

# Дослідження та випробування верстатів і верстатних комплексів

## Конспект лекцій

для студентів спеціальності 133 «Галузеве  
машинобудування»

Розглянуто і схвалено  
на засіданні кафедри  
«Комп'ютеризовані мехатронні  
системи, інструмент і технології»  
Протокол № 1 від 28 серпня 2018 р.

## РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ ТОЧНОСТІ У ВЕРСТАТОБУДУВАННІ

### **Лекція 1, 2 Вступ. Забезпечення точності верстатів. Показники точності верстата. Показники точності деталі. Проблеми забезпечення та підвищення точності верстатів**

*Точність* – основний показник, що характеризує якість та технічний рівень металорізального обладнання.

Геометрична та кінематична точність верстата характеризує точність переміщення його формоутворювальних вузлів без силових та теплових впливів. Ці характеристики пов'язані з точністю виготовлення та складання вузлів та пристроїв верстата, тобто з технологічними факторами.

Високі вимоги до точності сучасних верстатів визначають суворі допуски на точність переміщення та положення робочих органів, що пов'язані з геометрією верстата, як його вихідною характеристикою.

За точністю верстата поділяють на 5 класів:

**Н** – нормальної точності, забезпечують обробку деталей по 8-7 квалітетам точності;

**П** – підвищеної точності, виготовленні переважно на базі верстатів класу Н, але з більш високими вимогам до точності базових деталей (шпиндель та його опори, напрямні та інші);

**В** – високої точності, яка забезпечується за рахунок спеціальної конструкції окремих елементів, більш високої якості їх виготовлення та експлуатації верстата у спеціальних умовах.

**А** – особливо високої точності, виготовляються з більш суворими допусками, ніж верстата класу В.

**С** – надточні – спеціальні майстер-верстата, призначені для виготовлення прецизійних деталей верстатів, машин та приладів, від точності яких залежать характеристики виробів (ділильні та еталонні колеса, вимірювальні гвинти, тощо).

У інших країнах застосовують аналогічну градацію верстатів на 5 класів точності: – звичайний (без позначення);

**Н** – високий;

**Р** – прецизійний;

**SP** – суперпрецизійний;

**UP** – ультрапрецизійний.

Допустимі відхилення для регламентованих нормативами показників точності верстатів при переході від класу до класу складають геометричну прогресію із знаменником  $\phi = 1,6$ .

Перелік параметрів, що характеризують геометричну та кінематичну точність верстатів даного типу, методи їх перевірки та допустимі відхилення параметрів регламентовані відповідними стандартами:

ГОСТ 22267-76 – «Верстата металорізальні. Схеми та способи вимірювання геометричних параметрів» – утримує методи та метрологічні

засоби, які застосовують для перевірок геометричної і кінцевої точності верстатів різних типів.

Норми точності (допустимі відхилення параметрів, що вимірюються), а також у більшості випадків і норми жорсткості наведені у стандартах «Верстати металорізальні. Норми точності» окремо на усі типи верстатів. Одним з проблемних питань забезпечення точності є призначення показників, які характеризують точність верстата.

Найбільшого поширення набув такий перелік показників точності верстата:

**1. Точність оброблених на верстаті деталей, яка визначається:**

- ✓ точністю розмірів – **ТР**;
- ✓ точністю форми оброблених поверхонь – **ТФ**;
- ✓ точністю взаємного розташування – **ТВР**;
- ✓ точністю мікрогеометрії оброблених поверхонь – **ТМ**.

Зміст наведених показників зручно пояснити таблицею параметрів для усіх груп та типів верстатів.

Показники точності деталей, виготовлених на усіх типах верстатів

Деталь(поверхня)	<b>ТР</b>	<b>ТФ</b>	<b>ТВР</b>
Тіла обертання (зовнішні та внутрішні поверхні)	Похибка D та L	Відхилення від циліндричності, сферичні та інші, відхилення форми торців	Биття, неспіввісність, неперпендикулярність
Отвори та площини, що утворюються обертанням інструменту	Похибки D та L	Відхилення від циліндричності, відхилення форми торців	Неспіввісність, неперпендикулярність, непаралельність та переки осей, непаралельність площин, відхилення міжосьових відстаней.
Площини, пази, канавки, криволінійні поверхні	Похибки лінійних розмірів, похибки кутових розмірів	Неплощинність, відхилення від заданої форми.	Непаралельність; неперпендикулярність, відхилення координат лінійних та кутових, несиметричність, неперетинання осей
Спеціальні поверхні (гвинтові, бокові зубців зубчастих коліс)	Похибки розмірів профілю осьового, нормального, торцевого перерізу, похибки кроку різі, кроків обводного та основного зубців зубчастих коліс	Відхилення профілю від номінального	Биття, неспіввісність, різниця кроків.

Показником **ТМ** є шорсткість оброблених поверхонь.

2. **Кінематична точність** формоутворювальних рухів під час обробки різі, зубців зубчастих та черв'ячних коліс визначається точністю взаємного переміщення (відхилення від паралельності, перпендикулярності тощо), точністю координатних переміщень (лінійних та кутових), точністю передаточного відношення (постійність або зміна за заданим законом)
3. **Точність у динаміці**, яка пов'язана з деформаціями, коливаннями параметрів процесу різання, тертя, процесами у природі.
4. **Точність**, що пов'язана з **тепловими деформаціями**;
5. **Точність**, що залежить від **факторів з повільним проявленням** (знос, природне старіння, релаксаційні явища).

Підвищення точності металообробкою обладнання забезпечує підвищення надійності оброблених деталей, зібраних з них вузлів і створює умови для інтенсифікації роботи цих вузлів (підвищення швидкості, навантажувальної здатності, потужності).

Підвищення точності важливе з точки зору підвищення продуктивності самого верстатного обладнання.

*Приклад.* У наш час випускається різьбонарізний верстат 2P056 класу точності Н. Він забезпечує нарізання різі степені точності 6Н шляхом вільного різання мітчиком.

Для отримання різі більш високої точності необхідно застосовувати послідовну обробку 2–3-ма мітчиками за 2–3 проходи.

Розроблений верстат моделі 2P056П (підвищеної точності) працює за принципом примусового різання, де точність кроку забезпечується застосуванням у приводі подачі еталонної копіювальної пари гвинт-гайка.

Потрібна точність різі забезпечується за один прохід. Тобто, підвищення продуктивності за рахунок збільшення точності.

Підвищення точності токарних та розточувальних верстатів забезпечує проведення кінцевої обробки деталей, що виключає шліфування. Це також підвищує продуктивність металообробки.

Проблеми досягнення точності пов'язані з усуненням джерел похибок верстатів та характеризуються надзвичайною багатофакторністю.

Якщо подивитись на історію розвитку вимог до точності верстатів, то спостерігається така картина.

Вимоги до точності обробки зростали одночасно з ростом продуктивності, швидкості машин, у тому числі і самих верстатів, що викликало нові проблеми забезпечення точності.

Так, інтенсифікація режимів обробки викликала збільшення зусиль різання, що вимагало урахування та забезпечення статичної жорсткості технологічної системи.

Збільшення швидкості обробки, частот обертання, швидкостей поступальних переміщень вимагає урахування впливу на точність

динамічних факторів, коливань пружної системи верстата, динамічних властивосте робочих процесів (різання, тертя, процеси у двигунах), урахування замкненості динамічної системи верстата у процесі його роботи.

Крім урахування та компенсації внутрішніх джерел динамічних похибок необхідно захищати верстат від зовнішніх впливів, тобто постають проблеми захисту верстатів від зовнішніх впливів.

Розширення технологічних можливостей, підвищення точності, збільшення долі верстатів класів В, А, С, призвело до необхідності урахування впливу теплових деформацій верстата та оброблюваної деталі, коливань температури, вологості, атмосферного тиску.

Окрему проблему складає розмірна та різальна стійкість інструменту.

Важлива проблема метрологічного забезпечення розробки, виготовлення та експлуатації верстатів. Геометрична, кінематична та силова схеми верстата повинні забезпечувати як мінімальні похибки обробки, так і найбільш ефективні способи їх контролю та регулювання.

Метрологічне забезпечення експлуатації верстатів повинно створювати умови продуктивного і точного контролю на верстаті деталей, а також систематичної перевірки та регулювання точності самого верстата.

У поняття метрологічне забезпечення входять також засоби вимірювання показників точності.

Одна з проблем у цьому напрямку – створення засобів вимірювання, які забезпечують достовірний контроль показників точності верстата.

Велика кількість показників та велика працемісткість їх вимірювання вимагає автоматизації та комп'ютеризації засобів вимірювання.

### **Лекція 3 Фактори впливу на точність обробки. Систематичні та випадкові складові загальної похибки обробки**

Під точністю механічної обробки розуміють ступінь відповідності обробленої деталі її вірному прототипу або зразку.

Чим більша відповідність, тим вища точність.

Аналогічне, але більш чітке визначення:

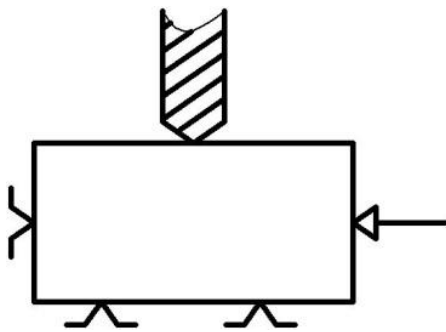
*Точність обробки* – ступінь наближення дійсних значень геометричних параметрів оброблених деталей до заданих величин.

*Точність* характеризується похибкою, яка визначається різницею між дійсним та заданим або розрахованим значенням параметра.

*Похибки обробленої деталі* – це результат впливу на процес обробки багатьох факторів, що викликають елементарні похибки обробки:

До елементарних похибок обробки відносять:

1. Специфічні властивості динамічної системи верстата у процесі обробки – деформативність системи пружної технологічної системи ВПД;



- динамічні характеристики робочих процесів у верстаті;
- ступінь стійкості замкненої динамічної системи верстата;

2. Похибки базових поверхонь заготовки та похибки її встановлення на верстаті;
3. Деформації заготовки та інших елементів технологічної системи під впливом зусиль закріплення;
4. Розмірний знос ріжучого інструмента;
5. Похибки настроювання верстата;
6. Геометричні похибки верстата;
7. Похибки способу формоутворення;
8. Похибки виготовлення та встановлення інструменту;
9. Теплові деформації ланок технологічної системи під впливом зовнішніх та внутрішніх теплових полів.

Доля похибок від перелічених факторів у загальному балансі точності обробки різна.

Ряд факторів практично не змінюється у процесі обробки:

- деформації заготовки та елементів технологічної системи під впливом зусиль закріплення;
- похибки базових поверхонь заготовки та встановлення її на верстаті;

- похибки виготовлення та встановлення інструмента;
- геометричні похибки верстата.

Інші фактори суттєво змінюються у процесі обробки під впливом змінних зусиль, змінної жорсткості, зміни температурних умов, зміни параметрів процесів різання, тертя.

Фактори та їх наслідки – похибки обробки – можуть утримувати систематичні та випадкові складові.

Фактори *систематичних похибок* обробки – геометричні похибки верстата.

Під час обробки деталей, що обертаються:

- непаралельність осі обертання і траєкторії руху інструменту викликає конусність;
- перекис – гіперболоїдальність обробленої поверхні.

Нерівномірна за кутом повороту жорсткість шпинделя викликає систематичну складову похибки форми поперечного перерізу деталі.

У той же час багато з діючих факторів, а також їх сукупності, призводять до появи *випадкових похибок*.

Вони проявляються у розсіянні параметрів точності обробки.

Особливість проявлення причин випадкових похибок в тому, що вони не піддаються точному прогнозуванню і проявляють свою дію незалежно одна від одної.

Фактори випадкових похибок:

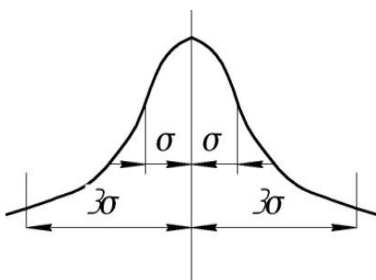
- коливання твердості матеріалу заготовки;
- коливання припуску;
- коливання положення заготовки через неякісне базування;
- коливання температурного режиму;
- коливання заготовки відносно інструменту внаслідок динамічних процесів у верстаті, а також затуплення інструменту.

В результаті дії випадкових факторів дійсні розміри кожної деталі є випадковими величинами безперервного типу, оскільки приймають будь-які значення в межах визначеного інтервалу.

При різних умовах обробки деталей розсіяння їх розмірів підпорядковуються різним математичним законам.

Розподіл дійсних розмірів деталей, оброблених на налагоджених верстатах, підпорядковуються закону нормального розподілу Гаусса.

Умови відповідності розподілу випадкових величин закону Гаусса визначаються теоремою Ляпунова:



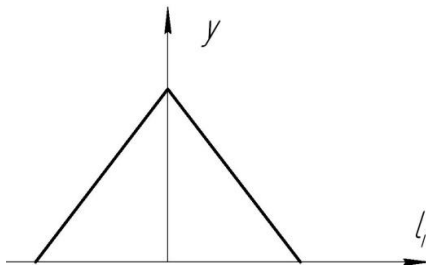
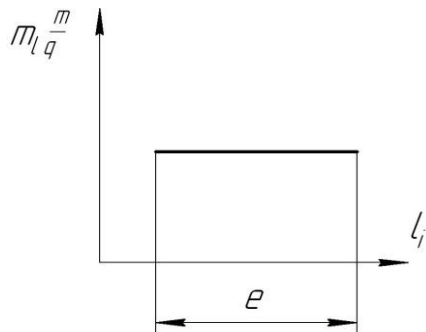
а) вплив кожного із додатків на суму мізерно мало і приблизно однаковий, тобто нема домінуючих складових;

б) до складу суми входить велике число взаємно незалежних випадкових величин.

На практиці крива розподілу деталей відхиляється від теоретичної кривої.

