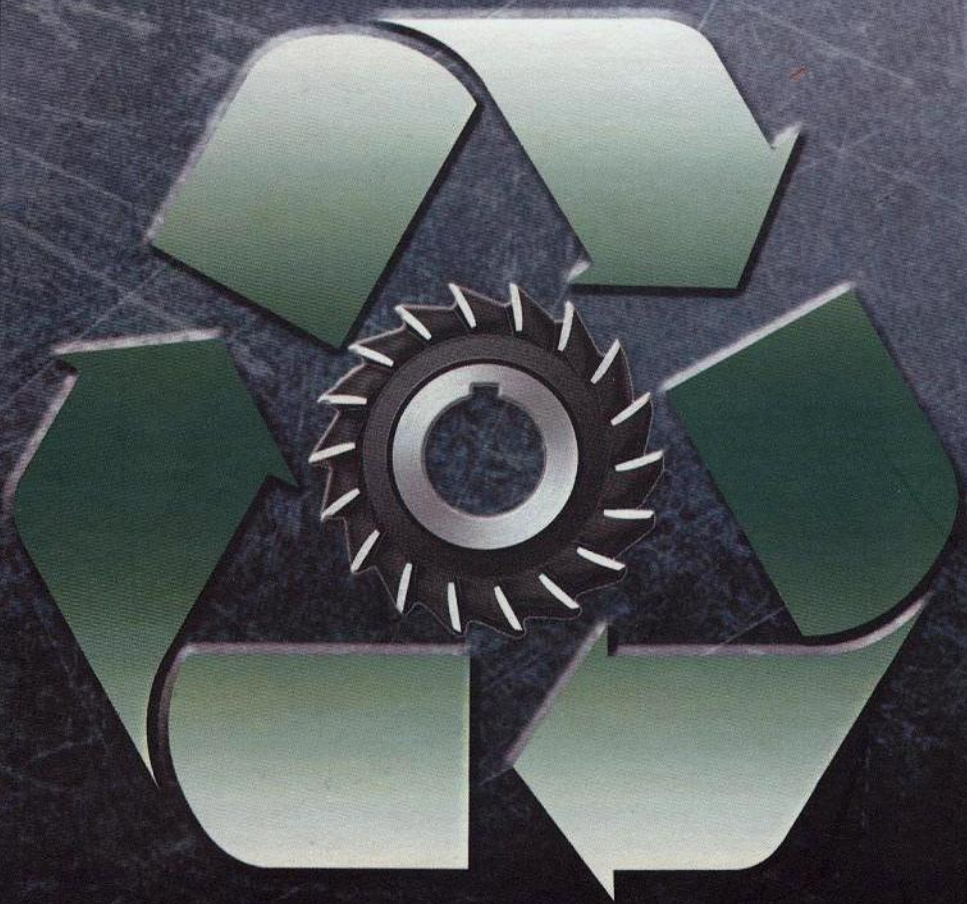


# Ресурсозбереження фрезерного обладнання: теорія та практика



Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

Г. С. Тимчик  
В. І. Скипюк  
Т. Р. Клочко

**Ресурсозбереження фрезерного обладнання:  
теорія та практика**

Монографія

*Рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ»*

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2014

Рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ»  
(Протокол № 7 від 24.06.2014 р.)

#### Рецензенти:

*В. М. Шаранов*, д-р техн. наук, проф.,  
Заслужений діяч науки і техніки України,  
Черкаський державний технологічний університет

*В. О. Румбешта*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

Тимчик Г. С.

**Т41** Ресурсозбереження фрезерного обладнання: теорія та практика: монографія / Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, Т. Р. Ключко. — К.: НТУУ «КПІ», 2014. — 264 с. — Бібліогр.: с. 246–263.

ISBN 978-966-622-641-2

Створено теоретичні засади збереження ресурсу та підтримки належної точності роботи зношеного металообробного обладнання, на підставі яких запропоновано низку нових методик для визначення похибок роботи зношених верстатів із ЧПК різних типів, які надають можливості підвищення ресурсу роботи та необхідної точності виготовлення деталей. Запропоновано засади створення нових автоматизованих комплексів, які підвищують продуктивність роботи технологічного металообробного обладнання у сучасному приладобудівному виробництві під час виготовлення деталей надточних приладів. Результати роботи мають наукову і практичну цінність для освітніх установ, які зорієнтовані на підготовку фахівців у галузі технології надточного приладобудування, для спеціальних курсів підвищення кваліфікації фахівців на виробництві галузі надточного приладобудування.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, студентів старших курсів вищих навчальних закладів відповідно та інженерно-технічного напрямку з фаху технології приладобудування для підприємств України.

УДК 621.9.06+621.914  
ББК 34.63-5

ISBN 978-966-622-641-2

© Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк,  
Т. Р. Ключко, 2014  
© НТУУ «КПІ» (ПБФ), 2014

## ПЕРЕДМОВА

Результати проведених теоретичних досліджень надали підстави запропонувати засади функціонування нових автоматизованих комплексів, які підвищують продуктивність роботи технологічного металообробного обладнання в сучасному приладобудівному виробництві. У роботі окреслено необхідні умови для застосування створених контрольно-вимірювальних засобів підтримки точності зношеного обладнання для промислової автоматизації технологічних процесів виготовлення деталей надточних приладів.

Запропонований метод подовження ресурсу роботи обладнання базується на реєстрації моменту торкання інструмента до деталі та вирішує важливу проблему сучасного промислового виробництва. Викладені рекомендації щодо створення принципів дії різального інструмента як елемента вимірювальної системи, які дозволять визначити основні конструктивні особливості побудови нового типу вимірювального інструмента для обробки металів. Новий інтегрований контрольно-вимірювальний інструмент забезпечує підвищення точності вимірювання координат поверхні торкання інструмента до деталі у процесі обробки.

Наведені алгоритми забезпечення процесу вимірювання координат поверхні торкання інструмента до деталі надають можливості подовження ресурсу автоматизованого металообробного обладнання, що досить довгий термін було в експлуатації, для виробництва деталей прецизійних приладів.

Технологічне обладнання групи металообробних верстатів із системами керування типу CNC при виготовленні надточних деталей буде значно ефективнішим при використанні пропонованої контрольно-вимірювальної системи, що доводить необхідність застосування та впровадження результатів досліджень на виробництві.

Окрім того, результати роботи мають наукову та практичну цінність для освітніх установ, які зорієнтовані на підготовку фахівців у галузі технології надточного приладобудування, для спеціальних курсів підвищення кваліфікації фахівців на виробництві галузі надточного приладобудування.

Наукове видання

Тимчик Григорій Семенович  
Скицюк Володимир Іванович  
Клочко Тетяна Реджинальдівна

**Ресурсозбереження фрезерного обладнання:  
теорія та практика**

Монографія

*Дизайн обкладинки*  
М. Клочко

*В авторській редакції*  
*Надруковано з оригінал-макета замовника*

Темплан 2014 р., поз. 3-1-009

Підп. до друку 05.08.2014. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. 15,34. Обл.-вид. арк. 25,52. Зам. № 14-156.  
Наклад 300 пр.

---

НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»  
Свідцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.  
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
тел. (044) 406-81-78

## ПЕРЕДМОВА

Результати проведених теоретичних досліджень надали підстави запропонувати засади функціонування нових автоматизованих комплексів, які підвищують продуктивність роботи технологічного металообробного обладнання в сучасному приладобудівному виробництві. У роботі окреслено необхідні умови для застосування створених контрольно-вимірювальних засобів підтримки точності зношеного обладнання для промислової автоматизації технологічних процесів виготовлення деталей надточних приладів.

Запропонований метод подовження ресурсу роботи обладнання базується на реєстрації моменту торкання інструмента до деталі та вирішує важливу проблему сучасного промислового виробництва. Викладені рекомендації щодо створення принципів дії різального інструмента як елемента вимірювальної системи, які дозволять визначити основні конструктивні особливості побудови нового типу вимірювального інструмента для обробки металів. Новий інтегрований контрольно-вимірювальний інструмент забезпечує підвищення точності вимірювання координат поверхні торкання інструмента до деталі у процесі обробки.

Наведені алгоритми забезпечення процесу вимірювання координат поверхні торкання інструмента до деталі надають можливості подовження ресурсу автоматизованого металообробного обладнання, що досить довгий термін було в експлуатації, для виробництва деталей прецизійних приладів.

Технологічне обладнання групи металообробних верстатів із системами керування типу CNC при виготовленні надточних деталей буде значно ефективнішим при використанні пропонуємої контрольно-вимірювальної системи, що доводить необхідність застосування та впровадження результатів досліджень на виробництві.

Окрім того, результати роботи мають наукову та практичну цінність для освітніх установ, які зорієнтовані на підготовку фахівців у галузі технології надточного приладобудування, для спеціальних курсів підвищення кваліфікації фахівців на виробництві галузі надточного приладобудування.

## ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	9
ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ РЕСУРСУ ТА КОНТРОЛЮ ТОЧНОСТІ РОБОТИ ВЕРСТАТІВ У ГНУЧКОМУ ВИРОБНИЦТВІ .....	17
1.1. Аналіз чинників, що впливають на якісні показники кінцевого продукту механічної обробки .....	17
1.2. Аналіз методів підвищення ресурсу металообробного обладнання .....	19
1.2.1. Точність технологічного обробного обладнання	21
1.2.2. Точність системи керування. Основні помилки інтерполятора та режиму інтерполяції	22
1.2.3. Сталі похибки, що створені внаслідок налагодження технологічного процесу	23
1.2.4. Плинні похибки виробництва, залежні від якості технологічного устаткування	24
1.3. Аналіз приладів контролю точності виконання деталей у процесі обробки металу	26
1.4. Порівняльний аналіз методів і приладів контролю точності роботи верстатів із ЧПК	28
1.4.1. Загальні підходи до підвищення точності виготовлення деталей приладів у промисловому виробництві	35
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	42
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ МОРФОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ ТОРКАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ДО ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ	43
2.1. Фізико-технологічні ознаки морфології поверхні торкання різального інструмента і деталі	44
2.1.1. Фізична модель поверхні після технологічної обробки	48
2.1.1.1. Аналітична модель поверхні деталі після токарної обробки	53



2.1.1.2. Моделювання параметрів поверхні після шліфувальних операцій	60
2.1.1.3. Моделювання параметрів поверхні після фрезерних операцій обробки металу	62
2.2. Технологія торкання технологічних об'єктів у процесі металообробки	64
2.3. Загальні принципи дії різального інструмента як елемента контрольно-вимірювальної системи	65
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	75
 РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ТОЧНОСТІ ВВЕДЕННЯМ ЗВОРОТНЬОГО ЗВ'ЯЗКУ	76
3.1. Зона присутності абстрактної сутності та технологічного об'єкта	77
3.1.1. Вплив панданної зони технологічного об'єкта на стабільність реєстрації зони присутності	77
3.1.2. Джерела створення електромагнітної зони присутності технологічних об'єктів	81
3.1.3. Природні джерела електромагнітного поля	86
3.1.4. Чинники виникнення змінної електрорушійної сили у системі технологічного обладнання	89
3.1.5. Підгрунтя утворення змінної електрорушійної сили та межі можливостей її реєстрації	91
3.2. Ефект дуальності поверхні торкання та його вплив на точність визначення координати	93
3.2.1. Засади дуальності координати, залежні від параметрів системи контролю торкання	95
3.2.2. Дуальність координат рушійних систем металообробного верстата	99
3.3. Загальна концепція векторної похибки у обробляючому просторі верстата	110
3.4. Вплив зворотнього зв'язку в системі функціональної діагностики стану технологічного обладнання	115
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	120

РОЗДІЛ 4. ПРИНЦИПИ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ОБРОБНЕ ОБЛАДНАННЯ ПРИ РІЗНИХ ТИПАХ ТОРКАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	121
4.1. Руйнуюче торкання технологічних об'єктів	121
4.1.1. Руйнуюче торкання за симетричного способу руху	122
4.1.2. Руйнуюче торкання за відтяжного способу руху	124
4.1.3. Руйнуюче торкання за відскочного способу руху	131
4.2. Підвищення швидкості подачі при визначенні координати поверхні інструментом, що обертається	134
4.3. Динамічні навантаження на різальний інструмент при швидкісному кроковому врізанні	139
4.3.1. Врізання циліндричною частиною різального інструмента	139
4.3.2. Силкові навантаження при врізанні торцевою частиною фрези	148
4.4. Пружні деформації технологічної обробної системи при швидкісному кроковому врізанні	149
4.4.1. Основні типи деформацій заготовки	151
4.4.2. Пружні деформації верстата і різального інструмента	154
4.4.2.1. Вигин інструмента під дією сили різання	155
4.4.2.2. Контактні деформації в стиках	156
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	159

РОЗДІЛ 5. АЛГОРИТМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТИ ТОРКАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ДО ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ	160
5.1. Інформаційне забезпечення роботи	160
5.2. Загальний алгоритм роботи системи контролю торкання у складі технологічного комплексу при виконанні обробки металу	162
5.3. Алгоритми забезпечення контролю роботи системи контролю торкання	164
5.4. Алгоритм роботи «Торкання» системи контролю	168
5.5. Алгоритм роботи «Крок-вимірювання» системи	170
5.6. Алгоритми функціонування АНБ-Т у складі системи ЧПК типу CNC	171
5.7. Методика врахування пружних деформацій системи технологічного обладнання, не охоплених зворотнім зв'язком	175



ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5	176
РОЗДІЛ 6. ПОБУДОВА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТОРКАННЯ ДЛЯ ЗНОШЕНОГО МЕТАЛООБРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ	177
6.1. Методика дослідження зони присутності технологічного об'єкту	177
6.2. Методика досліджень поля похибок позиціювання технологічних об'єктів	183
6.3. Вибір верстатного обладнання для виконання дослідних робіт	194
6.4. Апаратне забезпечення дослідів. Принципи побудови системи реєстрації торкання та її периферійних модулів	197
6.4.1. Активні та пасивні нульові бази та методика їх використання у дослідних роботах	209
6.4.2. Узагальнена методика роботи комплексу при проведенні дослідних робіт	210
6.4.3. Методика дослідження точності позиціювання різального інструмента на фрезерних верстатах та ОЦ	215
6.5. Методики проведення експериментальних робіт із дослідження стану обробного обладнання	216
6.5.1. Методика проведення контролю геометричних руйнацій робочої поверхні стола	217
6.5.1.1. Результати дослідження зонної точності верстатів із системою керування ЧПК	219
6.5.1.2. Результати дослідів із вимірювання руйнації робочого столу фрезерного верстата 2С150 ПМФ4	225
6.5.1.3. Результати досліджень глибини руйнацій при негативних технологічних процесах	229
6.5.2. Методика проведення контролю люфтів за координатними осями верстата	231
6.5.3. Методика визначення жорсткості верстата	232
6.5.4. Методика визначення зносу різального інструмента	235
6.6. Практичне застосування системи контролю торкання в умовах сучасного виробництва	237
6.7. Методика підтримки точності верстатів із системою ЧПК при застосуванні системи контролю торкання	239
6.7.1. Вимоги до механічної частини верстата	239

6.7.2. Вимоги до розташування периферійних модулів електромагнітних відчутників у складі верстата	240
6.7.3. Вимоги до узгодження системи контролю торкання із системою керування CNC	241
6.7.4. Вимоги до алгоритмічного забезпечення роботи системи контролю торкання із системою CNC верстата	242
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 6	244
ПІСЛЯМОВА	245
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	246

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АВГ	– активна вимірювальна головка.
АНБ	– активна нульова база.
АЧТД	– активний чутник торкання деталі.
АЧТІ	– активний чутник торкання інструмента.
ВГ	– вимірювальна головка.
ГВС	– гнучка виробнича система.
ЕМП	– електромагнітне поле.
ЕМВ	– електромагнітне випромінювання.
ЕРС	– електрорушійна сила
ЗП	– зона присутності.
ОВ	– об'єкт вимірювання.
ОЦ	– обробний центр.
ПЗ	– панданна зона.
ПНБ	– пасивна нульова база.
ПЧТД	– пасивний чутник торкання деталі.
ПЧТІ	– пасивний чутник торкання інструмента.
РІ	– різальний інструмент
СКТ	– система контролю торкання.
СМР	– субмікроскопічний рельєф.
ТЕРС	– термоелектрорушійна сила.
ТО	– технологічний об'єкт.
ТОС	– технологічна обробна система «верстат-пристосування-інструмент-деталь».
ТП	– технологічний процес.
ТФ	– технологічний фантом
ЧЕ	– чутливий елемент.
ЧПК	– числове програмне керування.
CNC	- computer numerical control

$R_a$  - середнє арифметичне відхилення профілю

$y_{pmk}$  – висота  $k$ -го найбільшого виступу профілю;

$y_{vmk}$  – висота  $k$ -ої найбільшої упадини профілю.

$A_k$  – амплітуда  $k$ -ої точки шорсткості поверхні

$T$  – період функції  
 $\omega$  – кутова швидкість обертання інструмента (або деталі)  
 $R$  – радіус циліндричної панданної зони інструмента (або деталі)  
 $j$  – щільність електричного струму  
 $\lambda$  – питома електропровідність матеріалу  
 $\mu$  – магнітна проникність матеріалу  
 $\mu_0$  – магнітна стала  
 $B$  – вектор магнітної індукції  
 $H$  – вектор напруженості магнітного поля  
 $L$  – індуктивність обмотки відчутника  
 $R_a$  – активний опір навантаження  
 $C_0$  – особиста ємність  
 $q$  – заряд  
 $E$  – вектор напруженості електричного поля  
 $E_{ст}$  – напруженість поля сторонніх сил  
 $F_{шфн}(t)$  – функція шорсткості  
 $r_0$  – радіус ідеальної деталі, тобто при практично дзеркальній поверхні;  
 $r_{max}$  – радіус деталі на максимальній висоті виступів шорсткої поверхні;  
 $\theta_n$  – кут плинної координати неоднорідності, під яким відбивається акустична хвиля  
 $t_T$  – час аналізу на торкання, закладений у систему керування технологічним обладнанням;  
 $l_{кр}$  – критична довжина шляху, коли інструмент обов'язково повинен торкатися поверхні деталі.  
 $H_i$  – діюча висота іоносфери  
 $I'_0$  – залишкова стала струму,  
 $\dot{I}_{i\delta\delta}$  – комплексний струм від зони різання  
 $\dot{\mathbf{J}}_0$  – щільність струму у початковий момент часу  $t = 0$   
 $f(M_B)$  – модуляційна функція верстата  
 $f(M_{обр})$  – функція модуляції у зоні металообробки  
 $T$  – є час, необхідний для створення команди реверсу руху при торканні;  
 $\bar{T}$  – час, необхідний для створення команди реверсу руху при неторканні.  
 $V_p$  – максимально можлива швидкість руху ЧЕ;  
 $k_n$  – коефіцієнт мінімально можливої швидкості ЧЕ

$K_D(U)$  – уявні координати деталі, які зберігаються у пам’яті CNC;

$K_D(R)$  – реальні координати деталі після виготовлення у робочому просторі верстата.

$K_{RD}(R)$  – реальна функція координатного рушія деталі у розімкненому стані;

$K_{RD}(U)$  – уявна функція координатного рушія деталі із відповідними корекціями;

$K_{RI}(R)$  – реальна функція координатного рушія інструмента у розімкненому стані;

$K_{RI}(U)$  – уявна функція координатного рушія інструмента з відповідними корекціями;

$K_U(R)$  – реальна функція чутника торкання;

$K_U(U)$  – уявна функція чутника торкання.

$n_0$  - число обертів фрези за хвилину;

$z_0$  - число зубів фрези.

$h_{\text{ед}}$  - величина врізання, мм;

$V_{\text{ад}}$  - швидкість врізання, мм/хв

$\delta_{\text{Діс}}$  - вигин інструмента під дією сили різання;

$\delta_{\text{Діе}}^{i-\text{ад}}$  - контактна деформація в стику інструмент-втулка;

$\delta_{\text{Діе}}^{\text{ад}-\text{ад}}$  - контактна деформація в  $i$ -му стику втулка-втулка (при використанні для установки фрези в шпиндель більш однієї перехідної втулки);

$\delta_{\text{Діе}}^{\text{ад}-\phi}$  - контактна деформація в стику втулка-шпиндель.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ РЕСУРСУ ТА КОНТРОЛЮ ТОЧНОСТІ РОБОТИ ВЕРСТАТІВ У ГНУЧКОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Фрезерна та токарна обробка деталей є дуже поширеними у машинобудуванні, що дозволяє виконувати величезну кількість різноманітних операцій [1, 2, 3, 4]. Водночас, при виготовленні деталей приладобудування вимагаються висока точність та висока продуктивність [4, 5]. Ці проблеми вирішуються досить успішно за допомогою верстатів із ЧПК [6, 7, 8].

Проблему підвищення ефективності технологічних процесів обробки і поліпшення якості продукції найбільш успішно можна вирішити створенням і впровадженням методів та систем керування якістю виробничих процесів. Реалізація таких методів і засобів є особливо важливою для приладобудування, де у багатьох випадках першорядне значення одержують вимоги до підвищення точності обробки.

Розглядаючи функціональну структуру верстатів із ЧПК, можна виокремити такі частини, які мають плинне моральне та фізичне старіння і вимагають постійного оновлення:

- Механічна частина верстата;
- Електромеханічна система та система енергетичного забезпечення;
- Система керування типу CNC;
- Програмне забезпечення;
- Периферійні відчутники для збирання необхідної інформації координат та стану вузлів і агрегатів.

За такого підходу до виконання проектних робіт та робіт з модернізації з метою підвищення точності досить чітко видно, що структурний розподіл верстата вимагає відповідних досить специфічних напрямків.

#### **1.1. Аналіз чинників, що впливають на якісні показники кінцевого продукту механічної обробки**

Аналізуючи чинники впливу на якість кінцевого продукту механічної обробки, необхідно зауважити, що це є комплекс показників, вироблених споживчим ринком продукції, сформульований спеціальними державними та світовими стандартами якості [5, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Проблема виготовлення якісної продукції є настільки актуальною, що вироблено перелік певних заходів задля підтримання якості на високому рівні,

тобто існує велика необхідність усунення випадкових чинників, які тією чи іншою мірою мають вплив на будь-який показник. Як наслідок, були вироблені комплекси керування якістю, які тісно пов'язані із необхідними параметрами виробу [15, 16, 17]. Основна проблема тут знов-таки базується на належній стабільності. Навіть, якщо була досягнута висока якість певного приладу, це ще не означає, що він довго буде утримуватись на споживчому ринку. Адже вимоги ринку міняються і, як наслідок, прилад, який ще недавно був новий, розглядається вже як застарілий. Проте це не означає, що він свого часу був неякісно зроблений, це означає, що змінилися вимоги до його характеристик.

Існує проблема старіння верстатів із ЧПК. Як наслідок, - це втрата виконання високоточних розмірів. Згідно стандартів якості [1, 9, 10, 11, 12, 13, 18] це є наступні показники:

1. Показник точності технологічного процесу;
2. Показник стабільності технологічного процесу;
3. Ризик непоміченого розладу;
4. Похибка вироблення продукції;
5. Випадкова похибка вироблення продукції.

Досить поверхневого погляду на ці показники, щоб побачити вплив зносу обладнання на їхні варіації у часі. Плинність параметрів верстата особливо відчувається на точнісних параметрах деталей, що виготовлюють.

Отже, параметр якості, що найбільш піддається впливу, – це розмір окремих фрагментів деталі. Чим точніше необхідно виконати той чи інший розмір деталі, тим більші вимоги до точності роботи верстата. Але у зв'язку із плинним зносом механіки верстата виникають можливості порушення названих вище показників (особливо п. 3). Основним чинником, котрий впливає на цей показник, є явний гистерезис у виконанні руху за координатами вперед-назад (дуальність - люфт). Аналізуючи роботу сучасних верстатів із ЧПК, необхідно помітити той факт, що попри високу точність виконання руху робочої поверхні та інструмента, верстат як формотворчий пристрій, є технологічно незамкненим у своєму колі. Рух робочих поверхонь верстата й різального інструмента може відбуватися навіть без наявності деталі на робочому столі.

Така відсутність зворотного зв'язку полишає технологічну систему інформації стосовно точності розміру, що виконується, зносу інструмента, вірності обраного режиму роботи, можливості введення необхідних корекцій стосовно розташування деталі та її наявності на робочому столі взагалі. Ті системи контролю, котрі існують наразі, поки що мають досить грубий



характер керування (аварії), або використовуються суто під наглядом оператора, що значно ускладнює застосування цих систем у масовому виробництві. Отже, загальний висновок сказаного вище є те, що для підтримки високої якості виконання розміру деталі є необхідним замкнення технологічного кола і, як наслідок, подовження ресурсу роботи верстату.

## **1.2. Аналіз методів підвищення ресурсу металообробного обладнання**

На тлі бурхливого розвитку радіоелектронних засобів механічна частина верстата залишається сталою. Це пояснюється великою консервативністю конструкції «типового верстата», тобто його морфологією. Основною проблемою такої консервативності є стала типова конструкція пропонуємого асортименту деталей та їх заангажованість за формою внаслідок конструкторської стереотипності думки і, як наслідок, проектування форми деталі. Якщо прослідкувати історію розвитку технологічних процесів обробки металу, то є можливість констатувати той факт, що наразі існуючі технологічні процеси залишилися такими, як і кілька десятиліть тому, практично без певних змін.

Ще одним чинником, котрий опосередковано пояснює досить повільну плинність точності верстатів впливає з того, що виготовити високоточний механічний виріб можливо тільки за умови високоточного обладнання, яке гарантує необхідну точність. Але, з іншого боку, будь-який виріб є вторинним продуктом роботи верстата і для цього необхідно мати ще більш точний верстат, котрий виготовляє той верстат, на якому виготовляється визначений виріб. Цей простий аналіз показує на те, що існує дуже важлива проблема втримання технологічних показників верстата впродовж всього його «активного життя», до повного вичерпання ресурсу механічної частини. Здебільшого на підприємствах вітчизняного виробництва, де практично майже 100% верстатів відпрацювали по десять і більше років, ця проблема не вирішується. Це є і брак коштів, і адміністративна недалекоглядність, і нерозуміння того, що технологія металообробки наразі є застарілою.

В умовах нашої країни зростає необхідність реставрації механічної частини верстатів. Основним чинником цього процесу є знов таки консервативна конструкція верстатів. Будучи бездоганно відроблені технології впродовж останніх десятиліть доводять, що з огляду на економічні проблеми більш вигідним є реставрація механічної частини верстатів, ніж ліквідація їх через систему металобрухту, оскільки у разі реставрації механічної частини,

електронних систем обслуговування власник верстату отримує майже подвійну економію коштів у порівнянні, наприклад із придбанням нового верстату подібного класу. Останнім часом це стало настільки вигідним, що за кордоном з'явилося багато фірм, котрі займаються подібною реставрацією. Цим фірмам сприяють фірми виробники основного обладнання, котрі використовуючи власні потужності, виробляють комплектуючі деталі для верстатів, які колись вироблялися на цій фірмі, і на них збереглася конструкторська документація.

У подібній ситуації основні фірми-виробники навіть зацікавлені у цих роботах, оскільки мають вагомий прибуток при використанні налагоджених технологічних процесів. За таких умов це надає можливість завантажити людський потенціал роботою, а особливо високої кваліфікації, якої вимагають реставраційні роботи. Такі невеликі реставраційні фірми та компанії не є конкурентами основних фірм виробників з двох основних чинників:

- по-перше, вони не мають достатніх виробничих потужностей для виготовлення верстатів у повному обсязі (практично все робиться вручну);
- по-друге, не всякий верстат можливо реставрувати у повному обсязі.

У більшості випадків існує реальна можливість досягти досить значних технологічних якостей верстатів [16, 17]. Основним чинником позитивної реалізації у реставрації є те, що старі верстати здебільшого пройшли значний час старіння, і концентратори деформацій зникли з маси верстата. За таких умов якість металу на верстатах, котрі відпрацювали по 10 – 15, а то і більше років вище, ніж нових [9]. Основним чинником цього явища є дуже малі залишкові концентратори деформації у масі верстата.

Отже, виникає унікальна можливість відновлення механічної системи верстата завдяки сучасним технологіям і використанню нової потужної системи керування обробним верстатом.

Другим напрямком продовження «технологічного життя» верстатів є замкнення технологічного кола: верстат – інструмент - деталь – система керування. На сьогодні ця проблема вирішується частково, або зовсім не вирішується. Здебільшого це є не стільки проблема механічної частини верстата, скільки проблема типової тенденції розвитку керуючих систем CNC, і не стільки у нас в Україні, скільки в закордонних системах. Основною тенденцією цієї тези є та, що механічні процеси, котрі відбуваються при обробці металу, є досить повільними, а відтоді немає необхідності проектувати системи CNC із високою швидкістю аналізу процесу металообробки. Ця теза є згубною, оскільки існує причинно-наслідковий зв'язок: спочатку йде

руйнування матеріалу різальним інструментом, і тільки потім виникають різні вторинні процеси. За таких обставин, як показує чинний аналіз технологічних процесів, достеменно реєстрація моменту торкання інструмента до поверхні деталі є фундаментальною проблемою сучасного виробництва.

Працюючи в напівавтоматичному чи автоматичному режимі, верстат із системою ЧПК, по-перше, повинен забезпечити точність обробки, що залежить від сумарної похибки обробки [13, 19, 20, 21]. На неї впливає низка чинників: точність верстата, точність системи керування верстатом, похибки установки заготовки, похибки налагодження інструментів на розмір, похибки налагодження верстата на розмір, похибки виготовлення інструмента, розмірний знос різального інструмента, жорсткість системи технологічного обладнання.

### **1.2.1. Точність технологічного обробного обладнання**

Точність технологічного обладнання в ненавантаженому стані називають геометричною. Залежно від характеристик забезпечення точності роботи верстата із ЧПК розподіляють у порядку зростання точності на чотири класи: Н (нормальної точності), П (підвищеної точності), В (високої точності) і А (особливо високої точності).

При перевірці норм точності верстатів встановлюють точність геометричних форм і відносного розташування опорних площин, що базують заготовку та інструмент, точність рухів за направляючими робочих органів верстата; точність розташування осей обертання і траєкторій руху робочих органів верстата, які спрямовують заготовку та інструмент відносно одне одного і відносно поверхонь, що є базовими; точність оброблених поверхонь зразка; шорсткість обробленої поверхні зразка.

Точність верстатів із ЧПК характеризують додатково наступні специфічні особливості: точність лінійного позиціонування робочих органів; величина зони нечутливості, тобто дуальність координати при зміні напрямку руху, точність повернення робочих органів у вихідне положення; стабільність виходу робочих органів у задану точку; точність відпрацьовування в режимі кругової інтерполяції, стабільність положення інструментів після автоматичної зміни.

При перевірках виявляють точність і стабільність, тобто багаторазову повторюваність приходу робочих органів у те саме положення, причому найчастіше стабільність є важливішою для досягнення точності обробки на верстатах із ЧПК, ніж сама точність.

Ці показники є табличними які наводять у спеціалізованій літератури з цього питання де вказано їх межові значення.

Загальна похибка, що допускається, при позиціюванні робочих органів визначається як

$$\Delta_p = \Delta + \delta.$$

Якщо виходити з відхилень, що допускаються, то найбільша похибка при відпрацьовуванні руху, наприклад на довжині в 300 мм по осях X і Y, для верстата класу П складе 17,2 мкм, а для верстата класу В - 8,6 мкм.

Для збереження точності роботи верстата протягом тривалого часу експлуатації проектують норми геометричної точності (при виготовленні обробного верстата) в порівнянні із нормативними параметрами, збільшеними до 40%. Тим самим завод-виготовлювач резервує в новому верстаті запас на зношування.

### **1.2.2. Точність системи керування. Основні помилки інтерполятора і режиму інтерполяції**

Інтерполятор дає визначені похибки в обробку. Як було розглянуто [8, 12, 22, 23], для інтерполяторів характерні деякі відхилення траєкторії, що відпрацьовується, від заданої. Відхилення  $\delta$  (геометрична похибка) залежить від кута нахилу траєкторії до координатних осей і не перевищує ваги імпульсу (дискрети)  $\Delta$  на ділянці будь-якої довжини в одну із сторін від траєкторії  $\pm 0,707\Delta$  на обмеженій ділянці обабіч від заданої траєкторії.

Верстатам першого покоління із дискретою до 0,01 мм і більше були притаманні значні похибки обробки, пов'язані з роботою інтерполяторів. Геометрична похибка інтерполяції для сучасних верстатів із вагою поодиначних імпульсів у (0,001 ÷ 0,002) мм є величиною надмалою, що не дає істотного впливу на точність обробки, але впливає на параметри мікрогеометрії, що виявляються у вигляді відхилень шорсткості обробленої поверхні деталі.

Зовсім інша ситуація виникає при одночасному русі робочих органів у режимі інтерполяції за декількома осями. У цьому випадку нерівномірність руху навіть за однією із координат призводить до похибки виконання траєкторії та хвилястості обробленої поверхні, тобто порушення морфології поверхні деталі.

Окрім того, існують похибки апроксимації. При використанні системи ЧПК

із лінійними інтерполяторами для обробки деталей за коловим контуром, при розрахунку координат опорних крапок у процесі підготовки технологічного процесу обробки застосовують апроксимацію кола, що пов'язано зі специфічними похибками [16, 22].

### **1.2.3. Сталі похибки, що створені внаслідок налагодження технологічного процесу**

До сталих похибок слід віднести похибки, які не є наслідком плинної зміни розташування елементів виробничого процесу, тобто, якщо немає обробки, то зміна геометрії розташування не змінюється і, як наслідок, виникають сталі похибки. До таких похибок необхідно віднести наступні [6, 18, 19, 23] типи:

- похибка встановлення заготовки;
- похибка налагодження інструментів на розмір;
- похибка налагодження верстата на розмір;
- похибки виготовлення різального інструмента.

Похибка встановлення заготовки визначається сумою помилок базування та кріплення. Всі помилки є векторними величинами і тому зазначений вище підсумок виконується геометрично. Помилка базування виникає внаслідок несполучення засадної бази із вимірювальною.

Похибка налагодження інструментів на розмір є наслідком невизначеності координати його поверхонь при попередніх вимірах перед встановленням у шпиндель верстата. Попри велику точність приладів попереднього налагоджування кінцевий результат завжди виробляється із деякими відхиленнями. Ці відхилення визначаються похибкою самого приладу та похибкою кріплення на верстаті налагодженого на розмір інструмента.

Похибки налагодження верстата на розмір полягають у погодженому встановленні налагодженого на розмір різального інструмента, робочих елементів верстата та елементів пристосувань, що базуються у просторі з урахуванням явищ, які відбуваються у процесі обробки та забезпечують отримання необхідного розміру із заданим допуском на виготовлення. Це взаємне розташування елементів технологічної системи визначають терміном «встановлений розмір». Похибка налагодження верстата виникає внаслідок того, що при пошуку нуля програми та встановленні інструментів неможливо розташувати робочі елементи верстата з інструментом точно в розрахункову позицію.

У процесі налагодження, щоб визначити встановлений розмір для кожного

інструмента, оператор використовує метод спроб робочих ходів, а в процесі подальшої обробки партії деталей — метод автоматичного отримання розмірів.

Похибки виготовлення інструмента повністю залежать від ступеню налагодженості інструментального виробництва. Так, наприклад, при фасонній токарній обробці оброблювана поверхня формується різними крапками, що розташовані на заокругленій частині верхівки різця, тобто радіусі заокруглення циліндричних поверхонь та торцевих. Цю обставину завжди враховують при програмуванні конічних і криволінійних поверхонь. При обробці конічних поверхонь досить ввести у програму корекції за віссю Z.

Якщо фактичний радіус при верхівці різця матиме відхилення від заданого програмою, то неминучим є виникнення похибок оброблюваного профілю.

#### **1.2.4. Плинні похибки виробництва, залежні від якості технологічного устаткування**

До чинників, котрі мають плинний характер у процесі виробництва слід віднести наступні:

- розмірний знос робочої частини інструмента;
- жорсткість технологічної обробної системи (ТОС);
- теплові деформації від внутрішніх напружень.

Зношування інструмента в процесі обробки може значно впливати на точність обробки, особливо при виготовленні деталей із жаростійких і жароміцних матеріалів.

Зношування інструмента, зокрема різців, по задній грані відбувається в результаті тертя між цією гранню й оброблюваною поверхнею. Критерієм зношування є розмір площини зносу задньої грані. Розмірним зносом є радіальне зменшення довжини різця по задній грані. Оскільки різець коротшає, то, як наслідок, збільшується діаметр оброблюваної деталі. Зношування різця вносить у налагодження систематичну похибку.

Підналагодження може бути ручним та автоматичним. При ручному підналагодженні верстатів із системою ЧПК оператор через визначений час за визначеним числом оброблюваних деталей вводить розмірну корекцію інструмента. За умови автоматичного підналагодження розмірна корекція вводиться програмно згідно статистики щодо стійкості роботи різального інструмента визначеного типу.

Пружні деформації є супутнім фізичним явищем, характерним для всіх елементів технологічного обладнання. Верстат, пристосування, різальний

інструмент і деталь у процесі обробки являють собою пружну систему технологічного обладнання. Сили різання при обробці викликають пружні деформації окремих елементів системи, пружні деформації в місцях з'єднань деталей механізмів, а також зсуву в цих стиках. Як наслідок, це викликає деформацію реальної системи координат на відміну від уявної.

Під жорсткістю пружної системи розуміють її здатність чинити опір деформуючій дії зовнішніх сил. За відсутності необхідної жорсткості під дією складових сили різання система ВПД деформується, що викликає відхилення від форми та розмірів обробленої заготовок. Отже, точність обробки значною мірою залежить від жорсткості ТОС, а також від жорсткості залежать умови різання без вібрацій.

Теплові деформації виникають у наслідок дії трьох чинників: виділення тепла двигунами, гідравлічною системою і частинами верстата, що рухаються (внаслідок тертя); утворення тепла в процесі різання; мінливості температури приміщення, у якому знаходиться верстат. Ці деформації дуже істотні: так, нагрів сталевго стрижня довжиною 1 м на 1°C призводить до його подовження на 11 мкм.

Теплові деформації частин верстата в початковий період роботи йдуть дуже інтенсивно, потім їхня інтенсивність зменшується, і за деякий час величина деформації стабілізується. Зміна взаємного розташування робочих органів верстата значно впливає на точність обробки, тому необхідно передбачити прогрів верстата до початку обробки деталей.

Друга практична рекомендація: при обробці деталей варто уникати тривалих зупинок і зберігати визначений ритм чередування роботи і перерв на зміну заготовок.

Заготовкам завжди притаманні внутрішні напруження. Вони виникають в результаті нерівномірного охолодження окремих частин заготовок при литті, штампуванні, куванні, зварюванні, термообробці й обробці різанням. З часом внутрішні напруження поступово вирівнюються і зменшуються, водночас, заготовка деформується. Особливо активно жолобиться заготовка в процесі обробки, коли знімаються поверхневі шари, які є найбільш напруженими, відбувається перерозподіл напруг і заготовка деформується. Для зменшення впливу цих деформацій на остаточні результати обробки чорнові ходи необхідно виокремити від чистових, тому що саме під час чистового ходу досягається необхідна точність розмірів та геометричної форми деталі. Для забезпечення високої точності обробки між чорновими та чистовими



операціями варто виконувати природне чи штучне старіння.

### **1.3. Аналіз приладів контролю точності виконання деталей у процесі обробки металу**

Задача керування точністю виготовлення деталі на сучасному технологічному обладнанні має два напрямки:

- 1) пасивне керування точністю;
- 2) активне керування точністю [4, 6, 16, 19, 23].

Пасивне керування якістю обробки деталей ґрунтується на прогнозі ходу такого процесу та попереднього визначеного добору низки його вхідних параметрів при проектуванні технологічного процесу і виборі устаткування з метою зменшення дії причин, що викликають похибки. Здебільшого використовуються два методи:

- а) вибір оптимальних режимів обробки [24];
- б) збільшення жорсткості ТОС і підвищення її точності.

Активне керування точністю технологічних процесів за допомогою системи активного контролю технологічних операцій (САКТО) можна виконувати за вхідними характеристиками цього процесу. Керування точністю за вхідними даними полягає в періодичній зміні рівня налагодження устаткування при відхиленні поточних дійсних розмірів оброблюваної деталі більш встановленого відхилення.

Аналізуючи прилади контролю точності виконання деталей, необхідно зауважити те, що здебільшого вони виконують подвійні та потрібні функції [25, 26].

Подібна ситуація виникає тому, що більшість виробників подібних приладів намагаються всіляко забезпечити їх попит. Як наслідок, створюють прилади із більш-менш універсальними якостями. За аналізом сучасного стану цієї галузі можна констатувати появу досить широкого асортименту подібних приладів. Досить велику кількість цих приладів становлять прилади посереднього контролю розмірів інструмента і деталі (АВГ, ПВГ, АНБ, ПНБ). Загальна вада цих приладів полягає в тому, що їхній універсалізм є обмеженим, тобто використання певного приладу на верстаті типу ОЦ ще не означає можливість його використання на верстатах токарної та шліфувальної груп. За таких умов особливої ваги набувають прилади контролю безпосередньо контролюючі інструмент як основний чинник формотворення (АЧТІ, ПЧТІ). Таким системам чутників притаманні не тільки здібності щодо контролю розмірів деталі, але і

зносу інструмента і його критичного стану [25, 27, 28, 29, 30, 31].

Загально-статистичний аналіз дає наступні результати щодо основних чинників руйнацій виробничого обладнання:

- помилки у програмуванні;
- неякісне кріплення інструмента і деталі;
- критичний знос інструмента;
- защемлення інструмента в масі деталі та його руйнування.

Зазвичай такі ситуації призводять до руйнування інструмента, верстата і обладнання, що є надто небажаним. Наприклад, руйнування інструмента в обробних центрах завжди викликають руйнування шпинделя (біля 90% випадків).

Звісно є можливість часткового уникнення надзвичайних ситуацій у металообробці, базуючись на відомих характеристиках стійкості різального інструмента та властивостях матеріалу деталі. Однак повне уникнення таких ситуацій без наявності приладів контролю стану інструмента, деталі та обладнання не є можливим. Збільшення кількості нових матеріалів із одночасними вимогами зростання точності визначають необхідність розробки нових засобів контролю якості металообробки.

При створенні приладів контролю стану різального інструмента та деталі виникають такі проблеми:

- необхідність високої чутливості до змін параметрів процесів металообробки;
- необхідність високої швидкодії;
- невеликі розміри, які не заважають роботі інструмента;
- максимальна надійність;
- стійкість до забрудненого середовища у зоні металообробки.

Всі ці вимоги виникають тому, що контроль процесу за критичними випадками не є задовільним. Прилади, що контролюють межові ситуації, по-перше, є мало чутливими, а, по-друге, реєструють вже завершений акт дії. Тобто, встановлення факту певної критичної ситуації не попереджає насамперед розвиток цієї ситуації і, як наслідок, наступних руйнацій. Така побудова системи контролю не виконує основної вимоги виробництва - попередження критичних ситуацій. У цьому випадку необхідно мати прилади високої швидкодії, які не поступаються своїм швидкісним аналізом процесу металообробки. Досягнення високих виробничих потужностей, сталої якості

технологічного процесу можливо лише за умов розробки контрольно-вимірювальних чутників, підсистем і модулів загального стеження та керування процесом, яким притаманні висока точність та швидкодія у загальному колі керування процесом металообробки. Характеристики таких систем контролю повинні відповідати сучасним умовам виробництва.

Основною проблемою всіх систем контролю стану інструмента та виробу є несвоєчасне визначення моменту їх торкання. Здебільшого невизначеність цього чиннику виробничого процесу призводить не тільки до надмірних перевантажень інструмента, деталі та обладнання, але й до їх руйнування. Одночасно зауважимо, що первинна оцінка якості процесу металообробки, як правило, отримується на етапі входження інструмента в повний робочий режим (тобто силове навантаження). Отримати якісний аналіз із цього перехідного процесу без точної інформації про момент торкання просто неможливо. Систем, котрі визначають момент торкання інструмента до поверхні деталі, на цей час розроблена невелика кількість. Але низка конструктивних недоліків і складність використання при встановленні на обладнання заважають їх широкому розповсюдженню у виробництві.

Підводячи підсумок вищесказаному та висновкам, зробленим стосовно можливостей різних систем [23, 25, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40] необхідно констатувати той факт, що найбільш корисні для використання поставленої задачі є активні чутники торкання інструмента (АЧТІ).

#### **1.4. Порівняльний аналіз методів і приладів контролю точності роботи верстатів із ЧПК**

Як показує низка наукових робіт [23, 36, 41, 42, 43, 44] та авторські дослідження [24, 27, 34, 45, 46, 47] пов'язані з проблемами контролю стану деталі, різального інструмента, технологічного обладнання, необхідно мати спеціальні прилади, які мають можливість виконувати ці технологічні операції.

Так, наприклад, система [48] (рис. 1.1) прогнозування стану РІ призначена для систем керування технологічними процесами обробки матеріалів на верстатах із ЧПК у режимі зворотнього зв'язку із ТОС. Система визначає аварійні ситуації та знос РІ під час роботи металообробного верстата на підставі аналізу сигналу ВАЕ, для чого у системі є відчутник ВАЕ (стандартний п'єзоакселерометр). Сигнал відгуку системи ТОС на сигнал ВАЕ надходить у систему підсилення та обробки, надалі перетворюється у дискретну форму та



надходить до системи ЧПК верстата.

Система обробки сигналів від ТОС реєструє наявність і характер автоколивань обладнання. Під час обробки фіксуються значення спектральної густини сигналів при гострому РІ для порівняння їх зі значеннями плинних значень спектральної густини сигналів під час роботи обладнання.

Окрім цього, порівняння здійснюється також перехресне порівняння спектральної густини сигналів за різними каналами для підвищення точності визначення ситуації.

Автоматизація процесу обробки дискретних сигналів, що надходять до мікропроцесору системи, здійснюється триканальним блоком торкання, на вхід якого надходять сигнали від технологічної системи обробки. Отже, система фіксує момент торкання РІ поверхні деталі та надає контрольні сигнали, що характеризують стан плинного процесу та інструмента.

Втім, якщо торкання зникає, система подає сигнал про відсутність торкання верхівки РІ з поверхнею деталі. При їх появі знов починається циклічне опитування, яке врешті визначає сигнал аварійної ситуації. Проте ця система, по-перше, є дуже складною у реалізації, а, по-друге, є дуже складною за математичним апаратом обробки, що неодмінно впливає на точність та достовірність результатів, а також впливає і на швидкість системи обробки. Тобто її застосування у промислових умовах є дуже проблематичним.

З усього вищесказаного слідує висновок, що у всіх виробничих ланках необхідно мати плинний контроль якості виконання того чи іншого виробничого процесу.

