

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА
ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 621:658

**СТАН СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА МОЖЛИВІ
ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ**

*Стельмах Н.В., Румбешта В.О., Паткевич О.І., Національний технічний університет
України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

У роботі проведений аналіз сучасного виробництва приладів. Розглянуті основні особливості та специфіка дрібносерійного приладобудування. Визначені основні чинники, які впливають на трудомісткість і складність приладобудування. Запропоновано нові шляхи для підвищення ефективності сучасного виробництва приладів

Вступ

Сучасне виробництво на приладобудівних і машинобудівних підприємствах України носить дрібносерійний характер. Про це свідчить аналіз тенденцій світового машино- і приладобудування, а тому доля дрібносерійного та одиничного виробництва із великою номенклатурою виробів буде і надалі збільшуватись. Приладобудівні підприємства України здебільшого здійснюють дрібносерійний випуск продукції, тому виникає необхідність більш глибоко проаналізувати вплив особливостей дрібносерійного виробництва на процеси розвитку сучасного приладобудування.

Моральний цикл життя приладу становить 2-3 роки, в у той час як виробів у машинобудуванні - 5-10 років. Дрібносерійне виробництво приладів характеризується великою номенклатурою виробів, істотною різницею в технологічних маршрутах виробів, великою кількістю споживачів, терміновістю виконання замовлень з можливими індивідуальними вимогами до приладу, стійкістю термінів освоєння нової продукції, більш питомою вагою етапу технологічної підготовки виробництва. Існуючі системи націлені на загальні універсальні рішення, не враховуючи специфіку реального підприємства, тому що розроблялися як типові рішення, котрі можливо впроваджувати на будь-якому підприємстві як приладобудівному, так і машинобудівному. Вони вимагають істотної доробки та гнучкості при використанні їх на приладобудівних підприємствах України, які є дрібносерійними.

Дрібносерійне виробництво можна віднести до складних типів виробництва, що наближається по складності до гнучких виробництв [1]. Про це свідчать такі його особливості:

- наявність великої номенклатури виробів, їх конструктивна складність;
- велика кількість найменувань деталей та їх різна трудомісткість змінюються протягом досить коротких інтервалів часу;
- істотна різниця в технологічних маршрутах різних виробів;
- предметна спеціалізація цехів, які мають перетинання виробничих потоків продукції, що випускається;

- велика кількість споживачів, тільки частина яких є постійними, терміновість виконання замовлень із можливими індивідуальними вимогами, дотримання термінів освоєння нової продукції;

- велика питома вага етапу планування технічної підготовки виробництва в загальному циклі виготовлення продукції, що викликає необхідність особливого планування та узгодження термінів запуску-випуску по всьому технологічному ланцюгу виробництва тощо.

Всі вище перераховані особливості сучасного приладобудування свідчать про те, що необхідно знаходити нові шляхи як винайденню нових, так і вдосконаленню вже існуючих методів планування, підготовки, організації та безпосередньо самого процесу виробництва приладів.

Оскільки технологічна підготовка виробництва (ТПВ) є одним з найбільш трудомістких етапів в загальному процесі виробництва, то підхід до її проведення має бути особливим. А саме організація, та проведення всіх підготовчих робіт має відповідати сучасним вимогам виробництва.

На сьогодні було проведено низку наукових досліджень щодо організації та проведенню ТПВ. Але переважно всі вони вирішують завдання, що стосуються безпосереднього технологічного процесу виготовлення виробів. Комплексних досліджень, які б враховували технологічні, організаційні та економічні питання до цього часу не проводились.

Постановка задачі. Чинники впливу на трудомісткість і складність приладобудування

Оскільки конструкція приладів базується на засадах механіки, електротехніки та радіоелектроніки необхідне застосування сполучення цих всіх технологій виготовлення.

Висока складність виробництва, трудомісткість виготовлення, наявність безлічі складальних робіт різко збільшує виробничий цикл випуску виробів, в умовах дрібносерійності, а саме це вимагає створення особливих методів і методик з ефективною організацією виробництва.

I. Часта і швидка зміна конструкцій виробів у приладобудуванні, обумовлена швидким “моральним старінням”, це вимагає кон’юнктурності на ринку. Якщо в машинобудуванні (автомобілі, літаки, танки, поїзди, верстати тощо) термін кон’юнктурності і служби 10-20 років, то в приладобудуванні - всього 1-2 року. Тому запуск дорогої масової продукції в приладобудуванні майже неможливий, крім широкого вжитку, а виробництво організується більш універсальним і дрібносерійним. На одному заводі відразу розширена номенклатура виробів, тобто перші лише тільки запускаються для випробування (дрібносерійне виробництво), а інші вже входять у серію. І ця зміна йде постійно, так зміна типу приладу здійснюється вже за 2-3 роки.

II. Велика номенклатура виробів, що випускаються одночасно, у приладобудуванні, а це різко ускладнює роботу виробничих служб і схему виробничих потоків переміщення виробів, які виготовляються. Прилади застосовуються скрізь, для всіх можливих галузей науки, техніки, медицини, енергетики, автоматичних систем керування процесами і рухомими об’єктами (контроль еколо-

гії) тощо. І кожний такий напрямок приладобудування має свою специфіку, стандарти і нормалі, свої заводи.

III. Наявність у конструкції приладів різних матеріалів, що вимагає застосування особливих технологій і спеціального устаткування.

IV. Висока точність елементів виконання характеристик виробів приладобудування їх деталей, вузлів і виробів у цілому, що вимагає великого обсягу регульовально-налагоджувальних, контрольних, вимірювальних і випробувальних робіт.

Практично встановлено, що досягти високої точності роботи складних багатофункціональних технічних пристроїв неможливо за рахунок тільки виготовлення деталей приладів і простого стикування цих елементів при складанні. Тому перелік складальних робіт у приладобудуванні значно відрізняється від точного машинобудування, і він містить наступні процеси:

1. Операції простого складання з'єднанням і вгвинчуванням займають усього 20 % складального циклу.

2. Операції одержання нероз'ємних з'єднань: пресування, зварювання, пайка, склеювання, вальцювання і т.д.

3. Процеси точного складання - селективне складання, регулювання характеристик, пригін доробленої точності елементів при складанні.

4. Електромонтажні операції і намотувальні роботи.

5. Одержання друкованих і мікроелектронних схем і інтегральних напівпровідникових систем.

6. Регульовально-налагоджувальні та процеси юстирування.

7. Контрольно-перевірочні та доводочні процедури.

8. Великий комплекс випробувань готової продукції.

Це займає багато робочого часу і трудомісткості по виготовленню приладів, де всі складальні роботи займають 60-80% від усього тимчасового циклу одержання придатної продукції і стільки ж робочих площ.

V. При складанні приладів використовується значна кількість різних фізичних і хімічних параметрів і процесів, що вимагають для їх виміру та перевірки великої кількості пристроїв (вольтметрів, амперметрів, каліметрів, осцилографів тощо).

Для обов'язкової гарантії точності роботи цього технічного устаткування і дотримання точності стандартних одиниць виміру, використовуваних при цьому величин необхідно мати додатково зразкове контрольне устаткування. Все це різко ускладнює та здорожує складання, значно збільшує виробничий цикл по випуску виробів і вимагає високої кваліфікації всього складального персоналу.

VI. Висока трудомісткість всіх складальних робіт на підставі вище перерахованих особливостей, у результаті чого їхня трудомісткість займає 70-80% від загальної трудомісткості виготовлення приладів.

VII. Наявність низки виробів, що випускаються одночасно, вимагає особливої організації складського господарства і її диспетчеризації, що ускладнює виробничий цикл.

VIII. Вимоги по дотриманню високої стерильності складальних процесів при поганій зовнішній екології, що відчутно впливає на якість цих процесів і

саму продукцію випуску, змушує застосовувати в приладобудуванні особливу організацію складальних ділянок і цехів у цілому із застосуванням герметизації їх від зовнішнього середовища і введенням великої кількості промивних процесів, що також ускладнює організацію виробництва [2].

Всі ці особливості і специфіка приладобудування робить його дорогим і трудомістким, вимагає високого рівня технічних знань.

Отже, зважаючи на усі вище перераховані факти, виникає необхідність в адаптації підприємств до умов випуску продукції невеликими партіями із частими змінами асортиментів виробів у дуже широкому діапазоні, тобто до умов багатомоделового одиничного і дрібносерійного виробництва.

Наразі всі проектні, розрахункові та моніторингові роботи виконуються за допомогою систем автоматизованого проектування (САПР). Багато використовуваних в промисловості САПР були розроблені для умов крупносерійного і невеликої кількості серійного виробництва, тому вони не знайшли широкого застосування в приладобудуванні та використовуються що найкраще для рішення окремих технологічних завдань у діалоговому режимі.

Оскільки всі складальні роботи займають 60-80% від робіт у загальному обсязі робіт по ТПВ, необхідна розробка та впровадження у виробництво нових методів проектування технології складання приладів, які дають можливість реалізувати інтелектуальну комп'ютерну технологію автоматизованої гнучкої технологічної підготовки виробництва [3].

