

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, В. Ф. Граняк

**ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ
В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2019

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/501>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 681.518.3.08
К95

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 1 від 30 серпня 2018 року)

Рецензенти:

Квасніков В. П., доктор технічних наук, професор

Кучерук В. Ю., доктор технічних наук, професор

Кухарчук, В. В.

К95 Вимірювання параметрів обертального руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи : монографія / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, В. Ф. Граняк. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 152 с.

ISBN 978-966-641-753-7

Монографія містить елементи теорії вимірювального перетворення таких параметрів обертального руху як кутове положення, кутова швидкість та биття. Пропонуються нові математичні моделі вимірювального перетворення параметрів обертального руху в значення струму на виході позиційно-чутливого елемента. Показано, що застосування розроблених засобів контролю дозволяє розширити діапазон вимірювань інформативних параметрів та підвищити вірогідність контролю. Монографія розрахована на інженерів, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів, що спеціалізуються в галузі експериментальної інформатики.

УДК 681.518.3.08

ISBN 978-966-641-753-7

© В. Кухарчук, Ю. Ведміцький, В. Граняк, 2019

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/501>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ	8
1.1 Загальна характеристика параметрів обертального руху.....	8
1.2 Особливості вимірювання параметрів обертального руху.....	9
1.2.1 Вимірювання кутових переміщень.....	10
1.2.2 Вимірювання кутової швидкості	12
1.2.3 Основні положення теорії моментів інерції.....	14
1.3 Особливості побудови засобів вимірювання параметрів обертального руху.....	16
Розділ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ	18
2.1 Класифікація та аналіз математичних моделей.....	18
2.2 Математична модель асинхронного двигуна.....	20
2.3 Математична модель синхронного двигуна	28
2.4 Математична модель двигуна постійного струму.....	32
2.5 Математична модель крокового двигуна	35
Розділ 3 АНАЛІЗ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	45
3.1 Класифікація оптичних вимірювальних перетворювачів параметрів обертального руху.....	45
3.2 Фотоелектричні вимірювальні перетворювачі	47
3.2.1 Принцип дії перетворювачів кутових переміщень.....	49
3.2.2 Математична модель взаємодії об'єкта вимірювання і фотоелектричного сенсора	52
3.3 Метод просторової модуляції для вимірювання параметрів обертального руху.....	57
3.3.1 Узагальнена математична модель вимірювального перетворення в оптичній системі	59

3.3.2	Оцінка функцій впливу неінформативних параметрів.....	63
3.3.3	Математичні моделі оптико-механічного дефлектора.....	66
3.3.4	Математична модель засобу вимірювання кутових параметрів ..	72
3.3.4.1	Математична модель вимірювального перетворення параметрів обертального руху в динамічному режимі	72
3.3.4.2	Дослідження перехідної та імпульсної характеристик	77
3.3.4.3	Уточнені математична і електрична моделі позиційно чутливого детектора.....	80
3.3.4.4	Позиційно чутливий датчик, як електрична система з розподіленими параметрами	81
3.3.4.5	Позиційно чутливий датчик, як електрична система із зосередженими параметрами	84
3.4	Математичні моделі та принцип дії ємнісного акселерометра.....	87
3.4.1	Математичні та електричні моделі мікромеханічного ємнісного акселерометра	88
3.4.1.1	Уточнені математична та електрична моделі мікромеханічного ємнісного акселерометра	89
3.4.1.2	Спрощені математична та електрична моделі мікромеханічного ємнісного акселерометра	93
3.5	Математична модель та принцип дії сенсора аксіальних зміщень	95
3.5.1	Типи, принцип дії та конструкція накладних вихрострумів вимірювальних перетворювачів осьових зміщень.....	95
3.5.2	Математичні моделі накладних вихрострумів вимірювальних перетворювачів	97
3.5.2.1	Математична модель накладного параметричного вихрострумів вимірювального перетворювача	97
3.5.2.2	Математична модель накладного трансформаторного вихрострумів вимірювального перетворювача	99
РОЗДІЛ 4 ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ		
ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ		
		102
4.1	Архітектура побудови оптико-електронних засобів вимірювання параметрів обертального руху	102

4.1.1 Алгоритми роботи засобу контролю параметрів обертального руху	103
4.1.2 Виведення функції перетворення засобу вимірювання	105
4.1.3 Визначення діапазону вимірювання.....	107
4.1.4 Експериментальні дослідження.....	108
4.2 Мікропроцесорний засіб вимірювання кутової швидкості з фотоелектричним сенсором	113
4.3 Мікропроцесорний засіб вимірювання ковзання	117
4.4 Мікропроцесорний засіб вимірювання моменту інерції і динамічного моменту	118
4.5 Мікропроцесорний засіб вимірювання кутового положення	122
4.6 Вимірювання вібрацій.....	126
4.7 Вимірювання осьових зміщень	129
4.7.1 Фазовий безконтактний метод та засіб вимірювання осьового зміщення ротора електричних машин	130
4.7.2 Удосконалений вихрострумний метод та засіб вимірювання осьового зміщення ротора електричних машин.....	137
ВИСНОВКИ.....	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	145

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	аналоґо-цифровий перетворювач
БП	блок підсилення
ВВП	вихрострумний вимірювальний перетворювач
ВП	вимірювальний перетворювач
ЕРС	електрорушійна сила
ЗВ	засіб вимірювання
ЗК	засіб контролю
КМОН	комплементарний метало-оксидний напівпровідник
МХ	метрологічні характеристики
НВЧ	надвисокі частоти
ОЗП	оперативний запам'ятовувальний пристрій
ОР	обертальний рух
ПВЗ	пристрій вибірки зберігання
ПЗЗ	пристрій з зарядовим зв'язком
ПЧД	позиційно-чутливий детектор
ПЧП	позиційно-чутливий перетворювач
СВД	світловипромінювальний діод
СКВ	середньоквадратичне відхилення
ТП	тахометричний перетворювач
УФ	ультрафіолетовий
ФП	фотоприймальний пристрій
ФТ	фототранзистор

ВСТУП

Розширення діапазону, підвищення точності вимірювань і вірогідності контролю об'єкта, що досліджується, завжди залишається важливою науково-технічною задачею. У випадку, коли неможливо з достатньою точністю аналітично описати параметри об'єкта контролю, експериментальні дослідження є єдиним способом одержання вимірювальної інформації, а вірогідність контролю – єдиною кількісною оцінкою відповідності результату контролю дійсному стану об'єкта. До таких параметрів відносять і параметри обертального руху: кутове положення, кутова швидкість, биття ротора. Оскільки операції порівняння з нормою передують операції порівняння зі зразковою величиною, то для кількісної оцінки параметрів обертального руху застосовують різноманітні засоби вимірювань, але обов'язковими їхніми складовими є об'єкт контролю, елементи спряження з сенсором, засіб вимірювання електричної величини (вимірювальний канал). У сучасних засобах контролю (ЗК) застосовують як контактний, так і безконтактний ЗК виділених інформативних параметрів. Відсутність елементів спряження сенсора з об'єктом в безконтактних засобах контролю забезпечує відсутність впливу інерційних властивостей сенсора, похибки ексцентриситету, перехідного процесу муфти спряження на результати вимірювань. Але такі засоби не забезпечують необхідну роздільну здатність z (кількість вимірних значень за один оберт вала об'єкта контролю) і тому їхнє використання для динамічних вимірювань параметрів обертального руху (ОР) є обмеженим.

