

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. О. Поджаренко, В. М. Севастьянов, В. П. Осадчий

**МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ТАХОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2009

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/478>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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

УДК 621.317.089

П 45

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 30.10.2008 р.)

Рецензенти:

П. Г. Столярчук, доктор технічних наук, професор

В. В. Кухарчук, доктор технічних наук, професор

Поджаренко, В. О.

П 45 Метрологічне забезпечення тахометричних вимірювальних перетворювачів: монографія / В. О. Поджаренко, В. М. Севастьянов, В. П. Осадчий. — Вінниця : ВНТУ, 2009. — 148 с.

ISBN 978-966-641-308-9

В монографії розглядаються питання метрологічного забезпечення тахометричних вимірювальних перетворювачів. Дослідженнями ІВС контролю параметрів тахометричних перетворювачів встановлено, що існує необхідність контролю параметрів тахометричних перетворювачів як у статичному, так і в динамічному режимі роботи. Це дозволило розробити нову модель ІВС з покращеними метрологічними характеристиками.

Розроблено нові методи розрахунку параметрів тахометричних вимірювальних перетворювачів у динамічному режимі роботи.

УДК 621.317.089

ISBN 978-966-641-308-9

© В. Поджаренко, В. Севастьянов, В. Осадчий, 2009

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ | 6 |
| Розділ 1. Основи тахометрії | 7 |
| 1.1. Особливості тахометричних перетворювачів як об'єктів контролю | 7 |
| 1.2. Огляд та аналіз існуючих підходів до контролю параметрів тахометричних перетворювачів | 12 |
| 1.3. Проблеми підвищення достовірності контролю в ІВС контролю параметрів ТП та шляхи їх вирішення | 22 |
| Розділ 2. Принципи побудови систем контролю параметрів ТП 24 | |
| 2.1. Аналіз систем контролю параметрів ТП з різними типами двигунів | 24 |
| 2.1.1. Двигун постійного струму | 25 |
| 2.1.2. Синхронний двигун | 29 |
| 2.1.3. Асинхронний двигун | 31 |
| 2.1.4. Порівняння результатів моделювання | 33 |
| 2.2. Аналіз руху механізму з приводом від двигуна постійного струму з незалежним збудженням | 34 |
| 2.3. Розробка та обґрунтування методу визначення параметрів динамічного режиму роботи ТП | 40 |
| Розділ 3. Розробка системи контролю параметрів ТП | 43 |
| 3.1. Розробка структурної схеми інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів ТП | 43 |
| 3.2. Вибір взірцевого тахометричного перетворювача | 45 |
| 3.3. Розробка структури вимірювального каналу кутової швидкості | 47 |
| 3.4. Дослідження метрологічних характеристик ІВС | 55 |
| 3.4.1. Оцінювання метрологічних характеристик вимірювального перетворення кутової швидкості | 55 |
| 3.4.2. Дослідження динамічних метрологічних характеристик вимірювального каналу кутової швидкості | 59 |
| 3.4.3. Оцінювання статичних метрологічних характеристик вимірювального перетворення моменту інерції | 62 |
| 3.5. Мінімізація похибки дискретного диференціювання при вимірюванні кутової швидкості | 65 |
| 3.6. Дослідження достовірності контролю в динамічному режимі | 71 |

| | |
|---|------------|
| Розділ 4. Метрологічне забезпечення ТП..... | 83 |
| 4.1. Задача метрологічної атестації програмного забезпечення ІВС контролю параметрів тахометричних перетворювачів ... | 83 |
| 4.2. Метрологічна атестація генератора цифрового тестового сигналу | 87 |
| 4.3. Метрологічна атестація системи контролю параметрів тахометричних перетворювачів на основі теорії невизначеності вимірювань | 93 |
| 4.4. Методика оцінювання невизначеності результатів вимірювань при контролі тахометричних перетворювачів..... | 101 |
| | |
| ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ | 104 |
| ЛІТЕРАТУРА | 106 |
| Додаток А. Проект ДСТУ «Тахометри. Терміни та визначення.» | 114 |
| | |
| Додаток Б. Проект ДСТУ «Тахометри. Загальні технічні вимоги.» | 123 |
| Додаток В. Проект ДСТУ «Тахометри. Методи і засоби перевірки.» | 140 |
| | |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

| | | |
|------|---|--|
| АЦП | – | Аналого-цифровий перетворювач |
| ВК | – | Вимірювальний канал |
| ВП | – | Вимірювальне перетворення |
| ВТП | – | Взірцевий тахометричний перетворювач |
| ГЦТС | – | Генератор цифрового тестового сигналу |
| ДПС | – | Двигун постійного струму |
| ІВС | – | Інформаційно-вимірювальна система |
| КЗВ | – | Комп'ютерний засіб вимірювання |
| МА | – | Метрологічна атестація |
| МПС | – | Мікропроцесорна система |
| МС | – | Муфта сполучення |
| МХ | – | Метрологічні характеристики |
| ОД | – | Об'єкт досліджень |
| ПЗ | – | Програмне забезпечення |
| ПТП | – | Тахометричний перетворювач, що перевіряється |
| СКВ | – | Середньоквадратичне відхилення |
| ТП | – | Тахометричний перетворювач |
| ТС | – | Технічний стан |
| ЦАП | – | Цифро-аналоговий перетворювач |
| ЦСП | – | Цифровий сигнальний процесор |
| ЧР | – | Частотний регулятор |
| ШПІ | – | Широтно-імпульсний перетворювач |

Вступ

Тахометричні перетворювачі (ТП) представляють собою один з найбільш масових видів вимірювальних засобів. В наш час неможливо назвати жодної з областей техніки та промисловості, де б не застосовувались ТП, як для дослідницьких цілей та виконання вимірювань, так і для забезпечення автоматичного регулювання і управління технологічними процесами, які здебільшого працюють в динамічних режимах та режимах реального часу. Точність, надійність та стабільність властивостей ТП у значній мірі визначають рівень розвитку сучасної науки і техніки. В сучасній літературі майже повністю відсутній розгляд питань, пов'язаних з роботою ТП в динамічних режимах. З розширенням номенклатури ТП, підвищенням точності, якості необхідно суттєво підвищувати вимоги до повірочної апаратури, що привело до необхідності розробки засобів, які базуються на досягненнях сучасної електроніки та автоматики та забезпечують високу точність, а також високу продуктивність калібровки. Неавтоматична апаратура для калібровки ТП не задовольняє сучасні вимоги при проведенні випробувань в динамічному режимі. Автоматизація калібровки не тільки забезпечує підвищення виробництва, продуктивності та точності, але й дозволяє накопичувати великий статистичний матеріал. Все це обумовлює високу економічну ефективність впровадження автоматичних повірочних засобів.