Висновки

Отже розглянуті особливості і специфіка дрібносерійного приладобудування ставить завдання перед сучасною промисловістю значно підвищити ефективність технологічної підготовки виробництва для прискореного випуску продукції в дрібносерійному виробництві за рахунок аналізу і синтезу трудомісткості складальних вузлів, розробки раціональної послідовності підготовчих і виробничих етапів отримання приладів за допомогою розробки комплексу математичних моделей, методів і алгоритмів, що дозволяють створити систему гнучкого автоматизованого проектування сучасних технологій складання приладів, які відносяться до надскладних механічних, електромеханічних та електронних систем.

Подальшим дослідженням в даному напрямку є:

- провести аналіз предметної області для вирішення задач інформаційної підтримки технологічної підготовки виробництва в машинобудуванні та приладобудуванні, а також порівняльний аналіз рішень, реалізованих в сучасних корпоративних системах автоматизованого проектування та підготовки виробництва;
- виявити шляхи скорочення тривалості виробничого циклу, з моменту отримання завдання до випуску 1-х виробів;
- виконати аналіз впливу етапів складання на тривалість виробничого циклу, як при підготовці виробництва так і при самому складанні;
- розробити методологію ранжування складальних одиниць по трудоемкості їх виготовлення на всі підготовчі та виробничі етапи виготовлення приладів;
- сформулювати план виготовлення деталей для пріоритетних вузлів за результатами ранжирування;

Література

1. Остаф'єв В.О., Держук В.А., Румбешта В.О. Технологические процессы изготовления деталей приборов. – К.: Высшая школа, 1983. – 207 с.
2. Румбешта В.О. Основы технологии складання приладів: Підручник. – К.: ІСДО, 1993. – 303 с.
3. Глоба Л.С. Интеллектуальна комп'ютерна технологія конструкторсько-технологічної підготовки механо-оброблюючого виробництва: Дис.д-ра. тех. наук: 05.12.13. -К., 1996. -58с.

Стельмах Н.В., Румбешта В.О. Паткевич О.И. **Состояние современного производства приборов и возможные пути повышения его эффективности.**

В работе проведен анализ современного производства приборов. Рассмотрены основные особенности и специфика мелкосерийного приборостроения. Определены основные факторы, влияющие на трудоемкость и сложность приборостроения. Предложены новые пути для повышения эффективности современного производства приборов.

Stelmakh N.V., Rumbeshta V.O., Patkevich O.I. **Condition of modern manufacture of devices and possible ways of increase of its efficiency.**

In work the analysis of modern manufacture of devices is lead. Have considered the basic features and specificity of small-scale instrument making. Have defined the major factors influencing labour input and complexity of instrument making. New ways for increase efficiency modern manufacture of devices are offered.

Надійшла до редакції
4 вересня 2006 року

УДК 621.531

ОПТИМАЛЬНА МОДЕЛЬ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ОБ'ЄКТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

Руднева М.С., Національний авіаційний університет, м.Київ, Україна

Розроблена оптимальна модель ідентифікації при вимірювання об'єктів із застосуванням вейвлет-перетворення. Наведений метод дозволяє забезпечити найбільш ефективний режим роботи інтелектуальної системи вимірювання в реальному масштабі часу

Вступ. Постановка задачі

Розвиток сучасних інформаційно-вимірювальних систем потребує застосування нових методів ідентифікації об'єктів. Методи цифрової обробки сигналів дають можливість підвищувати якість розпізнавання об'єктів.

Цифрова обробки здійснюється за наступними вимогами [1]: точне перетворення сигналу, стиснення цього сигналу, можливість відтворення оригінального сигналу. Враховуючи вищезазначені вимоги при побудові оптимальної моделі ідентифікації сигнал представляють у вигляді точно локалізованої флуктуації частотно-часових характеристик. Обробка інформації в цих системах здійснюється розкладанням в деякий безкінечний ряд за одним з типових ортогональних базисів з метою прийняття рішення. Дослідження методів вейвлет-перетворення були розглянуті в [1, 3], однак до теперішнього часу ці методи не були застосовані для ідентифікації об'єктів вимірювання.

Постановка задачі полягає у розробці оптимальної моделі ідентифікації при

вимірюванні об'єктів на координатно-вимірювальній машині (КВМ) із застосуванням вейвлет-перетворення. Задача підвищення якості розпізнавання при вимірюванні безпосередньо пов'язана з питанням вибору методів обробки сигналів. В цьому випадку вейвлет-перетворення дає змогу вирішити цю задачу.

Основна частина. Розв'язання задачі

КВМ є складним механізмом, який має пристрої керування, електромеханічні елементи, інформаційно-вимірювальні системи. Основною умовою керування КВМ є необхідність реалізувати багатомірний рух по п'яти координатам. На практиці існує необхідність виконувати процес ідентифікації та вимірювання при траєкторних переміщеннях вимірювальної головки. Тому актуальною задачею є створення математичної моделі ідентифікації із застосуванням різних методів обробки при вимірюванні об'єкту. Ці методи базуються на дослідженні та обробці Фур'є-спектру інтерференційного сигналу. Однак застосування перетворення Фур'є для відновлення функції руху об'єкту має істотний недолік в тому випадку, коли необхідно отримати точну інформацію про локалізацію сингулярностей в часовій та частотній областях.

В умовах промислового виробництва контрольні операції при вимірюванні залежать від точності переміщення об'єкту та стабілізації вимірювальної головки.

Динамічну систему КВМ можливо уявити у вигляді нелінійного рівняння:

$$\dot{x} = f(x(t), q, t), \quad (1)$$

де f – нелінійна функція, q – параметр, t – час.

Якщо відомі результати вимірювання даних $y(t)$, тоді задача ідентифікації буде зводитися тільки до визначення параметру q .

Задача розпізнавання в реальному масштабі часу полягає в отриманні інформації та перетворення цієї інформації в кластери. Для зменшення дії дестабілізуючих чинників при ідентифікації можливо застосування фільтрів, які можуть бути як лінійними, так і нелінійними. Потім виконується сегментація об'єкту та контури з графічного растрового зображення перетворюються на текстовий опис вимірювального об'єкту. За координатним описом об'єкту будується його зображення у вигляді контурних функцій. Отримана інформація надходить на останній етап – розпізнавання.

Однією з проблем ідентифікації є розпізнавання об'єктів відхилення від форми та розташування поверхонь. В цьому випадку необхідно враховувати нев'язку.

Вона може бути представлена рівнянням:

$$\varepsilon(n) = y(n) - \mathcal{F}(n), \quad (2)$$

де $y(n)$ – вихідні параметри об'єкту, $\mathcal{F}(n)$ – величина настроюваної моделі.

Задача визначення оптимального алгоритму ідентифікації зводиться до задачі мінімізації функціонала нев'язки та має вигляд:

$$M \{ \varepsilon^2(n) \} = \Phi(\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2) \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2$ – передатні функції.

Але для покращення процесу ідентифікації найсучаснішими методами є застосування методів вейвлет-перетворення.

Якщо вимірювання здійснюється за допомогою пакету прикладних програм, тоді ідентифікація проводиться в наступній послідовності:

- Обробка даних, фільтрація, побудова залежностей;
- Методи параметричної ідентифікації для різних модельних структур;
- Непараметричні методи ідентифікації: розрахунок кореляцій, спектрів, застосування вейвлет-перетворення;
- Відображення моделі: діаграми, імітаційне моделювання;
- Процедури підтвердження.

Апріорне знання не завжди надає повну інформацію про об'єкт дослідження. Тому необхідно використовувати статистичні методи, які дозволяють використовувати різного типу фільтрів, що надають по закінченні дослідження достовірні результати про систему. В деяких випадках використовують стандартні лінійні моделі. Визначення на основі спостереження адекватної моделі є основною задачею при побудові оптимальної моделі. Завершальний етап містить перевірку вибраної моделі та підтвердження її для вирішення конкретної задачі ідентифікації та вимірювання об'єкту зі складною просторовою поверхнею.

У випадку, коли вибрана модель не відповідає оптимальній системі, необхідно визначити причини не оптимальності, до яких належать [2-4]:

- числовий метод не дозволяє знайти найкращу за обраним критерієм модель;
- критерій вибраний неправильно;
- вибрані моделі не відповідають якості системи;
- апріорні данні не були достатніми для вибору оптимальної моделі.

Перевірка та адекватність моделі можливо представити, якщо подати вхідний сигнал у систему, обрану модель та зрівняти величину вихідного сигналу. Якщо похибка мінімальна, то модель є оптимальною для вирішення цього класу задач.

Вейвлет-аналіз дає можливість являти собою одну з форм частотно-часового аналізу, який призначений для виявлення локальних флуктуацій сигналу. Якщо неперервне вейвлет-перетворення CWT [3] дорівнює:

$$CWT_f(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (4)$$

тоді

$$f(t) = C_{\psi}^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{\infty} CWT_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) db, \quad (5)$$

де коефіцієнт нормування $C_{\psi}^{-1} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, a, b \in R$.