Наріжною необхідністю виконання дій відтворюючих дії оператора є необхідність отримання високоякісного вимірювання моменту торкання. Основна проблема при копіюванні дій оператора полягає в оцінці якості та забрудненості поверхні, яка підлягає торканню. Визначення ступеню забрудненості та якості поверхні є основною проблемою чутників торкання. Для того, щоб обминути визначену проблему, у технологічних системах використовуються системи очистки деталі на різних етапах роботи. Такий підхід до вимірювання дозволяє досить значно збільшити вірогідність точного вимірювання.

В умовах сучасного виробництва сформовано три основні різновиди конструкцій щодо застосування чутників торкання (рис. 1.2) [49, 50]. Найбільш поширеними є активні вимірювальні головки (АВГ) (рис. 1.2,а).

Щуп-головка	Нульова База	Інструментальний чутник торкання
(АВГ, ПВГ)	(АНБ, ПНБ)	(ПЧТІ, АЧТІ)
		
<p>1) контроль розташування та розмірів виробу</p> <p>2) контроль розташування нульової бази</p>	<p>1) прив'язка інструмента до системи координат</p> <p>2) контроль зносу інструмента</p>	<p>1) контроль розташування та розмірів деталі та інструмента</p> <p>2) обробка деталі</p> <p>3) контроль зносу інструмента</p> <p>4) захист від надзвичайних ситуацій</p> <p>5) прив'язка до нульової бази</p> <p>6) обробка поверхні</p>
а)	б)	в)

Рис. 1.2. Класифікація найбільш поширених типів чутників торкання різального інструмента до поверхні деталі у процесі її виготовлення

Подібна вимірювальна головка інформує систему CNC про торкання щуп - штангою поверхні деталі (тобто імітує інструмент). Така АВГ має можливість виконувати дві технологічні функції:

- контроль розташування деталі у виробничому просторі та її розмірів;
- контроль розташування нульової бази, визначення її відносних координат.

На другому місці за поширеністю є нульова база (ПНБ, АНБ) (рис. 1.2,б). За принципом роботи це така ж сама система, як і АВГ, тільки розташована на нерухомих частинах обладнання і легкодоступних для інструментів (імітує деталь).

Така АНБ (ПНБ) вирішує дві технологічні функції:

- прив'язка інструмента до системи координат верстату;
- вимірювання зносу інструмента.

Дуже часто цей прилад має модифікації у вигляді різного типу калібрів, але всі вони виконують ті ж самі функції.

Третім за поширенням є інструментальний чутник торкання (ЧТІ), який встановлюється безпосередньо на різальному інструменті або у безпосередній близькості до нього.

Технологічні функції, на які спроможна така система торкання, є наступними:

- контроль розташування та розмірів виробу;
- обробка виробу різанням;
- контроль зносу інструмента;
- захист від надзвичайних ситуацій;
- прив'язка до нульової бази;
- обробка поверхні деталі.
- Розподіл систем торкання на пасивні та активні проводиться за принципом – сповіщає чи не сповіщає система до CNC інформацію про момент торкання.

Порівняльний аналіз усіх трьох напрямків розвитку приладів контролю вказує на явну зверхність останнього напрямку розвитку чутників. При явній зверхності цього типу чутників є досить серйозною завадою на шляху їх використання. Сутність її полягає в тому, що типове металообробне обладнання абсолютно не пристосоване до такого типу чутників.



Як виявили авторські дослідження, найбільш оптимальним випадком є випадок, коли чутник торкання встановлюється на робочому інструменті або у безпосередній близькості до нього. Таке розташування чутника дає можливість отримувати інформацію про стан торкання у значно більшій якості, ніж у всіх інших способах (рис. 1.3). У такому варіанті обробки металу різальний інструмент комплексно виконує дві технологічні функції: обробка металу та обмір отриманого результату.

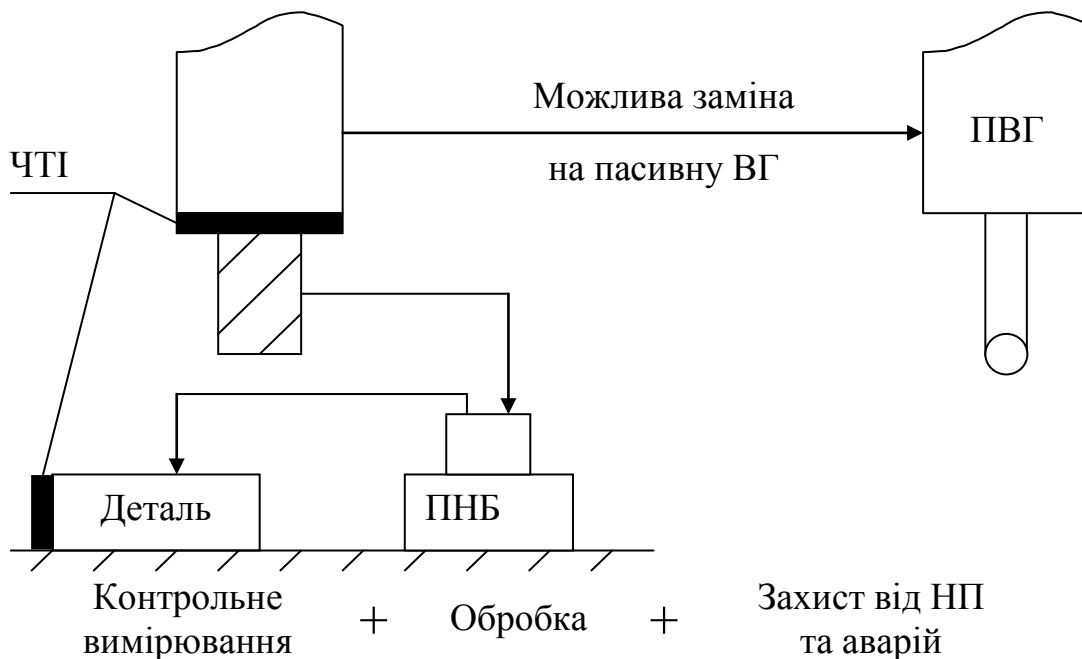


Рис. 1.3. Схема виробничого комплексу контролю розмірів інструмента і деталі.

Наявність відносно недорогої ПНБ надає можливість контролювати розміри абсолютного зносу інструмента. Але особлива привабливість цього варіанту полягає в тому, що чутник торкання є системою захисту інструмента від надзвичайних подій у зоні обробки.

Методологія процесу торкання має на своїй конкретній меті отримання високих результатів точності вимірювання моменту торкання і, як наслідок, моменту торкання.

Вибір основної методології торкання базується на фізичних якостях об'єкту торкання та інструмента які визначають фізичну природу чутника торкання. Другим чинником, що впливає на обрання методу торкання, є необхідна точність виконання вимірювання. Залежно від цих чинників впливу обирається

швидкість торкання та кількість торкань задля уточнення координат. У деяких наукових роботах розглядається це питання, але без необхідної конкретизації методології цього процесу [28, 29, 42]. Таке самоусунення від пошуку нових методологічних принципів призводить до якісних втрат у цьому напрямку роботи над системами торкання.

Між тим процес торкання є дуже тонкий метод перетворення інформації про торкання об'єктів технологічного процесу в інший вид інформації, загальноприйнятий для систем CNC. Він повинен нести інформацію не тільки про сам факт торкання, а і про якість цього процесу. У цих двох вимогах наявне протиріччя із тієї причини, що будь-який чутник торкання повинен мати неймовірно високу чутливість до факту торкання з одного боку, і обмежену з огляду на контроль якості процесу торкання. Таку вимогу висуває необхідність контролю стану робочого інструмента. Але загальна сучасна методологія побудови чутників торкання базується на отриманні надвисоких характеристик реєстрації торкання, зневажаючи зони нечутливості та вводячи різного роду інтегровальні пристрої. Тим часом є необхідність підвищення не чутливості, а швидкодії, котра дає допомогу в швидкому розпізнаванні моменту торкання від перешкоди. Здебільшого в системах торкання вводять інтегровальні елементи, які значно затримують швидкість аналізу та погіршують швидкісні показники чутників щодо первісних. Система чутника будь-якої конструкції вже є інерційною і має інтегровальний характер, тому немає необхідності погіршувати показники всієї системи в цілому [43, 45, 51].

Первинним чинником дії для системи торкання є факт торкання матеріальних технологічних мас, які призводять до розмірних змін фізичних і хімічних параметрів. Величини цих змін реєструє первинний перетворювач (відчутник). Тип відчутника обирається за принципом максимальної чутливості до обраного фізичного або хімічного закону. Сигнал із відчутника надходить до аналізатора моменту торкання, який аналізує сигнал і сповіщає про це утворювач сигналу торкання. Цей утворювач, в свою чергу, аналізує отриману інформацію і на своєму виході формує сигнал “Присутність” та “Торкання”. Особливістю найкращих систем чутників торкання є можливість формувати сигнал “Відстань”, який приблизно вказує відстань до об'єкту торкання.

Якщо звернутись до внутрішньої побудови систем чутників торкання (СЧТ) [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63], то можна побачити велику кількість варіантів. Така кількість варіантів пояснюється величезною кількістю типів відчутників, а також варіантів обробки інформації. Як вже вказувалось

вище, процес торкання як такий породжує велику кількість фізичних і хімічних ефектів. Здебільшого на ці ефекти реагують специфічні перетворювачі, які розроблялись саме для реєстрації такого ефекту. Звідсіля слідує і принцип вибирання відчутника. Перелік таких принципів короткий, бо їх усього два:

- принцип вибору оптимального співвідношення між чутливістю та швидкодією;
- принцип зручності користування.

Ці два принципи є превалюючими при виборі, тому що надійність усієї системи у цілому залежить від надійності виконання саме цього вузла системи.

Найбільш складні прилади цього типу мають системи самоконтролю, які охоплюють зв'язками контролю всі вузли системи чутника і формують сигнал "готовність". Для посилення фізичного ефекту при торканні може застосовуватись генератор підсилення фізико-хімічного ефекту, який покладено у засади роботи чутника торкання.

Відповідно до викладеного вище, а також з огляду на актуальність проблеми підвищення точності та стабільності роботи фрезерних верстатів взагалі, і у приладобудуванні зокрема, створення приладів активного контролю, модернізація існуючих систем керування та розробка програмного забезпечення адаптивних систем керування технологічним процесом обробки металу є необхідною вимогою сьогодення.

Відповідно до мети досліджень було поставлено основні задачі, які полягали у наступному. Необхідно було дослідити процес отримання та обробки інформації для активного контролю моменту торкання різального до поверхні деталі при фрезеруванні. Водночас необхідно було визначити можливості стосовно підвищення точності виготовлення деталі при використанні чутника торкання на фрезерних верстатах та можливості стосовно підвищеного ресурсу роботи обробного верстата.

#### **1.4.1. Загальні підходи до підвищення точності виготовлення деталей приладів у промисловому виробництві**

Ефективність будь-яких технологічних процесів визначається комплексом спеціальних заходів. Базуються ці заходи на дослідженні технологічних чинників, що впливають на якість виробництва, тобто згідно досліджень, проведених у [1-5, 15, 16, 18, 20, 28, 32, 36, 62, 64 - 67]:

- чинників, що впливають на точність роботи металообробного обладнання;

- чинників, що впливають на якість виробів при застосуванні нових технологій;

- чиннику методу контролю виробу та технологічного обладнання.

Основними вимогами до будь-якого промислового виробу і, як наслідок, до будь-якої деталі, яка входить до нього, є дві вимоги:

- якість роботи за функціональним призначенням;

- якість поверхні, яка повинна задовольняти вимогам роботи виробу.

Якість роботи за функціональним призначенням містить у собі здібність роботи виробу за його прямим призначенням у широкому розумінні цього слова. Для виконання свого функціонального призначення будь-який виріб повинен у своїх розмірах відповідати цим вимогам, тобто є вимога отримання стабільних високоточних розмірів.

Ще одним чинником, який впливає на якість роботи виробу, є якість обраного матеріалу, тобто його механіко- та фізико-хімічні властивості. Від цих властивостей залежить тривалість виконання виробом свого функціонального призначення. Всі ці вимоги до виробу повинні бути підконтрольними впродовж усього технологічного процесу.

Другою вимогою до виробів є якість поверхні після її обробки. Основна увага тут приділяється на фізико-механічні та хімічні характеристики. До таких характеристик треба віднести твердість, деформаційні утворення, фазові та структурні перетворення, глибина розповсюдження залишкових напруг, хімічний вміст поверхневого шару.

Якість поверхні також залежить від шорсткості поверхні після обробки матеріалу. Всі ці параметри поверхні повинні бути підконтрольними залежно від технічних умов, що висуваються до виробу, тобто забезпечувати плинний контроль якості виготовлення деталі.

При ручному способі виготовлення на універсальних верстатах проводиться контроль розташування заготовки та її корекція. Виконується ця технологічна операція вручну оператором. Для визначення вірності розташування оператор повинен увімкнути головний рушій, щоб визначити межу коливань заготовки у патроні (токарне виробництво) і торкнутись різальним інструментом деталі для подальшого визначення розмірів режиму обробки. Для фрезерних верстатів потрібно робити теж саме. Торкання у обох випадках необхідно для прив'язки інструмента і деталі до координатної системи верстатів. У подальших технологічних операціях обробки оператор постійно користується методологією торкання інструмента і виробу з метою отримання необхідного

розміру. За таким способом виробництва точність отримання кінцевого розміру виробу є не дуже високою і дуже тривкою у часі. Найкращий результат щодо точності при ручному торканні не перевищує 10 мкм, а здебільшого коливається у межах від 50 до 100 мкм. Проблема ця виникає від того, що торкання оцінюється візуально по сліду на поверхні виробу і надто залежить від людського чиннику, умов спостереження та якості перетворення руху руки у рух інструмента. Вимірювання виробу безпосередньо на верстаті має теж свої вади. Це є якість вимірювального інструмента, а також можливість вільного доступу до виробу, який зазвичай не завжди задовільний. Все це потребує додаткових витрат часу на зупинку верстата та сам процес вимірювання тому, що процес вимірювання розміру потребує чистої поверхні, правильного розташування інструмента і сталої сили торкання.

У напіваавтоматичних способах виробництва вхідний контроль розташування заготовки не здійснюється, тому що ця технологічна операція виконується системою упорів та калібрів.

Зазвичай такий спосіб розташування заготовки у виробничому просторі є не досить точним. Окрім того, існує можливість потрапляння заготовок з неякісною геометрією. Усі ці чинники у більшості випадків є причиною надзвичайних ситуацій у виробництві. Безпосередній доступ до виробу у процесі такого виробництва неможливий. Є можливість тільки констатації факту отриманих розмірів щодо виходу деталі з робочої зони. Оператор у такому випадку контролює розміри отриманого виробу і здійснює корекцію розташування робочого інструмента, як наприклад, у кулачкових напіваавтоматах. Основною причиною використання такого напіваавтоматичного способу виробництва, не дивлячись на можливість надзвичайних ситуацій, є можливість великих потужностей масового виробництва при задовільній точності. Причиною надзвичайних ситуацій у такому способі є відхилення позиціонування заготовки та зношення інструмента. Стале програмне забезпечення процесу металообробки розраховане зазвичай на певне межове відхилення у геометрії заготовки та при відсутності реєстрації моменту торкання. Навіть з дефектною заготовкою ця програма працює як з нормальною. За таких умов визначеного виробництва оператор є постійним спостерігачем та коректором процесу, контролером кінцевого продукту.

Автоматичне або адаптивне виробництво є копіюванням ручного виробництва, але при заміні функцій оператора функціями автоматичних систем. Точність виконання технологічних операцій автоматичними системами

набагато вища і швидша за можливості оператора. Єдине, у чому програє будь-яка автоматична система людському контролю, - це інтегральний контроль процесу обробки та його інтерполяція у розвитку, але це справа часу. Наріжною необхідністю виконання дій, які відтворюють дії оператора, є необхідність отримання високоякісного вимірювання моменту торкання. Основна проблема при копіюванні дій оператора полягає в оцінці якості та забрудненості поверхні, яка підлягає торканню. Визначення ступеню забрудненості та якості поверхні є основною проблемою чутників торкання. Для того, щоб обминати цю проблему, у технологічних системах використовуються системи очистки деталі на різних етапах роботи. Такий підхід до вимірювання дозволяє досить серйозно збільшити вірогідність точного вимірювання.

Отже, з усього вище сказаного, можна сформулювати низку проблем та задач, які вимагають дослідження. Тобто ми маємо взаємодію різального інструмента і матеріалу заготовки, яка визначає формотворення нової деталі. Всі процеси, з якими нам необхідно визначитись, будуть стосуватися визначення моменту торкання РІ та деталі, а також місця розташування крапки торкання, тобто її координат. Звідси ми отримуємо низку фізико-технічних явищ, які підлягають ретельному дослідженню.

По-перше, поверхня будь-якого об'єкту, в тому числі і ТО (інструмент, деталь, верстат), є зосередженням його маси. Поверхня АС завжди замкнена у просторі, а її форма визначає просторовий розподіл маси. Будь-яка АС не може бути стабільно розташована не тільки у визначеній системі координат, а і у довільно обраній, оскільки це є протиріччям стосовно постулатів фундаментальної фізики [68, 69, 70, 71, 72]. Може йтися лише про відносну стабільність, яка нас задовольняє. Тому на всіх рівнях рухомості спостерігаються зони, де маса АС присутня періодично, тобто існує ефект панданності. Сутність явища панданної зони полягає у тому, що якась частина маси від суцільного монолітного об'єму до його зовнішніх (периферійних) координат поступово зменшується, поки не сходить нанівець. Особливістю панданної зони є її циклічність, тобто під час руху маса АС виникає періодично і досягаючи свого максимального значення поступово зникає. Така властивість притаманна і деталі, і інструменту, і будь-якому іншому ТО. Саме ця властивість визначає якість визначення моменту торкання РІ з деталлю.

По-друге, поверхня будь-якого АС, в тому числі і ТО (інструмент, деталь, верстат), є основою створення навколишніх польових структур. Такі польові структури виконують лише однозначну функцію – вони сповіщають у

навколишній простір про параметри АС, а у приватному випадку – ТО. Стосовно фізики генерації польової структури як такої, то вона повністю залежна від внутрішньої побудови АС. Але зовнішня зона присутності повністю визначається формою (геометрією) АС і, як наслідок, ТО.

Існуючий розподіл польових структур вказує на те, що серед них є можливість відокремити наступні:

- Оптичні польові структури, які досить легко контролюються людиною;
- Акустичні польові структури, які не досить повно контролюються людиною;
- Електрофізичні польові структури, які лише посередньо можуть контролюватися людиною.

В основі подібної градації покладено чутливість різних приладів (людини) до тієї чи іншої структури. Не дуже заглиблюючись у сутність реєстрації тієї чи іншої польової структури, необхідно зауважити, що все побудовано за принципом можливостей оцінки спектру АС. Якщо оптичне (світлове) поле оцінюється досить гарно, тобто за максимальною кількістю інформації, то, наприклад, електрофізичні явища (властивості) можна оцінити лише за допомогою спеціалізованих приладів, та й то у вузькому діапазоні параметрів польової структури.

Окрім того, будь-яка полева структура має відповідні модуляції. В основі цих модуляцій покладено властивості АС як такого. Але основну модуляцію зони присутності створює рух АС. Як наслідок такого руху (панданна зона АС) зона присутності виявляється нестабільною за потужністю, що вимагає відповідних технічних рішень.

По-третє, панданна зона будь-якого АС, а також і ТО, завжди, без виключень, буде мати два рівні. Зовнішній рівень буде обумовлений геометрією максимального (одного) виступу над поверхнею та траєкторією його руху. Внутрішній рівень буде обумовлений геометрією мінімальної западини та траєкторією її руху. У загальному випадку ці відстані (максимальна та мінімальна) завжди зорієнтовані відносно траєкторії руху АС або ТО. Для ТО це є особливо важливо, оскільки центр маси та центр руху не завжди співпадають. Як наслідок між цими двома уявними поверхнями розташована реальна поверхня АС або ТО. Таким чином, виникає проблема, де саме відбувся процес торкання інструмента і деталі, адже він може бути реалізованим лише у межах панданної зони. Окрім того, виникає ще одна

проблема, а саме взаємна компенсація панданних зон інструмента і деталі. Таке взаємне поглинання панданних зон супроводжується ще одним явищем, а саме: коли чутник визначає інформацію про торкання у процесі руху. Як наслідок виникає динамічна похибка визначення координати. Отже, якщо підсумувати все вище сказане, то необхідно зауважити, що у будь-якому випадку будь-яка координата може бути визначена лише у подвійний спосіб, тобто виникає ефект дуальності поверхні. Сутність дуальності полягає у тому, що маючи дві координати поверхні, необхідно визначитися з питанням, де саме знаходиться реальна поверхня ТО.

По-четверте, існує певна нелінійність координат як уявної, так і реальної. Нелінійність уявної координати є повністю залежною від системи чутників, які її визначають. Система чутників по координатах є цілком реальна конструкція з своїми конструкційними похибками. Тобто, попри всю свою досконалість та точність вона спирається на комплекс похибок, які притаманні реальній системі. Реальна система координат будь-якого верстата без виключень має похибки, які повністю залежні від його конструкції та низки технологічних похибок при виготовленні. Цілком зрозуміло, що подібна комбінація (векторна сума) координат буде вкрай непевною. Введення електронної корекції в системі координат не вирішує цієї проблеми похибок, оскільки об'єм пам'яті CNC кінцевий, а корекція за об'ємом вимагає в десятки разів більшого. Навіть, якщо реалізувати подібну корекцію, це призведе до затягування часу вирішення задачі стосовно реальної координати деталі та інструмента. Окрім того, як наслідок є те, що робоча площа верстата (1D, 2D, 3D) використовується лише на окремих ділянках. Ці ділянки піддаються найбільшому навантаженню і, як наслідок, більш швидкому зносу. Саме на цих ділянках виникає максимальна величина дуальності в той час, коли до 60% площі практично не експлуатується. Верстат, фактично, визнається повністю зношеним, коли саме у цих частинах площини робочого столу він втратив точність. Але це не є раціональним і з технічного погляду, і економічного. Адже повний ресурс верстата не є використаним. Отже, з одного боку є повністю зношений фрагмент координат робочої поверхні верстата в той час, як інші зберегли практично первинну точність виготовлення. Як наслідок, деталь, яка встановлена на робочому столі верстата і має кінцеві розміри (конструкційні), може бути виготовлена з різною точністю. Якщо відкинути вторинні ознаки і зосередитись на якомусь одному розмірі деталі і прослідкувати точність його виконання, то можна констатувати той факт, що існують зони, де точність вища



і є зони, де точність нижча. Тобто, весь об'єм верстата умовно можна розподілити на ділянки високої та низької точності. Найкраще це буде видно, якщо у таку зону вноситься куб з метрологічною геометрією форми та розмірів. Різниця у розмірах між тим, що фіксує система CNC та реальним об'єктом (кубом) покаже реальну похибку всієї системи у замкненому циклі, що є, наприклад, характерним для контурного фрезерування. Тобто, у цьому випадку будемо мати максимальне співпадіння координат та розмірів. Користуючись аналогією з математикою, маємо право стверджувати, що в основі геометрії та розмірів кубу ми можемо визначити градієнт просторової похибки у визначеній робочій зоні верстата.

По-п'яте, з усього вище наведеного необхідно зробити вагомий висновок, а саме – у системі уявних та реальних координат повинен бути зворотній зв'язок, який визначає величину розходження між ними. Виконати подібне завдання може лише прецизійна система контролю торкання (СКТ). До такої системи контролю висуваються наступні вимоги:

- вимога високої чутливості до моменту торкання інструмента до деталі, тобто до фізичних явищ, які відбуваються у зоні торкання;
- вимога високої швидкодії до реєстрації моменту торкання, оскільки існує динамічна похибка і необхідно достеменно знати саме цю величину для визначення реальної координати поверхні;
- вимога чутливості до зони присутності деталі, що дає можливість створення попереджувального сигналу про можливе торкання інструмента;
- вимога до невеликих розмірів відчутника, який легко прилаштовується на інструменті та не заважає процесу металообробки;
- нескладне програмне забезпечення.

Тобто існує проблема побудови теоретичного та практичного підґрунтя до створення приладів контролю торкання між інструментом та деталлю.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Виходячи із аналізу проблем сучасного приладобудівного виробництва, аналізу існуючих методів підвищення точності та стабільності роботи металообробних верстатів, а також сучасного рівня ведення робіт в галузі створення та модернізації верстатів, можна зробити наступні основні висновки:

1. Механічна частина сучасних фрезерних верстатів із ЧПК, що застосовують при виготовленні деталей приладів, відпрацьована багаторічною практикою та піддається дуже повільним змінам.

2. Якість систем керування верстатом типу CNC і програмного керування в сучасних умовах значною мірою визначають точність роботи верстатів, здійснюється їхнє постійне удосконалення та відновлення.

3. Активні методи контролю точності дозволяють досягти більш високих результатів, їхня точність зростає в міру поглиблення зворотнього зв'язку. Проте в загальній системі технологічного обладнання перехід інструмент-деталь дуже важко піддається узгодженню через наявність стружки у робочій зоні верстату.

4. Застосування в робочій зоні верстату різноманітних існуючих чутників значно підвищує надійність роботи усього верстата.

5. Вироблено умови до системи відчутників торкання активного керування процесом різання використовувалася для верстатів токарної групи, де різальна кромка інструмента є постійною. Використання чутника моменту торкання у верстатах фрезерної групи, де використовуються багатолезові інструменти, є більш складним і потребує проведення додаткових досліджень.

6. Використання чутника моменту торкання в технологічному процесі фрезерування вимагає створення спеціального приладу керування, а також розробки алгоритмів і керуючого програмного забезпечення.

7. Безпосередньо дію на якість і швидкість виготовлення кінцевого продукту металообробки має вплив якості реєстрації процесу торкання інструмента і поверхні деталі.

8. Якість визначення моменту торкання є прямо залежною від швидкодії систем торкання.

9. Із усіх варіантів реєстрації моменту торкання найбільш ефективним є варіант за умови встановлення відчутника на різальний інструмент або у безпосередній близькості від нього.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ МОРФОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ ТОРКАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ДО ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ

Якість поверхні визначає сукупність всіх властивостей поверхневого шару матеріалу. В умовах експлуатації виробів приладобудування зовнішнім впливам, в першу чергу, піддаються поверхні взаємодії. Знос тертьових поверхонь, зародження тріщин втоми, тощо, – це процеси, котрі здійснюються на поверхні деталей і в деякому прилеглому до поверхні шарі. Природно, що надання поверхням деталей приладів спеціальних властивостей сприяє суттєвому підвищенню показників якості машин і приладів в цілому, і, в першу чергу, показників надійності. Якість поверхні є єдиним із найважливіших чинників, якій забезпечує високі експлуатаційні властивості деталей приладів. Найбільш суттєвим для практики приладобудування є встановлення залежностей між параметрами конкретного технологічного процесу обробці поверхні, показниками якості поверхневого шару та показниками деталей машин і приладів в експлуатації.

Використання робочого інструмента у якості вимірювального приладу має цілу низку переваг у порівнянні із звичайним технологічним процесом. Фрезерний інструмент (фреза) як формотворчий об'єкт має кінцеву точність виконання, про основні проблеми якої було згадано у п.р. 1.2.4. Будь-який фрезерний верстат або обробний центр має специфічні координатні похибки у розташуванні своїх робочих поверхонь [1, 2, 15, 20]. Але необхідно зауважити, що основну увагу в роботах [12, 18, 66] зосереджено на похибках виконання механіки рушійних систем та похибок зв'язаних з межами можливої точності виконання окремих вузлів та агрегатів верстата. Все це призводить до того, що існує просторове поле похибок обробного верстата, котре може бути запрограмоване у пам'яті системи керування CNC. Але наявність точності виконання остаточних розмірів інструмента, а також можливостей зносу робочих поверхонь верстату зовсім не враховано. Окрім того, існує низка проблем, пов'язаних із самою поверхнею деталі як такою, тобто реальний розмір поверхні являє собою комплексну координату із різних її спотворень та наслідків металообробки. Звідсіля випливають наступні технологічні проблеми визначення координати торкання поверхні деталі робочим інструментом, які розглядаються у цьому розділі:

- поверхня технологічного об'єкту як предмет торкання інструмента до його

поверхні;

- фрезерний інструмент як вимірювальний у технологічному процесі фрезерування;
- технологія торкання інструмента до поверхні деталі та чинники впливу на якість цього процесу.

Складність рішення задач, пов'язаних із нормуванням, технологічним забезпеченням і контролем геометричних параметрів морфології поверхонь (відхилення форми, хвилястість і шорсткість), полягає в тому, що їх досить складно виокремити. У реальних поверхнях може зустрітись їх комбінації.

## **2.1. Фізико-технологічні ознаки морфології поверхні торкання різального інструмента і деталі**

Якість поверхневого шару матеріалу обумовлено властивостями матеріалу і методами обробки: механічної, електрофізичної, електрохімічної, і т.д. У процесі механічної обробки (різання лезовим інструментом, шліфування, полірування тощо) поверхневий шар деформується під дією навантажень і температури, а також забруднюється домішками (частинками абразиву, кисень) та іншими інорідними включеннями.

Під терміном поверхневий шар приймається сама поверхня і її деякий поверхневий шар, який відрізняється від матеріалу серцевини деталі. Глибина шару  $h$  (рис. 2.1,а) розрізняється залежно від умов експлуатації деталі (від декількох мікрометрів для вимірювального калібру до декількох міліметрів для валу машин). Схематична будова поверхневого шару приведена на рис. 2.1,б. Зміцнений шар, якій складається із верхнього шару 1, шару 2 із текстурою, в якому зерна мають переважну орієнтацію, і пластично деформованого шару 3, який має зменшену густину в порівнянні із серцевиною 4, в ньому суттєво збільшено кількість дислокацій та інших дефектів будови кристалічної ґратки. Цей шар має збільшену твердість у порівнянні із серцевиною.

Якість поверхневого шару визначається двома групами характеристик. Геометричні характеристики якості поверхні: відхилення форми (макрогеометрія); хвилястість, шорсткість (мікрогеометрія); субмікрошорсткість.

Їх розрізняють за критерієм, яким слугує відношення кроку  $S$  до висоти нерівностей  $R$ :

- відхилення форми  $\frac{S}{R} > 1000$ ;

- хвилястість  $\frac{S}{R} = 50 \dots 1000$ ;
- шорсткість  $\frac{S}{R} < 50$ .

Субмікроскопічний рельєф (СМР) поверхні має особисту природу виникнення: його параметри насамперед залежать від внутрішніх недосконалостей металу, який деформується, і прикладених напружень. Для якісних і кількісних характеристик СМР велику роль грають плівки окислів і абсорбованих шарів рідини. Кількісний характер СМР визначений величиною виступів і упадин, їх формою і частотою розташування на поверхні матеріалу.

Відомо вплив СМР, наприклад, на адгезію, адсорбцію, відбиваючу здатність та ін. Але закони утворення СМР і чисельні характеристики, як при його виникненні, так і при навантаженні, наприклад, тертям, поки що не достатньо вивчені та при оцінці якості поверхні не враховують, а тому не нормують.

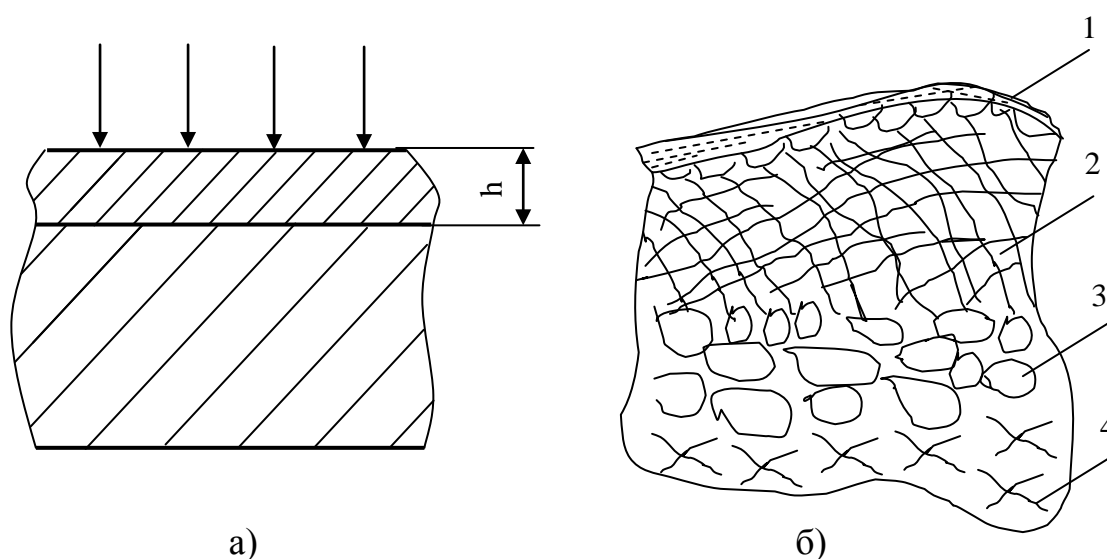


Рис. 2.1. Внутрішня структура поверхневого шару деталі

Існує межа технологічної точності виконання деталей незалежно від точності виконання технологічного обладнання, яка вказує на те, що основним чинником цієї проблеми є несталість поверхні деталі у часі та просторі [67]. Так, наприклад [31] доводиться, що така межа коливається у межах від 3 до 4 мкм для верстатів із точністю позиціювання в 1 мкм. Але слід зауважити, що ця робота виконана на верстатах, що виготовлені майже тридцять років тому.

Тут необхідно визначити той факт, що подібні верстати мали дещо іншу систему контролю координат ніж зараз. Тим не менш, навіть за тієї недосконалої системи реєстрації координати визначалася можлива точність отримання координати торкання інструмента із поверхнею деталі і, як наслідок, означеної точності. Застосування нових систем контролю координати (лазерних систем, індукторів тощо) [43, 56, 63] дозволяє значною мірою знизити похибки координації інструмента в просторі зони механічної обробки. Попри всі сучасні досконалі технічні вирішення задач стосовно координатного розташування основної координати шпинделя інструмента існує проблема визначення координати поверхні технологічного об'єкту, котрого повинен торкнутися інструмент. У загальному випадку поверхня деталі має два наступні розширення стосовно технологічного процесу (рис. 2.2).

Наявність таких нашарувань є наслідком впливу технологічних процесів на виготовлення деталі. Тут необхідно відрізнити два джерела впливу на розмір поверхні. Це, по-перше, геометричні спотворення, що виникають під час технологічного процесу виготовлення деталі, які мають виключно механічне походження. По-друге, це хімічне спотворення поверхні металу заготовки, котре є наслідком взаємодії матеріалу деталі із навколишнім середовищем (повітря → кисень, азот та інші активні сполуки) і фактично ніколи не припиняються, хіба що, коли були застосовані спеціальні засоби захисту. Цей безперервний хімічний процес є найбільш вагомим із впливом на невизначеність координати поверхні, оскільки є плинний у часі. Обидва наведені джерела створюють комплексний вплив на реальні розміри заготовки та деталі через глибинні поверхневі спотворення.

Глибина подібних спотворень поверхні має, в першу чергу, значний механічний характер, тобто, мушлі, шліри, тріщини різної глибини, тощо. Із цієї низки проблем необхідно визначити два особливо впливових чинника, котрі впливають на невизначеність координати поверхні деталі – це геометричні деформації та шорсткість поверхні які займають здебільшого переважну вагу при визначенні координати торкання різальним інструментом поверхні деталі.

Зовнішня поверхня будь-якої деталі являє собою так звану крицю, тобто шар окислу, який є продуктом хімічної реакції матеріалу деталі з киснем атмосфери. Звичайно у технологічних процесах подібні нашарування мають у своєму складі не тільки продукти хімічної реакції із киснем повітря, але і продукти хімічних сполук, отриманих як наслідок попередніх технологічних

процесів, як наприклад литва, котре має ваду дифузії кремнію у технологічний розплав (рис. 2.3).

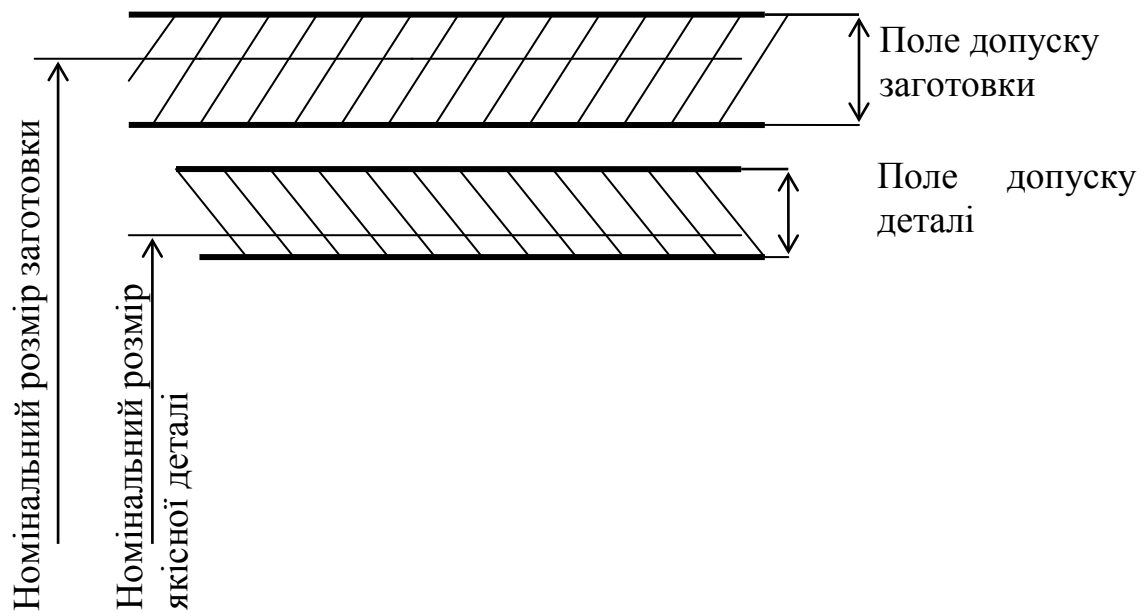


Рис. 2.2. Поле допусків заготовки та деталі

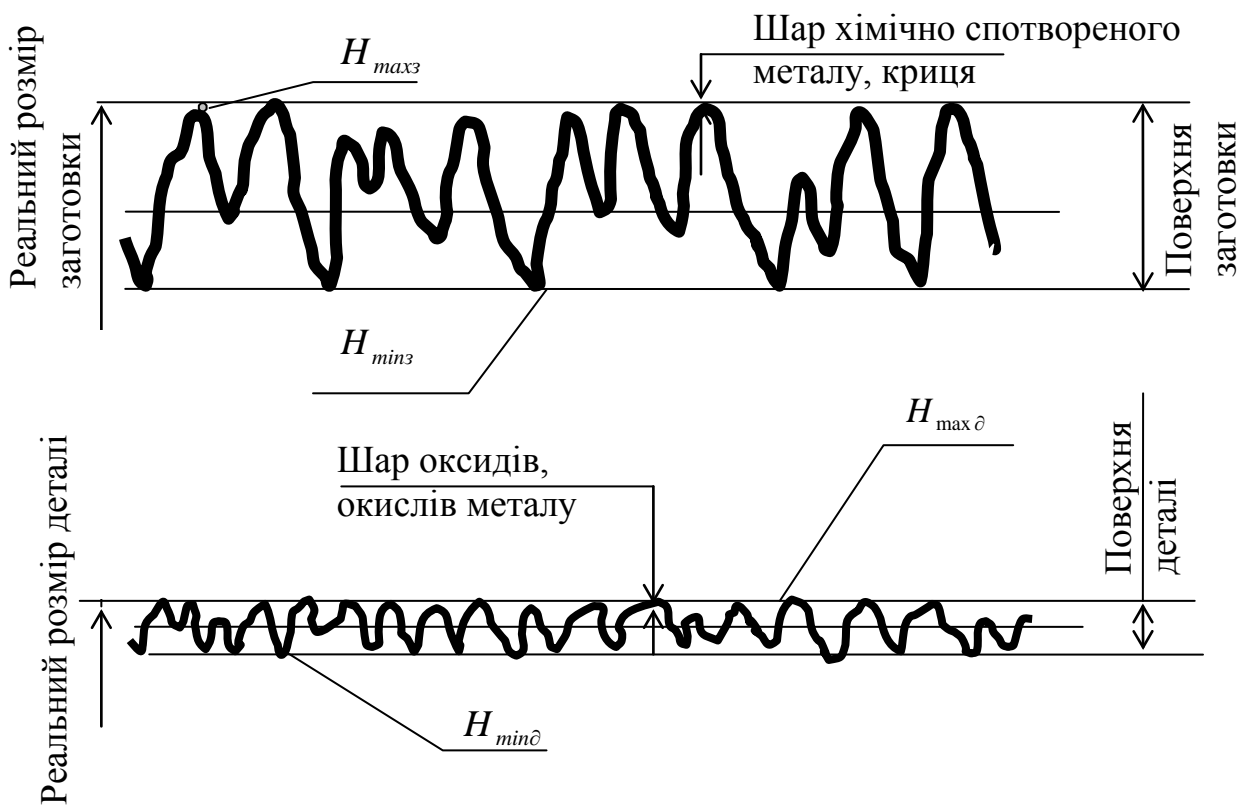


Рис.2.3. Технологічна поверхня заготовки та деталі

На фрезерних верстатах та ОЦ у переважній більшості обробляють корпусні деталі. Такі деталі здебільшого за попереднім технологічним процесом мають литво за різними моделями. Загальна хиба ливарного виробництва це усадка технологічного матеріалу при тужавінні та малоякісна поверхня. За тужавіння технологічний матеріал має значні геометричні спотворення, які можуть сягати міліметрів навіть за надточного лиття. Вплив цього чиннику на координату поверхні негативний, тому що всі геометричні розміри зменшуються у відповідній системі координат. Попри цей негативний вплив шорсткість поверхні завжди має позитивний наслідок, оскільки у процесі торкання інструмента до деталі координата оцінюється за верхівками окремих елементів шорсткості поверхні [62, 63, 73, 74, 75].

### **2.1.1. Фізична модель поверхні після технологічної обробки**

При конструюванні будь-якої деталі необхідно регламентувати параметри, які характеризують її поверхні. Але в багатьох випадках вимоги до якості поверхні можуть бути виявлені лише експериментальним шляхом, оскільки залежність різних експлуатаційних властивостей від різних фізичних і геометричних параметрів складні та ще недостатньо досліджені.

Тертя та знос деталей значно пов'язані із нерівностями, хвилястістю, мікронерівностями, а також із напрямком штрихів (слідів обробки). Характеристики мікронерівностей та хвилястості виявляється на розмірах тих ділянок, в яких знаходиться зона фізичного контакту, тобто визначає контурну площу торкання. Наявність хвиль призводить до зменшення опорної площі в 5-10 разів у порівнянні із рівною шорсткою поверхнею. Процес контактування поверхонь, які мають мікронерівності, значною мірою визначається формою і розмірами останніх. Для оцінки цього впливу належить враховувати не тільки граничні значення відхилень від правильної геометричної форми, але й взаємне розташування та форму макронерівностей спряжених поверхонь деталей.

Оптимальна шорсткість характеризується висотою, кроком і формою нерівностей (радіусом упадин, кутом нахилу нерівностей в напрямку руху тощо). Параметри оптимальної шорсткості залежать від якості мастила, умов роботи поверхонь, що зазнають тертя, їх конструкцію і матеріалу. Діапазон  $R_{\text{опт}}$  зазвичай дуже малий. Мікротвердість поверхневого шару впливає на зносостійкість. Наприклад, деформаційне зміцнення, що виникає внаслідок обробки різанням, зменшує знос поверхонь в 1,5 ÷ 2 рази. Шорсткість поверхні впливає також на міцність деталей. Так, при роботі в умовах переміщених



навантажень руйнування деталей пояснюється концентрацій напруг внаслідок наявності нерівностей. За меншу шорсткість є менша можливість виникнення поверхневих тріщин від втоми металу. Оздоблена обробка деталей (доводка, полірування) забезпечує значне підвищення межі їх втомленої міцності.

Мала шорсткість поверхні позитивно впливає на антикорозійну стійкість деталей, що необхідно в тому випадку, коли не можна використовувати захисне покриття (наприклад, поверхні циліндрів двигунів і т.і.).

Дотримання належної якості поверхні необхідно в спраженнях, що відповідають умовам густини, герметичності, теплопровідності. Зниження шорсткості поверхні деталей спричиняє покращення здатності до відбиття акустичних, електромагнітних, світлових хвиль, зменшення втрат у хвилеводах, резонаторах, полегшується чищення деталей від пилу, поверхневих забруднень, тощо.

Шорсткість і хвилястість поверхні деталі взаємопов'язані із точністю розмірів, оскільки встановлена точність, наприклад, спраження залежать від співвідношення висоти нерівностей і поля допуску (точність обробки) деталей. Для додержання заданої точності деталей в приладі необхідно також при обробці кожної деталі додержання оптимальної шорсткості кожної поверхні.

Багато характеристик якості поверхні, які впливають на експлуатаційні характеристики приладу, залежать від технологічного методу та умов виготовлення деталей. Виходячи із цього, можна призначити визначені умови обробки (режими обробки, технологічний метод, тощо), які забезпечать отримання поверхні із необхідними параметрами якості [76, 77, 78, 79, 80].

Додержання якості поверхні формується під впливом технологічної спадкоємності. Під технологічною спадкоємністю розуміють перенос властивостей деталі, що оброблюється, від попередніх технологічних операцій до наступних, які впливають на експлуатаційні характеристики всього приладу в цілому. Водночас, зміна експлуатаційних властивостей визначається методами і режимами, які застосовують на окремих операціях термічної та механічної обробки, типом, станом РІ, розмірами припусків, послідовністю та складом операцій технологічного процесу.

Висока точність завжди відповідає малої шорсткості та хвилястості поверхні (водночас, висока точність завжди забезпечує високу надійність роботи приладу). Це визначено не тільки умовами роботи спражених деталей, але й необхідністю отримання надійних результатів вимірів виробничих метрологічних приладів і пристроїв.

Задана поверхня після токарної обробці [79] деталі типу “вал” діаметром  $D_0 = 2r_0$ , де  $r_0$  – заданий радіус деталі для ідеальній поверхні за параметрами шорсткості (якості) (рис. 2.4).