Розділ 1. Основи тахометрії

1.1. Особливості тахометричних перетворювачів як об'єктів контролю

Всі засоби вимірювальної техніки, що виготовляються або потребують ремонту, ввозяться з-за кордону, знаходяться в експлуатації та на зберіганні, підлягають метрологічній повірці. Метрологічна повірка засобів вимірювальної техніки – це встановлення придатності засобів вимірювальної техніки до застосування на основі експериментального визначення його метрологічних характеристик і контролю їх відповідності встановленим нормам. Метрологічну повірку здійснюють згідно з «Законом України про метрологію та метрологічну діяльність» [1] та ДСТУ 2708—99 [2].

Поширеною технічною задачею є вимірювання частоти обертання валів в процесі роботи різноманітного обладнання: турбоагрегатів, насосів, двигунів на підприємствах водопостачання, теплопостачання, газоконденсаторних станціях. Для вирішення цих задач використовуються тахометричні системи, тахометричні перетворювачі, які призначені для неперервного, дистанційного перетворення частоти обертання валів агрегатів у послідовність імпульсів струму чи напруги. Крім того, тахометричні перетворювачі як основні складові входять у склад різноманітних теплових лічильників (для вимірювання витрат), ротаційних витратомірів газу, витратомірів води та інших рідин, масових витратомірів тощо.

В процесі роботи тахометричні комплекси повинні вимірювати та контролювати частоту обертання та прискорення обертання, працювати в динамічному та статичному режимах роботи. При несправному ТП виникає неправильне вимірювальне перетворення частоти обертання та прискорення обертання, внаслідок чого можуть виникнути різноманітні аварійні ситуації або неправильний облік енергоресурсів. Це може призвести до значних економічних втрат.

Контролювання технічного стану ТП проводиться на основі їх метрологічного забезпечення. Метрологічне забезпечення – це встановлення та застосування наукових і організаційних основ, технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності і необхідної точності вимірювань [1]. Кінцева мета метрологічного забезпечення – звести до раціонального мінімуму можливість прийняття помилкових рішень за результатами вимірювань, випробувань і контролю параметрів, приладів чи процесів. Для досягнення цієї мети необхідне комплексне вирішення всіх задач метрологічного забезпечення.

Діапазон вимірювання кутової швидкості в тахометрії досить широкий: від одиниць до декількох десятків тисяч обертів за хвилину. При цьому похибка вимірювання знаходиться в межах від одиниць до сотих часток відсотка. До області вимірювання кутових швидкостей (тахометрії) традиційно стали відносити в багатьох випадках і вимірювання лінійної швидкості, пройденого шляху, числа обертів.

В наш час випускаються електронні цифрові тахометри із системою сигналізації при досягненні визначеного значення кутової швидкості. Такі прилади в залежності від призначення мають вихід на дублюючі показники, реєструючі пристрої, мають великі потенційні можливості, що дозволяють легко змінювати діапазон вимірювань, з'єднувати прилади з різними датчиками, вимірювальними перетворювачами або приймачами.

У вітчизняній практиці застосовуються, головним чином, такі первинні вимірювальні перетворювачі тахометрів: індукційні, індуктивні, фотоелектричні. Деякі з них випускаються як окремі вироби, наприклад, растрові фотоелектричні перетворювачі типу ВЕ-178 Оршанського верстатобудівного заводу. Більшість цих перетворювачів входить до складу електронних тахометрів ТЭСА, 7ТЭ й інших.

Тахометри вітчизняної розробки, що знаходяться в експлуатації, не повною мірою забезпечують потреби народного господарства. За діапазоном і точністю вимірювань вони не поступаються кращим закордонним зразкам, чого не можна сказати про їхню масу, габаритні розміри та надійність.

У практиці розробки і виробництва тахометричних комплексів існує ряд проблем. Наприклад, зупинено випуск магнітних відцентрових тахометрів, що добре зарекомендували себе та вигідно відрізнялися від електронних не тільки малими розмірами, але і високою надійністю і радіаційною стійкістю, не вимагали джерел живлення.

Ресурс роботи ряду виробів, оцінка їх технічного стану, якість роботи роторних систем або виробів, що представляють сукупність роторних систем, у значній мірі визначаються рівномірністю обертання кінематичних ланок. З'явилася велика кількість нестандартних приладів, перевірка яких, як правило, заводами-виготовлювачами не виконується. Важливою проблемою є вирішення вимірювальних задач, пов'язаних з визначенням миттєвих значень кутової швидкості і її коливань.

На основі аналізу [3] розглянутих вимірювальних задач, оцінки тенденції розвитку робочих засобів вимірювання і стану питання метрологічного забезпечення всієї номенклатури робочих засобів вимірювань можна зробити такі висновки.

Існуюча локальна схема перевірки засобів вимірювання частоти обертання в цілому задовольняє вимоги економіки, проте має потребу в подальшому удосконаленні в галузі розширення діапазону і підвищення точності відтворення частоти обертання еталонних ЗВ першого розряду.

Рух обертових механізмів можна описувати термінами «кутова швидкість» чи «частота обертання», що мають розходження, що буде показано далі.

Наведемо визначення цих термінів, що відповідають міжнародній системі одиниць вимірювання.

Кутовою швидкістю називається фізична величина, обумовлена першою похідною від кута повороту φ за час t , рад/с:

$$\omega(t) = d\varphi/dt. \quad (1.1)$$

Частотою обертання n називається фізична величина, обумовлена відношенням числа обертів N обертового вала до часу обертання $\Delta t \in [0, T]$

$$n(t) = N/\Delta t. \quad (1.2)$$

Одиниця вимірювання n відрізняється від ω у формулі множником 2π .