В дискретному вейвлет-перетворенні (DWT) введемо масштабний коефіцієнт $a = a_m = a_0^m$ ($a_0 > 1$), що еквівалентно розбиттю частотної осі на частотні смуги.

Частотне вікно матиме границі:

$$\left(\frac{\omega_0}{a_m} - \frac{\Delta_{\omega}}{a_m}, \frac{\omega_0}{a_m} - \frac{\Delta_{\omega}}{a_m} \right) = \left(a_0^{-m+1} \Delta_{\omega}, a_0^{-m+2} \Delta_{\omega} \right), \quad (6)$$

тоді центральна частота m - того вейвлету має вигляд

$$\frac{\omega_0}{a_m} = (a_0 + 1)a_0^{-m} \Delta_m \quad (7)$$

У координатно-вимірювальних машинах при русі системи відображена точка вимірювання весь час змінює своє місце знаходження в просторі, вимірювальна головка описує криву, яка і визначає траєкторію руху. Дослідження конфігурації вимірювального механізму необхідно для формального визначення робочої операції. Найбільш відомий метод дослідження конфігураційного простору вимірювального механізму розглядається із застосуванням зміни прийнятих загальних координат з визначенням параметрів відображеної точки.

Відновлення траєкторії руху об'єкту за допомогою двох інтерференційних сигналів при застосуванні вейвлет-перетворення [5-7] з найбільшою точністю забезпечує високу ступінь відновлення сигналу.

Змінна складова інтерференційного сигналу має вигляд:

$$I(t) = A \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} f(t)\right), \quad (8)$$

де A – амплітудний коефіцієнт; t – час; θ – фаза сигналу, λ – довжина хвилі, $f(t)$ – функція, що характеризує рух об'єкту та має вигляд:

$$f(t) = K_{\psi_1}^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(a,b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_1\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dadb}{a^2}, \quad (9)$$

де ψ_1 – базисна вейвлет-функція, $C(a,b)$ – коефіцієнти вейвлет-перетворення функції.

Якщо ввести функцію $S(t)$, виходячи з умов співпадання її спектру з точністю до постійного множника спектру функції $f(t)$:

$$S(t) = \frac{dI_1 / dt}{I_2(t)} = \frac{4\pi}{\lambda K_{\psi_1}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(a,b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_2\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dadb}{a^2}. \quad (10)$$

Метод надає можливість ідентифікувати об'єкт, визначити зміщення об'єкту та відновити напрямок руху.

Висновки

Дослідження довели, що внаслідок використання в якості ознак значень масштабних коефіцієнтів вейвлет-перетворення на проміжках часу, де спостерігається екстремуми кореляційної функції частоти, підвищується ефективність розпізнавання об'єкту та вимірювання складних просторових поверхонь. На відміну від традиційного перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення забезпечує двомірне представлення досліджуваного сигналу в частотній області та в площині частота-положення.

Запропонована оптимальна модель ідентифікації при вимірюванні надає можливість досліджувати процес ідентифікації вимірювання геометричних розмірів та прогнозувати відхилення від математичної моделі геометричних розмірів деталей, а також проаналізувати об'єкт з використанням коефіцієнтів

вейвлет-перетворення сигналу на ділянках, де спостерігається екстремуми кореляційної функції. Точність вимірювання при застосуванні методу вейвлет-перетворення підвищується. При подальших дослідженнях буде здійснена ідентифікація параметрів об'єктів прецизійних деталей.

Література

1. Биков М.М., Ковтун В.В. Аналіз ефективності ідентифікації диктора за частотою основного тону. Вісник технологічного університету Поділля - Хмельницький: ХДУ - №2. Ч.1. – Т.2. – С.20-24.
2. Пупков К.А., Неусыпин К.А. Выбор оптимальной структуры измерительного комплекса. // Изв.вузов. Приборостроение. – 1998. – Т.41, №1-2. – С.34-39.
3. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-перообразования. СПб.: ВУС, 1999. – 203 с.
4. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации. – М.: Наука–Физ.мат.лит. – 1995. –336 с.
5. Шередко Ю.Л., Марусяк А.В. Способ корректного сведения задачи идентификации к задаче распознавания образов // Управляющие системы и машины.– 2002.– №5. – С.5-12.
6. Ту Д.Т., Гонсалес Р.К. Принципы распознавания образов / Пер. с англ. И.Б. Гуревич; Под ред. Р.И.Журавлева. – М.: Мир, 1978. – 411 с.
7. Сибрин А.П. Вопросы идентификации нелинейных систем управления с использование частотных характеристик // Применение систем автоматизированного проектирования в приборостроении и машиностроении. – Челябинск, 1980. – С.92-99.

Руднева М.С. Оптимальная модель идентификации при измерении объектов с применением вейвлет-преобразования.

Разработана оптимальная модель идентификации при измерении объектов с применением вейвлет-преобразования. Приведенный метод позволяет обеспечить наиболее эффективный режим работы интеллектуальной системы измерений в реальном масштабе времени.

Rydneva M.S. Optimum model authentication at measuring objects with the use of wavelet – transformation.

The optimum model of authentication at measuring of objects is developed with the use of wavelet-transformation. The resulted method allows to provide the most effective mode of operations of the intellectual system of measurings in the real time.

*Надійшла до редакції
4 вересня 2006 року*

УДК 681.325

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ СУМІЩЕНИХ ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДИНАМІЧНОГО ТИСКУ

Тихан М.О., Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна

Запропоновані головні теоретичні засади побудови нового типу мікромеханічних сенсорів - суміщених тензометричних перетворювачів динамічного тиску, котрі покликані здійснювати вимірювання в реальному масштабі часу

Вступ

Сучасні високотехнологічні галузі, а саме: аерокосмічна промисловість, двигунобудування, теплоенергетика та інші вимагають створення більш швидкодіючих та точніших систем автоматичного контролю та керування [1-6].

Відомо, що на таку швидкодію та точність суттєвий вплив мають первинні вимірвальні перетворювачі, що перебувають у середовищі, параметри стану якого контролюються.

Серед інших вимірюваних параметрів фізичних функціональних процесів у згаданих галузях, вимірювання тиску є вагомою часткою. При цьому, однією з головних особливостей вимірюваного тиску є його швидкоплинність (динамічність) у поєднанні з непередбачуваним перебігом. Довільність і непередбачуваність динамічності тиску полягає у тому, що в одному вимірвальному акті він може мати як різко змінний (ударний) характер з періодичною, або неперіодичною повторюваністю, так і “гладкий”-гармонійний, майже гармонійний і т.п. характер, а також мати статичні ділянки. Тобто, вимірюваний тиск - це сильно виражений нестационарний процес.

Оскільки вихідний сигнал з перетворювача є інформативним при формуванні керуючих сигналів для виконавчих механізмів швидкодіючих систем автоматики, тому існує потреба вимірювань у реальному масштабі часу, або якомога близько до цього.

Як відомо, вимірювання динамічних величин відноситься до класу некоректно поставлених задач [7]. Розв’язок цих задач здійснюють методом регуляризації (метод Тихонова) [8], однак практичне його застосування при вимірюванні динамічного тиску в реальному масштабі часу не дає бажаних результатів. Така ситуація очевидно зумовлена фізичними особливостями як самої величини, так і особливостями вимірвальних приладів, що застосовуються.

Спосіб та перетворювач для вимірювання динамічного тиску в реальному масштабі часу

На сьогодні відомий апаратно-обчислювальний спосіб і відповідний перетворювач для вимірювання динамічного тиску в реальному масштабі часу [9, 10]. Суть запропонованих ідей полягає у такому.

Відомо, що робота лінійних систем в динамічному режимі описується інтегралом згортки [11]

$$U(t) = \int_0^t g(t, \tau) \cdot p(\tau) d\tau \quad (1)$$

де $g(t, \tau)$ – імпульсна перехідна характеристика; $U(t)$ – вихідний сигнал перетворювача; $p(t)$ – вимірюваний тиск (вхідний сигнал).

Припускаємо, що $g(t, \tau) \neq 0$ і $\ddot{g}(t, \tau)$ та $\ddot{U}(t)$ існують і є неперервними.

Враховуючи конструктивні особливості тензометричних перетворювачів тиску, інтеграл згортки можна подати у більш явному вигляді

$$U(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0 \cdot (t - \tau)) d\tau \quad (2)$$

де β – коефіцієнт демпфування коливань первинного пружного перетворювача; η_0 – основна частота його власних коливань; k – статичний коефіцієнт перетворення.

Подвійним диференціюванням залежності (2), отримуємо

$$\ddot{U}(t) = -2 \cdot \beta \cdot \dot{U}(t) + k \cdot \eta_0 \cdot p(t) - (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U(t)$$

З останнього рівняння маємо

$$p(t) = \frac{\ddot{U}(t) + 2 \cdot \beta \cdot \dot{U}(t) + (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U(t)}{k \cdot \eta_0} \quad (3)$$

Формула (3) є ключовою до способу вимірювання динамічного тиску в реальному масштабі часу.