Закон нормального розподілу справедливий для деталей, оброблених різанням з точністю 8-го квалітету і нижче. Фактичне поле розсіяння  $\omega = 6 \cdot \sigma$ .

Якщо розсіяння розмірів суттєво залежить від одного домінуючого фактора (наприклад, зносу інструменту), то розподіл розмірів партії деталей підпорядковується закону рівної вірогідності.



Розподіл за законом рівної вірогідності справедливий для деталей, оброблених з особливо високою точністю (6-й квалітет та вище). Фактичне розсіяння  $\omega = 2\sqrt{3} \cdot \sigma$ .

Під час обробки по 7-му та 8-му квалітетам, а також при суттєвому впливі жорсткості системи ВПД, зносу інструмента та інших причин розподіл розмірів може підпорядковуватись закону трикутника. При цьому  $\omega = 2\sqrt{6} \cdot \sigma$ .

При одночасному впливі факторів систематичних та випадкових похибок закони розподілу становлять собою композицію.

Таким чином для оптимізації обробки за критерієм точності необхідно застосовувати статистичні методи.



## РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ФАКТОРІВ УТВОРЕННЯ ПОХИБОК ОБРОБКИ

### Лекція 4, 5 Джерела утворення похибок при різних видах обробки на токарних, фрезерувальних та шліфувальних верстатах

#### **Обробка на токарних верстатах.**

Відносні пружні переміщення елементів технологічної системи, що мають складний просторовий характер, призводять до зміни заданої під час статичного настроювання відстані між вершиною різця та віссю обертання деталі (величина  $Y$ ).

Отримані радіальні розміри  $A_{\omega}$  можна зобразити у вигляді суми розмірів статичного настроювання  $A_0$  (за відсутності похибок встановлення) та відносного пружного зміщення ( $Y$ ):

$$A_{\omega} = A_0 + Y.$$

Динамічні процеси під час обробки призводять до зміни пружних зміщень та коливання величини  $Y$ , отже до розсіювання розмірів  $A_{\omega}$ . Дослідження показали, що на великих подачах пружне зміщення зростає пропорційно подачі.

Геометрія інструмента має домінуючий вплив на формування амплітуди та швидкості відносного переміщення інструмента та заготовки в зоні контакту.

Для головного кута в плані  $\varphi = 45^\circ$  амплітуда зростає в напрямку від вершини різця до осі обертання (за  $P_y$ ), для  $\varphi = 90^\circ$  – в напрямку  $P_z$ .

Геометрична точність самоцентрувальних трикулачкових патронів впливає на точність обробки. Характеристикою точності патронів служить *ексцентриситет*, який має дві складові:

- похибки у нерухомих з'єднаннях,
- похибки рухомих ланок передаточного механізму.

Токарна обробка по *копіру*. Точність пов'язана з динамікою копіювальної системи. Дослідженнями встановлені такі умови забезпечення точності обробки:

- необхідність постійного контакту щупа та копіра, що залежить від допустимого прискорення щупа при заданій жорсткості притискної пружини;
- частота вимушених коливань системи повинна в 9...11 разів перевищувати власну частоту коливань щупа з пружиною.

У токарних багатшпиндельних напівавтоматах, як показали дослідження, пружні деформації шпиндельного вузла та поперечного супорта залежать від частоти обертання шпинделя. При найбільших швидкостях спостерігаються менші деформації.

Нерівномірність нагріву опор шпиндельного вузла у перші часи роботи призводить до його перекоосу та збільшенню деформацій.

Зазори в системі та їх вибирання під навантаженням пояснюють зміну жорсткості шпиндельного вузла при зусиллях до 3000 Н та її стабілізацію із збільшенням зусиль.

**Фрезерувальні верстати.** Найбільш важка задача – отримання правильної форми площини вздовж поздовжньої подачі.

Джерела відхилення від площинності:

- геометричні похибки рухів вузлів верстата;
- неточність встановлення та кріплення верстата на фундаменті;
- теплові деформації;
- деформації від робочих зусиль у процесі різання;
- нерівномірність припуску.

Відомо, що змінюючи режими різання під час обробки з поздовжньою подачею можна отримати відхилення від площинності як в сторону опуклості, так і в сторону увігнутості.

Для  $t = 0,1$  мм → створюється опуклість величиною 0,01 мм,

Для  $t = 0,5$  мм → створюється опуклість величиною до 0,005 мм,

Для  $t = 1$  мм → створюється опуклість величиною до 0,0005 мм,

Для  $t = 4$  мм → створюється увігнутість величиною 0,03 мм.

Під час переміщення столу від середнього положення в обидві сторони без обробки виникає кінематична похибка, пов'язана з геометричними неточностями та пружними деформаціями у рухомих стиках. Зміна відстані від шпинделя (осі, горизонтального або вертикального торця) до поверхні столу складає до 20 мкм.

При контурному фрезеруванні на верстатах з ЧПК домінуючий вплив на точність мають пружні деформації (40...60%). Жорсткість вздовж координатних осей може відрізнятись у 2...3 рази.

**Шліфувальні верстати.** Складний характер мають похибки під час шліфування методом врізання з компенсацією зміщення твірної круга під час правок.

Похибки обумовлені зносом алмазу для правки круга, помилками у переміщеннях рухомих вузлів, пружними та тепловими деформаціями системи, зносом шліфувального круга між правками.

Знос алмазу може складати 0,4...0,8 мкм.

Похибки переміщення алмазу при довгих кінематичних ланцюгах до 5 мкм. Осьове биття гвинта подачі алмазу спричиняє похибки обробки до 60 мкм.

Складний характер мають теплові деформації.

При осьовому закріпленні заднього кінця шпинделя нагрів підшипників викликає подовження тіла (до 0,14 мм на кінець 2-ї зміни).

Затуплення алмазу викликає додатковий нагрів його державки на 110...120 °С, що викликає її подовження на 50...60 мкм.

Пружні деформації державки з алмазом при її жорсткості 10...15 Н/мкм призводять до коливань зусиль правки, які сприяють нестабільності процесу правки та викликають похибки до 6 мкм.

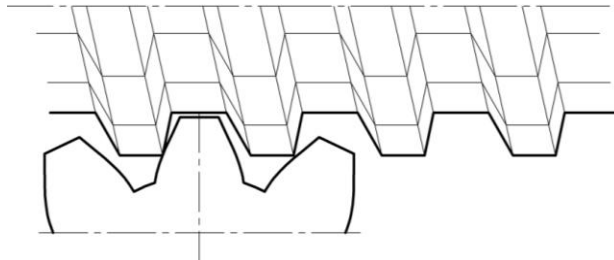
## **Лекція 6 Джерела та складові похибок обробки. Похибки геометричної схеми обробки. Статична жорсткість стиків та несучих частин**

### **1. Похибки геометричної схеми обробки**

Допущення та наближення під час розв'язання кінематичних задач та спрощення ріжучого інструменту викликають систематичні похибки обробки.

Наприклад: Нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами за теоретичною схемою - кочення колеса по прямолінійній рейці в осьовому перерізі черв'яка. Похибка профілю евольвенти зуба обумовлюється:

- порушенням нахилу гвинтової канавки,
- твірної леза ріжучої частини фрези.



Аналогічно утворюється похибка профілю при формоутворенні зубців за допомогою довбачів. Викривлення профілю відбувається в результаті загострення для отримання передньої поверхні ріжучої частини. Викривлюється профіль зуба і при нарізанні модульними фрезами.

При фрезеруванні різей виникає огранка поверхні як систематична похибка форми профілю різі.

### **2. Статична жорсткість стиків та несучих частин**

Контактна піддатливість стиків може визначатись залежністю:

$$\varepsilon = a \cdot \sigma_{\varepsilon}^n$$

де  $a$  – коефіцієнт виду обробки ( $a = 1,3$  – для точіння ( $Ra = 1,25 \dots 0,63$ );  $a = 0,2$  – для тонкого шліфування ( $Ra = 0,02 \dots 0,04$ )).

$\sigma_{\varepsilon}$  – контактне напруження, МПа;

$c$  – показник степені (для сталевих та чавунних деталей при площі стиків до  $100 \dots 150 \text{ см}^2$   $c = 0,5$ ).

Відхилення від площинності у  $10 \dots 15$  мкм підвищують податливість стиків у  $2 \dots 2,5$  рази.

Важливе значення мають пружні переміщення від моментів та нецентрального навантаження.

Кут повороту поверхонь стику від моменту:

$$\alpha = 10^{-3} K_{\text{к.п}} \text{ М/І},$$

де  $M$  – момент, Н·мм;

$J$  – момент інерції площі стику, мм<sup>4</sup>.

$K_{к.п}$  – коефіцієнт контактної піддатливості, мкм/МПа (залежить від початкового затягнення, розмірів та точності виготовлення стиків).

Визначені експериментально значення  $K_{к.п}$  лежать у межах від 20...21 – для вертикальних напрямних при ширині 50...100 мм та середньому тиску до 0,5 МПа,

3...5 – не затягнені пінолі (циліндричні стики),

0,3 – затягнені пінолі з гарною підгонкою,

0,1...0,15 – затягнені конічні з'єднання з гарним приляганням.

Коефіцієнт податливості збільшується у 1,5...2 рази при коливаннях рясно змащених плоских стиків.

Під час складання вузлів верстатів, що стикаються фланцями з гвинтовими з'єднаннями, утворюються кутові відхилення осей, які викликаються контактними деформаціями стиків через нерівномірність затягнення елементів кріплення.

Жорсткість шпиндельних опор на підшипниках кочення визначається пружними деформаціями останніх.

Визначені залежності деформацій від навантаження, діаметра кульок та їх кількості для різних типів підшипників.

Для базових деталей встановлені залежності зміни жорсткості при зміні відношень головних розмірів, розмірів перерізів, товщини стінки, від наявності ребер жорсткості, вікон тощо.

Жорсткість по куту повороту механічних приводів має складові:

- 1) закручування валів(15...30%),
- 2) згин валів із врахуванням жорсткості опор (35...40%),
- 3) контактні деформації шліцьових та шпонкових з'єднань (35...45%).

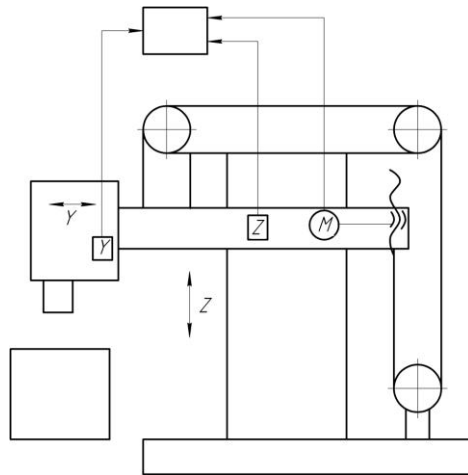
## РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ

### **Лекція 7** Зниження та компенсація впливу окремих джерел похибок. Компенсація джерел похибок базових деталей, шпindelьних вузлів, напрямних. Зниження впливу теплових деформацій

*Базові деталі.* Як відомо, точність визначається відповідністю траєкторії рухів робочих органів ідеальним геометричним прототипам.

Напрямні хоча і виготовляються з високою точністю, а корпусні деталі мають високу жорсткість, але цим не гарантується висока точність переміщень.

Наприклад, гравітаційні навантаження під час переміщення рухомих вузлів координатно-розточувального верстата 23460 змінюють свої координати, що призводить до відхилення від прямолінійного переміщення до 10 мкм на 1000 мм ходу.



Для компенсації деформацій корпусних деталей від взаємних переміщень важких вузлів використовуються гідравлічні або електромеханічні системи, що створюють врівноважувальний момент, величина якого регулюється в залежності від положення рухомого органу. Такі системи дозволяють знизити похибки у 3 рази.

Набула розвитку тенденція заміни металу для виготовлення станин на неметалічні матеріали: різні види бетону, граніти тощо. Такі матеріали дозволяють значно підвищити вібростійкість станин.

Використовують як звичайний бетон на основі цементу, так і комбінації інших матеріалів.

Низька жорсткість та міцність цементного бетону компенсується великою товщиною стінок або взагалі суцільним монолітом. Такі станини майже не збільшують маси, оскільки бетон легший за чавун.

Токарний верстат NDM-25 фірми «Георг Фішер» (Швейцарія) з найбільшим діаметром обробки над станиною 500 мм має моноблочну похилу станину із попередньо напруженого залізобетону.

Верстати із бетонними станинами випускають фірми Німеччини, Англії.

Полімербетон – один з перспективних конструкційних матеріалів для корпусних деталей.

Розроблені полімербетони на основі епоксидної, поліефірної, акрилової смоли з наповнювачами із кварцового піску, базальту, гранітної крошки.

Такі бетони твердіть за один день замість 28 для цементних, можуть працювати на розтягнення ( $\sigma_p = 25 \text{ Н/мм}^2$  замість  $4 \text{ Н/мм}^2$  для цементних), стійкі до масла, води, ЗОР. Вібростійкість підвищується у 10 разів порівняно із чавуном.

З них виготовляють станини шліфувальних, багатоцільових верстатів фірми Німеччини та інших країн.

Фірма «Ніппон Електрик Компані» (Японія) розробила матеріал з полістирольною зв'язкою та частками фериту від 0,1 до 10 мкм в якості наповнювача для виготовлення столів прецизійних верстатів. Демпфувальна здатність такого матеріалу у 100 разів вища ніж у чавуну.

Створюються аналогічні дешеві конструкційні матеріали із промислових відходів для зниження шуму та вібрацій.

**Шпинделі.** Оснащення шпинделів високошвидкісних верстатів пристроями та системами гасіння вібрацій покращує динамічні характеристики, що підвищує точність.