Поняття «оберт» (tour, revolution, umdrehung) широко застосовується в техніці, але не завжди з яким розумінням його змісту. У більшості випадків воно зустрічається як «оберт за хвилину» (рідше за секунду) у якості одиниці швидкості обертання. У такому випадку «оберт» звичайно розуміється як синонім циклу обертання. Існує пропозиція прийняти «оберт» як одиницю кута [4]. У першому випадку «оберт» є не вимірювальною, а рахунковою одиницею, причому «швидкість обертання» – це частота обертання. Але якщо «оберт» – одиниця кута, то «швидкість обертання» потрібно буде розглядати як кутову швидкість. От чому для правильного розуміння цих трьох понять – «оберт», «оберт за хвилину» і «швидкість обертання» – необхідно розібратися з їхніми визначеннями в існуючих нормативних документах і в метрологічній літературі, з огляду при цьому, і на практику їх застосування.

У рекомендаціях ISO P31 «оберт» і «швидкість обертання» не зустрічаються, ISO/TK 31/11 дає як характеристику періодичного обертання частоту обертання з визначенням – «число обертів, поділене на час».

При впровадженні Міжнародної системи одиниць (SI) у технічних колах висловлювалося бажання зберегти «оберт за хвилину» на правах одиниці, маючи на увазі її широке поширення і її наочність. Оскільки похідні вимірвальні одиниці виходять як сполучення вимірвальних одиниць, то для здійснення цього необхідно визнати «оберт» вимірвальною одиницею. У цьому зв'язку на 2-й сесії Консультативного комітету МКМВ з одиниць була внесена пропозиція включити оберт як одиницю плоского кута, що дорівнює 2π радіан, у список одиниць, що допускаються нарівні з одиницями SI. Ця пропозиція не знайшла підтримки комітету, що прийшов до думки, що термін «оберт», наприклад у вираженні одиниці «оберт за секунду», є лише поясненням природи відповідної величини – «частоти обертання».

Часто застосовують «частота x обертів за секунду», але коректний вираз «частота обертання X за секунду» [5].

У проєкті рекомендацій МОЗМ «Unites de mesure legales» (1972) у розділі «Інші одиниці» як одиниця частоти обертання дається «оберт у законну одиницю часу». В останньому проєкті цього документа як одиниця плоского кута з'явився оберт. Це означає, однак, що оберт за секунду або хвилину є одиницею кутової швидкості, а не частоти обертання. Проте у [6, 7] оберт за секунду й за хвилину приводяться як одиниці частоти обертання і кутової швидкості.

У метрології, однак, не можна допускати застосування того самого поняття в двох значеннях. Потрібно з'ясувати, яке з двох значень оберту – цикл обертання або кут 2π – доцільно залишити для застосування в практиці. Наприклад, коли говориться, що вал машини робить 1000 обертів за хвилину, ніхто не уявляє собі кут $1000 \cdot 2\pi = 360000^\circ$, а кожний розуміє, що вал крутиться 1000 разів за хвилину. Це означає, що «оберт» є рахунковою одиницею одного циклу обертання. Оберт відповідає куту 2π , але не застосовується в значенні кута 2π .

Неважко з'ясувати, що застосовувана дотепер величина «швидкість обертання n » відповідає точно величині «частота обертання».

Визначення швидкості обертання таке як і частоти обертання

$$n = N/t, \quad (1.3)$$

де N – число обертів за час t .

Мається на увазі, що рух періодичний ($n = const$). Кутова швидкість ω відноситься до довільного обертання, і її визначення $\omega = d\varphi/dt$, де φ – кут обертання.

Ці визначення вказують на те, що швидкість обертання, як і частота обертання, ніяк не є синонімами кутової швидкості. За фізичним

змістом це різні величини, не пропорційні одна іншій. При періодичному обертанні $n = const$, але кутова швидкість може бути змінною протягом одного оберту, наприклад у поршневих двигунів і компресорів. Рівність $\omega = 2\pi n$ справедлива тільки для рівномірного обертання.

Отже, спираючись на існуючу практику, треба застосовувати слово «оберт» тільки як рахункову одиницю, що означає один цикл обертання. У такому випадку «оберт за хвилину» і «оберт за секунду» не будуть уже метрологічними одиницями. Їх варто замінити одиницями частоти обертання «за секунду» (s^{-1}) і «за хвилину» (h^{-1}). При цій заміні всі чисельні значення і усі формули, що містять швидкість обертання або частоту обертання n , залишаються незмінними.

Сказане вище не означає, що треба відмовитися від поняття «оберт», проте у змісті одного циклу обертання воно необхідно і його можна використовувати.

Таким чином, вибір в якості базового поняття «частота обертання» дасть усереднений опис руху обертових механізмів. Це цілком достатня інформація, оскільки робочий процес визначається саме обертанням, а не поворотом. Проте «частота обертання» є позасистемною одиницею вимірювання [8] і використання її можливе тільки при $\omega = const$, тобто у статичному режимі роботи, коли терміни «кутова швидкість» і «частота обертання» тотожні, що доведено вище. А для проведення вимірювання у динамічному режимі $\omega = \Delta\varphi/\Delta t$ доцільно використовувати поняття «кутова швидкість» і вимірювати її за допомогою системної одиниці $din(pad/c)$.

Якість процедури контролю, ступінь його правдоподібності характеризується достовірністю контролю [9]. Кількісною оцінкою достовірності є ймовірність того, що результат контролю відповідає дійсному стану об'єкта. Як і ймовірність, вірогідність контролю може приймати значення від 0 до 1. В ідеальному випадку контроль дає абсолютну правильний результат, і тоді вірогідність дорівнює 1. Але на практиці через вплив великої кількості різних факторів достовірність відрізняється від 1. Основними причинами цього можуть бути: невідповідність об'єкта контролю приписаній йому моделі, що звичайно пов'язано з необхідністю спрощення процедури контролю; наявність похибок вимірювання контрольованого параметра; наявність відтворення (вимірювання) режимних та вхідних величин.

