

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

М. Й. Юкиш, В. В. Кухарчук, Й. Й. Білинський

**ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ
ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ НА ОСНОВІ
МЕТОДУ ПРОСТОРОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2009

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/486>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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

УДК 681.518.3.08
Ю24

Рецензенти:

Муравський Л. І., доктор технічних наук, професор
Петрук В. Г., доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 26 червня 2008 року).

Юкиш, М. Й.

Ю 24 Оптико-електронні засоби контролю параметрів обертального руху на основі методу просторової модуляції : монографія / М. Й. Юкиш, В. В. Кухарчук, Й. Й. Білінський. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 138 с.

ISBN 978-966-641-323-2

Монографія містить елементи теорії вимірювального контролю 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 і описано ці фізичні процеси системою диференціальних рівнянь, яка враховує динамічні властивості засобу контролю. 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 978-966-641-323-2

© М. Юкиш, В. Кухарчук, Й. Білінський, 2009

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/486>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 5 |
| ВСТУП | 6 |
| РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ | 8 |
| 1.1. Загальна характеристика параметрів обертального руху | 8 |
| 1.2. Особливості контролю параметрів обертального руху | 11 |
| 1.2.1. Контроль кутових переміщень | 12 |
| 1.2.2. Контроль кутової швидкості..... | 13 |
| 1.2.3. Контроль вібрації та биття..... | 18 |
| 1.3. Класифікація оптичних засобів контролю параметрів обертального руху..... | 20 |
| 1.4. Вибір критерію оцінки ефективності вимірювальних перетворювачів..... | 28 |
| РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ПРОСТОРОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ | 34 |
| 2.1. Розробка методу просторової модуляції для вимірювання параметрів обертального руху..... | 34 |
| 2.2. Узагальнена математична модель вимірювального перетворення випромінювання в оптичній системі..... | 36 |
| 2.3. Оцінка функцій впливу неінформативних параметрів | 42 |
| 2.4. Розробка математичних моделей оптико-механічного дефлектора..... | 49 |
| 2.4.1. Математична модель оптико-механічного дефлектора в статичному та динамічному режимах роботи..... | 49 |
| 2.4.2. Обґрунтування вибору форми дефлектора | 54 |
| 2.5. Математична модель засобу контролю кутових параметрів | 54 |
| 2.5.1. Розробка математичної моделі контролю параметрів обертального руху в динамічному режимі..... | 54 |
| 2.5.2. Дослідження перехідної та імпульсної характеристик | 59 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ | 63 |
| 3.1. Розробка засобу контролю биття та вібропереміщення | 63 |
| 3.2. Розробка засобу контролю кута повороту та кутової швидкості..... | 65 |
| 3.3. Оцінка функцій впливу на процес перетворення кутових параметрів неінформативних величин | 68 |
| 3.4. Розробка мікропроцесорних засобів контролю параметрів обертального руху..... | 71 |

| | |
|---|------------|
| 3.4.1. Розробка структурної схеми для побудови мікропроцесорного засобу контролю параметрів обертального руху..... | 71 |
| 3.4.2. Алгоритми роботи засобу контролю параметрів обертального руху..... | 72 |
| 3.4.3. Перетворення та обробка вимірювальної інформації. Виведення функції перетворення..... | 74 |
| 3.5. Аналіз метрологічних характеристик засобу контролю кутової швидкості, кута повороту і лінійних переміщень..... | 76 |
| 3.5.1. Аналіз статичних метрологічних характеристик засобу контролю кута повороту..... | 76 |
| 3.5.2. Аналіз статичних метрологічних характеристик засобу контролю кутової швидкості..... | 80 |
| 3.5.3. Аналіз статичних метрологічних характеристик засобу контролю биття..... | 83 |
| 3.5.4. Визначення верхньої і нижньої межі вимірювання параметрів обертального руху..... | 85 |
| 3.6. Аналіз похибок вимірювального перетворення..... | 87 |
| 3.6.1. Похибка встановлення положення плями світла на ПЧД..... | 87 |
| 3.6.2. Похибка вимірювання спричинена ексцентриситетом..... | 88 |
| 3.6.3. Похибка квантування (похибка АЦП)..... | 90 |
| 3.7. Загальна похибка вимірювання параметрів обертального руху..... | 92 |
| 3.8. Вірогідність контролю..... | 95 |
| РОЗДІЛ 4. АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ КОРТРОЛЮ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ..... | 100 |
| 4.1. Розробка інженерної методики проектування засобу контролю..... | 100 |
| 4.2. Апаратно-програмна реалізація оптико-електронного засобу контролю параметрів обертального руху..... | 112 |
| 4.2.1. Апаратна реалізація засобу контролю параметрів обертального руху..... | 112 |
| 4.2.2. Розробка програмного забезпечення..... | 114 |
| 4.3. Експериментальні дослідження..... | 117 |
| 4.3.1. Експериментальні дослідження похибок вимірювання кутової швидкості..... | 117 |
| 4.3.2. Експериментальні дослідження похибок вимірювання кута повороту..... | 120 |
| 4.3.3. Експериментальні дослідження похибок вимірювання лінійних переміщень..... | 122 |
| ЛІТЕРАТУРА..... | 126 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