Отже, суть способу є такою:

1. Безпосереднім вимірюванням тиску одержуємо значення вихідного сигналу перетворювача – $U(t)$, яке пропорційне деформації первинного пружного елемента.

2. Одночасно, тим чи іншим способом вимірюємо значення величини $\ddot{U}(t)$, яка згідно до фізичної суті тензометричних перетворювачів пропорційна пришвидченню деформації первинного пружного елемента.

2. Числовим інтегруванням величини $\ddot{U}(t)$ отримуємо значення величини $\dot{U}(t)$, котра з фізичного погляду пропорційна швидкості деформації первинного пружного елемента.

3. Знаючи конструктивні параметри η_0 , β , та k , а також використовуючи залежність (3), відновлюємо вхідний сигнал $p(t)$.

Оскільки вимірювання величин $U(t)$ і $\ddot{U}(t)$, а також обчислення величини $\dot{U}(t)$ відбувається практично одночасно, то можна стверджувати, що процедура вимірювання вхідного динамічного тиску $p(t)$ здійснюється у реальному масштабі часу із затримкою, зумовленою лише обчислювальною процедурою.

Для реалізації описаного способу вимірювання динамічного тиску запропоновано суміщений тензометричний перетворювач, принципова конструктивна схема якого показана на Рис.1 [9].

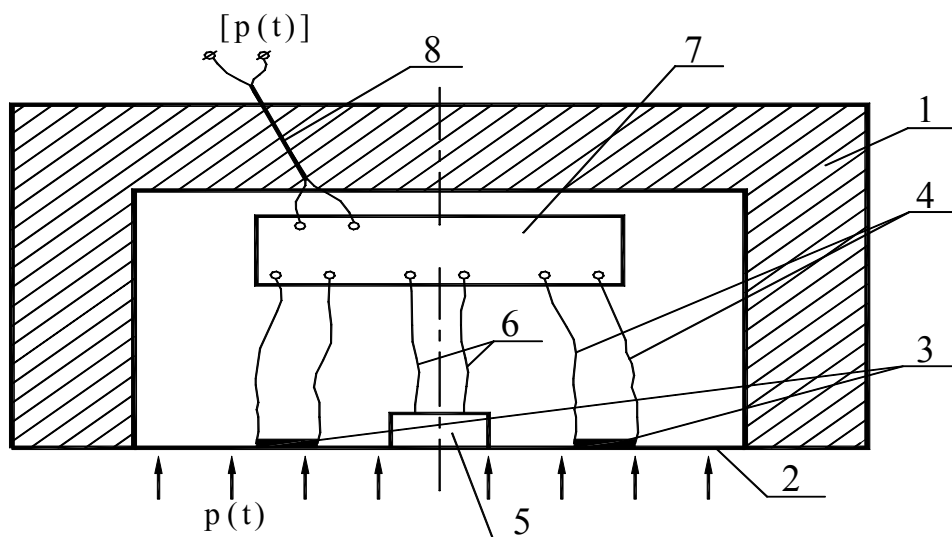


Рисунок 1 – Принципова схема суміщеного перетворювача динамічного тиску

Суміщений перетворювач динамічного тиску містить корпус 1 з круглою

жорстко заземленою мембраною 2, на якій розташовані тензорезистори 3 і акселерометр 5, що розташований в центрі мембрани, електровиводи якого 6 разом з струмовиводами з тензорезисторів 4 під'єднані до блоку обробки сигналів 7.

Процедура вимірювання здійснюється таким чином.

Вимірюваний тиск $p(t)$ сприймається мембраною 2, її прогин $U(t)$ вимірюють тензорезисторами 3, одночасно акселерометром 5 вимірюють прискорення руху центра мембрани – $\ddot{U}(t)$, вихідні сигнали з тензорезисторів 3 через струмовиводи 4, і вихідний сигнал з акселерометра 5 через електровиводи 6 поступають у блок обробки сигналів 7, у блоці обробки вихідних сигналів здійснюється обчислення швидкості руху центра мембрани згідно формули

$$\dot{U}(t) = \int_0^t \ddot{U}(\tau) d\tau, \tag{4}$$

а також відновлення вхідного сигналу в реальному часі обчисленням його значення за формулою (3).

Очевидно, що прискорення $\ddot{U}(t)$ саме по собі є динамічною величиною. Тому при його вимірюванні постають ті ж самі проблеми, як і при вимірюванні динамічного тиску. Але тут є одна суттєва особливість.

Як відомо, загальна динамічна похибка має дві складові - динамічну похибку перехідної фази, що залежить від швидкості зміни вхідного сигналу, і динамічну похибку усталеної фази, що залежить від співвідношення частоти вхідного сигналу і власної частоти перетворювача.

Для первинного перетворювача-мембрани найбільш швидкозмінним вхідним сигналом є стрибок тиску, відгук на який є фактично перехідною функцією мембрани. Як відомо, ця функція є затухаючою по експоненті синусоїдою з частотою власних коливань мембрани. Тому саме перехідна функція мембрани буде найбільш швидкозмінним і найбільш високочастотним вхідним сигналом для акселерометра.

Отже, для суміщених перетворювачів динамічного тиску необхідно з'ясувати, при яких фізичних параметрах акселерометра, як коливної системи, його загальна динамічна похибка буде не більшою від заданої. Для вирішення цієї задачі оцінимо динамічну похибку лінійної коливної системи при гармонійному вхідному сигналі

$$p(t) = \frac{p_0}{2} (1 - \cos \omega t), \tag{5}$$

де p_0 , ω – амплітуда та частота вхідного сигналу.

Підставивши вираз (5) у формулу (2) отримуємо

$$U(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \frac{p_0}{2} (1 - \cos \omega \tau) \cdot \sin(\eta_0 \cdot (t - \tau)) d\tau = \frac{k}{2} p_0 [\Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_3] \tag{6}$$

де $\Psi_1 = \frac{\eta_0 - e^{-\beta t} (\eta_0 \cdot \cos \eta_0 t + \beta \cdot \sin \eta_0 t)}{\eta_0^2 - \beta^2}$,

$$\Psi_2 = \frac{\beta}{2} \left[\frac{1}{\beta^2 + (\eta_0 - \omega)^2} \left(\sin \omega t + \frac{\eta_0 - \omega}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} \left(\sin \eta_0 t + \frac{\eta_0 - \omega}{\beta} \cos \eta_0 t \right) \right) \right],$$

$$\Psi_3 = \frac{\beta}{2} \left[\frac{1}{\beta^2 + (\eta_0 + \omega)^2} \left(\frac{\eta_0 + \omega}{\beta} \cos \omega t - \sin \omega t - e^{-\beta t} \left(\sin \eta_0 t + \frac{\eta_0 + \omega}{\beta} \cos \eta_0 t \right) \right) \right]$$

Очевидно, що залежність (6) – це амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) перетворювача в часовій області, що дозволяє знайти його загальну динамічну похибку при тій чи іншій частоті вхідного гармонійного сигналу в конкретний момент часу, а також дозволяє відшукати максимальну динамічну похибку перетворювача з урахуванням як перехідної, так і усталеної фаз вимірювального перетворення, а також фазового зміщення.

Відшукаємо максимальну відносну динамічну похибку на деякому проміжку часу. Оскільки при статичному вимірюванні вихідний сигнал перетворювача становив би

$$U_{ст} = k \cdot p, \quad (7)$$

то максимальна відносна динамічна похибка перетворювача тиску становитиме

$$\delta_{\max}(\zeta) = \frac{\max[U(t) - U_{ст}]}{U_{ст}^{\max}} 100\% \quad (8)$$

де $U_{ст}^{\max}$ – максимальне значення статичного сигналу.

На рис.2 подане графічне зображення розрахованої за формулою (8) залежності максимальної відносної динамічної похибки перетворювача від співвідношення власної частоти перетворювача до частоти вхідного сигналу

$$\zeta = \frac{\eta_0}{\omega}$$

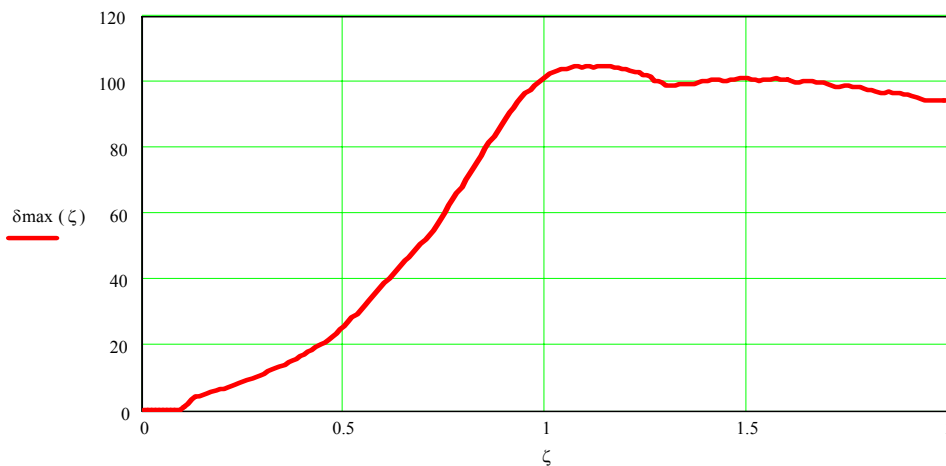


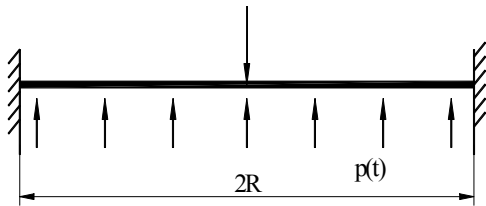
Рисунок 2 – Залежність відносної основної динамічної похибки перетворювача від співвідношення частот $z = h_0 / w$.