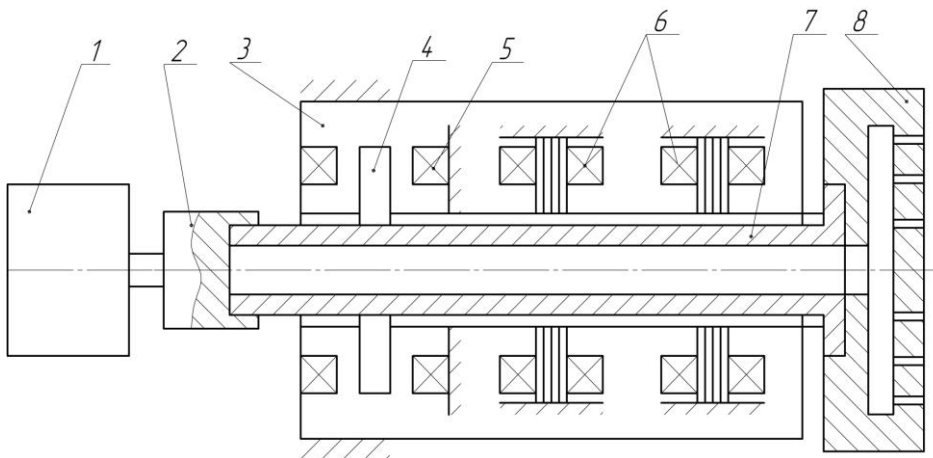
Пасивні демпфери та віброгасники ударної, фрикційної, динамічної, гідравлічної дії застосовують у борштангах.

Активні віброгасники – це вібратори, що керуються датчиками швидкості елемента, вібрацію якого знижують.

Активне керування коливальними процесами у шпиндельних вузлах здійснюється за допомогою активних магнітних підшипників.

Так у шпиндельному вузлі фрезерного верстата досягли радіального биття  $2 \text{ мкм}$  на частоті  $35000 \text{ хв}^{-1}$ .

Високоточний шпиндель верстата для алмазного точіння магнітних дисків пам'яті:



У корпусі 3 змонтований шпindel 7 з патроном 8. Шпindel обертається у радіальних магнітних підшипниках 6, осьове навантаження сприймає подвійний опорний підшипник 5 через жорсткий диск 4. Шпindel обертається від електродвигуна 1 через пружну муфту 2.

**Напрямні.** Основним напрямком збереження точності напрямних є підвищення їх зносостійкості.

*Традиційні:* оптимізація змащення, захист від пилу.

*Нетрадиційні:* Використання присадок, що забезпечують вибірковий переніс, перехід до напрямних кочення.

Матеріал SKC-3 на основі епоксидних смол. Малий коефіцієнт тертя (0,04), спроможність поглинати тверді частки, що попереджує появу подряпин та зазорів.

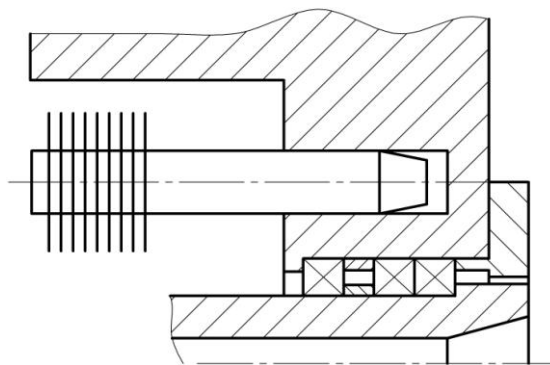
**Теплові деформації.** Для зниження їх впливу створюються термоконстантні цехи та дільниці із стабілізацією температури до  $\pm 0,05$  °C.

Термоізоляційні екрани для захисту несучої системи верстата від джерел теплоутворення.

Охолодження окремих деталей (підшипники шпинделів) за рахунок циркуляції масла або повітря.

Системи автоматичної компенсації теплових деформацій мають кілька напрямлень:

1 – Здійснення направленої зміни теплового потоку. (за рахунок теплових труб). Це стрижень з матеріалу, що має високу теплоємність та теплопровідність. Він герметичний і заповнюється рідиною з високою теплоємністю. Конічний кінець встановлюється у зоні підвищеного теплоутворення. На іншому кінці ставляться диски. Властивість такої труби – відбирати тепло від джерела. Ефективність збільшується, якщо обдувати радіатор.



На безцентрово-шліфувальному верстаті 3М182 це знизило похибку розмірів деталей у партії у 1,5 рази.

2 – Програмна компенсації теплових деформацій та похибок. Така система складається з великої кількості датчиків у місцях теплоутворення.

Коректувальна поправка отримується в результаті обробки інформації ЕОМ. На практиці кількість датчиків обмежується лише найбільш важливими місцями.

Так на токарному багатоцільовому верстаті шведської фірми встановлено 5 датчиків. Сигнали отримує система ЧПК, де обчислюється температурне зміщення шпинделя, а результати використовуються для корекції положення інструменту.

Алгоритм визначення корекції розробляється на основі експериментальних досліджень.



## **Лекція 8** Способи корекції систематичних та випадкових похибок верстатів. Механічний та автоматичний способи підналагодження. Способи підналагодження за вхідними та вихідними параметрами

*Корекція систематичних похибок* широко застосовується для підвищення точності позиціонування.

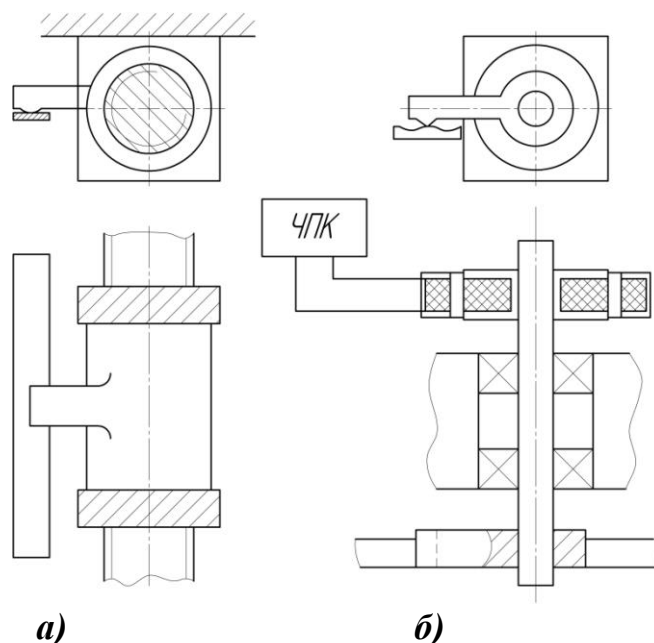
На систематичні похибки позиціонування впливають похибки вимірювальної системи, геометричні похибки напрямних, похибки гвинтової пари (у середині кроку та накопичена).

Традиційний спосіб корекції – механічний. Він полягає у створенні додаткової кінематичної ланки, яка диференційно пов'язана із рухомим вузлом.

Така ланка може складатись із коректувального пристрою – лінійки, по якій рухається важіль. Лінійка має складний профіль з виступами та западинами, що відповідають попередньо виміряним похибкам системи на довжині усього координатного переміщення відповідного вузла. Важіль під час руху коливається навкруги осі. Можливі два варіанта використання такого коливання:

1. Силове, коли важіль безпосередньо діє на рухомий вузол та уповільнює або прискорює його переміщення. Так на схемі *а)* показано випадок, коли важіль приєднаний до гайки на ходовому гвинті і його коливання обертають гайку в ту чи іншу сторону, що компенсує похибки кроку гвинта, тобто переміщення вузла відбуваються з більш високою точністю, ніж може забезпечити гвинт приводу.

2. Несилове, коли важіль діє на вимірювальну систему, яка передає у систему керування відповідну інформацію про величину похибки переміщення вузла для здійснення корекції руху. На схемі *б)* показано пристрій корекції переміщення вузла з індуктивним вимірювальним перетворювачем.



Інший спосіб використання метода корекції систематичних похибок – підналагодження початкової точності взаємного розташування інструмента та заготовки, що змінюється у процесі обробки партії деталей від зносу чи затуплення інструменту, теплових та пружних деформацій. Внаслідок цього відбувається зміщення поля розсіювання розмірів деталей до границі поля допуску. Момент підналагодження визначається вимірюванням оброблених деталей. При цьому підналагодження можна проводити досить часто, що звузить поле розсіювання, тобто підвищить точність обробки.

Автоматичне підналагодження – активний контроль – дозволяє підвищити точність не знижуючи продуктивність.

Розглянуті способи корекції похибок можна віднести до керування за вихідними параметрами.

**Корекція випадкових похибок** базується на способах керування за вхідними параметрами, чим забезпечується зменшення впливу випадкових похибок на загальну точність обробки.

Найбільший вплив на величину поля розсіювання здійснюють:

- коливання припуску та твердості заготовки (збільшується діапазон сил різання  $i$ , відповідно, пружних деформацій);
- сили та швидкості під час позиціонування (збільшуються коливання шляху до моменту позиціонування).

У першому випадку доцільно розподіляти заготовки на групи за розмірами та твердістю і вводити корекцію на режими різання для кожної групи.

Можна вимірювати пружні переміщення та під налагоджувати верстат, але це пов'язано із труднощами регулювання руху на малих переміщеннях, хоча точність підвищується у 3 рази.

Більш ефективним способом корекції змінних зусиль є зміна подачі.

Оскільки сила різання  $P = C_v \cdot t^x \cdot s^y \cdot HB^z$ , а  $C_v = Const$  при постійних  $V_p$ , геометрії різця, ЗОР, то умовою регулювання буде  $P = Const$ , тобто  $t^x \cdot s^y \cdot HB^z = Const$ . Для забезпечення цієї умови при коливаннях  $t$  і  $HB$  залишається тільки керувати  $s$ .

В деяких системах вимірюють коливання пружною переміщення, які потрібно підтримувати постійними за рахунок зміни подачі, що рівноцінно підтриманню розмірного налагодження.

Для різних верстатів цей метод корекції зменшує поле розсіювання у 3...9 разів. Даний метод має резерв підвищення точності за рахунок компенсації систематичних похибок, пов'язаних із змінною жорсткістю технологічної системи.

*Наприклад.* Відомо, що при обточуванні або шліфуванні довгих циліндричних деталей вони вигинаються під час обробки, що дає

відхилення від прямолінійності. Вимірювання переміщень з відповідною корекцією подачі компенсує коливання пружних переміщень.

Так при обробці з постійною подачею вала  $\varnothing 23$   $L = 400$ , коливання діаметра по довжині склало 0,34 мм. При змінній подачі – 0,085 мм.

**Лекція 9 Технологічні способи підвищення точності обробки. Точність попередньої обробки. Швидкісне різання. Похибки базування пристосувань-супутників. Сучасні види термообробки. Автоматичне керування точністю обробки**

Зміни методів та режимів обробки, кількості проходів, базування заготовок, розташування інструмента та інші технологічні прийоми суттєво впливають на точність обробки. Це повинно враховуватись під час конструювання верстатів та розробці технологічних процесів.

До технологічних способів відносять:

- ✓ Підвищення точності попередньої обробки на операціях, які впливають на кінцеву точність деталі.
- ✓ Швидкісне різання, яке не тільки підвищує продуктивність, а за рахунок відводу більшої частини тепла у стружку, знижує теплові деформації, що підвищує точність.

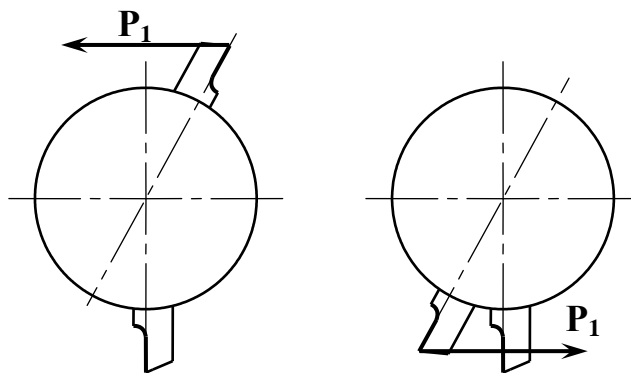
Із розвитком ГВС широкого застосування набули пристосування-супутники, похибки базування яких суттєво впливають на точність.

Дослідженнями встановлено вплив крім контактних деформацій неодноразності прикладання сил закріплення, а також нерівності рельєфу контактуючих поверхонь супутника та верстата.

При застосуванні пристосувань-супутників необхідно:

- максимально синхронізувати дію сил закріплення;
- контакт з пристосуваннями для фіксації чи столом повинен відбуватись по елементам, наближеним до точкових з мінімальною кількістю точок.

Відомий метод підвищення точності обробки на розточувальних верстатах, коли обробка ведеться двома різцями у одній борштанзі.



Для зменшення довжини борштанги різці розташовують один перед іншим із зміщенням на 1...2 мм вздовж осі. Зміщення за кутом різців таке, щоб сумарне зусилля різання  $P_1$ , що діє на чорновий різець, розташовувалось перпендикулярно до радіуса, що проведений через вершину чистового різця.

Кут між чорновим і чистовим різцями складає 155...135°C, або відповідно 22...40°C.

Сучасні види термообробки (хіміко-термічна, термомеханічна) покращують структурний стан матеріалу деталі.

Найбільш перспективний метод – обробка променем лазера. Він забезпечує локальне зміцнення поверхні деталі з підвищенням на 20% твердості порівняно з іншими видами термообробки.

Локальне зміцнення створює можливість утворення плямистого поверхневого зміцнення, при якому не утворюється суцільний крихкий шар.

Важлива властивість - незмінність геометрії обробленої поверхні, що позбавляє від подальшої механічної обробки.

До технологічних методів керування точністю відносять використання програм на верстатах з ЧПК, які враховують систематичні похибки від пружних деформацій, похибки позиціонування.

### **Автоматичне керування точністю обробки**

На основі розглянутих способів корекції впливу джерел похибок можливе створення системи автоматичного керування точністю обробки (САКТО).

Звичайний показник точності розміру або форми – це відхилення. У САКТО зручно використовувати середній квадрат відхилень  $\sigma^2$ , тобто дисперсію. Це пояснюється тим, що вірогідність знаходження дійсних розмірів деталей всередині поля допустимих відхилень пов'язана при стійкому законі розподілу з дисперсією та математичним законом очікування. Тому основна мета керування точністю обробки у більшості випадків полягає у зменшенні дисперсії.

