетворювача Q . Фазовий зсув пропорційний величині Q (3.58).

7. На основі фазового методу вимірювального перетворення Q запропоновано вимірювальний перетворювач Q і числа КЗВ. Виведені та проаналізовані їх рівняння вимірювального перетворення, розраховано сімейство статичних характеристик вимірювального перетворення Q . Показано, що для ефективного вимірювання Q суттєве значення має вибір величини квантуючої частоти.

8. Запропоновано метод ідентифікації параметрів діагностування обмоток ЕМ за допомогою теорії чутливості. Проаналізовано результати роботи методу ідентифікації та показано, що алгоритм на базу запропонованого методу ідентифікації працює досить швидко, оскільки в процесі ідентифікації необхідно проводити

обчислення лише за формулами (3.84)– (3.85). Підрахунки $\mathbf{I}^H(t)$, $\mathbf{u}^H(t)$ здійснюються попередньо. Залежності відносних похибок ідентифікації від відносних відхилень параметрів носять нелінійний характер. Це пояснюється мультимодальністю цільової функції ідентифікації. Найменшу похибку ідентифікації даний алгоритм дає при ідентифікації ПД R_1 .

4. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТУВАННЯ

4.1. Узагальнений підхід до оцінки метрологічних характеристик

Інформаційно-вимірвальна техніка має великий арсенал різноманітних технічних засобів з нормованими метрологічними характеристиками. Тому актуальною є проблема вибору необхідного засобу вимірювань для вирішення конкретної вимірвальної задачі. Виходячи з режимів роботи засобів вимірювань, розрізняють їх статичні і динамічні метрологічні характеристики. До основних статичних метрологічних характеристик відносять такі: функція перетворення; статична характеристика; чутливість; адитивна та мультиплікативна похибки; похибка нелінійності [191]. Цих характеристик достатньо, щоб здійснити нормування точності засобів вимірювань в статичному режимі роботи. Необхідно також, щоб і математичний апарат досліджень засобів вимірювання в статичному режимі дозволяв достатньо просто отримувати виділені нормативними документами метрологічні характеристики. Складність полягає в тому, що функція вимірвального перетворення описує для різних засобів різні фізичні процеси, які відносяться до різних галузей знань, і є функціями багатьох змінних. Необхідно мати узагальнений для всіх них метод дослідження, який був би універсальним для всіх фізичних явищ, покладених в основу побудови засобів вимірювань. Як такий математичний апарат для дослідження статичних метрологічних характеристик є використання розкладу функції перетворення в ряд Тейлора [192]. Але такий підхід не дозволяє оцінити основні статичні метрологічні характеристики опосередкованих вимірювань. Тому в даній роботі дістав подальший розвиток відомого підходу розкладання функції перетворення в ряд Тейлора, який спрямований на отримання аналітичних залежностей для основних статичних метрологічних характеристик при опосередкованих вимірюваннях. Опосередковані вимірювання мають місце при вимірвальному перетворенні параметрів діагностування ЕМ [193].

Опосередкованими називаються вимірювання фізичної величини з перетворенням її роду чи обчисленням за результатами вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функційною залежністю $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Крім інформативного параметра, на результат вимірювань діють також впливні величини $\mathbf{f} = f(f_1, f_2, \dots, f_m)$, які викликають появу неінформативних складових (додаткових похибок) вимірвального перет-

ворення. Тому в загальному випадку функція перетворення опосередкованого вимірювання (рис. 4.1) матиме вигляд:

$$y = f(\mathbf{x}, \mathbf{f}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n, f_1, f_2, \dots, f_m) = f(v_1, v_2, \dots, v_{n+m}) = f(\mathbf{v}). \quad (4.1)$$

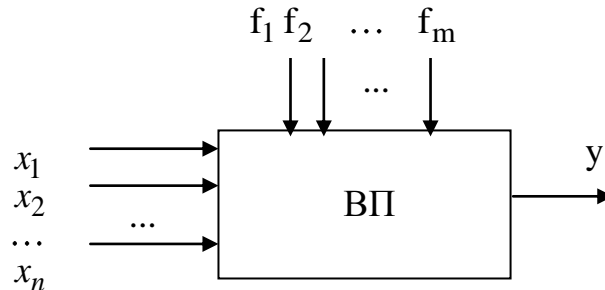


Рис. 4.1. Загальне представлення вимірювального перетворення при опосередкованих вимірюваннях

Розклавши (4.1) в ряд Тейлора, матимемо

$$f(v_1, v_2, \dots, v_{n+m}) = f(\Phi) + \sum_{i=1}^{n+m} \frac{\partial y}{\partial v_i} \Big|_{\Phi} \cdot (v_i - v_{iH}) + \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} \frac{\partial^2 y}{\partial v_i \partial v_j} \Big|_{\Phi} \cdot (v_i - v_{iH})(v_j - v_{jH}) + \dots \quad (4.2)$$

Індекс “ Φ ” при похідних означає, що вони визначаються при номінальних значеннях параметрів \mathbf{v} :

$$\Phi = (v_{1H}, v_{2H}, \dots, v_{n+mH}) = (x_{1H}, x_{2H}, \dots, x_{nH}, f_{1H}, f_{2H}, \dots, f_{mH}).$$

Провівши математичні перетворення рівняння (4.2), отримаємо:

$$y = f(x_{1H}, x_{2H}, \dots, x_{nH}, f_{1H}, f_{2H}, \dots, f_{mH}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Big|_{\Phi} \cdot (x_i - x_{iH}) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial y}{\partial f_i} \Big|_{\Phi} \cdot (f_i - f_{iH}) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_{\Phi} \cdot (x_i - x_{iH}) \cdot (x_j - x_{jH}) + \\
& \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{\partial^2 y}{\partial f_i \partial f_j} \Big|_{\Phi} \cdot (f_i - f_{iH}) \cdot (f_j - f_{jH}) + \\
& + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial f_j} \Big|_{\Phi} \cdot (x_i - x_{iH}) \cdot (f_j - f_{jH}) + \dots
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Згідно [193] введемо такі позначення:

- $f(x_{1H}, x_{2H}, \dots, x_{nH}, f_{1H}, f_{2H}, \dots, f_{mH})$ - вільний член розкладу при номінальних значеннях параметрів;

- $\sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \Big|_{\Phi} = \sum_{i=1}^n S_i$ - сума номінальних коефіцієнтів перетворення або чутливостей ВП;

рення або чутливостей ВП;

- $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_{\Phi} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S'_{ij}$ - сума змін чутливостей в діапазоні перетворень;

ні перетворень;

- $\sum_{i=1}^m \frac{\partial y}{\partial f_i} \Big|_{\Phi} = \sum_{i=1}^m \beta_i$ і $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{\partial^2 y}{\partial f_i \partial f_j} \Big|_{\Phi} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \beta'_{ij}$ - коефіцієнти впливу впливних величин на вихідний параметр вимірювального перетворення у;

впливу впливних величин на вихідний параметр вимірювального перетворення у;

- $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial f_j} \Big|_{\Phi} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij}$ - коефіцієнти впливу впливних величин на номінальні чутливості S_i вимірювального перетворення.

З урахуванням прийнятих позначень рівняння (4.3) представимо у вигляді

у вигляді

$$\begin{aligned}
y = & f(x_{1H}, x_{2H}, \dots, x_{nH}, f_{1H}, f_{2H}, \dots, f_{mH}) + \sum_{i=1}^n S_i \Big|_{\Phi} \cdot (x_i - x_{iH}) + \\
& + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S'_{ij} \Big|_{\Phi} \cdot (x_i - x_{iH}) \cdot (x_j - x_{jH}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \Big|_{\Phi} \cdot (x_i - x_{iH}) \cdot (f_j - f_{jH}) +
\end{aligned}$$

$$+ \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot (f_j - f_{j_H}) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \beta'_{ij} \cdot (f_i - f_{i_H}) \cdot (f_j - f_{j_H}) + \dots, \quad (4.4)$$

де

$$y = f(\Phi) + \sum_{i=1}^n S_i \cdot (x_i - x_{i_H}) +$$

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S'_{ij} \cdot (x_i - x_{i_H}) \cdot (x_j - x_{j_H}) + \dots$ - номінальна функція перетворення

вимірювального перетворення;

$$\Delta y_H = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S'_{ij} \cdot (x_i - x_{i_H}) \times (x_j - x_{j_H}) + \dots$$
 - абсолютна похибка

нелінійності номінальної функції перетворення;

$$\delta_H = \frac{\Delta y_H}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot (x_i - x_{i_H})}$$
 - відносна похибка нелінійності номінальної функції перетворення;

нелінійності номінальної функції перетворення;

$$\Delta y_M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \cdot (x_i - x_{i_H}) \cdot (f_j - f_{j_H})$$
 - абсолютна мультиплікативна похибка вимірювального перетворення;

мультиплікативна похибка вимірювального перетворення;

$$\Delta y_a = \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot (f_j - f_{j_H}) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \beta'_{ij} \cdot (f_i - f_{i_H}) \cdot (f_j - f_{j_H})$$
 - абсолютна адитивна похибка вимірювального перетворення.

Аддитивна похибка вимірювального перетворення.

На рис. 4.2 представлена модельна структурна схема ВП, яка відповідає рівнянню (4.4).

4.2. Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювального перетворення добротності

Отримана статична характеристика нелінійна, а функція перетворення добротності є вихідною для отримання аналітичних залежностей для оцінки таких статичних метрологічних характеристик: номінальна функція перетворення; чутливість; похибка нелінійності; адитивна і мультиплікативні складові похибок.

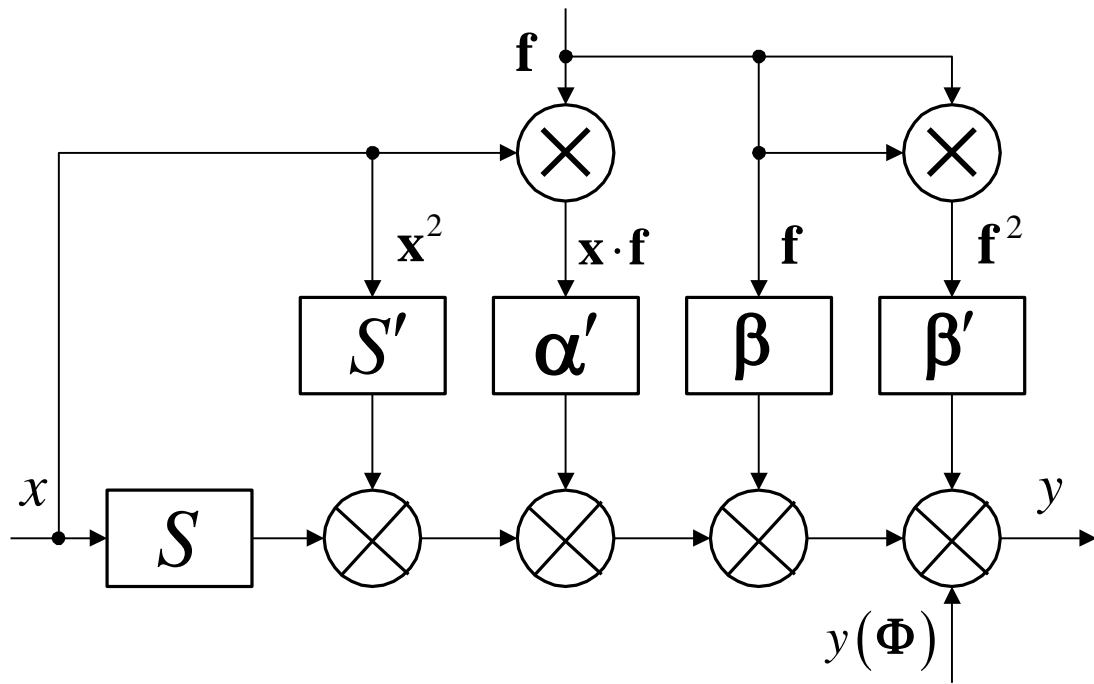


Рис. 4.2. Модельна структурна схема вимірювального перетворення при опосередкованих вимірюваннях

В робочих умовах вимірювальний канал добротності здійснює функціональне перетворення інформативного параметра Q у бінарний код N_x . Крім інформативного сигналу, на нього діють впливні величини $\bar{f} = (f_0, f_q)$, які мають зв'язок з вихідною величиною N_x і спричиняють виникнення неінформативних складових перетворення. В цьому випадку вимірювальний канал добротності можна представити як на рис. 4.3. В таблиці 4.1 наведені розраховані за методикою, викладеною в п. 4.1, аналітичні залежності для визначення основних статичних метрологічних характеристик вимірювального перетворення добротності [194].

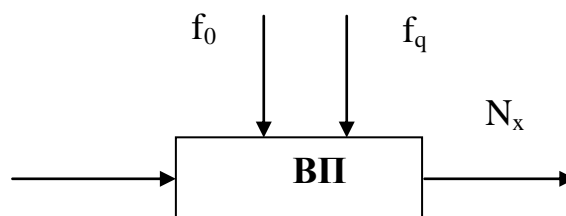


Рис. 4.3. Узагальнена структурна схема вимірювального каналу добротності

Таблиця 4.1.