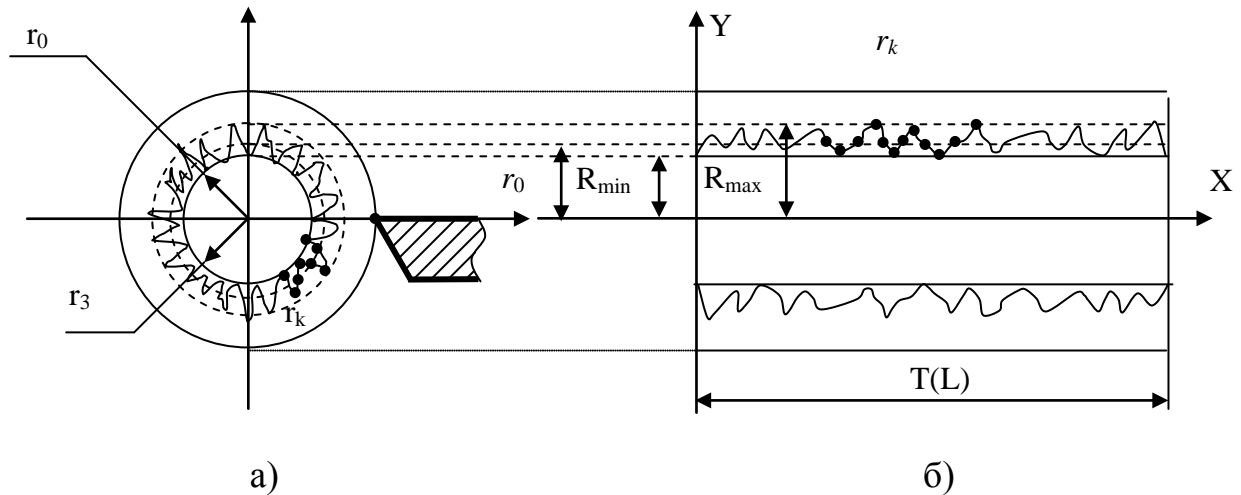


Рис. 2.4. Характеристики поверхні деталі після токарної обробки, де: а) поперечний перетин деталі; б) продольний перетин

Базові параметри шорсткості поверхні:

- 1) Висота нерівності профілю по 10-ти точках  $R_z$ :

$$R_z = \frac{\sum_{k=1}^5 |y_{pmk}| + \sum_{k=1}^5 |y_{vmk}|}{5},$$

де  $y_{pmk}$  – висота  $k$ -го найбільшого виступу профілю;

$y_{vmk}$  – висота  $k$ -ої найбільшої упадини профілю.

(відстань від середньої лінії профілю поверхні).

- 2) Середнє арифметичне відхилення профілю  $R_a$  у межах базової довжини  $l$  (довжина лінії, що використовується для визначення нерівностей, які характеризують шорсткість поверхні);

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx; \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y_k|,$$

де  $l$  – базова довжина;  $n$  – число обраних точок профілю на базовій довжині.

Періодичний профіль шорсткості деталі формується внаслідок точіння, фрезерування і т.д. Аперіодичний профіль шорсткості деталі формується внаслідок шліфування, полірування, доводки, електроерозійної обробці. Періодичний профіль описується періодичною функцією; аперіодичний профіль – випадковою функцією.

Один із головних параметрів шорсткості  $R_{max}$  є найбільшою висотою нерівностей, тобто це – відстань між лінією виступів профілю та лінією упадин профілю у межах базової довжини ( $R_p$  – висота найбільшого виступу профілю;  $R_v$  – глибина найбільшої упадини профілю) (Рис. 2.5,а).

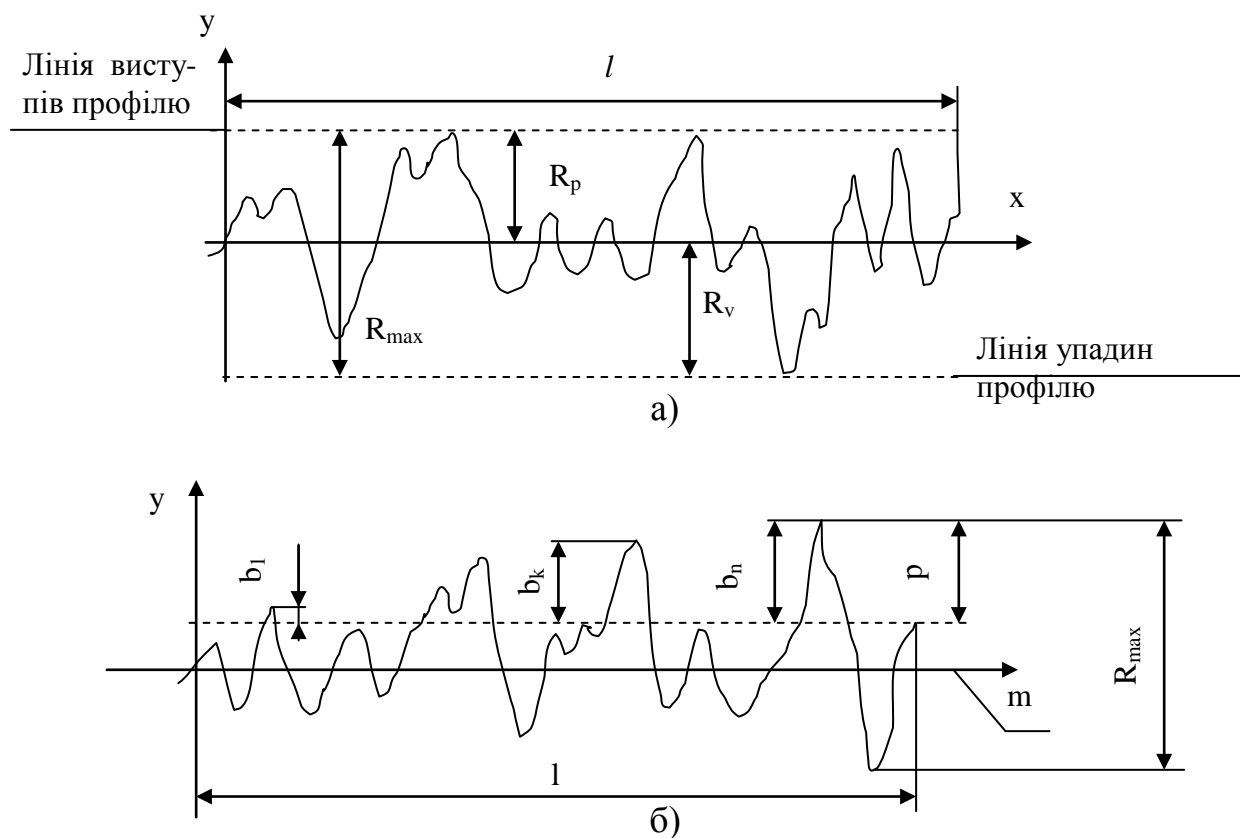


Рис. 2.5. Загальні параметри шорсткості поверхні деталі

Вимоги до шорсткості не впливають на вимоги дефектності (наприклад, раковина і т.д.). Шорсткість поверхні оцінюється за нерівностями профілю (найчастіше поперечною), якій отримуємо внаслідок перерізу реальної поверхні площиною (найчастіше у нормальному перерізі). Для виокремлення шорсткості поверхні від інших нерівностей із відносно великими кроками (відхилення форми та хвилястість) її розглядають у межах обмеженої ділянки, довжина

якої є базовою довжиною  $l$ . Базою для відхилення профілю є середня лінія профілю  $m$ . Відносна опорна довжина профілю  $t_p$  – це відношення опорної довжини профілю до базовий довжини на заданому рівні перерізу  $p$ :

$$t_p = \frac{\eta_p}{l},$$

де

$$\eta_p = \sum_{k=1}^n b_k,$$

тобто сума довжин відрізків, які відсікаються на даному рівні в матеріалі профілю лінією, яка є еквідистантною середньої лінії у межах базової довжини (рис. 2.5,б).

Експлуатаційні властивості шорсткості поверхні, визначених для зносостійкості в усіх видах тертя, визначаються  $R_a$  ( $R_z$ ),  $t_p$  напрямлені нерівності.

Нормування параметрів  $S$  і  $S_m$  (середній крок місцевих упадин і середній крок нерівностей поверхні), що характеризують взаємне розташування (відстань) характерних точок нерівностей вершин (максимумів) і точок перетину профілю із середньою лінією (нулів профілю), для поверхонь, профіль яких описується процесами, близькими до випадкових, можливо спектральними характеристиками профілю (які виражені через кореляційну функцію профілю).

Ця властивість крокових параметрів є важливою не тільки для обліку впливу нерівностей на експлуатаційні властивості поверхні, але дозволяє розв'язувати задачі, пов'язані із метрологічним забезпеченням якості поверхні, достатньо простими методами, частково задачі, пов'язані з визначенням необхідної довжини для виміру параметру при заданій точності.

У додатку до кількісних параметрів доцільно нормувати напрямок нерівностей, наприклад, у зв'язку із напрямком відносного переміщення третьових спряжених поверхонь чи струменя рідини чи газу відносно поверхні, а також забезпечення необхідної зносостійкості, вібростійкості, міцності конструкції при циклічних навантаженнях.

Хвилястість поверхні є елементарним відхиленням поверхні будь-якої форми. Це є сукупність нерівностей на поверхні, що періодично повторюються та виникають внаслідок коливань чи відносно коливальними рухами в системі технологічного обладнання, в тому числі РІ, заготовок. Хвилястість визначається на нормальному перерізі поверхні, причому шорсткість і відхилення форми виключаються.

Параметри хвилястості визначені наступним чином:

- відхилення в реальному перерізі круглих деталей, у яких крок менше  $1/15$  кола;
- відношення кроку до висоти більше 40;
- висота хвилястості – середнє арифметичне значення із 5 значень висоти нерівностей.

Найбільш розповсюдженим є варіант для виробів приладобудування, коли вказано чисельне значення параметру, яке відповідає найбільш грубим значенням допусків шорсткості поверхні, тобто найбільшому граничному значенню для параметрів  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S$ ,  $S_m$  до найменшого граничного значення параметру  $t_p$ .

#### **2.1.1.1. Аналітична модель поверхні деталі після токарної обробки**

Розглянемо випадок, коли поверхня деталі формується в результаті токарної обробки, наприклад, поверхня валу (рис. 2.4,а). Шорсткість такої поверхні може бути представлена періодичною функцією, яка описана рядами Фур'є, які складаються з простих гармонічних коливань з циклічними частотами, кратними основній циклічній частоті  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  (рис. 2.4,б).

У даному випадку припустимо, що  $T$  – час одного оберту деталі. Верхівка РІ проходить шлях  $L = 2\pi r_{\text{реал}}$ , тобто  $r_{\text{реал}}$  – радіус валу з урахуванням параметрів шорсткості, хвилястості поверхні, тобто з урахуванням СМР.

Таким чином, 
$$r_{\text{реал}} = r_0 \pm \int_0^L r dx.$$

Період  $T$  функції можна подати через режими різання, тобто шлях  $L = T_{\text{обр}} V_p$ , тоді  $T_{\text{обр}} = \frac{2\pi R_{\text{реал}}}{V_p}$  - часовий параметр періодичної функції, яка визначає формоутворення шорсткості поверхні, тобто  $0 < t < T_{\text{обр}}$ .

Таким чином, використовуючи принцип суперпозиції, представимо функцію шорсткості поверхні в загальному вигляді:

$$F_{\text{шф}}(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (2.1)$$

де  $A_k$  – амплітуда  $k$ -ої точки шорсткості поверхні;

$$\omega_k = \frac{2k\pi}{T}, \text{ де } T - \text{період функції.}$$

Оскільки нормування шорсткості відбувається на кінцевій (базовій) довжині поверхні з кінцевим числом  $n$  обраних точок поверхні, функцію шорсткості доцільно розглядати для числа  $n$  точок поверхні, тобто:

$$F_{\text{шф}n}(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k). \quad (2.2)$$

Тоді поверхня валу після токарної обробки можна описати, користуючись розкладенням (при  $T = 2\pi$ ) на інтервалі напівперіоду  $[-\pi; \pi]$ :

$$F_{\text{шф}n}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kt + b_k \sin kt, \quad (2.3)$$

де амплітудний спектр визначається виразом  $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ ,

а фазовий спектр функції  $\varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k}$ .

Коефіцієнти  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  визначені формулами Фур'є – Ейлера (для періоду  $T = 2\pi$ ) та мають опис:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} F_{\text{шф}n}(t) dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} F_{\text{шф}n}(t) dt; \\ a_k &= \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} F_{\text{шф}n}(t) \cdot \cos \frac{2k\pi}{T} t dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} F_{\text{шф}n}(t) \cdot \cos ktdt = 0; \\ b_k &= \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} F_{\text{шф}n}(t) \cdot \sin \frac{2k\pi}{T} t dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} F_{\text{шф}n}(t) \cdot \sin ktdt = 0. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для зручності обчислення можна представити функцію шорсткості в комплексній формі, використавши формули Ейлера:

$$\begin{aligned} F_{\text{шф}n}^{\text{ТОК}}(t) &= \sum_{k=1}^n F_k e^{j \frac{2k\pi}{T} t}, \\ F_n &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F_{\text{шф}n}(t) e^{-j \frac{2k\pi}{T} t} dt, \\ F_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} F_{\text{шф}n}(t) e^{-j 2kt} dt \quad (\text{для } T = 2\pi). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Якщо представити функцію шорсткості гармонічною функцією із випадковим чином розподіленими параметрами  $F_{\text{шф}k}(t) = r_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)$ , то спектр Фур'є шорсткої поверхні має вираз у межах періоду обробки:

$$F(f_x, f_y, t) = \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-R_0}^{R_0} \int_{-T_{\text{обр}}/2}^{T_{\text{обр}}/2} F_{\text{шф}}(x) F_{\text{шф}}(y) F_{\text{шф}}(t) \cdot \exp[-j(f_x x + f_y y)] \exp\left[-j \frac{2k\pi}{T}\right] dx dy dt. \quad (2.6)$$

Водночас, можна визначити спектральні характеристики, подаючи функцію в колових координатах.

Функції  $F_{\text{шф}n}(t)$  обмежена значенням  $R_{\text{max}}$ , тобто максимальною висотою виступу шорсткої поверхні (за суттю є  $R_{\text{реал}}$ ). Для того, щоб визначити спектральні характеристики функції поверхні, перетворюємо координати наступним чином:

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2; \quad \rho^2 = f_x^2 + f_y^2; \quad \varphi = \text{tg}^{-1}(f_y/f_x); \\ x &= r \cos \theta; \quad f_x = \rho \cos \varphi; \quad dx dy = r dr d\theta; \\ y &= r \sin \theta; \quad f_y = \rho \sin \varphi; \quad \theta = \text{tg}^{-1}(y/x). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Тоді для періодичної функції із періодом  $2\pi$  (для токарної обробки поверхні деталі), підставляючи вираз (2.6) у (2.7), отримуємо:

$$F(\rho) = F(f_x, f_y, f_t) = \int_0^{R_{\text{max}}} r dr \int_0^{2\pi} \exp[-jr\rho \cos(\theta - \varphi)] d\theta \int_0^T \exp\left[-j \frac{2\pi}{t}\right] dt. \quad (2.8)$$

Використавши відомий вираз для функції Бесселя, перший ряд нульового порядку набуває вигляду:

$$I_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[-jz \cos(\theta - \varphi)] d\theta. \quad (2.9)$$

Приведемо вираз (2.8) до виду (2.9). Тоді

$$F(\rho) = 2\pi \int_{R_0}^{R_{\text{max}}} I_0(r\rho) r dr. \quad (2.10)$$

За допомогою виразу для функції Бесселя першого порядку першого ряду, отримуємо вираз (2.10) в наступному вигляді:

$$F(\rho) = \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\text{max}}) - I_1(\rho R_0)] \quad (2.11)$$

$$(\text{при } zI_1(z) = \int_0^z \alpha I_0(\alpha) d\alpha).$$

Отже, спектральні характеристики функції шорсткості поверхні співставлені в залежність від висоти максимального виступу профілю поверхні деталі.

Остаточно інтегруємо вираз (2.11) за формулою (2.6), та отримуємо

$$\begin{aligned} F(\rho, t) &= \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\max}) - I_1(\rho R_0)] \int_{-T_{\text{іао}}/2}^{T_{\text{іао}}/2} \exp(-j\omega t) dt = \\ &= \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\max}) - I_1(\rho R_0)] \int_{-T_{\text{обр}}/2}^{T_{\text{обр}}/2} \exp\left(-j \left| \frac{2\omega}{T} = \frac{V_p}{L_{\text{обр}}} \right| t\right) dt = \\ &= \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\max}) - I_1(\rho R_0)] \sin c \frac{V_p}{T_0 L_{\text{обр}}} T_{\text{обр}} = \\ &= \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\max}) - I_1(\rho R_0)] \sin c \left( \frac{V_p}{R_{\max}} T_{\text{обр}} \right). \end{aligned} \quad (2.12)$$

На підставі викладеного можна дійти висновку: інженерія поверхні залежить від режимів технологічної обробки та опис її форми набуває виразу функції Бесселя.

Розглянемо іншим методом загальний випадок формування поверхні деталі, коли функція враховує повністю всі відхилення від заданих технічними умовами параметрів.

Функцію, яка описує шорсткість поверхні із врахуванням СМР у поперечному перетині, можна представити випадковою гармонійною функцією із випадковими параметрами, тобто у полярних координатах, як

$$f(r) = 2r_n \sin \theta_n, \quad (2.13)$$

$$\text{де } r_n = \sqrt{z^2 + y^2}, \theta_n = \arctg \frac{y}{z}.$$

Величина амплітуди функції  $r_n$  змінюється в межах інтервалу  $[r_0, r_{\max}]$ , де  $r_0$  – радіус ідеальної деталі, тобто при практично дзеркальній поверхні;

$r_{\max}$  – радіус деталі на максимальній висоті виступів шорсткої поверхні;

$\theta_n$  – кут плинної координати неоднорідності, під яким відбивається акустична хвиля.



Використаємо для рішення задачі теорему про середнє інтегральне обчислення, оскільки

$$\int_a^b f(x)dx = (b-a)f(\xi_n), \quad (2.14)$$

де  $a \leq \xi_n \leq b$ ,

$\xi_n$  – деяка точка функції  $f(x)$ .

Тоді, в нашому випадку

$$\int_{r_0}^{r_{\max}} f(r)dr = (r_{\max} - r_0)f(\xi_n), r \leq \xi_n \leq r_{\max}, \quad (2.15)$$

де  $\xi_n$  – деяка точка на поверхні деталі, яка описує зміну радіусу деталі в поперечному перерізі.

Водночас, функція  $f(\xi_n) = 2\xi_n \sin(\theta_n)$ .

У цьому випадку

$$\int_{r_0}^{r_{\max}} 2r_n \sin \theta_n dr = (r_{\max} - r_0) * 2\xi_n \sin \theta_n. \quad (2.16)$$

Обчислимо інтеграл для першого квадранту, наприклад, в інтервалі  $[0, \frac{\pi}{2}]$

для кута  $\theta_n$ , на всю решту поверхні в межах усього периметру  $2\pi r_n$  деталі, який визначає періодичність випадкової функції шорсткості. Тоді

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_0}^{r_{\max}} 2r \sin \theta_n dr d\theta_n &= (r_{\max}^2 - r_0^2)(-\cos \theta_n) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = r_{\max}^2 - r_0^2. \\ &\left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta_n d\theta_n \int_{r_0}^{r_{\max}} 2r dr = (r_{\max}^2 - r_0^2) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta_n d\theta_n \right). \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$r_{\max}^2 - r_0^2 = (r_{\max} - r_0) \cdot 2\xi_n \sin \theta_n.$$

$$\xi_n = \frac{r_{\max} + r_0}{2 \sin \theta_n}. \quad (2.18)$$

Тоді

$$S(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_{\max} - r_0}{2 \sin \theta_n} \sin kt.$$

Визначимо функцію шорсткості поверхні  $F_{\text{шор}}(r, t)$  деталі, яка оброблюється, сумою непарних гармонік ряду Фур'є:

$$F_{\text{шор}}(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin kt, \quad (2.19)$$

де  $b_k = \frac{2}{T} \int_0^T F_{\text{шор}}(r, t) \sin kt dt,$

$T = \frac{2\pi r_3}{V_p}$  – період обробки деталі;

$r_3$  – радіус заготовки;

$V_p$  – швидкість різання.

Тоді з (2.19) із врахуванням виразів (2.18) отримуємо

$$\begin{aligned} b_k &= \frac{2}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^T \frac{r_{\max} + r_0}{2 \sin \theta_n} \sin kt dt = \frac{2}{T} \cdot \frac{r_{\max} + r_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \int_0^T \sin kt dt = \\ &= \frac{r_{\max} + r_0}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \cdot \frac{1}{k} [-\cos kT + 1] = \frac{r_{\max} + r_0}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \cdot \frac{1}{k} \cdot 2 \sin^2 k \frac{T}{2} = \\ &= 2 \frac{r_{\max} + r_0}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \cdot \frac{1}{k} \cdot 2 \sin^2 k \frac{T}{2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Функція шорсткості визначає параметри поверхневих ефектів, що виникають внаслідок акустичних явищ та неоднорідностей матеріалу деталі, набуває форми (із врахуванням значення  $T$ ):

$$F_{\text{шор}}(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_{\max} + r_0}{2\pi r_3} \cdot \frac{V_p}{k \sin \theta_n} \sin^2 k \pi \frac{r_3}{V_p} \sin kt. \quad (2.21)$$

Функція є залежною від параметрів нормування шорсткості поверхні, від реальних параметрів різання.

Визначимо функцію, що описує зміну об'єму профілю шорсткості поверхні деталі, яку отримали в результаті токарної обробки:

$$\iint_D f(p) d\sigma = \iint_D F(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (2.22)$$

де  $F(r, \varphi)$  – функція координат  $r, \varphi$ , яка представляє функцію  $f(p)$  точки  $P$ . Вираз  $r dr d\varphi$  – елемент площі в полярних координатах.

$$\iint_D F(r, \varphi) r dr d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{r_1}^{r_2} F(d, \varphi) r dr, \quad (2.23)$$

де  $r_{1,2}$  – функції, які залежать від  $\varphi$ , можуть бути постійними.

Обмежимося в нашому випадку  $r \in [r_0, r_{\max}]$ ,  $\varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ .

Окружність, як наведено вище, має опис  $f(r) = 2r_n \sin \varphi_n$ .

Тоді

$$\begin{aligned} \iint_D 2r_n \sin \varphi_n d\sigma &= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_{r_0}^{r_{\max}} \sin \varphi_n dr = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi_n d\varphi \int_{r_0}^{r_{\max}} r_n^2 dr = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi_n d\varphi \cdot \frac{r_n^3}{3} \Big|_{r_0}^{r_{\max}} = \\ &= 2 \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3} \cdot \left[ -\cos \varphi_n \right]_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{3} (r_{\max}^3 - r_0^3). \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\text{Із врахуванням } \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi = \frac{\pi}{2},$$

$$\frac{2}{3} (r_{\max}^3 - r_0^3) = (r_{\max} - r_0) (2\pi - 0) f^2(\xi, \varphi),$$

отримуємо

$$\begin{aligned} r_n &= \sqrt{\frac{2(r_{\max}^3 - r_0^3)}{3(r_{\max} - r_0)2\pi4\sin^2 \varphi_n}} = \sqrt{\frac{1}{12\sin^2 \varphi_n} \cdot \frac{(r_{\max} - r_0)(r_{\max}^2 + r_0^2 + r_{\max}r_0)}{r_{\max} - r_0}} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{12\sin^2 \varphi_n} \cdot (r_{\max}^2 + r_{\max}r_0 + r_0^2)} \end{aligned}$$

та врешті

$$r_n = \frac{1}{6\pi \sin \varphi_n} (r_{\max}^2 + r_{\max}r_0 + r_0^2). \quad (2.25)$$

Площа зміни профілю шорсткості поверхні дорівнює

$$\Delta F = F_{\max} - F_0 = \pi r_{\max}^2 - \pi r_0^2 = \pi (r_{\max}^2 - r_0^2).$$

Остаточно

$$\Delta F_{\delta} = \frac{\pi}{4} (r_{\max}^2 - r_0^2) \sin^2 \varphi_n = \frac{\pi}{4} r_n^2 \sin^2 \varphi_n. \quad (2.26)$$

$$r_0 \leq r_n \leq r_{\max}.$$

Радіус випадкової функції (у полярних координатах), що описує профіль шорсткості поверхні, станове  $\rho = 2r_n \sin \varphi_n$ .

Площа  $\frac{1}{4}$  кільця, яке створюється поміж мінімальною та максимальною висотою шорсткості поверхні деталі, набуває форми:

$$\begin{aligned}\Delta F_{\delta} &= \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_0}^{r_{\max}} 4r_n^2 \sin^2 \varphi dr d\varphi = \frac{1}{2} \cdot 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \varphi d\varphi \int_{r_0}^{r_{\max}} r^2 dr = 2 \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 - \cos 2\varphi}{2} d\varphi = \\ &= 2 \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3} \cdot \frac{1}{2} \left[ \varphi \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} \right] = 2 \dots \cdot \frac{1}{2} \left[ \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} (\sin \pi - \sin 0) \right] = \frac{\pi}{4} \cdot 2 \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{6}.\end{aligned}$$

Знаходимо функцію  $r_n$  наступним чином:

$$\begin{aligned}\frac{\pi}{4} \cdot \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3} &= (r_{\max} - r_0) 4r_n^2 \sin^2 \varphi_n, \\ \frac{\pi}{4} \cdot \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3(r_{\max} - r_0) 4 \sin^2 \varphi_n} &= r_n^2, \\ \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(r_{\max} - r_0)(r_{\max}^2 + r_{\max} r_0 + r_0^2)}{3(r_{\max} - r_0) 4 \sin^2 \varphi_n} &= r_n^2, \\ r_n &= \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{(r_{\max}^2 + r_{\max} r_0 + r_0^2)}{12 \sin^2 \varphi_n}}.\end{aligned}\tag{2.27}$$

Тобто, визначаючи цю функцію, можна отримати визначення параметрів формотворення поверхні деталі, наприклад, при токарній обробці.

### 2.9.1.2. Моделювання параметрів поверхні після шліфувальних операцій

Розглянемо формування поверхні, яка утворюється внаслідок шліфування деталі, доводки тощо. Така поверхня може бути описана неперіодичною функцією на кінцевому інтервалі, який визначений, наприклад, довжиною обробки деталі. Отже,  $T \neq 2\pi$ .

Використовуючи вираз (2.3) для класичного розкладу функції в ряд Фур'є, приведемо за допомогою заміни змінної в функції (2.3) із періодом  $2\pi$  і скористуємося виразами коефіцієнтів тригонометричного ряду (2.4).

$$\text{У цьому випадку } \frac{t}{T} = \frac{x}{2\pi}, \text{ звідки } t = \frac{T}{2\pi} x.$$

Тоді, функцію  $S(t)$ , яка визначає параметри шорсткості поверхні деталі, визначено наступним виразом:

$$S(t) = S\left(\frac{T}{2\pi}x\right) = S(x). \quad (2.28)$$

Тепер доведемо, що  $S(x)$  – періодична функція із періодом  $2\pi$ . Отже,

$$S(x + 2\pi) = S\left[\frac{T}{2\pi}(x + 2\pi)\right] = S\left(\frac{T}{2\pi}x + T\right) = S(t + T) = S(t) = S(x). \quad (2.27)$$

Визначаючи коефіцієнти ряду Фур'є та виходячи із отриманих виразів, можна дійти висновку:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(x) dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S\left(\frac{T}{2\pi}x\right) dx = \left| \begin{array}{l} t = \frac{T}{2\pi}x; x = -\pi; \\ dt = \frac{T}{2\pi}dx; t = \frac{T}{2\pi}(-\pi) = -\frac{T}{2}. \end{array} \right| = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \frac{2\pi}{T} dt = \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) dt. \end{aligned} \quad (2.28,a)$$

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(x) \cos kx dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S\left(\frac{T}{2\pi}x\right) \cos kx dx = \left| \begin{array}{l} t = \frac{T}{2\pi}x; x = -\pi; \\ dt = \frac{T}{2\pi}dx; t = \frac{T}{2\pi}(-\pi) = -\frac{T}{2}. \end{array} \right| = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \cos\left(k \frac{2\pi}{T}t\right) \frac{2\pi}{T} dt = \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \cos\left(k \frac{2\pi}{T}t\right) dt. \end{aligned} \quad (2.28,b)$$

Аналогічно визначаємо коефіцієнт:

$$b_k = \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \sin\left(k \frac{2\pi}{T}t\right) dt. \quad (2.28,b)$$

Якщо розглянути функцію шорсткості деталі, що формується внаслідок шліфування, полірування, або інших технологічних операцій доводки, то вона може набути форму аперіодичної функції, тобто  $b_k$  обчислюється як

$$b_k = \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} F_{\text{шф}}(r, t) \sin k \frac{2\pi}{T} t dt, \quad (2.29)$$

де  $T$  – не є функцією, що кратна  $2\pi$ .

Тому з виразу (2.29) із врахуванням (2.20) отримуємо

$$b_k = \frac{1}{T/2} \frac{r_{\max} + r_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin k \frac{2\pi}{T} t dt = \frac{1}{T/2} \frac{r_{\max} + r_0}{2} \cdot 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin k \frac{2\pi}{T} t dt =$$

$$= \frac{r_{\max} + r_0}{T} \cdot 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \frac{T}{2\pi k} \left[ -\cos k \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2} + 1 \right] = 2(r_{\max} + r_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi \sin \theta_n} \sin^2 k \frac{\pi}{2} \quad (2.30)$$

А функція, яка описує поверхневі ефекти цього типу технологічної обробки, набуває форми

$$F_{\text{шф}}(r, t) = 2(r_{\max} + r_0) \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi \sin \theta_n} \sin^2 k \frac{\pi}{2} \sin k \frac{2\pi}{T}, \quad (2.31)$$

тобто функція визначає також параметри нормування шорсткості, та залежить від режимів обробки.

### 2.1.1.3. Моделювання параметрів поверхні після фрезерних операцій обробки металу

При входженні фрезерного інструмента у торкання з технологічною поверхнею він, у першу чергу, торкатиметься верхівку шорсткої поверхні. За такого процесу сигнал, який надходить із системи, матиме або статичний або переривчастий характер. Статичний характер сигнал буде мати у випадку відсутності обертання різального інструмента, але водночас вірогідність влучання точки із максимальною координатою інструмента (у системі координат інструмента) у найбільш високу верхівку на шорсткій поверхні деталі є занадто малою.

Водночас, похибка визначення координати становитиме ледве не  $H_{\max z} + H_{\min z}$  для заготовки і  $H_{\max d} + H_{\min d}$  для деталі. Здебільшого це є вадою поверхні, котра не дає можливості визначитися з її координатою точніше за її шорсткість.

Для того, щоб уникнути подібного явища необхідно надати інструмента обертальний рух. Чим більшою є швидкість обертання інструмента, тим більш якісно є можливість визначитися з координатою поверхні деталі. На рис. 2.6 відображено цей процес за різними етапами.



$t_T$  - час аналізу на торкання, закладений у систему керування технологічним обладнанням;

$l_{кр}$  - критична довжина шляху, коли інструмент обов'язково повинен торкатися поверхні деталі.

Водночас, у широкому сенсі  $V_x^i = \omega R$ ,

де  $\omega$  - кутова швидкість обертання інструмента (або деталі),

$R$  – радіус циліндричної панданної зони інструмента (або деталі).

Як видно з діаграм (рис. 2.6), існує запізнення у часі стосовно визначення моменту торкання різального інструмента до деталі, але це є вадю всіх систем торкання без виключення.

Подальший рух інструмента вглиб деталі, як видно з діаграм (лінії 3, 4, 5 рис. 2.6), призводить до зростання щільності сигналів торкання які з глибиною врізання утворюють суцільний сигнал торкання.

Скорочений підсумок вищесказаного вказує на те, що існує проблема в оцінці координати поверхні з високою точністю. Пов'язана ця проблема, у першу чергу, із якістю поверхні обробки і, у другу, з відносним рухом інструмента і деталі. Але, незважаючи на це, існує можливість значного зменшення впливу шорсткості на точність визначення координати поверхні. З одного боку, це висока швидкодія систем торкання, які відчують найменші коливання поверхні, а з іншого, - глибина хімічного впливу на поверхню деталі [31, 38, 63, 81].

З виключно принципових позицій шорсткість поверхні при фрезерних операціях обробки металу мало відрізняється від таких же самих при токарній обробці. Єдине, що потрібно враховувати за застосування математичного апарату токарної обробки при переході до фрезерної обробки, є необхідність з циліндричних (полярних) координат у площинні координати.

## **2.2. Технологія торкання технологічних об'єктів у процесі металообробки**

Як було розглянуто у попередньому п.р. 2.1, входження робочого інструмента у масу заготовки супроводжується мікроруйнуваннями поверхні металу. Якби інструмент не був занадто жорстким, то всі ці руйнації мали б суто уявний характер, як було вказано у авторській роботі [44, 46, 73]. Глибина занурення інструмента у масу деталі не обов'язково має негативний вплив на якість деталі.



При використанні обробного інструмента із функціями вимірювального інструмента існують наступні випадки торкання та використання цих результатів у подальшому технологічному процесі:

- при відомому полі допуску на виконання розміру деталі при торканні глибина занурення інструмента ( $h_{кр}$ ) не повинна перевищувати цю величину допуску, швидкість подачі у цьому випадку може бути достатньо великою, тобто  $h_{кр} = 100$  мкм;
- процес вимірювання інструментом розмірів деталі, коли перебіг координати є недопустимим, і швидкість подачі повинна бути мінімальною, глибина занурення інструмента  $h_{кр} = 1$  мкм.

Для того, щоб розглянути, як це відтворюється в дійсності, необхідно розглянути наступні питання:

- дуальність поверхні торкання деталі як явище, котре створює СКТ;
- руйнуюче торкання технологічних об'єктів у ідеалізованій моделі;
- засоби підвищення швидкості подачі.

### **2.3. Загальні принципи дії різального інструмента як елемента контрольно-вимірювальної системи**

При розгляді технологічних процесів, які вимагають отримання високоточних деталей приладобудування, фрезерний інструмент є основним інструментом формотворення. Тому попри значного розвитку СКТ на засадах АВГ використання робочого інструмента в якості вимірювального є досить перспективним напрямком. Так, порівняльний аналіз існуючих СКТ у роботі [25, 49, 50, 82] вказує на значні переваги такого підходу до підвищення точності виготовлення деталей. Використання обробного інструмента в якості вимірювального устаткування надає можливість підвищити точність роботи, скоротити апаратні затрати і, як наслідок, є більш вигідним з огляду на економічні аспекти застосування.

Але, незважаючи на такі переваги, розвиток цих приладів стримується в основному з наступних чинників:

- фрезерний інструмент має межу точності виготовлення;
- шпинделі верстатів теж мають межу точності виготовлення.

Основна проблема при використанні різального фрезерного інструмента у якості вимірювального - це точність його виконання. Згідно ДСТУ при виготовленні фрезерного інструмента можуть існувати наступні відхилення [83,

84, 85]:

- радіальні відхилення:
  - для суцільних фрез по суміжних зубцях -  $20 \div 60$  мкм;
  - для суцільних фрез по протилежних зубцях -  $40 \div 60$  мкм;
  - для збірних фрез по суміжних зубцях –  $50 \div 150$  мкм
  - для збірних фрез по протилежних зубцях -  $< 100$  мкм;
- відхилення по торцю:
  - для суцільних фрез –  $20 \div 40$  мкм;
  - для збірних фрез –  $50 \div 100$  мкм.

Для збірних фрез, де застосовуються надтверді матеріали, ця вимога є ще більш жорсткою, тобто: відхилення по радіусу до 10 мкм і до 5 мкм по торцю.

Такі вище названі відхилення є найбільш впливовими у порівнянні, наприклад, із биттям при встановленні у шпиндель або інструментальну державку, тощо. Оскільки найменші відхилення притаманні торцю різального інструмента, деякі зарубіжні системи орієнтуються саме на торкання торцевою частиною інструмента. Таким прикладом може бути система торкання японського виробництва LC-Sensor [32, 35].

Стосовно точності виконання фрезерного інструмента необхідно звернути увагу на такий процес, як нерівномірний знос різальних окрайців. Так, більш виступаючий різальний окраєць матиме швидкий знос, у той час, як наступна у послідовності різальна стрічка може мати дуже низьке навантаження.

Оскільки всі різальні стрічки мають різне навантаження, то і знос буде відбуватися нерівномірно. Тобто, наприклад, найбільш радіально виступаюча різальна стрічка матиме максимальний знос аж до критичного, в той час, коли найменш навантажена буде знаходитися у стані нормальних навантажень.

Для того, щоб визначитись із чинниками, котрі впливають на точність визначення координати, необхідно розглянути саме процес входження інструмента в торкання із поверхнею деталі (рис. 2.7).

Для розгляду цього процесу необхідно зробити наступні передумови:

- фреза має єдину різальну стрічку, де розташована єдина крапка торкання за координатами X та Y;
- фреза має єдину крапку торкання розташовану на торці на єдиній різальній стрічці за координатою Z;
- наявність більш ніж однієї з крапок торкання є невірогідною.

Цю передумову відображено на рис. 2.7. Звідсіля видно, що при торканні фреза може торкнутися поверхнею тільки тієї стрічки, котра найбільше віддалена

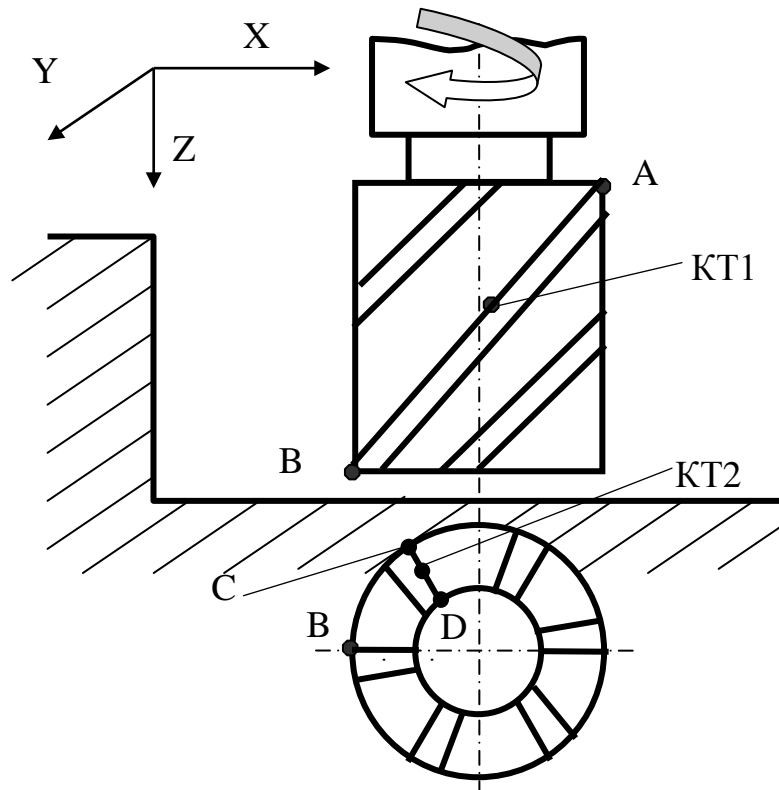


Рис. 2.7. Можливі місця розташування крапки торкання фрези до поверхні обробки

від осі обертання, тобто у межах просторової кривої АВ. Саме на цій стрічці буде розташована крапка КТ1, яка за умовою повинна торкнутися поверхні деталі за координатами  $X$  або  $Y$ . За координатою  $Z$  крапка торкання КТ2 буде розташована на різальній стрічці, яка найбільш є радіально віддаленою від осі обертання фрези і обмежена довжиною стрічки CD.

Доречно буде зауважити, що різальні стрічки АВ і CD не обов'язково повинні співпадати за фазою руху у процесі обертання.

У підсумку створюється ситуація, котра відображена на рис. 2.8, коли у зв'язку із неточністю виготовлення та базування у шпинделі фрези при обертанні у шпинделі підсумкові розбіжності виробляють у просторі обертання фрези уявну об'ємну фігуру, котра за формою наближається до циліндричної, тобто панданну форму фрези.

Якщо полишити інші елементи конструкції фрези, зробивши перехід до аналітичного вигляду, то отримуємо у просторі два кола відповідно до координат  $X$ ,  $Y$  та  $Z$  (рис. 2.9,а). При прийнятті за тезу те, що поверхня, котрої торкається крапка інструмента КТ1, необхідно зауважити: для реєстрації торкання необхідно виконати умову (2.32), тобто довжина треку торкання є  $l_{кр}$ .

Застосування цієї умови стосовно координат  $X$  та  $Y$  як найбільш складного випадку призводить до наступного результату

$$l_{кр} \geq V_1 \cdot t_T, \quad (2.33)$$

де  $V_1$  - лінійна швидкість крапки КТ1, яка залежить від кутової швидкості  $\omega_i$  обертання інструмента і діаметру  $D_1$  кола обертання.

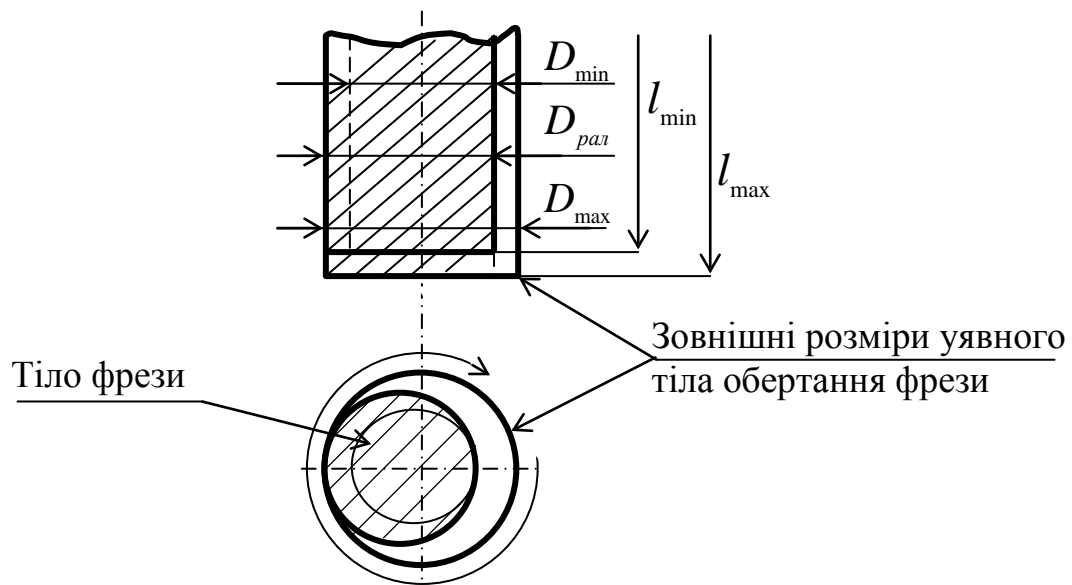


Рис. 2.8. Уявне тіло обертання фрези, котре входить у торкання із деталлю (панляння зона фрези)

Лінійна швидкість з [72] визначається як

$$V_1 = \omega_i \cdot \frac{D_1}{2}. \quad (2.34)$$

Кутова швидкість  $\omega_i$  при обертанні інструмента у процесі обробки деталі має вираз

$$\omega_i = \pi \cdot n_i \cdot D_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{T_i}, \quad (2.35)$$

де  $n_i$  - оберти різального інструмента;

$T_i$  - період обертання інструмента.

Підставляючи результат (2.35) у вираз (2.34), отримуємо залежність

$$V_1 = \pi n_i D_1 = \frac{\pi D_1}{T_i}. \quad (2.36)$$

Довжина треку (дуги) торкання у зв'язку із малими розмірами кута  $\phi_{\text{ед}}$  визначатиметься як

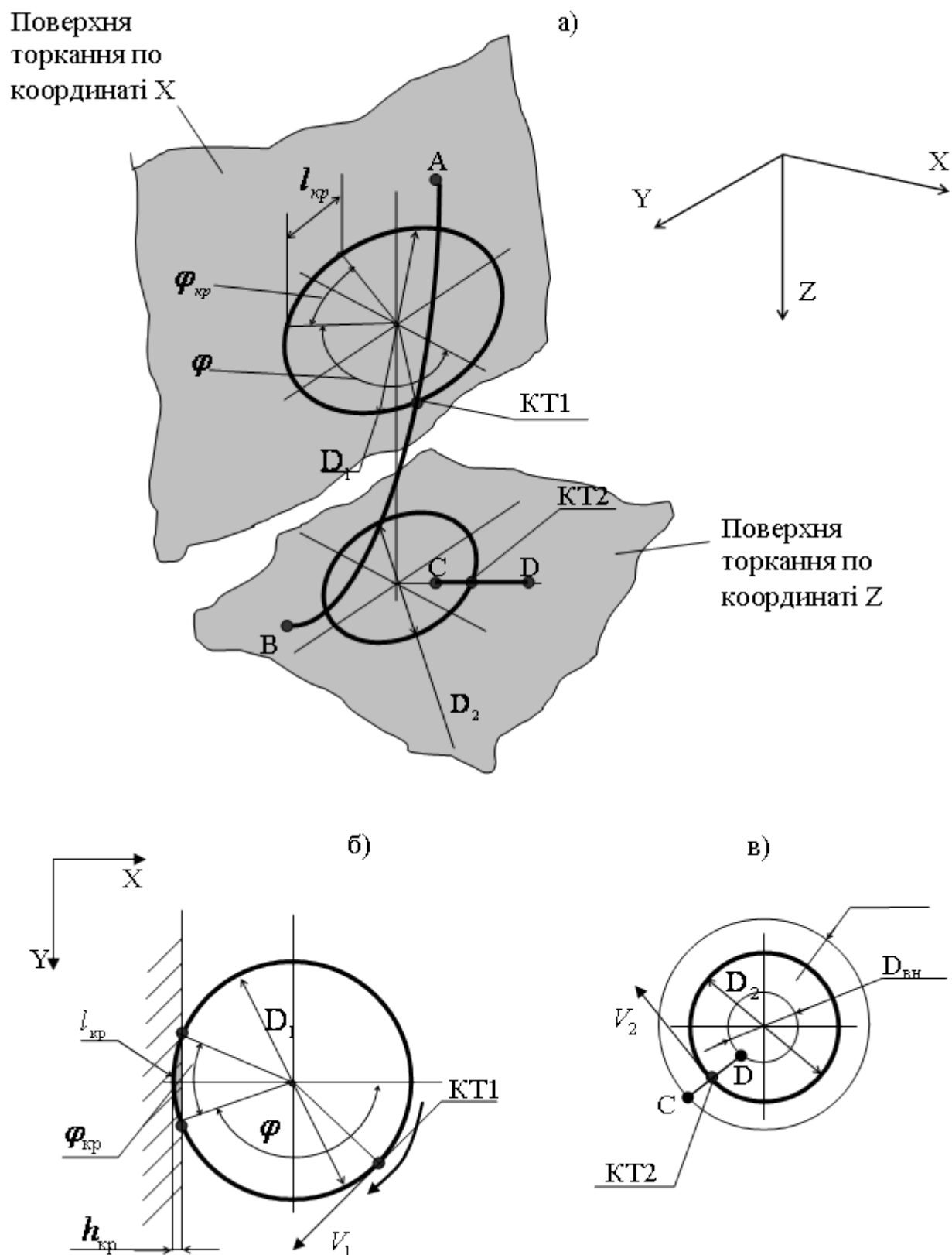


Рис. 2.9. Графо-аналітичні схеми дослідження торкання фрезою поверхні деталі, де: а) загальний випадок, б) для координат X та Y, в) для координати Z

$$l_{кр} \approx \frac{D_1}{2} \Phi_{кр} \quad (2.37)$$

Користуючись умовою (2.3) та виразами (2.6), є можливість вивести умову також і для швидкості обертання інструмента  $n_i$ , тобто:

$$n_i \geq \frac{\Phi_{кр}}{\pi \cdot t_T} \quad (2.38)$$

Але у виведеній залежності (2.38) не видно, як впливає швидкість на точність визначення координати. Для цього звернемося до властивостей кола як геометричної фігури [94, 95]. У цьому випадку величини  $h_{кр}$ , яка є безпосередньо показником точності та пов'язана із нею критична довжина треку  $l_{кр}$ .

$$h_{кр} = \frac{D_1}{2} \cdot \sin \frac{\Phi_{кр}}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\Phi_{кр}}{4}; \quad (2.39)$$

$$l_{кр} = \sqrt{D_1^2 \cdot \sin^2 \frac{\Phi_{кр}}{2} + \frac{16}{3} \cdot h_{кр}^2}. \quad (2.40)$$

Підставляючи  $\Phi_{кр}$  з (2.39) у (2.40), отримуємо наступний результат:

$$h_{кр} = \frac{D_1}{2} \cdot \sin \frac{\pi \cdot n_i \cdot t_T}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi \cdot n_i \cdot t_T}{4}. \quad (2.41)$$

Підставляючи у цю залежність значення  $t_T$  та  $h_{кр}$ , можна визначити мінімальне значення  $n_i$ . З іншого боку, для отримання належної точності необхідно виконати умову: щоб  $h_{кр}$  дорівнювало кроку позиціювання різального інструмента за належною координатою, який, у свою чергу, є тісно пов'язаним із швидкістю подачі  $S$ .