| | |
|------|--|
| АЦП | аналого-цифровий перетворювач |
| БП | блок підсилення |
| 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 параметри обертального руху: кутове положення, кутова швидкість, биття. 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, вторинний вимірювальний прилад. У теперішній час застосовують як контактні, так і безконтактні засоби контролю 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 вимірюваних значень за один оберт вала об'єкта контролю) і тому не використовуються для динамічних вимірювань параметрів обертального руху (ОР).

Контактні засоби контролю характеризуються достатньою роздільною здатністю ($z \leq 10000$), завдяки чому забезпечуються прийнятні метрологічні характеристики як в статичному, так і в динамічному режимах роботи. Але наявність перехідного процесу муфти спряження призводить до обмеження нижньої межі вимірювань кутової швидкості $\omega_{\min} \leq 20 \dots 50$ об/хв. і появи похибки ексцентриситету. Інерційні властивості сенсора та муфти спряження є причиною виникнення динамічної похибки. Конструктивні особливості таких сенсорів 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 призводить до невиправданого 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 засобу контролю, який би забезпечував високу точність, малу інерційність, широкий діапазон вимірювань є важли-

вою 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 156 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

Первинні вимірювальні перетворювачі параметрів обертального руху широко розповсюджені на практиці. В ряді галузей техніки до цих перетворювачів висувають жорсткі вимоги щодо точності, експлуатаційних і спеціальних характеристик.

Обертальний рух об'єктів характеризується такими параметрами як кутова швидкість, кутове прискорення, кут повороту, биття, вібрація. Існує велика кількість різноманітних вимірювальних перетворювачів цих параметрів, які відрізняються принципом дії, конструкцією, технологією виготовлення. Серед них чільне місце посідають оптичні сенсори. Розвиток оптики і електроніки, зокрема вдосконалення характеристик оптичного волокна, лазерів, світлодіодів, а також поява інтегрально-оптичних схем і компонентів, обумовив створення і широке використання в промисловості нових оптичних перетворювачів.

Оптичні прилади представляють собою велику групу пристроїв, основаних на найсучасніших методах перетворення променевої енергії, використанні нових квантових джерел випромінювання, останніх досягнень мікроелектроніки. Завдяки високій чутливості, малій інерційності, різноманітності форм і методів вимірювань, оптичні прилади зробили можливим застосування променевої енергії для автоматизації виробничих процесів, створення нової автоматичної контрольно-вимірювальної апаратури і проведення нових видів наукових досліджень.

Сучасні оптичні вимірювальні перетворювачі дозволяють вимірювати велику кількість фізичних величин, наприклад, тиск, температуру, відстань, положення в просторі, швидкість обертання, швидкість лінійного переміщення, прискорення, коливання, масу, звукові хвилі, рівень рідини, деформацію, коефіцієнт заломлення, електричне поле, електричний струм, магнітне поле, концентрацію газу, дозу радіаційного випромінювання і т.д. [1–4].

1.1. Загальна характеристика параметрів обертального руху

Положення твердого тіла, що обертається навколо нерухомої осі, визначається кутом повороту φ , тобто двогранним 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

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

Дане 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 по приросту Δt , отримаємо [5, 6]

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

Приріст $\Delta\varphi = f(t + \Delta t)$ за проміжок часу запишеться таким чином [5, 6]:

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

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

Членами рівності, що вміщують у собі Δt вище другого ступеня, в першому наближенні можна знехтувати [5, 6]. 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 $\omega = \text{const}$ – обертання є рівномірним. У цьому випадку рівняння обертання матиме вигляд [6]

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

де φ_0 – початковий кут повороту.

При нульових початкових умовах рівняння рівномірного обертання матиме такий вигляд [6]:

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

Якщо кутова швидкість змінюється в часі, то величина [6]

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

відображає собою кутове прискорення тіла в даний момент часу.

Обертання, під час якого кутова швидкість є лінійною функцією часу, називають рівномірним [6]. 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 [7–9].

Для вимірювання вібрації на практиці користуються

- віброприскоренням a (м/с²);
- віброшвидкістю v (мм/с);
- розмахом вібропереміщення S (мкм).

Якщо припустити, що функція переміщення $u(t) = A \cos(\omega t - \varphi)$, то віброшвидкість є першою похідною від переміщення і виражається таким співвідношенням:

$$v = \frac{du}{dt} = -\omega A \sin(\omega t - \varphi) = -\omega A \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}), \quad (1.10)$$

де $A\omega$ – амплітуда віброшвидкості.