Згідно з вищенаведеним, вірогідність розподіляють на методичну та інструментальну. Тому достовірність контролю визначається його методичною та інструментальною складовими [10, 11]. Згідно з державним стандартом України [9] – достовірність контролю – ступінь об'єктивної відповідності результату контролю дійсному ТС об'єкта.

Методична складова достовірності контролю визначається як

$$D_m = \frac{N_1}{N}, \quad (1.1)$$

де N – загальна кількість показників, що характеризують ТС ОД; N_1 – кількість показників, що ввійшли в модель контролю.

Інструментальна складова достовірності контролю D_i визначається ймовірністю помилок першого α та другого β роду визначення параметрів контролювання

$$D_i = 1 - \alpha - \beta. \quad (1.2)$$

Загальна достовірність контролю D_Σ виражається добутком

$$D_\Sigma = D_m \cdot D_i. \quad (1.3)$$

1.2. Огляд та аналіз існуючих підходів до контролю параметрів тахометричних перетворювачів

Різноманітність ТП зумовлює необхідність їх чіткої класифікації в залежності від багатьох параметрів, зокрема, за діапазоном вимірювання, за точністю, за фізичним ефектом, на якому заснований даний тахометричний перетворювач та багатьма іншими важливими характеристиками.

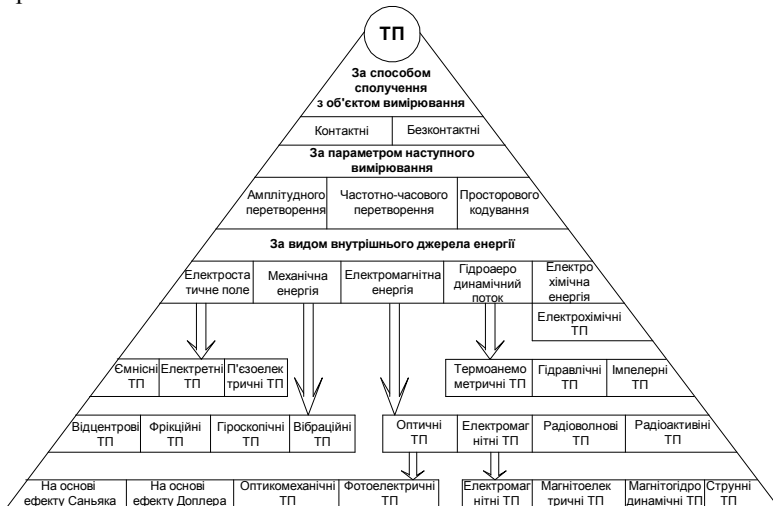


Рис. 1.1. Класифікація тахометричних перетворювачів

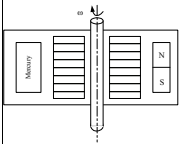
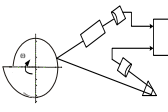
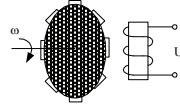
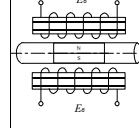
З розвитком науки і техніки почали розробляти і випускати багато різноманітних тахометричних установок вітчизняного і закордонного виробництва. Вони автоматизовані, мають зручний інтерфейс, що полегшує роботу перевірки і підвищує їх точність та швидкість [14].

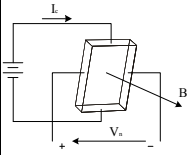
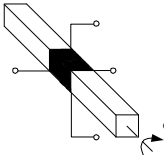
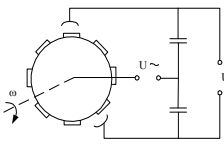
В таблиці 1.1 наведені найбільш важливі та суттєві параметри та властивості. Ці параметри є середніми для датчиків, які є в продажу, або з великою вірогідністю реальні для датчиків промислового виготовлення.

Таблиця 1.1

Огляд тахометричних перетворювачів

| За способом сполучення з валом | Контактні | Безконтактні | | |
|--------------------------------|---|---|---|--|
| За видом джерела енергії | Електромеханічні | Оптичні | | |
| Тип ТП | Тахогенераторні | Стробоскопічні | Фотоелектричні | Оптоелектронні |
| Принцип дії | Заснований на використанні явища електромагнітної індукції | Фізіологічна особливість ока зберігати короточасні світлові зображення після їх зникнення | Модуляція освітленості робочої поверхні фотоелектричного елемента числом обертів | Ефект Сан'яка (поєднання фазового зсуву між двома складовими розщепленого світлового потоку) |
| Умовна схема |  |  |  |  |
| Діапазон об./хв. | 1 — 10000 | 30 — 600000 | 0,001 — 1000000 | 0,001 — 1 |
| Похибка | 0,2 — 1 % | 0,5 — 1,5 % | 0,1 — 1,5 % | < 0,5 % |
| Основні переваги | Лінійна залежність у великому діапазоні | Відсутність навантаження на ОВ | Простота конструкції Висока заводостійкість | Роздільна здатність 10^5 — $5 \cdot 10^8$ імп./об. Висока заводостійкість |
| Основні недоліки | Велике навантаження на ОВ Пульсації вихідної ЕРС | Конструктивна складність Неможливість вимірювання швидкозмінних кутових швидкостей | Похибка, зумовлена нерівномірністю нанесення поділок | Наявність дзеркала Використовується рідкісний і дорогий матеріал |