Контактні засоби контролю характеризуються достатньо високою роздільною здатністю ($z \leq 10000$), завдяки чому забезпечуються прийнятні метрологічні характеристики як в статичному, так і в динамічному режимах роботи об'єкта. Але наявність перехідного процесу муфти спряження спричиняє обмеження нижньої межі вимірювань кутової швидкості $\omega_{\min} \leq 20 \dots 50$ об/хв і появу похибки ексцентриситету. Інерційні властивості сенсора та муфти спряження є причиною появи динамічної похибки. Конструктивні особливості таких сенсорів також значно обмежують і верхню межу вимірювань кутової швидкості $\omega_{\max} \leq 5000 \dots 10000$ об/хв.

Контроль кутового положення, наприклад, крокового двигуна, за рахунок тривалості перехідного процесу муфти спряження спричиняє невиправдане зменшення швидкодії. Крім того, така конструкція (муфта спряження–сенсор) ускладнюють контроль параметрів ОР в умовах експлуатації, коли вихідний вал тіла обертання з'єднано з навантаженням.

Тому створення засобів контролю, які би забезпечували високу точність, малу інерційність, широкий діапазон вимірювань є важливою і актуальною задачею. Одним із шляхів вирішення цієї задачі є розробка такого методу і мікропроцесорного засобу контролю параметрів ОР, яким були б властиві переваги відомих безконтактних засобів та відсутні недоліки контактних.

Метою цієї роботи є підвищення вірогідності контролю і розширення діапазону вимірювань параметрів обертального руху за допомогою оптико-електронних засобів на основі безконтактного методу просторової модуляції.

Монографія складається зі вступу і чотирьох розділів та містить бібліографічний список із 95 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

1.1 Загальна характеристика параметрів обертального руху

Положення твердого тіла, що обертається навколо нерухомої осі, визначається кутом повороту φ , тобто двограним кутом між двома площинами, що проходять через вісь обертання, з яких одна нерухома, а інша жорстко закріплена з твердим тілом і обертається разом з ним. Під час обертання кут повороту φ є функцією часу

$$\varphi = f(t). \quad (1.1)$$

Таке рівняння називають рівнянням обертання. Якщо воно задане, то для будь-якого моменту часу t можна визначити значення кута φ , що визначає положення тіла. Якщо взяти два моменти t і $t + \Delta t$ часу і розкласти $f(t)$ в степеневий ряд з приростом Δt , отримаємо [1, 2]

$$f(t + \Delta t) = f(t) + f'(t)\Delta t + f''(t)\frac{\Delta t^2}{2} + \dots \quad (1.2)$$

Приріст $\Delta\varphi = f(t + \Delta t)$ за проміжок часу запишеться таким чином [1, 2]:

$$\Delta\varphi = \omega(t)\Delta t + \varepsilon(t)\frac{\Delta t^2}{2} + \dots, \quad (1.3)$$

де $\omega(t)$ – кутова швидкість у момент часу t ; $\varepsilon(t)$ – кутове прискорення у момент часу t .

Членами рівності, що мають у своєму складі Δt вищий другого ступеня, в першому наближенні можна знехтувати [1, 2]. Поділивши обидві частини (1.3) на Δt , отримаємо

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \omega(t) + \varepsilon(t)\frac{\Delta t}{2} + \dots \quad (1.4)$$

Кутова швидкість дорівнює похідній кута повороту за часом

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

Якщо $\omega = const$ – обертання є рівномірним. У цьому випадку рівняння обертання матиме вигляд [2]:

$$\varphi = \omega t + \varphi_0, \quad (1.6)$$

де φ_0 – початковий кут повороту.

При нульових початкових умовах рівняння рівномірного обертання матиме такий вигляд [2]:

$$\varphi = \omega t. \quad (1.7)$$

Якщо кутова швидкість змінюється в часі, то величина [2]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \varepsilon \quad (1.8)$$

є кутовим прискоренням тіла в даний момент часу.

Обертання, під час якого кутова швидкість є лінійною функцією часу, називають рівнозмінним [2]. Рівняння обертання матиме вигляд

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \varepsilon \frac{t^2}{2}, \quad (1.9)$$

де φ_0 – початковий кут повороту; ω_0 – початкова кутова швидкість; ε – постійне кутове прискорення.

За основну одиницю кутової швидкості прийнято рад/с. На практиці часто використовують термін частота обертання n – величина, яка дорівнює відношенню кількості обертів, здійснених тілом, до часу обертання [3–5].

1.2 Особливості вимірювання параметрів обертального руху

Високоточний контроль та вимірювання кута повороту, кутової швидкості, биття та вібрації об'єктів обертання має велике значення для забезпечення якісної та надійної роботи багатьох електротехнічних комплексів та систем. В якості об'єктів обертання тут розглядаються різноманітні тіла, наприклад, ротори або вали електричних двигунів змінного та постійного струму, роторні системи з газоманітним підвісом, турбіни, гідрогенератори тощо.

Складним завданням залишається високоточний контроль та вимірювання параметрів обертального руху в динамічному режимі роботи. Контроль кутових параметрів у динамічному режимі має низку особливостей [6–16]. По-перше, це необхідність отримання великої кількості вимірювальної інформації за короткий проміжок часу. Тобто існує необхідність сумісних вимірювань кутового положення, швидкості обертання, биття і вібрації у широкому діапазоні їх зміни. Крім того, необхідно відслідковувати зміну інформативних параметрів у часі та виявляти так звані «синхронні провали», що суттєво впливають на якість роботи обладнання. Процедура контролю основана на попередньому вимірювальному перетворенні неелектричної величини в електричну, тому спершу виникає необхідність детального аналізу відомих вимірювальних перетворювачів параметрів обертального руху.

1.2.1 Вимірювання кутових переміщень

Перетворювачі кутових переміщень надзвичайно поширені в практиці вимірювань механічних величин. У низці галузей техніки до цих перетворювачів висуваються досить часто суперечливі вимоги до точності, чутливості, діапазону і швидкодії вимірювального перетворення, високої надійності та малих габаритних розмірів, конструктивної адаптивності до об'єкта контролю.

Досить часто застосовуються багатополюсні обертові трансформатори, індукційні редуктосини, кругові індуктосини, фазові перетворювачі кута з обертовим модулятором [1, 12, 16], фотоелектричні перетворювачі [16-11, 13] й ін.