А віброприскорення є другою похідною від переміщення і виражається

$$a = \frac{d^2u}{dt^2} = \omega^2 A \sin(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}) = \omega^2 A \cos(\omega t - \varphi - \pi), \quad (1.11)$$

де $A\omega^2$ – амплітуда віброприскорення.

З викладеного вище видно, що віброшвидкість і віброприскорення теж змінюються за гармонічним законом і пов'язані між собою певними співвідношеннями [9]. Фази гармонік віброприскорень менші («відстають») від фаз гармонік віброшвидкостей на 90°. А фази гар-

монік віброшвидкостей менші («відстають») від фаз гармонік вібропереміщень теж на 90° .

У низькочастотній області найкраще спостерігати вібропереміщення, а у високочастотній – віброприскорення.

Під биттям обертових частин розуміють неоднаковість відстані від осі обертання тих їхніх точок, що відповідно до конструкції повинні бути рівновіддаленими від цієї осі, тобто лежати на колі з центром на осі обертання [9–11]. Розрізняють статичне биття, при якому геометрична вісь обертової частини збігається з віссю обертання, і динамічне биття, при якому геометрична вісь обертової частини не збігається з віссю обертання, роблячи стосовно останнього визначені переміщення. Простого загального зв'язку між обома видами биття не існує. В окремих випадках статичне биття може зникати при обертанні з тією чи іншою частотою і навпаки, динамічне биття здатне виникати там, де статичне биття практично відсутнє, і не обов'язково у результаті вібрації.

1.2. Особливості контролю 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. В якості об'єктів обертання можуть розглядатися різноманітні тіла, наприклад, ротори або вали електричних двигунів змінного та постійного струму, роторні системи з газоманітним підвісом, турбіни тощо.

Складним завданням залишається високоточний контроль та вимірювання параметрів обертального руху в динамічному режимі роботи. Контроль кутових параметрів у динамічному режимі має ряд особливостей [12–22]. По-перше, це необхідність отримання великої кількості контрольно-вимірювальної інформації за короткий час. 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 вимірювальному перетворенні, тому необхідно детально розглянути відомі вимірювальні перетворювачі параметрів обертального руху.

1.2.1. Контроль кутових переміщень

Перетворювачі кутових переміщень широко використовуються для промислових вимірювань. У ряді галузей техніки до цих перетворювачів висуваються жорсткі вимоги точності, експлуатаційні і спеціальні вимоги.

На практиці широко застосовуються багатополюсні обертові трансформатори, індукційні редуктосини, кругові індуктосини, фазові перетворювачі кута з обертним модулятором [5, 18, 22], фотоелектричні перетворювачі [12–17, 19] 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 [5]. Вони відрізняються малим коефіцієнтом ослаблення вихідного сигналу, тобто відношення напруги живлення до максимального значення вихідної напруги складає 2–10.

Індукційні редуктосини відрізняються від багатополюсних обертних трансформаторів тим, що як первинна, так і двофазна вторинна обмотка 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 обертних 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 [5]. Недоліком багатополюсних обертних трансформаторів і редуктосинів є складність намотування.

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 [5, 23]. Однак коефіцієнт ослаблення сигналу в них значний і досягає 8000.

Завдяки відсутності цілого ряду джерел похибок, властивих перерахованим перетворювачам з електричною редукцією, практичний інтерес представляє також застосування фазових перетворювачів кута з обертним модулятором. Можливість збільшення електричної редукції при малих габаритах дозволяє одержати високу точність таких перетворювачів. Їхнім недоліком варто вважати складність конструкції, пов'язану з необхідністю мати подвоєний датчик точного каналу і синхронний двигун для обертання роторів. Ці перетворювачі за прин-

ципом дії є генераторними. Живлення здійснюється від джерела постійного струму, а на виході виділяється змінна складового сигналу, що може складати 0,5 В. У даному випадку існують свої джерела похибок, що відносяться до цього типу перетворювачів з електричною редукцією [5, 24].

Відсутність обмоток, можливість одержання високої точності за рахунок збільшення коефіцієнта електричної редукції при малих габаритах, різні методи перетворення кута в електричні сигнали й інші технологічні і конструктивні показники сприяють широкому застосуванню фотоелектричних перетворювачів кутових переміщень [5–6, 25–29]. Найбільше поширення отримали перетворювачі послідовного відліку накопичувального типу та перетворювачі зчитування.

У перетворювачах послідовного відліку перетворений кут розбивається на рівні одиничні прирости, кожному з яких відповідає одиниця молодшого розряду цифрового коду. Числовий еквівалент отримують підрахунком кількості одиничних приростів у діапазоні 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 притаманні додаткові похибки перетворення при втраті або появі «зайвих» імпульсів, що відповідають одиничному приросту кута [5, 7, 24]. 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 дестабілізуючих факторів. Недоліком є відносна складність виготовлення, особливо високоточних перетворювачів [5, 7, 24].