За отриманою залежністю можна визначити співвідношення власної частоти коливання мембрани і власної частоти коливання акселерометра, при якому основна динамічна похибка останнього не буде більшою від заданої. Такий розрахунок враховуватиме як усталену, так і перехідну фази вимірювального перетворення, а також враховуватиме фазове зміщення. Так, скажімо, при співвідношенні згаданих частот 1/10 динамічна похибка акселерометра становить 0,1%, що для багатьох випадків менше від статичної похибки.

Отже, для суміщених перетворювачів намагання збільшити власну частоту коливання акселерометра є цілком логічним. Проте у цьому випадку зростатиме його маса. Оцінимо, як це відіб'ється на динамічних властивостях перетворювача загалом.

Для з'ясування цієї проблеми дослідимо динаміку круглої, жорстко защемленої мембрани при схемі навантаження поданої на Рис.3.

$$F(t) = m \cdot \frac{\partial^2 w_0(t)}{\partial t^2}$$



Рисунки 3 – Схем навантаження мембрани

Тобто, на мембрану діє тиск $p(t)$, а з протилежної сторони – зосереджена в центрі мембрани сила $F(t) = m \cdot \frac{\partial^2 w_0(t)}{\partial t^2}$, де m – деяка маса, $\frac{\partial^2 w_0(t)}{\partial t^2}$ – пришвидчення руху центра мембрани.

Вимушені коливання при даній схемі навантаження мембрани опишуться рівнянням [10]

$$c^4 \Delta \Delta w(r,t) + \frac{\partial^2 w(r,t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial w(r,t)}{\partial t} = \frac{p(t)}{\gamma} - \frac{m \partial^2 w_0(t)}{\gamma \partial t^2} \cdot \frac{\delta(r)}{2\pi r} \quad (9)$$

де $c^4 = \frac{D}{\gamma}$, D – циліндрична жорсткість, γ – питома вага одиниці площі мембрани, β – коефіцієнт демпфування, $\delta(r)$ – функція Дірака.

Як відомо [10], розв'язок рівняння (9) записується у вигляді

$$w(r,t) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\zeta_n}{\eta_n} \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\tilde{\beta}(t-\tau)} \cdot \sin(\eta_n(t-\tau)) d\tau \quad (10)$$

де $\Phi_n(k_n \cdot r) = J_0(k_n \cdot r) \cdot I_0(\mu_n) + J_0(\mu_n) \cdot I_0(k_n \cdot r)$ – власна функція відповідної межевої задачі, $J_0(k_n \cdot r)$ і $I_0(k_m \cdot r)$ – функції Бесселя першого і другого роду,

$k_n = \frac{\mu_n}{R}$, μ_n – власні значення відповідної межевої задачі,

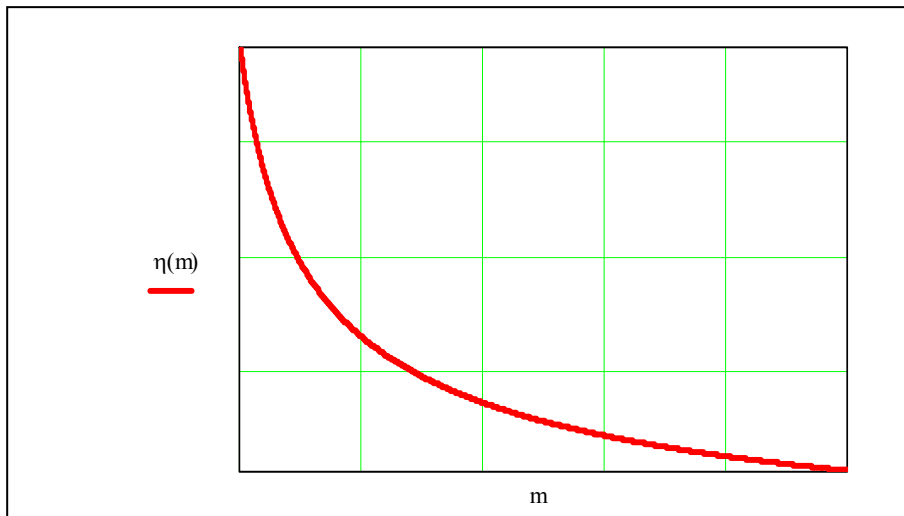
$$\zeta_n = \frac{2\pi\gamma R^2 \cdot (J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n))}{\mu_n \cdot (2\pi\gamma R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) + m \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2)} \quad (11)$$

$$\eta_n = \sqrt{\zeta_n^2 - \tilde{\beta}^2} - \text{власна частота коливань мембрани.} \quad (12)$$

$$\zeta_n^2 = c^4 \cdot \frac{\mu_n^4}{R^2} \cdot \frac{2\pi\gamma \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n)}{(2\pi\gamma R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) + m \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2)} \quad (13)$$

$$\tilde{\beta} = \frac{\beta \cdot 2\pi R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n)}{2\pi R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) + m \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2} \quad (14)$$

Вираз (12) засвідчує, що власна частота коливань мембрани залежить від



зосередженої в її центрі маси (маса акселерометра). Якісний характер такої залежності подано на рис.4.

Рисунок 4 – Залежність власної частоти мембрани від значення зосередженої маси

Така ситуація буде регламентувати вибір конструкції акселерометра, адже зростання його маси відчутно змінює динамічні властивості перетворювача загалом.

Покладаючи у виразі (14) $p(\tau) = p_0 = const$ при $t \geq 0$, отримуємо перехідну функцію мембранного перетворювача

$$w(r, t) = p_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\zeta_n}{\eta_n} \cdot \left[\frac{\eta_n - e^{-\tilde{\beta} \cdot t} (\eta_n \cdot \cos \eta_n t + \tilde{\beta} \sin \eta_n t)}{\eta_n^2 + \tilde{\beta}^2} \right] \quad (19)$$

З виразу (19) отримуємо залежність, що дозволяє розрахувати ще один важливий динамічний параметр – мінімальну тривалість погасання перехідних коливань мембрани. Покладаючи, що перехідний процес погас, якщо амплітуда перехідних коливань менша від тисячної частки усталеного значення, то необхідний для цього час становитиме

$$t(m) = \frac{\pi}{\eta_0} + \frac{1}{\tilde{\beta}} \ln \left(\eta_0 \cdot \frac{10^3}{\sqrt{\eta_0^2 + \tilde{\beta}^2}} \right), \quad (20)$$

де η_0 – основна власна частота коливань мембрани.

Якісний характер залежності (20) подано на рис.5.

Висновки

Отримані аналітичні залежності є принциповими теоретичними засадами при створенні суміщених тензометричних перетворювачів тиску, котрі покликані здійснювати вимірювання в реальному масштабі часу, і є перспективним напрямком досліджень. Крім цього, залежності (16) і (20) визначають потенційні вимірювальні можливості перетворювача загалом. Тобто, значення власної частоти коливань мембрани визначатиме допустимий частотний діапазон вимірюваного тиску, якщо він матиме неперервний періодичний чи майже періодичний характер. Для ударного характеру тиску залежність (20) регламентуватиме його допустиму шпаруватість.