| За способом сполучення з валом | Контактні | Безконтактні | | |
|--------------------------------|---|---|---|---|
| | За видом джерела енергії | Електромагнітні | | |
| Магнітогідродинамічні | | Радіохвильові На осн. еф. Доплера | Індуктивні | Індукційні на осн. еф. Баркгаузена |
| <i>Tun TPI</i> | | | | |
| Принцип дії | Взаємодія рідкого металу з магнітним полем при якій індукується напруга | Зміна частоти коливань, які сприймаються спостерігачем, який рухається в напрямку розповсюдження цих коливань | Залежність індуктивності катушки від зміни опору магнітного кола | Зміна частоти стрибків Баркгаузена |
| Умовна схема |  |  |  |  |
| Діапазон об./хв.. | 0,1 — 200000 | 0,001 — 1 | 0,1 — 1000000 | 0,01 — 1 |
| Похибка | 0,01 % | < 1 % | 0,1 -1,5 % | < 1 % |
| Основні переваги | Малі габаритні розміри Незначний гістерезис | Відсутність навантаження на ОВ | Висока надійність Простота конструкції | Простота реалізації |
| Основні недоліки | Недосконалість підшипників Магнітні наводки | Складність реалізації | Низька заводозахисеність | Низька заводозахисеність |

| За спосо- бом сполу- чення з ва- лом | Безконтактні | | |
|---|---|---|---|
| За видом джерела енергії | Гальваномагнітні на осн. еф. Хола | Електростатичні | |
| <i>Тип ТП</i> | | П'єзоелектричні | Ємнісні |
| Принцип дії | Виникнення ЕДС у напівпровідни- ковому матеріалі | Виникнення електрич- них сигналів у п'єзо- електричних кристалах | Зміна зарядного струму конденсатора, яка пропорційна його ємності |
| Умовна схема |  |  |  |
| Діапазон об./хв. | 10 — 20000 | 10 — 20000 | 1 — 10000 |
| Похибка | 0,1 — 1 % | 0,1 — 1 % | 1 — 3 % |
| Основні переваги | Простота реалізації Відсутність навантаження на ОБ | Велика роздільна здатність, надійність, довговічність | Висока чутливість Простота реалізації |
| Основні недоліки | Пульсації вихідної ЕРС | Низька швидкодія | Вплив електричних полів та паразитної ємності, навколишнього середовища |

Відповідна класифікація найпоширеніших тахометричних перетворювачів за діапазоном вимірювання, в залежності від ефекту на якому заснований принцип роботи ТП, показана на рисунку 1.2.

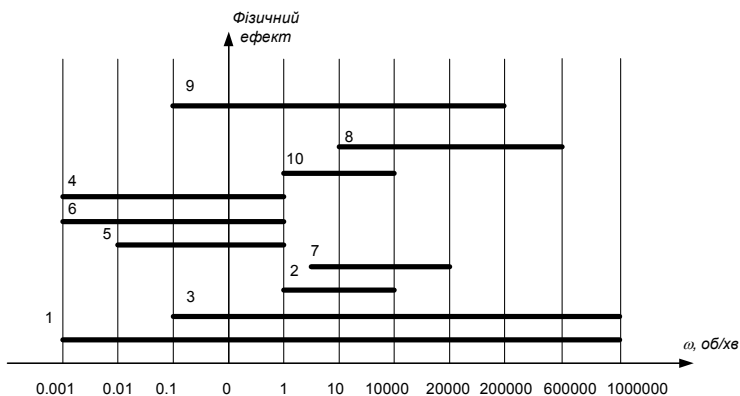


Рисунок 1.2. Класифікація ТП

На рис. 1.2 представлені такі тахометричні перетворювачі:

| Різновид ТП | Діапазон вимірювання, об/хв | |
|------------------------------------|-----------------------------|---------|
| 1. Фотоелектричні ТП | 0,001 | 1000000 |
| 2. Тахогенераторні ТП | 1 | 10000 |
| 3. Індуктивні ТП | 0,1 | 1000000 |
| 4. Оптиелектронні ТП (еф. Сан'яка) | 0,001 | 1 |
| 5. ТП на основі еф. Баркгаузена | 0,01 | 1 |
| 6. ТП на основі еф. Доплера | 0,001 | 1 |
| 7. ТП на основі еф. Хола | 10 | 20000 |
| 8. Стробоскопічні ТП | 30 | 600000 |
| 9. Магнітогідродинамічні ТП | 0,1 | 200000 |
| 10. Ємнісні ТП | 1 | 10000 |

Найбільший діапазон вимірювань у фотоелектричних ТП. Для вимірювання малих переміщень краще використовувати ТП № 4, 5, 6. Також прийнятні характеристики в індуктивних ТП. Тому, в залежності від діапазону вимірюваної величини, необхідно вибирати відповідний ТП, який охоплює повний діапазон вимірювання.

З наведеної класифікації тахометричних перетворювачів найбільш придатними для нашого дослідження є такі: фотоелектричні, індуктивні та перетворювачі на основі ефекту Хола. Ці перетворювачі мають широкий діапазон вимірювання, достатню точність та швидкість. Проте, необхідно приділити особливу увагу, можливості ТП зберігати наведені властивості, як у статичному, так і у динамічному ре-

жимі роботи, а також на всьому діапазоні вимірювання. Це можливо реалізувати за рахунок створення ТП зі змінною величиною «інформативних поділок», тобто $Z = var$.

Забезпечення єдності вимірювань кутових швидкостей досягається шляхом контролювання тахометричних перетворювачів у відповідності до ДСТУ 8.285-78 «Тахометри. Методи і засоби повірки» [12], а також ДСТУ 8.286-78 «Державний спеціальний еталон та схема контролю для засобів вимірювання кутової швидкості в діапазоні $5 \cdot 10^8 - 2,5 \cdot 10^{-4}$ рад/с [13].

Для контролю тахометрів, визначення їх основної похибки, застосовують еталонні тахометричні установки, в яких як робочу міру використовують прецизійні генератори електричних коливань, що дозволяють відтворювати в залежності від типу установки кутові швидкості з граничною похибкою (0,1–0,05)%.

Розглянемо типи деяких приладів закордонного та вітчизняного виробництва. Для забезпечення вимірювання височастотних параметрів руху використовують велику кількість тахометрів: промислові тахометри СА25/СА27; електронні тахометри 7ЕЭ, ТЭСА-1; цифрові тахометри АТТ-6000, ТЦ –3М та багато інших.

Ці прилади забезпечують достатньо широкий діапазон вимірювання від 5 до 100000 об/хв з похибкою до 0,1 %. Найбільш розповсюдженими у нашій країні є механічні тахометри. Основні види і типи мають діапазон 5–10000 об/хв та похибку 1 %.