1.2.2. Контроль кутової швидкості

Відомі засоби контролю (ЗК) кутової швидкості або тахометри основані на трьох принципах вимірювання кутової швидкості [7], коли:

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

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

– значення кутової швидкості безпосередньо перетворюється в іншу фізичну величину, яка вимірюється вторинним засобом вимірювань, і опосередковано визначається.

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 на практиці широко 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 [7, 11–31].

У теперішній час за допомогою будь-якого одного тахометра неможливо з високою точністю виконувати вимірювання в усіх діапазонах можливої зміни кутових швидкостей. 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 одну із складових похибок тахогенератора. Інша складова похибки обумовлена наявністю перехідного контакту між колектором і щітками [31].

Частотні ТП здійснюють перетворення швидкості обертання в послідовність імпульсів, частота яких пропорційна вимірюваній швидкості. Частотні ТП поєднують простоту і універсальність, властиву аналоговим пристроям, з точністю і завадостійкістю, що характерні для датчиків з кодовим виходом. До частотних ТП відносяться фотоелектричні, оптико-електронні, магнітоелектричні та електромагнітні ТП [7, 18, 21–29].

Серед частотних ТП можна виділити растровий ТП, який має високу роздільну здатність (від 1000 – 250000 імпульсів за один оберт) [7, 18, 21]. 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 [6].

Схематичне представлення найпростішого фотоелектричного ТП частотно-часового перетворення з перериванням світлового потоку показано на рис. 1.1.

Принцип дії цього ТП засновано на перериванні освітленості робочої поверхні фотоприймача за допомогою модулятора, який має вигляд диску з радіальними отворами, тобто у вигляді раstra або растрової решітки, і жорстко з'єднано з валом об'єкта вимірювання. Фотоприймач освітлюється лампою через отвори модулятора. При обертанні останнього здійснюється переривання світлового потоку, який попадає на фотоприймач (фотодіод на рис. 1.1), в результаті чого струм фотодіода має імпульсний характер. Формувач F перетворює імпульси струму (які мають складну форму і тривалість яких залежить від кутової швидкості) в прямокутні імпульси напруги U_F , калібровані за тривалістю та амплітудою. Як правило, в такий ТП додатково вводять другий фотоприймач, зсунутий відносно першого на половину кута між отворами модулятора. Це необхідно для забезпечення можливості визначення напрямку обертання вала об'єкта вимірювання.

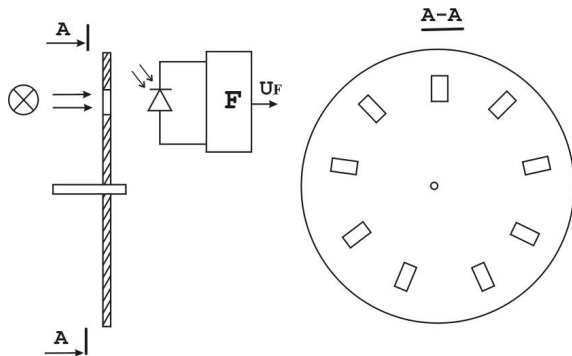


Рис. 1.1. Фотоелектричний ТП частотно-часового перетворення з перериванням світлового потоку

ТП частотно-часового перетворення здійснює перетворення кутової швидкості в частоту, яка далі перетворюється в цифровий код [7]

$$f = \frac{n \cdot z}{60}; N = \frac{f_0}{f_x}, \quad (1.12)$$

де z – кількість імпульсів, що формуються на виході ТП за один оберт вала (для ТП, що розглядається, дорівнює кількості отворів модулятора) [7].

Нижня межа вимірювань кутової швидкості для такого перетворювача (з урахуванням 1.12) становитиме

$$N_{max} = \frac{60 \cdot f_0}{n_{min} \cdot z}; n_{min} = \frac{60 \cdot f_0}{2^n \cdot z} = \frac{60 \cdot 10^6}{2^{12} \cdot 10^3} \approx 15 \text{ об/хв.} \quad (1.13)$$

Для розрахунку верхньої межі вимірювань скористаємось виразом для визначення нормованої похибки квантування. Якщо нормована похибка квантування становить 0,1 %, то верхня межа вимірювань становитиме:

$$\delta_{кн} = \frac{n_{max} \cdot z \cdot 100\%}{60 \cdot f_0}; n_{max} = \frac{\delta_{кн} \cdot 60 \cdot f_0}{z \cdot 100\%} = \frac{0.1\% \cdot 60 \cdot 10^6}{10^3 \cdot 100\%} = 60 \text{ об/хв.} \quad (1.14)$$

Широке застосування растрів підтверджує те, що технологія їхнього виготовлення проста і відзначається високою точністю. Сучасні технології дозволяють виготовляти диски-шаблони з похибкою рисунку, що не перевищує десятої частки секунди.