У загальному випадку є можливість стверджувати з великою достовірністю, що

$$S = \frac{l_{\kappa}}{t_{\kappa}} = \frac{h_{кр}}{t_{\kappa}}, \quad (2.42)$$

себто існує умова, коли  $l_{\kappa} = h_{кр}$ .

Якщо зважити на те, що обробні автоматизовані верстати мають крок позиціювання у 0,5 та 1,0 мкм, то існує можливість створити відповідну низку

значень для  $S$ ,  $n_i$ ,  $t_T$ ,  $h_{кр}$ ,  $t_k$ , які визначають точність отримання координати. За таким принципом є запрограмованим рух, наприклад СКТ “LC-Sensor” [35].

Програма цієї СКТ запрограмована на рух зі швидкістю 1 мкм/с (60 мкм/хв). Інструмент рухається кроками по 1 мкм на 1 мс, постійно працюючи у режимі “торкання-неторкання”. Водночас, гарантованою є точність отримання координати не гірше за 1 мкм. Звісна річ, що при задовільній точності ця система має відповідні вади, коли швидкість подачі є жорстко фіксованою, рух виключно здійснюється за координатою Z, а також відсутність повноцінного визначення перешкоди та забруднення поверхні.

Суттєвим при здоланні означених вище недоліків є значне підвищення швидкості подачі через збільшення розмірів кроку внутрішнім перепрограмуванням системи керування CNC.

Якщо роздивитись цю тезу більш достеменно, то з'ясовується, що таке збільшення не може бути занадто великим, а саме: воно є обмеженим полем допуску на виготовлення деталі. Так, при входженні (врізанні) інструмента у масу заготовки параметр  $h_{кр}$  ( $100 \div 300$  мкм) може сягати досить великих значень без будь-якої помітних пошкоджень різальної крайки інструмента. Так, було досягнуто межі в 700 мкм, але це є значення у лабораторних умовах [86]. Тим не менш, це надає можливість значно підвищити швидкість подачі до значень у  $100 \div 200$  мкм/мс. У цьому випадку, хоч і знижується точність визначення координати, але існує значний виграш у подачі до 600 мм/хв і більше. Первинна похибка, що утворюється внаслідок грубого позиціонування, може бути усунена багаторазовим торканням, як це було вказано в авторський роботі [46].

Визначення величин  $l_{кр}$  та  $h_{кр}$  ще не є остаточним вирішенням проблеми торкання деталі боковою різальною крайкою фрези. Досить легко побачити, що обертальний рух інструмента створює можливість лише періодичного торкання, оскільки площа, якої торкається інструмент, є дотичною до кола-траєкторії, котру утворює крапка КТ1.

У цьому випадку, приймаючи початок відліку фази руху від координати X, відповідні кути торкання площин за координатами нададуть наступний результат:

- для координати X

$$\varphi_X = \omega_f t + \frac{\pi}{2} + \varphi; \quad -\pi \leq \varphi \leq \pi; \quad (2.43)$$

- для координати Y

$$\varphi_Y = \omega_i t + \varphi; \quad -\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}. \quad (2.44)$$

Користуючись залежностями (2.40, 2.41, 2.43, 2.44), є можливість сформулювати умови отримання сигналу торкання від СКТ:

- для координати X

$$l_{кр}(X) = \left[ \lim_{\varphi \rightarrow \pm\pi} \left| \sin \left( \omega_i t + \frac{\pi}{2} + \varphi \right) \right| \right] \sqrt{D_i^2 \sin^2 \frac{\Phi_{кр}}{2} + \frac{16}{3} p_{кр}^2}; \quad (2.45)$$

$$h_{кр}(X) = \left[ \lim_{\varphi \rightarrow \pm\pi} \left| \sin \left( \omega_i t + \frac{\pi}{2} + \varphi \right) \right| \right] \left( \frac{D_i}{2} \sin \frac{\pi n_i t_T}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi n_i t_T}{4} \right); \quad (2.46)$$

- для координати Y:

$$l_{кр}(Y) = \left[ \lim_{\varphi \rightarrow \pm\frac{\pi}{2}} \left| \sin(\omega_i t + \varphi) \right| \right] \sqrt{D_i^2 \sin^2 \frac{\Phi_{кр}}{2} + \frac{16}{3} p_{кр}^2}; \quad (2.47)$$

$$h_{кр}(Y) = \left[ \lim_{\varphi \rightarrow \pm\frac{\pi}{2}} \left| \sin(\omega_i t + \varphi) \right| \right] \left( \frac{D_i}{2} \sin \frac{\pi n_i t_T}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi n_i t_T}{4} \right). \quad (2.48)$$

У металообробці найбільш важливою величиною є не  $l_{кр}$ , а  $h_{кр}$ , оскільки це є безпосередня глибина необхідного руйнування поверхні деталі. Тому є особливо важливим зв'язок цієї величини із величиною подачі, що видно із залежності (2.42). Цій залежності  $h_{кр}$  співпадає з кроком руху інструмента  $t_k$ , але час кроку  $t_k$  є складний за своєю будовою. Він складається із дійсного часу руху інструмента  $t_{kd}$ , коли він виконує рух, а відстань  $l_k = h_{кр}$  та часу  $T$ , необхідного для проведення аналізу торкання деталі та рішення про подальші дії, тобто рухатися на ще один крок, якщо торкання немає, або зупинитися, якщо воно є, і зафіксувати координату [26, 27] торкання поверхні деталі.

Для того, щоб надійно зафіксувати координату поверхні, крапка на різальному окрайці повинна зробити повний оберт у пошуках поверхні деталі, де вона повинна доторкнутися. Таким чином виникає залежність: один крок інструмента – один оберт інструмента. Для того, щоб витримати цю залежність і пов'язаної з нею задачі виконання точності визначення координати, повинна виконуватися наступна математична залежність



$$t_{\text{кд}\parallel} = T_i, \quad (2.18)$$

де  $T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} = \frac{1}{n_i}$  - період обертання інструмента.

З усього сказаного вище можна зробити висновок, що найкращий варіант завдання швидкості подачі є крок позиціонування на один оберт інструмента. Але якщо розглянути графічну залежність рис. 2.10, то, вочевидь, подача у 1 мкм/об є занадто малою і її необхідно збільшувати, і досить значно.

Основна причина цього явища полягає в тому, що для отримання досить помітних швидкостей подачі необхідно значно збільшувати оберти інструмента. У сучасному виробництві існують обробні верстати, які мають швидкість обертання інструмента у 40000-50000 об/хв. Але навіть така швидкість обертання гарантує досить малі швидкості входження у торкання. Тому це можливо лише за збільшення  $h_{\text{кр}}$  і, як наслідок, величини кроку  $l_{\text{к}}$ , але до певної межі і за певних умов. Як здолати цю проблему, буде описано далі.

При торканні фрези торцем поверхні деталі таких проблем не виникає, оскільки максимально виступаюча верхівка (крапка КТ2) на певному різальному окрайці своїм рухом створює коло в площині, паралельній поверхні.

Розташування треку торкання (його діаметр  $D_2$ ) коливається у межах перепаду діаметрів  $D_{\text{вн}}$  та  $D_{\text{мах}}$  (див. рис. 2.8 та рис. 2.9,в).

Оскільки діаметр  $D_2$  невизначений за своєю величиною, то єдині проблеми, що можуть виникати, - це при торканні поверхні типу “сходинок”.

Така вузька поличка не повинна бути за шириною менше за  $\frac{D_{\text{мах}} - D_{\text{вн}}}{2}$  для того, щоб гарантувати відповідну точність. Що стосується довжини фрезерного інструмента (рис. 2.8), то це дуже добре контролюється різними контрольно-вимірювальними засобами і не являє великої проблеми із вимірюванням [25].

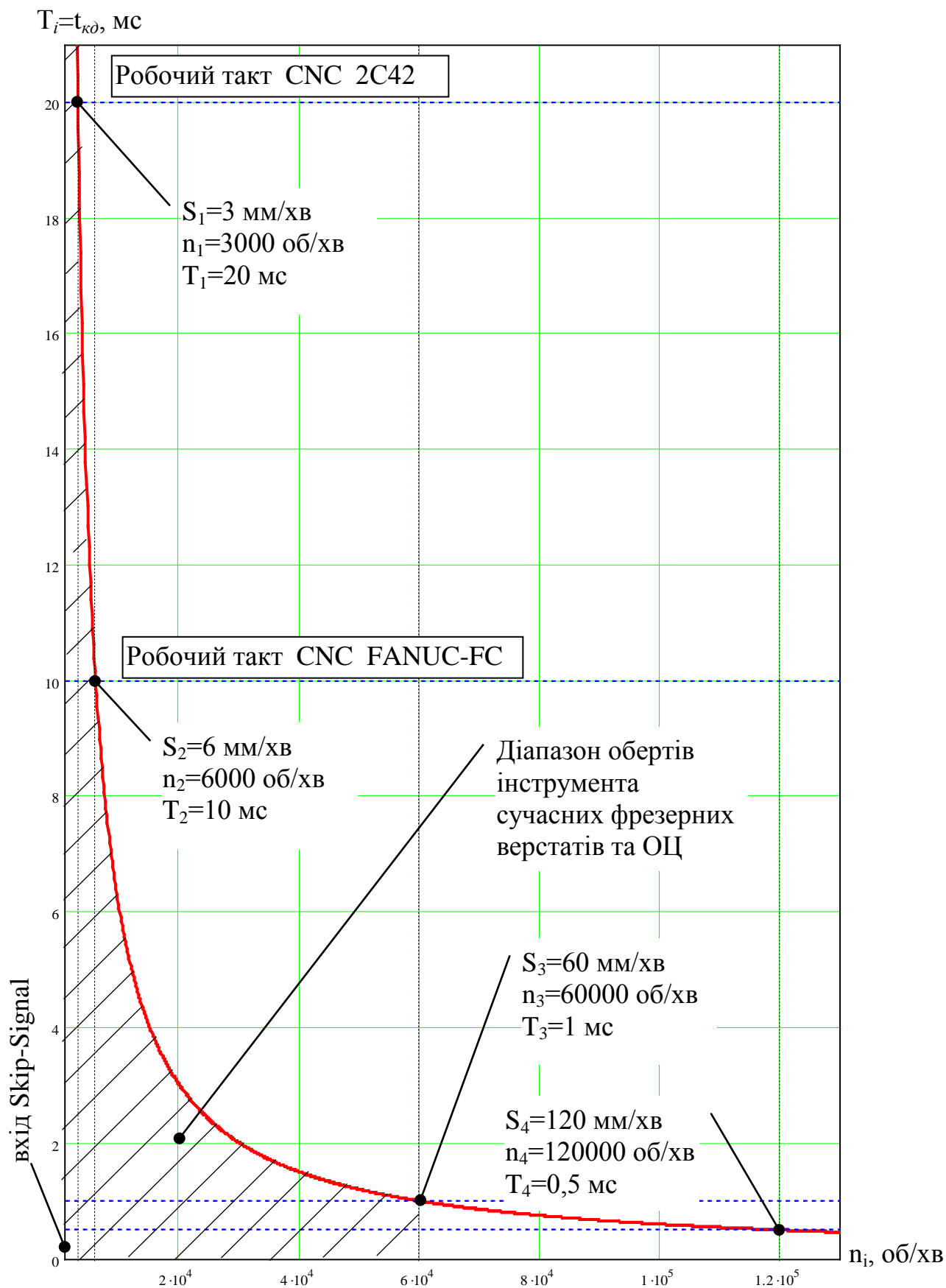


Рис. 2.10. Зв'язок подачі з основними параметрами руху та обертання інструмента для  $h_{\kappa p} = l_{\kappa} = 1 \text{ мкм}$

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Створено фізична модель інженерії поверхні об'єкту технологічної обробки на підставі дослідження поверхневих ефектів та субмікроскопічного рел'єфу поверхні деталі.
2. Запропоновано моделювання взаємодії об'єктів технологічної обробки та чутливих елементів аналізатора стану в зонах торкання на підставі дослідження електромагнітного випромінювання, що створюється об'єктами різального інструмента та досліджуваної поверхні деталі.
3. Розроблено загальні теоретичні принципи аналізу стану деталі та інструмента на основі аналізу поверхневих ефектів та об'ємних ефектів, що виникають під впливом різання та загальної взаємодії об'єктів.
4. Розглянуто графо-аналітичні схеми торкання фрезою поверхні деталі для дослідження можливих шляхів підвищення точності виготовлення прецизійних деталей приладів.

### РОЗДІЛ 3

## АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ТОЧНОСТІ ВВЕДЕННЯМ ЗВОРОТНЬОГО ЗВ'ЯЗКУ

Досить простий розгляд питання про точність визначення координати при фізичному торканні вимірювального інструмента до деталі вказує на те, що наближення до високої точності вимірювання залежить від неоднозначностей координати поверхні. Дослідження цього явища вказує на те, що умовно весь комплекс проблем, пов'язаних із невизначеністю моменту торкання і, як наслідок координати, є низка властивостей як ОВ (об'єкту вимірювання з погляду на нього, як на фізичний об'єкт), так і ЧЕ (чутливого елемента), які самі по собі створюють ефект подвоєності координати поверхні, який можна умовно назвати «дуальність поверхні». Це явище спостерігається навіть за ідеально-уявної системи координат, тобто за відсутності кривизни простору та дефектів рушійної системи верстата [83, 84, 87, 88, 89, 90, 91].

Наступною проблемою у досягненні великої точності є наявність «люфтів» у координатних рушіях верстата. Це явище супроводжує геть усі рушійні системи без винятку, оскільки це є механічна система, яка підкоряється типовим законам зносу навантаженої механіки. Особливо це стосується тих випадків, коли відбувається металообробка.

Тому напрямком досліджень є предмет достеменного розгляду засад утворення подібних явищ та їх вплив на загальний результат вимірювання.

Попри велику розповсюдженість великогабаритних фрезерних верстатів та ОЦ, а також токарних із системами керування типу CNC, вироби у приладобудуванні мають здебільшого невеликі розміри у порівнянні з габаритами робочого столу. Так, розміри деталей у приладобудуванні здебільшого не перевищують 100 мм, а їх вага – не більше за 1-2 кг, а тому робочий простір верстата використовується не повністю. Точність позиціонування для верстатів із системами керування типу CNC по поверхні стола не є однаковою, і це вимагає внесення у пам'ять системи відповідних величин корекції, які повинні враховуватись для підтримки точності. Однак ці величини є плинні з часом роботи верстата, оскільки існує знос рушійної системи, не враховуючи точність виготовлення рушійних систем. Мало того, при роботі верстата існують найбільш вживані ділянки робочої поверхні стола, що призводить до місцевої втрати точності (зонної). Тобто, існують ділянки, де точність позиціонування може бути у кілька разів нижчою за інші. Звідси

отримуємо висновок щодо нераціонального використання. Звідси впливають наступні технологічні проблеми визначення координати поверхні деталі робочим інструментом:

- процеси визначення координати поверхні та їх вплив на точність цієї технологічної операції;

- дуальність поверхні фізичного тіла (деталі) як наслідок неоднозначності вимірювальних і рушійних систем верстатів;

- зонна точність верстатів при обробці деталей у приладобудуванні.

Як було вже показано авторськими роботами [78, 82, 91, 92, 93], будь-яка абстрактна сутність (АС), зокрема об'єкти технологічного процесу, мають власні зони присутності, панданні зони (ПЗ). Саме панданна зона буде основним носієм зони присутності, за якою визначаються ті чи інші параметри певного ТО.

### **3.1. Зона присутності абстрактної сутності та технологічного об'єкта**

При будь-яких вимірюваннях відчутник у першу чергу зустрічається з ЗП і по її потужності формує сигнал, який спочатку сповіщає про наближення до об'єкту і вже потім про його фізичні параметри. Тому у цьому розділі розглянуто процеси, які впливають на створення зони присутності технологічних об'єктів (ТО).

#### **3.1.1. Вплив панданної зони технологічного об'єкта на стабільність реєстрації зони присутності**

Отже, для того, щоб зареєструвати відстань до ТО із необхідною точністю, необхідно мати достеменні знання про розташування відчутника та ТО у просторі.

Але для того, щоб зареєструвати будь-який об'єкт на відстані, необхідно мати відчутник, який вирішує відповідні задачі стосовно АС, що досліджується. Первинною задачею такого дослідження є визначення відстані відносно досліджуваного об'єкту та швидкості його руху, і лише на третьому етапі є можливість визначення його параметрів. Основне пояснення подібної ситуації базується на засадах закону агресії [92, 93].

Розглянемо досить простий дослід, основи якого покладені у розгляд ПЗ (рис. 3.1). Для цього уявимо собі, що існує деякий чутливий елемент (ЧЕ), який розташовано на відстані  $X_B$  від АС (колова геометрія) із центром у  $O_G$ , який обертається навколо центру  $O_{OB}$  з кутовою швидкістю  $\omega$ . Водночас, ця АС з

точки погляду відчутника спостерігається під кутом  $\alpha$ , а товщина диску забезпечує нормальний процес реєстрації торкання.

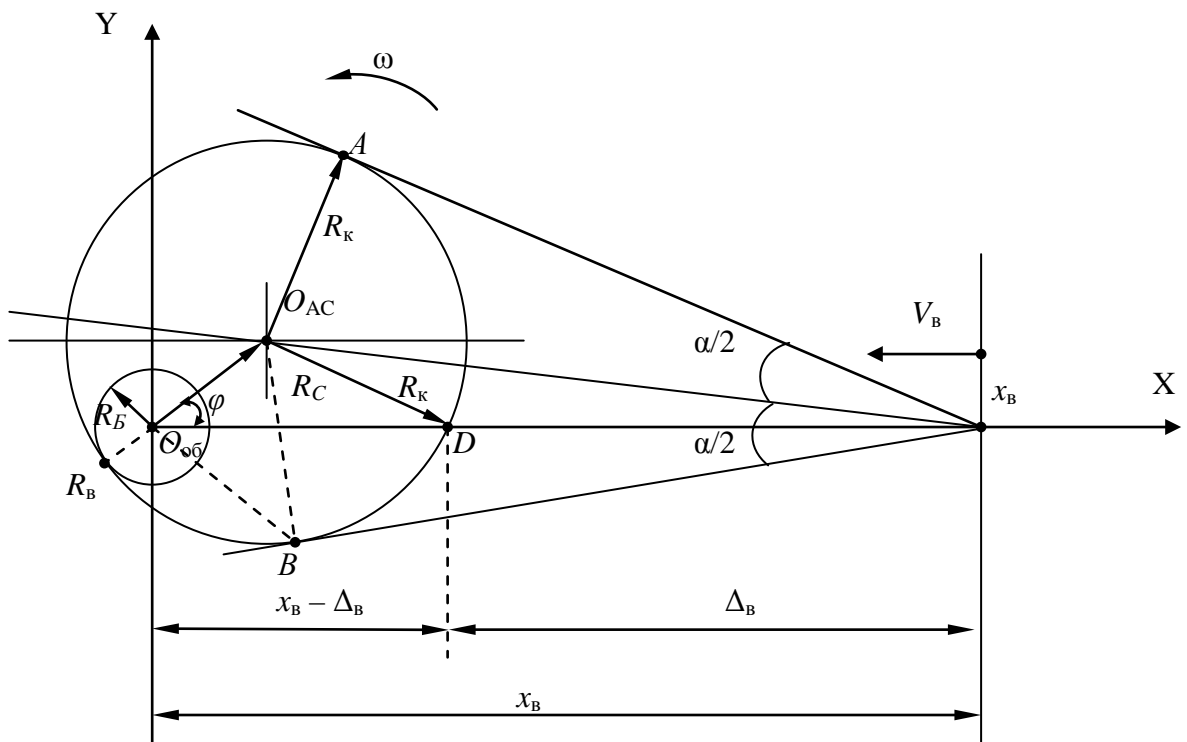


Рис. 3.1. Утворення зони присутності абстрактної сутності при русі центра маси

Абсолютно є достеменним, що сутність, яка має опис фізичної дії, створюватиме відповідний сигнал у відчутнику. Окрім того, необхідно зауважити, що у точці  $X_B$  дія матиме комплексний характер залежно від растрового кута. Ще раз нагадуємо, що задача вирішується у площині: при цьому відстань максимальної потужності дії відповідатиме відстані  $C$   $X_B$ , а координата торкання буде знаходитися у точці  $D$ , тобто нам необхідно вирішити задачу стосовно впливу руху ПЗ на сигнал відчутника.

Користуючись засадами математичних залежностей, які притаманні косокутному трикутнику, маємо можливість скористатися наступною залежністю для трикутника  $\Delta O_{AC}, O_{OB}, x_B$

$$(x_B C)(x_B C + 2R_K) = (A x_B)^2. \quad (3.1)$$

При цьому відстань фізичної дії, тобто  $\Delta_\phi$  [94, 95] (на рис. 3.1 не показано) від центру АС буде наступною:

$$\Delta_{\phi} = O_{AC}x_B = (x_B C + R_K) = \sqrt{R_c^2 + x_B^2 - 2R_c x_B \cos \varphi}. \quad (3.2)$$

Уявімо собі, що швидкість відчутника  $V_B$  є надвеликою у порівнянні з кутовою швидкістю  $\omega$ . У цьому випадку матимемо момент фізичного торкання у точці  $D$ . Відповідно до цього координата має наступну залежність:

$$x_B - \Delta_B = \sqrt{R_c^2 + R_K^2 - 2R_c R_K \cos \varphi}. \quad (3.3)$$

Користуючись залежністю для випромінюючих АС, тобто

$$F_{\phi} = \frac{K_{\phi}}{\Delta_{\phi}^n} \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (3.4)$$

отримуємо наступне

$$R_K = \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{R_c^2 + R_B^2 - 2R_c x_B \cos \varphi}. \quad (3.5)$$

Для статичного випадку, користуючись (3.3), (3.4), (3.5), матимемо

$$F_{\phi} = \frac{K_{\phi}}{\left(\sqrt{R_c^2 + x_B^2 - 2R_c x_B \cos \varphi}\right)^n} \cdot \frac{R_K^2}{R_c^2 + x_B^2 - 2R_c x_B \cos \varphi} \quad (3.6)$$

або

$$F_{\phi} = \frac{K_{\phi} R_K^2}{(R_c^2 + x_B^2 - 2R_c x_B \cos \varphi)^{n-1}}. \quad (3.7)$$

Аналізуючи вираз (3.7) відносно максимальних та мінімальних значень, матимемо наступне

$$F_{\phi} = \frac{K_{\phi} R_K^2}{(R_c^2 + x_B^2 - 2R_c x_B)^{n-1}}, \quad (3.8)$$

що відповідатиме максимальній дії на відчутник при  $\varphi = 0$ , а  $\cos \varphi = 1$ .

Мінімальний вплив на відчутник відповідатиме ситуації, коли  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ,  $\cos \varphi = 0$ , тобто маємо

$$F_{\phi} = \frac{K_{\phi} R_K^2}{(R_c^2 + x_B^2)^{n-1}}. \quad (3.9)$$

Для випадку, який ми розглядаємо існує критична ситуація, а саме, момент утворення панданного вакууму. Створюється подібна ситуація за умови  $R_K = R_c$ , звідки маємо наступні висновки:

- для максимального значення потужності, тобто за умови  $x_b = R_c = R_k$  отримуємо:

$$F_\phi = \frac{K_\phi R_c^2}{(R_c^2 - R_c^2 \cos \phi)^{n-1}}; \quad (3.10)$$

- для мінімальних значень потужностей, тобто при умові  $x_b = 2R_c + R_k$  матимемо

$$F_\phi = \frac{K_\phi R_c^2}{[R_c^2 + (2R_c + R_k)^2 - 2R_c(2R_c + R_k)\cos \phi]^{n-1}}. \quad (3.11)$$

Розглянемо процеси, що відбуваються у зоні панданного вакууму. Тоді відчутник має координату  $x_b < |2R_c - R_k|$ .

Для цього випадку ситуація дзеркально змінюється відносно сказаного вище. Координата входження відчутника у панданний вакуум відповідає  $x_b = R_c - R_k$ .

Перехід, який реєструється за максимальної потужності АС, відбувається при значенні  $x_b = R_c - R_k$ , тобто

$$F_\phi = \frac{K_\phi R_k^2}{[R_c^2 + (R_c - R_k)^2 - 2R_c(R_c - R_k)\cos \phi]^{n-1}}. \quad (3.12)$$

Мінімальне значення функція приймає при  $x_b = 2R_c - R_k$ , тобто

$$F_\phi = \frac{K_\phi R_k^2}{[R_c^2 + (2R_c - R_k)^2 - 2R_c(2R_c - R_k)\cos \phi]^{n-1}}. \quad (3.13)$$

Стосовно панданного вакууму існують ще дві особливості (на увазі мається його зона присутності у межах АС).

Першою такою особливістю є ситуації його реєстрації, коли  $x_b = 0$ , тобто відчутник знаходиться у геометричному центрі панданного вакууму.

У такому випадку залежності (3.12, 3.13) набувають наступного вигляду:

$$F_\phi = \frac{K_\phi R_k^2}{(R_c^2)^{n-1}} = \frac{K_\phi}{R_c^{n-1}}. \quad (3.14)$$

Тобто незалежно від фазового кута у центрі панданного вакууму буде статична рівнодіюча у всіх напрямках (у визначеному прикладі XY).

Наступна ситуація виникає, коли координата відчутника  $x_b = 0$ , а  $R_c \rightarrow \infty$ .



У цьому випадку необхідно розглядати невизначеність наступного вигляду:

$$\lim_{R_c \rightarrow \infty} F_\phi = \frac{K_\phi R_k^2}{[(\infty)^2 + (0)^2 - 2(\infty)(0)\cos\phi]^{n-1}} = F_T. \quad (3.15)$$

Реально ця функція приймає мінімальний рівень, коли на певній відстані її не можна відокремити від потужності шумового тла, тобто  $F_T$ .

Ця ситуація дуже схожа на протилежну, тобто  $R_c \rightarrow 0$ , а  $x_b \rightarrow \infty$ .

У такому випадку отримуємо невизначеність наступного вигляду:

$$\lim_{x_b \rightarrow \infty} F_\phi = \frac{K_\phi R_k^2}{[(0)^2 + (\infty)^2 - 2(0)(\infty)\cos\phi]^{n-1}} = F_T. \quad (3.16)$$

Якщо прийняти, що при статистичному  $R_k$  величини  $R_c$  та  $x_b$  приймають такі значення, що відчутник впевнено реєструє присутність АС, то можна визначитися із величиною зони торкання для ЗП.

Для цього приведемо вираз (3.13) до наступного вигляду:

$$R_c^2 + x_b^2 - 2R_c x_b \cos\phi = \sqrt[n-1]{\frac{K_\phi R_k^2}{F_\phi}}. \quad (3.17)$$

Вирішуючи це рівняння відносно  $x_b$  за умови, що фазовий кут  $\phi = 0$ , матимемо значення максимальної далекодії зони присутності  $x_{b\max}$ , тобто  $L_{3П}^{\max}$

$$L_{3П}^{\max} = R_c + \sqrt[n-2]{\frac{K_\phi R_k^2}{F_\phi}}. \quad (3.18)$$

З проведеного математичного моделювання необхідно зробити вагомий висновок, що будь-який відчутник завжди реєструватиме не тільки сталу величину потужності ПЗ, але й відповідні модуляції. Він також тісно пов'язаний з рухом у просторі. Це означає, що у просторі ПЗ передається не тільки рух, але і варіації геометрії АС.

### 3.1.2. Джерела створення електромагнітної зони присутності технологічних об'єктів

У загальній кількості деталей, що надходять до технологічного процесу, переважають матеріали, які у своєму переліку мають властивості електромагнітних речовин. Цим речовинам та їх хімічним сполукам притаманні

і якості електропровідності, і якості концентраторів або деконцентраторів магнітного поля. Взаємодія ЕМП та речовини безпосередньо пов'язана з явищами поляризації та намагнічування, заснованим на поняттях диполя молекулярних та атомних розмірів.

Оскільки ЗП є фізичним явищем, яке є притаманним всім АС без виключення, необхідно розглянути генезу їх утворення.

Найпростіший розподіл цих польових структур відбувається на рівні природних та штучних. Але властивості кожного з обраних АС призводять до того, що, як наслідок, ми отримуємо дещо більшу за розмірами класифікацію.

Наразі маємо можливість констатувати наступні властивості взаємодії та утворення польових структур АС у навколишньому середовищі, тобто:

- активне вироблення польової структури у навколишньому середовищі відносно об'єму АС, коли вона використовує свої внутрішні енергетичні ресурси або свої властивості. Найкращим прикладом є магнітне поле, яке утворюється феромагнетиками;
- взаємодія із зовнішніми польовими структурами призводить до їх повного відбиття, наприклад, дзеркальні поверхні;
- взаємодія із зовнішніми польовими структурами призводить до його спотворення та часткового поглинання, наприклад взаємодія магнітних та електричних полів;
- взаємодія із зовнішніми польовими структурами призводить до їх повного поглинання, наприклад абсолютно чорні ТО;
- взаємодія із зовнішніми польовими структурами взагалі відсутня, наприклад, проходження радіовипромінювання через пластичні матеріали тощо.

Оскільки нас цікавлять ТО металічного походження, які являють собою превалюючу кількість матеріалів при приладобудівному виробництві, то надалі у розгляді фізичних процесів утворення ЗП саме ці матеріали та їх властивості будуть матися на увазі.

Зазвичай всі ТО мають різноманітні електричні та магнітні властивості. Здебільшого у металообробці – це феромагнітні матеріали із яскраво означеними електричними характеристиками. Оскільки питання стосується металообробки, то звісно, що на першому плані ми маємо металообробний верстат та низку пристосувань, які виконують відповідно ті чи інші технологічні задачі. Достатньо поверхневого погляду на це обладнання, щоб констатувати той факт, що всі вони побудовані з матеріалів, які мають дуже

добрі електрофізичні властивості. Окрім того, окремі матеріали, які йдуть на побудову верстатів, мають ще кращі магнітні властивості, які утворюють навколо себе статичні магнітні поля. Як наслідок, всі ці специфічні фізичні ефекти призводять до утворення навколо верстата ЕМП, що створює зону присутності, на яку реагують електромагнітні відчутники.

Внесення деталі, котра має електрофізичні властивості, у зону обробки призводить до того, що конфігурація цих полів змінюється і це, як наслідок, відбивається на роботі чутливих елементів контрольних пристроїв технологічних процесів. Саме такі зміни полів повинні бути підконтрольними стосовно технологічних процесів обробки. Звісно, що на всі флуктуації електромагнітних полів впливають властивості матеріалів (табл. 5.1), але, окрім них, існує низка зовнішніх та внутрішніх процесів, які створюють безпосередню фізичну дію, яку реєструє відчутник.

Якщо абстрагуватися від конкретної побудови верстата як такого, то можна дійти висновку, що існує розшарування на джерела та приймачі ЕМП [96]. Провести різке розмежування між джерелами ЕМП та їх приймачами неможливо, оскільки через фізичні властивості ТО ми наштовхуємось на явище дуальності фізики процесу, тобто будь-який ТО може бути як джерелом випромінювання ЕМП, так і його приймачем. Єдиним критерієм тут слугує теза, наскільки це добрий випромінювач або приймач, і саме за цією тезою може бути проведене умовне розмежування.

У табл. 3.1 [97] наведено властивості найбільш застосовуваних матеріалів у ТО, що використовуються при металообробці і для деталей, і для верстатів.

Для всіх цих матеріалів існує відносний розподіл за групами [97]. В основі цього розподілу лежать три основних принципи. Це, по-перше, розподіл за діелектричними властивостями. По-друге, розподіл за властивостями електропровідності. По-третє, розподіл за магнітними властивостями. Звісно, що через широкий діапазон властивостей матеріалів ми не можемо провести чітку межу між ними, звідси така широка класифікація на групи. Як наслідок, це призводить до орієнтації на деякі крайнощі. Так, наприклад, для провідників  $\epsilon \approx 8,854 \text{ пФ/м}$  ( $\epsilon_r = 1$ ), але всі інші властивості є залежними від хімічного складу матеріалу, технологічного процесу обробки матеріалу та зовнішніх умов роботи, наприклад, відповідною обробкою низки нікелевих топів їх магнітну проникність  $\mu = 1,257\mu_r \text{ мкГ/м}$  можна підвищити у 100 разів.

Отже, до першої групи відносяться хімічні елементи та матеріали з досить високою гальванічною активністю (потужні анодні властивості).

Таблиця 3.1. Властивості типових провідників

Матеріал	Група	$\rho$ при 20 <sup>0</sup> С, нОм·м	$\mu_r$	Щільність, кг/м <sup>3</sup>
Магній	Хімічні елементи та метали з високою гальванічною активністю. Потужні анодні властивості (I)	42	1	1740
Магнієві топи		50-143	1	1750-1870
Алюміній	Анодні властивості (II)	27	1	2700
Цинк		60	1	7140
Кадмій		73	1	8640
Алюмінієві топи		27-86	1	2570-2930
Залізо	Середньоактивні властивості (III)	101	60-7000	7870
Олово		126	1	7300
М'яка сталь		100-197	120-2000	7860
Свинець		206	1	11680
Супермаллой		550-600	50000-100000	8800
Мю-метал		550-600	15000-150000	8800
Пермаллой		260-900	400-400000	8100-8800
Метглас		1250	62000-1100000	7280
Нікель	Хімічні елементи та метали низької активності. Катодні властивості (IV)	69	50-530	8900
Хром		132	1	7100
Топ нікель-срібло		290	1	8800
Нержавіюча сталь		560-780	1	7730-7960
Срібло	Хімічні елементи метала наднизької гальванічної активності. Потужні катодні властивості (V)	16	1	10500
Мідь		17,2	1	8960
Золото		22	1	19300
Топ берилій-мідь		37-102	1	8250
Латунь		61-110	1	8350-8700
Платина		106	1	21450
Бронза		91-212	1	7570-8850
Монель-метал		510-614	1	8460-8830
Титан		540	1	4500
Топа титана		482-1700	1	4420-4860
Графіт		6800-33000	1	2300-2720

П'ята група являє собою матеріали гальванічно малоактивні (катодні властивості). Оскільки всі ці матеріали застосовуються у металообробці, то, як наслідок, у будь-якому верстаті ми отримуємо низку електричних ланцюгів, котрі приймають участь у формуванні зовнішнього ЕМП і верстата, і деталі.

Знову таки, чіткого розмежування частин верстата на джерела й приймачі зробити не можна. Іноді один і той же самий елемент може бути одночасно і джерелом і приймачем ЕМП. Так, наприклад, станина верстата є одночасно джерелом магнітного поля і його приймачем від силових електричних мереж тощо.

Тому, на першому етапі при вирішенні конкретного завдання зручно вважати, що всі елементи верстата є потенційними джерелами й приймачами ЕМП, обираючи потім методом послідовного виключення найбільш імовірні варіанти, що підлягають детальному опрацюванню.

Чим вище співвідношення рівнів потужностей і напруг між будь-якими частинами верстата, тим імовірніше передача ЕМП з однієї із цих частин на іншу. Оскільки будь-який верстат можна розглядати як низку контурів  $RLC$ , то при однакових коефіцієнтах паразитного зв'язку на резонансних контурах, що працюють на основній частоті, збуджується більша напруга, ніж у аперіодичній або у розналагодженої системах. Тому з усіх елементів верстата найбільш імовірними джерелами наведення є елементи з найвищими рівнями високочастотної або імпульсної потужності. Найбільш імовірними приймачами ЕМП є елементи з найменшим рівнем високочастотної потужності, що містять резонансні контури, налаштовані на частоти, що випромінювані ймовірними джерелами ЕМП.

При розробці та експериментальному доведенні важливо знати ймовірні джерела й приймачі ЕМП для вживання необхідних заходів. Нижче наводиться перелік джерел ЕМП, користуючись яким варто враховувати, що у конкретних конструкціях можливі й інші, досить несподівані джерела й приймачі ЕМП. Отже, найбільш впливові наступні:

- природне електромагнітне поле;
- зовнішнє електромагнітне випромінювання;
- мережа живлення змінного струму;
- потужні генератори високої частоти, особливо працюючі в нелінійному режимі та імпульсні;
- імпульсні модулятори з високою напругою і великим струмом;
- електрозварювальні апарати;
- електропечі з дуговим розрядом;
- генератори імпульсів, особливо з великим струмом, наприклад, блокінг-генератори;

- генератори розгортки, особливо з високою напругою і малим часом зворотного ходу;
- обмотки реле, контакторів, соленоїдів та інших приладів, які мають велику індуктивність і працюють в режимі вмикання-вимикання;
- електродвигуни, працюючі в режимі вмикання-вимикання;
- колекторні електродвигуни;
- вимикачі, перемикачі та контактні пари реле;
- флуоресцентні освітлювальні прилади;
- ферорезонансні стабілізатори напруги;
- вихідні та силові трансформатори; дроселі живлення із щілиною;
- вихідні та передвихідні каскади підсилювачів високої, проміжної і низької частот;
- специфічні фізичні процеси, які супроводжують процес металообробки [98 - 101].

Цей перелік імовірних джерел випромінювання вказує на те, що, як наслідок, ми отримуємо суцільний спектр ЕМП, який необхідно досліджувати стосовно додатку кожної складової. Стосовно вищезначеного переліку джерел неможливо зробити більш-менш достеменний розгляд усіх чинників. Тому, розглянемо основні, найбільш впливові, які відзначаються на кінцевому результаті вимірювання.

### **3.1.3. Природні джерела електромагнітного поля**

Природне ЕМП створюється завдяки низки геофізичних, астрономічних та атмосферних явищ, що відбуваються як у середині земної кулі, так і на її поверхні та зовні. Взагалі, магнітне поле Землі має статичну складову та змінну. Статична складова магнітного поля Землі  $0,5e$  (ерстед) ( $40A/m$ ), як така, має виключно умовну статичність. Довгоперіодичні зміни потужності магнітного поля впливають лише на намагніченість частин верстата і деталей. Ця намагніченість виказує свій вплив лише в динаміці, коли відбувається процес металообробки. Конфігурація магнітного поля, як відомо, є залежною від форми об'єкту [81, 102-107] і незалежною від його потужності. Як наслідок, постійний вплив магнітного поля Землі на верстат і деталь призводить до постійної зміни намагніченості окремих елементів. Окрім того, слід враховувати, що напруженість магнітного поля Землі є локальне явище. Це означає, що три основні складові напруженості магнітного поля Землі, тобто  $\overline{H}_x$ ,  $\overline{H}_y$ ,  $\overline{H}_z$  (вектори) є плинними залежно від координат місця знаходження на

поверхні. Як наслідок, ступінь намагніченості верстата є залежною від його геометрії та його розташування у просторі. Так верстати, які мають відносну вертикальну подовженість відносно горизонтальної, більше реагуватимуть на вертикальну складову ( $H_z$ ), ніж верстати, подовжені у горизонтальній площині, які знаходяться під дією векторів  $H_x$  та  $H_y$ . До сталих складових необхідно віднести і магнітне поле, яке створюється сталими атмосферними струмами. Сутність явища пояснюється активністю Сонця, яка збуджує стратосферні нашарування атмосфери земної кулі, створюючи різницю потенціалів і, як наслідок, струми з більш менш статичним магнітним полем.

До магнітних складових сталого магнітного поля необхідно зауважити явище телуричних струмів, як наслідок взаємодії гірських порід, мінералів та гідротермальних течій. Подібна активність здебільшого спостерігається поблизу гірських масивів або геологічних аномалій. Тобто у підсумку необхідно зауважити, що при будь-якому розташуванні верстата або деталі завжди буде існувати залишкова намагніченість деталей технологічної системи. Змінна складова ЕМП Землі є більш активна завдяки своєму імпульсному характеру. Такий імпульсний характер є наслідком виникнення потужних електростатичних розрядів, що виникають внаслідок накопичення статичної електрики між атмосферними шарами та поверхнею Землі, тобто блискавок. У спеціалізованій літературі [108, 109], що присвячується цьому питанню, електромагнітні витоки, які виникають внаслідок електростатичного розряду (блискавки) мають назву атмосферіки.

Водночас,  $I(\omega)$  – спектральна щільність струму при розряді блискавки (модель у вигляді диполя Герца) заданої форми  $I(t) = I_{\Pi} (e^{-At} - e^{-Bt})$  з параметрами  $A = 10^3 \div 10^4$ ,  $B = 10^4 \div 10^5$ ,  $I_{\Pi} = (10 \div 100)$  кА, до того ж

$$I(\omega) = \frac{iI_{\Pi}H_i}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{1}{\omega + iA} - \frac{1}{\omega + iB} \right), \quad (3.19)$$

де  $H_i$  – діюча висота іоносфери,

$i$  – уявна одиниця.

На рис. 3.2 наведено спектр атмосферіків, залежний від часу доби. Свого часу авторами проводилось дослідження спектру за допомогою відчутників  $RLC$ , що повністю доводить достовірність отриманих результатів у роботі [110].

Зазвичай у більшості робіт, присвячених цій темі, результати відображають у вигляді середніх значень напруги  $\overline{U(t)}$ , яку створює поле Землі на виході

вузькосмугового фільтра з шириною смуги  $\Delta f_y$  (у різних роботах значення  $\Delta f_y$  є різними).

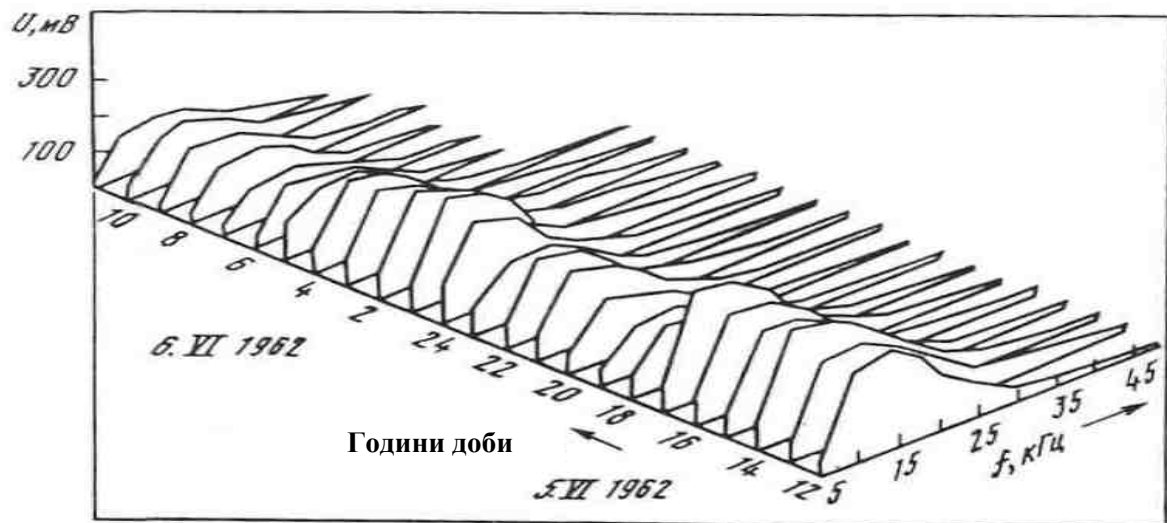


Рис. 3.2. Зміна середньої за годину форми спектру атмосфериків впродовж доби

Оскільки відчутники  $RLC$  мають яскраво окреслену смугову частотну характеристику, то можна вважати, що залежність [108]

$$S = \sqrt{\frac{\pi^2 (\overline{E})^2}{8\Delta f_y}} \quad (3.20)$$

може повністю задовольнити наші вимоги щодо шумової компоненти природного походження.

У виразі (3.20) маємо наступні складові:  $\overline{E} = \overline{U(t)\Delta f} \cdot K_B$ , де  $K_B$  – коефіцієнт передачі відчутника, який має розмірність В/м, а  $\Delta f_y$  – розмірність Гц. Спектр стосовно магнітного поля є аналогічним.

Отже, у скороченому підсумку необхідно констатувати той факт, що будь-яке технологічне обладнання знаходиться під впливом як статичного, так і змінного природного ЕМП Землі. Потужність впливу цих полів на роботу відчутників технологічних процесів на засадах ЕМП ще не достатньо вивчена, тому, як наслідок, у СКТ вводиться додатковий генератор поля, який створює навколо деталі відповідну зону присутності. Основні властивості та



характеристики електромагнітної зони присутності деталі було розглянуто в авторських роботах [26, 92, 93, 96, 111, 112, 113, 114, 115].