Аналітичні залежності для визначення основних статичних метрологічних характеристик вимірювального перетворення добротності

№	Найменування	Аналітична залежність	№ ф-ли
1.	Номінальний коефіцієнт перетворення або чутливість вимірювального перетворення Q	$S_Q = \frac{\partial N_x}{\partial Q} = -\frac{f_0}{2\pi f_q} \frac{1}{(1+Q^2)}$	(4.5)
2.	Зміна чутливості по діапазону перетворення x	$S'_Q = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N_x}{\partial Q^2} = \frac{f_0}{2\pi f_q} \frac{Q}{(1+Q^2)^2}$ i $S''_Q = \frac{1}{6} \frac{\partial^3 N_x}{\partial Q^3} = -\frac{f_0}{2\pi f_q} \frac{3Q^2-1}{(1+Q^2)^3}$	(4.6)
3.	Коефіцієнти впливу зовнішньої величини f на вихідний параметр вимірювального перетворення N _x	$\beta_{0f_0} = \frac{\partial N_x}{\partial f_0} = \frac{1}{2\pi f_q} \text{arcctg}(Q)$ $\beta'_{0I_m} = \frac{\partial^2 N}{\partial I_m^2} = 0$ $\beta_{0f_q} = \frac{\partial N_x}{\partial f_q} = -\frac{f_0}{2\pi f_q^2} \text{arcctg}(Q)$ $\beta'_{0f_q} = \frac{\partial^2 N_x}{\partial f_q^2} = \frac{f_0}{\pi f_q^3} \text{arcctg}(Q)$	(4.7)
4.	Коефіцієнт впливу зовнішньої величини f на номінальну чутливість s ₀ вимірювального перетворення Q	$\alpha_{0f_0} = \frac{\partial^2 N_x}{\partial Q \partial f_0} = -\frac{1}{2\pi f_q} \frac{1}{1+Q^2}$ $\alpha_{0f_q} = \frac{\partial^2 N_x}{\partial Q \partial f_q} = \frac{f_0}{2\pi f_q^2} \frac{1}{1+Q^2}$	(4.8)
5.	Номінальна функція перетворення	$N_x = S_Q Q + \alpha_{0f_0} Q \Delta f_0 +$ $+ \alpha_{0f_q} Q \Delta f_q + \beta_{0f_0} \Delta f_0 +$ $+ \beta_{0f_q} \Delta f_q + \beta'_{0f_0} \Delta f_0^2 +$ $+ \beta'_{0f_q} \Delta f_q^2$	(4.9)

Продовження

6.	Абсолютна похибка нелінійності номінальної функції перетворення ΔN_H	$\Delta N_H = -\frac{f_0}{2\pi f_q} \frac{(Q - Q_H)(1 + Q \cdot Q_H)}{(1 + Q^2)^2}$	(4.10)
7.	Відносна похибка нелінійності номінальної функції перетворення δ_H	$\delta_H = -\frac{1 + Q \cdot Q_H}{(1 + Q^2)^2 \operatorname{arctg}(Q)}$	(4.11)
8.	Мультиплікативна похибка	$\Delta N_M = -\frac{1}{2\pi f_q^2} \frac{Q - Q_H}{1 + Q^2} \times [f_0 f_{qH} - f_q f_{0H}]$	(4.12)
9.	Адитивна похибка	$\Delta N_a = \frac{\operatorname{arctg}(Q)}{2\pi f_q^2} \times [2f_q^2 f_0 - f_q^2 f_{0H} - 3f_0 f_q f_{qH} + 2f_0 f_{qH}^2]$	(4.13)

Результати моделювання похибок вимірювального перетворення добротності наведені на рис. 4.4-4.9.

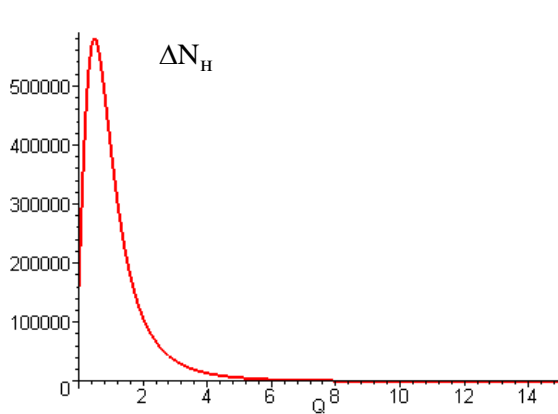


Рис. 4.4. Абсолютна похибка нелінійності вимірювального перетворення добротності

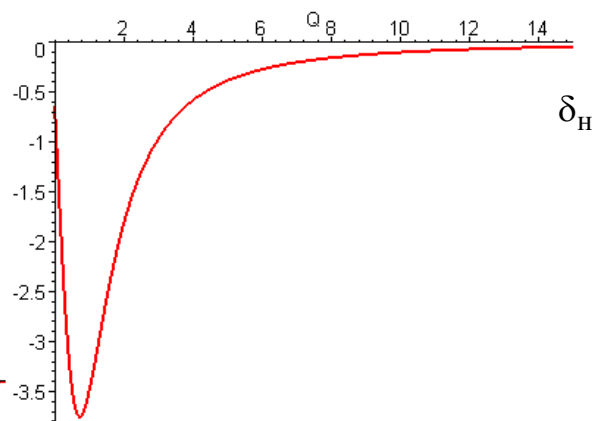


Рис. 4.5. Відносна похибка нелінійності вимірювального перетворення добротності

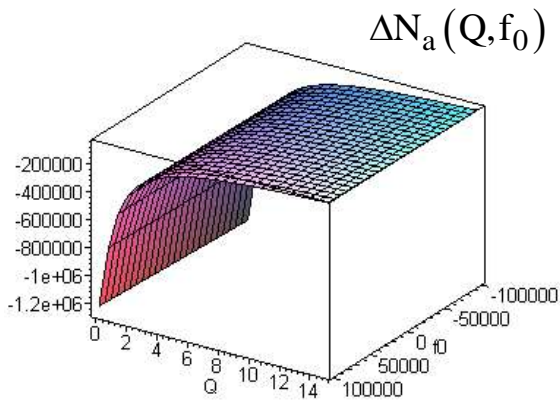


Рис. 4.6. Адитивна похибка $\Delta N_a(Q, f_0)$

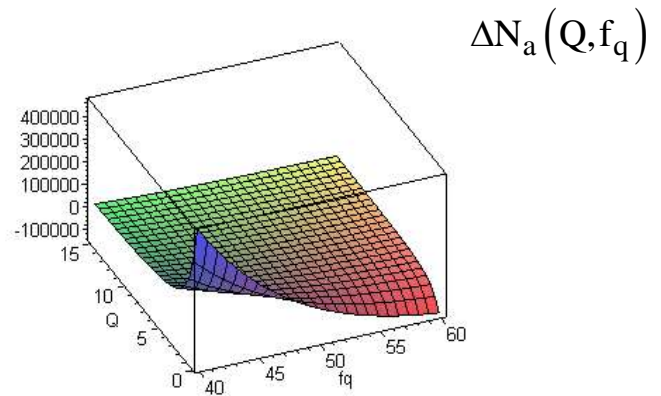


Рис. 4.7. Адитивна похибка $\Delta N_a(Q, f_q)$

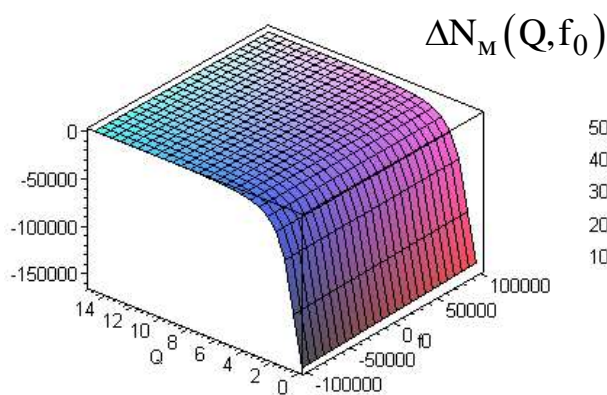


Рис. 4.8. Мультиплікативна похибка $\Delta N_M(Q, f_0)$

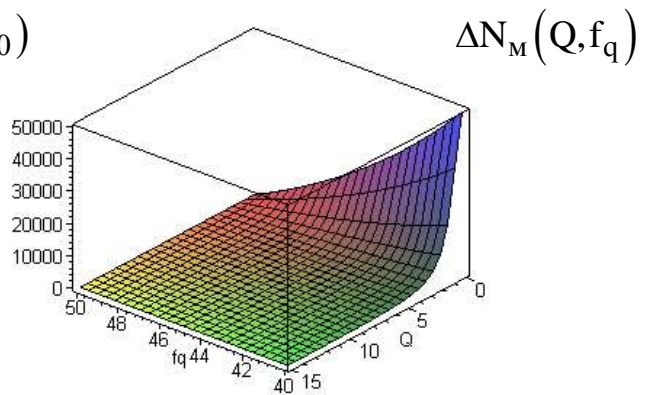


Рис. 4.9. Мультиплікативна похибка $\Delta N_M(Q, f_q)$

4.3. Оцінка метрологічних характеристик вимірювального каналу ковзання

Ковзання в АД характеризує відставання частоти поля статора f_m від частоти поля ротора f_r

$$S = \frac{f_m - f_r}{f_m} = 1 - \frac{f_r}{f_m} \quad (4.14)$$

i є досить важливим параметром, який в значній мірі визначає якість ЕМ [195-199]. Для побудови засобів вимірювань ковзання з наперед заданими метрологічними характеристиками необхідно мати математичну модель вимірювального каналу, основною складовою якої є модель об'єкта вимірювання. На даний момент відома жорстка нелінійна математична модель АД [9].

Така система складна для розв'язання і не дозволяє отримати аналітичні залежності для оцінки основних динамічних і статичних метрологічних характеристик засобів вимірювання даного інформативного параметра.

Спрощена лінеаризована модель [178] являє собою диференціальне рівняння першого порядку

$$\left[T_{em} \cdot \frac{dM(t)}{dt} + M(t) \right] \cdot Y_0 = S, \quad (4.15)$$

де T_{em} - електромагнітна постійна часу;
 $M(t)$ - електромагнітний обертальний момент;
 Y_0 - крутизна статичної характеристики.

Для отримання функції перетворення запишемо рівняння руху ротора АД

$$-J \cdot W_0 \cdot \frac{dS(t)}{dt} = p \cdot (M(t) - M_0), \quad (4.16)$$

де J - момент інерції ротора;
 M_0 - момент механічних втрат;
 W_0 - частота обертання поля статора;
 p - кількість пар полюсів.

Використавши (4.15) і (4.16), отримаємо таке диференціальне рівняння другого порядку

$$\frac{Y_0 \cdot T_{eo} \cdot J \cdot W_0}{p} \frac{d^2S(t)}{dt^2} + \frac{Y_0 \cdot J \cdot W_0}{p} \frac{dS(t)}{dt} + S(t) = Y_0 \cdot M_0. \quad (4.17)$$

Аналітичний розв'язок рівняння (4.17) матиме вигляд

$$S(t) = - \frac{(M_0 \cdot T_{eo} \cdot Y_0 K - T_{eo} \cdot K) e^{\left(\frac{-t}{2T_{eo}}\right)} \cos\left(\frac{K \cdot t}{2}\right)}{T_{eo} \cdot K} - \frac{-K \cdot T_{eo} \cdot Y_0 \cdot M_0 + (M_0 \cdot Y_0 - 1) e^{\left(\frac{-t}{2T_{eo}}\right)} \sin\left(\frac{K \cdot t}{2}\right)}{T_{eo} \cdot K} \quad (4.18)$$

де $K = \sqrt{\frac{-4T_{e0} + J \cdot Y_0 \cdot W_c}{J \cdot Y_0 \cdot T_{e0}^2 \cdot W_c}}$ - постійний коефіцієнт.

Графічна залежність зміни ковзання S в часі наведена на рис. 4.10.

Для доведення можливості заміни нелінійної математичної моделі спрощеною лінеаризованою, проведемо оцінку похибки розв'язків нелінійної моделі (4.15) багатокроковим методом Гіра та лінеаризованої моделі (4.18). З рис. 4.11 видно, що абсолютна похибка моделі не перевищує 0.1, тобто знаходиться в допустимих межах.

В статичному режимі роботи засобу вимірювання його вихідний сигнал вважається незмінним протягом часу, достатнього для зчитування показів. Для такого випадку використовуємо узагальнений підхід дослідження статичних метрологічних характеристик метод розкладу функції перетворення в ряд Тейлора.

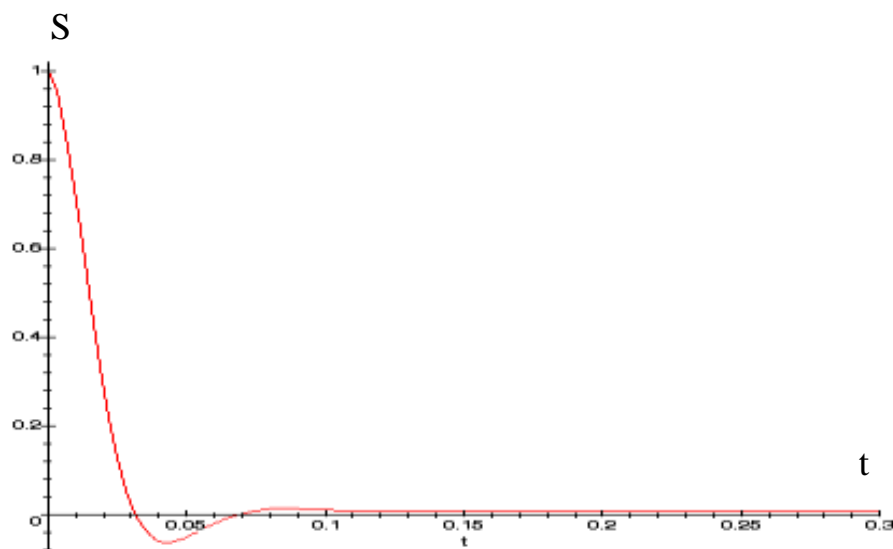


Рис. 4.10. Зміна ковзання в часі

Структурна схема засобу вимірювання ковзання наведена на рис. 4.12 і має такі складові: об'єкт вимірювання ОВ; фотоелектричний сенсор ФЕС, на виході якого формується частота ротора f_r , пропорційна кутовій швидкості W_r ; аналого-цифровий перетворювач частоти f_r у двійковий код N_r ; перетворювач змінної напруги електричної мережі у постійну імпульсну; аналого-цифровий перетворювач частоти промислової мережі f_m у двійковий код N_m ; числовий перетворювач CPU.

