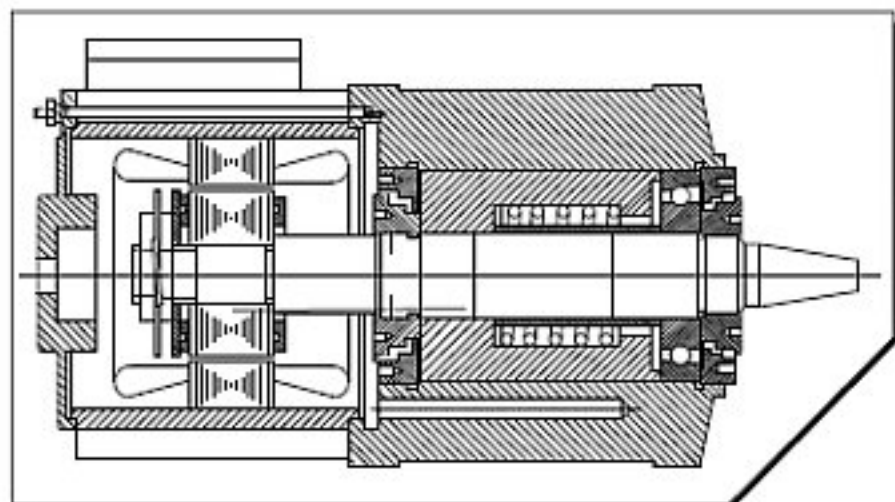


О. М. Васілевський  
П. І. Кулаков

**ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ  
ВИМІРЮВАННЯ ТА СИНХРОНІЗАЦІЇ  
КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ РОТОРІВ  
ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНИХ  
ЕЛЕКТРОМОТОРІВ**



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

О. М. Васілевський  
П. І. Кулаков

**ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПІДВИЩЕННЯ  
ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТА СИНХРОНІЗАЦІЇ  
КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ РОТОРІВ  
ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНИХ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2011

УДК 621.317

ББК 30.10

В19

Рецензенти:

**В. П. Квасніков**, доктор технічних наук, професор

**Р. Н. Квстний**, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 10 від 26 травня 2011 р.)

**Васілевський, О. М.**

В19 Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів: монографія / О. М. Васілевський, П. І. Кулаков. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 176 с.

ISBN 978-966-641-420-8

Розроблені теоретичні засади і практичні аспекти підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів електромоторів. Описано новий тип тахометричного перетворювача з можливістю зміни роздільної здатності, нові методи та засоби перетворення вимірюваної інформації, адаптивний алгоритм і систему синхронізації кутових швидкостей роторів електромоторів із спостережним засобом ідентифікації, а також метрологічне забезпечення вимірювальних каналів кутової швидкості з врахуванням сучасних вимог до характеристик якості вимірювань.

УДК 621.317

ББК 30.10

ISBN 978-966-641-420-8

© О. Васілевський, П. Кулаков, 2011

## З М І С Т

Список умовних скорочень та позначень.....	6
Вступ.....	7
1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	9
1.1. Основні принципи побудови систем синхронізації кутових швидкостей роторів декількох ЕМ.....	9
1.2. Класифікація та аналіз існуючих засобів вимірювання кутової швидкості роторів ЕМ.....	14
1.3. Оцінювання ефективності засобів вимірювання кутової швидкості ЕМ.....	22
1.4. Висновки.....	25
2. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТОЧНОСТЮ ВИМІРЮВАННЯ ТА СИНХРОНІЗАЦІЇ КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ РОТОРІВ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ.....	27
2.1. Математична модель ТП і моделювання роботи вимірювального каналу кутової швидкості.....	27
2.1.1. Математична модель фотоприймача на основі пари фотодіод–операційний підсилювач.....	27
2.1.2. Моделювання ВК кутової швидкості з ТП із зменшенням похибки, що обумовлена частотними властивостями фотоприймача, та їх математична модель.....	32
2.1.3. Синтез форми прорізи модулятора для отримання низькочастотного вихідного сигналу ТП.....	44
2.1.4. Модель тахометричного перетворювача з низькочастотним вихідним сигналом.....	48
2.1.5. Моделювання ВК кутової швидкості з ТП із низькочастотним вихідним сигналом та зменшенням похибки, що обумовлена частотними властивостями фотоприймача.....	54
2.2. Вимірювальне перетворення вихідного сигналу ТП з можливістю зміни роздільної здатності.....	62
2.3. Способи підвищення точності синхронізації роторів декількох ЕМ з використанням високоточного ТП і моделювання їх роботи.....	67