#### **3.1.4. Чинники виникнення змінної електрорушійної сили у системі технологічного обладнання**

За останні кілька десятиліть електричні явища у металообробці були досить ретельно вивчені [19, 26, 42, 65, 86, 110, 116, 117, 118, 119, 120]. Наразі це стосується зазвичай термоелектрики, яка супроводжує руйнування матеріалів під час процесів різання. Така цікавість до саме цих процесів пояснюється тим, що є можливість приблизної оцінки температури у зоні різання. Ця система наукових досліджень була здебільшого спрямована на можливість посередньої оцінки ступеню зносу інструмента і, як наслідок, можливості побудови за цим принципом адаптивної системи керування процесом металообробки. Але всі спроби так і залишилися нереалізованими.

З одного боку, ця ситуація виникла тому, що конструкція металообробного верстата є дуже складним електромеханічним об'єктом, а з іншого боку, врахування виключно термоелектричних явищ виявило односпрямованість вирішення цієї проблеми.

Одночасно з цим цей підхід до вирішення поставленої задачі залишив поза розглядом цілу низку електрофізичних явищ, які впливають на загальний результат роботи адаптивної системи.

Звідсіля є постановка задачі щодо більш достеменного дослідження електричних явищ процесів металообробки. Оскільки здебільшого дослідження були цілеспрямовані на терморушійну силу (ТРС) різання як одного із засобів вирішення проблеми не лише у лабораторних дослідженнях, а й основної фундації принципів адаптивної системи керування, то, як наслідок, для контролю процесу в металообробці використовувались такі електричні ефекти та закони:

- термоелектронна емісія або «випаровування» електронів з розпеченої поверхні металу;
- екзоелектронна емісія (ефект Крамера) відбувається за досить низьких температур як наслідок деформації металів, наприклад при різанні;
- термоелектричні явища, пов'язані з силовою взаємодією різнорідних металів під дією температури, а саме під впливом на контактну різницю потенціалів;
- ефект Пельтьє, який полягає в тому, що при проходженні струму через низку однорідних контактів в одних є виток тепла, а в інших йде його поглинання;
- ефект Томпсона, який полягає в тому, що при проходженні струму через низку

однорідних контактів з різною температурою в одних поглинається тепло, а в інших йде виток, але все залежить від напрямку струму через контакт;

- електрохімічні ефекти, які є наслідком взаємодії компонентів металорізального процесу з мастильними та охолоджувальними рідинами.

Не треба досить прискіпливого погляду, щоб побачити подвійність ТРС, тобто вона складається зі сталої та змінної складових. При досить достеменному дослідженні можна помітити, що, наприклад, термоелектричні явища можуть сягати своєю частотою десятків МГц і пов'язані з перехідними процесами у технологічному обладнанні [13, 17, 19, 42, 65, 121, 122]. Проте, виявляються зовсім недослідженими кілька фізичних ефектів, які притаманні процесам металообробки:

- контурна електрорушійна сила (ЕРС), яка виникає у процесі металообробки при контактуванні різального інструмента і деталі під дією зовнішнього та внутрішнього ЕМП;
- скін-ефект, який виникає на поверхні обладнання під дією зовнішнього та внутрішнього ЕМП;
- вихроструміві ефекти під дією ЕМП;
- уніполярна індукція, яка виникає у об'єктах, що обертаються, у статичному магнітному полі;
- рух виродженого електронного газу в об'єктах, що обертаються;
  - рух виродженого електронного газу під дією вібрацій;
  - ЕРС, яка виробляється підшипниками шпинделя;
- гіромагнітний ефект Енштейна-де Гіза, що полягає у намагнічуванні маси, яка обертається під дією зовнішнього магнітного поля, а також відцентрових сил, які діють на магнітний домен;
  - коливання опору шпинделя на масу верстата залежно від швидкості обертання.

Цей досить невеликий перелік неврахованих електрофізичних явищ у металообробці викликає щонайменше здивування, чому вони не були враховані при вимірюванні термо-ЕРС (ТЕРС). Тому основною задачею проблеми, що розглядається, є визначення низки чинників, які впливають на загальний результат вимірювань.

Тим не менш висока чутливість електромагнітних відчутників вимагає більш достеменного дослідження фізичних процесів, які пов'язані з металообробкою та можливістю керування технологічними процесами на великих швидкостях обробки. Тобто необхідно розглянути основне підґрунтя виникнення подібної проблеми.

### 3.1.5. Підґрунтя утворення змінної електрорушійної сили та межі можливостей її реєстрації

Конструктивні особливості та фізичний принцип роботи електромагнітного відчутника дозволяють отримувати досить якісний контроль технологічних процесів. Так, наприклад, реєстрація моменту торкання інструмента до поверхні деталі не вимагає надскладних технічних рішень.

Зазвичай для надійної реєстрації моменту торкання достатньо чутливості до напруженості магнітного поля в  $10^{-4} \div 10^{-5}$  А/м, що не викликає побудови складних схем обробки інформації відчутника. Для реєстрації зони присутності деталі достатньо мати чутливість до ЕМП  $10^{-6} \div 10^{-7}$  А/м. Окрім того, досить нескладне переналагодження частоти у сотні кГц та можливість керування шириною смуги пропускання створюють додаткові можливості при контролі технологічних процесів. Але це ще далеко не є межею можливостей електромагнітних відчутників. Цілком реальною є чутливість до ЕМП у  $10^{-10}$  А/м та переналагодження у кілька МГц. Наразі поки що не існує більш високоякісних систем контролю за своєю швидкодією ( $5 \div 100$ ) мкс, які дозволяють отримувати точність визначення координат торкання у 200 Å.

Специфіка роботи електромагнітних відчутників, а особливо їх висока чутливість, надають нові можливості у контролі технологічних процесів. Тому виникає низка проблем щодо визначення чинників виникнення змінного магнітного поля у металообробному обладнанні та їх зв'язку з конкретними фізичними процесами. Якщо зауважити, що швидкості різання у металообробці значно зросли, а з ними різко посилилась динаміка ЕМП, то це вимагає орієнтовного теоретичного дослідження можливих явищ та процесів, які можуть виникнути в процесі металообробки, які раніш не враховували.

Металообробний верстат як конструкція являє собою велику масу металічних деталей, з'єднаних в одне ціле. Цілком природно, що ця конструкція не може бути однорідною і за своїми геометричними розмірами, і за розподілом маси метала у цьому просторі. Велика кількість подібних відмінностей призводить до того, що електричні властивості кожного визначеного об'єму мають відмінності за своїми фізико-хімічними та електродинамічними властивостями. Це призводить до того, що у кожному окремо визначеному об'ємі верстата відбуваються свої специфічні електродинамічні процеси, які посередньо або безпосередньо впливають на загальне ЕМП верстата. Як наслідок, ці електрофізичні процеси впливають на результати роботи електромагнітних відчутників, які необхідно врахувати при вимірюваннях.

Якщо розглянути всі можливі варіанти виникнення ЕРС та струмів у масі верстата і, як наслідок, формування загального ЕМП, то можна дійти наступного висновку.

По-перше, це ЕРС, струми та ЕМП, які існують у масі верстата незалежно від того підключений він до силової мережі чи ні, оброблює він деталь чи просто працює на холостому ході. Здебільшого це стосується різного роду контактних ЕРС, які виникають поміж деталями верстата, впливу зовнішнього змінного ЕМП та сталого магнітного поля Землі.

По-друге, це струми ЕРС та ЕМП, які виникають внаслідок увімкнення верстата у силову мережу. У цьому випадку верстат отримує потужне ЕМП від струмів мережі та системи CNC. Окрім того, за наявності постійно рухомих частин та агрегатів виникають ЕРС та струми, пов'язані з процесами тертя.

По-третє, це струми ЕРС та ЕМП, які виникають внаслідок процесу металообробки. Основним чинником тут є термоЕРС у зоні різання, яка за своєю потужністю є найбільша серед інших вище згаданих. Але існують фізичні процеси, пов'язані з обертанням деталі або інструмента.

По-четверте, наявність механічних частин, що обертаються, призводить до значної модуляції сталих ЕРС та струмів у масі верстата. Як наслідок виникає змінний струм та притаманне йому ЕМП.

Отже, приймаючи попередні тези як основні, ми маємо можливість сформулювати уявлення про струми, які протікають у масі металообробного обладнання. В основі цих тез мають бути закладені і сталі, і змінні ЕРС. Як наслідок струм, приведений до місця торкання інструмента і деталі, матиме дві складові: одна стала, а інша - змінна. До того ж, частина сталих струмів має можливість перетворення у змінні завдяки модуляційним властивостям механіки верстата.

Особливістю подібного розгляду змінних струмів є те, що їх підсумкову величину необхідно розглядати як векторну суму, що значно ускладнює інтегральну оцінку загального сигналу, але полегшує диференційну. Як наслідок, кожний верстат має різні спектральні характеристики, за якими є можливість відслідковувати не тільки його розташування у просторі, але й термін роботи. Тобто це може бути досить дієвий спосіб оцінювання стану металообробного обладнання. Що найменше, це було підтверджено дослідями.

Отже, СКТ у момент торкання отримує подвійний імпульс струму. Перший з них - постійний  $I_0$ , а другий - змінний  $I_{\sim}$ , за яким утворюється сигнал спрацювання системи, тобто підсумковий струм  $I_{\Sigma}$  необхідно оцінювати як

$$I_{\Sigma} = I_0 + \dot{I}_{\sim}. \quad (3.21)$$

Рівняння (3.21) є справедливим лише для першого випадку з вищезгаданих, оскільки не існує модуляцій завдяки рухливості частин верстата. Якщо звернутися до другого, а тим більше третього випадку роботи верстата, то необхідно звернути увагу на те, що сталий струм може бути записаний лише виразом

$$I_0 = I'_0 + I_0 f(M_B), \quad (3.22)$$

де  $I'_0$  – залишкова стала струму,

$f(M_B)$  – модуляційна функція верстата.

Для змінного струму це буде

$$I = I_{\sim} + I_0 f(M_B). \quad (3.23)$$

Якщо звернути увагу на третій випадок з вище розглянутих, тобто процес різання металу, то отримуємо велику кількість специфічних ЕРС, які виникають лише у випадку металообробки. Тобто до виразів (3.21, 3.22, 3.23) необхідно додати ще один струм

$$\dot{I} = \dot{I}_{\text{обр}} + \dot{I}_{\text{обр}} f(M_{\text{обр}}), \quad (3.24)$$

де  $\dot{I}_{\text{обр}}$  – комплексний струм від зони різання,

$f(M_{\text{обр}})$  – функція модуляції у зоні металообробки.

Що стосується останнього виразу (3.24) стосовно струму у зоні різання, то необхідно зауважити, що досить велика кількість струмів, які приймають участь у його формуванні, є наслідком не тільки термоЕРС, але й цілої низки специфічних ЕРС, які притаманні лише тілам, що мають велику швидкість обертання. Наразі це деталі (шпинделі верстатів) токарних верстатів та відповідні елементи фрезерних верстатів. Швидкість обертання у сучасних верстатах може сягати 60000 об/хв (1000 Гц).

### **3.2. Ефект дуальності поверхні торкання та його вплив на точність визначення координати**

Розглядаючи процес торкання технологічних об'єктів, неможливо не помітити кілька важливих особливостей, які супроводжують це явище, як з погляду фізики процесу, так і можливих технологічних задач, які вирішуються у цей спосіб.

При визначенні координати поверхні на верстатах із системою ЧПК використовується ціла низка приладів, які реєструють момент торкання інструмента до поверхні деталі і вже за отриманим сигналом фіксують координату поверхні. Працюють такі прилади (типу СКТ) завжди за одним і тим же кінематичним способом руху, тобто – відтяжне багаторазове торкання [27, 45, 46, 47, 92, 93, 123]. Водночас, координата оцінюється за кількома торканнями на мінімальній швидкості. Але для кожної існуючої СКТ є характерним те, що вона працює у релейному режимі незалежно від конструкції. Подібна ситуація викликає цілком зрозумілу похибку у визначенні координати поверхні ТО. Основний чинник таких процесів ще ніколи не розглядався у технологічних процесах, хоч має досить вагомий вклад у загальний результат вимірювання.

При розгляді методичних засад, завдяки яким визначають координату поверхні того чи іншого ТО, необхідно, в першу чергу, з'ясувати, який саме фізичний процес виконуватиме функції фундаментального при оцінці моменту торкання [92, 93]. Аналіз (дослідження) цієї проблеми у сучасних технологічних процесах вказує на те, що всі вони базуються на фізичних властивостях поверхні ТО, до того ж таких, які мають можливість створювати стрибкоподібну зміну своєї величини у просторі. Чинником подібного вирішення проблеми є те, що СКТ мають незначну чутливість до зміни розташування інструмента на один крок руху верстата. СКТ, налаштована на визначену одну потужність зростання твердості (пружності тощо) матеріалу, матиме статичну похибку залежно від цих властивостей, основним чинником якої є зростання потужності залежно від глибини уявного занурення. Але для того, щоб отримати сигнал торкання, поверхня повинна отримати відповідний тиск від СКТ достатньої потужності, щоб мати ефект спрацювання чутливої системи. Як наслідок прогин поверхні ТО та чутливого елемента призводить до втрати точності. Окрім того, коли оцінка точності координати наближається до надвисоких ( $10 \div 200$ ) Å значень точності, починається вплив фізики поведінки поверхні на рівні хімічних реакцій та молекулярного зчеплення. Боротьба з цим явищем, наприклад, для вимірювальних головок контактної конструкції, вимагає вирішення двох конструкторських задач протилежного спрямування [82]. З одного боку, необхідно зменшити тиск на поверхні деталі, а з іншого, – необхідну потужність тиску в електричних контактах, які механічно з'єднані зі щуп-штангою.

Ще однією вадою подібних систем є залежність швидкості розімкнення контактних груп від швидкості руху вимірювальної головки (ВГ) відносно вимірювальної поверхні, до того ж у напрямку нормального вектора до поверхні торкання. Якщо це відбувається під кутом, то необхідно враховувати геометрію ЧЕ, який теж може призвести до помітних похибок. Тобто, як видно з цього невеличкого аналізу, точність визначення координати при умові, що рушійні системи є високоточними та стабільними, залежить від якості поверхні деталі та чутливості СКТ до зміни фізичного закону, покладеного у засади її роботи.

У підсумку до вищесказаного можна зауважити, що дуальність координати як факт залежатиме, з одного боку, від параметрів СКТ та фізичних процесів взаємодії відчутника з поверхнею ТО.

З іншого боку, дуальність притаманна системі координатних рушіїв верстата, в основі чого полягає наявність механічних люфтів та натягів у силовій системі металообробки.

### **3.2.1. Засади дуальності координати, залежні від параметрів системи контролю торкання**

Більш достеменно визначення питання входження у торкання ТО вказує на те, що стрибкоподібного збільшення потужності будь-якого з фізичних законів у межах зони торкання не може бути аж до розмірів атомів матеріалів, з яких вони складаються [82, 92, 93]. Причини є зовсім інші.

Першим чинником, котрий впливає на стрибкоподібну зміну сигналу СКТ, є зміна потужності на відстані фізичного закону, покладеного у принцип дії СКТ. Здебільшого потужність дії будь-якого фізичного закону зменшується з відстанню за залежністю  $1/x^n$ , де  $n=0..15$ , а  $x$  – відстань до ТО. Ступінь  $n=0..5$  є характерною для законів, які дають опис колових структур (Кулона, Ньютона, Ома, Брюнеля, Біо-Савара-Лапласа тощо), а ступені  $n=6..15$  є характерними для сил Ван-дер-Ваальса на молекулярному рівні [72].

Другим чинником, котрий призводить до появи стрибкоподібної зміни сигналу, є величина кроку руху ЧЕ відносно поверхні. Так, наприклад, якщо використовувати крок руху 1 мкм і при використанні законів, які змінюють потужність за залежністю  $1/x$ , сигнал у СКТ буде змінюватися поступово без стрибків, і зона торкання у такому випадку буде мати досить великий розмір у декілька мікрометрів. З іншого боку, при збереженні того ж самого кроку, але

при використанні закону зі зміною потужності як  $1/x^{10}$  крок у один мікрометр викликає стрибкоподібну зміну сигналу у СКТ.

Третій чинник, який впливає на якість отримання сигналу торкання, є чутливість відчутника до розвитку фізики процесу та його якісно-визбирувальні характеристики. На великій відстані від ОВ потужність дії фізичного принципу роботи падає до такого рівня, що зливається з суцільним тлом навколишнього середовища. Тому відчутник повинен мати досить потужні характеристики визбирування корисного сигналу. На жаль нескінченне підвищення чутливості та визбирувальних характеристик призводить до негативного впливу на швидкісні характеристики визначення моменту торкання.

Четвертий чинник впливу на якість торкання є утворення на поверхні ОВ нашарувань, які мають перехідний характер (властивості) між ТО, які входять у процес торкання. Властивості цих нашарувань здебільшого мають досить суттєву різницю із фізичними параметрами первинного матеріалу ОВ. Наприклад, алюмінієві топи мають властивість утворення тонкого шару (до 40 мкм) оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) на своїй поверхні. Якщо алюміній та його топи є гарними електропровідними матеріалами і досить м'якими за твердістю, то його окис є напівпровідником, а у кристалічному стані це є досить твердий матеріал – корунд. Попри це поверхневий прошарок оксиду відіграє дуже важливу роль при реєстрації моменту торкання, оскільки нівелює перехід від твердості повітря (тощо) до суцільного матеріалу ОВ.

П'ятим чинником впливу на якість визначення моменту торкання є динамічний рух ОВ та ЧЕ. Те, що існує безпосередній зв'язок між швидкостями сходження та розходження ОВ та ЧЕ немає ніякого сумніву, адже для головок електроконтактного типу є пряма залежність від швидкості входження у торкання [23, 35, 42, 124, 125].

Рушійна система верстата за принципом руху є стрибкоподібною, а отже створює миттєві динамічні навантаження, котрі для інерційних носіїв (маса конструкційних елементів) реєстрації торкання є рівнозначними удару. Звідсіля витікає наступне: між повільним рухом на один крок позиціонування та таким же самим, але стрибкоподібним є різниця у можливостях щодо спрацювання. Режим стрибка на крок частково компенсує недоліки електромеханічних конструкцій.

У підсумку необхідно зауважити, що чим менша інерційність конструкційних елементів реєстрації торкання, тобто фізичного закону покладеного у принцип роботи системи, тим вище якість отриманої



координати. Наприклад, важільна конструкція (електроконтактна) за своєю масою значно переважає потік електронів при електромагнітному способі реєстрації.

З вищесказаного існує можливість зробити досить вагомий висновок: для будь-якого ЧЕ більш важливим є поверхня розподілу між технологічними об'єктами, а не самі об'єкти як такі, тобто на перше місце при реєстрації торкання виходять відмінності у фізичних властивостях. Чим більше ці властивості відрізняються одна від одної, тим більш якісно можливо провести визначення поверхні розподілу і як наслідок її координати у просторі. Така ситуація призводить до того, що поверхня розподілу фізичних властивостей отримує дуалізм поведінки відносно чутника (рис. 3.3). За цією якістю поверхня розподілу є поверхнею для двох технологічних об'єктів OB1 та OB2. Для цього випадку, якщо ЧЕ вирішує задачу визначення координати поверхні об'єкту OB1, то  $\overline{\text{ЧЕ}}$  вирішує задачу визначення координати поверхні OB2. Одна задача відносно другої виявляється дзеркально-симетричною. З огляду на технологічне використання цього явища існує можливість створювати дуальні системи торкання, але поки що на заваді цьому є проблема дво- та багатопараметричних відчутників.

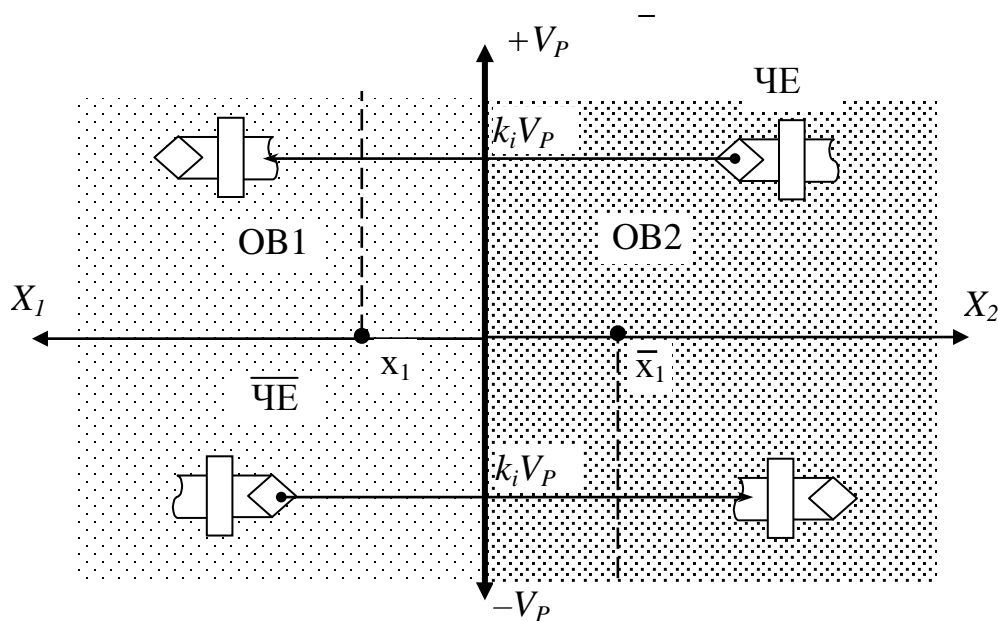


Рис. 3.3. Дуальність поверхні торкання технологічних об'єктів, де:  
 $\bar{x}_1$  та  $\bar{x}_1$  – координати поверхні, котрі утворюються у системі визначення координат

Як наслідок цієї дзеркальної-симетричності існує різниця у часі визначення торкання та виходу з нього, тобто може бути:

$$T \gg \bar{T}, T \ll \bar{T} \text{ та } T = \bar{T}, \quad (3.25)$$

де  $T$  – є час, необхідний для створення команди реверсу руху при торканні;

$\bar{T}$  – час, необхідний для створення команди реверсу руху при неторканні.

Невизначеність поверхні торкання вимагає зміни швидкості при перетині поверхні, тобто усі швидкості входу та виходу  $V_i$  повинні задовольняти умові:

$$V_p > V_i \geq k_n \cdot V_p. \quad (3.26)$$

де  $V_p$  – максимально можлива швидкість руху ЧЕ;

$k_n$  – коефіцієнт мінімально можливої швидкості ЧЕ.

Із залежностей (3.25) та (3.26) можна зробити вагомий висновок, що інформація про координату поверхні деталі може бути отримана лише у момент перехідного процесу, викликаного торканням. У супротивному випадку втрачається інформація про її розташування. Тому, найбільш якісні СКТ, такі наприклад, як АВГ МРЗ (Renishaw) використовують центрально-симетричний спосіб руху, який дотримується умови  $T = \bar{T}$ .

Така ситуація виправдовує себе не тільки у випадку коли ОВ непорушно тримається у просторі, але і у своїй протилежності, адже рух є відносним. Ця протилежність є більш доцільною коли розглядається торкання ОВ на зношених верстатах. Основною причиною дуальності поверхні є знос гвинтових кульових з'єднань на координатних рушійних системах. При наявності такого люфту реальні розміри деталі мають ваду або збільшуватися. Для СКТ, котрі працюють по виходу, або зменшуватися для СКТ, котрі працюють по входу на торкання, тобто вони повністю реалізують вищеописану ситуацію (рис. 3.4).

Ця теза отримала дуже важливе підґрунтя в результаті проведення спеціальних порівняльних дослідів проведених на верстаті віком у 14 років 2С150ПМФ4 з CNC 2С42-65.

Проводилися порівняльні експерименти з АВГ типу ЛР-365 та АВГ типу „Майстер-305Т”. Перша працювала за виходом з торкання згідно штатної програми. Друга працювала за входженням у торкання за нештатною програмою. Результати дослідів відображено на рис. 3.4. Дуже добре видно, наскільки різний за можливостями є кожний із типів АВГ, і наскільки зношені системи рушіїв за різними верстатами.

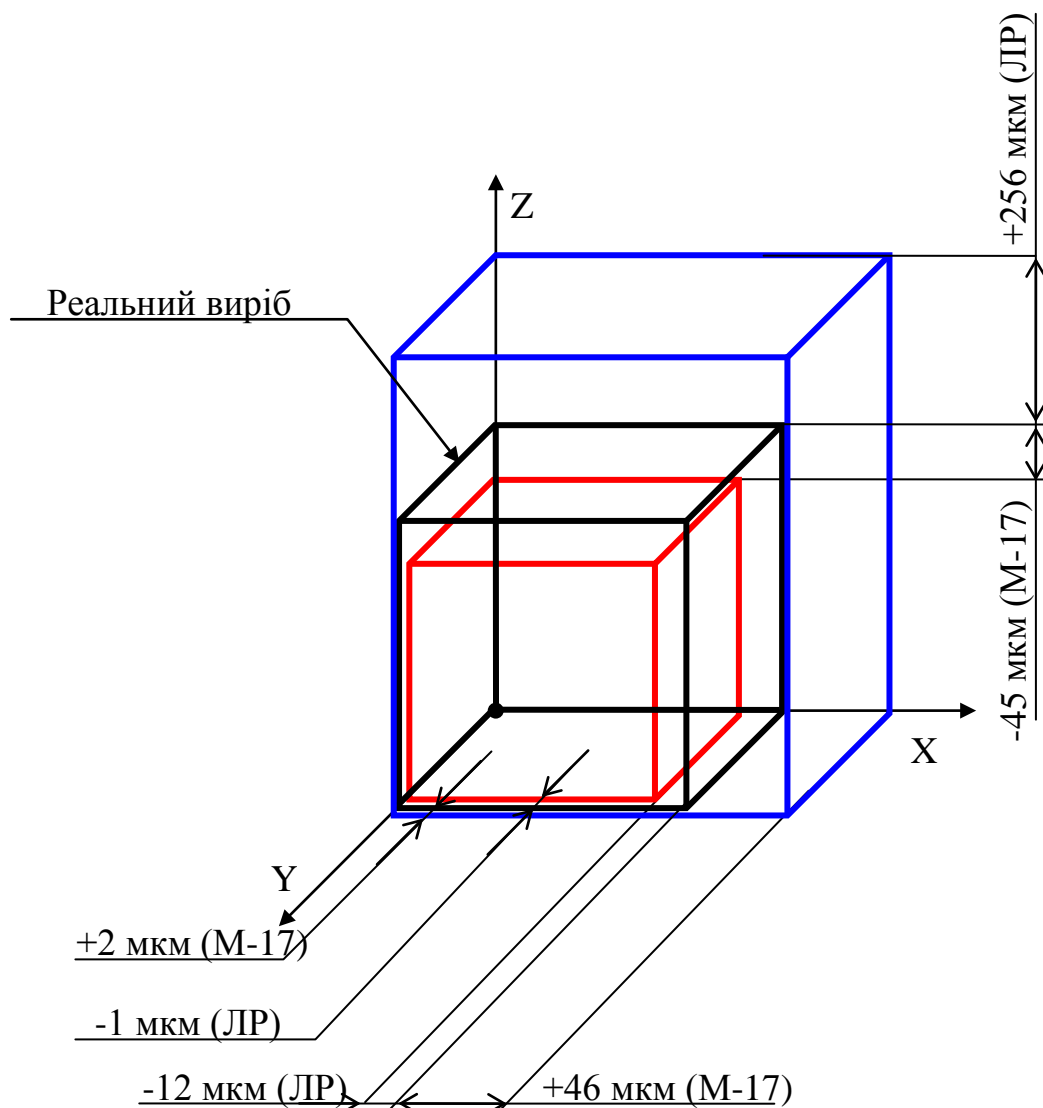


Рис. 3.4. Вплив принципу роботи АВГ різного типу на результати вимірювання координат поверхні деталі

Одночасно з отриманих результатів можна зробити висновок, що, якби існувала дуальна СКТ, її точність була б набагато вища за застосованій у вимірюваннях.

### 3.2.2. Дуальність координат рушійних систем металообробного верстата

Для з'ясування основних чинників впливу на точність виготовлення деталей була проведена низка досліджень. Ці дослідження точності верстатів із системами CNC були викликані проблемами точності виконання деталей при виробництві приладів. Попри проблем точності виконання розмірів для нового верстата подібні проблеми стають ще більш дошкульними для старого та

зношеного обладнання. Тим більше, що парк верстатів в Україні є в значній мірі застарілий. І, якщо це ще якимось задовольняє тяжку промисловість, то стосовно приладобудування це явище набуває критичних ознак. Для того, щоб дослідити основні проблеми точності верстатів було розглянуто наступні чинники впливу:

- Конструкційна недосконалість (неточність виконання) будь-якого верстата у точності, яка у свою чергу має у своєму підґрунті два чинники, тобто:
  - а) недостатня точність виконання механічних частин верстата, що позначається на точності геометричного руху;
  - б) неточності визначення координат, пов'язані з роботою координатних чутливих елементів і, як наслідок, з недостовірністю інформації, яку отримує CNC;
- Відсутність замкненого кола керування «інструмент-деталь-верстат-CNC».
- Стала (векторно-визначена) статистика навантажень на рушійні системи верстата.

Стосовно точності виконання механічних частин верстата, які постійно перебувають у стані руху, необхідно зауважити, що будь-які відхилення у їхній геометрії будуть безпосередньо впливати на точність виконання виробу. Окрім того, якщо врахувати перехресні зв'язки між рухомими частинами, то є можливість констатувати той факт, що кінцева точність виконання виробу буде набагато гірша за точнісні можливості за кожною із окремо взятої координати.

Система відліку координат верстата, хоч і має неточності у визначенні координати, але це є здебільшого вада електронних систем підрахунку, тобто типова ситуація – збій лічильних систем. Така ситуація зустрічається вкрай обмежено і притаманна швидкісним перегонам з однієї точки позиціонування інструмента в іншу.

Відсутність замкненого кола керування з розривом на кордоні інструмент-деталь призводить до того, що верстат починає працювати від штучно введених нулів по координатах, що збільшує вірогідність похибки. У кінцевому випадку зустріч інструмента із поверхнею деталі є абсолютно ненормованим випадком, який неможливо не те, що передбачити, але часом навіть вказати на можливі розбіжності.

Ще менш передбачуваною є ситуація з статистикою навантажень на верстат і, як наслідок, на силові рушійні системи. Єдине, на що можна більш-менш

точно посилалися, це на те, що всі деталі стереотипно базуються у центрі робочого столу, а обробка ведеться проти годинникової стрілки, наприклад контурне фрезерування.

Типова ситуація з визначенням точності верстатів здебільшого зводиться до визначення розмірів люфту по координатах визначених у нормативних документах [10, 11, 87]. Проведені дослідження довели [126, 88, 127, 128], що розміри люфту рушійної системи є неоднаковими як по площині робочої поверхні верстата, так і за напрямком. Окрім того, було виявлено плинний характер похибок залежно від втраченого ресурсу верстату та наявності зон з різною точністю руху. Тобто, наприклад, якщо маємо певну площину надмалої товщини, встановлену вертикально на робочій поверхні, то відстань виходу інструмента після торкання з нею буде залежною від напрямку руху (рис. 3.5), і це з врахуванням люфту рушійної системи.

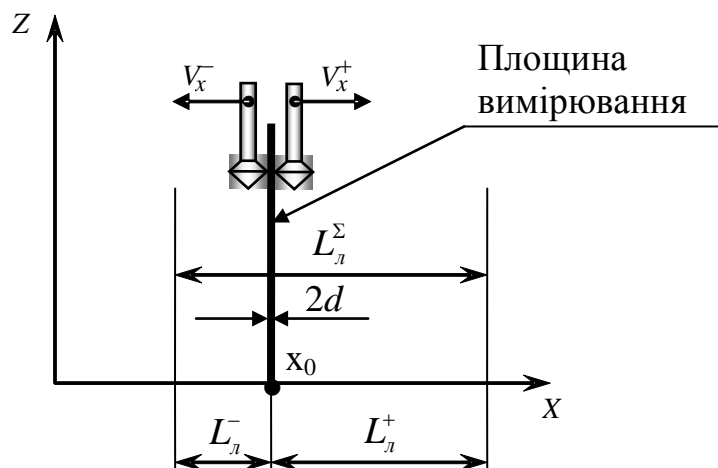


Рис. 3.5. Неоднозначність люфту рушійної системи у різних напрямках руху  $L_n^- \neq L_n^+$

Результатом цього явища є те, що вимірювання будь-якого розміру або координати поверхонь деталі матиме у своєму складі постійну непередбачувану похибку, залежну від напрямку руху вимірювального інструмента відносно поверхні деталі. Основною проблемою, яка виникає при вимірюванні, є те, що навіть зразкові розміри, непорушні у робочому просторі верстата, дають неоднозначні результати при зміні напрямку руху.

Так, наприклад, за способом вимірювання, відображеним на рис. 3.5, за допомогою АВГ повинна була б давати розмір товщини вимірюваного ТО.

Проте завжди буде присутня похибка, яка буде складатися з суми  $L_{\pi}^{-} + L_{\pi}^{+}$ . Мало того, при необмеженому зменшенні товщини ТО вона буде зберігатись. Координата  $x_0 + 2d$  навіть у випадку, коли  $d=0$  буде невизначена. Це є вада всіх без виключень рушійних систем.

Така ситуація виправдовує себе не тільки у випадку, коли ОВ непорушно тримається у просторі, але і у своїй протилежності, адже рух є відносним. Ця протилежність є більш доцільною, коли розглядається торкання ОВ на зношених верстатах. Основною причиною дуальності поверхні є знос гвинтових кульових з'єднань на координатних рушійних системах. При наявності такого люфту реальні розміри деталі мають ваду або збільшуватися, або зменшуватися.

Авторські дослідження [127, 129, 130] проблем точності верстатів із системами CNC та універсальних фрезерних верстатів довели, що у робочому просторі існують місця, які можна локалізувати за ознаками точності. Тобто, точність є залежною від координати розташування деталі. Окрім того, вона є плинною за часом та напрямком. Для того, щоб уявити, яким саме чином утворюється похибка, необхідно проаналізувати конкретні випадки руху інструмента у технологічному просторі.

Розглянемо більш достеменно різні випадки вимірювання розміру деталі на верстаті за допомогою АВГ, які працюють за позитивним принципом реєстрації координати торкання, тобто у момент входження в торкання.

Для випадку зовнішнього вимірювання розміру деталі залежно від напрямку вектора  $V_x^{+}$  (рис. 3.6) вимірювальний інструмент повинен виконати наступні технологічні рухи, щоб у результаті отримати розмір  $L_o^{+}$ :

- увійти в торкання з площиною  $A$  і зафіксувати координату її поверхні;
- відійти від поверхні на відстань  $l_1$  при умові, що вона гарантовано підкоряється залежності  $l_1 > L_{\pi}^{-}$  і зафіксувати її у напрямі координати  $-X$ ;
- змінити напрямок руху по координаті  $X$  на напрямок руху по координаті  $Z$  і відійти на необхідну відстань, щоб обійти деталь;
- знов змінити напрямок руху з координати  $Z$  на координату  $X$  і по цій координаті відпрацювати відстань  $l_2$  яка повинна задовольняти умові  $l_2 = L_o^{+} + 2l_1$  та зафіксувати координату;
- змінити напрямок руху з координати  $X$  на  $Z$  і пройти деяку відстань для впевненої реєстрації координати поверхні  $B$ ;

- змінити напрямок руху з координати  $Z$  на  $X$  і відпрацювати відстань  $l_1$  яка має виконувати умову  $l_1 > L_n^-$ .

При цьому циклі вимірювання вважається, що перебіг по координаті  $Z$  на малі відстані створює нерезистуємі похибки по координаті  $X$ .

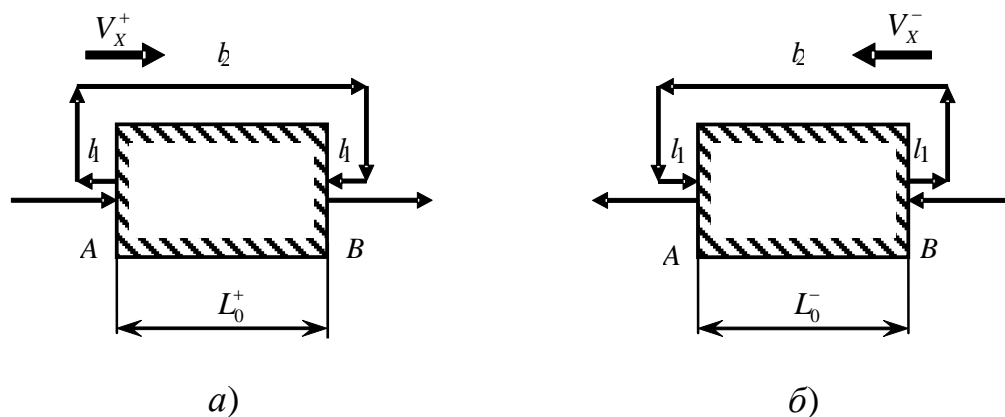


Рис. 3.6. Траєкторії руху інструмента при зовнішньому вимірюванні, де:

a) при  $V_x^+$ ; б) при  $V_x^-$

За ідеальних обставин, тобто метрологічна система рушіїв верстата є бездоганна, що є теж досить сумнівним припущенням [3], повинна виконуватися умова виміру, тобто:

$$L_i^+ = l_2 - 2l_1. \quad (3.27)$$

Реально відлікова координатна система відраховує для відстані  $l_1$ :

$$l_1 = l_{1в} + L_n^-, \quad (3.28)$$

де  $l_{1в}$  – результат вимірювання координатною системою верстата перебігу відходу від площини А.

Відбувається це за тих чинників, коли система у першій фазі руху вибирає люфт, і тільки у наступній фазі починає рух (рис. 3.6, а). Не варто доводити той факт, що будь-яка система без люфту є нерухомою, і будь-яка система з люфтами є рухома.

Для відстані  $l_2$  матимемо наступний результат:

$$l_2 = l_{2в} - L_n^+, \quad (3.29)$$

де  $l_{2в}$  – результат вимірювання величини  $l_2$ .

У цьому випадку рушійна система є реверсованою відносно вектора руху  $l_1$ , а тому і похибка має величину  $L_n^+$ .

Для системи координат, тобто «нереального» виміру, необхідно у залежностях (3.28) та (3.29) врахувати залежності (3.27). Звідки отримуємо наступне:

$$L_o^+ = l_{2B} - L_{\text{л}}^+ - 2l_{1B} + 2L_{\text{л}}^-;$$

або

$$L_o^+ = l_{2B} - 2l_{1B} - (L_{\text{л}}^+ - 2L_{\text{л}}^-). \quad (3.30)$$

Тобто із виразу (3.30) є вочевидь, що існує неврахована похибка. Навіть за припущення, що  $L_{\text{л}}^- \approx L_{\text{л}}^+$  будемо мати:

$$L_o^+ = l_{2B} - 2l_{1B} + L_{\text{л}}^-. \quad (3.31)$$

Добре видно, що отриманий результат, навіть за ідеальних припущень, відрізняється від зразка на  $L_{\text{л}}^-$  і, до того ж, у бік збільшення, звідки найкращим результатом можна вважати наступне:

$$L_o^+ = L_{\text{ов}}^- + L_{\text{л}}^-, \quad (3.32)$$

де  $L_{\text{ов}}^-$  – результат вимірювання рушійною системою верстата.

Для дзеркальної зміни напрямку руху це дає (рис. 3.6,б) наступні результати, якщо розглядати за вищенаведеною методикою:

Умова виміру:

$$L_o^- = l_2 - 2l_1. \quad (3.33)$$

Реальна  $l_1$  буде дорівнювати

$$l_1 = l_{1B} - L_{\text{л}}^+. \quad (3.34)$$

Відстань перегону  $l_2$  має наступний результат:

$$l_2 = l_{2B} - L_{\text{л}}^-. \quad (3.35)$$

Загальний цикл вимірювання

$$L_o^- = l_{2B} - L_{\text{л}}^- - 2l_{1B} + 2L_{\text{л}}^+, \quad (3.36)$$

звідкіля

$$L_o^- = l_{2B} - 2l_{1B} - (L_{\text{л}}^- - 2L_{\text{л}}^+). \quad (3.37)$$

За умови  $L_{\text{л}}^- \approx L_{\text{л}}^+$  маємо наступне:

$$L_o^- = l_{2B} - 2l_{1B} + L_{\text{л}}^+, \quad (3.38)$$

тобто отриманий результат навіть за ідеальних припущень буде



$$L_o^- = L_{ov}^+ + L_{\lambda}^+. \quad (3.39)$$

Навіть спрощеного погляду на залежності (3.32) та (3.39) достатньо, щоб стверджувати, що існує нерівність у вимірах, тобто

$$L_o^- \neq L_o^+. \quad (3.40)$$

До того ж, неможливо однозначно стверджувати, що є більше за інше, тобто  $L_o^-$  більше за  $L_o^+$ , чи навпаки.

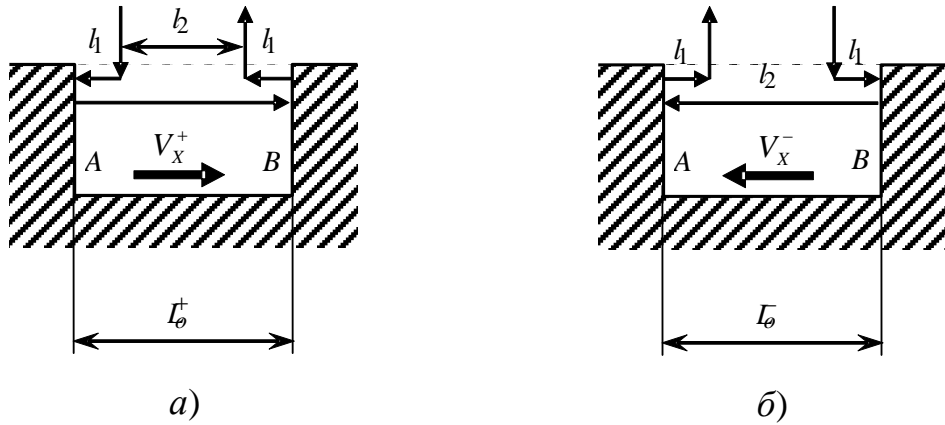


Рис. 3.7. Траєкторії руху інструмента при внутрішньому вимірюванні, де:  
а) при  $V_x^+$ ; б) при  $V_x^-$

Для випадку внутрішнього вимірювання розміру деталей (рис. 3.7) рух інструмента на початковій стадії відбувається за координатою  $Z$  і лише потім переходить до координати  $X$ . Притримуючись тієї ж самої методики, що і при зовнішньому вимірюванні, повинні були б мати наступне:

$$L_o^+ = l_2 + 2l_1. \quad (3.41)$$

У реальному випадку для  $l_1$  та  $l_2$  матимемо наступне:

$$l_1 = l_{1в} - L_{\lambda}^-; \quad (3.42)$$

$$l_2 = l_{2в} - L_{\lambda}^+.$$

Використовуючи підстановку з (3.42) у (3.41), отримуємо наступне:

$$L_o^+ = l_{2в} + 2l_{1в} - (L_{\lambda}^- + 2L_{\lambda}^+), \quad (3.43)$$

звідки робимо припущення, що  $L_{\lambda}^- \approx L_{\lambda}^+$  і отримуємо

$$L_o^+ = l_{2B} + 2l_{1B} + L_{\text{л}}^+. \quad (3.44)$$

Порівняння виразу (3.44) із виразом (3.41) призводить до наступного висновку

$$L_o^+ = L_{oB}^+ - L_{\text{л}}^+. \quad (3.45)$$

Проаналізуємо внутрішнє вимірювання для іншого, тобто дзеркального руху (рис. 3.7,б). У цьому випадку отримуємо наступний результат:

$$\begin{aligned} L_o^- &= l_2 + 2l_1; \\ l_1 &= l_{1B} - L_{\text{л}}^+; \\ l_2 &= l_{2B} - L_{\text{л}}^-; \\ L_o^- &= l_{2B} + l_{1B} - (L_{\text{л}}^+ - 2L_{\text{л}}^-); \\ L_o^- &= l_{2B} + l_{1B} + L_{\text{л}}^-; \end{aligned} \quad (3.46)$$

при умові, що  $L_{\text{л}}^- \neq L_{\text{л}}^+$ :

$$L_o^- = L_{oB}^- - L_{\text{л}}^-. \quad (3.47)$$

Наступний випадок отримання розмірів, які мають характер сходів, тобто вимірювання довжини сходинки (рис. 3.8,а). Для цього випадку є характерним те, що на відміну від попередніх випадків вимірювання відбувається у двох протилежних напрямках, тобто результат, що очікується, повинен був би бути

$$L_o^+ = l_2 - l_1, \quad (3.48)$$

де відповідні реальні рухи становитимуть:

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{1B} - L_{\text{л}}^-; \\ l_2 &= l_{2B} - L_{\text{л}}^+. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Водночас вважається, що визначення координати по площині В відбувається без люфту.