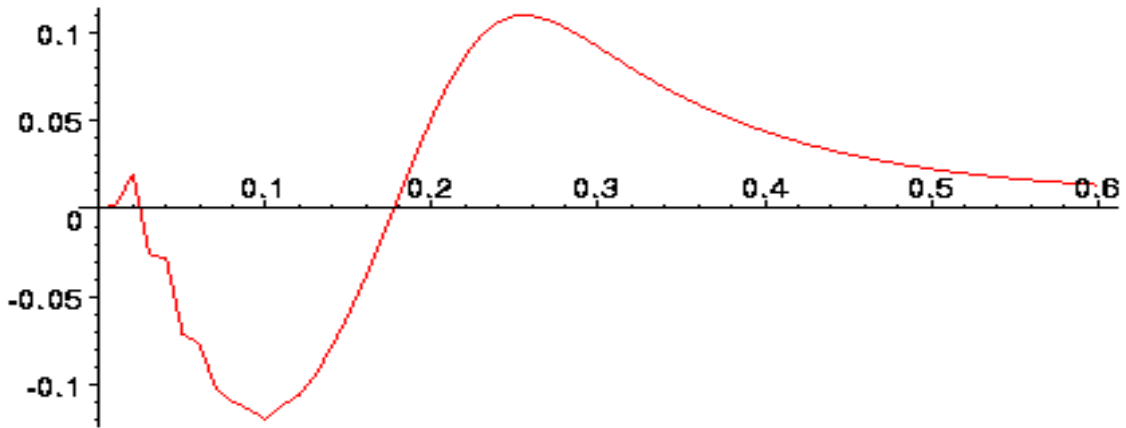


Рис. 4.11. Графічне подання похибки лінеаризації

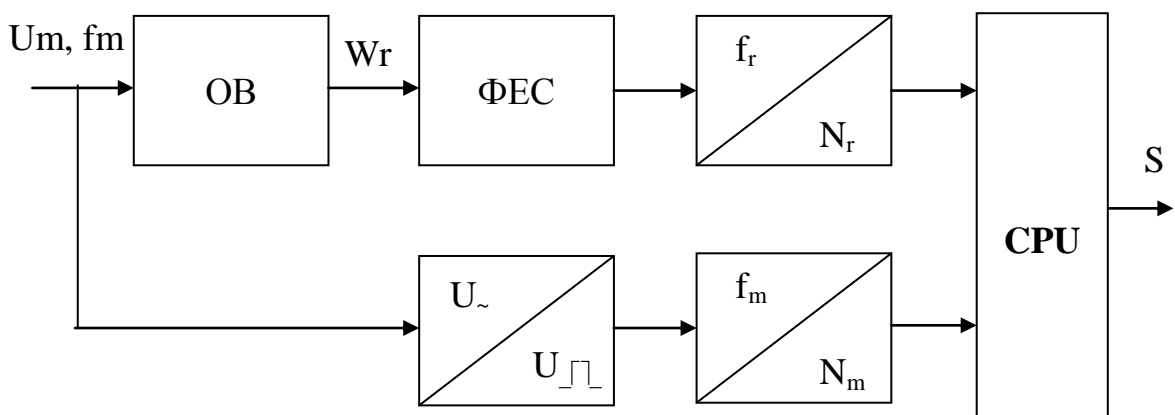


Рис. 4.12. Структурна схема вимірювального каналу ковзання

Отже, основними елементами такої схеми є вимірювальний канал кутової швидкості [42]

$$N_r = \frac{2\pi \cdot f_{or}}{Z \cdot W_r(t)} \quad (4.19)$$

і вимірювальний канал частоти промислової мережі [219]

$$N_m = \frac{f_{om}}{f_m}, \quad (4.20)$$

де f_{or} , f_{om} – частоти зразкових генераторів відповідних каналів;
 z - розрізнявальна здатність фотоелектричного сенсора кутової швидкості.

З урахуванням (4.19) і (4.20) остаточно функцію перетворення вимірювального каналу ковзання подамо у вигляді

$$S = 1 - \frac{1}{Z} \cdot \frac{f_{or}}{f_{om}} \cdot \frac{N_m}{N_r} \quad (4.21)$$

Отже, вхідними величинами числового перетворення ковзання (рис. 4.31) є двійковий код N_m і N_r , а до впливних величин відносяться Z , f_{or} , f_{om} .

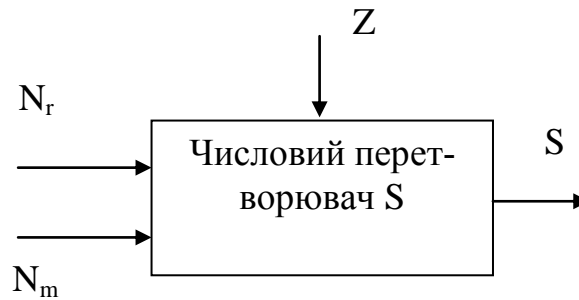


Рис. 4.31. Схема вимірювального перетворення ковзання

Отримаємо аналітичні залежності для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу ковзання (табл. 4.2).

Оскільки статична характеристика такого засобу вимірювання лінійна, то похибка нелінійності номінальної функції перетворення відсутня.

Аналіз отриманої функції перетворення показує, що на процес перетворення інформативного параметру s у вихідний сигнал впливає декілька впливних величин f_{or} , f_{om} , Z . В зв'язку з тим, що частоти квантування на виході кварцового резонатора f_{or} , f_{om} є високостабільними, то оцінимо функції впливу на результати вимірювання ковзання тільки від роздільної здатності Z фотоелектричного сенсора (табл. 4.3).

На рис. 4.13-4.21 показано результати математичного моделювання похибок вимірювального каналу ковзання.

Аналіз рис. 4.13-4.21 показує, що адитивна, мультиплікативна та сумарна складові похибок вимірювального каналу ковзання зменшуються при зменшенні N_r (більш точніші вимірювання в нижньому діапазоні частот обертання) та при зменшенні Z (при зменшенні розрізняльної здатності фотоелектричного сенсора кутової швидкості).

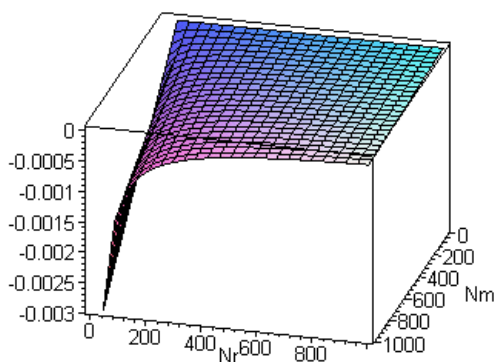
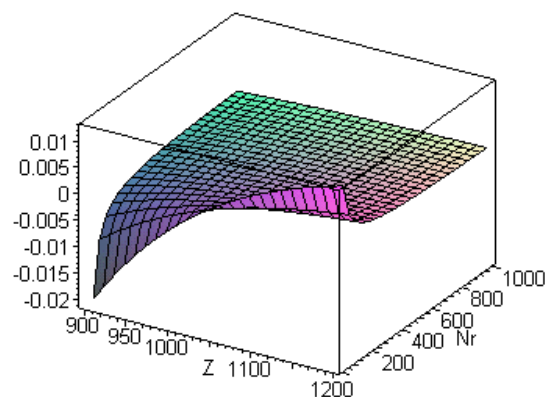
Таблиця 4.2.

Вихідні залежності для оцінки статичних
метрологічних характеристик

№	Найменування	Аналітична залежність	
1	Номінальний коефіцієнт перетворення або чутливість S до N_r	$S_{N_r} = \frac{\partial S}{\partial N_r} = \frac{f_{or}}{Z \cdot f_{om}} \cdot \frac{N_m}{N_r^2}$	(4.22)
2	Номінальний коефіцієнт перетворення або чутливість S до N_m	$S_{N_m} = \frac{\partial S}{\partial N_m} = -\frac{f_{or}}{Z \cdot f_{om}} \cdot \frac{1}{N_r}$	(4.23)
3	Зміна чутливості S'_{N_r} по діапазону перетворення	$S'_{N_r} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S}{\partial N_r^2} = -\frac{f_{or}}{Z \cdot f_{om}} \cdot \frac{N_m}{N_r^3}$	(4.24)
4	Зміна чутливості S'_{N_m} по діапазону перетворення	$S'_{N_m} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial N_m^2} = 0$	(4.25)
5	Коефіцієнт сумісного впливу параметрів N_r і N_m на швидкість зміни S	$\gamma = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial N_r \partial N_m} = \frac{1}{2} \cdot \frac{f_{or}}{Z \cdot f_{om}} \cdot \frac{1}{N_r^2}$	(4.26)
6	Номінальна функція перетворення	$S = S(\Phi) + S_{N_r} \cdot (N_r - N_{rH}) + S_{N_m} \cdot (N_m - N_{mH}) + S'_{N_r} \cdot (N_r - N_{rH})^2 + S'_{N_m} \cdot (N_m - N_{mH})^2 + \gamma \cdot (N_r - N_{rH})(N_m - N_{mH})$	(4.27)

Функції впливу від частоти промислової мережі

№	Найменування	Аналітична залежність	
1	Коефіцієнт впливу частоти Z на ковзання S	$\beta = \frac{\partial S}{\partial Z} = \frac{f_{or}}{Z^2 f_{om}} \cdot \frac{N_m}{N_r}$	(4.28)
2	Швидкість зміни коефіцієнта впливу Z на S	$\beta' = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} = -\frac{f_{or}}{Z^3 \cdot f_{om}} \cdot \frac{N_m}{N_r}$	(4.29)
3	Коефіцієнт впливу Z на номінальну чутливість S_{N_r}	$\alpha_{N_r} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial N_r \partial Z} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{f_{or}}{Z^2 \cdot f_{om}} \cdot \frac{N_m}{N_r^2}$	(4.30)
4	Коефіцієнт впливу Z на номінальну чутливість S_{N_m}	$\alpha_{N_m} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial N_m \partial Z} = \frac{f_{or}}{Z^2 \cdot f_{om}} \cdot \frac{1}{N_r}$	(4.31)
5	Мультиплікативна похибка перетворення	$\begin{aligned} \Delta S_m &= \alpha_{N_r} \cdot (N_r - N_{rH})(Z - Z_H) + \\ &+ \alpha_{N_m} \cdot (N_m - N_{mH})(Z - Z_H) = \\ &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{f_{or}}{Z^2 \cdot f_{om} \cdot N_r^2} \cdot (Z_H - Z) \times \\ &\times (N_{rH} \cdot N_m - N_r \cdot N_{mH}) \end{aligned}$	(4.32)
6	Адитивна похибка перетворення	$\begin{aligned} \Delta S_a &= \beta \cdot (Z - Z_H) + \beta' \cdot (Z - Z_H)^2 = \\ &= \frac{1}{Z^3} \cdot \frac{f_{or}}{f_{om}} \cdot \frac{N_m}{N_r} \cdot (Z - Z_H) \cdot Z_H \end{aligned}$	(4.33)

 $\Delta S_a(N_r, N_m)$ Рис. 4.13 Абсолютна адитивна похибка $\Delta S_a(N_r, N_m)$ при $Z = \text{const}$ $\Delta S_a(N_r, Z)$ Рис. 4.14. Абсолютна адитивна похибка $\Delta S_a(N_r, Z)$ при $N_m = \text{const}$

$$\Delta S_a(N_m, Z)$$

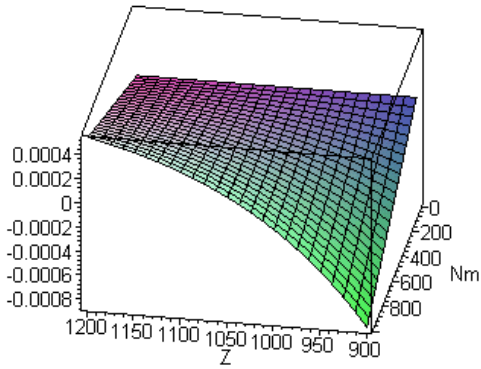


Рис. 4.15. Абсолютна адитивна похибка $\Delta S_a(N_m, Z)$ при $N_r = \text{const}$

$$\Delta S_m(N_m, Z)$$

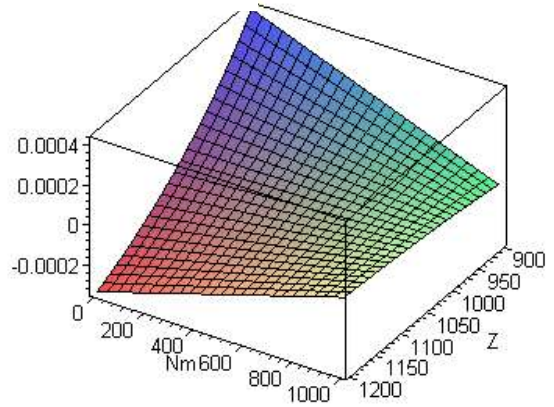


Рис. 4.16. Абсолютна мультиплікативна похибка $\Delta S_m(N_m, Z)$ при $N_r = \text{const}$

$$\Delta S_m(N_r, N_m)$$

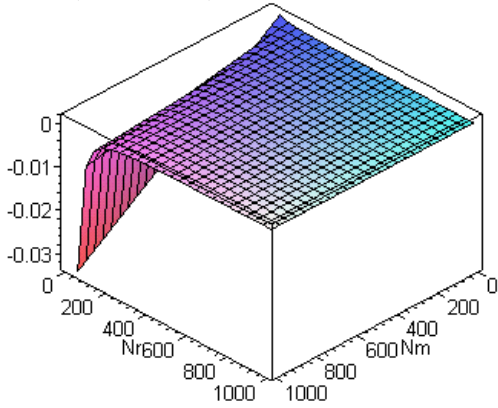


Рис. 4.17. Абсолютна мультиплікативна похибка $\Delta S_m(N_r, N_m)$ при $Z = \text{const}$

$$\Delta S_\Sigma(N_r, N_m)$$

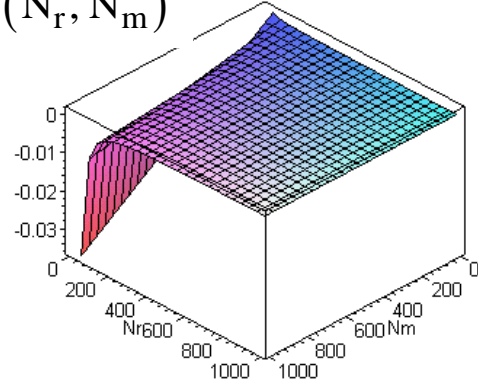


Рис. 4.18. Абсолютна сумарна похибка $\Delta S_\Sigma(N_r, N_m)$ при $Z = \text{const}$