Багатополюсні обертові трансформатори мають одно- або двофазні обмотки на роторі і двофазні обмотки на статорі, тобто вимагають наявності контактів при необмеженому куті повороту ротора [1]. Для них характерними є малий коефіцієнт ослаблення вихідного сигналу, тобто відношення напруги живлення до максимального значення вихідної напруги дорівнює 2–10.

Індукційні редуктосини відрізняються від багатополюсних обертових трансформаторів тим, що як первинна, так і двофазна вторинна обмотки розташовані в пазах статора, а ротор являє собою зубчасте колесо. Основною перевагою індукційного редуктосина є його безконтактність. Ослаблення вихідного сигналу в редуктосинах більше ніж у багатополюсних обертових трансформаторах. При малій площі паза статора коефіцієнт ослаблення сигналу досягає приблизно 40. В індукційних редуктосинах існують властиві їм додаткові джерела похибок, що вимагають для їхнього зменшення спеціальних методів проектування і виготовлення [1].

Створюються також перетворювачі з багатополюсними друкованими обмотками. Такі перетворювачі кутових переміщень відомі як індуктосини. Торцеві друковані обмотки створюються на ізоляційній основі. При цьому можна збільшити електричну редукцію при малих габаритах, завдяки чому за умови виконання інших конструктивних і технологічних вимог вдається підвищити точність перетворювачів [1, 17]. Однак коефіцієнт ослаблення сигналу в них значний і може досягати 8000.

Завдяки відсутності низки джерел похибок, властивих перерахованим перетворювачам з електричною редукцією, практичний інтерес викликає також застосування фазових перетворювачів кута з обертовим модулятором. Можливість збільшення електричної редукції при малих габаритах

дозволяє одержати високу точність таких перетворювачів. Їхнім недоліком вважають складність конструкції, пов'язану з необхідністю мати подвійний сенсор опорного каналу і синхронний двигун для обертання роторів. Ці перетворювачі за принципом дії є генераторними. Живлення здійснюється від джерела постійного струму, а на виході виділяється змінна складового сигналу, амплітуда якого може досягати 0,5 В. У цьому випадку існують свої джерела похибок, що відносяться до цього типу перетворювачів з електричною редуцією [1, 18].

Відсутність обмоток, можливість одержання високої точності за рахунок збільшення коефіцієнта електричної редуції при малих габаритах, різні методи перетворення кута в електричні сигнали й інші технологічні і конструктивні особливості сприяють широкому застосуванню фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень [1, 2, 19–23]. Найбільше поширення отримали перетворювачі послідовного відліку накопичувального типу та перетворювачі зчитування.

У перетворювачах послідовного відліку перетворюваний кут розбивається на рівні одиничні прирости, кожному з яких відповідає одиниця молодшого розряду двійкового коду. Числовий еквівалент отримують підрахунком кількості одиничних приростів у діапазоні зміни кута. В накопичувальних перетворювачах послідовного відліку відбувається алгебраїчне додавання числа, що відповідає попередньому значенню кута, до кількості приростів, що відповідають даному значенню кута, тобто відбувається накопичення приростів. Такі перетворювачі дозволяють отримати досить високу точність і швидкодію. Однак цим перетворювачам властиві додаткові похибки перетворення при втраті або появі «зайвих» імпульсів, що відповідають одиничному приросту кута [1, 3, 18]. Крім того, при перетворенні кута від заданого нульового положення необхідна додаткова операція переходу через це положення.

У перетворювачах зчитування кожному значенню кута, що перетворюється, відповідає повне значення числового еквівалента. Двійковий код задається непрозорими і прозорими ділянками растрової доріжки. Для усунення похибки неоднозначності користуються кодовими масками Грея. Тому такі позиційні перетворювачі забезпечують високу інформаційну надійність, дозволяють отримати вихідні сигнали без додаткових операцій переміщення, мають високу точність перетворення, стійкість до зовнішніх впливних величин. Недоліком є відносна складність виготовлення, особливо високоточних перетворювачів [1, 3, 18].

1.2.2 Вимірювання кутової швидкості

Засіб вимірювання (ЗВ) кутової швидкості ще називають тахометром. Відомі тахометри основані на трьох принципах вимірювання кутової швидкості [3]:

- вимірюється приріст часу Δt , за який точка об'єкту, що обертається, повернеться на фіксований кут $\Delta\varphi$. Кутова швидкість розраховується за формулою (1.5);

- вимірюється кут $\Delta\varphi$, на який точка об'єкта, що обертається, повернеться за фіксований проміжок часу Δt . Кутова швидкість також розраховується за виразом (1.5);

- значення кутової швидкості безпосередньо перетворюється в іншу фізичну величину, яка вимірюється вторинним засобом вимірювань, і опосередковано отримують результат.

Вимірювальні пристрої, що здійснюють перетворення кутової швидкості, кута повороту, часу, за який відбувається поворот на фіксований кут, в іншу фізичну величину, називають тахометричними перетворювачами (ТП).

Для вимірювання кутової швидкості часто застосовують тахогенератори постійного і змінного струму, частотні фотоелектричні ТП, растрові, волоконно-оптичні на основі ефекту Саньяка, магнітоелектричні та електромагнітні ТП, ТП на основі ефекту Холла. Один з найбільш точних методів вимірювання кутової швидкості є накопичувальні кодувальні перетворювачі та перетворювачі зчитування [3, 6–26].

У теперішній час за допомогою будь-якого одного тахометра неможливо з високою точністю виконувати вимірювання в усіх діапазонах можливої зміни кутових швидкостей та у різних режимах роботи об'єкта. Тому тахометри створюються як спеціалізовані технічні засоби, призначені для перекриття тільки певних ділянок діапазону. Ця обставина зумовлює велику кількість ТП і тахометрів на їхній основі.

Тахогенератори застосовують для вимірювання частоти обертання будь-якого вала в діапазоні 0–10000 об/хв. Однак вихідна характеристика тахогенератора має зону нечутливості, що зумовлена впливом опору щіткового контакту. Реальна вихідна характеристика є нелінійною внаслідок наявності магніторушійної сили реакції якоря, що послаблює потік збудження. Відхилення від лінійності через розмагнічувальну дію якоря визначає першу складову похибки тахогенератора. Друга складова зумовлена наявністю перехідного контакту між колектором і щітками [26].

Частотні ТП здійснюють перетворення швидкості обертання в послідовність імпульсів, частота яких пропорційна вимірюваній швидкості. Частото-

тні ТП поєднують простоту і універсальність, притаманну аналоговим пристроям, з точністю і завадостійкістю, що характерні для сенсорів з кодовим виходом. До частотних ТП відносяться фотоелектричні, оптико-електронні, магнітоелектричні та електромагнітні ТП [3, 12, 15–23].