САКТО з дискретним керуванням настроювання застосовують для забезпечення точності розмірів деталі. Від таких систем не потребують швидкодії. Керуючий імпульс виробляється на основі інформації, що отримується до початку циклу корекції. Інформацією можуть бути дані про розміри оброблених деталей, припуску, твердість заготовки, стан технологічної системи. Перетворені у відповідності з алгоритмом системи керування дані вводяться в якості керуючого імпульсу у пристрій настроювання верстата, змінюючи відносно положення інструмента і заготовки. До таких САКТО належать автопіднастроювальні пристрої. САКТО з безперервним керуванням застосовують для режимів різання або положення інструмента, стабілізації факторів впливу на точність.

Оскільки всі збурення у динамічній системі верстата призводять до її коливань, внаслідок чого з'являються різного роду відхиленням, важливим способом підвищення точності є зниження рівня коливань, підвищення запасу стійкості динамічної системи верстата.

Дослідження показали ефективність автоматичного керування рівнем коливань. У таких динамічних системах верстатів теоретично можна забезпечити нескінченно великий запас стійкості.

У реальних системах запас стійкості підвищують у 10...15 разів (тобто у стільки ж разів можливе зниження рівня вимушених коливань у верстатах).

Ефективне керування рівнем коливань забезпечується, коли прикладені до вузла впливи керування мають набагато меншу частоту ніж частота власних коливань вузла. Особливістю таких систем автоматичного керування є мінімальна інформація про властивості динамічної системи.

Безперервне керування положенням інструменту при достатній швидкодії САКТО в принципі може вирішити усі задачі керування точністю обробки, включаючи керування розмірами та формою деталі.

У верстатах з ЧПК та гнучких автоматизованих верстатних системах з використанням мікропроцесорів можливе здійснення програмної реалізації необхідних корекційних та компенсаційних впливів на усі органи, що приймають участь у формоутворенні, з метою підвищення точності обробки.

**Лекція 10 Точність – головний показник якості верстата.****Зв'язок точності та продуктивності. Вплив оборотних та необоротних процесів на початкові параметри верстатів**

Працездатність верстата визначає такий стан об'єкта, коли значення усіх параметрів, що забезпечують виконання заданих функцій, відповідають вимогам та показникам нормативно-технічної документації.

Виділяють показники призначення, надійності, технологічності, уніфікації, ергономічні, естетичні та ін.

Особливе значення мають показники функціонального призначення та надійності, оскільки безпосередньо визначають працездатність.

Для металорізальних верстатів для оцінки їх якості основні показники пов'язують з точністю обробки та якістю отриманих поверхонь.

Точність верстата безпосередньо пов'язана і з продуктивністю. Чим вищий запас на точність, тим більш високі рівні обробки можна застосовувати на верстаті, тим вищий рівень продуктивності.

У реальних умовах експлуатації більш високі значення одного з таких показників можуть бути отримані за рахунок зниження іншого.

*Наприклад:* точну обробку можна отримати на чистових режимах за декілька проходів з більшими витратами часу, ніж за менших вимогах до точності, тобто збільшення продуктивності за рахунок зменшення точності.

Два основних показники (точність та продуктивність) взаємозв'язані: якщо можна допустити зниження продуктивності, то зниження точності за рахунок продуктивності не можна.

Але показники точності – це основні показники, що визначають можливості та область застосування верстата, рівень його якості.

При створенні нових верстатів, особливо багатоопераційних, одночасно ставиться задача підвищення точності та продуктивності, оскільки на них здійснюються як чорнові, так і фінішні операції. Тобто має місце широкий діапазон навантажень при високих вимогах до точності.

У сучасних багатоопераційних верстатах вимоги точності повинні враховуватись під час призначення високопродуктивних режимів різання для попередньої обробки.

Часто на практиці режими обробки, що визначають продуктивність верстата, призначають, виходячи із стійкості та міцності інструменту та потужності приводу, не враховуючи точність. Це призводить до збільшення працездатності фінішних операцій через коливання припуску.

Висока продуктивність на чорнових операціях без урахування точності обробки призводить до зниження загальної продуктивності виготовлення виробів заданої якості.

Для оцінки якості верстата основні випробування пов'язують з оцінкою його точності та продуктивності.

Оцінюють геометричну точність, жорсткість, вібростійкість, теплові деформації, зносостійкість.

Виконують також випробування для визначення таких показників якості верстата як рівень шуму під час роботи на різних режимах, ККД приводів, інтенсивність випромінення тепла різними внутрішніми джерелами.

Для побудови системи випробувань верстата, виборі видів випробувань та розробці відповідних методик необхідно враховувати, що верстат повинен мати не тільки високі початкові показники якості, а і зберігати їх впродовж усього періоду експлуатації.

Під час експлуатації на верстат діє багато зовнішніх та внутрішніх впливів. Усі види енергії, у першу чергу механічна та теплова, діють на верстат, його механізми, створюючи умови для погіршення його технічних характеристик.

Частина процесів, що відбуваються у верстаті та впливають на його технічну характеристику, – оборотні. Вони змінюють параметри системи у визначених межах без тенденції прогресивного погіршення.

*Наприклад:* деформація вузлів та деталей від дії зовнішніх та внутрішніх сил та теплових полів.

Необоротні процеси призводять до поступового погіршення з часом технічних характеристик верстата.

*Наприклад:* знос, корозія.

Всі процеси впливають на характеристики верстата, викликають похибку у його функціональності та знижують якість заданого технологічного процесу.

На показники якості верстата впливає швидкість процесів, які діють на вузли та деталі.

За швидкістю проходження усі процеси можна розділити на три категорії:

1. **Швидкоплинні процеси.** Періодичність вимірюється звичайно долями секунди. Ці процеси закінчуються у межах циклу роботи верстата і знову виникають під час обробки наступної деталі. До них відносять вібрації, зміни сил тертя у рухомих з'єднаннях, коливання робочих навантажень та ін., що впливають на взаємне розташування інструмента та заготовки і знижують точність обробки.
2. **Процеси середньої швидкості.** Протікають за час безперервної роботи верстата і їх тривалість вимірюється у хвилинах та годинах. Вони призводять до зміни початкових параметрів верстата. До цієї категорії відносять як оборотні процеси (зміна температурних полів верстата, температура навколишнього середовища) так і необоротні (знос різального інструмента), але такі, що протікають у багато разів інтенсивніше, ніж знос деталей.



3. **Повільні процеси.** Протікають впродовж всього періоду експлуатації верстата та проявляються за час між його періодичними ремонтами. До них відносять знос основних механізмів верстата, перерозподіл внутрішніх напружень в деталях, повзучість металу, забруднення поверхонь тертя, корозія, сезонні зміни температури. Ці процеси впливають на точність, а також ККД та інші характеристики верстата.

### Вплив різних процесів на початкові параметри верстата



Ці взаємодії досить складні і мають зворотні зв'язки.

*Наприклад:* теплові деформації окремих ланок верстата не тільки змінюють взаємне положення вузлів і цим впливають на точність, але і підвищують навантаження, від чого збільшується тепловиділення у механізмах.

Розвиток методів випробування верстатів відбувається у відповідності з наведеною схемою.

Поступово із ускладненням конструкцій та підвищенням вимог до характеристик верстата з'являються нові види випробувань, які більш

повно охоплюють фактори та процеси, що впливають на працездатність верстата.

У першу чергу виникли випробування верстатів, пов'язані з оцінкою його геометричної точності.

Норми геометричної точності та відповідно система перевірок верстатів існує з 1927 р. і пов'язана з ім'ям проф. Г.Шлезінгера.

Методи перевірки верстатів на жорсткість запропонував у 30-х роках інженер К.В.Ватінов. Він показав, що жорсткість є одна з основних характеристик верстата і визначає його можливості по забезпеченню точності обробки.

Пізніше почали розвиватися методи досліджень та випробувань верстатів, що дозволяли оцінити різні процеси у верстатах. Це випробування на вібростійкість, по визначенню теплових деформацій та температурних полів верстата.

Розробляються методи оцінки якості верстата із врахуванням повільно протікаючих процесів (зносу).

Починають проводити комплексні випробування верстатів, що дозволяє врахувати одночасно вплив різних факторів.

## РОЗДІЛ 4 ОСНОВНІ ВИДИ ВИПРОБУВАНЬ ВЕРСТАТІВ

**Лекція 11, 12 Випробування верстатів на геометричну та кінематичну точність. Розподіл випробувань за характером перевірок на шість груп. Оцінка похибок поступного та обертального рухів. Стандартизовані та новітні способи вимірювання параметрів точності верстатного обладнання.**

Такі випробування передбачають оцінку точності роботи окремих механізмів та точність виготовлення елементів верстата.

Перелік перевірок точності та відповідні нормативи, а також метрологічне забезпечення та методики обробки результатів наведені у стандартах. Вони відображають специфіку верстата та технологічні методи обробки на ньому.

За характером перевірки поділяють на **6 груп**:

1. **Точність руху:** радіальне та осьове биття шпинделя, торцеве та осьове биття планшайби (стола); прямолінійність переміщення супорта (стола); постійність кутового положення робочої поверхні стола під час переміщень; точність дискретних переміщень.
2. **Точність взаємного положення та руху:** паралельність руху супорта осі шпинделя, перпендикулярність осі шпинделя до поверхні стола; співвісність або паралельність двох шпинделів; взаємна перпендикулярність поздовжнього та поперечного переміщення стола.
3. **Точність позиціонування (встановлення):** точність переміщень стола (супорта) у задане положення; точність фіксації кутового положення під час обертання револьверної головки (шпиндельного блоку); точність ручного встановлення лінійних (кутових) положень робочого органу за вимірювальними шкалами.
4. **Кінематична точність:** точність передаточного відношення кінематичного ланцюга шпиндель-ходовий гвинт (токарно-гвинторізні верстати); точність взаємного руху поздовжнього та поперечного переміщення хрестового стола (фасонна обробка); точність взаємного переміщення (обертання) шпинделя та стола (зуборізні верстати).
5. **Точність поверхонь,** що визначають положення заготовки та інструмента: площинність робочої поверхні стола, точність Т-подібних пазів стола та їх паралельність; точність положення конічного отвору шпинделя; торцеве та радіальне биття базових поверхонь шпинделя (фланцевий кінець).
6. **Точність напрямних поверхонь:** площинність напрямних ковзання, вивернутість напрямних.

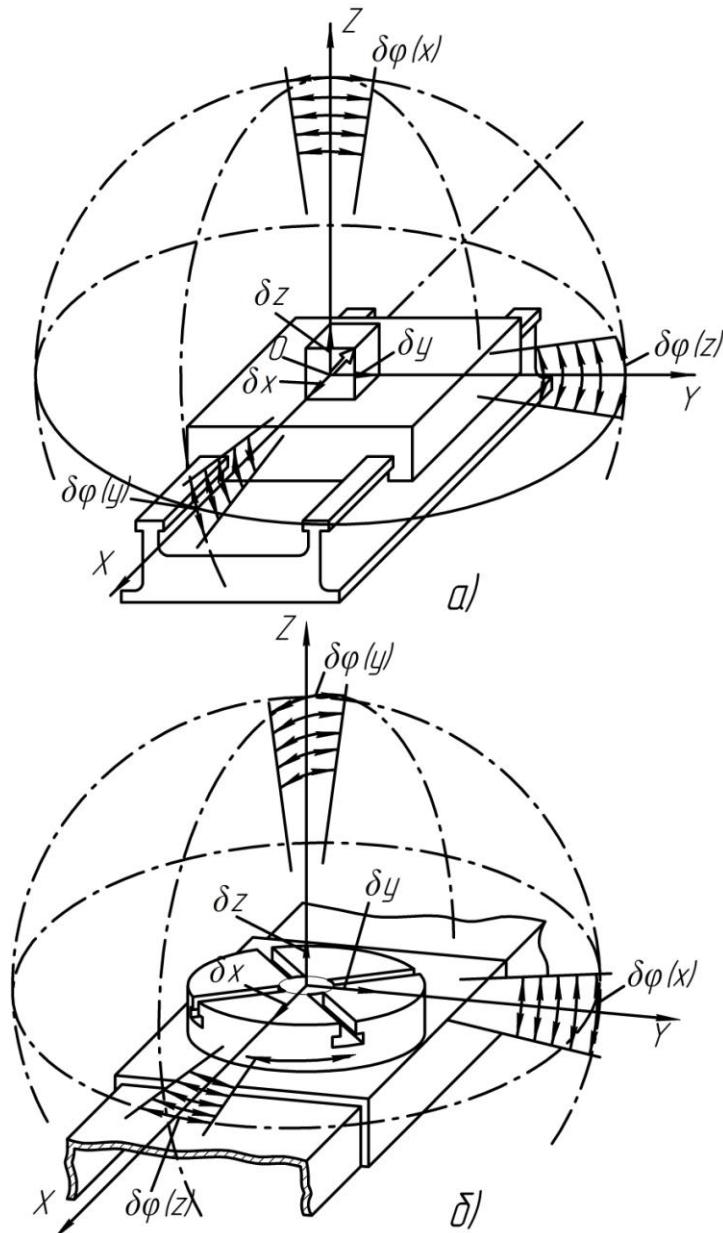
Наведенні перевірки найбільш типові, але не вичерпують усіх видів вимірювань, які наведенні у стандартах.

Перші 4-ри групи перевірок безпосередньо пов'язані з вихідними параметрами верстата, тобто з характеристиками траєкторій переміщення формоутворюючих вузлів.

Перевірки 5-ої групи оцінюють точність поверхонь базування інструмента та заготовки, тобто характеризують точність з'єднань компонентів технологічної системи.

Перевірки 6-ої групи оцінюють точність напрямних. Вони не визначають безпосередньо точність верстата, оскільки вимірюють характеристики його елемента, а не вихідні параметри. Але вони необхідні, оскільки від точності геометричних форм напрямних залежить точність формоутворюючих рухів вузлів.

Оскільки положення твердого тіла у просторі визначається 6-ма степенями рухомості, необхідно у загальному вигляді визначити 6 похибок, що характеризують відхилення руху від ідеального.