Контролювання ТП згідно ДСТУ 8.285-78, проводиться тахометричними установками, які забезпечують вимірювання технічних характеристик параметрів руху згідно з існуючими вимогами.

В тахометрії єдність вимірювань забезпечується виконанням локальної схеми перевірки [15]. За цією схемою робоча міра частоти та часу використовується і служить джерелом частоти у діапазоні від 1 Гц до 10 кГц та ЗВТ (засобом вимірювальної техніки) часових інтервалів періоду обертання, а також кількості числа обертів.

Тахометрична установка УТ-05-60 [16] відноситься до ЗВТ першого розряду. Основні характеристики установки УТ-05-60: діапазон відтворення частоти обертання 10–60000 об/хв; гранична відносна похибка відтворення частоти обертання не перевищує 0,05 %. Установка призначена для перевірок робочих ЗВТ методом прямих вимірювань [15]. У відповідності зі схемою повірки перевіряються тахометри з похибкою не меншою як 0,15 %, що задовольняє існуючі вимоги.

Установка ТХ1-60 [17] складається з п'ятиступінчастого редуктора, що приводиться в рух шунтовим двигуном постійного струму, що живиться від мережі змінного струму за допомогою системи перетворювачів. На основному (середньому) валу редуктора закріплені

стробоскопічний диск, що висвітлюється короткочасними спалахами імпульсної лампи, керованою частотою 50 Гц, одержуваною в результаті розподілу частоти кварцового генератора 10000 Гц. Відхилення частоти генератора від номіналу не виходить за межі $\pm 0,01\%$.

За допомогою стробоскопічного методу вимірювання можуть бути відтворені дискретні значення частот обертання на основному валу редуктора через кожні 50 об/хв у межах 100–3000 об/хв. На інших валах редуктора будуть відтворюватися дискретні значення частот обертання, збільшених чи зменшених щодо частоти основного вала на величину передатного коефіцієнта шестерень редуктора. Стробоскопічний диск виконаний таким чином, що дискретні значення частоти обертання можуть бути відтворені без допомоги допоміжного тахометра в межах всього діапазону.

Похибка вимірювання кутової швидкості складає 0,1% і визначається головним чином похибкою «відліку», тобто похибкою доведення кутової швидкості до того значення, при якому відповідна фігура стробоскопічного диску нерухома.

Зразкова установка ОТХЗ-150 [18] ускладнена в порівнянні з попередньою. В цю установку, крім тих вузлів, що застосовані в ТХ1-60, введені стабілізатор кутових швидкостей, магазин частот та підсилювач. Ці елементи дозволяють одержувати дискретні значення кутових швидкостей і автоматично підтримувати їхні значення з заданим ступенем точності тривалий час. Стробоскопічний метод в установці збережений лише як допоміжний, що дозволяє одержувати необхідні значення кутової швидкості і контролювати її синхронізацію. Частоти обертання 60000–150000 об/хв виходять за допомогою додаткового редуктора, що складається з пари шестерень (текстолітової і сталеві). Змащення редуктора виробляється краплинною масельничкою. Крапельки олії, потрапляючи на зуби шестерень, перетворюються в масляний туман, що добре забезпечує змащення шестерень і підшипників редуктора.

Стабілізатор кутової швидкості установки являє собою синхронний двигун, за допомогою якого синхронізуються швидкості основного вала редуктора, що приводиться в рух шунтовим двигуном. Дискретні значення стабілізованих кутових швидкостей визначаються значенням частоти, яка подається на стабілізатор від магазину частот. У свою чергу, магазин частот забезпечує набір частотних реперів у межах 50–1500 Гц через 25 Гц. Внаслідок цього на основному валу п'ятишпindelного редуктора одержують дискретні значення кутових швидкостей у межах 100–3000 об/хв. Установка в цілому забезпечує одержання дискретних значень частот обертання 5–150000 об/хв із похибкою $\pm 0,01\%$.

Спеціальна установка УС-3 [19] для відтворення кутових швидкостей і випробування елементів тахометричної апаратури призначена для відтворення дискретних значень кутових швидкостей (через 100 об/хв до 1000 об/хв, і через 1000 об/хв до 10000 об/хв) у межах 50–10000 об/хв із похибкою 0,003 %. Основним вимірювальним ланцюгом цієї установки є генератор еталонних частот ГЕЧ, за допомогою якого одержують дискретні значення частот від 50 до 1500 об/хв, контрольовані п'єзокварцовим генератором. Ці частоти подаються зі зсувом по фазі на кут 90° на вхід двоканального підсилювача. З виходу підсилювача двофазний змінний струм подається на спеціально розроблений двофазний гістерезисний синхронний двигун, швидкість обертання якого визначається значенням поданої на нього частоти змінного струму.

Крім високої точності, ця система відтворення кутових швидкостей дозволяє одержати необхідні значення швидкості шляхом простого включення гістерезисного двигуна без підготовчих операцій, як це мало місце в установках ТХ1-60 і ОТХ3-150. Установка дозволяє робити дослідження тахометричної апаратури в нормальних умовах, а також у камерах тепла і холоду.

Пристрій для вимірювання малих кутових швидкостей [20]. В наш час становить великий інтерес вимірювання надзвичайно малих кутових швидкостей. Був розроблений пристрій для вимірювання кутових швидкостей у діапазоні $5 \cdot 10^{-4}$ – $2,5 \cdot 10^{-1}$ рад/с з похибкою $\pm 1\%$ (до 10^{-3} рад/с) і $\pm 0,5\%$ (до $2,5 \cdot 10^{-1}$ рад/с).

Двоє дифракційних ґрат, розташовані на невеликій відстані, переміщуються одна відповідно одної. Одна з них закріплена на поворотній платформі, інша – нерухома. Інтерференційні смуги, що спостерігаються при цьому, переміщуються. За допомогою фотоелектричного пристрою й електронного лічильника ведеться підрахунок інтерференційних смуг за визначений проміжок часу. Знаючи постійну ґрат, проміжок часу, число смуг і радіус платформи, легко розрахувати середнє значення кутової швидкості за даний проміжок часу.