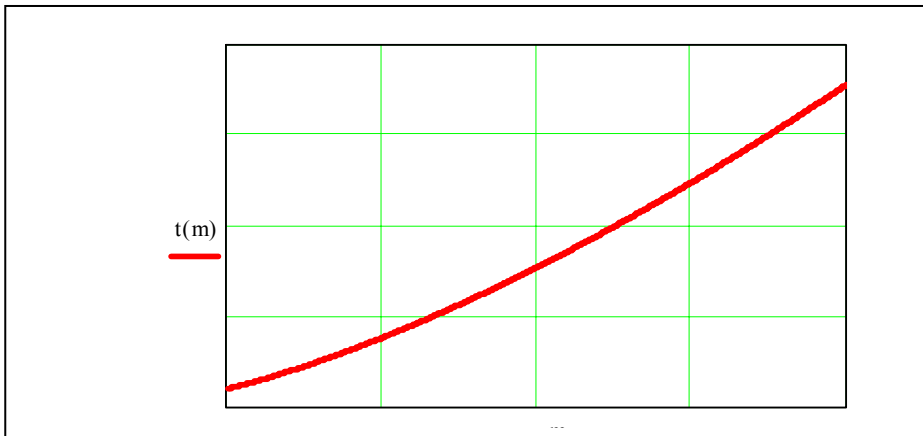


Рисунок 5 – Залежність тривалості погасання перехідних коливань мембрани від значення зосередженої маси

Література

1. Маркелов И.Г. Комплекс датчиков давления для эксплуатации на объектах атомной энергетики// Sensors & Systems, 2000, № 11 – 12. - С. 24 – 25.
2. Мокров Е.А. НИИ физических измерений. 45 лет в космическом приборостроении// Датчики и системы. № 9.2005. - С.2-3.
3. Мокров Е.А., Белозубов Е.М. Базовая системная модель нового поколения тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления для ракетной и авиационной техники. Датчики и системы. № 6. - 2005. - С. 10-14.
4. Соколов Л.В. Анализ возрастающих потребностей в микромеханических сенсорах и МЭМС. Датчики и системы. № 6.2005. - С. 41-43.
5. Козин С.А., Федулов А.В. и др. Создание полупроводниковых интегральных датчиков механических параметров на основе технологии МЭМС. Датчики и системы. №9, 2005. - С. 48-49.
6. Лурье Г.И., Мартыненко В.Т. Новое поколение полупроводниковых датчиков теплоэнергетических параметров. Приборы и системы управления, 1996, № 4, с. 26 – 28.
7. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: О редукации к идеальному прибору в физике и технике. - М.: Сов. радио, 1979. с.272.
8. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач // М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. Издание 2-е.
9. M. Tykhan. Method for input signal restoration during dynamic pressure measurement and its sensor. 18th IMEKO WORLD CONGRESS . Rio de Janeiro, Brazil. September 17 – 22, 2006. V. IX A, p. 99-103.
10. Високоточні датчики тиску для систем автоматичного керування у теплоенергетиці, енергообліковуючій та аерокосмічній техніці. Звіт про науково-дослідну роботу № ДЗ /145-2005. Міністерство освіти та науки України, Національний університет "Львівська політехніка".
11. Азизов А. М., Гордов А. Н. Точность измерительных преобразователей. М.: Энергия, 1975р., с.256.

Тихан М.О. Теоретические аспекты совмещенных тензометрических преобразователей динамического давления.

Предложены главные теоретические основы нового типа микромеханических датчиков-совмещенных тензометрических преобразователей динамического давления, которые дают возможность измерения в реальном масштабе времени.

Tyhan M.O. The theoretical foundation of the sensors-combined dynamics pressure piezoresistive transducers

The principal theoretical foundation of new type mikromechanic sensors-combined dynamics pressure piezoresistive transducers, which give a possibility measurement in real time has been proposed.

Надійшла до редакції
9 січня 2007 року

УДК 528.541.4(088.8)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ

Сафарян В.А, Гераимчук М.Д., Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина

Статья посвящена исследованиям точности вертикального проектирования. В ней отмечено, что основной влияющей ошибкой при передаче осей высотных объектов оптическими приборами вертикального проектирования (ПВП), является ошибка отсчёта по координатной палетке. Определена функциональная связь ошибок с высотой проектирования и оптическим увеличением прибора

Введение. Постановка задачи

За последние годы внедрение монолитно-каркасного строительства, привело к тенденции роста этажности зданий и сооружений. Объём строительства 24-30-ти этажных зданий возрос до 70-80%. Возведение высотных объектов предъявляет повышенные требования не только к качеству строительства, но и к высокой геометрической точности. Для решения задач по передаче координат по вертикали, зарубежные фирмы, в том числе и отечественные предприятия, предлагают приборы различного класса точности. Нередко они имеют повышенные характеристики, а их применение без соответствующей метрологической аттестации может привести к недопустимым геометрическим отклонениям строящегося высотного объекта.

В ранее проведенных исследованиях [1,2,3] получены уравнения в виде зависимости средней квадратической ошибки от одного параметра-высоты проектирования H :

$$\sigma_1=0,27+0,0141H \text{ (мм)}, \quad (1)$$

$$\sigma_2=0,36+0,013H \text{ (мм)}, \quad (2)$$

для прибора с оптическим микрометром;

$$\sigma_3=0,40+0,0013H \text{ (мм)}. \quad (3)$$

Основной задачей является получение эмпирической формулы погрешности проектирования $\sigma_{в.н.}$ в зависимости от двух основных влияющих на неё факторов - высоты проектирования H и увеличения V оптической системы. Полученная погрешность $\sigma_{в.н.}=f(H,V)$ должна быть представлена в виде функции стандартного отклонения, например линейного или квадратического типа.

Целью работы исследования исследования точности ($T=\sigma_{в.н.}/H$) передачи координат по вертикали оптическими ПВП.

Выполненные исследования и полученная трёхфакторная модель погрешности проектирования $\sigma_{в.н.}=f(H,V)$ позволит: оценить возможности оптических ПВП, имеющие различные увеличения V ; классифицировать их по точности проектирования, ограничив тем самым их применение; оценить технологические возможности приборов с различным увеличением в ступенчатом и сквозном методе проектирования; разработать на данный класс приборов государственный стандарт технических требований, методики аттестации и испытаний.

Известно, допуск Δ передачи осей по вертикали в строительном производстве определяется в соответствии с действующим ГОСТ 21779-82 и зависит от класса точности строительства (всего 6 классов) и высоты проектирования H , [4]. Для 1-го (наивысшего) класса точности он определяется зависимостью:

$$\Delta = 0,475 + 0,104H, \text{ (мм)} \quad (4)$$

В соответствии с метрологическими правилами погрешность средства передачи осей на данный допуск Δ не должен превышать как минимум $(1/3)\Delta$, в лучшем случае $(1/10)\Delta$. В строительстве эта величина определяется тем же ГОСТом в виде среднего квадратического отклонения σ и составляет $\sigma = (1/6)\Delta$.

Как видим, это простейшее правило предъявляет довольно жёсткие требования к геометрической точности проектирования осей $\sigma_{в.н.}$ приборами ПВП, допустимые границы которых и ограничиваются неравенством:

$$\sigma_n \leq \frac{1}{6} \cdot \Delta_i \quad (5)$$

здесь Δ_i – допуски, определяемые классом точности строительства и высотой проектирования H .

Инструментальная погрешность приборов ПВП с самоустанавливающейся линией визирования в основном зависит от качества работы компенсатора. При хорошей юстировке элементов подвески компенсатора, эффективном демпфирующем устройстве чувствительного элемента, погрешность положения визирной линии в оптическом канале прибора обычно не превышает $0,2-0,5''$ [5,6]. Эта погрешность ничтожно мала по отношению к основной. Основная доля погрешности проектирования (90-95%) в оптических ПВП носит субъективный характер и зависит от ошибки визуального отсчёта по координатной палетке, установленной на рабочем горизонте. Параметры H и V_α , являются основными факторами, влияющими на зрительные возможности оператора, а потому требуют нормирования при определении функции $\sigma_{в.н.} = f(H, V)$.

Методика исследования

Для решения поставленной задачи по определению погрешности отсчёта σ_0 и вертикального проектирования $\sigma_{в.н.}$, был использован прибор К-04М НПО “Завод Арсенал”, имеющий сменную систему окуляров с переменным оптическим увеличением зрительной трубы от $V_1=16^x$, $V_2=30^x$ до $V_3=45^x$. С целью подтверждения математической модели $\sigma_{в.н.} = f(H, V)$, полученной в результате исследования К-04М, по той же методике выполнены исследования и экспериментального образца прибора ПВП ЛАСК-1, имеющий жидкостный компенсатор подвесного типа. Оптическое увеличение зрительной трубы у прибора равно $V=20^x$ [5]. Для проведения исследований изготовлено вспомогательное микрометрическое устройство (МУ), на штоке которого закреплялась координатная палетка. МУ базировалось на втулке, которая устанавливалась в стандартный геодезический трегер.

Методика исследований заключалась в следующем. Исследуемый прибор устанавливался на штатив и приводился в рабочее положение. Используя отклоняющее зеркало его визирная ось направлялась в горизонт на штатив с МУ и координатной палеткой. Штатив с МУ и палеткой устанавливался на известном

расстоянии от прибора ($H_1=7\text{м}$, $H_2=25\text{м}$, $H_3=50\text{м}$ и $H_4=100\text{м}$). Используя микрометрический винт МУ задавались перемещения палетки и снимались отсчёты, наблюдая в прибор. Полный комплекс измерений был проведен для $V_1=16^x$, $V_2=30^x$ и $V_3=45^x$. Каждая серия измерений состояла из 15 отсчётов. Ошибка отсчёта определялась разницей измеренных длин полученных по отсчётам на координатной палетке и МУ. Фрагмент результатов исследований для $V=45^x$, $H=7\text{м}$. приведен в табл.1.