Точність ТП частотно-часового перетворення визначається точністю виготовлення модулятора, кількістю розрядів, а також похибкою монтажу джерела випромінювання. Швидкодія перетворювача визначається часом перетворення його АЦП [7, 20–23].

Джерелом похибок ТП частотно-часового перетворення є зміщення осей обертання від потрібного розташування. В результаті спостерігається нерівномірне обертання і виникає похибка, спричинена ексцентриситетом, тобто незбіжність осей обертання.

У ряді інженерних застосувань, при вимірюванні середньої частоти обертання можуть застосовуватись більш дешеві перетворювачі, ніж ті, що використовуються в оптичних і магнітних кодуєчих пристроях. Електромагнітні ТП є надійними, простими, недорогими і можуть функціонувати в температурному діапазоні $-50 \div \pm 100$ °C [18]. Однак внаслідок залежності вихідного сигналу від швидкості обер-

тання діапазон вимірюваної швидкості обмежений на рівні 10 Гц знизу і 10 кГц зверху.

Широке застосування мають ТП на основі ефекту Холла. Такі ТП мають просту конструкцію, забезпечують похибку $0,5 \div 1 \%$ в діапазоні вимірювання до 10000 об/хв. Недоліками є низька надійність, чутливість до перешкод і впливу навколишнього середовища [7].

Один з найбільш точних і прямих методів вимірювання положення вала оснований 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 [7, 21–29]. Для побудови ТП просторового кодування використовують накопичувальні кодові перетворювачі кута і перетворювачі зчитування, розглянуті в п. 1.2.1. На один кодовий розряд необхідно мати один пристрій зчитування. На рис. 1.2. показані реалізації кодових дисків (а – в двійковий; б – в код Грея).

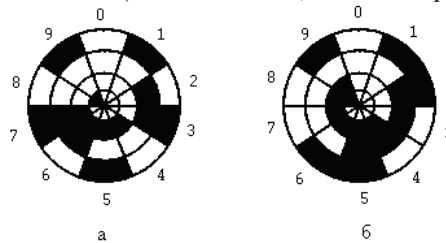


Рис. 1.3. Кодові диски

Вихідний код представляє собою код кутового положення диска відносно нульового положення. Кутова швидкість знаходиться шляхом цифрового диференціювання залежності вихідного коду від часу:

$$\omega = \frac{2\pi}{n} \cdot \frac{N_2 - N_1}{t_2 - t_1}, \quad (1.15)$$

де n – кількість секторів; N_2, N_1 – значення вихідного коду ТП у моменти часу t_2, t_1 .

Вираз (1.15) визначає середню кутову швидкість за проміжок часу від t_1 до t_2 .

Точність ТП просторового кодування визначається розрядністю кодового диска, точністю виготовлення кодової маски, точністю зчитування інформації і точністю виконання операції цифрового диференціювання [7, 68–70]. Основною похибкою є похибка диферен-

ціювання. Крім того, операція диференціювання знижує швидкодію ТП, а роздільна здатність змінюється зі зміною швидкістю. Тому такі ТП мають обмеження по верхній межі вимірювання кутової швидкості, приблизно, на рівні 3000 об/хв.

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

1.2.3. Контроль вібрації та биття

Для вимірювання вібрації та биття використовують вимірювальні перетворювачі малих переміщень.

Абсолютні вібрації зазвичай вимірюють за допомогою перетворювачів інерційної дії. Практика створення вимірювачів параметрів абсолютної вібрації показує, що в цій сфері велику перевагу мають п'єзоперетворювачі [32–40]. На їхній основі створено багато високоточних приладів для вимірювання вібрацій у широкому діапазоні частот. До переваг п'єзоелектричних перетворювачів можна віднести високу віброміцність і завадостійкість. Однак п'єзоелектричні перетворювачі за своєю суттю є контактними перетворювачами, тобто передбачають обов'язкове жорстке кріплення до досліджуваного об'єкта. З огляду на це їхнє застосування при вимірюванні вібрації рухомих елементів неможливе.

Застосування контактних перетворювачів для контролю положення зразкової поверхні призводить до виникнення похибки контактування, динамічної похибки при високих швидкостях обертання, зберігається похибка форми через вплив мікрогеометрії поверхні на результат вимірювань.

Відносну вібрацію та биття вимірюють приладами, основаними на смісних, індуктивних, фотоелектричних і лазерних перетворювачах [9, 32–40]. Для отримання закінченої картини вібраційних процесів, які виникають під час роботи машини, необхідно вимірювати саме відносну вібрацію.

Принцип дії безконтактних індуктивних первинних вимірювальних перетворювачів оснований на використанні залежності індуктивності контуру зі струмом або взаєміндуктивності двох зв'язаних контурів від їхніх розмірів, форми, взаємного положення і магнітної проникності середовища, в якому вони знаходяться. Зокрема, індуктивність котушки з магнітним осердям, розміщеним над магнітною поверхнею на певній відстані, залежить від величини останнього [23, 32, 33]. В цьому випадку перетворювач сприймає відносні переміщення торця осердя і контрольованої поверхні.