$$\Delta S_m(N_r, Z)$$

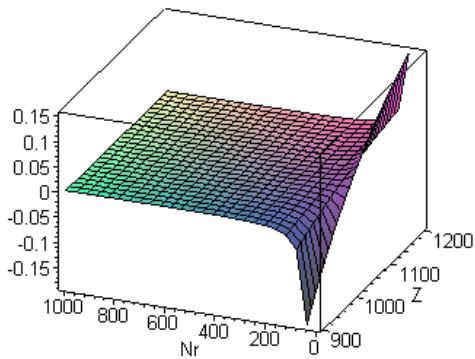


Рис. 4.19. Абсолютна мультиплікативна похибка $\Delta S_m(N_r, Z)$ при $N_m = \text{const}$

$$\Delta S_\Sigma(N_r, Z)$$

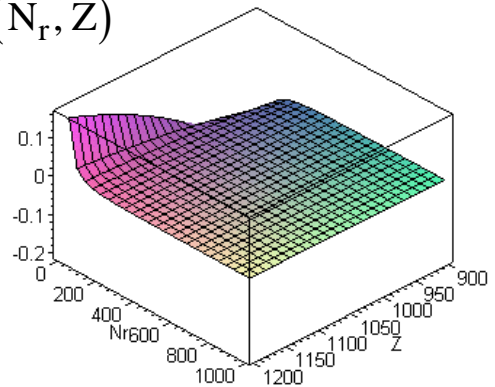


Рис. 4.20. Абсолютна сумарна похибка $\Delta S_\Sigma(N_r, Z)$ при $N_m = \text{const}$

$$\Delta S_{\Sigma}(N_m, Z)$$

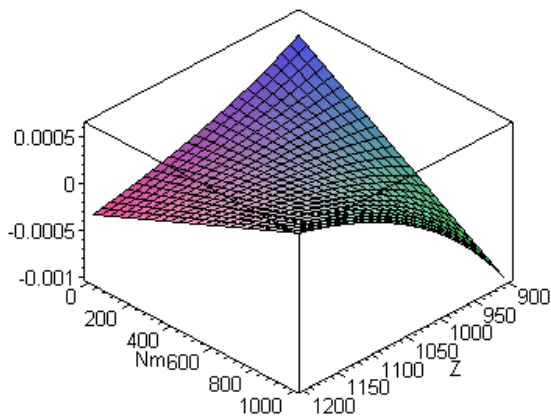


Рис. 4.21. Абсолютна сумарна похибка $\Delta S_{\Sigma}(N_m, Z)$ при $N_r = \text{const}$

Висновки

1. Отримав подальший розвиток підхід до оцінки статичних метрологічних характеристик за допомогою розкладання функції вимірювального перетворення в ряд Тейлора для опосередкованих вимірювань, що дозволило узагальнити методику отримання аналітичних залежностей для оцінки таких основних статичних метрологічних характеристик:

- номінальний коефіцієнт перетворення (чутливість вихідного параметра вимірювального перетворення по інформативному входному параметру);
- зміна чутливості по діапазону перетворення;
- коефіцієнти впливу впливних величин на вихідний параметр вимірювального перетворення;
- коефіцієнти впливу впливних величин на номінальну чутливість вимірювального перетворення;
- абсолютна похибка нелінійності номінальної функції перетворення;
- відносна похибка не лінійності номінальної функції перетворення;
- абсолютна мультиплікативна похибка вимірювального перетворення;
- абсолютна адитивна похибка вимірювального перетворення.

Наведено структурну схему вимірювального перетворення при опосередкованих вимірюваннях.

2. Отримано аналітичні залежності для номінальної функції перетворення; чутливості; похибки нелінійності; мультиплікативної і

адитивної похибок засобу вимірювання добротності обмоток ЕМ. Показано, що статична характеристика вимірювального перетворення нелінійна. За допомогою програмного середовища Maple V R5 здійснено моделювання похибок нелінійності, адитивних та мультиплікативних похибок, що дозволяє синтезувати мікропроцесорні засоби вимірювань із нормованими метрологічними характеристиками.

3. Для оцінки динамічних метрологічних характеристик засобів вимірювання ковзання запропоновано лінеаризовану математичну модель у вигляді диференційного рівняння другого порядку. В статичному режимі роботи засобу вимірювання отримано функцію перетворення і шляхом розкладання її в ряд Тейлора оцінено функції впливу роздільної здатності фотоелектричного сенсора на результати вимірювання. Отримано аналітичні залежності для оцінювання адитивної і мультиплікативної похибок вимірювального перетворення інформативного параметра, чутливості, номінальної функції перетворення, які дозволять розробляти засоби вимірювання ковзання з наперед заданими нормованими метрологічними характеристиками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 7287-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. - М.: Госкомстандарт, 1987. - 52с.
2. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытания. М.: Госкомстандарт, 1986. -42с.
3. Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. Про вдосконалення програм випробувань електричних машин/ В кн. "Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини". Збірник наукових праць, випуск №3.-К.:ФАДА, ЛТД, 1999, с. 101-104.
4. Векслер М.С., Теплинский А.М. Шунты переменного тока.- Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987.-120с.
5. Швецкий Б.И. Электронные цифровые приборы.- К.: Техніка, 1991.- 191с.
6. Измерения в электронике: Справочник./ В.А.Кузнецов, В.А.Долгов, В.М.Коневских и др.; под ред. В.А.Кузнецова.- М.: Энергоатомиздат, 1987.-512с.
7. Лейтман М.Б. Нормирующие измерительные преобразователи электрических сигналов.- М.: Энергоатомиздат, 1986.-144с.
8. Alexandrovitz A. Digital simulation of induction motor represented through space phasors. //Conf. Elec. and Electron. Eng. Is Israel, Tel-Aviv, Apr. 7-9, 1987.
9. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин.-М.: Высш.шк., 1987.-248с.
10. Коробейников Б.А., Ищенко А.И., Тадессе М. Исследование переходных процессов в симметричных асинхронных двигателях с помощью обобщенного вектора.//Электромеханика, 1985, №4, с.31-34.
11. Чабан В.И., Белый Л.А. Единая математическая модель синхронной и асинхронной машин как элементов системы. //Изв. вузов. Электромеханика, 1984, №3, с.24-28.
12. Малиновский А.Е., Талюко В.В. Дифференциальные уравнения несимметричного асинхронного двигателя, не содержащие периодических коэффициентов.//Электричество, 1981, №7, с.64-66.
13. Сторожко С.П. Расчет переходных электромагнитных процессов в асинхронном двигателе с индукционными сопротивлениями в цепи ротора.//Изв.вузов.Электромеханика, 1980, №1, с.66-72.
14. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.-368с.

15. Чучман Ю.И. Многоцелевая математическая модель электрической машины. // Электротехника, 1990, №9, с.26-29.
16. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс).-М.: Высш.шк., 1987.
17. J.Roger Folch, V.J.Lasaro Joares Modelling of induction motors in transient operation using finite element method./ Int. Conf. «Electrical Drives and Power Electronics» EDPE'96, Proceeding volumes 1, the High Tatras, Slovakia, pp.221-226.
18. Сакая Ямамура Спирально-векторная теория электрических машин переменного тока. // Электротехника, 1996, №10, с.7-15.
19. М.Менаа, О.Тouhami, М.Бenhaddadi, R.Ibtiouen Analysis of induction motor by a spiral vector theory.// Second Int. Scientific Conf. «Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems» UEES'96, Proceeding volumes 2, 1996, Szczecin, Poland, pp.527-532.
20. Трещев И.И. Исследование динамических режимов в машинах переменного тока по переходным функциям. //Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1991, №2, с.46-50.
21. Арменский Е.В., Кузина И.В., Фалк Г.Б. Электромашинные устройства автоматики.- М.: Высш. шк., 1986.
22. Калявин В.П., Тарасов С.В., Юхнович В.А. Построение и анализ диагностической модели асинхронного электродвигателя.// Изв. вузов. Приборостроение, 1989, №9, с.61-67.
23. R.Fiser, S.Ferkolj Dynamic analysis of Induction Motor with rotor faults. /Int. Conf. «Electrical Drives and Power Electronics» EDPE'96, Proceeding volumes 1, the High Tatras, Slovakia, pp.106-111.
24. Моделювання електромеханічних систем: Підручник. // Укл.: О.П.Чорний, А.В.Луговой, Д.Й.Родькін, Г.Ю.Сисюк, А.В.Садовой. -Кременчук, 2001.-376с.
25. Арменский Е.В., Фалк Г.Б. Электрические микромашины.-М.: Высш.шк., 1985. -231с.
26. Чабан В.И. Методы анализа электромеханических систем.-Львов: Выща школа. -1985. -191с.
27. Чабан В.И. Основы теории переходных процессов электромашинных систем. -Львов: Выща школа. -1986. -200с.
28. Чабан В.И. Уравнение исполнительного асинхронного двигателя с полым ферромагнитным ротором // Техническая электродинамика. -1987. №6. -с.71-75.
29. Чабан В.Й. Методи нелінійної електротехніки. -Львів: Світ. -1990. -167с.
30. Кучерук В.Ю. Огляд методів математичного моделювання електричних машин. //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-Хмельницький.-1999.-№2.-с.17-23.

31. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах.- М.: Высш.шк., 1985.-536с.
32. Дьяконов В.П. Математическая система Maple V R3/R4/R5. – М.: «Солон», 1998.-400с.
33. Осин И.Н., Шакарян Ю.Г. Электрические машины. Синхронные машины. -М.: Высш.шк, 1990.-303с.
34. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины.- Л.:Энергия. Ленигр.отд-ние, 1985.
35. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока.-Л.:Энергия. Ленигр.отд-ние, 1980.-256с.
36. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока.-Л.:Энергия. Ленигр.отд-ние, 1980.-344с.
37. Жиц М.З. Переходные процессы в машинах постоянного тока.-М.:Энергия, 1974.-112с.
38. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами:Пер.с.англ.-М.: Энергоатомиздат, 1989.-184с.
39. Кучерук В.Ю. Класифікація та аналіз методів оцінки стану електричних машин. //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-Хмельницький.-1999.-№4.-с.56-62.
40. Кирианаки Н.В., Гайдучок Р.М. Цифровые измерения частотно-временных параметров сигналов.-Л.:Выща шк.,1978.-168с.
41. Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации: Учеб. пособие/ В.А.Поджаренко, А.Д.Азаров, В.А.Власенко, И.И.Коваленко. -К.: Вища шк., 1990.- с.7-61.
42. Кучерук В.Ю., Кухарчук В.В. Аналіз та практична реалізація мікропроцесорного засобу вимірювання кутової швидкості обертання електричних машин. //Вісник ВПІ.-1995.-№2.-с.12-16.
43. А.с. №1262385 СССР, МКИ G01P 3/489. Устройство для измерения скорости вращения / Карпов Е.А., Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., Мельничук П.Л. – 3822880/24-10; заявл. 12.12.84; опубл. 07.10.86, бюл. №37-7с.
44. А.с. №1364992 СССР, МКИ G01P 3/481. Устройство для измерения скорости вращения / Поджаренко В.А., Кухарчук В.В. – 3720282/24-10; заявл. 04.04.84; опубл. 07.01.88, бюл. №1.-4с.
45. А.с. №1352371 СССР, МКИ G01P 3/489. Цифровой тахометр / Маликов В.Т., Поджаренко В.А., Кухарчук В.В. и др. – 4007556/24-10; заявл. 14.01.86; опубл. 15.10.87, бюл. №38.-7с.
46. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Михалевич В.М., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. Датчик кутової швидкості для динамічних вимірювань.// Патент України на винахід №243374А від 17.07.98р.

47. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Михалевич В.М., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. Аналоговий датчик кутової швидкості.// Патент України на винахід №22701А від 11.03.97, бюл. № 3 від 30.06.98.

48. Кулаков П.І., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. Частотний датчик кутової швидкості.// Патент України на винахід №24398А від 17.07.98р.

49. Потапов Л.А., Юферов Ф.М. Измерение вращающих моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей. - М.: Машино-строение, 1976.-121с.

50. Лассан В.Л. Измерение угловых скоростей. - М.: Машино-строение, 1969.

51. Способы и устройства получения и обработки тахометрической информации / Казанцев Е.М., Напираев Л.Б., Павлович Н.В. М., Информэлектро, 1985.

52. Кирианаки Н.В., Гайдучок Р.М. Цифровые измерения частотно-временных параметров сигналов.-Л.: Выща школа, 1978.-168с.

53. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю. Інформаційно-вимірювальна система механічних характеристик електричних машин.// В кн. «Новые технологии, материалы, оборудование (исследования, разработки, внедрение)». Материалы докладов международных академических чтений, Украина, Киев, 1995, Укр. Техн. Акад., с.85-91.

54. Podzharenko V.A., Kucheruk V.Yu. Computer-Measuring System of the Mechanical Characteristics of Electrical Drives./ Int. Conf. «Electrical Drives and Power Electronics» EDPE'96, Proceeding volumes 2, the High Tatras, Slovakia, pp.633-637.

55. Kucheruk V.Yu., Podzharenko A.V. Computer-Measuring System for rotor balancing of Electromechanical Systems.// Second Int. Scientific Conf. «Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems» UEES'96, Proceeding volumes 2, 1996, Szczecin, Poland, pp.483-488.

56. Кучерук В.Ю., Поджаренко В.О. До питання про визначення моментів інерції електричних машин.// В кн. «Современная контрольно-испытательная техника промышленных изделий и их сертификация». Мат. НТК, Вып. 1, том 2, Мукачево, 1997, с.166-168.

57. Podzharenko V.A., Kucheruk V.Yu. New method of measurement of a moment of inertia of an electrical machines.// XIV IMEKO World Congress, Tampere, Finland, 1-6 June 1997, Volume III, Topics 3, pp.90-95.

58. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Гоменюк А.С. Новый способ измерения момента инерции электрических машин. //Научно-технический сборник «Автоматизация технологических процессов та промислова екологія», Выпуск 1, 1997, с.23-27.

59. Кучерук В.Ю., Кухарчук В.В., Поджаренко В.А. Аппаратная реализация средств измерения момента инерции.// Труды филиала МГТУ им. Н.Э.Баумана в г. Калуге. Специальный выпуск: Материалы международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2000», п. Симеиз, 18-23 сентября 2000г.-Калуга: Изд-во Н.Бочкаревой, 2000, с.283-287.

60. Кучерук В.Ю., Кухарчук В.В., Дудикевич В.Б., Поджаренко А.В. Методологія побудови засобів вимірювання моменту інерції роторів електричних машин.//Проблеми створення нових машин і технологій. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного інституту.- Выпуск 1/2000 (8), с.113-118.

61. Одинец С.С., Томилин Г.Е. Средства измерения крутящего момента. - М.: Машиностроение, 1977.

62. Долина В.И. Экспериментальное определение вращающих моментов двигателей и моментов сопротивления механизмов средней и большой мощности в эксплуатационных условиях.// Тр. ВНИИЭ, 1973, вып.42, с.103-116.

63. А.с. №1545107 СССР; МКИ G 01 L 3/00. Устройство для измерения электромагнитного момента асинхронного электродвигателя /Кривицкий М.Я., Вачегин А.М., Добрынин С.В. – 4281264/10; заявл. 13.07.87; опубл. 23.02.90, Бюл. №7, 4с.

64. Определение зависимости вращающего момента от угловой частоты вращения ротора в процессе прямого пуска вхолостую./ Совпель В.Б., Литвинов А.Е., Ярмоленко В.И., Дыбченко Р.С.: Донецкий политехн. ин-т.// Донецк, 1984. - Деп. в УкрНИИТИ №649 - Ук85.

65. Хомерики О.К., Саонишвили Т.П., Иванов А.В. Структурные методы повышения точности устройств косвенного измерения крутящих моментов. - В кн.: Информационно-измерительные системы. -Тезисы докладов .-Винница, 1985, с.200-201.

66. А.с. №1246029 СССР; МКИ G 01 R 31/24 Способ косвенного определения механической характеристики асинхронного электродвигателя/ Даниленко А.Н., Белобловский Н.И. – 3758833/24-07; заявл. 25.06.84; опубл. 23.07.86, Бюл. №27, 3с.

67. А.с. №1499290 СССР; МКИ G 01 R 31/34 Косвенный способ определения механических и пусковых характеристик асинхронного электродвигателя/ Фищук В.С., Криволапчук И.Г. – 4310013/24-10; заявл. 27.07.87; опубл. 07.08.89, Бюл. №29, 3с.

68. А.с. №15396997 СССР; МКИ G 01 R 31/34 Способ косвенного определения механической характеристики асинхронного электро-двигателя / Фищук В.С., Криволапчук И.Г., Загоруйко Г.А. – 4287367/24-07; заявл. 20.07.87; опубл. 30.01.90, Бюл. №4, 4с.
69. Краличкин Л.К. Измерение статического вращающего момента асинхронных электродвигателей.//Метрология, 1978, №9.
70. Акимов Л.В., Литвинов О.И., Спанцирети Н.П. Устройство для экспресс динамометрических испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. //Электротехника, №3, 1975, с.47-50.
71. Акимов Л.В., Борзяк Ю.Г., Литвинов О.И., Сосницкий И.И. Совершенствование динамометрических испытаний асинхронных двигателей. //Электротехника, №9, 1978, с.45-46.
72. Акимов Л.В., Борзяк Ю.Г., Колесник А.Д., Литвинов О.И., Сосницкий И.И. Исследование асинхронных двигателей перспективных серий.//Электротехника, №10, 1981, с.29-32.
73. 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, с.5-7.
74. А.с. №1543260 СССР; МКИ G 01 L 3/22 Устройство для динамометрических исследований электродвигателей./ Литвинов О.И., Петерек И.Л., Борзяк Ю.Г., Сосницкий И.И., Колесник А.Д. – 4167690/24-10; заявл. 26.12.86; опубл. 15.02.90, Бюл. №6, 5с.
75. А.с. №857754 СССР; МКИ G 01 L 3/22 Устройство для регистрации механических характеристик электродвигателей./ Бимба А.А., Лимба В.А., Лукошевичюс А.А., Мильчюс Э.П., Уканис П.П. – 2693109/18-10; заявл. 05.12.78; опубл. 23.08.81, Бюл. №31, 4с.
76. Синельников Е.М., Сомихина Г.С. Измерение вращающих моментов асинхронных двигателей при разбеге.// Электричество, №7, 1950, с.48-53.
77. А.с. №343169 СССР; МКИ G 01 M 1/10 Способ определения зависимости вращающего момента от скорости двигателя./ Барский С.З., Мясников Н.А. – 1404659/18-10; заявл. 17.02.70; опубл. 22.04.72, Бюл. №20, 2с.
78. Лейтман М.Б. Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей: (методы и аппаратура). - М.: Энергоатомиздат, 1983.
79. Костюков Ю.П., Костиков С.Н. Измерение динамических механических характеристик двигателей переменного тока./В кн.:

Электромеханические устройства и шины управления: Сб. научн. тр. Томского политехн. ин-та, Томск, 1987, с.167-171.

80. Соколов М.М., Масандролов Л.Б. Измерение динамических моментов в электроприводах переменного тока. - М.: Энергия, 1976.

81. Аббасова Э.М., Георгиади В.Х., Долина В.И., Заволокин В.И., Харламов А.А. Экспериментальное определение токов и моментов асинхронного электродвигателя со сменными короткозамкнутыми роторами при пусках./В кн.: Электромагнитные и тепловые исследования мощных электрических машин: Сб. научн. тр. ВНИИЭ, М., 1988, с.21-30.

82. Потапов Л.А., Еременко А.И., Колесников В.П., Образцов В.П. Измерение моментов и скорости вращения микроэлектродвигателей динамическим способом. - Л.: Информэлектро, 1973.

83. Исмаилов А.Г. Частотный датчик вращающего момента // Изв. Вузов. Электромеханика. -1987. -№ 7. -с.88-91.

84. Кучерук В.Ю. До питання про підвищення ефективності випробувань електричних машин у досліді холостого ходу.// В кн. «Наука и предпринимательство». Тезисы докладов междунар. симпозиума. -Винница-Львов, 1996, с.106.

85. Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю. Інформаційно-вимірвальні системи в електротехнічній промисловості.// В кн. «Наука и предпринимательство». Тезисы докладов междунар. симпозиума.-Винница-Львов, 1996, с.107.

86. Кучерук В.Ю. Аналіз існуючих засобів вимірювання механічних характеристик електричних машин. // Вимірвальна техніка та метрологія, Львів, №54, 1999, с.125-138.

87. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1974.

88. В.Ф.Сивокобыленко, В.А.Павлюков, Хенниуи Х. Метод расчета схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных двигателей. / Электротехника, 1996, №3, с.38-41.

89. А.с. №1372259 СССР, МКИ G 01R 31/34. Способ определения активных и индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора асинхронного двигателя/ Г.Г.Рогозин, Ю.И.Печуркин, Н.Г.Пятлина, В.И.Алексеев – 4092032/24-07; заявл. 24.07.86; опубл. 07.02.88, бюл. №5.-7с.

90. А.с. №1295347 СССР, МКИ G 01R 31/34. Способ определения активного, индуктивного сопротивлений и ЭДС асинхронного двигателя по высшим гармоникам / С.И.Кузовков, Н.Г.Широков – 3927765/24-07; заявл. 11.07.85; опубл. 07.03.87, бюл. №9.-5с.

91. Г.Божилев Метод за определяне на параметрите на асинхронните двигатели //Техническа мисъл, т. XXVI, №6, 1989, с.29-35.
92. A circuit approach to finite element analysis of a double squirrel cage induction motor / Belmans R. //IEEE Trans. Energy Convers. – 1990, 5, №4, pp. 719-724.
93. Е.К.Ещин, М.А.Тынкевич, В.В.Новоселов Определение параметров асинхронных электродвигателей в автоматизированной системе испытаний / Автоматизация и электрификация горных предприятий в условиях АСУ., Кемерово, 1985, с.62-65.
94. J.Holtz, Th.Thimm Identification of the Machine Parameters in a Vector-Controlled Induction Motor Drive //IEEE Transaction on Industry Applications, vol.27, №6, 1991, pp.1111-1118.
95. Рогозин Г.Г., Пятлина Н.Г. Способ идентификации асинхронной машины по экспериментальным данным ее динамического режима. //Электричество, 1981, №4, с.47-49.
96. Б.А.Коробейников, А.И.Ищенко Идентификация параметров математической модели широкополосных асинхронных двигателей / Изв.вузов. Электромеханика, 1989, №8, с.33-38.
97. Сивокобыленко В.Ф., Гармаш В.С. Определение параметров схем замещения асинхронных и синхронных двигателей /Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1982, №5, с.154-159.
98. А.с. №1531039 СССР, МКИ G01R 31/34. Способ определения параметров контуров ротора широкополосного асинхронного двигателя / В.Ф.Сивокобыленко, В.С.Гармаш. – 4069969/24-21; заявл. 28.03.86; опубл. 23.12.89, бюл. №47.-2с.
99. New method of identification for induction machines parameters by means of quasi-Newton algorithms / Capolino G.A. // IMACS Ann.Comput. and Appl. Math. – 1989 – 6, №1-4, pp.133-135.
100. S.Ranicki A method of calculation of characteristics of three-phase induction machine with two-side asymmetry / Archiv fur Elektrotechnik, 1984, v.67, №4, pp.237-246.
101. J.Grochowalski Use of Regression analysis for the determining of Electrical Machine equivalent circuit // Second Int. Scientific Conf. «Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems» UEES'96, Proceeding volumes 2, 1996, Szczecin, Poland, pp.209-214.
102. Parameter estimation for induction machines based on sensitivity analysis / Ansuji Somchai, Shokooh Farrokh // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1989, v.25, №6, с.1035-1040.
103. Поджаренко В.А., Кучерук В.Ю., Кухарчук В.В. Способ косвенного определения параметров математической модели электромеханических преобразователей с использованием функций чув-

ствительности. // В кн. «Контроль и управление в технических системах». Тезисы докладов НТК стран СНГ.- Винница, 1992, с.9.

104. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю. До питання про ідентифікацію внутрішніх параметрів електричних машин.// Вісник Вінницького політехнічного інституту, №1(2), 1994, с.10-13.

105. Кучерук В.Ю. Ідентифікація внутрішніх параметрів роторного кола асинхронних машин за допомогою теорії чутливості.// Вісник ВПІ.-2000.-№4.-С.5-10.

106. Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В., Селезньова Р.В. Ідентифікація внутрішніх параметрів обмоток електричних машин за допомогою теорії чутливості. //Вісник Державного університету “Львівська політехніка”. Автоматика, вимірювання та керування. 2000. №389. с. 72-81.

107. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981.-464с.

108. D.J.Atkinson, P.P.Akarnley, J.W.Finch Observes for Induction Motor State and Parameter Estimation //IEEE Transactions on industry applications, vol.27, №6, 1991, pp.1119-1127.

109. Н.В.Андреев, В.А.Поджаренко, А.В.Скилягин Задача идентификации параметров электромеханической системы. /Автоматика, 1993, №3, с.32-37.

110. Поджаренко В.А., Андреев Н.В., Скилягин А.В., Кучерук В.Ю. ИИС для научных исследований и испытаний изделий электротехнической промышленности.// В кн. «Измерительные информационные системы». Тезисы докладов ВНТК «ИИС-91»-Санкт-Петербург, 1991г., с.182.

111. Jaderko A., Krzeminski Z. Fuzzy-Logic Algorithm of the Magnetizing Curve Identification of the Induction Motor / Int. Conf. «Electrical Drives and Power Electronics» EDPE'96, Proceeding volumes 2, the High Tatras, Slovakia, pp.537-541.

112. Системы фуцци-управления /В.И.Архангельский, И.Н.Богаенко, Г.Г.Грабовский, Н.А.Рюмшин. – К.: Тэхника, 1997.-208с.

113. D.Balara, J.Zilkova Parametric identification of nonlinear DC Motor model using Neural Networks.//Int. Conf. «Electrical Drives and Power Electronics» EDPE'96, Proceeding volumes 2, the High Tatras, Slovakia, pp.548-553.

114. Коськин Ю.П., Смирнова Н.Н., Трошнева Е.Н., Хосидов З.К. Диагностирование обмоток электрических машин по рабочим характеристикам.//Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, №6, 1991, с.156-160.

115. Малышев В.С., Манюков М.Ф., Титюхин Н.Ф. Анализ вибрационных параметров асинхронного двигателя в динамическом режиме. /В кн. «Задачи динамики электрических машин». Межвуз. тематич. сб. научн. Тр., Омский политехнический ин-т, Омск, 1988, с.73-76.

116. Поляков В.И. Интегральный критерий теплового состояния изоляции электрических машин.//Электричество, №9, 1985, с.49-54.

117. Гольдберг О.Д. Научные основы диагностики и управления качеством асинхронных двигателей.//Электричество, 1986, №1, с.20-22.

118. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей./ О.Д.Гольдберг, И.М.Абдуллаев, А.Н.Аби-ев; Под ред. О.Д.Гольдберга – М.:Энергоатомиздат, 1991.-160с.

119. S.Rawicki Diagnostic methods for three-phase Induction Motor.// Second Int. Scientific Conf. «Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems» UEES'96, Proceeding volumes 2, 1996, Szczecin, Poland, pp.321-324.

120. В.Павлына, Ю.Чучман, И.Соболевский Непрерывная параметрическая диагностика электрических машин.//Second Int. Scientific Conf. «Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems» UEES'96, Proceeding vol. 2, 1996, Szczecin, Poland, pp.533-556.