2.4. Адаптивна система синхронізації кутових швидкостей роторів декількох ЕМ із спостережним засобом ідентифікації.....	79
2.5. Висновки.....	86
<b>3. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ.....</b>	<b>88</b>
3.1. Структурна схема та рівняння перетворення вимірювальних каналів, призначених для високоточного вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів ЕМ.....	88
3.2. Аналіз основних похибок вимірювання кутових швидкостей роторів ЕМ.....	94
3.2.1. Аналіз метрологічних характеристик ВК кутової швидкості.....	95
3.2.2. Похибка вимірювання кутового положення вала ЕМ.....	101
3.2.3. Аналіз похибок вимірювання кутових швидкостей шляхом диференціювання вихідного сигналу ТП та їх мінімізація.....	104
3.2.4. Аналіз складових похибки вимірювання кутової швидкості з розробленим ТП та їх мінімізація.....	114
3.3. Методика повірки вимірювальних каналів кутової швидкості.....	119
3.4. Методика оцінювання характеристики якості вимірювань на основі концепції невизначеності.....	126
3.4.1. Основні тенденції в оцінюванні невизначеності результатів вимірювань.....	126
3.4.2. Порівняльний аналіз двох підходів щодо вираження характеристик точності вимірювань.....	134
3.4.3. Методика перерахунку характеристик похибок в характеристику невизначеності вимірювань.....	141
3.4.4. Методика перерахунку характеристик невизначеності в характеристику похибки.....	144
3.4.5. Оцінка результатів вимірювань кутової швидкості роторів ЕМ при їх синхронізації.....	146
3.5. Висновки.....	151

4. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	153
4.1. Рекомендації щодо інженерного проектування та апаратно-програмна реалізація.....	153
4.1.1. Рекомендації з інженерного проектування схеми електричної принципової.....	153
4.1.2. Алгоритмічна реалізація процедури вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів декількох ЕМ.....	156
4.2. Експериментальні дослідження несинхронності обертання ЕМ.....	159
4.3. Експериментальні дослідження похибок вимірювання кутової швидкості.....	162
4.4. Висновки.....	164
Література.....	165
Додаток А. Збірне креслення розробленого тахометричного перетворювача.....	173
Додаток Б. Схема електрична принципова вимірювального каналу кутової швидкості.....	174
Додаток В. Схема електрична принципова системи синхронізації кутових швидкостей роторів декількох електромоторів.....	175

## Список умовних скорочень та позначень

АД	Асинхронний двигун
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
АЧХ	Амплітудо-частотна характеристика
ВК	Вимірювальний канал
ЕС	Електромагнітна складова
ЕМ	Електромотор
МК	Мікроконтролер
МП	Масштабний перетворювач
МС	Механічна складова
МХ	Механічна характеристика
ПЕ	Пороговий елемент
ПІД	Пропорційно інтегрально диференціальна складова
ТП	Тахометричний перетворювач
СКВ	Середнє квадратичне відхилення
ФЧХ	Фазо-частотна характеристика
ЧР	Частотний регулятор
ЦАП	Цифроаналоговий перетворювач
$c_i = \partial f / \partial x_i$	Коефіцієнти чутливості
$u_A(x_i)$	Невизначеність типу А
$u_B(x_i)$	Невизначеність типу В
$u_c(y)$	Сумарна стандартна невизначеність
$\tilde{u}_c$	Відносна сумарна стандартна невизначеність
U	Розширена невизначеність
$t_p(v_{eff})$	Квантиль розподілу Стьюдента
$v_{eff}$	Ефективне число ступенів вільності
$r(x_i, x_j)$	Коефіцієнт кореляції
$\Delta_p$	Довірчі межі
$\omega$	Кутова швидкість

## ВСТУП

Бурхливий інформаційно-технологічний розвиток вимірювальної техніки, приладів і методів вимірювання та контролю кутових швидкостей, що спостерігається в останні роки, привів до значних змін в теорії і практиці керування технологічними процесами. Технічний прогрес в самих різних галузях промисловості пов'язаний з неперервним ускладненням технології виробництва, з підвищеними вимогами до точності виготовлення виробів та їх якості при все більш складному процесі їх обробки. Переважна більшість промислових систем вимірювання та автоматичного контролю оснащена силовими електромоторами (ЕМ), тому підвищення вимог до таких систем тягне за собою необхідність підвищення точності при вимірюванні і контролі механічних параметрів ЕМ, на які покладено задачу здійснення складних переміщень робочих органів механізму. В процесі реалізації цих переміщень виникає необхідність розгону, гальмування, реверсу ЕМ, підтримання постійності вимірюваних величин.