Як наслідок маємо наступне:

$$L_o^+ = l_{2B} - l_{1B} - L_{\text{л}}^+ + L_{\text{л}}^-. \quad (3.50)$$

Із виразу (3.50) видно, що визначення таких розмірів є найбільш достеменним, оскільки обидва люфти  $L_{\text{л}}^+$  та  $L_{\text{л}}^-$  приблизно взаємно компенсують один одного. Якщо змінити напрямок руху вимірювання, то будемо мати наступний результат (рис. 3.8,б):

$$l_1 = l_{1B} - L_{\pi}^+; \quad (3.51)$$

$$l_2 = l_{2B} - L_{\pi}^-,$$

або

$$L_o^- = l_{2B} - l_{1B} - L_{\pi}^- + L_{\pi}^+. \quad (3.52)$$

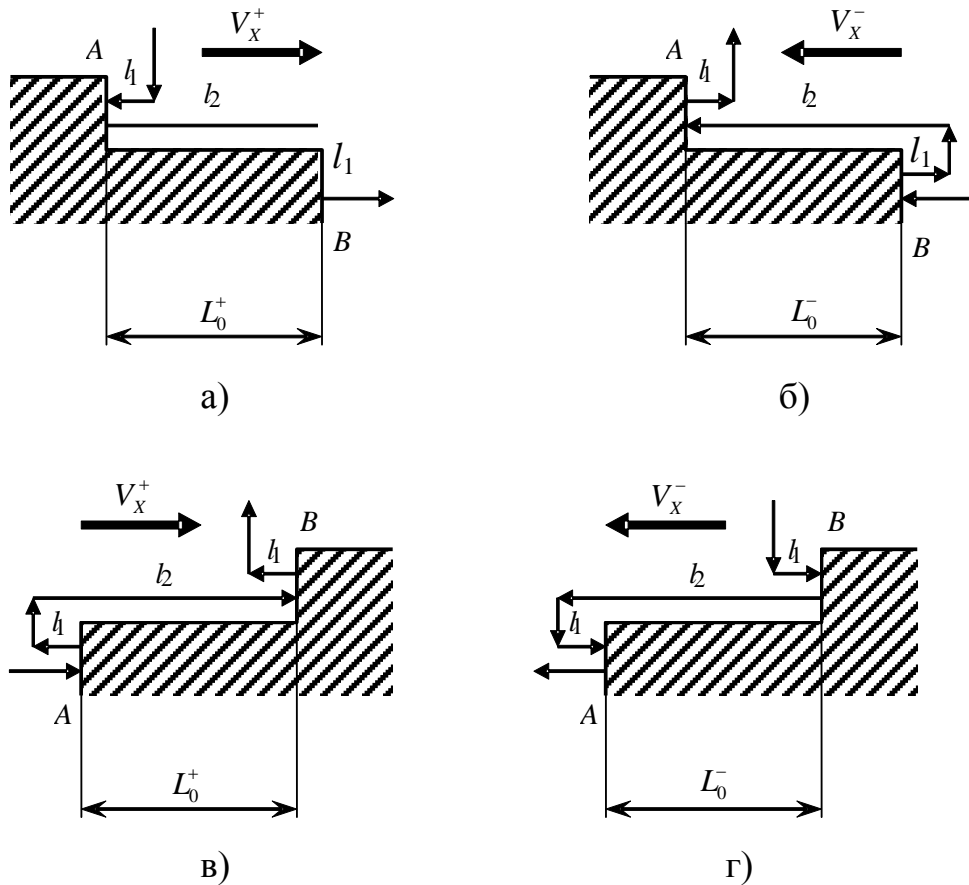


Рис. 3.8. Траєкторії руху інструмента при вимірюванні сходинками, де:

а) при  $V_x^+$ , сходинка зліва; б) при  $V_x^-$ , сходинка зліва;

в) при  $V_x^+$ , сходинка справа; г) при  $V_x^-$ , сходинка справа

Якщо провести аналогічний експеримент, але дзеркально протилежний (рис. 3.8, б, г), то у наслідку отримаємо наступний результат:

$$\begin{aligned} L_o^+ &= l_{2B} - l_{1B} - L_{\pi}^+ + L_{\pi}^-; \\ L_o^- &= l_{2B} - l_{1B} - L_{\pi}^- + L_{\pi}^+. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Порівняльний аналіз всіх цих математичних виразів дає той висновок, що похибка зовнішнього та внутрішнього вимірювання завжди буде присутня. У

випадку вимірювання сходами (рис. 3.8, *а, б, в, г*) вона буде мати найменшу величину. Мало того, із виразів видно, що вони за визначених умов будуть взаємно компенсовані. На перший погляд здавалося б, що це є вирішення проблеми, хоча б у відносно односторонньому порядку. Але постає питання, що саме робити для випадку внутрішнього та зовнішнього вимірювання. Безпосередньо компенсувати їх неможливо, оскільки необхідно мати точну інформацію про розмір люфтів  $L_{\text{л}}^+$  та  $L_{\text{л}}^-$ .

Правда, існує можливість підвищити точність вимірювання визначенням середньої величини, тобто

$$L_{\text{ср}} = \frac{2L_o - L_{\text{л}}^- - L_{\text{л}}^+}{2}, \quad (3.54)$$

але такий підхід не вирішує повної задачі, оскільки основним чинником є подвоєння координати поверхні та її невизначеність.

Отже, у загальному підсумку можна стверджувати, що для внутрішнього вимірювання похибки від люфту рушійної системи змінюється на протилежну, так наприклад для руху справа-наліво – це буде  $L_o + L_{\text{л}}^-$ , а при русі навпаки  $L_o + L_{\text{л}}^+$  (рис. 3.8, *а, б*). Застосування методики визначення середньої величини у цьому випадку призводить до аналогічних наслідків. Порівнюючи між собою ці вимірювання, видно, що для зовнішніх розмірів це буде зменшення, а для внутрішніх – збільшення абсолютної величини.

У наступному випадку вимірювання проводиться на деталі, поверхні якої розташовані як сходи (рис. 3.8, *а, б, в, г*). На перший погляд здавалося б, що такий випадок повинен мати сходження у результатах з великою точністю. Проте, проведені дослідження довели, що це не так, тобто ніколи не виконується рівність  $L_o^- = L_o^+$ . Навіть за випадку дзеркального відображення ситуації на рис. 3.8, *а* та 3.8, *г* не існує можливості досягти належного результату. Окрім того, було з'ясовано, що отримати позитивний результат практично неможливо у жодній координаті верстата. Мало того, чим більше  $L_o$ , тим більше розходження між  $L_o^-$  та  $L_o^+$ , тобто точність рушійної системи верстата неоднакова на окремих ділянках; в одних місцях вона вища, в інших – нижча. Звідсіля слідує висновок, що існують зони з різною точністю. Конкретно обмежувати їх за розміром деталі, як це робиться у випадку з майстер-моделлю нерационально, оскільки це обмежить можливості використання верстата, а тому був обраний шлях розподілу на прямокутні фрагменти та кубічні об'єми зразкових розмірів. Ці фрагменти зразкових

розмірів слугували як спосіб зразкового вимірювання.

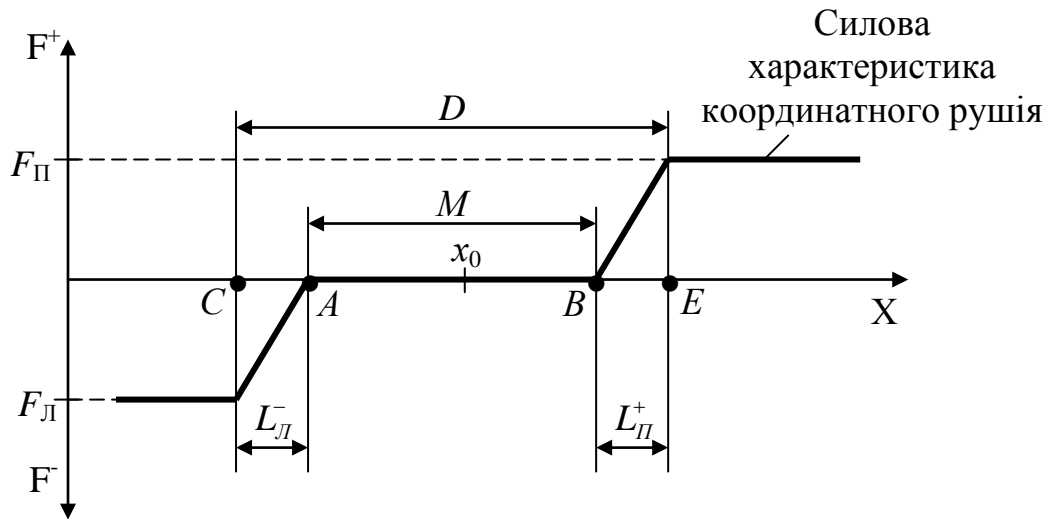


Рис. 3.9. Комплексне уявлення дуальності координати за рахунок рушійних систем верстата

З усього вищесказаного необхідно зробити висновок, що дуальність  $D$  координати, яку створює рушійна система верстата, є комплексною величиною. Ця величина у своєму складі має дві компоненти (рис. 3.9).

По-перше, це величина реального механічного люфта  $M$ , коли ведучий вал рушія обертається, але робочий стіл або інструмент не рухаються. При цьому навантаження рушійної системи мінімальне, а уявна координата  $x_0$  залишається непорушною у просторі верстата. Невизначеність координати  $x_0$  буде дорівнювати величині  $M$ . Після того, як буде пройдено відстань  $M$  або її частину, координата  $x_0$  опиниться у крапці  $A$  або  $B$  характеристики рушійної системи верстата. Але розташування крапок  $A$  та  $B$  практично невідомо.

По-друге, поза відтинку  $M$  ( $AB$ ) залежно від того, у якому напрямку рухається силова характеристика рушія, починається його навантаження. Оскільки необхідно піддавати руху великі маси металу, то вал рушія деформується аж до того моменту, поки не настане рівновага сил у механічній системі. Окрім того, оскільки в одному напрямку вал стискається, а в іншому розтягується, то і величини  $L_{\text{Л}}^-$  та  $L_{\text{П}}^+$  не рівні між собою. Під час металообробки різниця між цими величинами стає ще більшою. Якщо ввести сили деформації  $L_{\text{Л}}$  та  $L_{\text{П}}$ , то можна записати:

$$F_{\text{Л}} = k_{\text{с}} L_{\text{Л}}^-, F_{\text{П}} = k_{\text{р}} L_{\text{П}}^+, \quad (3.55)$$

де  $k_c$  та  $k_p$  – коефіцієнти пружності на стискання та розтягування відповідно.

Як наслідок, механічна дуальність верстата може бути отримана у вигляді:

$$D = M + \frac{F_{\text{Л}}}{k_c} + \frac{F_{\text{П}}}{k_p}. \quad (3.56)$$

Із виразу (3.56) видно, що дуальність координати є залежною від ступеню зносу рушійної силової механіки та навантаження на неї. Здебільшого проблема дуальності притаманна верстатам, де система відліку координати об'єднана разом з силовою.

### 3.3. Загальна концепція векторної похибки у обробляючому просторі верстата

Визначимо, як необхідний нам виріб проходить вторинну стадію технологічного фантому (ТФ), тобто реалізується у кресленниках [65]. Наступна стадія реалізації ТФ деталі полягає у завантаженні програм у систему ЧПК верстата. Одночасно з цим у систему ЧПК завантажується ТФ інструментів та ворокола їх рухів під час виготовлення деталі. Отже, ми отримуємо у пам'яті ЧПК нереалізований ТФ деталі третього ступеню. Цей ТФ деталі є цілком уявним, тобто система ЧПК має лише уяву як виготовити деталь, користуючись своєю системою координат, яку вона приймає за ідеальну. При цьому вважається, що система координат механіки теж є ідеальною. Але це далеко не так, тому що вона вже реалізована, тобто є реальна механічна система координат, яка посередньо пов'язана з уявною. Десь у цій системі координат знаходиться заготовка, яка несе в собі ТФ деталі.

Якщо ми уявимо, що геть усі координатні системи, які приймали участь у виготовленні деталі, були ідеальні з будь-якого погляду, то і деталь повинна бути ідеальною. Така деталь, у якій неможливо знайти дефекти або похибки за будь-якого способу контролю будемо вважати ідеальною, а також її систему координат.

У такому випадку буде справедливим наступне рівняння:

$$\lim_{K_D(U) \rightarrow K_D(R)} [K_D(U) - K_D(R)] = 0, \quad (3.57)$$

де  $K_D(U)$  – уявні координати деталі, які зберігаються у пам'яті CNC;

$K_D(R)$  – реальні координати деталі після виготовлення у робочому просторі верстата.

У випадку, коли ми маємо відмінності, які нас не задовольняють, то єдиний висновок, якого можна дійти – це незадовільна якість інших координатних систем.

Сутність цього явища полягає у наступному. ТФ деталі, який зберігається у пам'яті системи ЧПК, є ідеальним, оскільки він дає опис ідеальної деталі. Але існує ще й чинник інтерпретації цього ТФ, тобто похибки, з якими система ЧПК реалізує деталь через свої чутливі елементи (ЧЕ). Тобто тут ми маємо справу з уявною системою координат. Ця уявна система координат пов'язана з механічною, а та, у свою чергу, - з системами координат інструмента і системою координат деталі, тобто це є жорстка або реальна система координат. Для більш достеменного розуміння всі ці системи координат та зв'язки між ними відображені на рис. 3.10.

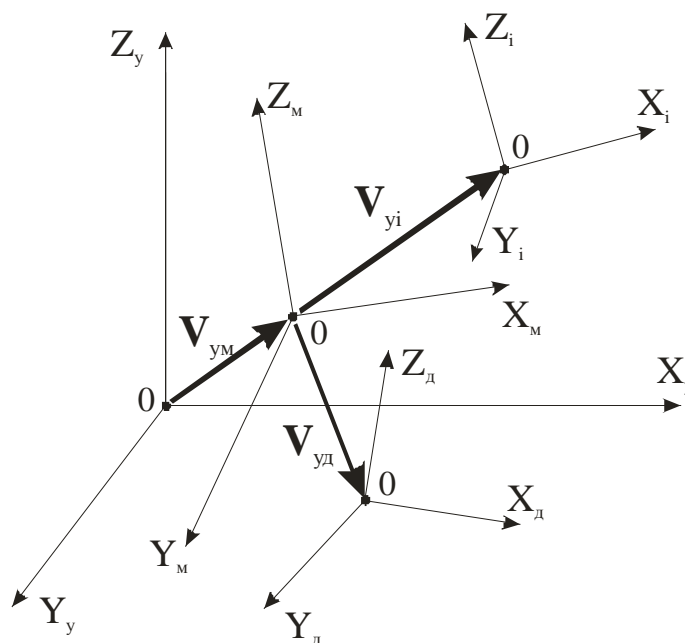


Рис. 3.10. Векторна блок-діаграма трикоординатної системи верстата, де:

$X_y, Y_y, Z_y$  - уявна система координат, притаманна системі CNC;

$X_m, Y_m, Z_m$  - реальна система координат верстата (механічна);

$X_d, Y_d, Z_d$  - ідеальна система координат (деталь);

$X_i, Y_i, Z_i$  - додаткова система координат (інструмент);

$V_{um}, V_{yi}, V_{ud}$  - вектори зв'язку координатних систем: уявна – реальна,

реальна – додаткова, реальна – ідеальна відповідно

З цієї блок-діаграми добре видно, що існує група векторів  $\mathbf{V}_{ум}, \mathbf{V}_{yi}, \mathbf{V}_{уд}$ , незамкнених у просторі. Технологічна операція з «обнуління» верстата, яка полягає у зведенні в одну точку початків координат уявних та реальних, завжди відбувається з кінцевою похибкою у розмірах та напрямку вектора  $\mathbf{V}_{ум}$ .

Всі ці вектори необхідно сприймати як векторні суми, які їх формують у просторі. Для того, щоб вирішити цю задачу, необхідно розглянути фізико-математичне підґрунтя утворення подібних похибок.

З векторної діаграми (рис. 3.10) дуже добре видно, що для вирішення задачі з отримання необхідної точності повинна виконуватися умова (векторна сума):

$$\mathbf{V}_{ум} + \mathbf{V}_{yi} = \mathbf{V}_{ум} + \mathbf{V}_{уд}. \quad (3.58)$$

Оскільки ця умова виконується в уявній системі координат CNC, то

$$\mathbf{V}_{ум} + \mathbf{V}_{yi} - \mathbf{V}_{ум} - \mathbf{V}_{уд} = 0 \quad (3.59)$$

і, як наслідок, при будь-яких ситуаціях вектор  $\mathbf{V}_{ум} = 0$ , а  $\mathbf{V}_{yi} = \mathbf{V}_{уд}$ .

Порушити цю умову може лише деякий збій у системі CNC та наявність ірраціональних функцій при обчисленні координат векторів.

Але реальна система координат верстата виробляє свої аналогічні вектори  $\mathbf{V}_{рм}, \mathbf{V}_{рд}$  та  $\mathbf{V}_{рі}$ , до того ж кожний з них визначається як сума уявного вектора  $\mathbf{V}_y$  та вектора похибки  $\mathbf{V}_\Pi$ , тобто

$$\mathbf{V}_y = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}, \quad (3.60)$$

та

$$\mathbf{V}_\Pi = n_x\mathbf{i} + n_y\mathbf{j} + n_z\mathbf{k}. \quad (3.61)$$

Звідси маємо можливість отримати наступні залежності у реальній системі координат:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{рм} &= \mathbf{V}_{ум} + \text{grad } \mathbf{V}_{рм}, \\ \text{grad } V_{рм} &= \frac{\partial V_{рм}}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V_{рм}}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V_{рм}}{\partial z} \mathbf{k}, \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{рі} &= \mathbf{V}_{yi} + \text{grad } \mathbf{V}_{рі}, \\ \text{grad } V_{рі} &= \frac{\partial V_{рі}}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V_{рі}}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V_{рі}}{\partial z} \mathbf{k}, \end{aligned} \quad (3.63)$$

$$\mathbf{V}_{рд} = \mathbf{V}_{уд} + \text{grad } \mathbf{V}_{рд},$$



$$\text{grad } V_{\text{рд}} = \frac{\partial V_{\text{рд}}}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V_{\text{рд}}}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V_{\text{рд}}}{\partial z} \mathbf{k}. \quad (3.64)$$

Проаналізуємо отриманий результат з погляду на взаємодію уявної та реальної системи координат.

Як відомо з класичної геометрії, для того, щоб дві площини співпадали, вони повинні мати хоча б три спільні точки, а у цьому випадку є лише одна та ще й з невідомою точністю. Окрім того, ми приймаємо певну ідеалізацію, обумовивши, що всі системи координат являють собою ідеалізовані площини з кутами у  $90^\circ$  між ними. У реальності це є криволінійні площини (криволінійні координати), і знаходження для них спільних координат є вкрай проблематичною справою.

Ще більша проблема виникає у визначенні векторів  $\mathbf{V}_{\text{yi}}$  та  $\mathbf{V}_{\text{уд}}$  та їх зв'язок і векторами  $\mathbf{V}_{\text{pi}}$ ,  $\mathbf{V}_{\text{рд}}$ , що зазвичай є невизначеними. Особливо це стосується координат інструмента, які мають плинний характер. Це є основною причиною того, що точність сучасних верстатів знаходиться у межах від 300 до 400 мм відносно центру.

Оскільки конструкція будь-якого верстата є сталою, тобто відпрацьованою на протязі багатьох десятиліть, всі ці системи координатних вимірюваних пристроїв є лише додатком до вже усталеної конструкції. Через те, що будь-яка координатна система вимірювання є додатком до механічної, всі неточності механіки верстата автоматично переносяться на неї.

Внаслідок сталої конструкції механообробних верстатів можна констатувати той факт, що відчутники координат у кращому випадку встановлені попарно. У дійсності це означає, що монолітно скріплені відчутники можуть бути базовані лише на нерухомій частині верстата, в той час як третя транспортується по одній з попередніх.

Згідно вище вказаної тези, залежність однієї координати від іншої може мати наступні варіанти:

Залежні координати	Транспортуєма координата
$X \longleftrightarrow Y$	Z
$X \longleftrightarrow Z$	Y
$Y \longleftrightarrow Z$	X

У першому стовпчику є координати, які знаходяться у прямому зв'язку. Тобто відчутники монолітно зв'язані, і точність цього зв'язку залежить від

точності їх розташування у просторі та точності кріплення. Транспортуєма координата у цьому випадку відрізняється тим, що вона транспортується вздовж будь-якої із залежних координат.

Пояснимо це простим прикладом токарного верстата. Подовжня координата  $Z$  руху інструментального блоку (револьверної головки) переміщує і поперечну координату  $Y$ , тобто її рушійну систему і чутник відстані (координати). За такого конструкційного рішення всі похибки, притаманні координаті  $Z$ , впливатимуть на точність розташування координати  $Y$ , яка, в свою чергу, теж має свою похибку. Отже, на координату розташування інструмента у просторі матиме вплив координати  $Z$  на координату  $Y$ .

Для обробного центру (ОЦ) на фрезерному верстаті необхідно додати ще третю координату, яка жорстко пов'язана з будь-якою з координат, що призводить до ще більш складної залежності. Якщо для токарного верстата уявити площину руху інструмента, кожна координата якої має свою похибку, то у цьому випадку ми маємо право стверджувати, що це є поле похибки. Для випадку з трьома координатами це буде польовий об'єм похибок.

Ця система польових структур є досить специфічною. Якщо розглянути, наприклад, польову структуру в площині (тобто  $Y-Z$ ), то необхідно зауважити, що вона має кінцеву товщину, яка утворюється внаслідок неточностей виконання реальних координат. Така площа лише уявна, оскільки система допусків, яка застосовується у цьому випадку, має на увазі, що всі похибки розташовані на площині з нульовою товщиною. Тим не менш з попереднього розгляду видно, що це не зовсім вірно. І справа не в тому, що несуча і транспортована координати знаходяться у різних площинах. Теж саме можна зауважити і стосовно трикоординатної системи.

Якщо ми хочемо мати підсумкову похибку у момент сходження всіх координат при металообробці, то необхідно враховувати дуальність координати (6.33). У цьому випадку загальна похибка визначення координати:

$$\text{grad } \Delta = (D_{PM} + D_{PI} + D_{PD}) + \text{grad } V_{PM} + \text{grad } V_{PI} + \text{grad } V_{PD}, \quad (3.65)$$

де  $D_{PM}$  – вектор дуальності координати механічної системи верстата координати;

$D_{PI}$  – вектор дуальності координати різального інструмента;

$D_{PD}$  – вектор дуальності координати деталі.

Отже, для того, щоб мати розміри деталі необхідної точності потрібно, щоб виконувалася умова  $\text{grad } \Delta = 0$ . Це можливо лише у тому випадку, коли

електромеханічна система верстата замкнена. Проте, хоч у цей спосіб практично ліквідується дуальність як така, то частина градієнтів (динамічна складова) залишаються не скомпенсованими.

### **3.4. Вплив зворотнього зв'язку в системі функціональної діагностики стану технологічного обладнання**

Отже, розглядаючи низку похибок у розділі 1, маємо можливість констатувати той факт, що існуючі технологічні процеси не дають можливість реалізувати деталь із необхідною точністю. На заваді цього процесу маємо такі перешкоди, як об'єднання реальних систем координат та їх уявного відображення.

На сьогодні існує ідеологічна спрямованість, коли вважається, що зрощування жорсткості металообробного обладнання разом з електронною системою (уявною) компенсації вирішує всі проблеми позиціювання інструмента відносно деталі і, як наслідок, всі проблеми точності виготовлення. Проте, подібна теза заводить всю ситуацію металообробки у глухий кут. Як наслідок, у виробничому процесі деталь рухається сама по собі, а інструмент сам по собі. В основі цього процесу полягає загально прийнятий принцип програмування систем CNC, який полягає у тому, що спочатку є функція деталі  $D(x, y, z)$  і вже потім виробляється траєкторія руху інструмента, як елементу формотворення, тобто  $I(x, y, z)$ .

Як наслідок, всі похибки формотворення є відносний рух двох систем координат, інструмента і деталі.

Орієнтуючись на все, що було сказано у розділі 1 та низкою спрощень, маємо можливість створити теоретичну схему відносного руху інструмента і деталі у робочому просторі верстата (рис. 3.11).

На рис. 3.11 відображено наступні функції, які приймають участь у формотворенні деталі:

- $K_D(U)$  – уявна функція геометрії деталі, яка зберігається у пам'яті CNC;
- $K_I(U)$  – уявна функція руху інструмента, яка повинна забезпечувати реалізацію функції  $\lim K_D(U) = D(x, y, z)$ ;
- $K_{RD}(R)$  – реальна функція координатного рушія деталі у розімкненому стані;
- $K_{RD}(U)$  – уявна функція координатного рушія деталі із відповідними корекціями;

- $K_{PI}(R)$  – реальна функція координатного рушія інструмента у розімкненому стані;
- $K_{PI}(U)$  – уявна функція координатного рушія інструмента з відповідними корекціями;
- $K_U(R)$  – реальна функція чутника торкання;
- $K_U(U)$  – уявна функція чутника торкання.

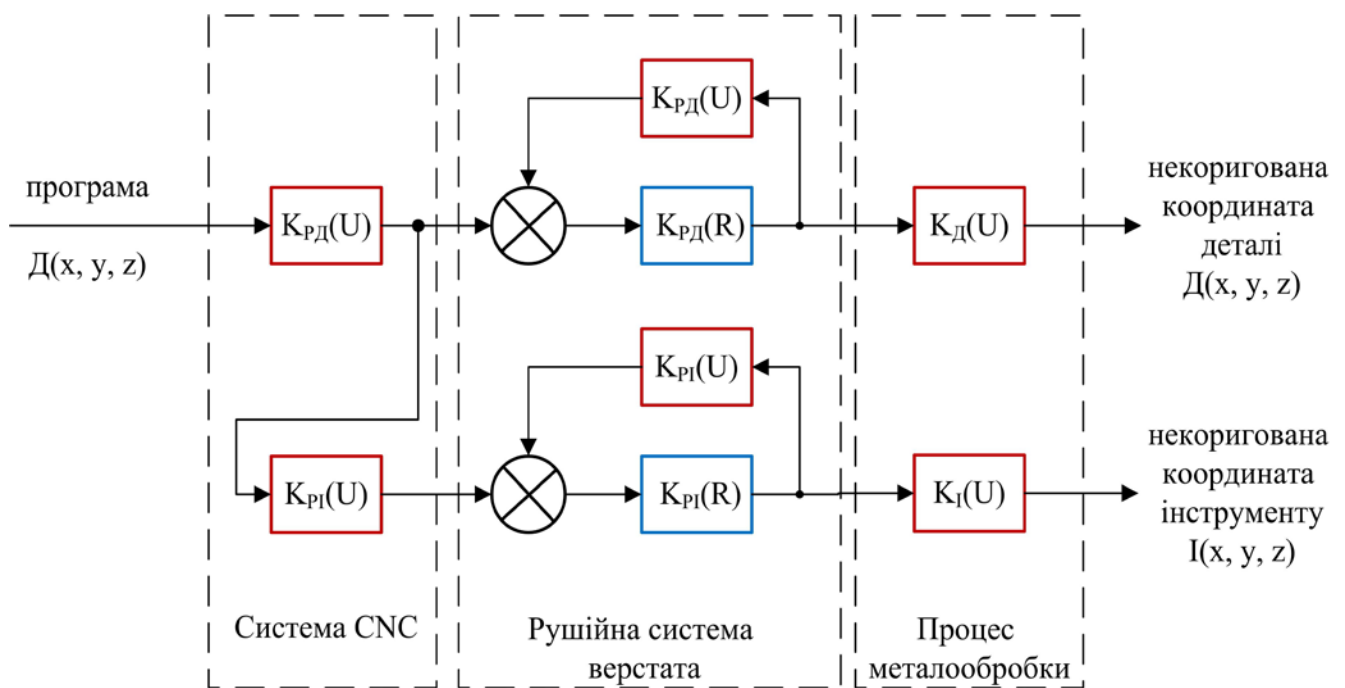


Рис. 3.11. Принципова теоретична схема керування рухом інструмента і деталі у сучасній металообробці

Основою побудови будь-якої схеми (системи) керування є її передавальні функції. У нашому випадку функція керування процесом металообробки є розімкнена, оскільки рух деталі (або вона є, або її немає) та інструмента (або він є, або його немає) відбувається у виробничому просторі верстата абсолютно незалежно один від одного. Задля спрощення наступних математичних перетворень введемо позначення у математичних виразах:

- передавальна функція по координаті деталі:

$$W_1(p) = \frac{K_{PD}(R)}{1 + K_{PD}(R) \cdot K_{PD}(U)}, \quad (3.66)$$

- передавальна функція для координати інструмента:

$$W_2(p) = \frac{K_{PI}(R)}{1 + K_{PI}(R) \cdot K_{PI}(U)}, \quad (3.67)$$

- передавальна функція чутника:

$$W_3(p) = K_q(R) \cdot K_q(U). \quad (3.68)$$

Водночас, загальна функція передачі координат на заготовку  $D'(x, y, z)$  визначатиметься, як:

$$W_D(p) = \frac{D'(x, y, z)}{D(x, y, z)} = K_D(U) \cdot K_D(R) \cdot W_I(p). \quad (3.69)$$

Для інструмента функція передачі координати буде визначатися як

$$W_I(p) = \frac{I'(x, y, z)}{D(x, y, z)} = K_D(U) \cdot K_I(U) \cdot K_I(R) \cdot W_Z(p). \quad (3.70)$$

Згідно наведеного вище, маємо можливість стверджувати наступне, а саме: існує подвійна просторова похибка, яка складається з похибок руху деталі та інструмента. Як наслідок, передавальна функція складатиметься із двох попередніх рівнянь, (3.69) та (3.70):

- для деталі:

$$D'(x, y, z) = D(x, y, z) \cdot W_D(p), \quad (3.71)$$

- для інструмента:

$$I'(x, y, z) = D(x, y, z) \cdot W_I(p). \quad (3.72)$$

Просте співвідношення (3.71) до (3.72) дає наступне:

$$\frac{D'(x, y, z)}{I'(x, y, z)} = \frac{W_D(p)}{W_I(p)}, \quad (3.73)$$

або

$$D'(x, y, z) = \frac{W_D(p)}{W_I(p)} \cdot I'(x, y, z). \quad (3.74)$$

Із рівняння (3.74) можемо зробити висновок, що реальна функція отриманих координат деталі  $D'(x, y, z)$  є повністю залежною від реальних координат інструмента  $I'(x, y, z)$ . Функція реальних координат інструмента  $I'(x, y, z)$  є досить непевна, а тому всі похибки, характерні для цієї функції, будуть повністю притаманні і функції координат деталі  $D'(x, y, z)$ .

Тепер розглянемо випадок, коли контур ТОС є замкненим, тобто ми контролюємо момент торкання інструмента до поверхні деталі. Водночас, принципова теоретична схема рис. 3.11 набуває наступного вигляду як на рис. 3.12. У такій системі момент торкання інструмента до деталі реєструється системою СКТ та передається відповідний сигнал до CNC.

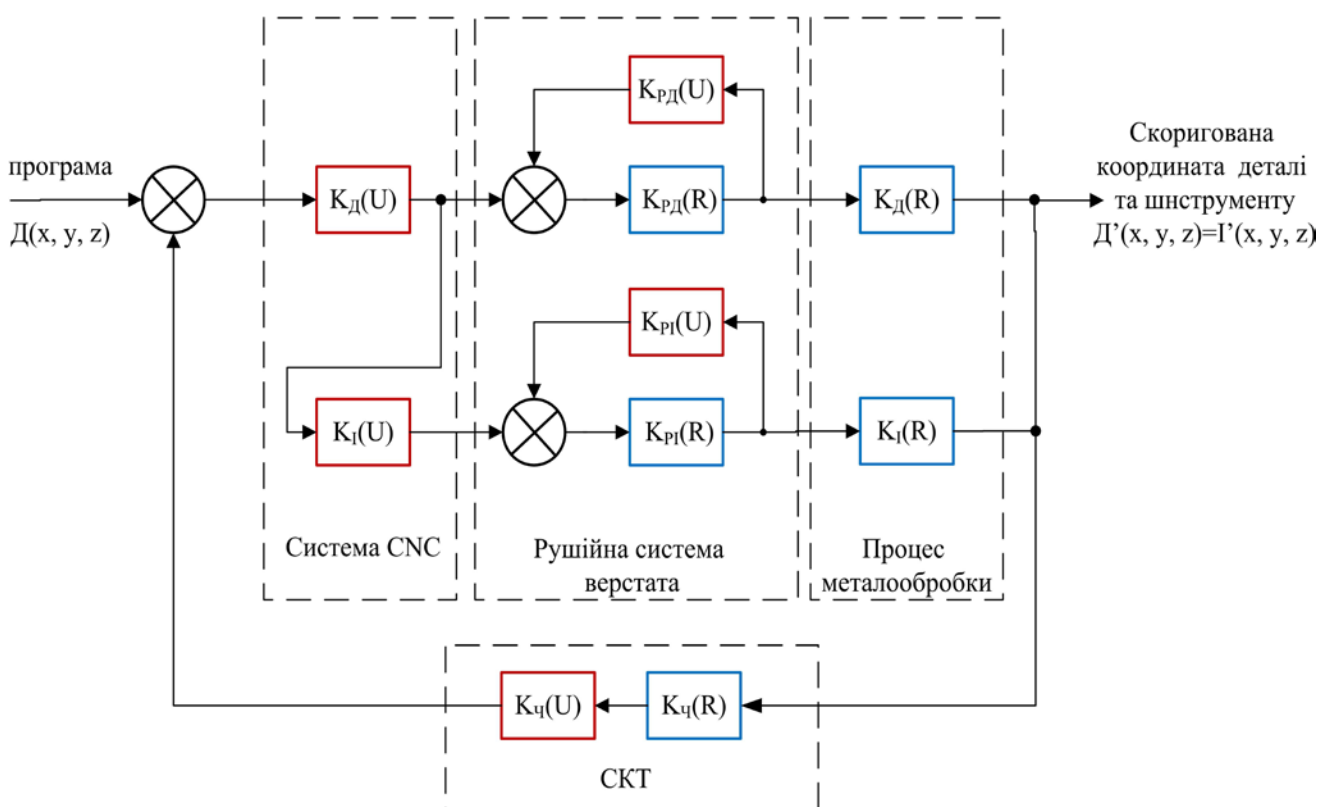
$$\mathcal{D}'(x,y,z)=\mathcal{I}'(x,y,z). \quad (3.75)$$


Рис. 3.12. Принципова теоретична схема керування рухом інструмента і деталі при замкненому контурі ТОС

Передавальна функція у цьому разі набуває вигляду

$$\begin{aligned} \frac{D'(x,y,z)}{D(x,y,z)} &= \frac{I'(x,y,z)}{I(x,y,z)} = \frac{K_d(U)[W_1(p)K_d(R) + W_2(p)K_1(U)K_1(R)]}{1 + W_3(p)K_d(U)[W_1(p)K_d(R) + W_2(p)K_1(U) \cdot K_1(R)]} = \\ &= \frac{W_4(p)}{1 + W_3(p)W_4(p)}, \end{aligned} \quad (3.76)$$

де  $W_4(p) = K_d(U)[W_1(p)K_d(R) + W_2(p)K_1(U)K_1(R)]$ .

У цьому випадку просте співвідношення  $D'(x,y,z)$  до  $I'(x,y,z)$  дає наступний результат:

$$\frac{D'(x,y,z)}{I'(x,y,z)} = \frac{\frac{W_4(p)}{1 + W_3(p)W_4(p)}}{\frac{W_4(p)}{1 + W_3(p)W_4(p)}} = 1, \quad (3.77)$$

або

$$D'(x,y,z) = I'(x,y,z), \quad (3.78)$$

що і необхідно було довести.

Отже, введення зворотнього зв'язку по торканню інструмента до деталі ліквідують всі можливі похибки у системі керування верстата. У цьому випадку залишаються лише похибки, викликані динамічними навантаженнями на інструмент і деталь під час обробки, оскільки поверхні деталі та інструмента непідконтрольні ні в який спосіб.

Подібна система контролю торкання дозволяє вирішувати такі проблеми металообробки:

- визначення координат розташування поверхні деталі;
- визначення координат розташування поверхні інструмента;
- визначення глибини врізання інструмента в масу деталі з високою точністю;
- визначення величини зносу інструмента з високою точністю;
- блокування надзвичайних ситуацій під час збоїв у системі CNC.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Створено фізико-математичне підґрунтя панданних зон у металообробці, що дозволяє визначитись з конкретними випадками вимірювання координат поверхні технологічних об'єктів. Це надає можливості високоефективного контролю та підвищення точності передбачення стану обладнання у процесі роботи.
2. Досліджено чинники виникнення електромагнітної зони присутності, які створюють навколо себе технологічні об'єкти металообробки, та створено фізико-математичне підґрунтя для керування надточним неруйнівним торканням поверхонь технологічних об'єктів.
3. Запропоновано поняття та аналітичні моделі дуальності поверхні технологічних об'єктів, на засадах яких можна моделювати стан точності металообробного обладнання у процесі роботи.
4. Запропоновано основні принципи утворення просторових похибок в обробляючому просторі верстата, які надають можливості передбачити просторове спотворення координатної системи обладнання.
5. Показано та математично доведено, що утворення системи зворотнього зв'язку надає можливості звести ці похибки нанівець та значно підвищити точність контролю стану роботи обладнання при виготовленні деталей надточних приладів. Показано, що внаслідок введення зворотнього зв'язку в системі технологічного обладнання можна реалізувати неруйнівне торкання і, як наслідок, здійснити високоточне визначення координат поверхні технологічних об'єктів у робочому просторі верстата.
6. Обґрунтовані теоретичні засади керування процесом зближення технологічних об'єктів є основою для створення принципів дії відповідних систем контролю якості руху інструмента при входженні у торкання з поверхнею деталі.



## РОЗДІЛ 4

### ПРИНЦИПИ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ОБРОБНЕ ОБЛАДНАННЯ ПРИ РІЗНИХ ТИПАХ ТОРКАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Особливістю процесу торкання різального інструмента поверхні деталі є те, що це завжди супроводжується процесом руйнування поверхні останньої. Як було розглянуто в авторських роботах [92, 93], існує три засадних способи торкання:

- асиметричне багаторазове торкання;
- відтяжне багаторазове торкання;
- відскочне багаторазове торкання.

Всі ці способи більш менш почасти використовуються у технологічних процесах механічної обробки металу. Але на шляху їхнього широкого використання для отримання координат поверхні з високою точністю є такі перешкоди, як точність позиціювання інструмента і швидкодія систем CNC. Навіть за досягнутої на сьогодні точності реєстрації торкання СКТ у 0,02 мкм [131], що є на межі реєструємих руйнацій, крок позиціювання стає нездоланною перешкодою на шляху отримання високих точностей, а особливо низькою є швидкодія систем керування CNC.

#### **4.1. Руйнуюче торкання технологічних об'єктів**

У попередніх роботах [28, 30] були розглянуті випадки стосовно нежорсткого кріплення вимірювального інструмента, або пружної поверхні, яка відновлює своє розташування у просторі після закінчення процесу торкання. У подібній ситуації інтегрований інструмент, який використовують для реєстрації координати поверхні торкання, не може бути використаний для обробки заготовки, оскільки за умовами не має достатньої жорсткості кріплення різальних елементів. У реальному виробництві РІ (різці, фрези, свердла тощо) є надтвердими об'єктами (з жорстким кріпленням) у порівнянні з матеріалом деталі. При торканні цих технологічних об'єктів руйнуванню піддається, у першу чергу, ОВ (об'єкт вимірювання, деталь) і тільки у другу чергу ЧЕ (чутливий елемент, інструмент) через робочий знос різальних крайців.

Як було розглянуто у роботах [27, 44], існують три основні способи входження у торкання ОВ та ЧЕ. Такі самі способи зберігаються і при руйнуючому (жорсткому) торканні інструмента до поверхні деталі.

#### 4.1.1. Руйнующе торкання за симетричного способу руху

За симетричного способу руху як було вказано у [44, 46, 73], швидкість входу та виходу з торкання є однаковою. Ця теза зберігається і у випадку руйнующого торкання твердих тіл, але, водночас, існує досить суттєва різниця в поведінці поверхні ОВ за ідеальних умов, які пропонуються задля розглядання всіх випадків торкання ОВ, коли немає якостей пружності (рис. 4.1). У цьому випадку координата поверхні ОВ зміщується на величину  $L_p$ , а координата поверхні змінюється з  $O_0$  на  $O_I$ . Цей випадок вже згадувався у [27].

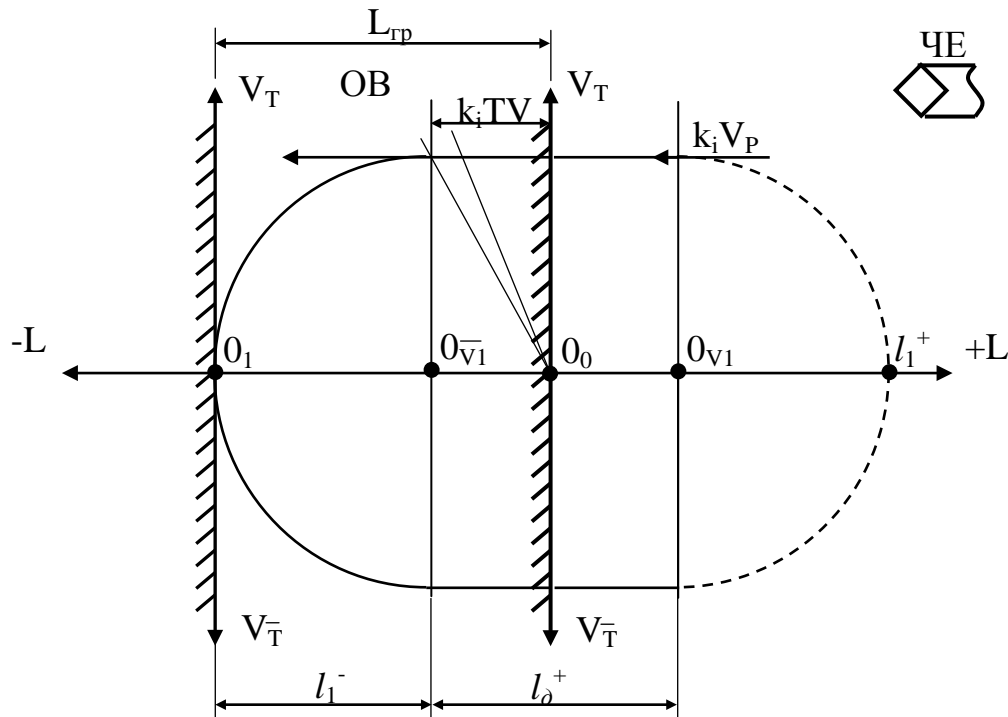


Рис. 4.1. Діаграма руйнування об'єкту вимірювання при одноразовому торканні за симетричного способу руху (загальний випадок)

Водночас, величина руйнації  $L_p$  визначатиметься як сума відстаней, що визначають відтинками  $O_I O_{VI}$  та  $O_{VI} O_0$  (рис. 4.1):

$$L_d = O_I O_{VI} + O_{VI} O_0,$$

де  $O_I O_{VI} = k_i^2 \cdot L_{гр}$ ;  $O_{VI} O_0 = k_i \cdot T \cdot V_p$ ; звідкіля

$$L_p = k_i^2 \cdot L_{гр} + k_i \cdot T \cdot V_p. \quad (4.1)$$

При виході із торкання у крапці  $O_I$  відбувається процес аналізу на

„неторкання”. Для цього системі контролю торкання ЧЕ задають час  $\bar{T}$ , за який визначається вихід із торкання та приймається команда на гальмування. ЧЕ при цьому долає відстань  $O_I O_{VI}$ , яка є сумою відтинків  $O_I O_{\bar{VI}}$  та  $O_{\bar{VI}} O_{VI}$ . Відтинок шляху  $O_{\bar{VI}} O_{VI} = l_{\delta}^+$  зазвичай утворюється у тому випадку, коли  $\bar{T} \gg T$ , тобто

$$O_I O_{\bar{VI}} + O_{\bar{VI}} O_{VI} = l_I^- + l_{\delta}^+,$$

де  $l_I^- = k_i^2 \cdot L_{ep}$ ;  $l_{\delta}^+ = k_i \cdot T \cdot V_p + O_I O_{VI}$ , звідкіля загальний шлях руху ЧЕ до наступного торкання є

$$L_{\Sigma 1} = 5k_i^2 \cdot L_{rp} + 2l_{\delta}^+. \quad (4.2)$$

Невідомий відтинок додаткового шляху  $l_{\delta}^+$  знаходиться за умови, що для подолання відстані  $l_I^- + l_{\delta}^+$  витрачається час  $\bar{T}$ , тобто:

$$l_{\delta}^+ = t_{\delta} \cdot k_i \cdot V_p,$$

де  $t_{\delta} = \bar{T} - k_i \cdot T_{\text{ао}}$  - час, необхідний для здолання шляху  $l_{\delta}^+$ .

Звідкіля слідує наступне

$$l_{\delta}^+ = (\bar{T} - k_i \cdot T_{rp}) \cdot k_i \cdot V_p = k_i \cdot \bar{T} \cdot V_p - k_i^2 \cdot T_{rp} \cdot V_p. \quad (4.3)$$

Підставимо отримані результати у (4.2), та внаслідок відповідних перетворень отримуємо наступний результат:

$$L_{\Sigma 1} = 4k_i^2 \cdot L_{rp} + 2k_i \cdot V_p \cdot \bar{T}. \quad (4.4)$$

Час, необхідний для повного циклу до входження у чергове торкання, буде

$$T_{\Sigma 1} = 4k_i \cdot T_{rp} + 2t_{\delta} + t_I^-, \quad (4.5)$$

де  $t_{\delta} = \bar{T} - k_i \cdot T_{rp}$ ;

$t_I^-$  - час, необхідний для здолання шляху  $l_I^-$  до входження у чергове торкання із швидкістю  $k_i \cdot V_p$ .

Це значення величини часу можна обчислити, виходячи з умови

$$t_I^- = \frac{l_I^-}{k_i \cdot V_p} = \frac{k_i^2 \cdot L_{rp}}{k_i \cdot V_p} = \frac{k_i \cdot T_{rp}}{2}. \quad (4.6)$$

Підставляючи отримані результати із виразу (4.6) у вираз (4.5), маємо наступний результат

$$T_{\Sigma 1} = \frac{5}{2} k_i \cdot T_{\text{гр}} + 2\bar{T}. \quad (4.7)$$

Таким чином, для одного циклу руйнуючого торкання за симетричного способу руху отримуємо

$$\begin{cases} L_{\Sigma 1} = 4k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} + 2k_i \cdot V_p \cdot \bar{T} \\ T_{\Sigma 1} = \frac{5}{2} k_i \cdot T_{\text{гр}} + 2\bar{T} \\ L_{p1} = k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} + k_i \cdot T \cdot V_p \end{cases}. \quad (4.8)$$

Із діаграми одноразового руйнуючого торкання (рис. 4.1) дуже добре видно, що у загальному випадку виникає достатньо помітний додатковий шлях і пов'язані з ним додаткові витрати часу. З цього погляду такий рух не є оптимальним, і тому виникає необхідність пошуку умов мінімальних значень відстаней і часу. Шлях гальмування та розгону  $L_{\text{гр}}$  неможливо скоротити, оскільки це є умова інерційності рушія ЧЕ. Тому необхідно виходити з умови, що  $l_{\theta}^+$  повинно дорівнювати нулю, тобто

$$l_{\theta}^+ = 0,$$

або із виразу (4.7) слідує:  $k_i \cdot \bar{T} \cdot V_p - k_i^2 \cdot T_{\text{гр}} \cdot V_p = 0$ , тоді

$$\bar{T} = k_i \cdot T_{\text{ао}}. \quad (4.9)$$

Підставляючи у (4.8) отримані результати, отримуємо:

$$\begin{cases} L_{\Sigma 1} = 5k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} \\ T_{\Sigma 1} = 4.5 \cdot k_i \cdot T_{\text{гр}} \\ L_{p1} = k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} + k_i \cdot T \cdot V_p \end{cases}. \quad (4.10)$$

Як видно з отриманих виразів, за виконання умови (4.9) існує виграш у шляху та часі, але не існує ніякого виграшу у глибині руйнування.

У випадку багаторазового торкання (рис. 4.2) відбувається поступове занурення ЧЕ вглиб ОВ, а кінцева глибина занурення визначається кількістю циклів торкання –  $n$ , тобто:

$$L_{\Sigma p1} = \sum_{i=1}^n (k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} + k_i \cdot T \cdot V_p) \quad (4.11)$$

#### 4.1.2. Руйнуюче торкання за відтяжного способу руху

При відтяжному способі руху швидкість руху ЧЕ при виході з торкання

значно менш ніж швидкість входження у торкання [44, 46, 47, 73]. Відповідно до цього виникає два варіанти зміни швидкості. Згідно першого варіанту швидкість входження у друге торкання така сама, як і у перше (рис. 4.3). Аналізуючи цей спосіб торкання необхідно констатувати той факт, що глибина руйнування буде обраховуватися за залежністю (4.10) і не буде від неї відрізнятися, оскільки початкові умови однакові, тобто швидкість входження у торкання  $k_i \cdot V_p$  однакові.