### Оцінка похибок руху формоутворювальних вузлів:

При поступальному переміщенні вузла (стіл, супорт, повзун) уздовж осі  $X$ :

1) виникають похибки лінійного положення опорної точки  $O$  вузла, які визначають похибку позиціонування  $\delta x$  в напрямку руху та похибки  $\delta y$  та  $\delta z$ , що характеризують відхилення від прямолінійності у двох взаємно перпендикулярних напрямках (по осям  $Y$  та  $Z$ );

2) виникають кутові відхилення у русі вузла відносно відповідних осей.

Кутова похибка  $\delta\varphi(x)$  відносно осі  $X$  пов'язана із "вивернутістю" напрямних або з похибками тіл кочення.

Коливання відносно поперечної осі  $\delta\varphi(y)$  та вертикальної осі  $\delta\varphi(z)$  також пов'язані з похибками форми та положення напрямних, а під час руху під навантаженням пов'язані з жорсткістю системи.

### Оцінка похибок обертального руху вузлів:

Під час обертального руху має місце аналогічна схема: виникають кутові похибки  $\delta\varphi(z)$ , що пов'язані з точністю позиціонування, та кутові похибки  $\delta\varphi(x)$  і  $\delta\varphi(y)$ , що визначають перекид при переміщенні відносно осі  $X$  та  $Y$ .

Лінійні похибки, віднесені до центру планшайби, – це осьове ( $\delta z$ ) та радіальне ( $\delta x$  та  $\delta y$ ) биття.

Для верстатів класу  $N$  вимірюють не всі похибки, а тільки ті, які найбільше впливають на точність обробки (точність позиціонування, радіальне та осьове биття шпинделя). Чим вище вимоги до точності верстата (чим вище клас точності), тим більшу кількість параметрів вимірюють.

Для визначення геометричної та кінематичної точності верстата застосовують різноманітні метрологічні засоби та оснащення.

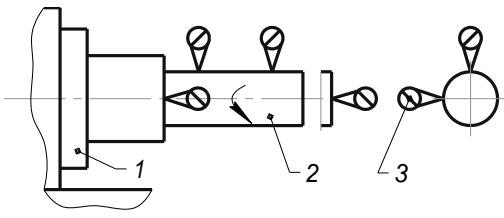
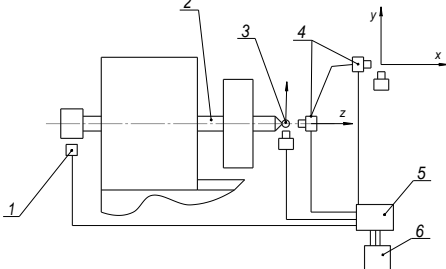
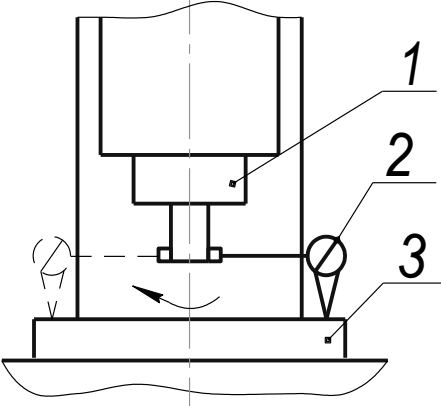
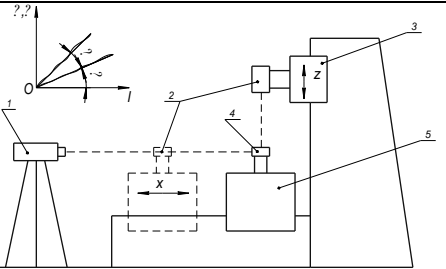
Якщо використовується метод, що дозволяє оцінити вихідні параметри верстата як за відсутності навантажень, так і на робочих режимах під час обробки, то отримані результати дають повну характеристику верстата.

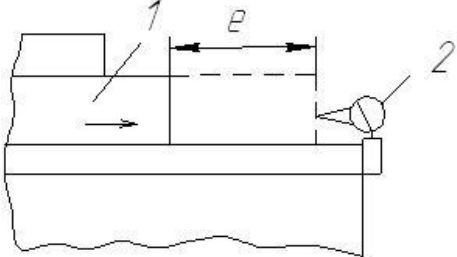
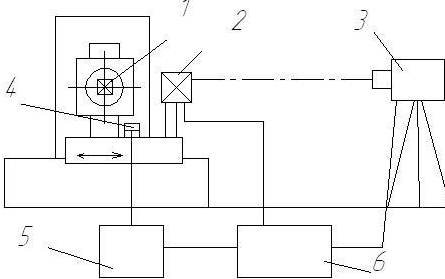
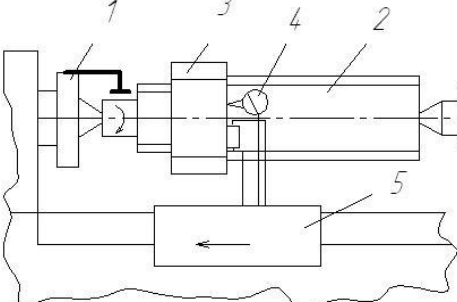
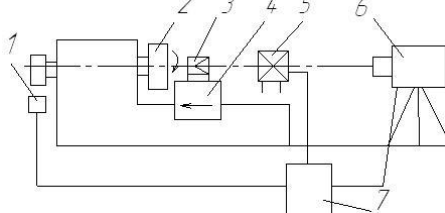
Такі результати отримують за допомогою безконтактних вимірювальних приладів. У стандартних перевірках використовують контактні методи.

Контактні методи потребують в багатьох випадках застосування спеціальних контактних оправок та точного оснащення (інструментальні кутники, лінійки, еталонні ходові гвинти та ін.).

Контактними методами вимірюють граничні відхилення. Стандартні перевірки дозволяють оцінити лише знаходження даного параметра в межах допуску.

## Схеми вимірювання точності верстату

Група перевірок	Методи вимірювань	
	контактні	безконтактні
Точність руху	 <p>1 – шпиндель 2 – оправка 3 – індикатори (датчики) лінійних переміщень. Вимірювання радіального биття шпинделя</p>	 <p>1 – датчик кута обертання шпинделя 2 – шпиндель 3 – еталонна кулька 4 – безконтактні вимірювальні перетворювачі переміщень 5 – блок оброблення даних 6 – дисплей Вимірювання радіального та осевого биття шпинделя та траєкторії переміщення осі шпинделя</p>
Точність взаємного положення	 <p>1 - шпиндель 2 - індикатор 3 - стіл Вимірювання відхилення від перпендикулярності осі шпинделя відносно поверхні столу</p>	 <p>1 – лазер 2 – чотириквартний фотодіод 3 – шпиндельна бабка 4 – пентапризма 5 – стіл <math>l</math> – переміщення <math>\alpha</math> – відхилення від терпендику лярності <math>\beta</math> – похибка встановлення Вимірювання відхилень від перпендикулярності двох рухів (стола та шпиндельної бабки) з використанням лазера</p>

Точність позиціонування	 <p>1 – стіл, 2 – індикатор Вимірювання точності позиціонування стола</p>	 <p>1 – відбивач на шпинделі 2 – інтерферометр 3 – лазер 4 – датчик температури та тиску повітря 5 – блок компенсаторів 6 – блок обробки даних Вимірювання точності позиціонування стола з використанням лазерного інтерферометра</p>
Кінематична точність	 <p>1 – шпиндель 2 – еталонний ходовий гвинт 3 – гайка 4 – індикатор 5 – супорт Вимірювання точності передаточного відношення "шпиндель-супорт" за допомогою еталонного ходового гвинта.</p>	 <p>1 – датчик кута повороту 2 – шпиндель 3 – відбивач 4 – супорт 5 – інтерферометр 6 – лазер 7 – блок обробки даних Вимірювання точності передаточного відношення "шпиндель-супорт" за допомогою лазерного інтерферометра.</p>

Безконтактні методи вимірювань забезпечують широкі можливості оцінки вихідних параметрів верстата. Вони дозволяють автоматизувати процес вимірювань та отримати масив даних, фіксувати результати графічно, переробляти інформацію з оцінкою широкої номенклатури показників точності верстата.

Числові значення допустимих відхилень для різних перевірок залежать від типу, розміру та класу точності верстату.

В середньому числові значення відхилень для верстатів середніх розмірів нормальної точності знаходяться в межах 10...30 мкм.

Для верстатів класів А і С ці відхилення від кількох мкм до десятих часток мкм та вище.

Для надпрецизійних верстатів досягнута точність обробки, яка вимірюється тисячними долями мкм (нано-технології).

Характеристики геометричної та кінематичної точності, що відносяться до положення та руху формоутворюючих вузлів верстату, є результатом сумування похибок окремих елементів верстата, які утворюють розмірний ланцюг від інструмента до заготовки.

Теорія розмірних ланцюгів проф. Б.С. Балакшина та розвинуті на її базі методи розрахунків загальної точності верстатів дозволяють оцінити внесок елементарних похибок верстатів у формуванні вихідних параметрів точності.

Геометрична та кінематична точність верстата, це необхідний, але недостатній критерій працездатності.

Необхідно визначити сили, що діють на верстат та його вузли, і оцінити ті деформації та зміщення, які вони викликають.



### Лекція 13 Аналіз діючих у верстаті сил та моментів

Сили та моменти, що діють у верстаті поділяють на групи:

1. **Рушійні сили та моменти**, які створюються двигунами (електричними, гідравлічними та ін.). Ці сили та моменти прикладені до ведучих ланок приводів верстата.

2. **Сили та моменти корисного опору** (сили різання та інші сили та моменти пов'язані з робочим процесом). Ці сили прикладені в зоні різання до інструмента та заготовки, а через них до ведених ланок приводів верстата (шпиндель, супорт, стіл та ін.).

3. **Сили та моменти шкідливих опорів** (сили тертя, опір середовища та ін.). Вони прикладені у місцях контакту ланок верстата та направлені проти рушійних сил. Сили та моменти опорів врівноважуються у статиці рушійними силами та моментами. Сили опору найбільше впливають на тепловий режим роботи верстата.

4. **Сили ваги** діють на усі деталі верстата. Їх визначають за другим законом Ньютона:

$$\mathbf{G} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g},$$

$\mathbf{m}$  – маса деталі,

$\mathbf{g}$  – прискорення вільного падіння.

5. **Сили пружності** при деформаціях ланок верстата. Вони виникають від дії будь-яких сил, що діють на ланки верстата. Це своєрідна реакція на діючі сили. Після зникнення навантажень сили пружності відновлюють (у межах пружних властивостей) початкові розміри та формулу ланок верстата, тому вони носять назву позиційних або відновлювальних.

6. **Сили взаємодії** між ланками верстата чи механізму. У відповідності третім законом Ньютона у кінематичних парах виникають нормальні складові сили, однакові за величиною та протилежні за напрямком, і тангенційні складові – сили тертя. Перші роботу не виконують. У других (сил тертя) робота трансформується у тепло.

7. **Динамічні сили**: сили інерції  $\mathbf{F}_m = \mathbf{m}\ddot{\mathbf{y}}$ , моменти інерційних сил  $\mathbf{I}_n = \mathbf{I}\epsilon$ . Роль цих сил зростає із зростанням прискорень.

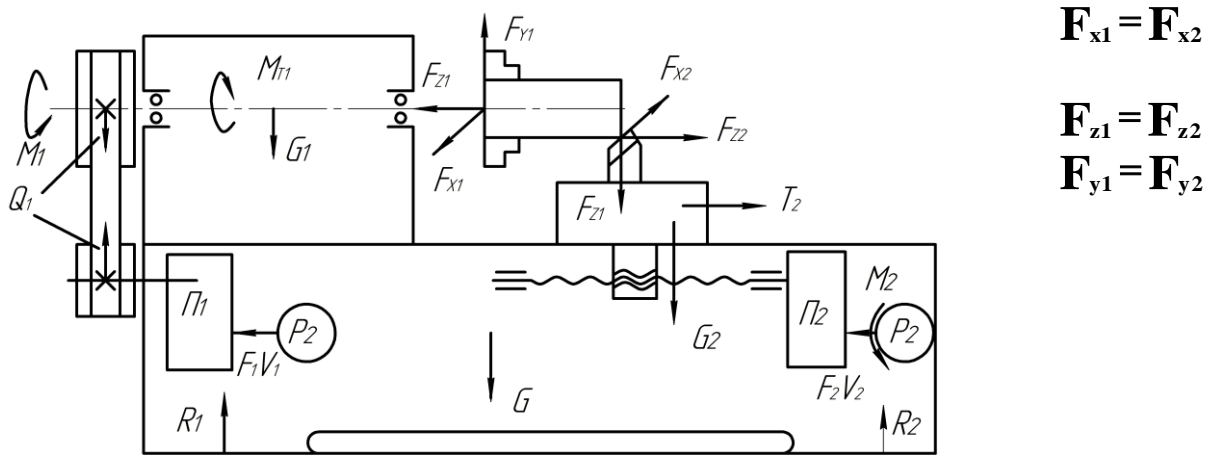
Сили та моменти груп 1, 2 та 4 відносять до зовнішніх. Вони прикладені до верстата та його механізмів ззовні, відомі або можуть бути визначені.

Сили та моменти груп 3, 5 та 6 називають внутрішніми. Вони являють собою реакції на дію зовнішніх сил і невідомі наперед.

Таку класифікацію не можна розглядати як вичерпну.

Важливу роль у верстатах грають сили, які викликають теплові деформації, похибки виготовлення окремих деталей верстата, невірноваженість валів, що обертаються.

## Схема розташування сил на верстаті



Зовнішні сили та моменти, що діють на верстат, зручно розглядати окремо для основних вузлів верстата.