Також велику увагу приділяють підвищенню якості продукції, що в свою чергу потребує розвитку систем вимірювання як електричних, так і механічних параметрів ЕМ. Враховуючи те, що основу професійних знань в науці і техніці складає вимірювана інформація, то стає зрозумілою необхідність забезпечення виробництва високоефективними методами і засобами вимірювання, контролю та керування, що вміщують в собі останні досягнення науки та техніки в різних галузях. Сьогодні, завдяки досягненням мікропроцесорної та вимірювальної техніки, стало можливим використання автоматичних засобів та систем різного рівня інтелекту для вимірювання і контролю різноманітних параметрів ЕМ як в процесі їх виготовлення, так і під час їх експлуатації. Традиційні методи та засоби не завжди забезпечують необхідну точність, швидкодію та ефективність вимірювання і синхронізації кутових швидкостей роторів декількох ЕМ.

Оскільки на процес синхронізації при вимірюванні кутових швидкостей в значній мірі впливають і механічні параметри, то до-



цільно розробити адаптивну систему синхронізації, яка б здійснювала синхронізацію і при відхиленні механічних параметрів від номінальних значень в певних межах. Сучасний рівень обчислювальних засобів розкриває додаткові можливості у створенні нових засобів і методів вимірювання кутових швидкостей, алгоритмів їх синхронізації та способів підвищення точності вимірювань та синхронізації роторів декількох ЕМ.

Таким чином, розробка елементів теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів декількох ЕМ, що дозволяють зменшити похибки вимірювань і синхронізації в процесі роботи ЕМ на підвищених, понижених чи середніх частотах обертання, є актуальною науковою задачею при побудові технологічних процесів призначених для перемотування стрічок металу, паперу, тканин, різних плівок, ниток і обробки дорогоцінних каменів.

## **1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **1.1. Основні принципи побудови систем синхронізації кутових швидкостей роторів декількох ЕМ**

Вирішення проблеми підвищення продуктивності механізмів та машин, що нерозривно пов'язане з проблемою підвищення швидкості робочих органів механізмів, провідні фірми світу знаходять у використанні електроприводів. Розвиток мікропроцесорної техніки привів до широкого використання електроприводів разом з двигунами змінного струму та створення нових систем вимірювального контролю кутових швидкостей. Порівняно з електроприводами постійного струму, електроприводи на базі асинхронних двигунів (АД) мають значно нижчу вартість, більшу різноманітність, значно більше число регульованих координат та значно простішу конструкцію, і тому широко використовуються на практиці.

Процес синхронізації кутових швидкостей кількох силових ЕМ пов'язаний з підвищеними вимогами до точності виготовлення виробів та їх якості, в результаті чого виникає проблема побудови системи вимірювального контролю кутових швидкостей ЕМ та їх синхронізації. Суть цієї проблеми полягає в автоматичному контролі та синхронізації декількох роторів (електрошпинделів) на підвищених кутових швидкостях. В процесі роботи ЕМ між ними виникає несинхронність обертання, за рахунок різних властивостей механізмів та неідеальності виготовлення електричних і механічних елементів. Тому, до основних параметрів, які необхідно контролювати відносяться: кутова швидкість, моменти інерції та опору і несинхронність обертання роторів силових ЕМ. Вибір цих параметрів обумовлений тим, що для підвищення якості обробки сировини, необхідно забезпечити високу точність синхронізації частот обертання ЕМ, тобто при роботі на максимальних частотах обертання проводити автоматичний контроль несинхронності обертання.

Нестабільність роботи електроприводів як об'єктів керування залежить від способів керування електродвигунами і від властивостей механізмів в процесі експлуатації. Зміна параметрів електроприводів відбувається при зміні таких основних величин: параметрів електро-

магнітних контурів в колі «перетворювач–двигун», передатних коефіцієнтів перетворювача, потоку збудження двигунів, моментів інерції механізмів, частот пружних механічних коливань. Крім того, в процесі експлуатації систем можуть спостерігатися значні зміни за спектральним складом та інтенсивності збуджуючих і керуючих впливів, що може привести до значного збільшення динамічних похибок системи, що в свою чергу приводить до необхідності перенастройки параметрів регуляторів для мінімізації цих похибок і забезпечення відносної синхронності обертання ЕМ [1 – 7].

Принципи побудови систем синхронізації кутових швидкостей роторів декількох ЕМ базуються на фундаментальних положеннях теорії електроприводів, обробки і передачі інформації, елементах теорії електродинаміки, вимірювальної техніки та інформаційно-вимірювальних технологій.

У зв'язку з розвитком обчислювальної та цифрової техніки розширюються можливості систем вимірювального контролю, слідування і стабілізації, що приводить до появи нових структурних рішень. Одночасно ростуть вимоги до надійності та збільшення терміну роботи систем вимірювального контролю, що розробляються. При цьому виникає задача контролю технічного стану кількох ЕМ, сигналізації про їх несправність та автоматичному підстроюванні кутових швидкостей роторів ЕМ [2, 8, 9].