Серед частотних ТП можна виділити растровий ТП, який має високу роздільну здатність (від 1000–250000 імпульсів за один оберт) [3, 12, 15]. Іншим ефективним частотним ТП для вимірювання низьких частот обертання в діапазоні 10^{-3} –1 об/хв є волоконно-оптичні ТП на основі ефекту Саньяка. До переваг слід віднести високу точність не більше 0,5 %, роздільну здатність 10^5 – 10^6 імпульсів за оберт, здатність вимірювати в важкодоступних місцях, в умовах підвищеної радіації, високих температур тощо [2].

У низці практичних застосувань, при вимірюванні середньої частоти обертання можуть застосовуватись більш дешеві перетворювачі, ніж ті, що використовуються в оптичних і магнітних кодувальних пристроях. Електромагнітні ТП є надійними, простими, дешевими і можуть функціонувати в температурному діапазоні $-50 \dots +100$ °С [12]. Але внаслідок залежності вихідного сигналу від швидкості обертання діапазон вимірюваної швидкості обмежений: знизу на рівні 10 Гц, а зверху – 10 кГц.

Розповсюдженими є також ТП на основі ефекту Холла. Такі ТП мають просту конструкцію, забезпечують відносну похибку $0,5 \dots 1$ % в діапазоні вимірювання до 10000 об/хв. Недоліками є низька надійність, чутливість до завад і впливу навколишнього середовища [3].

Один з найбільш точних і прямих методів вимірювання положення вала засновано на використанні тахометричних перетворювачів просторового кодування. В ТП просторового кодування інформацію про кутову швидкість отримують шляхом диференціювання коду кутового переміщення вала в часі. Просторовий параметр (кутове переміщення) визначають за допомогою кодувальної маски, оснащеної зчитувальним пристроєм [3, 15–23]. Для побудови ТП просторового кодування використовують накопичувальні кодові перетворювачі кута і перетворювачі зчитування, розглянуті в п. 1.2.1.

Точність ТП просторового кодування визначається точністю виготовлення маски, точністю зчитування інформації та точністю виконання операції диференціювання. Основною похибкою є похибка диференціювання. Крім того, операція диференціювання знижує швидкодію ТП, а роздільна здатність залежить від швидкості.

Актуальною задачею є можливості контролювати, крім кутової швидкості та кута повороту, інших параметрів, що впливають на якість роботи обладнання, а саме, биття і вібрація об'єктів обертання.

1.2.3 Основні положення теорії моментів інерції

Геометрія мас. Геометрія мас, як спеціальний розділ теоретичної механіки, вивчає розподіл матеріальних мас механічних систем в просторі і об'єднує в собі ряд теорій, які своїм предметом мають теоретичні та експериментальні дослідження сум виду

$$\sum_{k=1}^n f(x_k, y_k, z_k) m_k,$$
 поширених на всі

матеріальні точки, що утворюють систему за умови її дискретного подання. У випадку суцільних тіл чи неперервних середовищ об'єктами дослідження стають інтеграли $\iiint_V f(x, y, z) \rho(x, y, z) dx dy dz$. Назва «геометрія

мас» запропонована в 1857 році французьким вченим Атоном де ля Гупієром.

Теорія моментів інерції. Теорія моментів інерції є складовою геометрії мас і вивчає такі наведені вище суми та інтеграли, які утворюються в припущенні, що функція $f(x, y, z)$ є цілою функцією другого степеня відносно координат [1–14, 24, 27–31]. Тому предметом дослідження теорії моментів інерції є момент другого порядку, який називають моментом інерції. Вперше величини, подібні моментам інерції, були отримані в 1673 р. в роботах Хр. Гюйгенса, а сам термін «момент інерції» був введений в 1749 р. Л. Ейлером. Він же сформулював фундаментальні положення та теореми, що власне і утворили основу теорії моментів інерції.

Момент інерції відносно осі. Моментом інерції дискретної системи відносно осі (осьовим моментом інерції) називається скалярна величина, яка дорівнює сумі добутків мас матеріальних точок цієї системи на квадрати їх відстаней до осі [27–29]

$$J = \sum_{k=1}^n r_k^2 m_k, \quad (1.10)$$

а для тіл з неперервним розподілом маси в просторі

$$J = \int_m r^2 dm, \quad (1.11)$$

за наявності прямокутної системи координат

$$J = \iiint_V r^2(x, y, z) \rho(x, y, z) dx dy dz.$$

Фізичний зміст осьового моменту інерції. Осьовий момент інерції тісно і глибоко пов'язаний з динамікою обертального руху механічної системи і має прямий фізичний зміст. Відповідно до диференціального рів-

няння обертального руху твердого тіла (системи) навколо нерухомої осі $\ddot{\varphi} \sum_{k=1}^n r_k^2 m_k = \sum_{i=1}^m M_z(\vec{F}_i^{(e)})$ похідна за часом від кутової швидкості (кутове прискорення) пропорціональна головному моменту прямо прикладених сил відносно осі обертання (наприклад, z) і обернено пропорціональна моменту інерції тіла (системи) відносно цієї ж осі

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_z}{J_z}, \quad (1.12)$$

де J – момент інерції тіла, системи; M_∂ – динамічний момент системи.

Рівняння (1.12), подане у такому вигляді

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_\partial \quad (1.13)$$

показує, що динамічний момент електромеханічних перетворювачів енергії визначається як добуток моменту інерції ротора на кутове прискорення його руху.

Відтак, перебуваючи в залежності від просторового розподілу мас системи, момент інерції слугує мірою інертності цієї системи по відношенню до свого руху навколо осі обертання і виявляє тим самим глибокий зв'язок з динамікою обертального руху матеріальної системи в цілому.

Параметри обертального руху, які обрано в якості об'єктів вимірювання, подано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри обертального руху

№ з/п	Параметри обертального руху	Рівняння
1	Кут повороту твердого тіла (ротора)	φ
2	Кутова швидкість обертання ротора	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
3	Кутове прискорення	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$
4	Момент інерції ротора	J
5	Динамічний момент	$M_\partial = J \frac{d\omega}{dt}$
6	Динамічна механічна характеристика	$M_\partial = f(\omega)$

1.3 Особливості побудови засобів вимірювання параметрів обертального руху

При вимірюванні неелектричних величин широко застосовуються електричні методи вимірювання, тобто виконується «електрифікація» таких вимірювань – перетворення неелектричної величини в електричну.

Це зумовлює наявність вимірювального перетворювача в структурі засобу вимірювання неелектричної величин, що здійснює попереднє перетворення досліджуваної неелектричної величини у функціонально пов'язану з нею електричну величину.

У загальному випадку засоби вимірювання неелектричних величин конструктивно найчастіше складаються з двох самостійних вузлів:

- сенсора, що неелектричну величину перетворює в електричну;
- засобу вимірювання електричної величини.

Розглянемо узагальнену структурну схему (рис. 1.1) засобу вимірювання параметрів обертального руху.