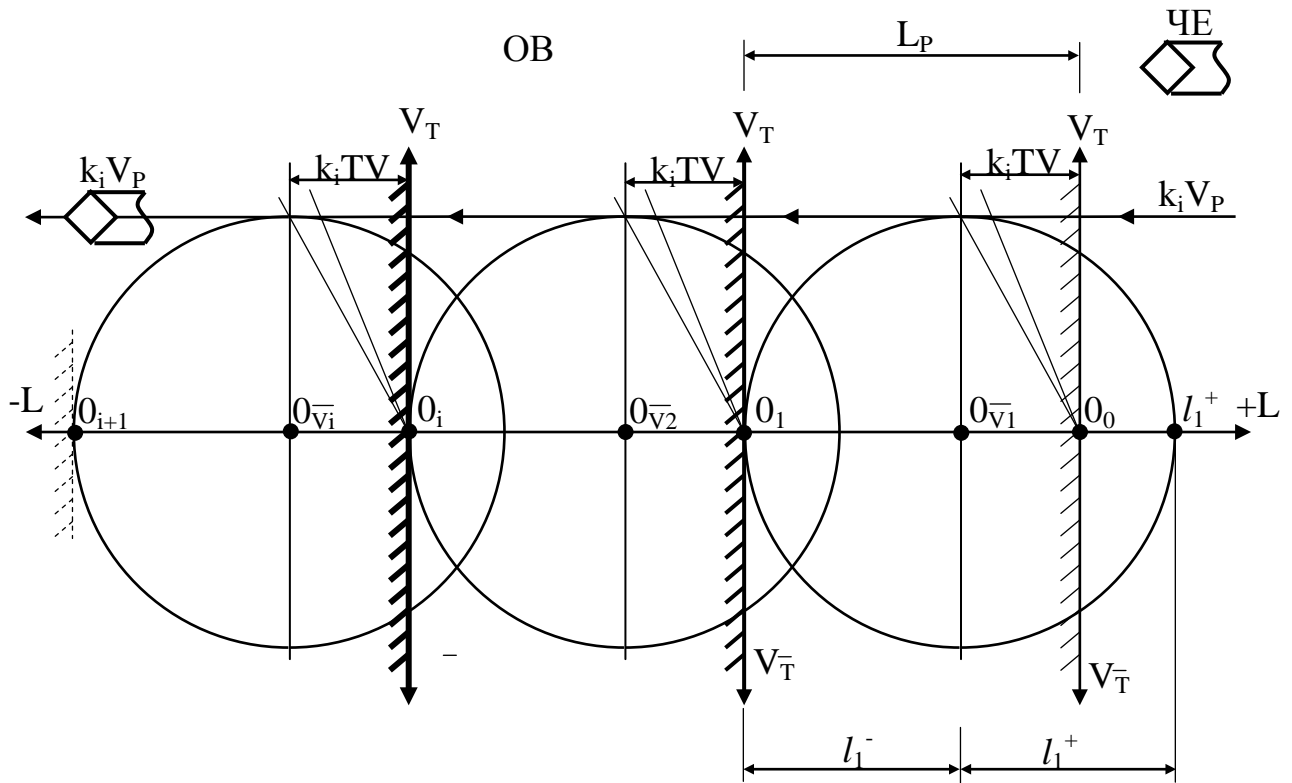


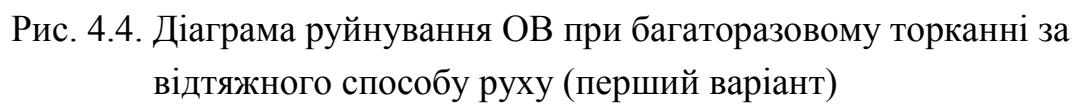
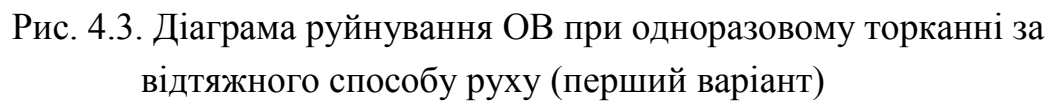
Рис. 4.2. Діаграма руйнування ОВ при багаторазовому торканні за симетричного способу руху

Різниця виникає при виході із торкання, де швидкість є  $k_{i+1} \cdot V_p$ . Умови входження у друге торкання із швидкістю  $k_i \cdot V_p$  є наступними (рис. 4.3)

$$k_i^2 \cdot L_{\text{тр}} = l_1^- + l_{\delta}^+ + l_1^+, \quad (4.12)$$

де  $l_1^- = l_1^+ = k_{i+1}^2 \cdot L_{\text{тр}}$  - шлях гальмування – розгін при виході з торкання;

$l_{\delta}^+$  - додатковий шлях руху, який виникає за тих самих умов, що і за попереднього способу руху.



Додатковий шлях  $l_{\partial}^+$  вираховується у такий самий спосіб, як і у симетричному способі руху, тобто

$$\begin{aligned} l_{\partial}^+ &= t_{\partial} \cdot k_{i+1} \cdot V_p; \\ t_{\partial}^+ &= \bar{T} - k_{i+1} \cdot T_{\text{гр}}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Звідкіля слідує наступне:

$$l_{\partial}^+ = k_{i+1} \cdot \bar{T} \cdot V_p - k_{i+1}^2 \cdot T_{\text{гр}} \cdot V_p. \quad (4.14)$$

Підставляючи вираз (4.14) у формулу (4.12), отримуємо наступний результат

$$k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} = 2k_{i+1}^2 \cdot L_{\text{гр}} + k_{i+1} \cdot \bar{T} \cdot V_p - k_{i+1}^2 \cdot T_{\text{гр}} \cdot V_p. \quad (4.15)$$

Після перетворень отримуємо зв'язок для коефіцієнтів швидкості  $k_i$  та  $k_{i+1}$ :

$$k_{i+1} = \frac{k_i^2}{2} \cdot \frac{T_{\text{гр}}}{T}. \quad (4.16)$$

Дуже добре видно що наявність додаткового шляху  $l_{\partial}^+$  не надає оптимальності при рухові ЧЕ. Тому умовою мінімальності руху буде  $l_{\partial}^+ = 0$ . У цьому випадку повинен витримуватися наступний зв'язок між  $k_i$  та  $k_{i+1}$ , виходячи з (4.12)

$$\begin{aligned} k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} &= 2k_{i+1}^2 \cdot L_{\text{гр}}; \\ k_i &= 2k_{i+1}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Тобто коефіцієнт швидкості  $k_{i+1}$  повинен дорівнювати половині  $k_i$ .

Користуючись вищесказаним, є можливість сформулювати основні рівняння руху руйнуючого відтяжного торкання у загальному випадку за першим варіантом

$$\begin{cases} L_{\Sigma 21} = V_p(k_i \cdot T + k_i^2 \cdot T_{\text{гр}} + k_{i+1} \cdot \bar{T}) \\ T_{\Sigma 21} = T + \bar{T} + 2k_i \cdot T_{\text{гр}} + k_{i+1} \cdot T_{\text{гр}} \\ L_{p 21} = k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} + k_i \cdot T \cdot V_p \end{cases} \quad (4.18)$$

У випадку, коли є кілька торкань ( $n$ ), залежності (4.18) перетворюються у наступне:

(4.19)

Для оптимального за шляхом та часом ( $l_{\hat{\alpha}}^+ = 0$ ) отримуємо (рис. 4.3):

(4.20)

Цей спосіб торкання, як видно із вищесказаного, має інші варіанти. Згідно другого варіанту умова (4.16) зберігається аж до входження у повторне торкання. У загальному випадку це відображено на діаграмі рис. 4.5.

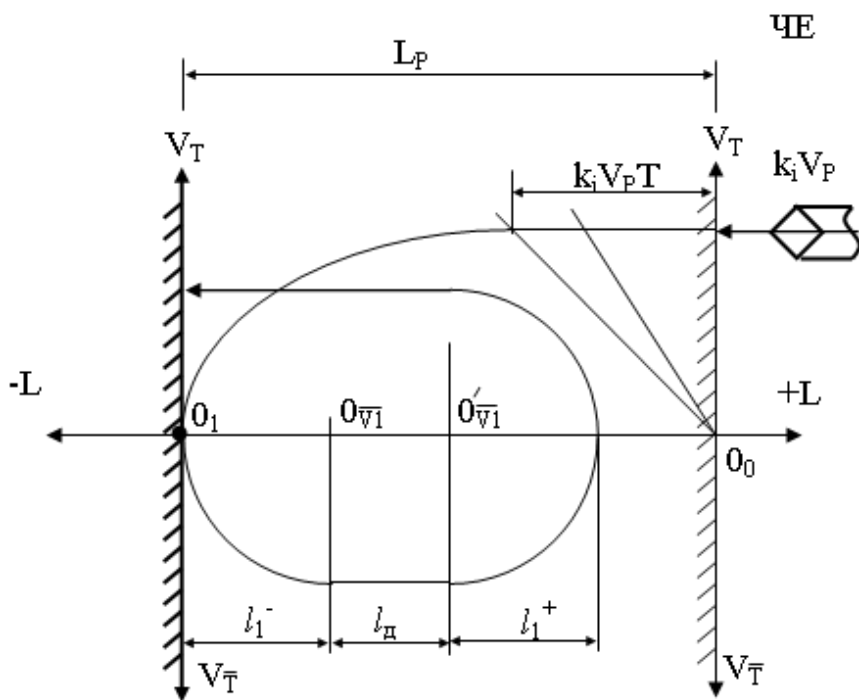


Рис. 4.5. Діаграма руйнування ОВ при одноразовому торканні за відтяжного способу руху (другий варіант)



Більш добірний аналіз цього випадку показує, що значне збільшення  $l_{\partial}^+$  призводить до появи ще одного додаткового шляху перед входженням у повторне торкання, але це означає ще більшу відміну від конкретного наведеного випадку. Робота системи контролю торкання у цьому випадку просто виходить за межі розумного сенсу використання, оскільки повторні руйнації такі ж самі при без переваг у шляху та часі.

Цей варіант торкання зберігається, коли умова (4.16) виконується на відміну від (4.17) у межах всього інтервалу значень  $k_{i+1} \leq \frac{k_i}{2}$ . За цієї умови швидкість входження у друге торкання завжди буде менше за  $k_i \cdot V_p$ . Загальний шлях при цьому є наступним

$$L_{\Sigma 22} = k_i \cdot V_p \cdot T + k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} + 2l_l^- + 2l_{\partial}^+ + 2l_l^+, \quad (4.21)$$

де  $l_l^- = l_l^+ = k_{i+1}^2 \cdot L_{\text{гр}}$ ;

$$l_{\partial}^+ = k_{i+1} \cdot \bar{T} \cdot V_p - k_{i+1}^2 \cdot L_{\text{гр}}.$$

Після перетворень отримуємо наступний результат:

$$L_{\Sigma 22} = k_i \cdot V_p \cdot T + 2k_{i+1}^2 \cdot L_{\text{гр}} + 2k_{i+1} \cdot \bar{T} \cdot V_p. \quad (4.22)$$

Час, необхідний, щоб здолати цю відстань, є

$$T_{\Sigma 22} = T + 2\bar{T} + k_i \cdot T_{\text{гр}}. \quad (4.23)$$

Для того, щоб зник додатковий шлях  $l_{\partial}^+$ , необхідно виконувати умову:

$$k_{i+1} \cdot T_{\text{гр}} \geq \bar{T}. \quad (4.24)$$

За виконання цієї умови (4.24), шлях та час, який використовується при руйнації ОВ, набувають наступного вигляду

$$\begin{cases} L_{\Sigma 22} = k_i \cdot V_p \cdot T + k_i^2 \cdot L_{\text{гр}} + 3k_{i+1}^2 \cdot L_{\text{гр}} + k_{i+1} \cdot V \cdot \bar{T} \\ T_{\Sigma 22} = T + \bar{T} + k_i \cdot T_{\text{гр}} + 3k_{i+1} \cdot T_{\text{гр}} \end{cases}. \quad (4.25)$$

Як видно із діаграми на рис. 4.6, глибина руйнації є такою самою, як і у попередньому випадку, але, коли відбувається багаторазове торкання, існує потенційний виграш у глибині руйнації, тобто вона відчутно менша ніж у попередніх випадках:



#### 4.1.3. Руйнующе торкання за відскочного способу руху

При відскочному способі руху, як було вже вказано у роботах [44, 46, 73, 81], швидкість входження ЧЕ у торкання із ОВ є меншою за швидкість виходу з нього, тобто  $k_{i+1} \cdot V_p < k_i \cdot V_p$ , що було обумовлено у [44, 46]. Загальну діаграму руйнування за цього способу відображено на рис. 4.7.

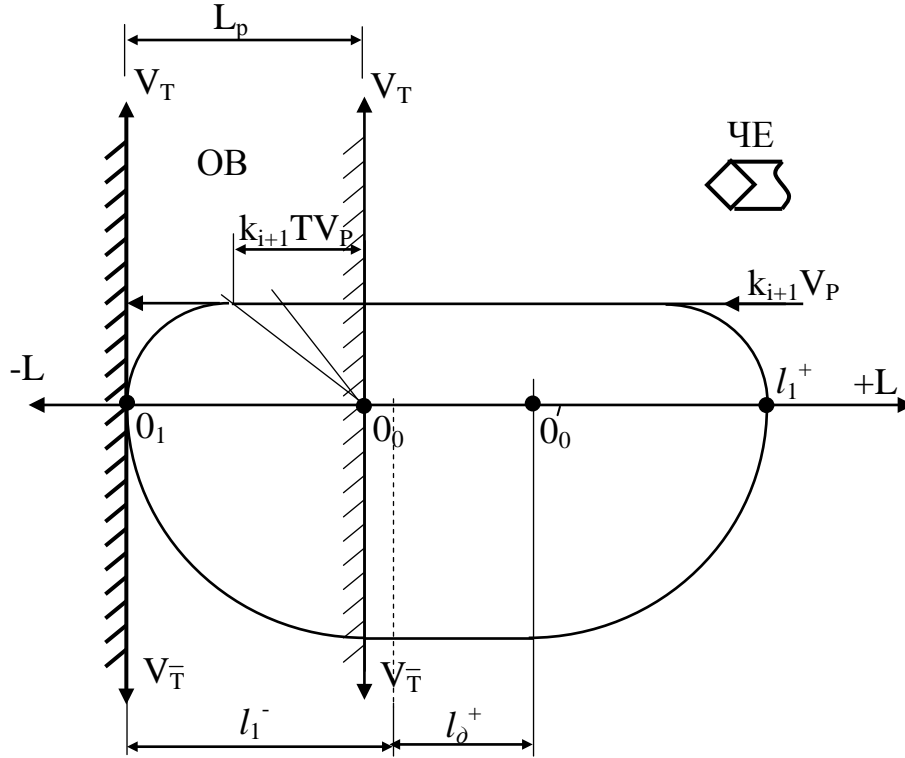


Рис. 4.7. Діаграма руйнування ОВ при одноразовому торканні за відскочного способу руху (загальний випадок)

Згідно аналізу цього способу руху є можливість зробити наступні висновки, які є пов'язаними з таким руйнуванням ОВ. Додатковий шлях  $l_\delta^+$  при виході ЧЕ із торкання обчислюється за тією ж методикою, що і у попередніх випадках, тобто

$$\begin{aligned} l_\delta &= k_i \cdot \bar{T} \cdot V_p - k_i^2 \cdot L_{\text{тр}} \\ t_\delta &= \bar{T} - k_i \cdot T_{\text{тр}} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Загальний шлях виходу ЧЕ із торкання набуває вигляду

$$l_l^- + l_\delta^+ + l_l^+ = k_i^2 \cdot L_{\text{тр}} + k_i \cdot \bar{T} \cdot V_p \quad (4.29)$$

Глибина руйнації (шлях руйнації) має вираз

$$L_p = k_{i+1} \cdot T \cdot V_p + k_i^2 \cdot L_{rp}. \quad (4.30)$$

Шлях, який проходить ЧЕ до наступного торкання, від крапки реверсу  $l_\theta^+$  до чергового торкання із швидкістю  $k_{i+1} \cdot V_p$  у крапці  $O_l$ , виходячи із виразу (4.29), буде

$$l_l^- + l_\theta^+ + l_l^+ = \frac{1}{k_{i+1}} \cdot (k_i^2 \cdot L_{rp} - k_{i+1}^2 \cdot L_{rp} + k_{i+1}^3 + k_i \cdot \bar{T} \cdot V_p). \quad (4.31)$$

Повний шлях у одному циклі від торкання до торкання є наступним

$$L_{\Sigma 3} = L_{rp} \left[ \frac{(k_i^2 - k_{i+1}^2) + k_{i+1} \cdot (k_i^2 + k_{i+1}^2)}{k_{i+1}} \right] + \bar{T} \cdot V_p \left( \frac{k_i}{k_{i+1}} + 1 \right). \quad (4.32)$$

Вираз обчислювання часу, необхідного для виконання повного циклу від торкання до торкання, набуває вигляду

$$T_{\Sigma 3} = T_{rp} \left[ \frac{(k_i + k_{i+1})^2 + 2k_{i+1}}{2k_{i+1}} \right] + \bar{T} \left( \frac{k_i}{k_{i+1}} + 1 \right) + T. \quad (4.33)$$

Існує ще один варіант обчислення часу, виходячи із виразу (4.29), тобто

$$L_{\Sigma 3} = L_{rp} (2k_i^2 + k_{i+1}^2) + V_p (2k_i \cdot \bar{T} + k_{i+1} \cdot T), \quad (4.34)$$

але вирахування часу, необхідного для виконання повного циклу, не піддається більшому спрощенню, оскільки швидкість на різних відтинках шляху є різною.

Для виконання умов оптимальності (мінімальності) кількості руху та витраченого на це часу, необхідно витримати ті ж самі умови, що і у попередніх випадках, тобто  $k_i \cdot T_{rp} \geq \bar{T}$ . Це є умова відсутності додаткового  $l_\theta^+$  (рис. 4.8). У цьому випадку вирази (4.32, 4.33, 4.34) набувають наступного вигляду:

$$\begin{cases} L_{\Sigma 3} = L_{rp} (4k_i^2 + k_{i+1}^2) + k_{i+1} \cdot V_p \cdot T \\ T_{\Sigma 3} = T + T_{rp} \cdot \left[ \frac{(2k_{i+1} + k_i)^2 + k_i^2 - k_{i+1}^2}{2k_{i+1}} \right]. \end{cases} \quad (4.35)$$

Аналіз цього способу руху дає два можливих критичні випадки. У першому випадку, коли полюс розгін-гальмування ЧЕ відбувається на координаті

первинного торкання ( $O_0$ ), виконується умова:

$$k_{i+1}^2 \cdot L_{\text{rp}} + k_{i+1} \cdot V_p \cdot T = k_i^2 \cdot L_{\text{rp}}. \quad (4.36)$$

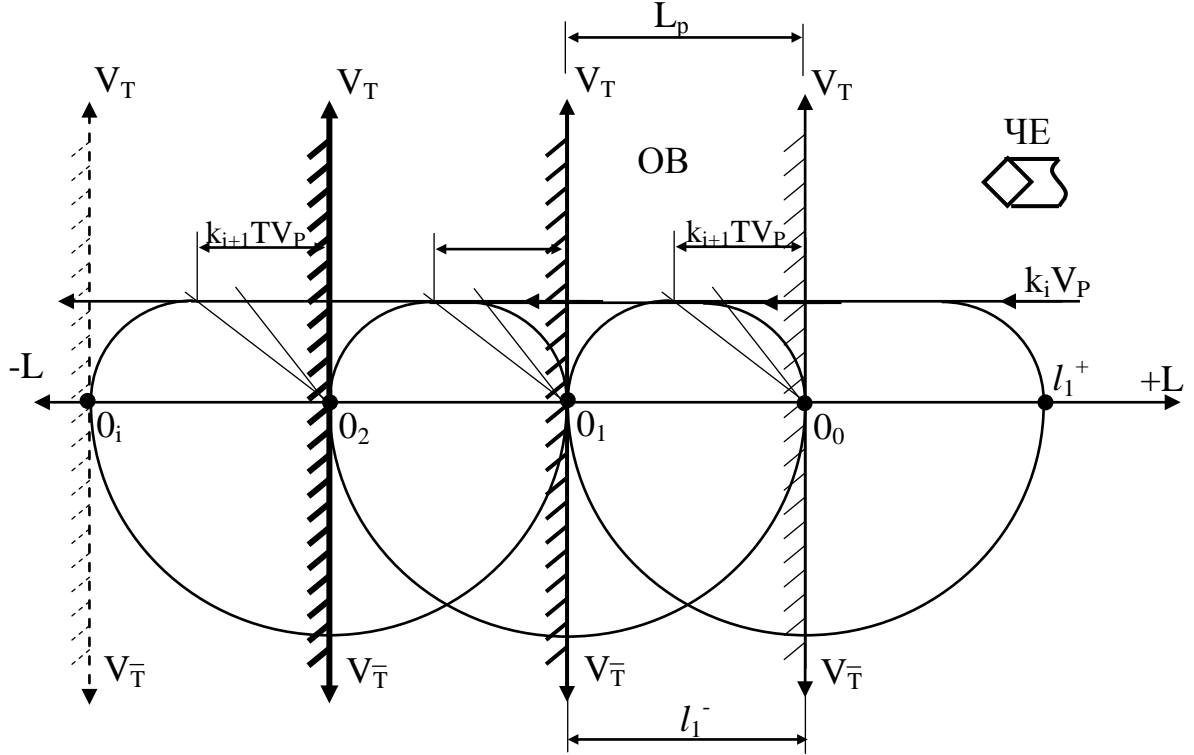


Рис. 4.8. Діаграма руйнування ОБ при багаторазовому торканні за відскочного способу руху (загальний випадок)

Вирішуючи це рівняння відносно  $k_{i+1}$ , отримується наступний зв'язок між коефіцієнтами швидкості:

$$k_{i+1} = \frac{\sqrt{T^2 + k_i^2 \cdot T_{\text{rp}}} - T}{T_{\text{rp}}}. \quad (4.37)$$

У другому випадку може бути ситуація, коли виконується умова  $k_i^2 \cdot T_{\text{rp}} = \bar{T}$ , тоді

$$k_{i+1} \cdot \bar{T} \cdot V_p = k_i^2 \cdot L_{\text{rp}}, \quad (4.38)$$

звідкіля є можливість вивести наступну залежність між коефіцієнтами  $k_i$  та  $k_{i+1}$ :

$$k_{i+1} = \frac{k_i^2}{2} \cdot \frac{T_{\text{гр}}}{T}. \quad (4.39)$$

Із виразів (4.37) та (4.39) дуже добре видно, що коефіцієнти зміни швидкості не можуть бути обрані без врахування не тільки рушійної системи ЧЕ ( $T_{\text{гр}}$ ), але і параметру контролю по виходу системи із торкання  $\bar{T}$ .

За випадку кількох торкань ( $n$ ) залежності (4.31) і (4.39) сумуються, як і в попередніх випадках

$$\begin{cases} L_{\Sigma 3} = \sum_{i=1}^n \left[ L_{\text{гр}} (4k_i^2 + k_{i+1}^2) + k_{i+1} \cdot V_p \cdot T \right] \\ T_{\Sigma 3} = \sum_{i=1}^n \left\{ T + T_{\text{гр}} \left[ \frac{(2k_{i+1} + k_i)^2 + k_i^2 - k_{i+1}^2}{2k_{i+1}} \right] \right\} \\ L_{p\Sigma 3} = \sum_{i=1}^n (k_{i+1} \cdot T \cdot V_p + k_{i+1}^2 \cdot L_{\text{сп}}) \end{cases} \quad (4.40)$$

Отже, ці коефіцієнти надають можливість визначити процеси руйнування ОВ (деталі, яку оброблюють) у процесі механічної обробки фрезерним інструментом, що необхідно для підвищення точності виготовлення прецизійної продукції.

#### **4.2. Підвищення швидкодії подачі при визначенні координати поверхні інструментом, що обертається**

Як вже вказувалося у п.р. 2.2.1, фрезерний інструмент при входженні у торкання із поверхнею деталі вирізає з її маси об'єм матеріалу, котрий за формою є циліндричним сегментом. Окрім того, було вказано на те, що найважливішим параметром цієї геометричної фігури є стрілка сегменту  $h_{\text{кр}}$ , котра безпосередньо пов'язана із точністю визначення координати торкання. Ця величина не повинна перевищувати величину поля допуску на виготовлення необхідного розміру деталі [4, 13, 132].

З іншого боку, існують сталі кроки позиціювання як нових, так і застарілих верстатів, які утворюють наступний ряд: 0,5 мкм, 1 мкм, 2 мкм, 5 мкм, 10 мкм. Користуючись цим рядом, є можливість досягти швидкості подачі при входженні у торкання інструмента до поверхні деталі в 600 мм/хв при похибці в оцінці координати  $\pm 5$  мкм (крок 10 мкм/мс).

Звичайно існує можливість використовувати штучно створений крок розміром у поле допуску на виготовлення розміру, але у такому випадку цей штучний крок може бути нереалізованим через несумісність із кроком позиціювання верстата. Так, наприклад, якщо необхідно реалізувати крок у 24 мкм, то він є нереалізуємим для верстатів із кроком позиціювання у 5 мкм та 10 мкм.

Окрім того, підрахунок загальної дистанції, пройденої різальним інструментом, створюватиме додаткові проблеми у роботі системи керування CNC верстата, вимагаючи створення нових алгоритмів обслуговування. Тому найкращим виходом із утвореної ситуації є штучні кроки кратні десяти, тобто 10 мкм та 100 мкм. У такому випадку швидкість яка відповідає кроку від 100 мкм/с до 6000 мм/хв. Така швидкість є вже швидкістю технологічних перегонів різального інструмента з місця на місце. За таких великих швидкостей врзання точність визначення координати поверхні становитиме  $\pm 50$  мкм, що є досить задовільним результатом не тільки для чорнової обробки, але й для деяких малоточних чистових.

Якщо використовувати змінний крок, то є можливість досягти більш вагомих результатів. На сьогодні принцип крокування використовується тільки у СКТ типу “LC-Sensor” [35], але відтворює ця система лише крок у 1 мкм/мс. – 60 мм/хв, який визначається системою керування CNC верстата.

Реалізувати багаторазове торкання по одній крапці торкання неможливо, оскільки, як було розглянуто у п.р. 4.1, постійна руйнація поверхні за кожного торкання буде вносити суттєву похибку для кожного вимірювання. Водночас, виникає ситуація накопичення похибок.

За умови використання різних способів руйнуючого торкання, як видно із розглянутих вище варіантів, найбільш переважним є відтяжний рух за другим варіантом (рис. 4.5, рис. 4.6).

За умови використання цього способу отримуємо найкращі показники за часом, швидкістю та точністю, але за умови, що він буде розгорнутий у площині двох координат X та Y (рис. 4.9).

При такій розгортці багаторазового торкання необхідно виконувати наступні умови:

- співвідношення поля допуску та  $h_{кр}$ :

$$\delta_{доп} > h_{кр1} > h_{кр2} > h_{кр3}; \quad (4.41)$$

- витримати довжину перегонів  $l_{пер}$ :

$$\begin{aligned}
l_{\text{пер}1} &\geq \sqrt{h_{\text{кр}1} \cdot D_{\phi} - h_{\text{кр}1}^2} + \sqrt{h_{\text{кр}2} \cdot D_{\phi} - h_{\text{кр}2}^2} \\
l_{\text{пер}2} &\geq \sqrt{h_{\text{кр}2} \cdot D_{\phi} - h_{\text{кр}2}^2} + \sqrt{h_{\text{кр}3} \cdot D_{\phi} - h_{\text{кр}3}^2} \quad . \\
l_{\text{пер}i} &\geq \sqrt{h_{\text{кр}i} \cdot D_{\phi} - h_{\text{кр}i}^2} + \sqrt{h_{\text{кр}i+1} \cdot D_{\phi} - h_{\text{кр}i+1}^2}
\end{aligned}
\tag{4.42}$$

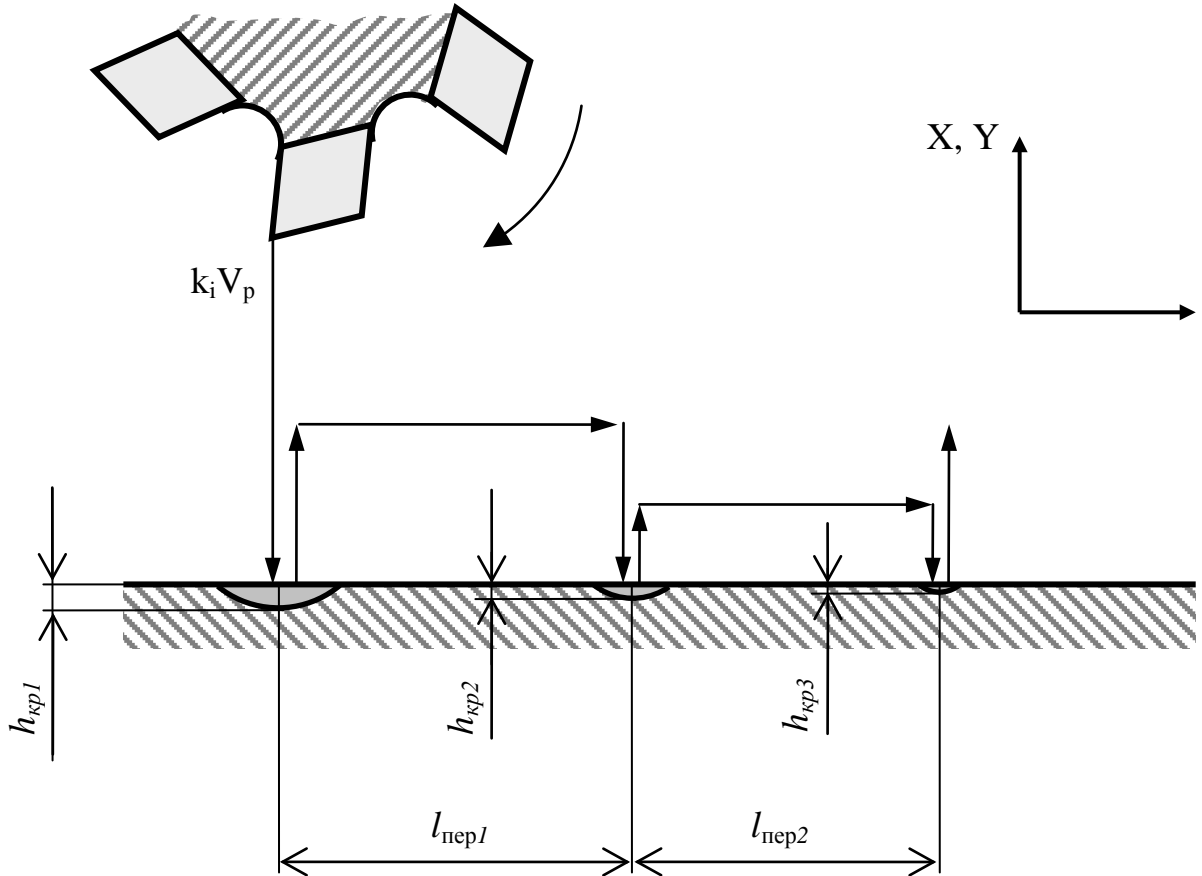


Рис. 4.9. Розгортка багаторазового торкання у лінію торкання по координаті X або Y

У загальному вигляді діаграма руху інструмента при входженні у перше торкання відображено на рис. 4.10.

На діаграмі дуже добре видно, що поверхня завжди буде отримувати руйнації на глибину  $h_{\text{кр}} < l_{\kappa}$ . За умови такого способу руху  $h_{\text{кр}}$  ніколи не може бути рівним довжині кроку  $l_{\text{кр}}$ . Відбувається це за двох основних чинників, котрі впливають на цей процес. По-перше, якщо інструмент перед наступним кроком знаходиться у безпосередній близькості до поверхні, то за умови руху  $h_{\text{кр}} = l_{\kappa}$ , а це означає, що існує торкання на межі чутливості СКТ, тоді  $h_{\text{кр}} \ll l_{\kappa}$ ,



або воно не існує, і тоді тим більше виконується умова  $h_{кр} < l_{\kappa}$  для наступного кроку.

Окрім того, існує деформація інструмента при врізанні, а це спричиняє до виконання нерівності  $h_{кр} < l_{\kappa}$  навіть за ідеальних умов.

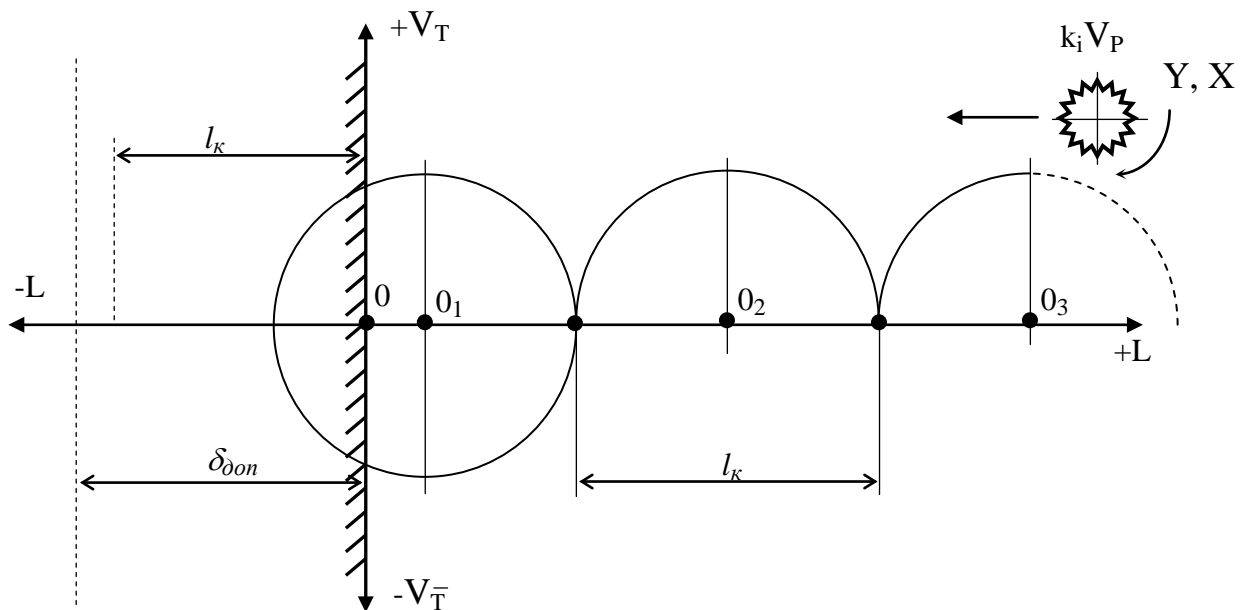
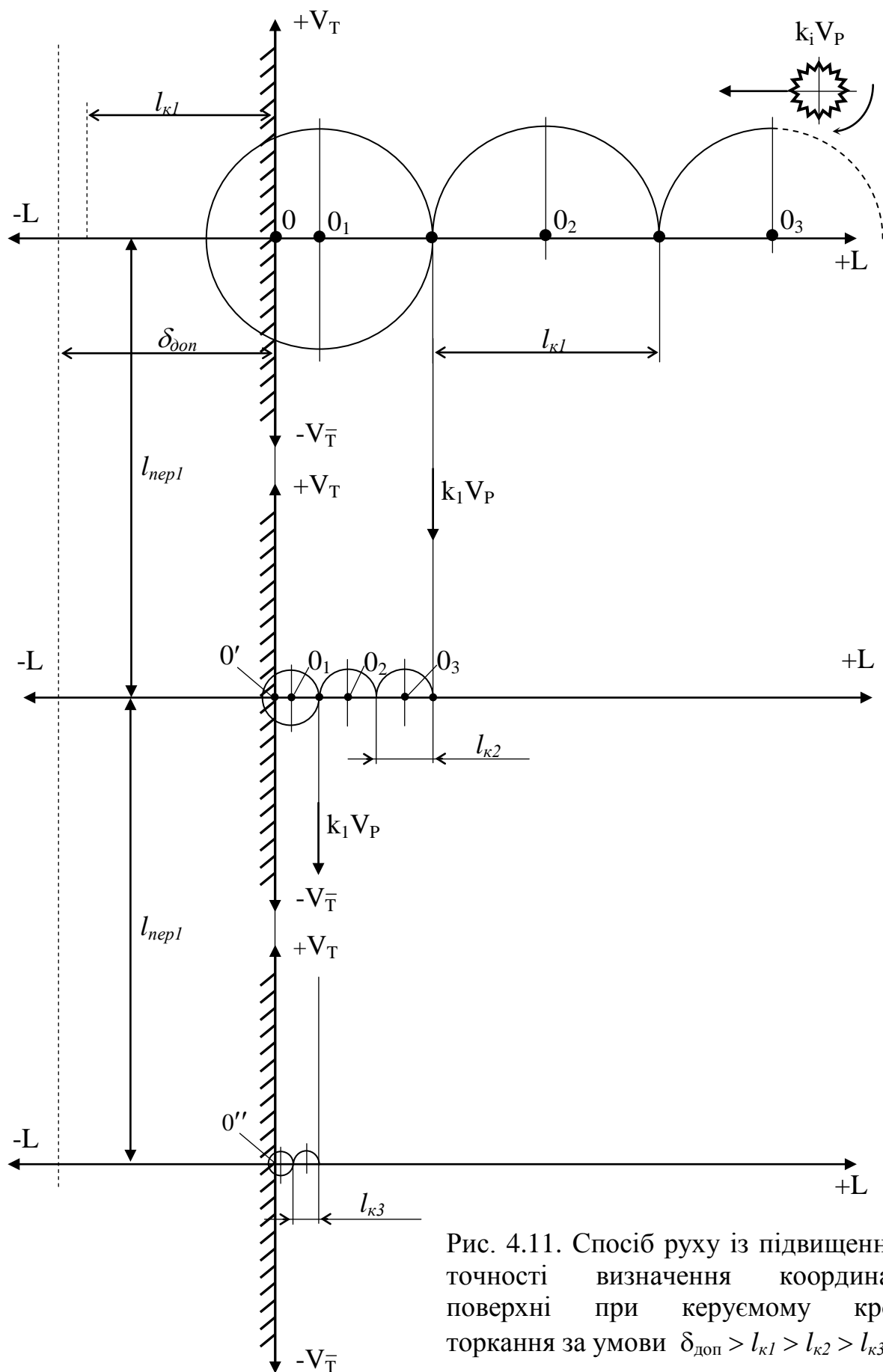


Рис. 4.10. Крокування інструмента до входження в торкання із поверхнею деталі при  $l_{\kappa} < \delta_{доп}$  за сталих розмірів кроку

У випадку необхідності визначення координати поверхні у такий спосіб краще користуватися діаграмою, відображеною на рис. 4.11. Такий двокроковий рух вимірювання є найбільш оптимальним з будь-якого погляду і був перевірений практично у лабораторних умовах.

За підсумками проведених дослідів було з'ясовано наступне:

- алгоритми програмування системи CNC значно спрощуються при введенні коефіцієнтів масштабування кроків;
- для верстатів із кроком позиціювання у 1 мкм найкращими кроками є 1 мкм, 10 мкм, 100 мкм, а для верстатів з кроком позиціювання в 0,5 мкм найкращими кроками є 0.5 мкм, 5 мкм, 50 мкм.



### 4.3. Динамічні навантаження на різальний інструмент при швидкісному кроковому врізанні

Для визначення динамічних навантажень на різальний інструмент доцільно розглянути розрахунок сил різання при врізанні кінцевої фрези.

Особливістю динамічних навантажень на РІ є те, що за умови крокового способу руху вони мають імпульсний характер із тривалістю не більш за одного оберту інструмента.

#### 4.3.1. Врізання циліндричною частиною різального інструмента

Залежно від швидкості врізання можуть бути два випадки:

а) коли швидкість є настільки великою, що стрибок на  $h_{кр}$  затягується до моменту підходу наступного зуба. Час стрибка, хв. знаходимо як

$$\tau_{стр} = \frac{h_{кр}}{V_{вр}},$$

де  $h_{кр}$  - величина врізання, мм;

$V_{вр}$  - швидкість врізання, мм/хв.

Час повороту фрези на один зуб, хв. має вираз:

$$\tau_{фр} = \frac{1}{n_{ф} \cdot z_{ф}},$$

де  $n_{ф}$  - число обертів фрези за хвилину;

$z_{ф}$  - число зубів фрези.

Таким чином, перший варіант є можливим, коли  $\tau_{стр} < \tau_{фр}$ , або

$$\frac{h_{кр}}{V_{вр}} < \frac{1}{n_{ф} \cdot z_{ф}}. \quad (4.43)$$

У цьому випадку схема різання матиме наступний вигляд (рис. 4.12). Зняття стружки проходить між точками N і M, у процесі різання миттєва товщина змінюється від нуля до  $a_{max} = h_{кр}$  і знову до нуля. Крайні кути контакту визначаються за формулами:

$$\theta_1 = 90^\circ - \arccos \frac{R - h_{кр}}{R}, \quad (4.44)$$

$$\theta_2 = 90^\circ + \arccos \frac{R - h_{кр}}{R}. \quad (4.45)$$

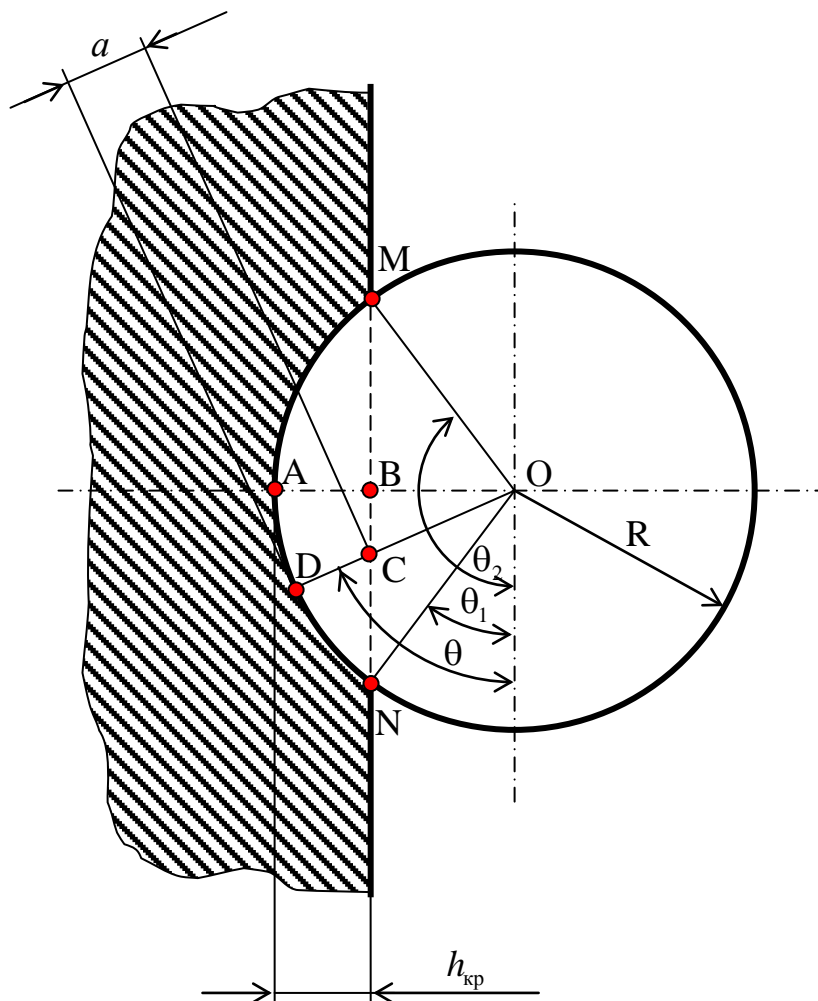


Рис. 4.12. Схема зрізання припуску для швидкого врізання

Розглянемо довільне розташування (крапка D) різальної кромки, що визначається кутом  $\theta$ . Миттєва товщина зрізуваного шару  $a$  визначається із трикутника BCO за формулою:

$$a = R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\cos(90^\circ - \theta)} = R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta}. \quad (4.46)$$

За другим варіантом, коли умова (4.43) не виконується, припуск знімається декількома зубами. Через малу величину  $h_{\text{кр}}$  ( $h_{\text{кр}} \leq 500$  мкм), можна вважати, що останній зуб знімає стружку приблизно однакової товщини (рис. 4.13):

$$a = \frac{V_{\text{вр}}}{n_{\phi} \cdot z_{\phi}}, \quad (4.47)$$

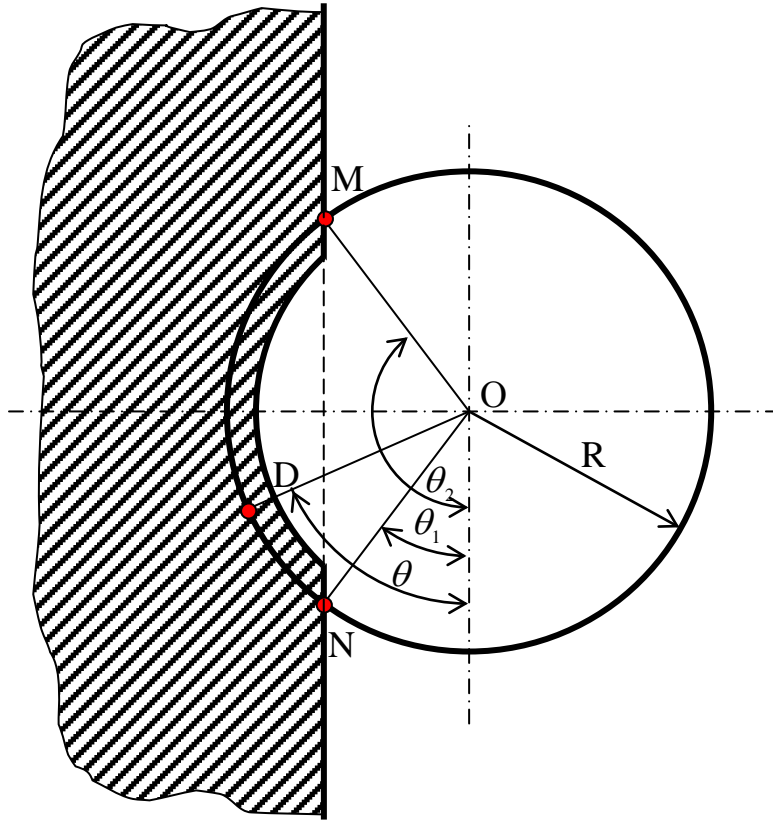


Рис. 4.13. Схема зрізання припуску для повільного врізання

або точний вираз є наступним:

$$a = \frac{V_{\text{вр}}}{n_{\text{ф}} \cdot z_{\text{ф}}} \cdot \sin \theta. \quad (4.48)$$

Для розрахунку сили, що діє на різальне лезо фрези, радше розглядаються умови на елементарній ділянці довжиною  $db$  різальної кромки, яка знімає стружку товщиною  $a$ .