Існує велика кількість систем синхронізації кутових швидкостей роторів ЕМ, які відрізняються принципом дії, структурою, елементами, принципом контролю і керуванням виконавчим механізмом, родом джерел живлення і т. д. Як відомо [2, 3] системи синхронізації можуть бути аналоговими, в яких несинхронність обертання ЕМ виділяється різними методами в аналоговій формі, цифровими – в яких задаючим пристроєм є мікропроцесор, а сигнал несинхронності обертання виділяється в цифровій формі у вигляді коду, і змішаними – цифро-аналоговими. На практиці для верстатів прокатки металів, перемотки паперу, ниток та обдирки алмазів в теперішній час, як правило, використовуються змішані багатоканальні системи синхронізації кутових швидкостей роторів ЕМ з підвищеними вимогами до точності синхронізації. Спрощена структурна схема системи синхронізації ку-

тових швидкостей роторів ЕМ і деякі її характеристики зображено на рис. 1.1–1.3. Така структура дозволяє забезпечити автоматичну синхронізацію кутових швидкостей роторів двох ЕМ на підвищених оборотах, тобто автоматично відслідковувати частоти обертання головного і допоміжного ЕМ з подальшою їх автопідстройкою та контролем механічних характеристик ЕМ [4, 10].

Об'єктом дослідження (ОД) є процеси отримання інформації про кутові швидкості роторів ЕМ за допомогою високоточного тахометричного перетворювача та методів контролю механічних характеристик (МХ).

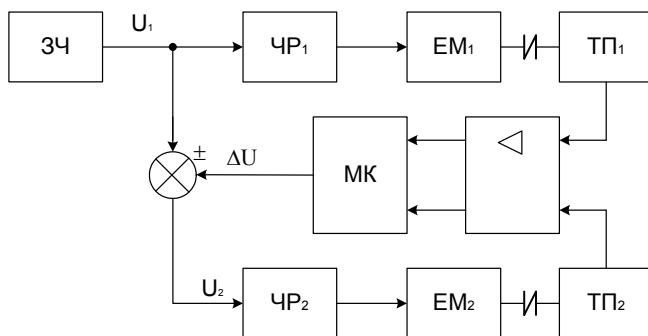


Рис. 1.1. Спрощена структура системи синхронізації кутових швидкостей роторів двох ЕМ

Система працює таким чином: за допомогою задавача частоти, сигналом  $U_1$ , через частотний регулятор ЧР<sub>1</sub> задається частота обертання ЕМ, яка може змінюватись від 0 до 100 Гц; сигнали кутових швидкостей роторів головного ЕМ<sub>1</sub> та допоміжного ЕМ<sub>2</sub> вимірюються за допомогою розроблених тахометричних перетворювачів (ТП<sub>1</sub> і ТП<sub>2</sub>) вихідні сигнали яких підсилюються та передаються до мікроконтролера МК, який розраховує поточні частоти обертання ЕМ та автоматично відслідковує виникаючу несинхронність обертання, і, якщо різниця між частотами обертання головного ЕМ<sub>1</sub> та допоміжного ЕМ<sub>2</sub> перевищує задану, то МК автоматично формує сигнал  $U_2$  для частотного регулятора (ЧР<sub>2</sub>), що зменшує чи збільшує кутову швидкість

допоміжного ЕМ. При одночасній роботі контурів регулювання, допоміжний ЕМ синхронно займає положення

$$U_2 = U_1 \pm \Delta U. \quad (1.1)$$

Використання ЧР дозволяє не тільки змінювати частоти обертання АД від нуля і до максимального значення, а й проводити автоматичний контроль несинхронності обертання ЕМ в режимі розгону, гальмування, реверсу та уникати дії пускових струмів при запусках і зупинках [11, 12].

Розвиток в часі перехідної характеристики регульованого  $N_p$  ЕМ, що ввімкнений в систему вимірального контролю з частотними регуляторами (рис. 1.1) та нерегульованого  $N_n$  ЕМ без використання системи регулювання за допомогою ЧР зображені на рис. 1.2 [4].