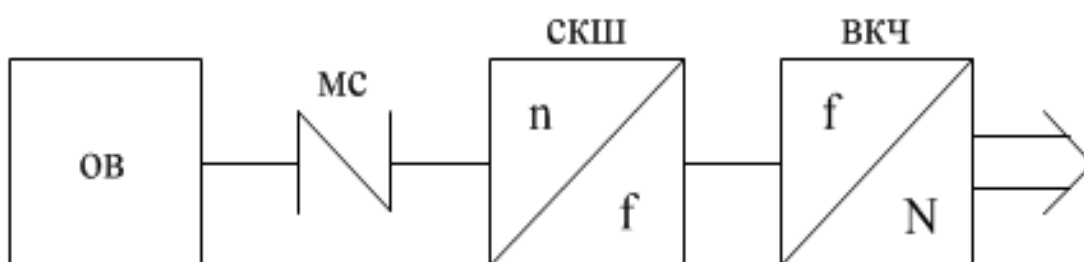


Рисунок 1.1 – Структурна схема засобу вимірювання параметрів обертального руху: *ОВ* – об'єкт вимірювання; *МС* – муфта спряження; *СКШ* – сенсор кутової швидкості; *ВКЧ* – вимірювальний канал миттєвих значень частоти

Така структурна схема продиктована конструктивною особливістю об'єктів вимірювання (ЕМПЕ), основними з яких є такі:

- асинхронні;
- синхронні;
- постійного струму;
- крокові;
- моментні;
- турбіни;
- гідрогенератори;
- оборотні машини;
- з магнітним підвісом і т. д.

Муфта спряження ОВ з сенсором також вносить свої труднощі в процес проектування тахометрів. Серед інших виділимо такі основні особливості:

- різноманітність конструкцій муфт спряження ОВ з СКШ;
- ексцентриситет з'єднання валів ОВ і СКШ;
- наявність перехідного процесу МС суттєво обмежує нижню межу вимірювання.

Оскільки основним елементом ЗВ неелектричних величин є різні вимірювальні перетворювачі, розглянемо більш детально принципи їх побудови. Залежно від енергетичних властивостей вихідного сигналу і способу його подальшого використання первинні вимірювальні перетворювачі поділяються на дві великі групи: параметричні і генераторні. В тахометрії перевагу надають генераторним сенсорам, основними з яких є:

- тахогенератори постійного і змінного струму;
- фотоелектричні сенсори на основі Муарового ефекту;
- високочутливі фотоелектричні сенсори N-кодери.

Така увага до цих вимірювальних перетворювачів пояснюється:

- широким діапазоном вимірюваних швидкостей;
- малим моментом інерції вала самого сенсора;
- надзвичайно великою роздільною здатністю ($z = 1000 \dots 50000$).

Не менш важливим в структурі тахометра є вимірювальний канал, до основних особливостей відносять такі:

- вимірювання частоти миттєвих значень тільки в прилеглих інтервалах;
- забезпечення за відносно невеликий проміжок часу (частки, одиниці секунд) великої кількості виміряних значень (десятки тисяч);
- наявність великого об'єму оперативної пам'яті під результати вимірювань;
- програмне забезпечення згладжування експериментальних даних для наступного диференціювання;
- апаратне, програмне і метрологічне забезпечення метрологічної атестації і повірки вимірювального каналу кутової швидкості.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

2.1 Класифікація та аналіз математичних моделей

Перші роботи з математичної теорії ЕМ з'явилися всередині 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 розвинулася 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 математичних моделей ЕМ [1–16, 24, 27–31]: 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 поточозчеплення – рівняння електромагнітного моменту.

У цьому випадку ЕМ (рис. 2.1) подається як багатополіусник, що має електричні виводи, які характеризуються напругою \bar{U} і частотою f ; механічні виводи: момент на валу $M_{\text{ем}}$, кутова швидкість ω , та момент механічних втрат M_0 .

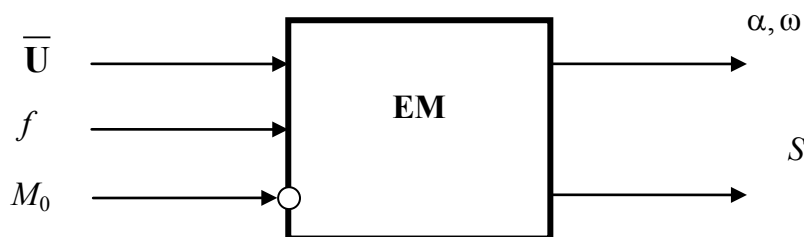


Рисунок 2.1 – Ідеалізоване подання ЕМ у вигляді багатополіусника

Загальний стан розвитку теорій технічної діагностики ЕМ важко охопити без класифікації існуючих діагностичних моделей ЕМ. Пропонується класифікація (рис. 2.2) математичних моделей ЕМ за такими найхарактернішими ознаками [17]: за видом представлення; за способом формування;

за вмістом розвитку несправності; за глибиною опису процесу; за фізичним принципом; за способом розв'язання рівнянь Максвелла; за видом електричної схеми заміщення; за видом системи координат; за методом аналізу схеми заміщення.