Індуктивний перетворювач зі змінною величиною зазору дозволяє виміряти переміщення від часток мікрометра до кількох міліметрів. Перетворювач є критичним до зміни магнітної проникності матеріалу контрольованої поверхні і середньої довжини силової лінії. Іншими словами, індуктивний перетворювач реагує не тільки на переміщення поверхні, але й на зміни властивостей певного об'єму матеріалу під цією поверхнею, оскільки силові лінії перетинають певний шар під нею. Крім цього існують труднощі зі стабілізацією параметрів перетворювача через вплив вихрових струмів, нагрівання осердя, вплив паразитних ємностей і індуктивностей з'єднувального кабелю [4, 35]. На практиці індуктивним перетворювачем можна вимірювати вібрації частотою до 1 кГц.

Принцип дії ємнісного безконтактного перетворювача оснований на залежності ємності між провідниками від їхнього взаємного положення, розмірів і властивостей середовища між ними [4]. При вимірюванні параметрів вібрації, амплітуда яких, як правило, не перевищує 1 мм, інформативним параметром є вимірювання відстані між пластинами. Контрольована поверхня повинна мати достатньо велику діелектричну проникність, яка забезпечує переважну чутливість перетворювача до коливань поверхні. Вибором оптимальної відстані між пластиною перетворювача і поверхнею можна значно знизити вплив зміни діелектричної проникності поверхні в широких межах. Збільшення початкового зазору перетворювача до оптимальної величини може призвести до зростання добротності перетворювача за рахунок зменшення впливу провідності діелектрика на роботу перетворювача. Ємнісні перетворювачі за своєю конструкцією є надійними в роботі.

Істотним недоліком ємнісних перетворювачів є вплив на їхню роботу паразитних ємностей і індуктивностей з'єднувального кабелю.

Робота радіохвильових перетворювачів переміщень основана на взаємодії електромагнітної хвилі НВЧ діапазону з поверхнею контрольованого об'єкта, в результаті чого параметри відбитого сигналу змінюються за законом переміщення цієї поверхні [35]. Найбільше застосування отримали частотний і фазовий методи вимірювання. Частотний метод оснований на зміні частоти об'ємного резонатора, одна із стінок якого утворена контрольованою електропровідною поверхнею. Фазовий метод полягає в зміні фази відбитої від об'єкта хвилі при переміщенні об'єкта відносно випромінювача. В обох випадках має місце відбиття хвилі від поверхні.

При відбиванні хвилі спостерігається утворення двох відбитих хвиль і виникають додаткові труднощі з фокусуванням електромагнітної хвилі на невеликій ділянці поверхні. Складним в реалізації є також підведення до випромінювача НВЧ сигналу по довгому каналу,

що потребує розміщення випромінювача і блока обробки в безпосередній близькості один від одного для проміжного перетворення сигналу у форму, зручну для передачі каналом зв'язку в основний блок обробки.

У цьому випадку збільшується кількість перетворень вимірювальної інформації, що веде до збільшення похибки всього процесу вимірювань.

Фотоелектричні та лазерні перетворювачі переміщень працюють на основі взаємодії електромагнітних хвиль оптичного діапазону і контрольованої поверхні, в результаті якої відбувається зміна початкових параметрів даних електромагнітних хвиль [34, 35]. Оптичні перетворювачі мають такі переваги як дистанційність вимірювань, висока швидкість, точність і роздільна здатність.

Усі розглянуті вище перетворювачі застосовуються на практиці залежно від конкретних вимог точності, конструктивних і експлуатаційних вимог, що висувають до них у різних системах особливо як прецизійні датчики, вихідні сигнали яких перетворюються в код для введення в ЕОМ.

1.3. Класифікація оптичних засобів контролю параметрів обертального руху

Як зазначалось вище, оптичні засоби контролю мають ряд переваг, що суттєво відрізняють їх від інших. Відсутність обмоток, можливість одержання високої точності при малих габаритах, безконтактність вимірювань, різні методи перетворення кутових величин в електричні сигнали сприяють широкому застосуванню оптичних перетворювачів для побудови засобів контролю параметрів ОР. Крім того, поєднання оптики, електроніки й обчислювальної техніки робить можливим створення на основі оптичних сенсорів багатопараметричних засобів, що забезпечують контроль одночасно кількох параметрів обертального руху.

Оптичні прилади дуже різноманітні за будовою, принципом дії і застосуванням. Існує ряд основних ознак, за якими їх класифікують.

Проаналізувавши узагальнену структуру оптичного вимірювального перетворювача, її було умовно поділено на три основні частини (рис. 1.3): джерело випромінювання, оптична система з модулятором і приймач випромінювання.