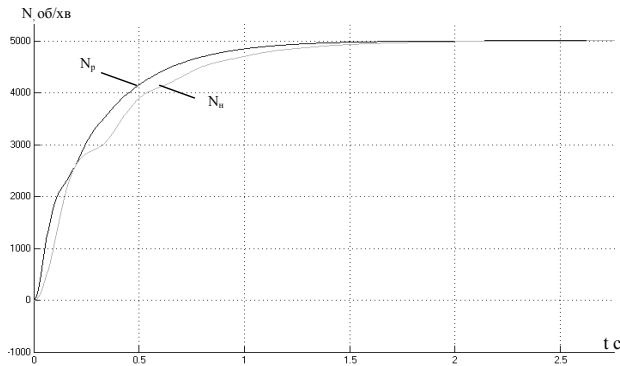


Рис. 1.2. Перехідні характеристики регульованого і нерегульованого ЕМ

Як видно з рис. 1.2 ЕМ, що ввімкнений в систему вимірального контролю з частотним регулюванням виходить на максимальний режим роботи плавно без коливань, а без використання ЧР помітна нестабільність перехідної характеристики (коливання). Також видно, що регульований ЕМ має менший час виходу на номінальний режим роботи. Розвиток в часі несинхронності обертання  $\Delta N_p$  між ЕМ<sub>1</sub> та ЕМ<sub>2</sub> (див. рис. 1.1) при заданій кутовій швидкості  $N_1$  зображено на рис. 1.3.

В нижній частині рис. 1.3 зображено несинхронність обертання  $\Delta N_H$  без використання запропонованої слідкуючої схеми вимірювального контролю. Як видно з нижньої частини рис. 1.3 синхронізація кутових швидкостей АД без ввімкнення сенсорів для вимірювання частот обертання у зворотні зв'язки – неможлива. Для того, щоб автоматично контролювати несинхронність обертання ЕМ необхідно змінювати частоту обертання ротора допоміжного ЕМ<sub>2</sub> (див. рис. 1.1) [13, 14].

Миттєві відхилення частот обертання ЕМ, що виникають при автоматичному контролі несинхронності (див. рис. 1.3), залежать від низки факторів, головними з яких є: динамічні зміни моменту опору і напруги мережі живлення, параметричні збурення в АД, наявність різного моменту на валах АД, похибки вимірювання поточних значень швидкості обертання, завади в каналах керування. В зв'язку з цим існує наукова задача, яка полягає в розробці систем синхронізації кутових швидкостей роторів силових ЕМ, точність синхронізації кутових швидкостей якої в першу чергу залежить від первинного вимірювального перетворювача – тахометричного перетворювача (ТП), тому необхідно провести аналіз відомих ТП і вибрати чи запропонувати надійний і високоточний ТП від якого залежить алгоритм функціонування і робота систем синхронізації кутових швидкостей роторів ЕМ.

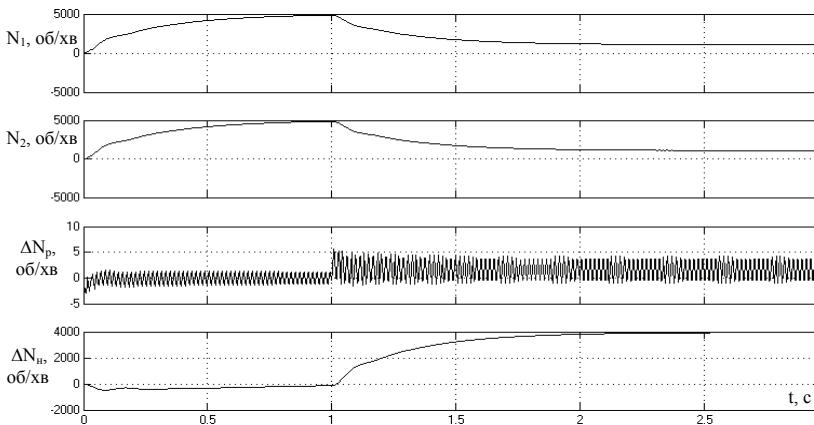


Рис. 1.3. Зміна кутових швидкостей в часі з використанням системи синхронізації та без неї

## 1.2. Класифікація та аналіз існуючих засобів вимірювання кутової швидкості роторів ЕМ

Високоточний автоматичний контроль та вимірювання кутової швидкості має велике значення не тільки при випробуваннях ЕМ, а в багатьох випадках і під час їх роботи. Це стосується систем точних приводів, систем автоматики, у яких ЕМ є складовими компонентами, систем, у яких відбувається керування електроприводами [5]. Складним завданням є високоточний контроль та вимірювання кутової швидкості у динамічному режимі, контроль та вимірювання залежності кутової швидкості від часу – швидкісних діаграм. Вимірювання кутової швидкості у динамічному режимі ускладнюється низкою причин:

- вимірювання кутової швидкості у динамічному режимі проводиться за короткий проміжок часу;
- інформативні параметри змінюються у широкому діапазоні;
- виникає необхідність сумісних вимірювань часу та кутової швидкості;
- необхідність вияву короткочасних змін «голкових провалів моменту», які суттєво погіршують якість механічної енергії, сприяють виникненню ударів в механічній трансмісії, що має зазори, з якою з'єднаний ЕМ;
- відсутність методик розрахунку динамічних метрологічних характеристик.