Відома в США фірма «*the Ideal Aerosmith*» виготовляє модель тахометричної установки *17-53-3B/C* [21], яка використовується для контролю електричних і механічних тахогенераторів і індикаторів. Її спроектовано і призначено для забезпечення максимальної ефективності й універсальності.

Зовнішні двигуни забезпечуються панеллю установчих фланців. Адаптер замінює фланці на гвинтове кріплення. Передні двигуни звичайно використовуються для руху генераторів електричних тахогенераторів. А гнучкий вал, може бути залишений на внутрішньому двигуні для використання з відцентровими чи магнітними тахометрами. Підк-

лючення установки забезпечуються для чотирьох тахометрів. Швидкість обертання по діапазонах може точно підтримуватися навіть зі зміною навантаження на валу. Панель керування має кнопки старт і стоп, реверсивний перемикач, потенціометр для контролю швидкості і ручку для точного регулювання швидкості.

Діапазон частот обертання: в межах 180–5000 об/хв. Похибка цієї установки становить $0,1\% \pm 1$ об/хв. Стабільність $0,15\%$, коли напруга живлення змінюється у межах $\pm 1\%$.

Потрійний випробувач тахометрів англійської фірми «Chell» *DMA BCE-11* – лабораторна, керована комп'ютером система перевірки тахометрів [22]. Вона призначена для одночасного випробування різноманітних тахометрів. Забезпечує точні і стійкі засоби для випробування і калібрування тахогенераторів і індикаторів.

DMA BCE-11 – система перевірки тахометрів, що використовує точний, керований двигун постійного струму з коаксіальними кодуючими оптичними пристроями, точність керування контролюється мікропроцесором. Кварц, що синхронізує ланцюг, забезпечує максимальну точність і стабільність. Доступні дві моделі, щоб охопити всі іспитові вимоги: BCE-10 обладнаний двома незалежними валами двигуна, і BCE-11 із трьома валами двигуна.

Оскільки використовується високостабільний кварц, єдине необхідне калібрування – для внутрішньої системи напруги генератора, воно виконується через програмне забезпечення шляхом порівняння з точним реальним цифровим вольтметром. Підготовка до роботи, прогрів і автоматичне самотестування виконується менше ніж за хвилину.

Діапазон частот обертання: 0 – 6000 об/хв. Точність: ± 1 об/хв $\pm 0,1\%$. Автоматичне заповнення стандартної паперової відомості для друку результатів перевірки. Прилад обладнано рідкокристалічним дисплеєм, допоміжною клавіатурою, додатковими функціональними клавішами.

Тахометрична установка фірми «the Ideal Aerosmith» моделі *1921* [21] використовується для перевірки і калібрування електричних і механічних тахогенераторів і індикаторів. Два різноманітних за швидкістю двигуни усувають потребу в додаткових механізмах при забезпеченні діапазону частоти обертання 10–50000 об/хв. Кожен двигун/вал керується закритою системою петлі, що використовує зворотний зв'язок пристрою, і цифрову плату контролю (керування) руху. Результат – дуже надійна система з похибкою відтворення швидкості обертання – $0,005\%$.

Пульт керування складається з рідкокристалічного індикатора, допоміжної клавіатури, вимикача живлення, кнопкою надзвичайної зупинки й індикатора обертів вала. Тип двигунів – сервомотор. Діапа-

зон частот обертання вала: 10–50000 об/хв. Вал А, діапазон: 10–5000 об/хв. Вал В, діапазон: 5000,01–50000 об/хв. Похибка тахометричної установки складає: 0,1 % (10–190 об/хв), 0,005 % (200–50000 об/хв). Одиниці вимірювання: оберти за хвилину, дюйми за хвилину, фути за хвилину, ярд/хв., метр/хв. Органи керування: вимикач живлення, клавіатура, дисплей, кнопка зупинки та індикатор обертів вала.

Фірма «King Nutronics Corporation» виготовляє компактну, портативну модель тахометричної установки 3711-B [23].

Установка призначена для калібрування тахометрів і тахогенераторів. Розроблена на точному кроковому двигуні, який синхронізований з використанням кварцового кристалічного генератора. Використовуючи множник 10:1 і додаткові адаптери, точність пасивних і активних оптичних тахометрів також може бути перевірена в межах діапазону 500–40000 об/хв (з кроком 10 об/хв і з похибкою $\pm 0,0002$ %). Калібрування може виконуватися в двох напрямках обертання вала, використовуючи одиниці об/хв, чи відсоток від повної шкали від 1 % до 120 % (від 210 до 5040 об/хв). Простий, інтуїтивний передній груповий засіб керування робить тахометричну установку, ефективною і зручною, і скорочує час навчання для недосвідчених операторів. Необхідна швидкість і інформація статусу системи доступні відразу на передньому груповому дисплеї. Похибка $\pm 0,0002$ %. Стабільність $\pm 0,0002$ %. Роздільна здатність 1 об/хв (10 об/хв при множителі 10:1).

Аналізуючи інформацію, сформуємо порівняльну таблицю наявних засобів контролю ТП (таблиця 1.2. В ході дослідження встановлено, що діапазон більшості ТП, що контролюються, знаходиться у межах 0–10000 об/хв. А похибка тахометричної установки для перевірки не повинна перевищувати 0,03 %, оскільки похибка більшості ТП складає $\pm 0,1$ %.