Рис. 1.3. Узагальнена структурна схема оптичного вимірювального перетворювача параметрів обертального руху

Виходячи з вищесказаного запропоновано класифікацію (рис. 1.4), в основу якої покладено сім основних класифікаційних ознак [41, 42]:

- 1) за типом джерела випромінювання;
- 2) за типом інформативного сигналу;
- 3) за наявністю або відсутністю оптичної системи;
- 4) за наявністю і типом чутливого елемента, модулятора або дефлектора;
- 5) за типом приймача випромінювання;
- 6) за принципом перетворення променевої енергії;
- 7) за видом інформативного параметра вихідної величини.

Поділ приладів за певними ознаками не виключає того, що визначена за однією ознакою група приладів може, в свою чергу, поділятися за іншою основною ознакою. Наприклад, оптико-електронні прилади можуть містити модулятор або бути без нього, використовувати одиночні фотоприймачі або інтегральні багатоелементні фотоприймальні пристрої.

За типом джерела випромінювання оптичні вимірювальні перетворювачі діляться на такі, що використовують монохроматичне, біле або імпульсне випромінювання. Відповідно до цього застосовують різні види випромінювачів, наприклад, напівпровідникові лазери, лампи розжарювання, світлодіоди [43–45].

Імпульсне випромінювання може бути як монохроматичне, так і біле.

При цьому даний сигнал може бути модульованим і немодульованим. Вимірювальні перетворювачі кутової швидкості використовують частотну, фазову, амплітудну, час-імпульсну і просторову модуляції. Перетворювачі просторового кодування діляться на накопичувальні і перетворювачі зчитування.

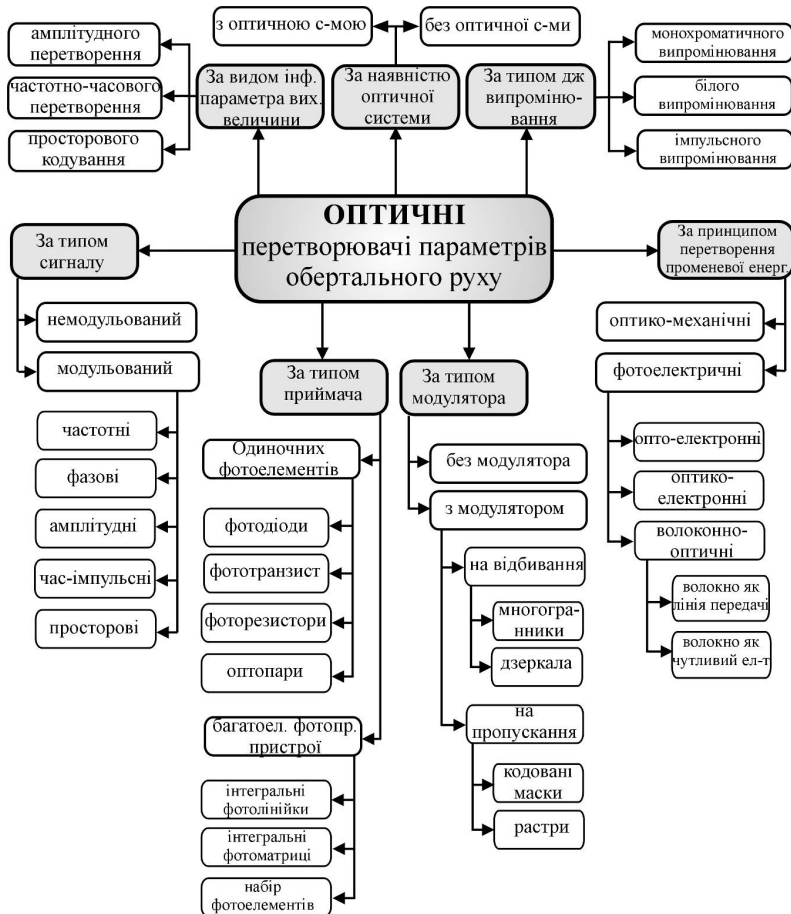


Рис. 1.4. Класифікація вимірювальних перетворювачів параметрів обертального руху

Оптичні вимірювальні перетворювачі можуть містити або ж не містити оптичну систему. Оптична система може включати в себе набір фокусувальних лінз, об'єктиви, оптичне волокно і т.п. Перетворювачі з оптичною схемою можуть також містити модулятори або дефлектори. Модулятори розміщуються на валу тіла обертання і бувають на відбивання і пропускання випромінювання. Досить поширеними є дефлектори у вигляді правильних і неправильних відбивальних багатогранників. Використовують також різноманітні дзеркала. На пропускання найчастіше застосовують растри і кодовані маски Грея, в

яких вимірювана величина безпосередньо перетворюється у код. Кількість розрядів кодованих масок при прийнятних габаритах (зовнішній діаметр менше 100 мм) складає 13–14. Растрові інтерполятори перетворювачів кута мають 22–23 розряди при діаметрі диска 100–150 мм [5, 19].