Рівняння обертання вала ЕМ описується наступним рівнянням [6]

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = M(t, \omega(t)) - M_0, \quad (1.2)$$

де  $M_0$  – момент опору на вала;  $M(t, \omega(t))$  – обертальний (електромагнітний) момент.

Динамічний момент ЕМ визначається лівою частиною рівняння (1.2) та дорівнює різниці між обертальним моментом та моментом на вала, визначає кутове прискорення ротора та зв'язаних з ним мас

$$M_d = J \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (1.3)$$

Момент опору обумовлений наявністю зовнішніх мас, що зв'язані з валом ЕМ. Він може існувати у перехідних та усталеному режимах роботи та бути відсутнім при випробуваннях ЕМ, може змінюватись у часі та залежати від кутової швидкості, але він характеризує зовнішні маси, а не сам ЕМ. При відсутності моменту опору на вала динамічний момент дорівнює оберальному.

Аналіз виразу (1.2) свідчить про необхідність проведення вимірювань і контролю кутової швидкості в динамічному режимі та контролю моменту інерції для визначення параметрів руху.

Момент інерції ротора є однією з найважливіших характеристик ЕМ, що визначає її динамічні властивості. Однак у довідковій літературі та технічних умовах на ЕМ він вказується не завжди. У відповідності з [7] момент інерції ротора може мати великі відхилення від номінального значення (до  $\pm 10\%$ ). При проектуванні різноманітних електроприводів та систем автоматики розробників цікавлять точні значення моменту інерції роторів ЕМ (а деколи і роторів, складених з виконавчими пристроями), оскільки вони визначають тепловий режим та швидкохідність ЕМ [8]. Внаслідок неоднорідності матеріалу та складних геометричних форм ротора розрахункове визначення моменту інерції є трудомістким завданням зі складною методикою та великою похибкою. Більш точним є експериментальне визначення моменту інерції. Питання експериментального визначення моменту інерції розглядаються в багатьох наукових роботах [8–12], але високоточного простого швидкодійного пристрою його контролю досі нема. Найбільш розповсюджені в теперішній час методи визначення моменту інерції [8], це метод допоміжного маятника, який використовується для ЕМ потужністю від 10 до 1000 кВт, метод самогальмування, який використовується для ЕМ потужністю вище 100 кВт, метод крутильних коливань. Останній є найбільш універсальним та придатним для контролю моменту інерції ЕМ як великої потужності, так і мікродвигунів. Згідно з цією методикою частина ЕМ, що обертається, підвішується у вертикальному положенні осі обертання та приводиться у кру-



тильний коливальний рух. При цьому визначається період малих крутильних коливань, який потім порівнюється з періодом коливань еталонного тіла з відомим моментом інерції. Шуканий момент інерції визначається з виразу

$$J = J_E \frac{T_0^2}{T_E^2}, \quad (1.4)$$

де  $J_E$  – момент інерції еталонного тіла;  $T_E$  – період коливань еталонного тіла;  $T_0$  – період коливань частини ЕМ, що обертається.

Незважаючи на універсальність, цей метод має такі суттєві недоліки, як необхідність розбирання ЕМ та велику трудомісткість, що значно обмежує його використання. За допомогою цього методу неможливий контроль моменту інерції ЕМ в процесі їх роботи та без їх демонтажування.

Нині відомі наукові розробки з визначення параметрів та характеристик ЕМ через аналіз динамічних режимів їх роботи [15–19]. У роботах [13, 14, 16], розроблено спосіб визначення моменту інерції та моменту опору на вала за допомогою двох зразкових мас з відомими моментами інерції на основі використання інформації про зміну кутової швидкості. Він полягає у вимірюванні кутового прискорення у режимах пуску та самогальмування асинхронного трифазного ЕМ при встановлених на вала зразкових масах. На основі отриманих результатів вирішується система рівнянь, з якої знаходяться шукані величини. Цей метод має високу точність, та у порівнянні з іншими методами, високу швидкодію, але він також не може використовуватися під час безперервної роботи та потребує додаткового закріплення двох зразкових мас.

Для вимірювального контролю моменту інерції ЕМ перспективним є спосіб, заснований на визначенні амплітуди крутильних коливань ротора під час їх роботи в усталеному режимі. Але він потребує подальшої розробки для визначення аналітичних співвідношень, що зв'язують контрольований параметр з вихідними параметрами ЕМ, інформацію про які можна отримати шляхом прямих вимірювань.

Механічна характеристика (МХ) є однією з найважливіших та найбільш інформативних характеристик ЕМ та визначається як залежність між обертальним моментом та кутовою швидкістю обертання

$$M=f(\omega), \quad (1.5)$$

або

$$\omega=f(M), \quad (1.6)$$

що отримана при незмінних напрузі живлення та частоті мережі [15].