Таблиця 1.2

Системи контролю параметрів ТП

| Назва приладу | Фірма виробник | Діапазон вимірювання (об/хв) | Похибка вимірювання (%) | Кількість двигунів |
|---------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1. УТ-05-60 | Вільнюський завод «Еталон» | 0 – 60000 | 0,05 | 2 |
| 2. ОТХ-100 | - // - | 0 – 100000 | 0,01 | 2 |
| 3. 17-53-3В/С | Ideal Aerosmith | 60 – 5000 | 0,1 | 2 |
| 4. DMA ВСЕ-11 | Chell | 0 – 6000 | 0,1 | 1 |
| 5. 1921 | Ideal Aerosmith | 10 – 50000 | 0,1 % 0,005 % | 2 |
| 6. 3711 — В | King Nutronics Corporation | 1 – 6500 | 0,0002 % | 1 |

Результати порівняльного аналізу систем контролю ТП наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Порівняльний аналіз систем контролю параметрів ТП

| Назва критерію | Установки заводу «Еталон» | Установки фірми «Ideal Aerosmith» | Установка фірми «King Nutronics Corporation» | Потенційний пристрій |
|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|----------------------|
| 1. Висока точність | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 2. Висока швидкодія | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 3. Широкий робочий діапазон | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 4. Динамічний режим | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 5. Зручність у використанні | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 6. Мала споживана потужність | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 7. Малий час проведення калібровки | 0 | 1 | 1 | 1 |
| E_p | 2 | 4 | 5 | $E_{II} = 7$ |
| $E = E_p / E_{II}$ | 0,29 | 0,57 | 0,71 | 1 |

З проведеного порівняльного аналізу встановлено, що найбільш ефективною є установка фірми «King Nutronics Corporation», яка створена на основі крокового двигуна постійного струму з синхронізацією від кварцового генератора, та з мікропроцесорною обробкою виміральної інформації.

1.3. Проблеми підвищення достовірності контролю в ІВС контролю параметрів ТП та шляхи їх вирішення

Як показав аналіз тахометричних установок, прилади вітчизняного виробництва поступають закордонним ЗВТ за метрологічними характеристиками і не дозволяють вирішувати метрологічні задачі при вимірюванні швидкозмінних кутових швидкостей та прискорень.

Вони мають малі діапазони кутових швидкостей, великі похибки вимірювання, не інформативне відображення інформації, складності у визначенні моменту синхронізації обертів вала із заданою кутовою швидкістю, неможливість визначення параметрів руху в динамічному режимі роботи ТП.

Із вищенаведеного випливає, що з метою підвищення достовірності контролю параметрів ТП необхідно проводити дослідження у

напрямку подальшого розвитку теоретичних основ побудови і створення нових методів вимірювання параметрів руху у динамічному режимі роботи ТП, методів та алгоритмів вимірювального перетворення вимірюваних параметрів та нових автоматизованих ІВС контролю параметрів ТП.

На цій основі сформульовано наукове завдання в галузі ІВС – подальший розвиток теорії побудови ІВС контролю параметрів ТП, що здатна забезпечити підвищений рівень достовірності контролю ТП в динамічному режимі їх роботи.

Таким чином, в монографії метою подальших досліджень, направлених на вирішення актуальної задачі підвищення достовірності контролю ТП в динамічному режимі їх роботи є:

- розробка моделі ІВС контролю параметрів ТП, дослідження форм еталонного сигналу для керування частотою обертання вала двигуна ІВС та математичні моделі системи з різними типами двигунів;
- розробка нових методів визначення параметрів руху ТП в динамічному режимі, що дозволить підвищити методичну складову достовірності діагностування;
- розробка нових та вдосконалення існуючих методів підвищення інструментальної складової достовірності діагностування в ІВС контролю параметрів ТП;
- обґрунтування структурно–алгоритмічної організації вимірювальних каналів ІВС контролю параметрів ТП;
- проведення експериментальних досліджень для перевірки достовірності отриманих результатів;
- оцінювання метрологічних характеристик вимірювального перетворення параметрів ТП;
- розробка рекомендацій до проектування ІВС контролю параметрів ТП.

Розділ 2. Принципи побудови систем контролю параметрів ТП

2.1. Аналіз систем контролю параметрів ТП з різними типами двигунів

Сучасні інформаційно-вимірвальні системи все частіше працюють в динамічних режимах, що вимагає контролю роботи ТП не тільки в статичному, але й в динамічному режимах. Проте описані в розділі 1 установки не дозволяють контролювати параметри ТП в динамічному режимі, а отже і визначити їх динамічні характеристики. В цьому розділі описані методи підвищення методичної складової достовірності контролю параметрів ТП, яка зумовлена неадекватністю об'єкта контролю його моделі, що прийнята при контролі.

Для того, щоб проводити перевірку, ІВС повинна мати властивості, які забезпечують виконання таких операцій:

- формування еталонних значень контрольованих параметрів;
- порівняння фактичних значень контрольованих параметрів з їх еталонними значеннями;
- винесення рішення про стан об'єкта в цілому.

Запропонована установка задає за допомогою електродвигуна кутову швидкість, яка вимірюється двома ТП: візцевим (ВТП), та ТП, що контролюється (ПТП). Різниця сигналів на виході ТП і є абсолютною похибкою вимірювання ПТП:

$$\Delta = f_{пов} - f_{зр} , \quad (2.1)$$

де $f_{пов}$, $f_{зр}$ – відповідно частота, виміряна ПТП, та виміряна ВТП.

Функціональна схема ІВС контролю параметрів ТП, що розробляється, представлена на рис. 2.1.

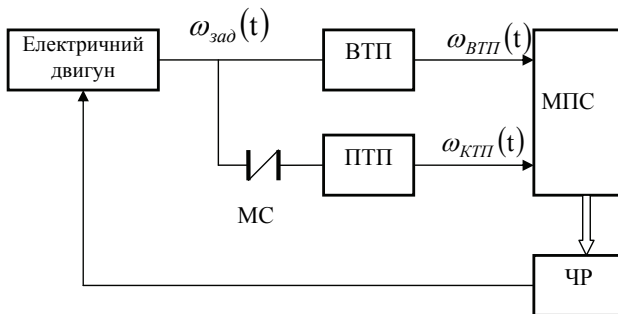


Рис. 2.1. Функціональна схема ІВС контролю параметрів ТП

Наукове видання

**Поджаренко Володимир Олександрович
Севастьянов Володимир Миколайович
Осадчий Василь Петрович**

**МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ТАХОМЕТРИЧНИХ
ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

Монографія

Редактор С. А. Малішевська

Оригінал-макет підготував В. М. Севастьянов

Підписано до друку 15.07.2009 р.
Формат 29,7×42¼ . Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,55.
Наклад 100 прим. Зам № 2009-114.

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

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/478>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

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