Результаты проведенного эксперимента для ЛАСК-1 аппроксимировались двумя статическими функциями (6,7), определяющими зависимость ошибки отсчёта σ_o , ошибки вертикального проектирования $\sigma_{в.п.}$ от высоты проектирования. При определении $\sigma_{в.п.}$ учтены ошибки центрирования $\sigma_{ц.} = 0.2$ мм, фиксации точки на координатной палетке $\sigma_{ф.} = 0.2$ мм и ошибка $\delta_{x,y} = \delta_o \cdot \sqrt{2}$, связанная с двойным определением точки проектирования (по осям X и Y координатной палетки).

$$\sigma_o = 0.097 + 0.01H, \text{ (мм)} \quad (6)$$

$$\sigma_{в.п.} = 0.244 + 0.014H. \text{ (мм)} \quad (7)$$

На представленных (пунктиром) соответствующих графиков полученных функций (6,7) и ранее выполненных исследований (см. рис.1), наблюдается хорошее их сочетание с результатами исследований по К-04М, которые показаны в виде сплошных утолщённых линий.

Таблица 1 - Фрагмент результатов исследований для $V=45^x$, $H=7\text{м}$.

Полевые исследования точности отсчёта по координатной палетке . (Цена деления палетки 5мм.)						
	$V=45^x$	$H=7\text{м}$.				
№ п/п	Отсч. по палетке $A_i(\text{см.})$	A_i-A1 (см.)	Отсч. по микромет. $B_i(\text{см.})$	B_i-B1 (см.)	di	di ²
1	15		2,00			
2	15,5	0,5	2,52	0,52	-0,02	0
3	16	1	3,02	1,02	-0,02	0
4	15,6	0,6	2,50	0,50	0,10	0,01
-	-	-	-	-	-	-
15	15,3	0,3	2,18	0,18	0,12	0,01
Контроль	15	0		СКО=	0,12	
			$\sigma_{xy}=0,17$	Для $\sigma_{ц}=\sigma_{ф}=0.2\text{мм}$.		
				$\sigma=0,33$		

Результаты эксперимента с К-04М сведены в сводную табл.2 полевых исследований и оценки точности полученной модели. При расчете погрешностей σ_o и $\sigma_{в.п.}$ использовалась трёхфакторная модель регрессионного анализа. В матричной форме она представлена в виде:

$$Y = X\beta_j + \varepsilon, \quad (8)$$

здесь β_j – коэффициенты регрессии, показывающие величину изменения результативного признака Y, при изменении переменной X_j ; ε – случайный вектор столбец ошибок наблюдений (остатков).

Таблица 2 – Сводная таблица полевых исследований

№ п/п	V^* Увелич. опт.сист.	H Высота проект. (М)	S_i Станд. откл. (мм.)	$VxSi$	$HxSi$	$e=y-y$	e/y	$Q_0=e^2$	$Qr=S^2$
1	16	7	0,44	7,04	3,08	0,027	0,061364	0,000729	0,1936
2	16	25	0,64	10,24	16	-0,0326	-0,05094	0,001063	0,4096
3	16	60	1,03	16,48	61,8	-0,0376	-0,0365	0,001414	1,0609
4	16	100	1,66	26,56	166	-0,2276	-0,13711	0,051802	2,7556
5	30	7	0,37	11,1	2,59	-0,025	-0,06757	0,000625	0,1369
6	30	25	0,56	16,8	14	-0,017	-0,03036	0,000289	0,3136
7	30	60	0,95	28,5	57	-0,022	-0,02316	0,000484	0,9025
8	30	100	1,41	42,3	141	-0,042	-0,02979	0,001764	1,9881
9	45	7	0,33	14,85	2,31	-0,054	-0,16364	0,002916	0,1089
10	45	25	0,46	20,7	11,5	0,014	0,030435	0,000196	0,2116
11	45	60	0,73	32,85	43,8	0,129	0,176712	0,016641	0,5329
12	45	100	1,33	59,85	133	-0,031	-0,02331	0,000961	1,7689
13	364	576	9,91	287,27	652,08	-4,8424	-0,48864	0,078883	10,3831

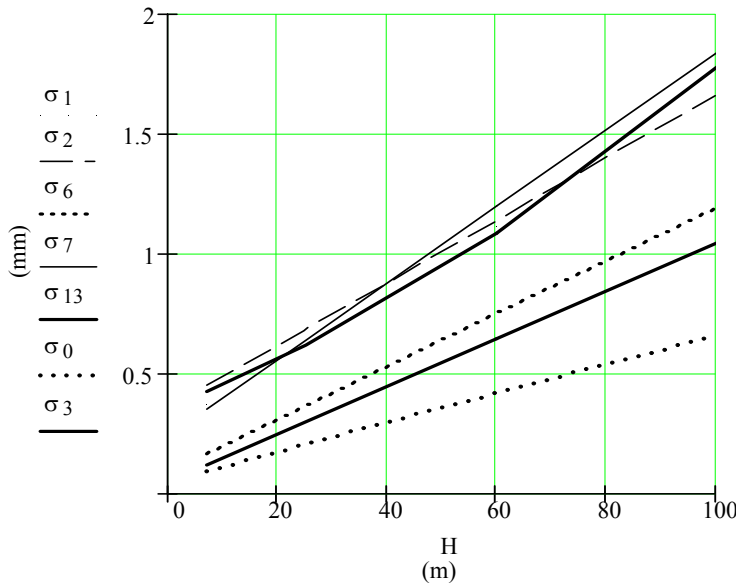


Рисунок 1 – Графики функции, полученные в результате аппроксимации b

В соответствии с методом наименьших квадратов, вектор оценок коэффициентов регрессии определяется по формуле:

$$b = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y, \quad (9)$$

здесь X^T – транспонированная матрица X исходных

данных; $(X^T \cdot X)^{-1}$ – матрица, обратная матрице $(X^T \cdot X)$.

Оценка ковариационной матрицы коэффициентов регрессии вектора b определялась из выражения:

$$S(b) = S^2 \cdot (X^T \cdot X)^{-1}, \quad (10)$$

где $S^2 = (Y - Xb)^T \cdot (Y - Xb) / (n - k - 1)$.

Проведенные расчёты выполненные в MathCAD, показали, что погрешность вертикального проектирования $\sigma_{в.п.}$ и погрешность отсчёта σ_0 , может быть аппроксимирована и представлена, как в линейной, так и в квадратичной форме следующими функциями:

$$\delta_0 = 0.316 - 0.009 \cdot V + 0.011 \cdot H \quad (\text{мм}), \quad (11)$$

$$\delta_o = 0.005 + 0.017 \cdot V + 0.008 \cdot H - 3.306 \cdot 10^{-4} \cdot V^2 \quad (\text{мм}), \quad (12)$$

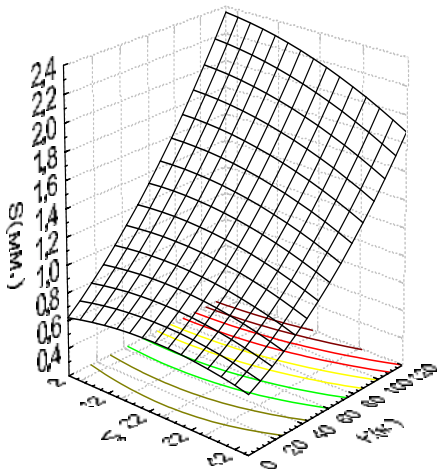
$$\delta_{\text{в.п.}} = 0.247 + 0.01 \cdot V + 0.011 \cdot H + 2.18 \cdot 10^{-4} \cdot V^2 - 1.103 \cdot 10^{-4} \cdot V \cdot H + 5.377 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 \quad (\text{мм}), \quad (13)$$

$$\delta_{\text{в.п.}} = 0.494 - 0.008 \cdot V + 0.014 \cdot H \quad (\text{мм}), \quad (14)$$

где V – увеличение оптической системы прибора; H – высота проектирования.

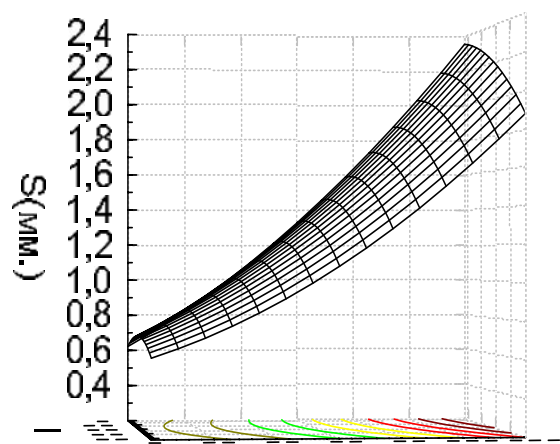
На рис.2(a,b) представлены трёхмерные графики полученной квадратической функции $\sigma_{\text{в.п.}}$ (13), в которой видна нелинейная связь исследуемых погрешностей, от параметров H и V .