Вигляд МХ обумовлюється різноманітними початковими умовами та іншими параметрами. З великою кількістю таких МХ виділяють пускову МХ, яка називається ще природною та вимірюється при підключенні ЕМ до мережі живлення з номінальними параметрами при відсутності на вала моменту опору та додаткових моментів інерції. За МХ при відповідних умовах розраховуються статичні параметри ЕМ. Наприклад, для трифазної асинхронного ЕМ, МХ режиму реверсу при наявності належного додаткового моменту інерції, наближується до МХ статичного режиму, що дає можливість зменшити час вимірювань таких статичних параметрів, як початковий пусковий момент, максимальний момент та ін. Окрім цього за МХ можна оцінити деякі види браку. Наприклад, при несиметрії обмотки ротора асинхронного двигуна (АД), форма МХ суттєво відрізняється від зразкової. При неправильному з'єднанні секцій обмотки статора час розбігу затягнутий у порівняно із зразковим.

З вищесказаного випливає, що підвищення точності визначення не тільки механічної характеристики, а і багатьох інших параметрів ЕМ вимагає наявності високоточних пристроїв вимірювання та контролю кутової швидкості у статичному та динамічному режимах роботи та точних автоматичних і швидкодійних пристроїв контролю моменту інерції ЕМ будь-якого типу. Це обумовлює доцільність їх подальшої розробки та дослідження.

На рис. 1.4 наведено спрощену конструктивну схему засобу вимірювання кутової швидкості ротора ЕМ. ЕМ спрягається з тахометричним перетворювачем (ТП) за допомогою муфти спряження, вихідний сигнал ТП обробляється вторинним контрольно-вимірювальним пристроєм, який розраховує механічні параметри та кутову швидкість і

здійснює процес контролю. З конструктивної схеми пристрою на рис. 1.4 випливає класифікація пристроїв вимірювання кутової швидкості за такими ознаками:

- в залежності від типу ЕМ. На сьогодні відома велика кількість наукових робіт, що розглядають математичне моделювання ЕМ [16–18]. З аналізу цих моделей випливають аналітичні співвідношення, що зв'язують вихідні параметри ЕМ, які можна визначити шляхом прямих вимірювань, з параметрами що не піддаються прямим вимірюванням (момент інерції та ін.) Пристрій вимірювального контролю може бути орієнтований як на конкретний об'єкт, так і бути універсальним. При використанні сучасної комп'ютерної техніки можлива реалізація пристрою вимірювання адаптивної системи, що адаптується під конкретний тип ЕМ;

- в залежності від типу ТП, що використовується. У відповідності до [15] тахометричні перетворювачі поділяються на амплітудного перетворення, частотно-часового перетворення, просторового кодування. У ТП амплітудного перетворення вихідним сигналом є рівень вихідної напруги, який є функцією кутової швидкості чи кута повороту. Інформативним параметром вихідного сигналу ТП частотно-часового перетворення є частота чи період вихідного сигналу, який є функцією кута повороту та кутової швидкості. В ТП просторового кодування інформація про кутову швидкість отримується шляхом диференціювання коду кутового переміщення вала об'єкта контролю за часом;

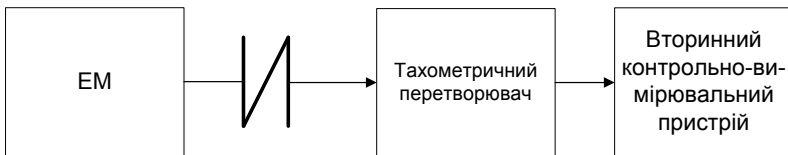


Рис. 1.4. Спрощена конструктивна схема засобу вимірювання кутової швидкості ЕМ

- в залежності від типу вторинного контрольно-вимірювального пристрою. Вторинний контрольно-вимірювальний пристрій може бути аналоговим та цифровим. Сучасні пристрої контролю є як правило

цифровими. Цифрові пристрої контролю можуть бути з мікропроцесорною обробкою інформації.

Класифікацію засобів вимірювання кутової швидкості за амплітудою крутильних коливань наведено на рис. 1.5.