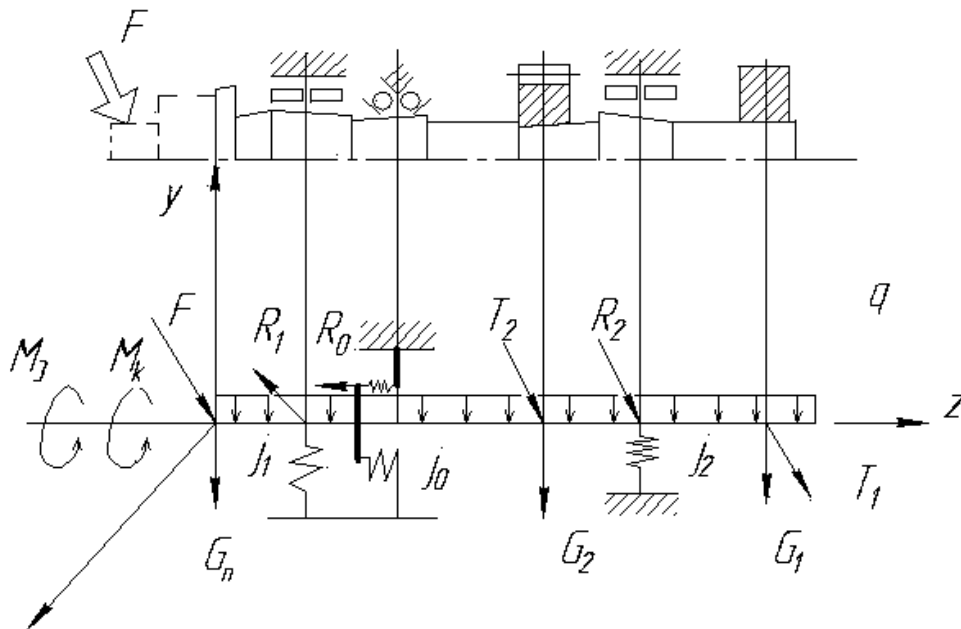


Схема сил на шпинделі

Шпиндель знаходиться під дією просторового навантаження:

$\mathbf{F}$  – сила різання;

$\mathbf{G}_{ш}$  – сила тяжіння шпинделя враховується як розподілена по довжині  $\mathbf{g}$ ;

$\mathbf{G}_n, \mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$  – сили тяжіння елементів на шпинделі;

$\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2$  – сили у передачах ведучої та веденої ланки;

$\mathbf{j}$  – жорсткість підшипників;

$\mathbf{R}$  – реакції у підшипниках.

Ці сили викликають згин, кручення, розтягання-стискання, зсув шпинделя та контактне деформування у опорах. Крім цього у

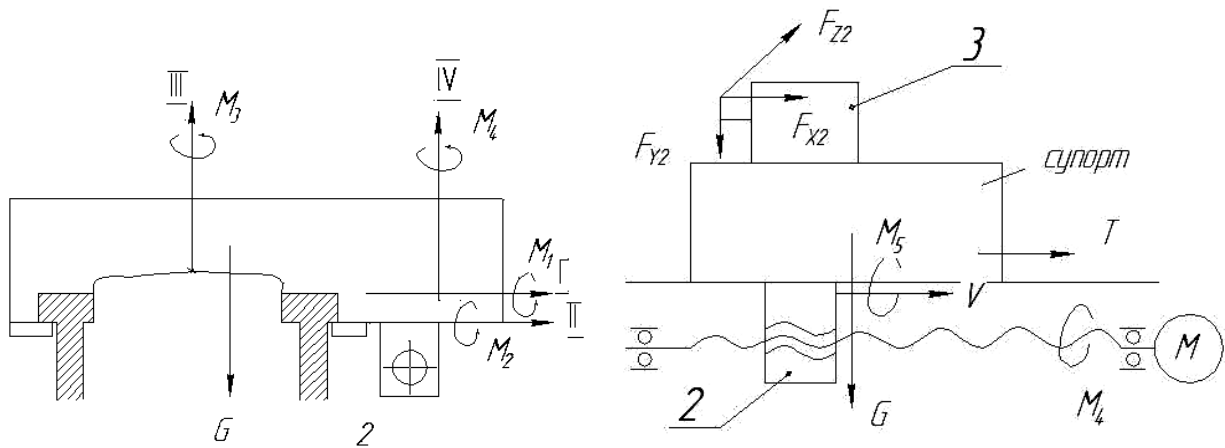
підшипниках, зубчастих та пасових передачах, механізмах затискання виникають сили тертя, які можливо визначити.

Силове навантаження шпинделя розглядається окремо у двох взаємно перпендикулярних площинах.

Зміщення сил різання відносно осі заготовки створює додаткові моменти згину  $M_3$  та крутний  $M_4$ .

**Сила та моменти шкідливих опорів** грають важливу роль у механізмах, що визначають точність та працездатність верстатів. Це приводи переміщення столів, супортів, повзунів, кулачкові механізми та ін. Слід враховувати асиметрію діючих сил, що викликає навантаження робочих поверхонь додатковими моментами та силами.

### Схема силового навантаження супорта



$M_1 - M_5$  відносно осей I - V через асиметрію рухомої сили  $Q$ , сил ваги  $G$  та сил різання  $F$ .

Сумарна сила тертя  $T$  в напрямних визначається через суму реакцій усіх граней та зведений коефіцієнт тертя:

$$T = f_3 \sum R_i; \quad \sum R_i = \sum g_i S_i; \quad f_3 = f \lambda;$$

де  $T$  – сила тертя зведений;

$f_3$  – коефіцієнт тертя;

$\sum R_i$  – сумарна реакція усіх граней;

$S_i$  – номінальна поверхня контакту;

$q_i$  – тиск на цій поверхні;

$f$  – коефіцієнт тертя;

$\lambda$  – коефіцієнт зведення;

В загальному вигляді  $\lambda = \sum |\mathbf{R}_i| / \sum \mathbf{R}_i$ , тобто відношення абсолютної суми реактивних сил, перпендикулярних до поверхні тертя, до алгебраїчної суми тих самих сил.

**Динамічні сили в умовах вимушених коливань**

$$\mathbf{F}_{\ddot{A}} = \mathbf{F}_{\text{нб}} \mu,$$

де  $\mathbf{F}_{\text{нб}}$  – амплітудне значення зовнішньої статичної сили,  
 $\mu$  – динамічний коефіцієнт.

Для одномасової системи

$$\mu = \left[ \sqrt{(1 - \omega^2 / \nu^2)^2 + 4b^2 \omega^2 / \nu^4} \right]^{-1},$$

де  $\omega$  – частота дії збурення;

$\nu$  – власна частота;

$b$  – коефіцієнт опору.

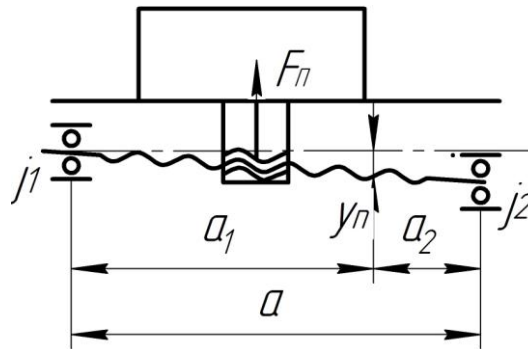
Відцентрові сили впливають на вали, що обертаються, і навантажують їх опори додатковою динамічною силою.

Сили, що створюються пасивними зв'язками, характерні для конструкцій, які одночасно зафіксовані по трьом та більше напрямним (вали, повзуни з трьома і більше опорами, механізми з жорстким замиканням):

$$\mathbf{F}_n = \mathbf{j}_n \mathbf{y}_i$$

де  $\mathbf{y}_n$  – зміщення, що пов'язане з похибками виготовлення;

$\mathbf{j}_n$  – жорсткість системи



Якщо вісь ходового гвинта не паралельна напрямним, то на довжині  $a_1$  сумарне зміщення складе  $y_i$  у відповідності з допуском на паралельність.

У гвинтовій парі виникає додаткова радіальна сила:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{y}_i \left[ \frac{\mathbf{a}_2^2}{\mathbf{j}_1 \mathbf{a}^2} + \frac{\mathbf{a}_1^2}{\mathbf{j}_2 \mathbf{a}^2} + \frac{\mathbf{a}_1^2 \mathbf{a}_2^2}{3\mathbf{E} \mathbf{I} \mathbf{a}} \right]^{-1}$$

## **Лекція 14** Вимірювання жорсткості та силових зміщень у верстатах. Статичний, динамічний та виробничий методи вимірювання жорсткості

Під жорсткістю верстатів розуміють їх здатність чинити опір пружним деформаціям від силового навантаження.

Жорсткість – це відношення сили до пружного зміщення:

$$j = \frac{F}{y}$$

Величина, зворотна жорсткості – податливість:

$$\omega = \frac{1}{j} = \frac{y}{F}$$

За ГОСТ 7035-15 жорсткість верстата визначається як похідна проекції навантажувальних сил по переміщенню вузлів у одному напрямку.

Жорсткість верстата розглядається як векторна величина. У кожній точці системи вона має чисельне значення тільки у визначеному напрямку.

Жорсткість має вирішальний вплив на основні вихідні показники верстатів – точність та продуктивність, а також якість обробленої поверхні, вібробійність, стійкість інструменту, довговічність конструкцій.

Жорсткість розглядають і як критерій якості, і як критерій розрахунків розмірів несучої системи верстатів. У верстатобудуванні її роль більш значна, ніж міцності.

Вплив жорсткості верстата на точність обробки проявляється у процесі змін діючих сил та змін самої жорсткості. Експериментально встановлено, що жорсткість верстатів однієї моделі змінюється, розподіл значень підкорюється закону нормального розподілу.

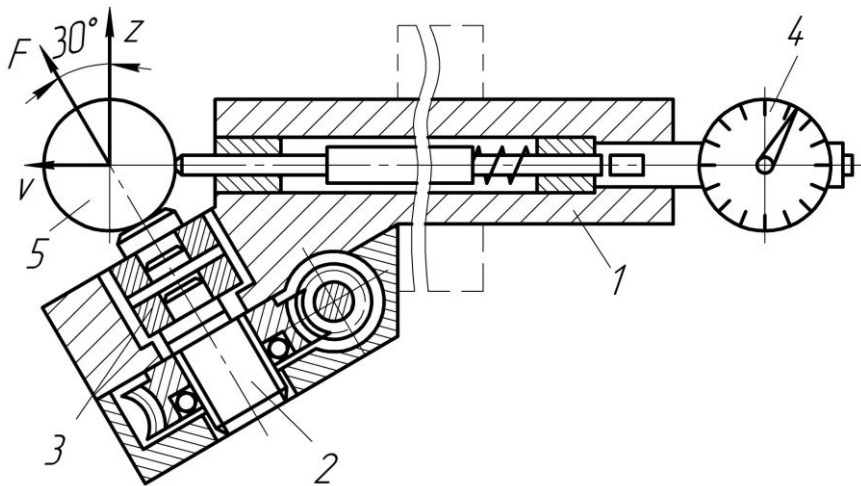
Випадковою величиною вважається радіальна жорсткість шпиндельного вузла у функції кута повороту (навіть у серійних верстатах вона коливається в межах 25...30%).

**Способи та засоби вимірювання жорсткості** верстатів зводяться до вимірювань діючої сили та відповідного пружного зміщення в умовах, максимально наближених до умов експлуатації.

Силове навантаження верстата та реєстрація сили забезпечується динамометрами.

Зміщення вимірюють індикаторами, міліметрами або за допомогою вимірювальних перетворювачів, як забезпечують точність та швидкість вимірювань.

Розрізняють статичний, динамічний та виробничий методи вимірювання жорсткості.



Спеціальний динамометр для токарних верстатів

Корпус 1 закріплюють у різцетримачі. Під час обертання черв'яка переміщується в осьовому напрямку гвинт 2, який через П-подібну пружину 3 навантажує оправку 5 під кутом  $30^\circ$ .

Сила  $F$  імітує сумарну силу різання.

Відносне зміщення оправки та різцетримача вимірюють індикатором 4.

Динамічний метод вимірювання жорсткості застосовують для частотного аналізу динамічної системи верстата.

Модуль амплітудно-фазо-частотної характеристики зображає собою динамічну податливість верстата для відповідної частоти збурення.

Верстат при цьому навантажується періодично змінюваною силою на різних частотах.

Виробничий метод вимірювання жорсткості зводиться до обробки за один прохід ділянок заготовки з різними припусками (точіння ступінчастого вала, фрезерування ступінчастої заготовки).

Зміна припуску викликає відповідну зміну сил різання та розміру деталі.