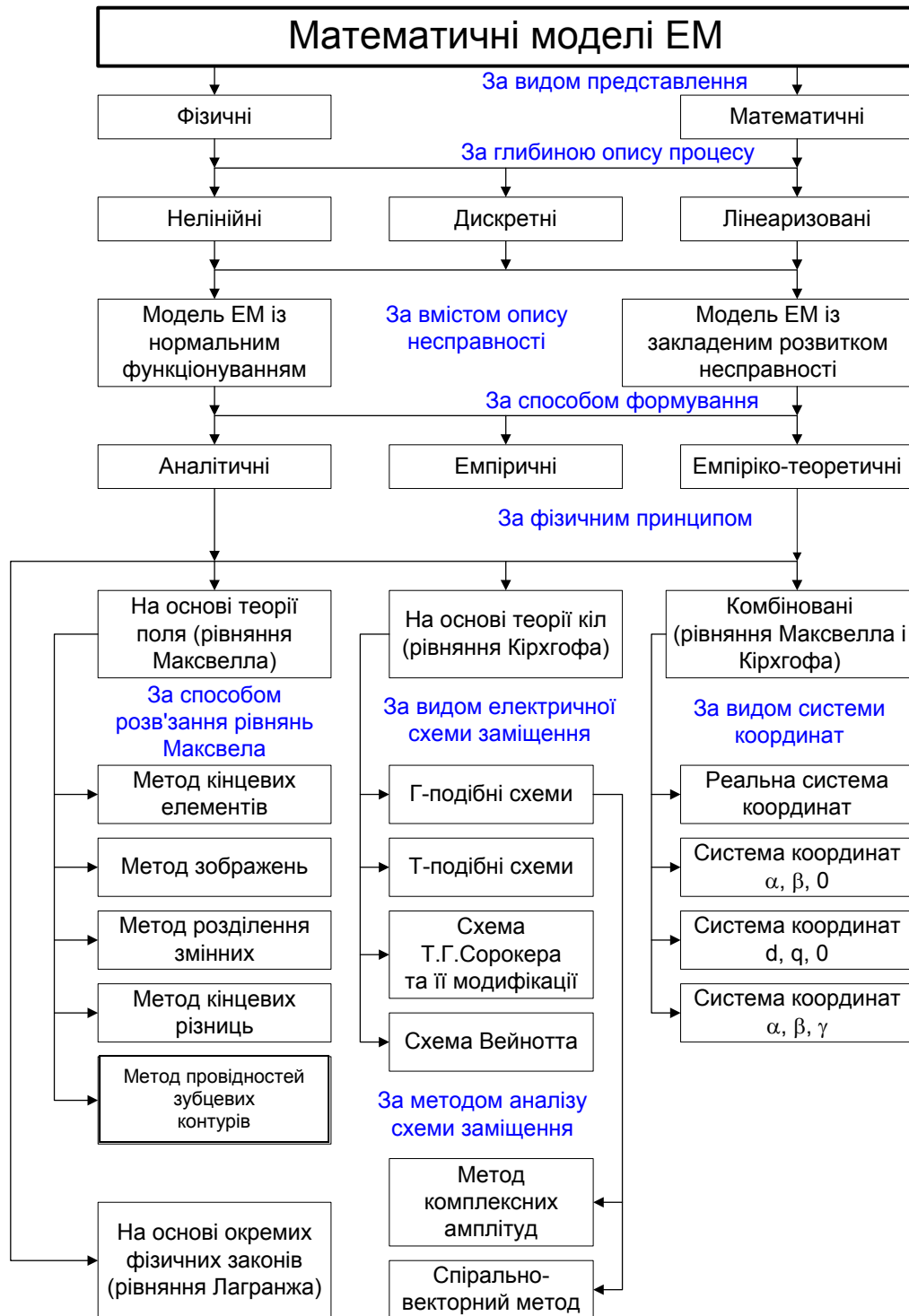


Рисунок 2.2 – Класифікація математичних моделей ЕМ

2.2 Математична модель асинхронного двигуна

Диференціальні рівняння АД можливо записати в кількох різних формах. Найпоширенішою формою запису диференціальних рівнянь для АД є система координат $\alpha, \beta, 0$ [27]:

$$\begin{cases} d\psi_{s\alpha}/dt = U_{s\alpha} - i_{s\alpha}R_{s\alpha}; \\ d\psi_{s\beta}/dt = U_{s\beta} - i_{s\beta}R_{s\beta}; \\ d\psi_{r\alpha}/dt = U_{r\alpha} - i_{r\alpha}R_{r\alpha} - \omega_r\psi_{r\beta}; \\ d\psi_{r\beta}/dt = U_{r\beta} - i_{r\beta}R_{r\beta} - \omega_r\psi_{r\alpha}, \end{cases} \quad (2.1)$$

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 (2.1) зображуються у вигляді:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = L_{s\alpha}i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}; \\ \psi_{s\beta} = L_{s\beta}i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \\ \psi_{r\alpha} = L_{r\alpha}i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}; \\ \psi_{r\beta} = L_{r\beta}i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}, \end{cases} \quad (2.2)$$

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.

Таку математичну модель було вибрано як базову для проведення подальших досліджень, оскільки вона є найбільш поширеною та універсальною.

Беручи 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 (2.2) в (2.1), отримаємо

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_{s\alpha}i_{s\alpha} + \frac{d}{dt}(L_s i_{s\alpha}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{r\alpha}); \\ U_{s\beta} = R_{s\beta}i_{s\beta} + \frac{d}{dt}(L_s i_{s\beta}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{r\beta}); \\ U_{r\alpha} = R_{r\alpha}i_{r\alpha} + \frac{d}{dt}(L_r i_{r\alpha}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{s\alpha}) + \omega_r(L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}); \\ U_{r\beta} = R_{r\beta}i_{r\beta} + \frac{d}{dt}(L_r i_{r\beta}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{s\beta}) - \omega_r(L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}). \end{cases} \quad (2.3)$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Э. Н. Асиновский, А. А. Ахмеджанов, М. А. Габидулин и др.; под общ. ред. А. А. Ахмеджанова. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
2. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В. К. Тартаковский. – Киев : Наукова думка, 1989. – 864 с.
3. Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации / В. А. Поджаренко, А. Д. Азаров, В. А. Власенко, И. И. Коваленко. – Киев : Выща школа, 1990. – 208 с.
4. Потапов Л. А. Измерение вращающих моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей / Л. А. Потапов, Ф. М. Юферов. – Москва : Энергия, 1976. – 121 с.
5. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
6. Поджаренко В. О. Дослідження та розробка інтелектуальних вимірювальних систем характеристик електромеханічних перетворювачів енергії : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.16 / Вінницький державний технічний університет. – Вінниця, 1995. – 356 с.
7. Патент 17753А України, МПК G 01 P 3/44. Датчик кутової швидкості / Кулаков П. І., Поджаренко В. О., Кухарчук В. В., Гоменюк А. С. та ін. – № 96104045 ; заявл. 24.10.96 ; опубл. 20.05.97, Бюл. № 9. – 5 с.
8. Патент 22701А України, МПК G 01 P 3/44. Аналоговий датчик кутової швидкості / Кулаков П. І., Поджаренко В. О., Михалевич В. М. та ін. – № 97031077 ; заявл. 11.03.97 ; опубл. 30.06.98, Бюл. № 3. – 10 с.
9. Патент. 24372А України, МПК G 01 P 3/44. Датчик кутової швидкості для динамічних вимірювань / Кулаков П. І., Поджаренко В. О., Михалевич В. М. та ін. – № 97041547 ; заявл. 02.04.97 ; опубл. 17.07.98, Бюл. № 12. – 4 с.
10. Кучерук В. Ю. Дослідження та розробка інформаційно-вимірювальної системи механічних характеристик електричних машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 / Вінницький технічний університет. – Вінниця, 1995. – 236 с.
11. Кулаков П. І. Розробка та дослідження пристрою контролю характеристик роторної системи з газоманітним підвісом : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. / Вінницький технічний університет. – Вінниця, 1999. – 182 с.
12. Аникст Д. А. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст, Ю. Г. Якушенкова. – Москва : Машиностроение, 1987. – 480 с.
13. Преснухин Л. Н. Фотоэлектрические преобразователи информации / Л. Н. Преснухин. – Москва : Машиностроение, 1974. – 376 с.