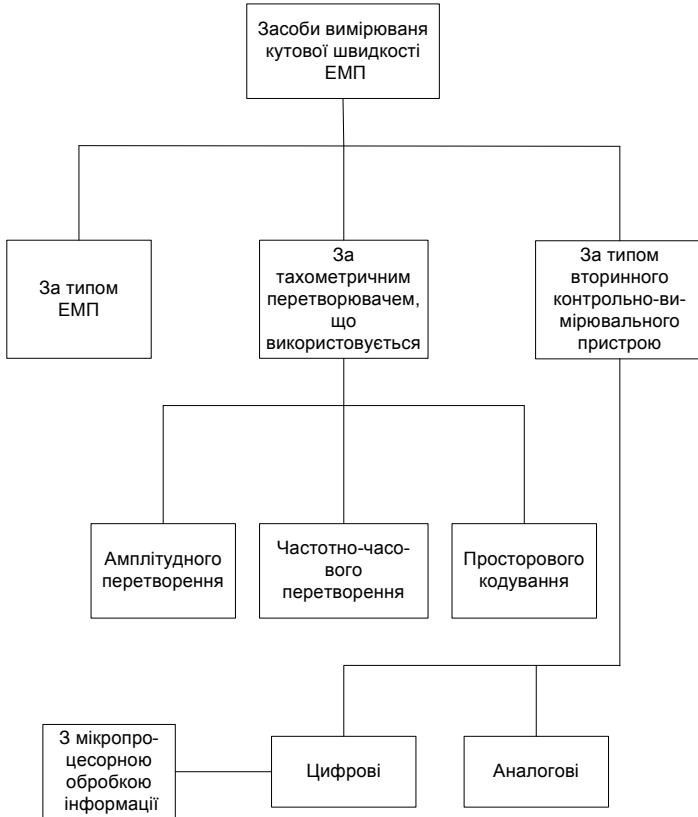


Рис.1.5. Класифікація засобів вимірювання кутової швидкості ЕМ

Проведемо порівняльну характеристику засобів вимірювання кутової швидкості з вторинним контрольно-вимірювальним пристроєм з мікропроцесорною обробкою інформації при використанні різних ТП.

В теперішній час найбільш розповсюдженими є ТП частотно-часового перетворення, інформативним параметром вихідного сигнала

лу яких є частота чи період слідування імпульсів [20–25]. Вимірювання кутової швидкості у цьому випадку зводиться до вимірювання частоти чи часового інтервалу [24–28]. Принцип дії найбільш часто використовуваних ТП частотно-часового перетворення – фотоелектричних, полягає у періодичній зміні потоку опромінення з частотою, яка прямо пропорційна кутовій швидкості. Модулятор такого ТП уявляє собою диск з прорізами, рівномірно розподіленими по колу. Кількість цих прорізів  $z$  є основною характеристикою модулятора.

У найпростіший частотний фотоелектричний ТП входить джерело світла, фотоприймач, модулятор. При обертанні модулятора, світловий потік, що попадає на фотоприймач, змінюється, і на його виході формуються імпульси напруги, частота яких прямо пропорційна кутовій швидкості, тобто здійснюється апаратне диференціювання кута повороту за часом з змінним часовим кроком, що є важливим недоліком таких ТП [15–17].

При вимірюванні за допомогою такого ТП кутової швидкості у динамічному режимі миттєва кутова швидкість обертання визначається як

$$\omega = \frac{2 \pi}{z_M \Delta t}, \quad (1.7)$$

де  $\Delta t$  – часовий інтервал між двома імпульсами, що йдуть один за одним;  $z_M$  – кількість штрихів модулятора первинного перетворювача.

Миттєва кутова швидкість є величиною зворотно пропорційною часовому інтервалу між двома імпульсами та уявляє собою дискретну функцію часу із змінним кроком, який залежить від вхідної величини. Динамічні властивості ТП безпосередньо пов'язані з дискретністю вихідного сигналу: чим менше дискретність, тим на більш швидкі зміни кутової швидкості може реагувати ТП. З (1.7) випливає, що зменшення дискретності може бути досягнуто шляхом збільшення  $z_M$ . Однак це неможливо на базі звичайного частотного ТП реалізувати широкодіапазонний тахометр. Це пояснюється не тільки нечутливістю ТП до напрямку обертання, що в принципі може бути вирішено шляхом введення додаткового дешифратора, а й високою дискретністю вихідного

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-420-8>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-420-8>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-420-8>

*Наукове видання*

**Васілевський Олександр Миколайович  
Кулаков Павло Ігорович**

**ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ  
ВИМІРЮВАННЯ ТА СИНХРОНІЗАЦІЇ  
КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ РОТОРІВ  
ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНИХ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено авторами

Підписано до друку 22.06.2011 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 10,16  
Наклад 100 прим. Зам № 2011-130

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-81-59  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

**Елементи теорії підвищення точності  
вимірювання та синхронізації  
кутових швидкостей роторів  
взаємозв'язаних  
електромоторів**



**Васілевський Олександр Миколайович** —  
кандидат технічних наук,  
доцент кафедри метрології  
та промислової автоматики  
Вінницького національного технічного  
університету



**Кулаков Павло Ігорович** —  
кандидат технічних наук,  
доцент кафедри метрології  
та промислової автоматики  
Вінницького національного технічного  
університету