121. T.Orlowska-Kowalska, C.T.Kowalski Neural network techniques in the Electrical Drives control and fault detection.//Int. Conf. «Electrical Drives and Power Electronics» EDPE'96, Proceeding volumes 2, the High Tatras, Slovakia, pp.27-38.

122. P.Vas Parameter Estimation, Condition Monitorign and Diagnosis of Electrical Machines, Oxford, Clarendon Press, 1993.

123. W.T.Thomson “On-line Current Monitoring to Diagnose Mechanical Shaft Misalingment in Three Phase Induction Motor Drive Systems”, ICEM'94, Paris, France, Proceeding volume 2, 1994, pp.238-243.

124. S.Ferkolj, R.Fiser, “On-line Fault Diagnostic Techniques of Induction Motor Drives”, Stockholm Power Tech, Int.symp. on Electric Power Engineering, Stockholm, Sweden, 18-22 June 1995, Proceeding No. Electrical Machines and Drives, pp. 162-166.

125. F.Filippetti, G.Franceschini, C.Tassoni, P.Vas, “A Fuzzy Logic Approach to On-line Induction Motor Diagnostics Based on Stator Current Monitoring”, Stockholm Power Tech, Int.symp. on Electric Power Engineering, Stockholm, Sweden, 18-22 June 1995, Proceeding No. Electrical Machines and Drives, pp. 156-161.

126. Технические средства диагностирования: Справочник /В.В.Клюев, П.П.Пархоменко, В.Е.Абрамчук и др.; Под общ. ред. В.В.Клюева.-М.: Машиностроение, 1989.-672с.

127. Луговой А.В., Родькин Д.Й. Випробувальний комплекс для діагностики електричних машин// Електроінформ.- 2002.- №1, с.14-16.

128. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин//АН Украины. Ин-т электродинамики. - К.:Наук. думка, 1992.-195с.

129. Методы автоматизированного исследования вибрации машин: Справочник/ С.А.Добрынин, М.С.Фельдман, Г.И.Фирсов. -М.: Машиностроение, 1987.-224с.

130. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. - М.: Недра, 1992.-236с.

131. Родькин Д.И., Черный А.П., Здор И.Е. Задачи и технические средства для диагностики параметров асинхронных двигателей.//Вісник Харківського державного політехнічного університету: Зб. наук. праць.-Вип. 61.-Х., 1999, 400с.

132. Фукуда Т. Диагностические методы контроля электроизоляции //Мэйдзе дайгаку рикога кубу кэнкю хококу.-1986.-Т 26.-с.153-160.

133. Муравлёв О.П. Разработка теории практических методов управления качеством электрических машин.// Электричество, 1986, №4, с.28-32.

134. Новиков В.К., Моисеенко В.В., Черноков А.Я. Автоматизированное оборудование для приемо-сдаточных испытаний асинхронных электродвигателей.// Электротехника, 1996, №2, с.55-59.

135. Лев Я.Л., Переверзев Л.А. О математических методах прогнозирования технического уровня и качества электродвигателей.// Надежность и контроль качества, 1981, №6, с.44-51.

136. Жуков Н.А., Игнатович В.М., Муравлёв О.П. Управление качеством при изготовлении асинхронных двигателей.// Стандарты и качество, 1977, №1, с.3-12.

137. Захаров О.Г. Испытания электротехнических изделий. М.: Высш.шк., 1987. -247с.

138. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин. - М.: Энергоатомиздат, 1990. -320с.

139. Бердников В.Н. Испытания авиационного электрооборудования. -М.: Машиностроение, 1986. -192с.

140. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. – М.: Высш. школа, 1980.-359с.
141. Кучерук В.Ю. Контроль якості асинхронних двигунів при їх випробовуваннях.// Автоматизація виробничих процесів, № 2 (11), Київ, 2000, с.41-45.
142. Жуков Н.А., Игнатович В.М., Муравлев О.П. Управление качеством при изготовлении асинхронных двигателей. //Стандарты и качество, 1977, №1, с.3-12.
143. Земельман И.А. О классификации погрешностей измерений. //Измерительная техника, 1985, №6, с.3-5.
144. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин./Под ред. Р.Б.Уманцева.-9 изд., перераб. И доп.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.-336с.
145. Ривлин Л.Б. Как определить неисправность асинхронного двигателя.-Л.: Энергия, 1968.-45с.
146. Гольдберг О.Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. -М.: Энергия, 1968.-176с.
147. Архипенко В.А., Черток Б.Н. Влияние числа и скоса пазов на пусковые и акустические характеристики трехфазных асинхронных двигателей // Электротехника.- 1976.- №3.-с.38-41.
148. Вольдек А.И. Магнитное поле в воздушном зазоре асинхронной машины // Электромашиностроение.-1953.- №3. -с.11-18.
149. Куракин А.С. Магнитная проводимость воздушного зазора // В кн.: Электродинамические силы, потери и параметры электрических машин. -Из-во АН УССР.- 1966. –с.15-21.
150. Сафронов В.В., Красильников В.И., Воробьев В.Е. Исследование пускового момента трехфазных асинхронных двигателей малой мощности // Электротехника.-1971.- №8.-с.15-16.
151. Б.А.Цыпухин. Некоторые вопросы анализа пульсаций начального момента малогабаритных асинхронных микродвигателей // Электротехника.-1967.- №2. -с.35-38.
152. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах./Пер. с англ. - М.: Энергия, 1981.-352с.
153. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин.-Л.: Энергия, 1976.
154. Зайцев В.Г., Сарапкин В.В. Высокочастотные колебания от искроразрядов в изоляции электродвигателей.- В кн.: "Электропитание сел. хоз-ва"-М.: ВИЭСХ.1969, Вып. 3, с.69-74.
155. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Кравкин А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. - М.: Энергоатомиздат, 1982. - с.504.

156. Справочник по электрическим машинам: В 2т. / Под общ. ред. И.П.Копылова и Б.К.Клокова. -Т.1. -М.: Энергоатомиздат, 1988. - 456с.

157. Электротехнический справочник: в 3-х т. Т.2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл.ред. И.Н.Орлов) и др. -М.: Энергоатомиздат, 1986. -712с.

158. В.Ю.Кучерук Діагностика стану асинхронного двигуна за допомогою логічних функцій.// Контроль і управління в складних системах (КУСС-2001). Матеріали шостої міжнародної НТК. М.Вінниця, 8-12 жовтня 2001 року. – Том 2 - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001.-с.91-98.

159. Кучерук В.Ю. Діагностика стану асинхронного двигуна за допомогою логічних функцій.// Контроль і управління в технічних системах. (КУСС-2001). Тези доповідей шостої міжнародної НТК. М.Вінниця, 8-12 жовтня 2001 року. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001.-с.142.

160. В.О.Поджаренко, В.Ю.Кучерук, О.П.Войтович Принципи побудови системи діагностування стану електричних машин за допомогою нечітких алгоритмів. //Вісник Технологічного університету Поділля, №3, Том 2, 2002, с.41-45.

161. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В.Клюев, П.П.Пархоменко, В.Е.Абрамчук и др.; Под общ.ред. В.В.Клюева.-М.:Машиностроение, 1989.-672с.

162. Ткаченко Р.О., Юрчак І.Ю., Ковальчук А.М. Підходи до вирішення задач прогнозування.// Вісник Державного університету “Львівська політехніка”.-1998.-№349.-с.53-62.

163. Івахів О.В. Структурно-алгоритмічні методи підвищення інформаційної ефективності засобів вимірювання. - Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. - Львів, 2002.- 376с.

164. Гаскаров Д.В., Голинкевич Г.А., Мозгалевский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1974.-224с.

165. Шабанов Г.П. Распознавание в системах автоконтроля. – М.: Машиностроение, 1973.-160с.

166. Маленький А.В. Классификация сигналов в условиях неопределенности.-М.: Советское радио, 1975.-328с.

167. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. В двух томах. Том 2. Основы кибернетических моделей. - М.: Энергия, 1979.-584с.

168. Касаткин А.С., Коменда Э.И. Статистическая оптимизация аппаратуры контроля (Библиотека по автоматике. Выпуск 407).- М.: Энергия, 1970.-56с.

169. Гнедов Г.Н., Росенбаули О.Б., Шумов Ю.А. Проектирование систем контроля ракет.- М.: Машиностроение, 1975.-224с.
170. Солодов А.В. Теория информации и ее применение к задачам автоматического управления и контроля. - М.: Наука, 1967.-432с.
171. Стратонович Р.Л. Теория информации. -М.: Советское радио, 1975.-424с.
172. Кузьмин И.В., Кедрус В.А. Основы теории информации и кодирования.-К.:Вища школа, 1977.-280с.
173. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.-432с.
174. Кучерук В.Ю. Прогнозування якості технологічного процесу при виробництві та технічній діагностиці асинхронних двигунів// ВОТТП, №1, 2001, с.91-95.
175. Кучерук В.Ю. Про вибір робочих режимів електричної машини при визначенні її параметрів. //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, Хмельницький, №1, 1998, с.85-87.
176. Дистефано Н. Об идентификации нелинейной вязкоупругой пружины в условиях динамики. Применение фильтров.//Труды межд. НТК, посвященной памяти Работнова.- М., 1979, с.163-169.
177. Bellman R., Kagiwada H., Kalaba R., Shridar R. Invariant Imbedding and Nonlinear Filtering Theory, Jour. Astro. Sci., 13, pp. 110-115 (1966).
178. Андреев М.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко В.О. Про точність нелінійного фільтра Н.Дистефано. //В кн. «Контроль і управління в технічних системах». Мат. 4-ї міжнародної НТК КУТС-97, том 2, Вінниця, 1997, с.28-31.
179. В.О.Поджаренко, В.Ю.Кучерук, І.М.Демідов Ідентифікація роторних параметрів асинхронних машин за допомогою методу інваріантного поглиблення.// Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія “Обчислювальна техніка та автоматизація”, Випуск 38: Донецьк: ДонДТУ, 2002.-с.92-96.
180. Кучерук В.Ю. Ідентифікація роторних параметрів асинхронних машин за допомогою методу інваріантного поглиблення/ В кн. ”Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини”. Збірник наукових праць, випуск №8.-К.:ФАДА, ЛТД, 2000, с. 373-378.
181. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. - М.: Наука, 1967.-624с.
182. Белоусова Н.В., Калявин В.П., Мозгалеvский А. В. Опыт применения тестового диагностирования обмоток электрических машин. - Л.: ЛДНТП, 1989.- 24с.

183. Русин Ю.С., Чепарухин А.М. Проектирование индуктивных элементов приборов.-Л.: Машиностроение, 1981.-171с.
184. Русин Ю.С., Лобеев Ю.С. Влияние короткозамкнутых витков на параметры индуктивных элементов//Известия вузов. Электромеханика, 1984, №4, с.106-107.
185. Джарадат Р.Х., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю. Фазовий метод мікропроцесорного вимірювання добротності електричних машин.// Вимірювальна техніка та метрологія, Львів, Випуск 51, 1995, с.19-21.
186. Патент України на винахід №23637А, G 01 R 27/26, G 01 R 27/02. Спосіб вимірювання добротності котушок індуктивності.// Куцевол М.О., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю.- 96124526; заявл. 03.12.96, опубл. 31.08.98, бюл. №4.-3с.
187. Автоматизация фазоизмерительных устройств и систем: Учеб.пособие./ Ю.А.Скрипник, А.Ф.Яненко, И.Ю.Скрипник, Л.А.Глазков - К.:УМК ВО, 1992.-204с.
188. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы.-К.:Выща школа, 1980.-560с.
189. Галахова О.П., Колтик Е.Д., Кравченко С.А. Основы фазометрии.-Л.:Энергия, 1976.-256с.
190. Белоусова Н.В. Оценка технического состояния обмоток электрических машин по переходному процессу //Изв. вузов, сер. Электромеханика. - 1986. - Т 7. - с.44-48.
191. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. -К.: Держстандарт України. -68с.
192. Воловик Г.С. Основы теории инвариантных измерений. - Севастополь: «Севпол», 1995.-160с.
193. В.В.Кухарчук, В.Ю.Кучерук, В.О.Поджаренко Оцінка статичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань. //Вісник Державного університету “Львівська політехніка”. Автоматика, вимірювання та керування. 2001. №420. с. 37-45.
194. Кучерук В.Ю., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В. Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювального перетворення добротності. // ВОТТП, №4, 2000, с.51-54.
195. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. –Л.: Энергоатомиздат, 1984. –408с.
196. Покатаев Б.И. Приборы для измерения скольжения асинхронных машин // В сб. научных трудов ХИМЭСХ: Электрификация сельскохозяйственного производства., т.1, вып 14-16, с.26-36.
197. Обзор методов и средств измерения разности частот вращения./ Поджаренко В.А., Кулик А.Я.: Винницкий политехнический институт // Винница, 1986, Деп. В УкрНИИТИ, №595-Ук87.

198. Ковалёв А.М. Цифроаналитические измерения скольжения электрических машин.//Известия ВУЗов. Приборостроение, т. XXI, 1978, №2, с. 22-26.

199. Агеева Н.Д. Компенсационная схема для измерения скольжения асинхронных двигателей.//В кн: Управление переходными режимами в энергосистемах. Труды ДВПИ. Владивосток, 1975, т.101., с. 50-57.

200. Кухарчук В.В. Спосіб апаратно-програмної реалізації вимірювання частоти періодичного сигналу // Вісник ВПІ. -1994. -№3(4). -С.28-33.