14. Конюхов Н. Е. Оптоэлектронные контрольно-измерительные устройства / Н. Е. Конюхов, А. А. Плют, П. И. Марков. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.
15. Podzharenko V. The Analysis of Dynamic Properties of Tachometer Converters / V. Podzharenko, V. Kuharchuk, V. Kucheruk and other // Proceedings of International Conference on Modeling & Simulation, MS'2001 – Lviv. – Lviv : Lviv Polytechnic National University. – 2001. – P. 57–62.
16. Застрогин Ю. Ф. Прецизионные измерения параметров движения с использованием лазера / Ю. Ф. Застрогин. – Москва : Машиностроение, 1986. – 272 с.
17. Потапов Л. А. Испытание микроэлектродвигателей в переходных режимах / Л. А. Потапов, В. Ф. Зотин. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 104 с.
18. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах / Дж. Вульвет ; пер. с англ. под ред. А. С. Яроменка. – Москва : Энергоатомиздат, 1981. – 200 с.
19. Авторское свидетельство № 1613959 СССР, МКИ G01P 3/489. Устройство для измерения разности частот вращения / Поджаренко В. А., Кухарчук В. В. и др. – № 4139303/24-10 ; заявл. 27.09.86 ; опубл. 15.12.90, Бюл. № 46. – 7 с.
20. Микропроцессорный регистратор быстропротекающих процессов / В. Т. Маликов, В. А. Поджаренко, В. В. Кухарчук и др. // Радиоизмерения. – 1985. – Т. 3. – С. 104–111.
21. Авторское свидетельство № 1262385 СССР, МКИ G01P 3/489. Устройство для измерения скорости вращения / Карпов Е. А., Поджаренко В. А., Кухарчук В. В. и др. – № 3822880/24-10 ; заявл. 12.12.84 ; опубл. 07.10.86, Бюл. № 37. – 7 с.
22. Авторское свидетельство № 1364992 СССР, МКИ G01 P 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. – 4 с.
23. Авторское свидетельство № 1352371 СССР, МКИ G01P 3/489. Цифровой тахометр / Маликов В. Т., Поджаренко В. А., Кухарчук В. В. и др. – № 40075554/24-10 ; заявл. 14.01.86 ; опубл. 15.11.87, Бюл. № 42. – 5 с.
24. Аш Ж. Датчики измерительных систем / Ж. Аш. – Москва : Мир, 1992. – 424 с.
25. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 455 с.
26. Волков Н. И. Электромашинные устройства автоматики : учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика» / Н. И. Волков, В. П. Миловзоров. – Москва : Высшая школа, 1986. – 335 с.

27. Фукс-Рабинович Л. И. Оптико-электронные приборы / Л. И. Фукс-Рабинович, М. В. Епифанов. – Ленинград : Машиностроение, 1979. – 362 с.
28. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу и др. ; перевод с японского, под ред. Т. Окоси. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
29. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин / под. ред. Е. С. Полищука. – Киев : Вища школа, 1984. – 359 с.
30. Электрические измерения неэлектрических величин / под. ред. П. В. Новицкого. – Ленинград : Энергия, 1975. – 596 с.
31. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. В 2-х книгах / под ред. В. В. Ключева. – Москва : Машиностроение, 1986. – Книга 1. – 488 с.
32. Білінська М. Й. Класифікація оптичних вимірювальних перетворювачів параметрів обертального руху / М. Й. Білінська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2002. – № 2. – С. 122–131.
33. Ишанин Г. Г. Источники и приемники излучения : уч. пос. для студ. оптич. спец. / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев. – СПб. : Политехника, 1991. – 240 с.
34. Frank D. W. A New Material Changes Laser and Lighting Engineering / D. W. Frank, A. Lamprecht // EuroPhotonics. – 2003. – V. 8, № 1. – P. 26–27.
35. Schutte J. Standardized Classification Enhances Reliability of LEDs / J. Schutte // Europhotonics. – 2001. – V. 6, № 3. – P. 36–37.
36. Шарыгин М. Е. Сканеры и цифровые камеры / Под ред. О. В. Колесниченко, И. В. Шишигина. – СПб. : БХВ-Петербург; Арлит, 2001. – 384 с.
37. Kuharchuk V. V. Application of multiparameter imaging sensors for rotary motion control / V. V. Kuharchuk, M. Y. Bilynska // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2003) : тези доповідей сьомої міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця, 2003. – С. 55.
38. Кухарчук В. В. Використання багатопараметричних інтегральних фотоприймальних пристроїв для контролю параметрів обертального руху / В. В. Кухарчук, М. Й. Білінська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 6. – С. 113–115.
39. Charge-coupled device. Image sensors. CCD Primer. MDT/PS 0218. – NY. : Eastman Kodak Company, 2001. – 13 p.
40. Майер В. В. Полное отражение света в простых опытах : учеб. руководство / В. В. Майер ; под ред. Я. А. Смородинского. – Москва : Наука. Физ-мат литература, 1986. – 128 с.
41. Иродов И. Е. Волновые процессы. Основные законы : учебное пособие для вузов / И. Е. Иродов. – Москва : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 264 с.

42. Кухарчук В. В. Пристрій для вимірювання биття обертових частин електричних машин / В. В. Кухарчук, М. Й. Білинська // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : наукові праці КДПУ. – 2002. – № 1. – С. 315–317.
43. Білинська М. Й. Пристрій для вимірювання дисбалансу тіл обертання / М. Й. Білинська // 6-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» : збірник наукових праць. – Ч. 1. – Харків : ХНУРЕ, 2002. – С. 286.
44. Воловик Г. С. Основы теории инвариантных измерений / Г. С. Воловик. – Севастополь : Севпол, 1995. – 160 с.
45. Тайманов И. А. Лекции по дифференциальной геометрии / И. А. Тайманов. – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. – 176 с.
46. Савелов А. А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применения / А. А. Савелов. – НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 294 с.
47. Ефимов Н. В. Краткий курс аналитической геометрии / Н. В. Ефимов. – Москва : Физматлит, 2002. – 238 с.
48. Фрумкин В. Д. Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике / В. Д. Фрумкин, Н. А. Рубичев. – Москва : Машиностроение, 1987. – 168 с.
49. Кухарчук В. В. Оптико-електронний засіб вимірювань кута повороту і кутової швидкості / В. В. Кухарчук, М. Й. Білинська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 5. – С. 16–19.
50. Достал И. Операционные усилители / И. Достал. – Москва : Мир, 1982. – 512 с.
51. Гусев В. Г. Электроника : учебное пособие для приборостроительных специальностей вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – Москва : Высшая школа, 1991. – 622 с.
52. Ортега Дж. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Дж. Ортега, У. Пул. – Москва : Наука, 1986. – 288 с.
53. Патент 48759А Україна, МКІ G 01 M 1/22. Пристрій для вимірювання дисбалансу роторів / Й. Й. Білинський, В. В. Кухарчук, М. Й. Білинська. – № 2001128242 ; заявлено 03.12.2001 ; опубл. 15.08.2002, Бюл. № 8. – 2 с.
54. Кухарчук В. В. Архімедова спіраль в просторово-оптичному перетворенні кутової швидкості та моменту інерції тіл обертання / В. В. Кухарчук, М. Й. Білинська, Ю. Г. Ведміцький // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – № 1(9). – С. 164–168.
55. Ведміцький Ю. Г. Узагальнена математична модель просторово-оптичного перетворення кутової швидкості та моменту інерції в задачах аналізу і синтезу / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – № 4(73). – Вінниця. – 2007. – С. 7–14.