Важливою класифікаційною ознакою є тип приймача. Приймачі оптичних сигналів бувають одноелементними і багатоелементними [46–50]. Серед одиночних фотоелементів можна виділити фотодіоди, фототранзистори, фоторезистори і оптопари. В якості багатоелементних фотоприймачів використовують набори фотоелементів. З розвитком сучасних технологій з'являються нові пристрої з використанням інтегральних багатоелементних фотоприймальних пристроїв. Фотолінійки і фотоматриці розширюють функціональні можливості відомих вимірювальних перетворювачів. Вони підвищують точність, завдяки своїй високій роздільній здатності, знижують інерційність, забезпечують автоматизацію вимірювань і зв'язок з комп'ютером через стандартні інтерфейси [50–52]. Так, наприклад, інтегральні фотолінійки містять близько 5–6 тисяч фотокомірок, а фотоматриці – мільйони фотокомірок [46, 50].

В таблиці 1.1 наведена класифікація фотоприймальних пристроїв, вказані особливості їхньої будови і застосування.

Найчастіше перетворення променевої енергії відбувається фотоелектричним шляхом. Фотоелектричні вимірювачі включають у себе опто-електронні, оптикоелектронні і волоконно-оптичні вимірювальні перетворювачі. Оптоелектронними називаються вимірювальні перетворювачі, в яких у процесі вимірювального перетворення не відбувається зміна характеристик випромінювання [1, 2]. До оптикоелектронних відносяться перетворювачі неелектричних величин в електричні, в яких вимірювана неелектрична величина і вихідна електрична зв'язана потоком електромагнітного випромінювання оптичного діапазону хвиль, при цьому використовуються властивості світлового потоку ослаблюватися, розсіюватися, відбиватися, відхилятися при його проходженні крізь досліджуване середовище. Волоконно-оптичні сенсори на сьогодні виділились у окрему підгрупу завдяки своїй чисельності і різноманітності. В свою чергу їх можна поділити на сенсори, в яких оптичне волокно використовується як лінія передачі, і на сенсори з оптичним волокном як чутливим елементом. Наприклад, точність перетворення кутового повороту в цифровий код фотоелектричним перетворювачем при 13 розрядах складає 2,5 мінути. Двоканальний волоконно-оптичний перетворювач «кут-код» забезпечує результуючу похибку вимірювання кута не більшу 0,5 градуса [67].

Таблиця 1.1

Класифікація фотоприймальних пристроїв

| Фотоприймальний пристрій за класифікаційною ознакою | Короткий опис | |
|--|-----------------------|---|
| 1. За принципом перетворення чутливого елемента | | |
| На внутрішньому фотоефекті | Фотодіоди | Напівпровідникові прилади, основані на внутрішньому фотоефекті, що використовують односторонню провідність <i>p-n</i> переходу, при освітленні якого з'являється ЕРС або змінюється значення зворотного струму. Спектральна чутливість від 180 – 2600 нм залежно від напівпровідникового матеріалу [43, 53] |
| | Фоторезистори | Принцип дії оснований на ефекті фотопровідності. Під дією потоку випромінювання внаслідок внутрішнього фотоефекту у фоторезистора змінюється опір [43, 53–54] |
| | Фототранзистори | Напівпровідниковий приймач випромінювання, що поєднує в собі властивості фотодіода і підсилювального триода. Розрізняють біполярні, уніполярні і польові ФТ [43, 53–55] |
| | Фототиристори | Фотоелектричний напівпровідниковий прилад <i>p-n-p-n</i> структури з трьома <i>p-n</i> переходами, при освітленні якого прилад переходить із закритого стану у відкритий в прямому напрямку [43, 53] |
| | Інші | Сканістори, фотопотенціометри та ін [53] |
| На зовнішньому фотоефекті | Фотопомножувачі | Електровакуумний прилад, який перетворює енергію оптичного випромінювання в електричні сигнали і містить фотокатод, вторинно-електронний помножувач і анод. Спектральна чутливість 100–1700 нм. Використовуються для вимірювань, які необхідно провести за короткий час або на високих частотах [53] |
| | Вакуумні фотоелементи | Вакуумний або іонний фотоелемент, оснований на явищі фотоелектронної емісії електронів у вакуум або газ, який перетворює енергію оптичного випромінювання в електричні сигнали і містить фотокатод і анод [43, 53] |

Наукове видання

Марина Йосипівна Юкиш, Василь Васильович Кухарчук,
Йосип Йосипович Білінський

**ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ
ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ НА ОСНОВІ
МЕТОДУ ПРОСТОРОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено М. Юкиш

Підписано до друку 16.09.2009 р.
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 8,05.
Наклад 100 прим. Зам. № 2009-158.

Вінницький національний технічний університет,
видавництво «УНІВЕРСУМ-Вінниця»
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,
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.

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/486>

Видавництво Вінницького національного технічного університету
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>