Додаток
Перелік можливих несправностей ЕМ та причин їх
виникнення

Двигун постійного струму

Характер несправності та її признаки	Причина несправності
Іскріння щіток	
<i>1) Іскрять всі щітки або їх частина</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Щітки встановлені неправильно 2. Відстань за окружністю колектора між щітками окремих брикетів нерівномірна. 3. Щітки в поганому стані і неправильно установлені в щіткотримачах. 4. Щіткотримачі установлені неправильно. 5. Щітковий брикет слабо закріплений і тому вібрує. 6. Щітки слабо прилягають до колектора. 7. Щітки сильно прилягають до колектора. 8. Установлені вугільні щітки марки, що не підходить (дуже м'які або дуже тверді). 9. Натискання на щітки неоднакове, внаслідок чого струм між ними розподіляється нерівномірно. 10. Поганий контакт в струмозбиральних кільцях; ослаблені стяжні болти; забруднені або окислені контактні поверхні в місцях з'єднання брикетів щіткотримачів і струмозбиральних кілець, що приводить до нерівномірного розподілу струму між окремими стержнями. 11. Спостерігається підвищена вібрація щіткового апарату. Частота власних коливань щіткового апарату співпадає з частотою його примусових коливань (резонансні явища), що викликаються виступаючими колекторними пластинами або вібрацією колектора. 12. Головні і додаткові полюси розташовані нерівномірно.
<i>2) Щітки іскрять; генератор погано збуджується; двигун погано іде в хід або працює з ненормальною частотою обертання; обмотка якоря місцями сильно нагрівається.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Деякі сусідні пластини колектора замкнуті опилками, не видаленими після обточки колектора. 2. В одній або кількох якірних котушках є міжвиткове з'єднання або коротке замикання.
<i>3) ДПС починає іскрити при частковому навантаженні.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Щітки розташовані неправильно; несправний щітковий апарат. 2. Головні і додаткові полюси чергуються неправильно.

	<p>3. Неправильна полярність окремих головних або додаткових полюсів.</p> <p>4. Обмотка додаткових полюсів частково або повністю шунтується іншою обмоткою.</p>
4) Щітки рівномірно іскрять при навантаженні.	Зазор між якорем і окремими чи всіма додатковими полюсами не відповідає паспорту ДПС.
5) Щітки одного полюсу іскрять сильніше щіток інших полюсів.	<p>1. Відстань між щітками за окружністю колектора різна.</p> <p>2. Міжвиткове з'єднання або коротке замикання в обмотці одного із додаткових чи головних полюсів.</p>
6) Спостерігається переходяче і за часом пропадаюче іскрення при навантаженні.	Поганий контакт у щітковому апараті.
7) Щітки іскрять, спостерігається почорніння лише окремих колекторних пластин, що знаходяться на певній відстані одна від одної (відповідно числу полюсів або пар полюсів). Після кожної чистки колектора чорніють одні і ті ж пластини.	<p>1. Поганий контакт в якорі.</p> <p>2. Окремі пластини колектора виступили або запали.</p> <p>3. Короткі замикання в якорі.</p> <p>4. Урівнювальні з'єднання відпаялись або відсутні.</p> <p>5. Число урівнювальних з'єднань недостатнє.</p>
8) Щітки іскрять, спостерігається почорніння певних пластин колектора.	Обрив в котушці якоря, що знаходиться між пластинами колектора, що почорніли.
9) Щітки іскрять, спостерігається почорніння кожної другої чи третьої пластини колектора.	<p>1. Ослабла затяжка колектора.</p> <p>2. Між пластинами колектора виступає ізоляція.</p>
10) Щітки іскрять, хоча щітковий апарат справний, щітки встановлені правильно, колектор чистий і ізоляція між колекторними пластинами не виступає.	<p>1. Якщо нагрівання в ДПС нормальне, то причиною несправності є недопустимо великий виробіток колектора.</p> <p>2. Якщо є підвищене нагрівання якоря, то це значить, що ДПС перевантажений.</p> <p>3. Якщо при підвищеному нагріванні якоря спостерігається нерівномірне нагрівання окремих котушок головних полюсів, то є міжвиткове з'єднання або коротке замикання в одній або в кількох котушках головних полюсів (спотворення магнітного поля викликає появу урівнювальних струмів у якорі).</p> <p>4. Якщо якір сильно нагрівається навіть у ненавантаженому ДПС і щітки одного полюсу іскрять сильніше щіток інших полюсів, то причиною несправності є погане центрування якоря, при якому зазор між якорем і окремими полюсами неоднаковий.</p>
11) Щітки іскрять, трем-	1. Колектор негладкий або б'є.

<p><i>тять, сильно шумлять; на колекторі видні сліди обгорання; колектор почорнів по всій окружності або на більшій її частині; поверхня колектора збороздена (хвилеподібна); колектор і щітки сильно нагріваються.</i></p>	<p>2. Між пластинами колектора виступає ізоляція. 3. Щітки поставлені неправильно, внаслідок чого колектор випрацьовується нерівномірно.</p>
<p><i>12) Щітки іскрять; колектор покритий окиссю, яка після чистки колектора утворюється навіть у тому випадку, коли ДПС не працює.</i></p>	<p>Кислотні пари або гази в машинному приміщенні викликають хімічне руйнування міді колектора.</p>
<p><i>13) Спостерігається легке кругове іскріння; по поверхні колектора із щіток одного полюсу на щітки іншого полюсу перескакують іскри.</i></p>	<p>1. Колектор забруднений через надмірне змащування або використання дуже м'яких вугільних щіток. 2. Колектор забруднений внаслідок сильного виробітку щіток, що викликається негладкістю колектора або використанням непідходящих щіток.</p>
<p><i>14) Круговий вогонь по колектору.</i></p>	<p>1. Щітки розташовані неправильно. 2. Головні і додаткові полюси чергуються неправильно (додаткові полюси неправильно з'єднані з якорем). 3. Вибрана непідходяча марка щіток. 4. При коротких замиканнях у зовнішньому колі щітки накалиються і під ними збирається багато струмопровідного пару, що іонізує повітря.</p>
<p><i>15) При зміні напрямку обертання щітки сильно іскрять.</i></p>	<p>Зміна напрямку обертання здійснюється дуже швидко.</p>
<p><i>16) При обертанні двигуна в одну сторону щітки іскрять сильніше, ніж при обертанні в іншу сторону; спостерігається постійна прихильність до іскріння при обертанні двигуна в якому-небудь напрямку; двигун обертається в одному напрямку швидше, ніж в іншому.</i></p>	<p>Щітки стоять не на нейтралі.</p>
Перегрівання ДПС	
<p><i>Рівномірно перегрітий весь ДПС. Інших примет ненормальної роботи немає.</i></p>	<p>1. ДПС перевантажений. 2. ДПС, призначений для короткочасної або повторно-короткочасної роботи, експлуатується тривало. 3. Вентиляційні шляхи ДПС забруднились; активна сталь і обмотки покрились теплоізолюючим шаром дрібних волокон та пилі. 4. Забруднились повітряні фільтри.</p>
Перегрівання обмотки якоря	

1) <i>Вся обмотка якоря нагрівається рівномірно, спостерігається схильність до іскріння; ДПС бере струм більше номінального; частота обертання ДПС менше номінальної, незважаючи на нормальну напругу в мережі.</i>	ДПС перевантажений.
2) <i>При нормальному навантаженні ДПС частота обертання менша номінальної; вся обмотка якоря нагрівається рівномірно.</i>	Погіршені умови вентиляції.
3) <i>Щітки одного полюсу іскрять сильніше щіток інших полюсів. Зазор між якорем і окремими полюсами неоднаковий.</i>	Якщо якір сильно нагрівається навіть у ненавантаженому ДПС і щітки одного полюсу іскрять сильніше щіток інших полюсів, то причиною несправності є погане центрування якоря, при якій зазор між якорем і окремими полюсами неоднаковий.
4) <i>Щітки одного полюсу іскрять сильніше щіток інших полюсів. ДПС при номінальній напрузі і правильному опорі регульовального реостату обертається дуже швидко. Котушки полюсів нагріваються рівномірно.</i>	Неправильне чергування головних полюсів внаслідок неправильного з'єднання одної чи кількох котушок, що створює ненормальне магнітне поле і викликає появу урівновальних струмів у якорі.
5) <i>Щітки одного полюсу іскрять сильніше щіток інших полюсів. ДПС при номінальній напрузі і правильному опорі регульовального реостату обертається дуже швидко. Котушки полюсів нагріваються нерівномірно.</i>	Міжвиткове замикання в одній або кількох котушках головних полюсів, що створює магнітне поле.
6) <i>ДПС погано запускається, в деяких випадках якір важко повертається або іде в хід поштовхами.</i>	Міжвиткове з'єднання або коротке замикання в одній чи кількох якірних котушках.
Перегрів колектора і щіток	
1) <i>Щітки тремтять і іскрять; поверхня колектора нерівна; щітки сильно шумлять.</i>	1. Колектор негладкий або б'є. 2. Між пластинами колектора виступає ізоляція. 3. Щітки поставлені неправильно, внаслідок чого колектор випрацьовується нерівномірно.
2) <i>Колектор темніє, хоча щітки не іскрять, а поверхня колектора рівна.</i>	1. Вибрана невідповідна марка щіток. 2. Щітки дуже сильно притиснуті до колектора.
3) <i>Щітки іскрять; краї щіток часом розкаляються і обго-</i>	Погані контакти у щітковому апараті і в колі струмопровідників, внаслідок чого є нерівномір-

<i>рають; арматура і мідні жгутики окремих щіток сильно нагріваються, а в деяких випадках навіть перегорають.</i>	ний розподіл струму між окремими щітками.
Перегрів обмотки збудження	
<i>1) Всі котушки полюсів рівномірно нагріваються вище норми; ДПС при нормальній напрузі мережі обертається дуже повільно.</i>	Дуже великий струм збудження; додатковий опір в колі збудження паралельної обмотки малий чи відсутній.
<i>2) Всі котушки нагріваються рівномірно.</i>	Дуже великий струм збудження. Регулятор збудження несправний або не відповідає ДПС.
<i>3) Деякі котушки сильно нагріваються; частина котушок остається холодною. Щітки іскрять. Якір нагрівається.</i>	1. Міжвиткове з'єднання або коротке замикання в одній або кількох котушках полюсів. 2. З'єднання паралельної обмотки з обмоткою додаткових полюсів або з послідовною обмоткою.
Ненормальна частота обертання ДПС	
<i>1) ДПС не запускається. В якорі немає струму при включеному пусковому реостаті.</i>	1. Перегоріли запобіжники. 2. Виник розрив в пусковому реостаті або в проводах. 3. Розрив в обмотці якоря.
<i>2) Струм в якорі є. ДПС з навантаженням не запускається. Без навантаження, запущений від руки ДПС розвиває дуже високу частоту обертання.</i>	1. Відсутнє або послаблене поле. 2. Міжвиткове з'єднання або коротке замикання в одній або в кількох котушках паралельного збудження. 3. Паралельна обмотка збудження з'єднана з корпусом або з іншими обмотками, внаслідок чого вона частково або повністю шунтується. 4. Паралельна обмотка збудження неправильно з'єднана з ДПС і пусковим реостатом, внаслідок чого обмотка збудження підімкнена до лінії однієї полярності.
<i>3) ДПС запускається тільки без навантаження. Після установки щітки пускового реостату на останній контакт (робоче положення) ДПС працює нормально.</i>	Паралельна обмотка збудження під'єднана неправильно – після пускового реостату.
<i>4) Струм в якорі і паралельній обмотці збудження є. ДПС не запускається чи працює з сильно пониженою частотою обертання. Щітки сильно іскрять.</i>	1. Обрив чи поганий контакт в обмотці якоря. 2. Міжвиткове з'єднання чи коротке замикання в якорі.
<i>5) Частота обертання ДПС при номінальній напрузі перевищує номінальну.</i>	1. Щітки зсунуті з нейтралі проти напрямку обертання ДПС. 2. Опір регулятора збудження дуже великий.

	<p>3. Міжвиткове замикання чи коротке замикання в одній або кількох паралельних котушках збудження.</p> <p>4. У ДПС змішаного збудження послідовна обмотка включена протилежно паралельній.</p>
б) Частота обертання ДПС при номінальній напрузі менше номінальної.	<p>1. Щітки зсунуті з нейтралі у напрямку обертання ДПС.</p> <p>2. Опір регулятора збудження дуже малий.</p>
7) ДПС “качає”	<p>1. ДПС працює з сильно ослабленим полем (приклад – ДПС з регулюванням частоти обертання). При підвищенні навантаження внаслідок реакції якоря підвищується також і частота обертання.</p> <p>2. Щітки зсунуті з нейтралі проти напрямку обертання ДПС або прилягають до колектора тільки набігаючим краєм.</p> <p>3. Послідовна обмотка включена протилежно паралельній.</p>

Асинхронні двигуни

Іскріння щіток, обгорання контактних кілець	
<i>Щітки іскрять; деякі щітки і їх арматура сильно нагріваються та обгорають.</i>	<p>1. Щітки погано пришліфовані.</p> <p>2. Щітки не можуть вільно рухатися в обоймі щіткотримача, що погіршує контакт між контактними кільцями і щітками.</p> <p>3. Контактні кільця та щітки забруднені.</p> <p>4. Контактні кільця мають нерівну поверхню або б'ють.</p> <p>5. Щітки слабо притиснуті до контактних кілець.</p> <p>6. Установлені щітки невідповідної марки.</p> <p>7. Струм нерівномірно розподіляється між окремими щітками.</p>
Перегрівання АД	
<i>Рівномірно перегрітий весь АД. Інших ознак ненормальної роботи немає.</i>	<p>1. АД перевантажений.</p> <p>2. АД, призначений для короткочасної або повторно-короткочасної роботи, експлуатується тривало.</p> <p>3. Вентиляційні шляхи АД забруднились; активна сталь і обмотки покриті теплоізолюючим шаром дрібних волокон та пилу.</p> <p>4. Забруднились повітряні фільтри.</p>
Перегрівання активної сталі статора	
<i>1) Активна сталь статора рівномірно перегріта, хоча навантаження АД не перевищує номінальне.</i>	Напруга мережі вище номінальної.
<i>2) Спостерігається підвищене місцеве нагрівання активної сталі при холостому ході</i>	1. Між окремими листами активної сталі є місцеві замикання, що викликані зазубринами, або через зачіплення ротора об статор під час роботи