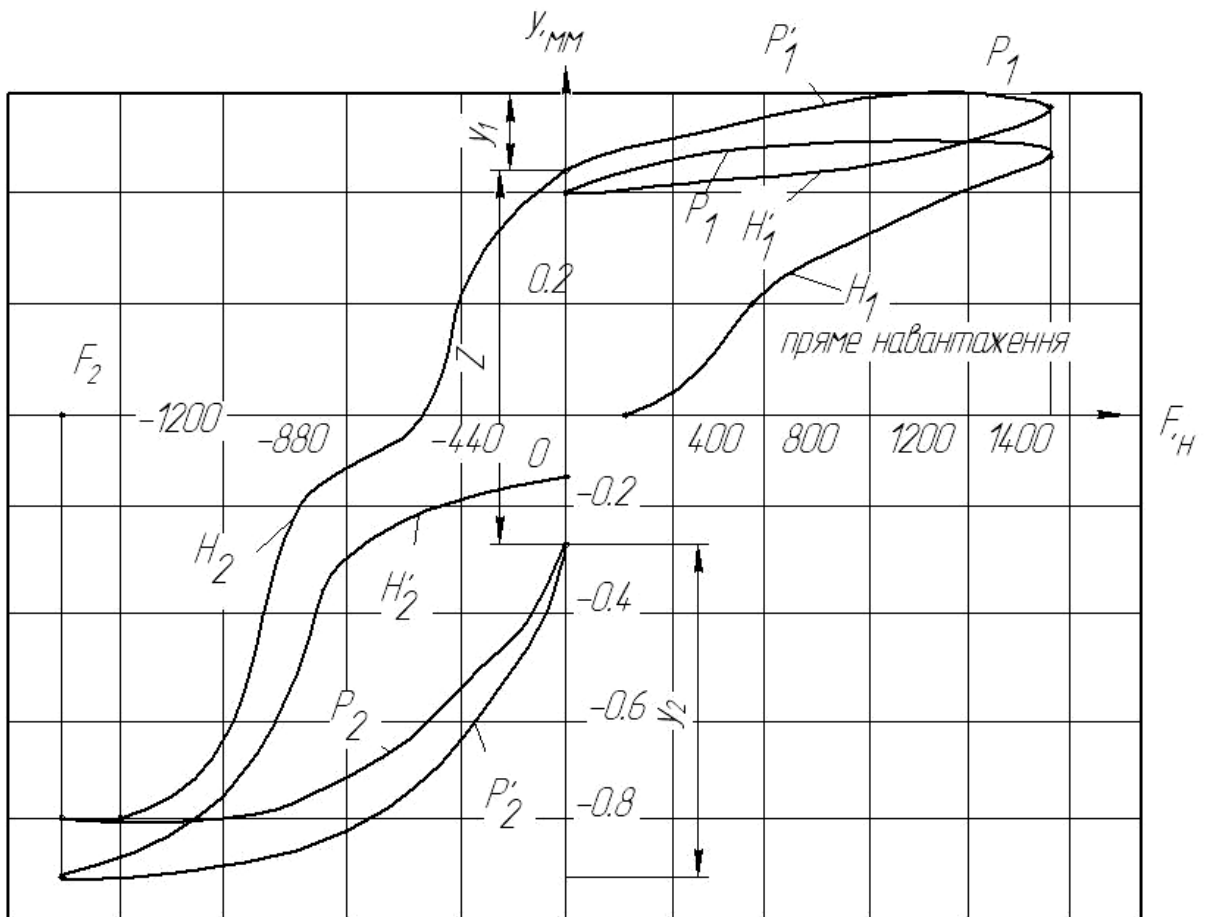
По зміні сил різання, що визначається розрахунком, та розмірів виступів, що лишились на обробленій деталі, визначають жорсткість верстата.

При статичному методі дослідження жорсткості верстат послідовно навантажують через рівні інтервали та реєструють відповідні зміщення.

Потім через ті ж інтервали верстат розвантажують. У координатах сила-зміщення будують графік, який зображає собою характеристику силових зміщень.

При необхідності верстат навантажують у двох протилежних напрямках (криві 1,2).

Рекомендують жорсткість визначати як середнє значення по розвантажувальним гілкам  $P_1$  та  $P_2$ , або після вторинного навантаження (по кривим  $P'_1, P'_2$ )



Характеристика силових зміщень

## РОЗДІЛ 5 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ ВЕРСТАТІВ

### **Лекція 15, 16 Стандартизовані методи випробувань верстатів, що застосовуються, та їх принципові недоліки. Поняття працездатності, вхідних та вихідних параметрів верстата**

Випробування дослідних зразків верстатів перетворились у глибокі експериментальні дослідження їх характеристик із застосуванням сучасних метрологічних засобів та реєструвальної апаратури.

Однак методика випробувань практично не змінилась з того часу, коли були розроблені методи випробування верстатів на геометричну точність.

Відбувалось лише послідовна поява нових видів випробувань, пов'язаних з оцінкою окремих факторів, які впливають на працездатність верстата.

Основні принципові недоліки методів випробувань верстатів, що застосовуються.

**1-й недолік.** Всі види випробувань проводять відокремлено, в той час як показники верстата різні при одночасній та послідовній дії ряду факторів.

Звичайно основна перевірка якості верстата – це оцінка геометричної чи кінематичної точності. Такі перевірки проводяться на непрацюючому верстаті. Потім проводять випробування, що доповнюють їх, оцінюючи вплив жорсткості, теплових деформацій, вібрацій.

Всі випробування проводяться роздільно, штучно виділяючи дію досліджуваного фактора.

Однак тільки аналіз одночасно діючих факторів дає вірний висновок про характеристики верстата.

Отримані показники верстата можуть суттєво відрізнятись при послідовному та одночасному врахуванні геометричної точності, жорсткості, теплових деформацій, вібрацій.

Різні результати дають випробування, проведені у статичному стані чи під час руху вузлів верстата, під час руху на холостому ході та під навантаженням.

**2-й недолік.** При випробуваннях та оцінці якості верстата відсутнє узаконене поняття про його вихідні параметри, що визначають працездатність.

Точність обробки деталей на верстаті не може розглядатись в якості такого параметра, оскільки вона є результатом дії усіх компонентів технологічної системи (інструмент, заготовка, тощо).

Потрібно виявляти параметри верстата, які безпосередньо відповідають за точність обробки та є вхідними для технологічної системи.



Так при випробуваннях на геометричну точність нема розподілу між оцінками параметрів верстата, які відносяться до показників якості всього верстата чи визначають точність виготовлення окремих його елементів.

Наприклад, перевірка прямолінійності напрямних, це важлива характеристика, але відноситься до точності самих напрямних, але не верстата в цілому.

Під час розробки стандартів та методик випробувань верстатів не постає питання про його вихідні параметри, тобто не виявляється головна мета випробувань. Замість цього на останніх етапах випробувань проводять перевірку верстата на точність за результатами обробки стандартного зразка, хоча отримані результати не можуть замінити даних про параметри, що характеризують якість верстата.

**3-й недолік.** При випробуваннях верстатів не враховується випадкова природа усіх явищ. Верстат працює на різних режимах під час обробки заготовок та в різних умовах експлуатації.

Статистичні характеристики технологічних процесів та зовнішніх впливів на верстат визначають і його реакцію на ці впливи, яка теж проявляється у випадковому вигляді.

Методи випробувань, що застосовуються, не враховують цього і оцінюють параметри лише для вибраних умов випробувань.

При цьому не визначаються випадкові характеристики параметра, не встановлюється різниця між фактичним і допустимим значенням, а лише констатується, що даний параметр знаходиться у межах допуску, чи ні.

Дійсна оцінка якості металорізальних верстатів, які працюють у широкому діапазоні режимів обробки та умов експлуатації, можлива лише у відносному трактуванні.

В існуючих методах випробувань верстатів цього нема.

Більш того, для оцінки показників верстата дослідний зразок звичайно приводиться у стан більш якісний, ніж серійний верстат при середніх умовах експлуатації, і тому інформація про його параметри може бути значно викривлена у сторону більш високих оцінок.

**4-й недолік.** При випробуваннях не застосовуються тестові методи діагностування, які дозволяють отримувати широку інформацію про стан верстата при різних спектрах навантажень.

Відсутні і навантажувальні пристрої для такої мети.

Поєднання випробувань з діагностуванням дозволить зробити їх більш результативними, коли не просто констатується придатність верстата до визначених умов роботи та вимог до його точності, а і визначаються характеристики, які потрібно змінити, ті вузли та механізми, які знищують показники його якості.

Діагностика перед експлуатацією на основі вивчення теплових полів верстата, віброакустичних сигналів, деформаційних полів дозволить розкрити механізми формування вихідних параметрів верстата, що

характеризують його якість, зробити випробування одним з основних етапів створення нових моделей верстатів.

**5-й недолік.** При випробуваннях не застосовують методи прогнозування для оцінки можливих змін параметрів верстата під час експлуатації.

Оцінка надійності верстата за параметрами точності можлива лише при поєднанні випробування з прогнозуванням.

Форсовані випробування не дають достовірних результатів по надійності, а ресурсні випробування на звичайних режимах практично неможливі через їх тривалість.

**6-й недолік.** При випробуваннях практично не використовуються можливості комп'ютерної техніки для керування процесом випробування та прогнозування можливих змін стану верстата.

Можна навести приклади застосування комп'ютера для обробки інформації за отриманими результатами випробувань, однак не чіпає методику випробувань, а лише прискорює процес отримання кінцевих результатів.

Застосування нових методик проведення випробувань можливо лише із застосуванням комп'ютерної техніки.

Необхідність її використання пов'язана із великим об'ємом обчислювальних робіт на різних етапах проведення випробувань:

а) для автоматизації випробувань, коли комп'ютер виконує керування процесом випробувань;

б) під час обробки великих масивів інформації, що отримується в результаті автоматизованого експерименту, особливо, якщо враховується вірогідна природа явищ;

в) для забезпечення прогнозування змін параметрів верстата на базі математичного моделювання та інформації, яку отримують в процесі випробувань.

Проведений аналіз показує, що сучасні методи випробувань металорізальних верстатів не можуть задовольнити зростаючі вимоги до оцінки їх якості та надійності.

Разом з тим підвищення ефективності випробувань та діагностування металорізальних верстатів, отримання повної інформації про стан машини, прогнозування надійності на стадії випробувань дослідного зразка, скорочення часу проведення випробувань є необхідною умовою подальшого розвитку верстатобудування.

Існує необхідність подальшого розвитку методів випробувань для оцінки якості та надійності металорізальних верстатів на базі досягнень науки та практики верстатобудування, сучасних метрологічних засобів та можливостей комп'ютерної техніки.

## РОЗДІЛ 6 ПРОГРАМНИЙ МЕТОД ВИПРОБУВАНЬ ВЕРСТАТІВ

### **Лекція 17 Принципи програмного методу випробувань. Основна мета. Поняття зони параметрів, області працездатності. Структура випробувально-діагностичного комплексу**

**Основна мета випробувань** – оцінити опірність верстата спектру зовнішніх сил, які відображають експлуатаційні навантаження, та виявити зону параметрів для регламентованих вихідних характеристик.

**Зона параметрів** – це зона, в якій із заданою вірогідністю знаходяться регламентовані вихідні характеристики верстата.

В загальному випадку це багатовимірний простір, оскільки для кожного верстата встановлюється ряд показників, які повинні знаходитись у межах, визначених нормативно-технічною документацією.

Для незалежних вихідних параметрів ця зона може бути представлена у вигляді набору окремих зон для кожної характеристики.

Це комплексна характеристика якості верстата, оскільки визначає його реакцію на зовнішні та внутрішні сили.

Чим менше зона параметрів, тим вище початкова якість верстата, а чим повільніше вона змінюється з часом, тим вище його надійність.

Під час випробувань верстата зони параметрів порівнюють з відповідними зонами працездатності – зонами допустимих значень вихідних характеристик.

В результаті визначаються показники якості верстата, і, в першу чергу, запас надійності по кожній характеристиці.

**Область працездатності** встановлюється виходячи з вимог до точності оброблюваних деталей із врахуванням того вкладу в утворення похибок обробки, який вносять інші компоненти технологічної системи.

В якості вихідних параметрів верстата вибирають показники точності здійснення рухів формоутворювальних вузлів.

Ці рухи характеризуються траєкторіями опорних точок.

Опорні точки та параметри їх траєкторій встановлюється в залежності від конструкції та призначення верстата.

Вибрані показники повинні визначати долю похибок яку вносить верстат у формування точності деталі.

Опорні точки, як правило, розташовують на базових поверхнях верстата, призначених для кріплення заготовки, пристосувань, інструмента (установчі бази, що контактують з технологічними базами заготовки).

Параметри траєкторій вибирають у прийнятій системі координат – незалежній чи побудованій на базових елементах верстата.

При одночасному аналізі кількох траєкторій необхідно враховувати ті параметри, які визначають їх взаємне просторове положення, що впливає на точність обробки.

Умови експлуатації враховуються тим, що випробування проводяться при одночасній дії силових та теплових факторів з програмованим навантаженням працюючого верстата спеціальними пристроями.

Умови експлуатації повинні відображати спектр експлуатаційних сил.

Вихідні параметри можуть визначатись як у вірогіднісній трактові (повна характеристика зони параметрів), так і в екстремальних умовах (оцінка межі зони параметрів).

Такі випробування складаються з великої кількості циклів, кожний з яких відображає одну з комбінацій можливих сил, що діють на верстат.

Це можливо лише при наявності програмованих навантажувальних пристроїв, що імітують силові, теплові, вібраційні та інші навантаження на верстат.

Такий метод випробувань передбачає обробку на верстаті типової деталі лише для підтвердження достовірності інформації, отриманої під час випробувань з програмованим навантаженням верстата, і встановлює ступінь адекватності умов випробувань до реальних умов експлуатації.

Випробування верстатів поєднується з прогнозуванням надійності. Тільки в цьому випадку можливо за порівняно короткий період часу отримати достовірні дані про параметричну надійність складної машини.

При цьому початкові дані для оцінки надійності, по-перше, є результатом проведених випробувань і, по-друге, використовується апріорна інформація щодо процесів, які призводять до зміни початкових характеристик верстата.

Випробування проводиться у випробувально-діагностичних комплексах, де забезпечується програмоване навантаження верстата, імітація зовнішніх сил, вимірювання необхідних параметрів в процесі роботи верстата та обробка інформації на комп'ютері.

При цьому комп'ютер обробляє інформацію результатів вимірювання параметрів траєкторії, тобто враховуються всі реалізації випадкової функції з отриманням в результаті характеристик, за якими визначають якість верстата.

У процесі випробувань комп'ютер повинен виконувати такі функції:

- а) обробляти та зберігати результати випробувань;
- б) обробляти інформацію про експлуатаційні навантаження та умови експлуатації, про зносостійкість матеріалів базових елементів, про точність обробки та про інші характеристики верстата;
- в) здійснювати програмне керування режимами роботи верстата та спеціальними навантажувальними пристроями, включаючи імітацію дії зовнішніх сил із зміною їх величини та напрямку, накладення спектра вібрацій, керування тепловими потоками та ін.;
- г) здійснювати розрахунки показників якості та прогнозувати показники надійності верстата.

## Структура випробувально-діагностичного комплексу



Обґрунтувати необхідність комп'ютерів для обробки результатів експериментів можна розрахунком кількості дослідів. Якщо потрібно досліджувати  $K$  параметрів, кожний з яких має  $n$  змін, то кількість експериментів складає  $N = n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_a$ .

Випробування проходять у режимі автоматизованого експерименту і складаються з послідовних циклів, кількість яких повинна бути достатньою для статистичної обробки результатів.