56. Фрайден Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – Москва : Техносфера, 2005. – 592 с.
57. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб. – Москва : Мир, 1989. – 196 с.
58. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
59. Карпов Ю. О. Электричні кола з розподіленими параметрами / Ю. О. Карпов // Теоретичні основи електротехніки / Ю. О. Карпов, В. Г. Мадьяров. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 102 с.
60. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Перехідні процеси в лінійних електричних колах / Ю. О. Карпов, Т. Є. Магас, Ю. Г. Ведміцький. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 159 с.
61. Кухарчук В. В. Елементи теорії контролю динамічних параметрів електричних машин : монографія / В. В. Кухарчуку. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 1998. – 125 с.
62. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под. ред. Б. С. Алешина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 424 с.
63. Павловський М. А. Теоретична механіка : підручник / М. А. Павловський. – 2-ге видання, стер. – Київ : Техніка, 2004. – 512 с.
64. Ведміцький Ю. Г. Елементи теорії електродинамічного моделювання вимірювального перетворення і контролю моменту інерції. Проблематика, динамічні аналогії та принцип дуальності / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 5(80). – С. 25–30.
65. Ведміцький Ю. Г. Вимірювальне перетворення і контроль моменту інерції механічних та електромеханічних систем в процесі їх експлуатації. Теорія і практика / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 4(113). – С. 47–55.
66. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле : підручник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 407 с.
67. Граняк В. Ф. Система вимірювального контролю биття ротора тихохідних електрогенеруючих машин / В. Ф. Граняк, В. В. Кухарчук // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016) : тези доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – С. 146–148.
68. Шкарлет Ю. М. Некоторые вопросы теории метода вихревых токов и расчёт накладных датчиков / Ю. М. Шкарлет // Неразрушающие методы контроля материалов и изделий. – Москва : Онтиприбор, 1964. – С. 56.
69. Калантаров П. Л. Расчёт индуктивностей / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Ленинград : Энергоиздат, 1981. – 136 с.

70. Учанин В. Н. Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации / В. Н. Учанин // Техническая диагностика и неразрушительный контроль. – 2010. – № 4. – С. 22–28.
71. Russel F. J. Communication and electronics / F. J. Russel, V. E. Schuster, D. L. Wiedelich. – Munich, 1962. – 232 p.
72. Соболев В. С. Накладные и экранные датчики : монография / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.
73. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко та ін. – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с.
74. Полішко С. П. Точність засобів вимірювань / С. П. Полішко, О. Д. Трубенюк. – Київ : Вища школа, 1992. – 173 с.
75. Латыев С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах / С. М. Латыев. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 248 с.
76. Якушенков Ю. Г. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах / Ю. Г. Якушенков, В. Н. Луканцев, М. П. Колосов. – Москва : Радио и связь, 1981. – 180 с.
77. Справочник по приемникам оптического излучения / В. А. Волков, В. К. Вялов, Л. Г. Гассанов и др. ; под ред. Л. З. Криксунова и Л. С. Кременчугского. – Київ : Техніка, 1985. – 216 с.
78. Лавренчик В. Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов / В. Н. Лавренчик. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 272с.
79. Браславский Д. А. Точность измерительных устройств / Д. А. Браславский, В. В. Петров. – Москва : Машиностроение, 1976. – 312 с.
80. Kuharchuk V. Optic-electronic control device of the turning angle and angular velocity / V. Kuharchuk, M. Bilynska, V. Usov // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2005) : тези доповідей восьмої міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2005. – С. 61.
81. Грановский В. А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения / В. А. Грановский – Ленинград : Энергоатомиздат, 1984. – 224с.
82. Максимов В. П. Измерение, обработка и анализ быстропротекающих процессов / В. П. Максимов, И. В. Егоров, В. А. Карасев. – Москва : Машиностроение, 1987. – 208 с.
83. Егоров А. Е. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / А. Е. Егоров, Г. Н. Азаров, А. В. Коваль ; под ред. В. Г. Воронова. – Харків : Вища шк., 1986. – 240 с.
84. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк ; пер. с англ. под ред. Н. П. Буслиенко. – Москва : Мир, 1972. – 381 с.

85. Кухарчук В. В. Мікропроцесорна система контролю параметрів обертального руху на основі оптико-електронного вимірювального перетворювача / В. В. Кухарчук, М. Й. Білинська // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : наукові праці КДПУ. – 2004. – № 2. – С. 42–44.

86. Кухарчук В. В. Оптико-електронний засіб вимірювання кутових параметрів і його практична реалізація / В. В. Кухарчук, М. Й. Білинська // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 162–164.

87. New non-system physical quantities for vibration monitoring of transient processes at hydropower facilities, integral vibratory accelerations / Y. G. Vedmitskiy, V. V Kukharchuk, V. F. Hraniak and other // Przegląd elektrotechniczny. – 2017. – № 3. – P. 69–72.

88. Моніторинг, діагностування, та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів : монографія / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, В. Г. Мадьяров та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 168 с.

89. Ширман А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – Москва : Машиностроение, 1996. – 276 с.

90. Граняк В. Ф. Безконтактний метод вимірювання осьового зміщення ротора електричної машини / В. Ф. Граняк, В. В. Кухарчук // Метрологія та прилади. – 2017. – № 5. – С. 18–21.

91. Оптические измерения : учебное пособие / А. Н. Андреев, Е. В. Гаврилов, Г. Г. Ишанин и др. – Москва : Университетская книга ; Логос, 2012. – 416 с.

92. Поплавко Ю. М. Фізика діелектриків : підручник / Ю. М. Поплавко ; за загальною редакцією акад. НАН України Ю. І. Якименка. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 572 с.

93. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э. Э. Лавендела. – Москва, 1981. – 509 с.

94. Патент 121538 Україна, МПК G01M 1/22. Безконтактний пристрій вимірювання осьового биття ротора електричних машин / Граняк В. Ф., Кухарчук В. В. – u201705823 ; заявлено 12.06.2017 ; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23. – 6 с.

95. Кухарчук В. В. Метод аналітичного розрахунку віброшвидкості у режимі розгону гідроагрегату / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк, Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. – 2015. – № 2. – С. 66–70.

Наукове видання

**Кухарчук Василь Васильович
Ведміцький Юрій Григорович
Граняк Валерій Федорович**

**ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ
В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. Граняком

Системні вимоги:

процесор Pentium; 512 Mb RAM;

Windows XP,7,8,10; Acrobat Reader 6.0+.

Один електронний оптичний диск (CD-ROM); Обсяг даних 3,4 Мб.

Наклад 100 (1-й запуск 1–30) прим. Зам. № E2019-01

Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний університет,

Інформаційний редакційно-видавничий центр.

Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,

м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.

press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/501>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>