<p>двигуна і номінальній напрузі мережі.</p>	<p>АД. 2. Виникло з'єднання між стяжними болтами і активною сталлю. 3. Зубці активної сталі в окремих місцях вигоріли та оплавились внаслідок коротких замикань в обмотці статора або пробією обмотки на корпус.</p>
<p>Перегрівання обмотки статора</p>	
<p>1) Спостерігається загальне рівномірне нагрівання всієї обмотки статора.</p>	<p>1. АД перевантажений або порушена його нормальна вентиляція. 2. Напруга на затискачах АД нижче номінальної, внаслідок чого АД при номінальній потужності перевантажений струмом. 3. Обмотка статора з'єднана не зіркою, а трикутником.</p>
<p>2) Обмотка статора місцями сильно нагрівається. Сила струму в окремих фазах неоднакова. АД сильно гуде і розвиває понижений обертальний момент.</p>	<p>1. Міжвиткове з'єднання в обмотці статора. 2. Неправильно з'єднані котушки одної фази; одна чи кілька котушок "перевернуті". 3. Обмотка однієї фази замкнута на землю в двох місцях. 4. Коротке замикання між двома фазами.</p>
<p>Перегрівання обмотки ротора</p>	
<p>1) Вся обмотка ротора рівномірно перегріта. У АД понижена частота обертання.</p>	<p>1. ДПС перевантажений. 2. ДПС, призначений для короткочасної або повторно-короткочасної роботи, експлуатується тривало. 3. Вентиляційні шляхи ДПС забруднились; активна сталь і обмотки покрились теплоізолюючим шаром дрібних волокон та пилу. 4. Забруднились повітряні фільтри. 5. Напруга на затискачах АД нижче номінальної, внаслідок чого АД при номінальній потужності перевантажений струмом.</p>
<p>2) Ротор, а іноді і статор перегрівуються. АД гуде, струм у статорі сильно пульсує. АД з навантаженням погано іде в хід і не розвиває номінальної частоти обертання; обертальний момент менше номінального.</p>	<p>1. Поганий контакт в пайках лобових частин обмотки або нульовій точці, в перехідних з'єднаннях між стержнями або в з'єднаннях між паралельними групами. 2. Поганий контакт в з'єднаннях обмотки з контактними кільцями. 3. Поганий контакт у щітковому апараті або ослабили контакти механізму для короткого замикання ротора і підйому щіток внаслідок механічної несправності, забруднення або попадання масла. 4. Поганий контакт в з'єднаннях між контактними кільцями і пусковим реостатом. 5. Поганий контакт у пусковому реостаті. 6. Поганий контакт між стержнями короткозамкненого ротора і короткозамикаючими кільцями через відрив стержнів від короткозамикаючих</p>

	кілець або розриву останніх (в одному або кількох місцях).
2) Двигун з фазним ротором без навантаження іде в хід при розімкненому колі ротора. При пуску в хід з навантаженням АД повільно розвертається і ротор сильно нагрівається.	Коротке замикання між сусідніми хомутиками лобових з'єднань або в обмотці ротора; заземлення обмотки ротора в двох місцях.
Перегрів контактних кілець та щіток	
Контактні кільця та щітки перегріті.	1. Щітки іскрять. 2. Щітки дуже сильно притиснуті до контактних кілець. 3. Недостатня вентиляція контактних кілець і щіток.
Ненормальна частота обертання АД	
1) АД не запускається.	Відсутній струм у статорі, що може бути через перегорання запобіжників або вимкнення несправного автоматичного вимикача.
2) АД не запускається, при ручному запусканні іде поштовхами ненормально гуде; в одній фазі статора немає струму.	Обрив в одній фазі мережі або внутрішній обрив в обмотці статора при з'єднанні фаз зіркою.
3) АД не запускається, незважаючи на те, що напруга на затискачах статора номінальна, а сила струму у всіх трьох фазах статора однакова; всі три напруги на кільцях, виміряні при нерухомому роторі, рівні.	1. Обрив у двох (або трьох) фазах пускового реостату або в з'єднувальних проводах між ротором і пусковим реостатом. 2. Сильне однобічне притягання ротора до статора через великий виробіток підшипників, зміщення підшипникових щитів.
4) При включенні АД в мережу ротор не обертається – “прилипає”; виведений із такого стану, він самостійно запускається і продовжує нормально працювати. Таке явище спостерігається головним чином у короткозамкнених двигунах.	Невдало вибрано кількість пазів статора і ротора.
5) АД з фазним ротором запускається при розімкненому колі ротора.	Коротке замикання в роторі.
6) АД з короткозамкненим ротором добре запускається без навантаження, а з навантаженням не запускається.	Велике навантаження.
7) АД з короткозамкненим	Відхилення форми кривої розподілу магнітної

<i>ротором не досягає нормальної частоти обертання, а “застрягає” і починає стійко працювати при низькій частоті обертання, яка в кілька разів менша номінальної.</i>	індукції в зазорі від синусоїди.
<i>8) При номінальному навантаженні АД обертається із частотою, що не досягає номінальної.</i>	1. Напруга на затискачах АД понижена. 2. Поганий контакт в колі ротора. 3. Великий опір в колі ротора. 4. Обмотка статора замість трикутника з'єднана зіркою.
<i>9) Частота обертання ротора нижча номінальної і сильно коливається навіть при невеликому навантаженні АД; струм в статорі сильно пульсує.</i>	Поганий контакт в колі ротора.
<i>10) АД працює стійко при половинній номінальній частоті обертання і сильно гуде, особливо при пуску. При досяганні номінальної частоти він продовжує працювати нормально, але при підвищенні навантаження частота обертання знову падає до половини номінальної.</i>	Обрив в одній фазі ротора.
<i>11) АД добре запускається і добре працює з номінальним навантаженням, але сила струму в фазах різна (в одній фазі на 73% більше, ніж в інших двох фазах) і частота обертання ротора нижча номінальної. Обмотка однієї фази залишається холодною.</i>	Внутрішній обрив в одній фазі обмотки статора при з'єднанні фаз трикутником.
<i>12) АД погано запускається і сильно гуде; сила струму у всіх трьох фазах різна і при холостому ході АД перевищує номінальну.</i>	1. Одна фаза обмотки статора “перевернута”. 2. Перемикач неправильно з'єднаний з АД.
Одностороннє притягання ротора	
<i>Під час роботи АД виникає зачеплення ротора за статор.</i>	1. Порушено правильність зазору між статором і ротором внаслідок виробітку підшипників, зміщення підшипникових щитів, неправильної установки підшипникових стояків, деформації сталі статора або ротора, згинання вала. 2. Ротор погано відбалансований. 3. Міжвиткове з'єднання і різні короткі замикан-

	ня в обмотці статора або неправильне з'єднання фаз статора.
Ненормальний шум в АД	
1) АД сильно гуде. Сила струму у всіх фазах різна. Нагрівання обмотки статора нерівномірне.	1. Коротке замикання в обмотці статора. 2. Обмотки статора з'єднані неправильно. 3. Число витків в окремих котушках обмотки статора неоднакове.
2) АД працює нормально, але є гудіння низького тону, відмічається підвищена вібрація.	Нерівний зазор між статором і ротором. Періодичне магнітне підтягування ротора з тенденцією вирівнювання повітряного зазору і ослаблення тиску на підшипники.
3) АД під час роботи сильно гуде з високим тоном (свистить), що пропадає після вимкнення струму. Іноді гудіння супроводжується сильною вібрацією.	Вібрація зубців статора і ротора через невдалий вибір співвідношення чисел пазів статора і ротора.
Перекриття контактних кілець електричною дугою	
При пуску АД виникає перекриття контактних кілець електричною дугою.	1. Контактні кільця і щітковий апарат забруднені маслом, мідно-вугільним та іншим пилом. 2. Навколишнє повітря має підвищену вологість або насичене кислотними чи лужними парами. 3. Обрив у з'єднаннях між ротором і пусковим реостатом і в самому реостаті.

Синхронні двигуни

Іскріння щіток і обгорання контактних кілець	
1) Щітки іскрять; деякі щітки і їх арматура сильно нагріваються та обгорають.	1. Щітки погано пришліфовані. 2. Щітки не можуть вільно рухатися в обоймі щіткотримача, що погіршує контакт між контактними кільцями і щітками. 3. Контактні кільця та щітки забруднені. 4. Контактні кільця мають нерівну поверхню або б'ють. 5. Щітки слабо притиснуті до контактних кілець. 6. Установлені щітки непідходящої марки. 7. Струм нерівномірно розподіляється між окремими щітками.
2) Контактні кільця та щітки перегріті.	1. Щітки іскрять. 2. Щітки дуже сильно притиснуті до контактних кілець. 3. Недостатня вентиляція контактних кілець і щіток.
Перегрівання СД	
Рівномірно перегрітий весь ДПС. Інших примет ненормальної роботи немає.	1. ДПС перевантажений. 2. ДПС, призначений для короткочасної або повторно-короткочасної роботи, експлуатується тривало.

	3. Вентиляційні шляхи ДПС забруднились; активна сталь і обмотки покриті теплоізолюючим шаром дрібних волокон та пилю. 4. Забруднились повітряні фільтри.
Перегрівання активної обмотки сталі статора	
<i>Активна сталь статора рівномірно перегріта, хоча навантаження генератора не перевищує нормального.</i>	1. СД працює з підвищеною напругою. 2. СД обертається з частотою нижче номінальної внаслідок пониження частоти мережі.
Перегрівання обмотки статора	
<i>1) Вся обмотка статора рівномірно перегріта.</i>	Перевантажений СД або перегріта активна сталь статора.
<i>2) Частина обмотки статора перегріта. Міжфазні напруги неоднакові. СД дуже гуде і димить.</i>	Міжвиткове з'єднання, коротке замикання між двома фазами або замикання на землю в двох місцях обмотки статора.
Перегрівання обмотки збудження	
<i>Обмотка збудження нагріта вище норми. Струм збудження більше номінального.</i>	1. СД працює з підвищеною напругою або частотою обертання нижче номінальної. 2. СД працює із знизеним коефіцієнтом потужності, тобто його реактивна потужність дуже велика. Внаслідок цього струм збудження дуже збільшений. 3. Міжвиткове з'єднання або замикання на корпус в двох місцях обмотки збудження.
Перегрівання контактних кілець і щіток	
<i>Контактні кільця і щітки перегріті, іскріння щіток.</i>	1. Щітки іскрять. 2. Щітки дуже сильно притиснуті до контактних кілець. 3. Недостатня вентиляція контактних кілець і щіток.
Намагнічування вала	
<i>Вал сильно намагнічений.</i>	Порушена симетрія магнітного поля внаслідок міжвиткового з'єднання в обмотці ротора.
Труднощі при асинхронному запуску СД	
<i>1) СД не запускається.</i>	Відсутній струм у статорі, що може бути через перегорання запобіжників або вимкнення несправного автоматичного вимикача.
<i>2) СД не запускається; в одній фазі статора немає струму.</i>	Обрив в одній фазі мережі або внутрішній обрив в обмотці статора при з'єднанні фаз зіркою.
<i>3) СД не запускається або запускається, але не розвертається до номінальної частоти обертання. Сила струму у всіх трьох фазах однакова.</i>	1. При пуску понижена напруга мережі. 2. Дуже велике навантаження при пуску. 3. Міжвиткове замикання в котушках обмотки збудження.
<i>4) СД не запускається або запускається, але не розвертається.</i>	Поганий контакт в пусковій (демпферній) обмотці, а також в місцях з'єднання окремих стержнів

<i>ється до номінальної частоти обертання. Сила струму у всіх трьох фазах однакова, в роторі іноді появляються спалахи або іскріння.</i>	з короткозамикаючими кільцями.
<i>5) СД не запускається і сильно гуде. Сила струму у всіх трьох фазах різна. Частина обмотки статора сильно нагрівається.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Міжвиткове з'єднання в обмотці статора. 2. Неправильно з'єднані котушки одної фази; одна чи кілька котушок “перевернуті”. 3. Обмотка однієї фази замкнута на землю в двох місцях. 4. Коротке замикання між двома фазами.
<i>6) СД не запускається і сильно гуде. Сила струму у всіх трьох фазах різна. Обмотка статора не нагрівається.</i>	Несправний пусковий автотрансформатор, або неправильно зроблено внутрішнє з'єднання обмотки статора.
Коливання СД і випадання його із синхронізму	
<i>1) При роботі СД виникають коливання (качання) ротора.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Дуже швидко змінюється навантаження. 2. Сильно коливаються напруга і частота.
<i>2) СД випадає із синхронізму.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. СД перевантажений. 2. Виникло пошкодження (коротке замикання, обрив) в мережі, що живить ротор СД. 3. Виникло пошкодження в мережі, що живить статор.
<i>3) Після ввімкнення СД і встановлення номінального навантаження струм статора росте і досягає найбільшого допустимого значення, при якому СД автоматично вимикається.</i>	Збуджувач працює без іскріння при відносно невеликому навантаженні. Комутовані секції викликають внаслідок прискореної комутації помітне в цьому режимі збуджувача підмагнічування головних полюсів, що приводить до зростання струму ротора.
Загальні несправності ЕМ	
Вібрація ЕМ	
<i>1) Неврівноважені частини, що обертаються.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Неврівноважені ротор, муфта, шків. 2. В ЕМ, що деякий час пропрацювала нормально, змістилась обмотка ротора.
<i>2) Існують механічні несправності.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Неправильно центрований агрегат, що складається із кількох машин. 2. Недостатньо закріплені частини, що обертаються, на валу (наприклад, ротор, шків, маховик). 3. Дефекти у зубчатих передачах внаслідок неправильного зціплення. 4. Несправна з'єднувальна муфта. 5. ЕМ недостатньо міцно закріплений на фундаменті. 6. ЕМ резонує із своїм фундаментом.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

КУЧЕРУК ВОЛОДИМИР ЮРІЙОВИЧ

**ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПОБУДОВИ СИСТЕМ
ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМОТОРІВ**

МОНОГРАФІЯ

Редактор Т.А. Ягельська

Формат 29.7×42¼
Гарнітура Times New Roman
Друк ізографічний
Ум. друк. арк. 11,29
Наклад 100 прим.
Зам. №

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького державного технічного університету
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ, головний корпус,
9-й поверх.
Тел.: (0432)-44-01-59