3D Surface Plot (NEW.STA.001.D.STA 3v*12c)
z=0,247+0,01*x+0,011*y-2,18e-4*x*x-1,103e-4*x*y+5,377e-5



а)

3D Surface Plot (NEW.STA.001.D.STA 3v*12c)
z=0,247+0,01*x+0,011*y-2,18e-4*x*x-1,103e-4*x*y+5,377e-5*y*y



б)

Рисунок 2 – Трёхмерные графики квадратичной функции $\sigma_{\text{в.п.}}$.

Проверка значимости коэффициентов уравнений (11-14), выполнены по критерию Фишера-Снедекора (F-распределение).

Для уровня значимости $\alpha = 0,05$, у всех полученных уравнений $F_{\text{набл.}} > F_{\text{кр.}}$, что свидетельствует о правильной их аппроксимации и значимости полученных коэффициентов регрессии β_1 и β_2 , а следовательно, определена зависимость исследуемой ошибки от высоты проектирования H и увеличения V оптической системы прибора. Доля участия первой в накоплении $\sigma_{\text{в.п.}}$ (см. по линейной модели уравнения (14)) положительна и равна $+0.014H$, а второй – отрицательна и равна $-0.008V$. Вторая β_V уменьшающего действия и чем больше V , тем меньше ошибка $\sigma_{\text{в.п.}}$. Тенденция изменения ошибки β_H в 1.75 раза больше β_V .

Учёт ограничений (5) приводит к совместному решению следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{в.п.}} &= 0.247 + 0.01V + 0.011H + 2.18 \cdot 10^{-4} V^2 - 1.103 \cdot 10^{-4} VH + 5.377 \cdot 10^{-5} H^2, \\ \sigma_{\text{в.п.}} &\leq \Delta_i / 6, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

здесь Δ_i – допуск, определяемый классом точности строительства и высотой проектирования H .

Графическое представление полученного квадратического уравнения (13), с

учётом ограничений в виде уравнений допуска $\sigma_{в.н.} \leq \Delta_i/6$, представлено на рис. 3.

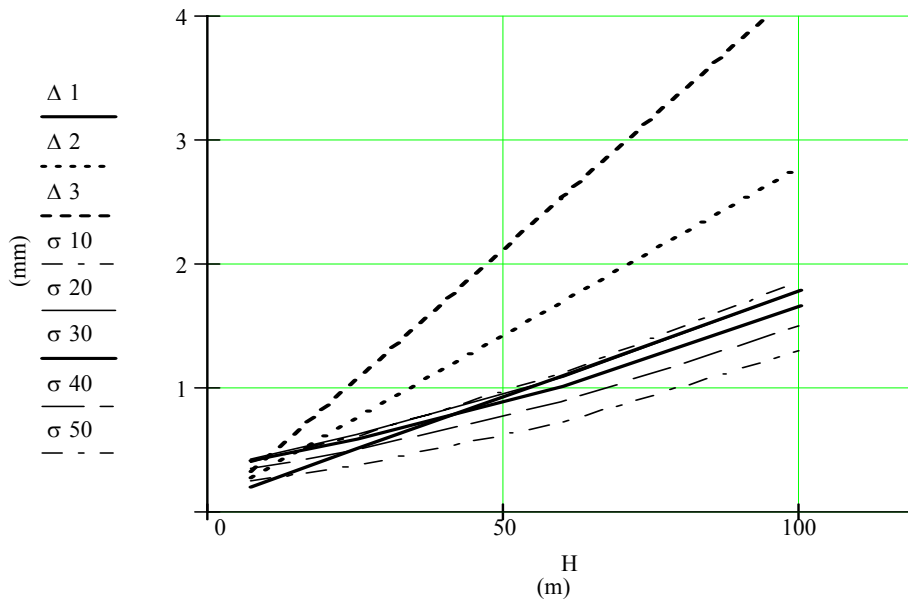


Рисунок 3 – Графическое представление Δ_i - допуски 1-го, 2-го и 3-го класса точности; σ_i - стандартное отклонение от высоты проектирования

Здесь $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – соответственно допуски для 1-го, 2-го и 3-го класса точности, уменьшенные в 6 раз. σ – стандартные отклонения для различных V .

На графике видно, что для 1-ого класса точности, необходимо использовать приборы, имеющие увеличение не менее $V \geq 28^x$. Учитывая Δ_i и H в неравенстве (16) можно рассчитать необходимое увеличение оптической системы для соответствующего класса строительства по формуле:

$$V \geq 61.750 + 1.750 \cdot H - 20.833 \cdot \Delta_i. \quad (16)$$

В случае, если $V < 61.750 + 1.750 \cdot H - 20.833 \cdot \Delta_i$, передачу координат необходимо выполнить ступенчатым методом, ограничив высоту проектирования.

Расчёт количества ступеней n можно определить, учитывая уравнение (14) линейного вида. Условие действия ошибок F между ступенчатым методом проектирования координат и сквозным, можно записать в виде:

$$F = \left(a + b \cdot \frac{H}{n} - c \cdot \frac{V}{n} \right) \cdot \sqrt{n} - (a + b \cdot H - c \cdot V) \geq 0, \quad (17)$$

здесь первый член представляет собой суммарную ошибку при ступенчатом, а второй – при сквозном способе передаче координат по вертикали. Для определения оптимального числа передач n найдём максимум функции F , определив её вторую производную:

$$F'' = \frac{\partial F}{\partial n^2} = 2 \cdot \left(b \cdot \frac{H}{n^3} - c \cdot \frac{V}{n^3} \right) \cdot \sqrt{n} + \frac{(-b \cdot H + c \cdot V)}{\sqrt{n^5}} - \frac{(a \cdot n + b \cdot H - c \cdot V)}{\sqrt{n^5}}. \quad (18)$$

Откуда число ступеней n равно:

$$n = \frac{b \cdot H - c \cdot V}{a}, \quad (19)$$

здесь a, b, c – коэффициенты уравнения (14); H и V - высота проектирования и

увеличение оптической системы используемого прибора соответственно.

Для случая $n \leq 1$, измерение следует выполнять сквозным проектированием. При $1 < n < 2$ проектировать можно сквозным или ступенчатым методом. При $n \geq 2$ необходимо применять ступенчатый метод проектирования.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований, получены эмпирические формулы средней квадратической погрешности $\sigma_{в.н.}$ вертикального проектирования и отсчёта σ_o по координатной палетке. Погрешности определены в зависимости от высоты проектирования H и увеличения V оптической системы прибора. Анализ значений средних квадратических отклонений показывает, что с увеличением высоты проектирования H погрешность проектирования увеличивается с положительным коэффициентом $+0.014H$. Увеличивая параметр V , оптической системы, можно уменьшить $\sigma_{в.н.}$ на величину $-0.008V$. Исследования показывают, что тенденция изменения $\sigma_{в.н.}$ от изменения параметров H и V имеет нелинейный характер и может быть аппроксимирована квадратическим уравнением (13). При больших высотах ($H \geq 100$ м) для исключения влияний атмосферных явлений, необходимо переходить на ступенчатый метод проектирования, рассчитывая оптимальное количество ступеней n по формуле (19).

Разработанный подход исследований может быть применен при исследовании высокоточных ПВП, имеющих оптические микрометры, что может быть предметом для дальнейших исследований.

Литература.

1. Прудников Г.Г. Исследование оптического центрировочного прибора “Зенит-ОЦП” // Инженерная геодезия. – 1985. – Вып. 11. – С. 54–59.
2. Сытник В.С., Ключин А.Б. Геодезический контроль точности возведения монолитных зданий и сооружений. М.: Недра, 1975. – С.50-53.
3. Баран П.И, Мищенко Н.А. Повышение точности вертикального проектирования. Геодезия и картография. – 1987. – №12.
4. ГОСТ 21779-82. Система обеспечения геометрической точности в строительстве. Технологические допуски геометрических параметров.
5. Гераїмчук М.Д, Сафарян В.А. Стабілізатор вертикального напрямку візирної лінії. // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – 2004. – Вип. 28. – С.124-128.
6. Сафарян В.А, Гераїмчук М.Д. Теоретические аспекты стабилизации визирной линии жидкостным компенсатором подвесного типа // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – 2004. – Вип. 28. – С.5-12.

Сафарян В.А., Гераїмчук М.Д. Дослідження точності вертикального проектування оптичними приладами. Стаття присвячена дослідженням точності відліку по координатній палітці. Вона визначена як основна похибка, що впливає на передачу координат висотних об'єктів приладами вертикального проектування (ПВП).	Cafarian. V, Geraimchuk. M. Research of accuracy of vertical designing by optical devices PVP. Clause is devoted to researches of accuracy of vertical designing and accuracy of readout on coordinate palete, as basic influencing mistake by transfer of axes of high-altitude objects by devices of vertical designing (PVP).
---	--

Надійшла до редакції
19 січня 2007 року