Кожен цикл здійснюється при власній комбінації значень факторів, що впливають на параметри траєкторій опорних точок.

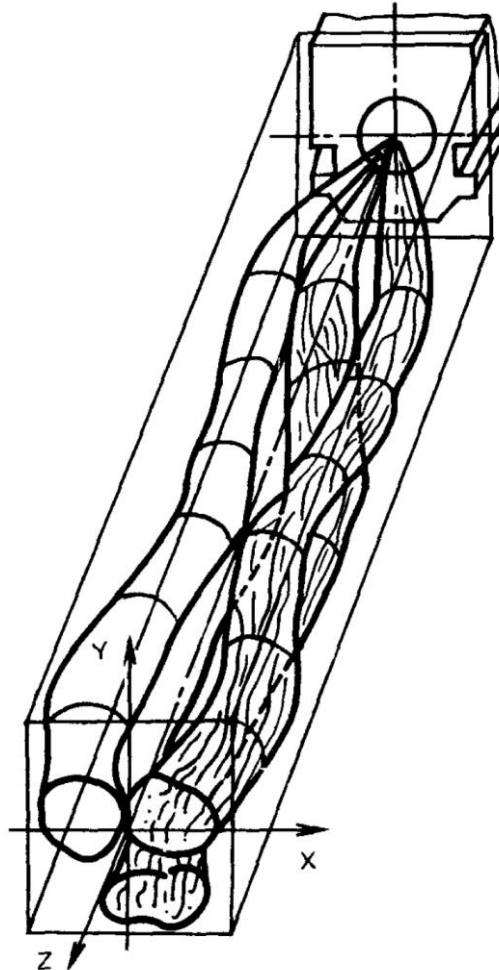
Отримані траєкторії кожної опорної точки є реалізацією деякого випадкового процесу, що характеризує рух робочих органів верстата під час експлуатації.

Параметри кожної траєкторії визначаються за допомогою вимірювального комплексу та вводяться у комп'ютер, де виконуються необхідні розрахунки, а їх результати зберігаються у пам'яті комп'ютера. Крім цього у такому комплексі є діагностична апаратура, за допомогою якої оцінюється стан окремих елементів верстата, його теплові поля, віброакустичні сигнали.

Наявність у вимірювальному комплексі діагностичної апаратури дозволяє після обробки даних на комп'ютері виявити причини відхилень окремих параметрів траєкторій від їх номінальних значень.

Комп'ютер керує формуванням усіх циклів, обробляє результати вимірювань та з урахуванням апріорної інформації здійснює прогноз про можливі зміни параметрів траєкторій в умовах тривалої експлуатації.

**Приклад результатів таких випробувань – ансамбль траєкторій руху центра шпинделя повзуна шпиндельної бабки багатоцільового верстата**



Якщо в результаті випробувань та прогнозування встановлено, що показники якості та надійності верстата не задовольняють технічним вимогам чи бажано отримати більш високі характеристики, то необхідно провести додаткові дослідження та випробування з оцінкою не тільки вихідних параметрів верстата, а виявлення вкладу окремих елементів конструкції та оцінки ступеня впливу основних факторів, що формують зону станів за лімітуючим параметром.

Під час програмних випробувань широкую інформацію щодо характеристик верстата та його реакції на зовнішні сили отримують за рахунок застосування спеціальних навантажувальних пристроїв, вимірювально-діагностичної апаратури, комп'ютера та за рахунок спеціальної організації цих випробувань.

## **Лекція 18** Алгоритм програмного випробування. Вхідні дані, технічні вимоги, випробування, моделювання зносу, прогнозування стану, визначення показників якості та надійності верстата

Програмні випробування верстатів передбачають розв'язання комплексу задач з програмування комбінацій значень програмованих навантажень, оброблення результатів дослідів, моделювання та прогнозування різних процесів у верстаті та розрахунку показників якості та надійності. Врахування усіх зв'язків та забезпечення достовірності отриманих результатів потребує розробки відповідного алгоритму проведення таких випробувань.

### **Схема алгоритму програмного випробування верстата**



Кожний з блоків наведеної схеми здійснює окремий етап випробування чи розрахунків для отримання інформації за якою оцінюють якість та надійність верстата.

Перший блок "Вхідні дані" пов'язаний із формуванням значень вхідних параметрів, які будуть варіюватись під час випробувань (2-й блок).

До них відносять величини та напрямки зовнішніх сил, їх динамічні складові, швидкість та переміщення вузлів, теплові впливи.

Для формування значень варіюваних параметрів використовується апріорна та статистична інформація про експлуатаційні навантаження та умови роботи даного верстата (3-й блок).

В результаті випробувань визначають параметри траєкторії переміщення робочих вузлів верстата, які приймаються за вихідні характеристики верстата.

Для розрахунків показників якості та надійності інформація надходить двома потоками.

I потік – від випробувально-діагностичного стенду – результат випробувань даного верстату.

II потік – результат прогнозування можливої зміни вихідних параметрів від зносу його базових елементів.

Прогнозування проводять за спеціальними методами розрахунків та інформацією про швидкість зносу окремих спряжень, яку отримують від експлуатаційних спостережень аналогічних верстатів та спеціальних методів фізико-статистичного моделювання зносу.

За основу розрахунків показників якості та надійності верстата приймають модель параметричної відмови, яка відображає процес зміни вихідного параметру верстата від дії різних процесів.

Якщо отримані показники не задовольняють технічним вимогам, необхідно здійснити оптимізацію вихідних параметрів і знову провести цикл випробувань та прогнозування.

В результаті оцінки якості та надійності верстата отримують сертифікат (свідотство) про його стан, в якому наведено за яких умов експлуатації досягається задана точність.

Випробування та прогнозування дають такі характеристики точності та надійності верстата:

- 1) числові значення характеристик зон параметрів (зон, де їх заданою вірогідністю знаходяться регламентовані вихідні параметри);
- 2) запаси надійності по точності для кожного з вихідних параметрів (відношення допустимих значень до фактичних);
- 3) ресурс по точності при заданій вірогідності безвідмовної роботи верстат.

У сертифікаті також вказують основні фактори, що впливають на точність та "слабкі місця", стан яких повинен контролюватись у процесі експлуатації.



Одним з основних процесів керування програмним випробуванням є формування комбінацій сигналів керування та їх значень.

Випробування складаються з великої кількості циклів, і для кожного циклу формується набір значень вхідних параметрів.

Виходячи з умов статистичної обробки інформації кількість циклів звичайно складає 100...150.

Вибір значень вхідних параметрів може здійснюватись різними методами. Наприклад, на основі принципів статистичного випробування (метод Монте-Карло), коли для кожного циклу вибираються (розігруються) значення вхідних параметрів із врахуванням їх законів розподілу.

Інший метод – керування режимами обробки на верстаті спеціальної деталі-імітатора, яка дозволяє обробляти різні поверхні із застосуванням всього діапазону режимів різання. Вимірювання вихідних параметрів дає інформацію для отримання законів розподілу вихідних параметрів, які є повною характеристикою зон параметрів і враховують всі можливі умови експлуатації верстата.

Усю цю інформацію дає випробувальний стенд, до складу якого входять: верстат, що випробується, програмовані навантажувальні пристрої, вимірювальний комплекс.

**Лекція 19, 20 Розробка методики програмних випробувань.  
Аналіз конструкції верстата, вимог до точності обробки.  
Проведення попередніх експериментів, вибір  
метрологічних засобів, розробка методів та засобів  
програмного навантаження**

Перед випробуваннями необхідно провести ряд розрахунків та попередніх експериментів, які дозволяють призначити показники вихідних параметрів верстата, вибрати їх оптимальну кількість, виявити головні фактори, що впливають на точність, здійснити доцільний вибір метрологічною, діагностичною, випробувального та іншого обладнання.

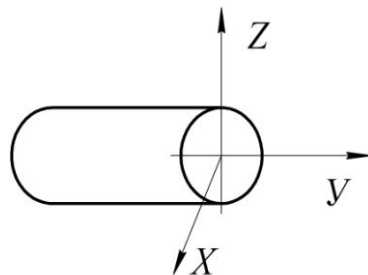
Основні підготовчі етапи:

**1. Аналіз конструкції верстата та методів формоутворення**

На цьому етапі виконуються такі операції:

- 1) Визначаються параметри та точність установчих баз верстата, які визначають взаємне положення інструмента та заготовки в процесі обробки. Необхідно оцінити точність форми поверхні базування та визначити систематичну похибку встановлення інструмента та заготовки, точність положення установочної бази по відношенню до руху відповідного вузла.
- 2) Для проведення програмних випробувань необхідно вибрати опорні точки та оцінити можливість обмеження числа опорних точок чи розглядати процес переміщення формоутворювального вузла у площині, якщо похибки траєкторії в одному із напрямків практично не впливають на точність обробки.

*Наприклад.* Для токарного верстата можна не розглядати траєкторію опорної точки у вертикальній площині **YZ**, оскільки зміщення різця у цьому напрямку практично не впливає на точність обробки. Тобто можливо обмежитись розглядом параметрів траєкторії у горизонтальній площині **XZ**.



- 3) Виявити тип та вигляд ідеальних траєкторій опорних точок, встановити зони, у яких ці траєкторії реалізуються, визначити координати взаємного положення формоутворювальних вузлів.

В результаті такого аналізу формується уявлення про ідеальний з позиції точності верстат, який би не впливав на загальну похибку обробки, тобто ідеально точного верстата. А оскільки такого верстата бути не може, то у подальшому розглядають ті параметри та методи їх оцінювання, які дозволяють отримати об'єктивну характеристику рівня якості верстата.

## 2. Аналіз вимог до точності обробки

Вимоги до точності обробки визначають вибір переліку вихідних параметрів верстата. Необхідно встановити зв'язки між показниками точності обробленої деталі та параметрами верстата, а також виявити вплив інших складових технологічної системи на точність обробки.

Якщо вплив верстата на дану похибку обробки більш високого порядку малості, то відповідний параметр верстата може не регламентуватись.

*Наприклад:* у токарному верстаті, зміщення інструменту у тангенціальному напрямку практично не впливає на точність обробки, тому відхилення від траєкторій достатньо розглядати у одній площині.

Для оцінки верстата у сумарну похибку обробки при розрахунках очікуваної точності враховують геометричну точність та пружні деформації, у ряді випадків – теплові деформації та інші складові.

Такі розрахунки дозволяють встановити, яка доля з допуску на точність обробки припадає на окремі компоненти системи, тобто визначити гранично допустимі відхилення для вихідних параметрів верстата.

Можливо на основі аналізу та розрахунків встановити відносну долю верстата (наприклад 50 або 30%). У такому випадку допуски на вихідні параметри верстата встановлюються як задана відповідна доля по відношенню до допустимої похибки обробки (наприклад 0,5 або 0,3).

## 3 Вибір номенклатури вихідних параметрів верстата

Досить відповідальний етап. Потрібно вибрати оптимальне число регламентованих параметрів.

В загальному випадку, чим вище вимоги до точності поверхні обробленої деталі, особливо до точності її форми, тим більше число вихідних параметрів повинно входити до загальної оцінки верстата.

## 4 Проведення попередніх експериментів

Вони проводяться як підготовчий етап повного циклу випробувань і необхідні для скорочення основних випробувань при збереженні достовірності виводів.

Для їх проведення не потрібне програмоване навантаження та автоматична обробка результатів.

Основна їх мета – це перевірка правильності прийнятих рішень та передумов:

1) якщо згідно попереднього аналізу параметри траєкторії можна розглядати у одній площині, то обробляється відповідна поверхня деталі, вимірюється форма обробленої поверхні у двох напрямках та порівнюється з формою руху інструменту у тих же напрямках.

2) для трьох встановлених опорних точок, потрібно визначити окремі зв'язки параметрів траєкторій точок з метою скорочення їх кількості до одної, чим забезпечується зменшення об'єму вимірювань.

3) перевіряється доцільність вибраної номенклатури вихідних параметрів та уточнюється її склад.

4) для перевірки правильності зроблених передумов, вибирається типова деталь та обробляється на середніх, або оптимальних режимах різання, а потім перевіряється на ній доцільність застосування прийнятих вихідних параметрів.

Якщо внесок деяких параметрів у загальну похибку невеликий, то можна їх не враховувати, тобто потрібно прямувати до мінімуму регламентованих параметрів.

## **5 Вибір метрологічних засобів**

Для вимірювань вихідних параметрів верстата, значень варійованих пар-в (сил, швидкостей) та діагностичних сигналів існує широкий вибір методів та засобів. Їх вибір повинен врахувати, що проведення програмного методу випробувань передбачає безперервний процес вимірювань, а уся інформація передається у комп'ютер та зберігається.

Найбільш доцільно застосовувати безконтактні вимірювальні перетворювачі з датчиками різного принципу дії та фізичної природа, які стикуються з відповідними аналого-цифровими перетворювачами для введення сигналів у комп'ютер.

## **6 Розробка методів та засобів програмного навантаження**

Такі параметри, які режими роботи верстата (швидкість головного приводу, подачі, допоміжні переміщення) встановлюються за допомогою системи ЧПК верстата.

Для імітації дії силових та теплових факторів із врахуванням їх вірогідностної природи практично нема стандартних пристроїв. Такі пристрої розробляються у кожному конкретному випадку або для кожного випробувального комплексу.

Програмний метод випробувань верстатів не відкидає випробовування окремих вузлів та елементів верстата на відповідність технічним вимогам. Однак позитивна оцінка компонентів складної системи не означає, що вся система також працездатна.

Під час функціонування складної системи верстата виникають взаємодії та взаємовпливи окремих її елементів, що впливають на формування вихідних параметрів системи.

*Наприклад.* Для верстата це може бути взаємний вплив теплових полів, динамічні взаємодії, деформації в зонах спряження вузлів.

Тому випробовування всього верстата для оцінки його вихідних параметрів із урахуванням експлуатаційних впливів є основним завершальним етапом створення нових зразків з високими значеннями вихідних параметрів по точності обробки, надійності, довговічності.