Як запропоновано в роботах [133] і [134], елементарні тангенціальна  $dP_z$  і радіальна  $dR_{xy}$  (рис. 4.14) сили, що діють на фрезу, розраховуються за формулами:

$$dP_z = C_{\text{п.п.}} \cdot a \cdot db + C_{\text{з.п.}} \cdot db, \quad (4.49)$$

$$dR_{xy} = U_{\text{п.п.}} \cdot a \cdot db + U_{\text{з.п.}} \cdot db, \quad (4.50)$$

де  $C_{\text{п.п.}}$  і  $C_{\text{з.п.}}$  – питомі сили різання, що діють на передній і задній поверхнях

інструмента за напрямком швидкості різання;

$U_{п.п}$  і  $U_{з.п}$  – питомі сили різання, що діють на передній і задній поверхнях по нормалі до швидкості різання.

Як свідчать дослідження [134], ступень деформації стружки, а отже, і питомі сили різання значно зростають у зоні малих товщин зрізуваного шару, співрозмірних із величиною радіусної перехідної ділянки між передньою та задньою поверхнями інструмента. У цьому діапазоні товщин можна із упевненістю говорити про реалізацію процесу різання лише до співвідношення

$$\frac{a_{\min}}{\rho} \geq 0,2 \dots 0,25, \text{ де } \rho - \text{радіус заокруглення різального леза.}$$

Враховуючи, що для нових загострених фрез  $\rho \approx 10$  мкм, крайня величина  $a_{\min}$  (тобто  $h_{кр}$ ), при якій зрізатиметься стружка, знаходиться в межах:

$$a_{\min} = h_{кр} = (0,2 \dots 0,25) \cdot 10 = 2 \dots 2,5 \text{ мкм.}$$

При меншій величині буде переважати пластичне деформування із тертям ЗПІ по поверхні різання. Ці процеси на даний час є мало вивченими і потребують додаткових досліджень.

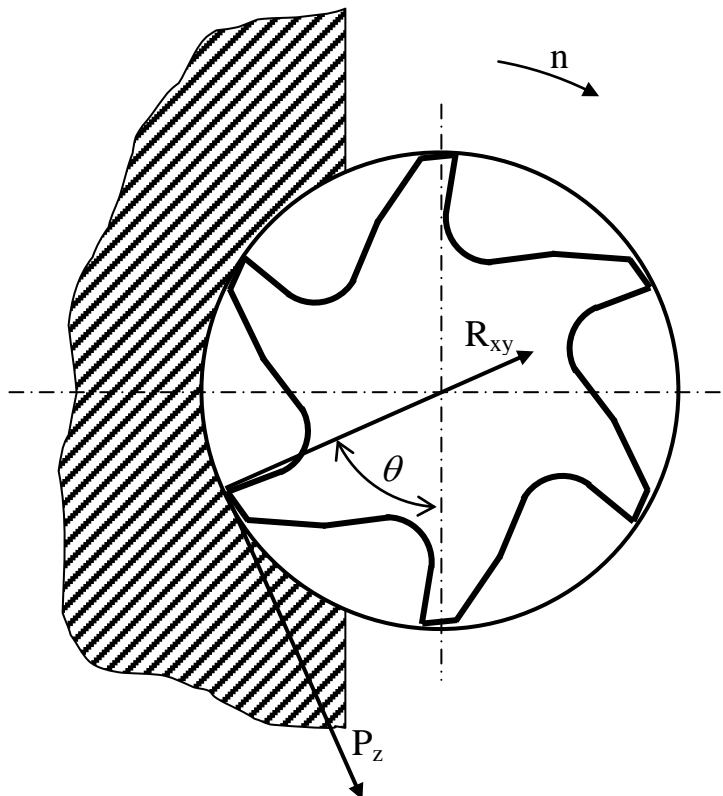


Рис. 4.14. Схема дії сил при кінцевому фрезеруванні

Як варіант рішення можна використати лише частину формул (4.49) і (4.50), врахувавши сили на ЗПІ:

$$dP_z = C_{з.п.} \cdot db; \quad (4.51)$$

$$dR_{xy} = U_{з.п.} \cdot db. \quad (4.52)$$

У зношеної фрези радіус  $\rho$  збільшується від 20 мкм до 25 мкм, що вимагає корекції області використання формул (4.49) і (4.50).

Для визначення питомих сил на передній та задній поверхнях можуть бути запропоновані наступні формули [134]:

$$C_{п.п.} = \tau_\phi (\varepsilon + 1); \quad (4.53)$$

$$C_{з.п.} = 1,5\tau_\phi \cdot \varepsilon \cdot \rho + \mu_c \cdot \sigma_{0,2} \cdot h_3; \quad (4.54)$$

$$U_{п.п.} = 1,13\tau_\phi \cdot (\varepsilon - 1); \quad (4.55)$$

$$U_{з.п.} = 1,7\tau_\phi \cdot \varepsilon \cdot \rho + \sigma_{0,2} \cdot h_3, \quad (4.56)$$

де  $\tau_\phi$  – зсувні напруження, що діють в площині зсуву.

$\varepsilon$  – відносний зсув матеріалу стружки, що залежить від степені її деформації;

$\mu_c$  – коефіцієнт зовнішнього тертя по задній поверхні інструмента між оброблюваним та інструментальним матеріалами;

$\sigma_{0,2}$  – межа текучості оброблюваного матеріалу;

$h_3$  – ширина фаски зношування на ЗПІ.

За даними [135] наближені значення зсувних напружень, що діють в площині зсуву, визначаються залежністю:

$$\tau_\phi = 0,8S_b, \quad (4.57)$$

де  $S_b = \sigma_b (1 + \delta)$  – реальна межа міцності на зсув оброблюваного матеріалу;

$\delta$  – відносне видовження;

$\sigma_b$  – межа міцності.

Практичне використання формул (4.53) ÷ (4.56) обмежується необхідністю експериментального визначення  $\varepsilon$ , дослідження якого залежить від радіуса  $\rho$ , оброблюваного матеріалу й товщини  $a$ .

У першому наближенні можна використати експериментальні дані [134], приведені для досить значного ряду оброблюваних матеріалів. Їх апроксимація дозволила одержати наступну формулу:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1,5315 \left( \frac{a}{\rho} \right)^{-0,3748}, \quad (4.58)$$

де  $\varepsilon_0$  – нормативне значення відносного зсуву, яке часто приймається  $\varepsilon_0 = 2,5$ .  
Підставивши це значення в (4.58), отримаємо

$$\varepsilon = 3,82875 \left( \frac{\rho}{a} \right)^{0,3748}. \quad (4.59)$$

Для зручності позначимо

$$\begin{aligned} c &= 3,82875; \\ k &= 0,3748, \end{aligned} \quad (4.60)$$

після чого вираз для  $\varepsilon$  залишиться:

$$\varepsilon = c \left( \frac{\rho}{a} \right)^k. \quad (4.61)$$

Підставимо вираз (4.61) у вирази (4.53) ÷ (4.56) та отримаємо наступні залежності:

$$C_{п.п.} = \tau \cdot \left[ c \cdot \left( \frac{\rho}{a} \right)^k + 1 \right]; \quad (4.62)$$

$$C_{з.п.} = 1,5\tau_\phi \cdot c \frac{\rho^{1+k}}{a^k} + \mu_c \cdot \sigma_{0,2} \cdot h_3; \quad (4.63)$$

$$U_{п.п.} = 1,13\tau \cdot \left[ c \cdot \left( \frac{\rho}{a} \right)^k - 1 \right]; \quad (4.64)$$

$$U_{з.п.} = 1,7\tau_\phi \cdot c \frac{\rho^{1+k}}{a^k} + \sigma_{0,2} \cdot h_3. \quad (4.65)$$

Для визначення параметрів  $db$  у формулах (4.49) і (4.50) виконаємо розгортку циліндричної поверхні фрези на площину (рис. 4.15).

Ширина фрезерування дорівнює:

$$B = R \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot \operatorname{ctg} \omega,$$

де  $\omega$  – кут нахилу гвинтової різальної кромки фрези.

Оскільки кути  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  вибрані довільно, позначимо  $\theta_2 - \theta_1 = \theta$ .

Тоді

$$db = R \cdot \operatorname{ctg} d\theta. \quad (4.66)$$



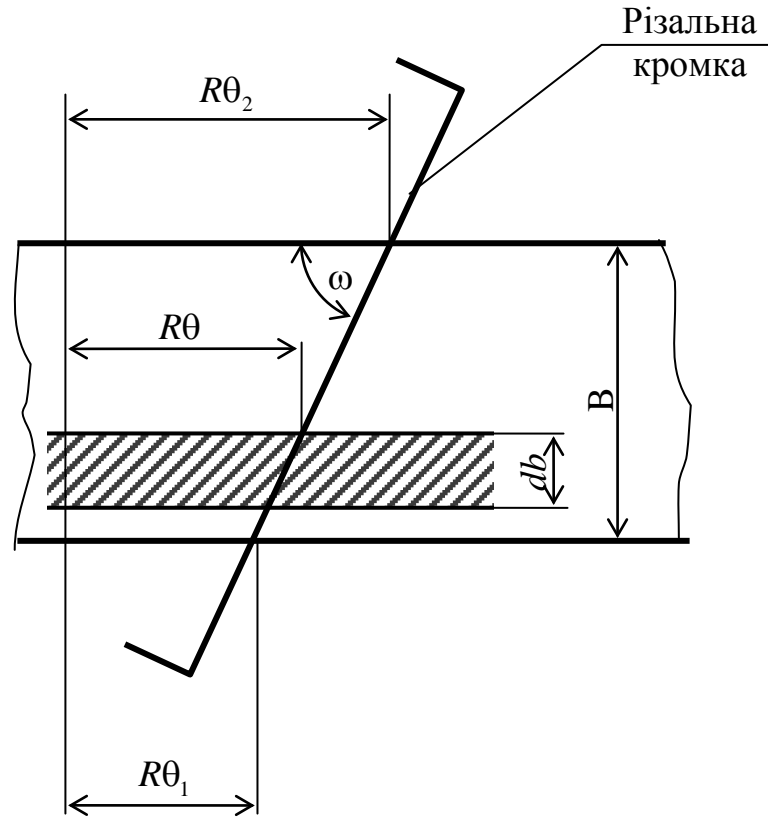


Рис. 4.15. Розгортка поверхні фрези на площину

Підставимо в формулу (4.49) і (4.508) залежності для  $a$  (4.46) і  $db$  (4.66), а також вирази (4.62) ÷ (4.65) для питомих сил різання:

$$dP_z = \tau_\phi \cdot \left[ c \cdot \frac{\rho^k}{\left( R - \frac{R - h_{кр}}{\sin \theta} \right)^k} \cdot \left( R - \frac{R - h_{кр}}{\sin \theta} \right) \cdot R \cdot ctg \omega \cdot d\theta + \right. \\ \left. + \frac{1,5\tau_\phi \cdot c \cdot \rho^{1+k}}{\left( R - \frac{R - h_{кр}}{\sin \theta} \right)^k} + \mu_c \cdot \sigma_{0,2} \cdot h_3 \right] \cdot R \cdot ctg \omega \cdot d\theta; \quad (4.67)$$

$$\begin{aligned}
dR_{xy} = & 1,13\tau_{\phi} \cdot \left[ \frac{c \cdot \rho^k}{\left( R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta} \right)^k} \cdot \left( R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta} \right) \cdot R \cdot \text{ctg} \omega \cdot d\theta + \right. \\
& \left. + \left[ 1,7\tau_k \cdot c \cdot \frac{\rho^{k+1}}{\left( R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta} \right)^k} + \sigma_{0,2} \cdot h_3 \right] \cdot R \cdot \text{ctg} \omega \cdot d\theta. \right.
\end{aligned} \tag{4.68}$$

Вирази для визначення загальних сил  $P_z$  і  $R_{xy}$ , що діють за час повороту різальної кромки від  $\theta_1$  до  $\theta_2$  отримуються інтегруванням виразів (4.67) і (4.68). Тоді вирази загальних сил різання набувають вигляду

$$\begin{aligned}
P_z = & R \cdot \text{ctg} \omega \cdot \tau_{\phi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ \frac{c \cdot \rho^k}{\left( R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta} \right)} + 1 \right] \cdot \left( R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta} \right) \cdot d\theta + \\
& + R \cdot \text{ctg} \omega \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ \frac{1,5 \cdot \tau_{\phi} \cdot c \cdot \rho^{1+k}}{\left( R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta} \right)^k} + \mu_c \cdot \sigma_{0,2} \cdot h_3 \right] \cdot d\theta;
\end{aligned} \tag{4.69}$$

$$\begin{aligned}
R_{xy} = & 1,13\tau_{\phi} \cdot R \cdot \text{ctg} \omega \int \left[ \frac{c \cdot \rho^k}{\left( R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta} \right)^k} - 1 \right] \cdot \left( R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta} \right) \cdot d\theta + \\
& + R \cdot \text{ctg} \omega \cdot \int \left[ \frac{1,7 \cdot \tau_{\phi} \cdot c \cdot \rho^{k+1}}{\left( R - \frac{R - h_{\text{кр}}}{\sin \theta} \right)^k} + \sigma_{0,2} \cdot h_3 \right] \cdot d\theta.
\end{aligned} \tag{4.70}$$

Через те, що показник ступеню  $k$  не є цілим числом, інтеграли (4.69) і (4.70) можуть бути обраховані тільки наближеними, числовими способами для кожного конкретного випадку.

У випадку, коли величина  $h_{кр}$  менше критичного значення, для розрахунку використовуються тільки праві частини виразів (4.69) і (4.70).

Загальна послідовність визначення сил різання при швидкому врізанні циліндричною частиною (див. рис. 4.12) буде наступною:

1. Призначаються початкові параметри процесу фрезерування:  $R$ ,  $\rho$ ,  $h_{кр}$ ,  $\omega$ ,  $S_b$ ,  $h_3$ ,  $\mu_c$ ,  $\sigma_{0,2}$ .
2. Розраховуються  $\tau_\phi$  за формулою (4.57).
3. Присвоюються значення для  $c$  і  $k$  із (4.60).
4. Розраховуються межі інтегрування  $\theta_1$  і  $\theta_2$  за формулами (4.44) і (4.45).
5. Перевіряється умова реалізації процесу різання:

$$\frac{h_{кр}}{\rho} \geq 0,1 \dots 0,25. \quad (4.71)$$

6. Якщо умова виконується, проводиться чисельне інтегрування нових виразів (4.69) і (4.70). Для зворотної умови інтегрується тільки друга частина кожного виразу, а перша прирівнюється до нуля.

У випадку, коли припуск зрізається кількома зубами (див. рис. 4.13) і умова (4.43) не виконується, у формули (4.49), (4.50), (4.62) ÷ (4.65) підставляється вираз (4.48) для товщини зрізаного шару.

Після перетворень отримаємо

$$P_z = R \cdot \text{ctg } \omega \cdot \tau_\phi \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ \frac{c \cdot \rho^k}{\left( \frac{V_{вр} \cdot \sin \theta}{n_\phi \cdot z_\phi} \right)^k} + 1 \right] \cdot \frac{V_{вр} \cdot \sin \theta}{n_\phi \cdot z_\phi} \cdot d\theta + \quad (4.72)$$

$$+ R \cdot \text{ctg } \omega \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ \frac{1,5 \cdot \tau_\phi \cdot c \cdot \rho \cdot (n_\phi \cdot z_\phi \cdot \rho)^k}{(V_{вр} \cdot \sin \theta)^k} + \mu_c \cdot \sigma_{0,2} \cdot h_3 \right] \cdot d\theta;$$

$$R_{xy} = 1,13 \cdot \tau_\phi \cdot R \cdot \text{ctg } \omega \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ c \cdot \left( \frac{\rho \cdot n_\phi \cdot z_\phi}{V_{вр} \cdot \sin \theta} \right)^k - 1 \right] \cdot \frac{V_{вр} \cdot \sin \theta}{n_\phi \cdot z_\phi} \cdot d\theta + \quad (4.73)$$

$$+ R \cdot \text{ctg } \omega \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ \frac{1,7 \cdot \tau_\phi \cdot c \cdot \rho \cdot (n_\phi \cdot z_\phi \cdot \rho)^k}{(V_{вр} \cdot \sin \theta)^k} + \sigma_{0,2} \cdot h_3 \right] \cdot d\theta.$$

Послідовність розрахунку в цьому випадку не відрізняється від приведених

раніше формул.

#### 4.3.2. Силів навантаження при врізанні торцевою частиною фрези

У цьому випадку (див. рис. 4.16) фреза працює у режимі свердлування, і кожна різальна кромка зрізає однакову стружку, товщина якої визначається наступною умовою:

$$\begin{cases} a = \frac{V_{вр}}{n_{\phi} \cdot z_{\phi}}, & \text{якщо } a \leq h_{кр}; \\ a = h_{кр}, & \text{якщо } \frac{V_{вр}}{n_{\phi} \cdot z_{\phi}} > h_{кр}. \end{cases} \quad (4.74)$$

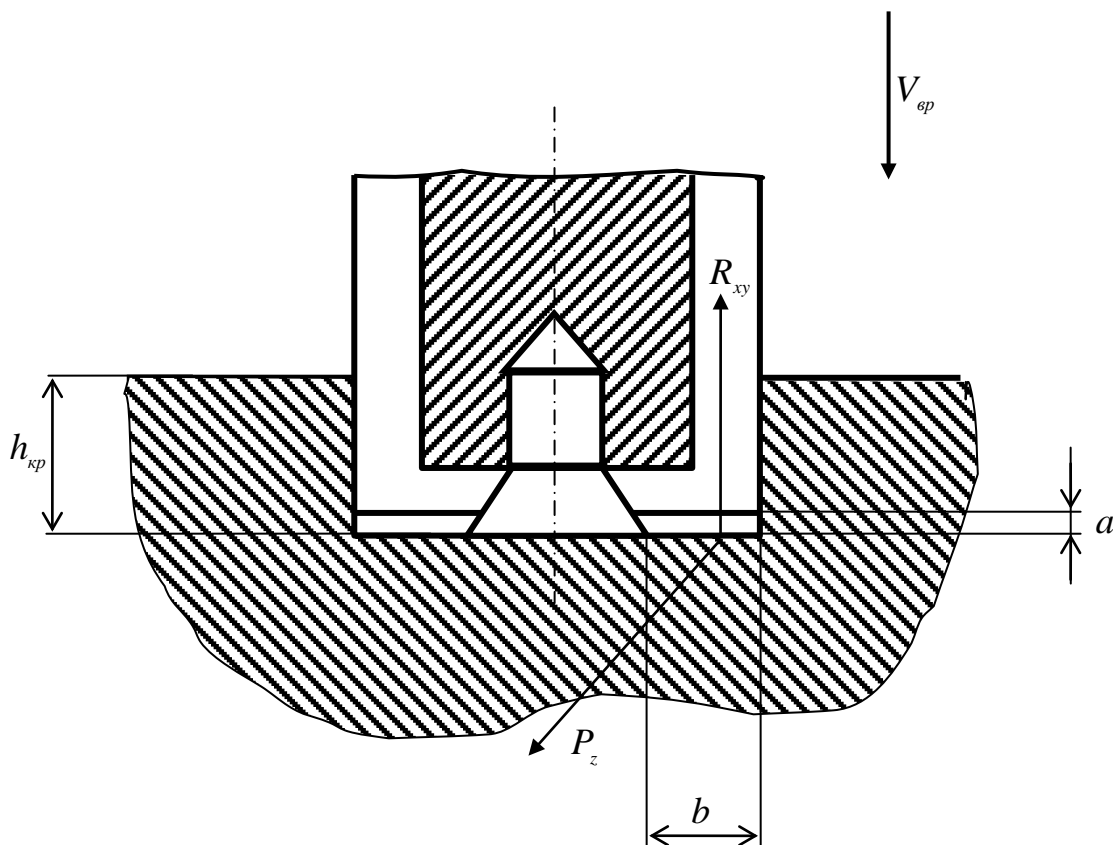


Рис. 4.16. Схема роботи торцевою частиною фрези.

Ширина зрізуваного шару є постійною та дорівнює ширині різального леза. Тоді формули (4.49) і (4.50) можуть бути відразу перетворені для повних сумарних сил різання:

$$P_{z\Sigma} = z_{\phi} \cdot b \cdot \left\{ \tau_{\phi} \cdot \left[ c \cdot \left( \frac{\rho}{a} \right)^k + 1 \right] \cdot a + 1,5 \cdot \tau_{\phi} \cdot c \cdot \frac{\rho^{k+1}}{a^k} + \mu_c \cdot \sigma_{0,2} \cdot h_3 \right\}; \quad (4.75)$$

$$R_{z\Sigma} = z_{\phi} \cdot b \cdot \left\{ 1,13 \cdot \tau_{\phi} \left[ c \cdot \left( \frac{\rho}{a} \right)^k - 1 \right] \cdot a + 1,7 \cdot \tau_{\phi} \cdot c \cdot \frac{\rho^{k+1}}{a^k} + \sigma_{0,2} \cdot h_3 \right\}. \quad (4.76)$$

Послідовність розрахунку складається із виконання умов формули (4.74) і подальшого прямого обчислення формул (4.75) і (4.76), якщо  $\frac{a}{\rho} \geq 0,2 \dots 0,25$ , або менше правої її половини (відмічено дужкою), якщо ця умова не виконується.

Значення сил різання, обчислених за формулами (4.69), (4.70), (4.72), (4.73), є максимальним за час перебування різального зуба у контакті. Якщо буде поставлена задача дослідити характер зміни сил за один цикл різання, то змінюються границі інтегрування:

1. Спочатку змінюється значення  $\theta_2$  від  $\theta_1$  до  $\theta_2$  з деяким кроком. Цим моделюється процес врізання кромки від нуля до максимальної сили різання.

2. У подальшому  $\theta_2$  фіксується, а змінюється нижня границя  $\theta_1$  від значення  $\theta_1$  до  $\theta_2$  із деяким кроком. Одержимо сили різання при виході фрези.

Це все дуже легко обчислюється в програмному середовищі MathCAD.

## **2.8 Пружні деформації технологічної обробної системи при швидкісному кроковому врізанні фрези**

Вирахувавши сили різання при врізанні, можливо визначити розмір відхилення фрези від номінального положення внаслідок деформацій системи технологічного обладнання.

Відомо, що деформації ТОС, що виникають під дією сил різання, призводять до зміни початкового відносного положення різального інструмента і оброблюваної деталі, внаслідок чого технологічна система втрачає точність [136], [137].

У фрезерних верстатах із системою ЧПК робочі органи охоплені зворотнім зв'язком, і деформації силових елементів під час переміщення і роботи можуть бути частково компенсовані системою керування.

Ступінь компенсації визначається типом лінії зворотного зв'язку, але, навіть у найбільш досконалих конструкціях зворотнім зв'язком не охоплена силова головка верстата, заготовка, верстатне обладнання та різальний інструмент.

Тому їх деформації під час процесу врізання будуть знижувати точність позиціонування.

Отже, у розрахунку силових навантажень і здійсненні позиціонування інструмента необхідно враховувати параметри жорсткості різального інструмента, силової головки верстату, оброблюємої заготовки і верстатного оснащення [138].

При визначенні похибки, внесеної пружними деформаціями технологічної системи, необхідно врахувати, що деформація заготовки та верстатного пристрою  $\delta_3$ , а також деформація верстата і різального інструмента  $\delta_{\text{СТ-PI}}$  є протилежними за напрямком і взаємно компенсують одна одну (рис. 4.17):

$$\delta_{\Sigma} = \delta_3 - \delta_{\text{СТ-PI}}. \quad (4.77)$$

З цього випливає, що оптимальним випадком буде випадок, коли деформація заготовки  $\delta_3$  і деформація верстата й різального інструмента  $\delta_{\text{СТ-PI}}$  є рівними за величиною.

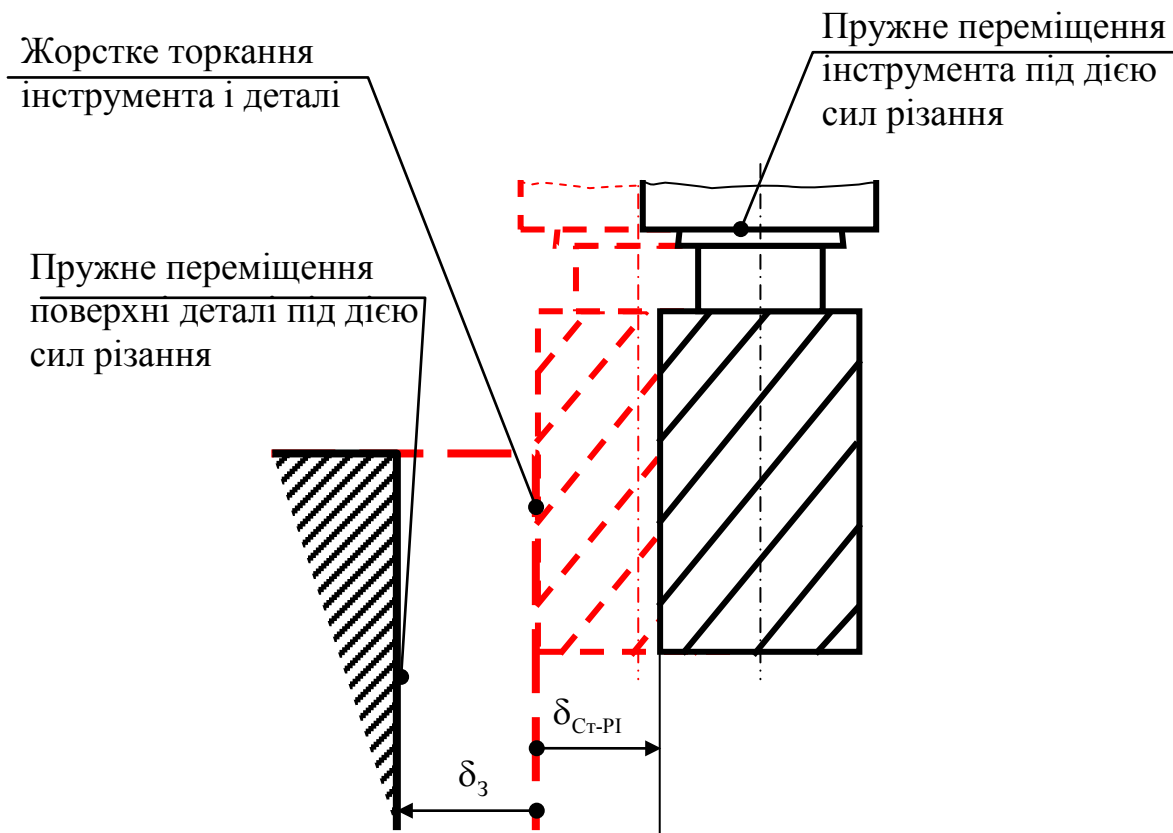


Рис. 4.17. Деформації поверхонь деталі та інструмента

Жорсткість окремої деталі вузла визначається її спроможністю пручатися появі пружних деформацій. Жорсткість цілого вузла характеризується його спроможністю пручатися появі пружних переміщень.

Жорсткість характеризується коефіцієнтом жорсткості [139]

$$j = \frac{P}{\delta}, \quad (4.78)$$

де  $P$  – навантаження;

$\delta$  - пружне переміщення.

Для спрощення технологічних розрахунків радше буває зручно користуватися не показником жорсткості  $j$ , а зворотним його показником, так званим коефіцієнтом піддатливості

$$c_n = \frac{1}{j}. \quad (4.79)$$

Тоді деформація під навантаженням від сили різання визначається співвідношенням

$$\delta = P \cdot c_n. \quad (4.80)$$

Таким чином, можна визначати деформації, що виникають у ТОС під час фрезерної обробки металу, врахування яких значно впливає на точність виготовлення прецизійної продукції.

#### **4.4.1. Основні типи деформацій заготовки**

Заготовка під дією сил різання сприймає два види деформування: пружна деформація заготовки закріпленої в пристосуванні  $\delta_{3y}$  і контактній деформації в стику заготовка-інструмент  $\delta_{3к}$  (оскільки жорсткість поверхні різального інструмента набагато вище такої в оброблюваній заготовці, прийнято вважати, що деформується саме заготовка) (рис. 4.18).

Складова  $\delta_{3y}$  залежить власне від жорсткості заготовки, схеми закріплення її в пристосуванні та параметрів жорсткості пристосування. Оскільки створення аналітичної моделі жорсткості не є метою даної роботи, а, крім того, ці питання недостатньо досліджені, є доцільним враховувати сумарну деформацію через твердість системи заготовка-пристосування  $j_{3-пр}$ , визначену експериментально для оснащення, що використовують на певному підприємстві.

У загальному виді вираз величини пружних деформацій набуває вигляду

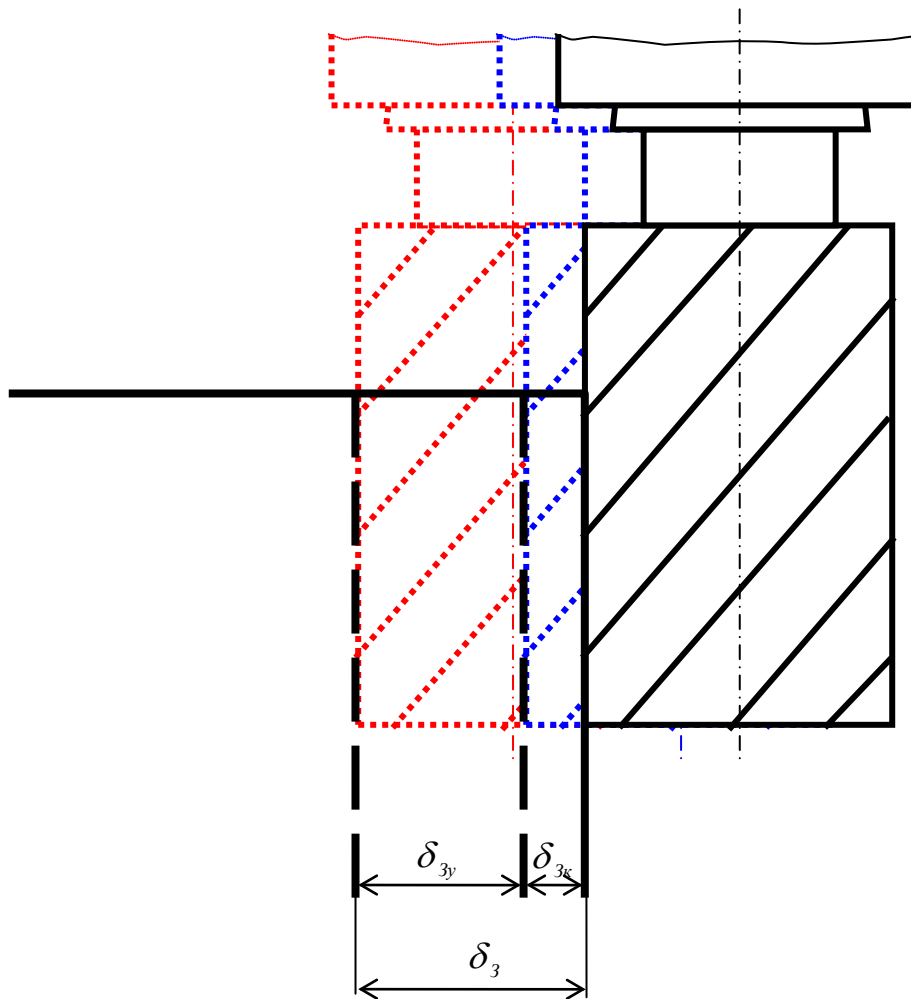


Рис. 4.18. Деформации заготовки

$$\delta_{3y} = \frac{R_v}{j_{3-Пр}}, \quad (4.81)$$

Для визначення контактної деформації стику заготовка-інструмент  $\delta_{3к}$  використовуємо гіпотезу Вінклера [140]. Відповідно до розрахункової моделі стик уявляється як тверда плита розмірами  $b \times dl$  на пружній основі.

Приймаємо наступні допущення (див. рис. 4.19):

1. Розглядаємо деформації поверхні заготовки тільки під дією нормальної складової сили різання  $P_v$ , тому що саме під дією цієї складової утворюється похибка визначення координати поверхні;



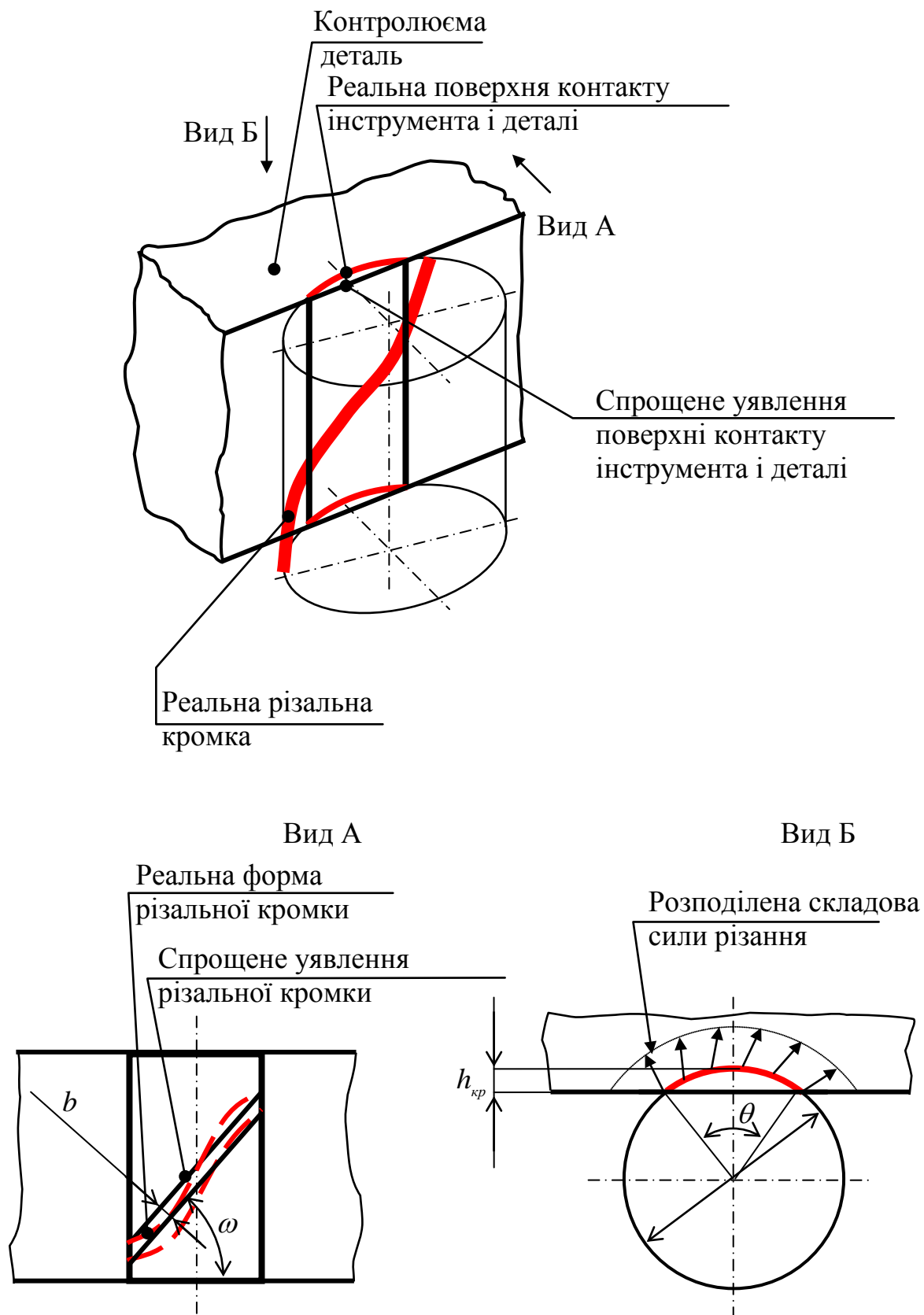


Рис. 4.19. Схема контактного деформування поверхні заготовки

2. Як пружну основу приймаємо стрічку на задній поверхні різального клину;

3. З огляду на співвідношення між розмірами та радіусом кривизни поверхні різання, і з метою спрощення розрахункової схеми, приймаємо стик заготовка-інструмент – плоским, а стрічку – прямою;

4. Складова сили різання рівномірно розподілена по різальній кромці.

Пружні деформації в стику визначаються залежністю Вінклера [140]:

$$\delta_{3к}(l) = \frac{k \cdot R_b(l)}{b}, \quad (4.82)$$

де  $k$  - коефіцієнт контактної податливості стику;

$R_b(l)$  - розподілена складова сили різання у крапці пружної основи з координатою  $l$ .

Розподілена складова сили різання  $R_g(l)$ , яку можна визначити, знаючи кількість різальних кромek  $m$ , що деформують заготовку та їх загальну довжину  $L_{кр}$ , має вигляд

$$\delta_{3к} = \frac{k \cdot R_b}{b \cdot m \cdot L_{кр}}. \quad (4.83)$$

Таким чином, можна записати

$$\delta_3 = R_b \left( \frac{1}{j_{3-Пр}} + \frac{k}{b \cdot m \cdot L_{кр}} \right). \quad (4.84)$$

#### 4.4.2. Пружні деформації верстата і різального інструмента

Розраховуючи  $\delta_{Ст-ПІ}$ , необхідно врахувати, що, як відносно постійну складову, можна включити деформацію верстата без врахування властивостей технологічного оснащення (різальний інструмент, оправка, верстатне пристосування). Тобто

$$\delta_{Ст} = \frac{P}{j}, \quad (4.85)$$

де  $P$  – сила різання;

$j$  – жорсткість верстата, яка визначена експериментально і яка заноситься в паспорт верстата.

Необхідно зауважити, що існуючі методики розрахунку жорсткості

верстатів є досить громіздкими та не універсальними, до того ж, вони не враховують динаміку процесів, що протікають. Тому на практиці доцільно використовувати виробничий метод визначення жорсткості верстату.

Деформація різального інструмента містить у собі два складові: вигини інструмента під дією сили різання та контактних деформацій у стиках інструмент-втулка, втулка-втулка і втулка-шпиндель.

У такий спосіб можна записати

$$\delta_{\text{CT-PI}} = \delta_{\text{CT}} + \delta_{\text{PI}i3} + \delta_{\text{PIK}}^{i\text{-BT}} + \sum_{i=1}^n \delta_{\text{PIKi}}^{\text{BT-BT}} + \delta_{\text{PIK}}^{\text{BT-III}}, \quad (4.86)$$

де  $\delta_{\text{PI}i3}$  - вигин інструмента під дією сили різання;

$\delta_{\text{PIK}}^{i\text{-BT}}$  - контактна деформація в стикі інструмент-втулка;

$\delta_{\text{PIKi}}^{\text{BT-BT}}$  - контактна деформація в  $i$ -му стикі втулка-втулка (при використанні для установки фрези в шпиндель більш однієї перехідної втулки);

$\delta_{\text{PIK}}^{\text{BT-III}}$  - контактна деформація в стикі втулка-шпиндель.

#### 4.4.2.1. Вигин інструмента під дією сили різання

Інструмент можна уявити у виді балки перемінного перетину консольно закріпленою і навантаженою силою різання (рис. 4.20).

Для визначення деформацій інструмента використаємо стандартні формули теорії опору матеріалів [141, 142].

Залежності зміни кутів повороту поперечних перетинів  $\varphi(z)$  і функція прогинів  $\delta(z)$  є наступними

$$\varphi(z) = \int_0^z \frac{M_x(z) \cdot dz}{E \cdot I_x(z)} + C_1; \quad (4.87)$$

$$\delta(z) = \int_0^z \left( \int_0^z \frac{M_x(z) \cdot dz}{E \cdot I_x(z)} \right) \cdot dz + C_1 \cdot z + C_2, \quad (4.88)$$

де  $M_x(z)$  - закон зміни згинаючого моменту по довжині інструмента;

$I_x(z)$  - закон зміни моменту інерції поперечного перетину інструмента по довжині інструмента;

$C_1$  і  $C_2$  - постійні інтегрування, обчислені з граничних умов.

У загальному випадку сила різання являє собою розподілене навантаження, що змінюється згідно визначеної залежності за довжиною різальної кромки PI

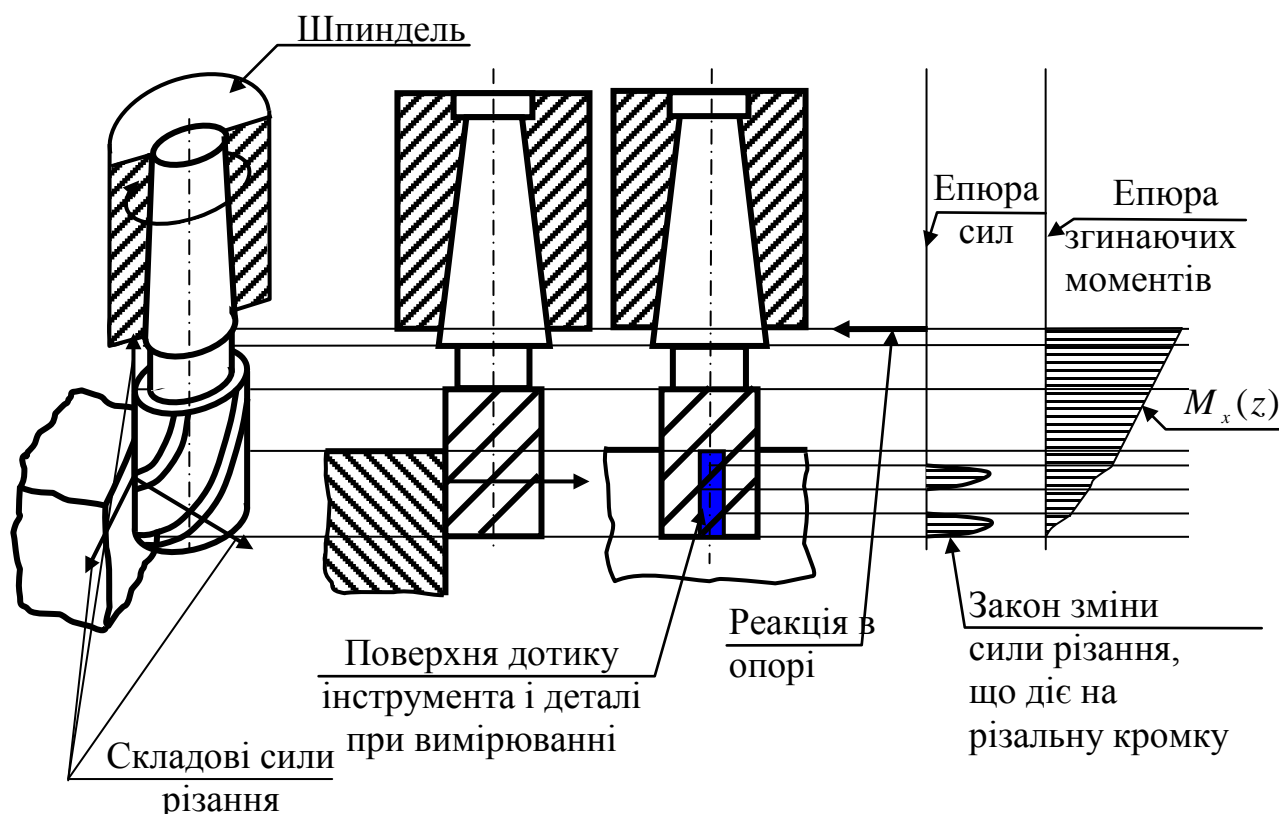


Рис. 4.20. Вигин інструменту під дією сил різання

(див. формули (4.49) і (4.50)).

Для розрахунку деформації різального інструмента за формулами (4.87) і (4.88) необхідно привести розрахункову модель (рис. 4.14) до розрахункової моделі, показаної на рис. 4.20. Крім цього, необхідно врахувати конструкцію інструмента (цільний, напайний чи збірний).

Із рис 4.20 видно, що деформація інструмента у випадку його обертання істотно залежить від кута повороту фрези.

#### 4.4.2.2. Контактні деформації в стиках

Контактні деформації кінцевих з'єднаннях хвостовиків втулок, оправок і інструментів розраховуються відповідно до методики, викладеної в [140]. Ці деформації включають два складові (рис. 4.21): переміщення  $\delta_0$  і кут нахилу  $\theta_0$  на початку стику.

Оправку чи кінцевий інструмент можна розглядати як консольну балку на

пружній основі, якою слугують поверхневі шари оправки та отвору деталі, що сполучається із нею.

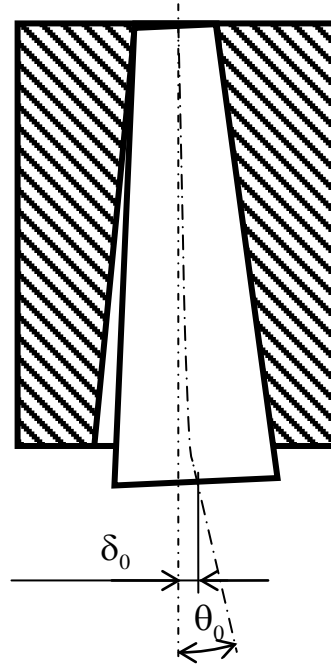


Рис. 4.21. Контактні деформації у стиках технологічної оснастки

Пружне переміщення  $\delta_0$  і кут нахилу  $\theta_0$  на початку стику визначаються за формулами:

$$\delta_0 = \frac{2R_b \cdot \beta \cdot k}{B} \cdot (\beta \cdot L \cdot C_1 + C_2), \quad (4.89)$$

$$\theta_0 = \frac{2R_b \cdot \beta^2 \cdot k}{B} \cdot (2\beta \cdot L \cdot C_3 + C_4), \quad (4.90)$$

де  $L$  – відстань від кромки стику до перетину прикладення навантаження;

$k$  – коефіцієнт контактної податливості стику;

$\beta$  – показник жорсткості стику;

$E$  – модуль пружності;

$B$  – приведена ширина стику;

$C_1, C_2, C_3, C_4$  – поправочні коефіцієнти, що враховують вплив перемінного діаметра, розраховані рішенням диференціального рівняння вигину на ЕОМ.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{B}{4E \cdot J \cdot k}}, \quad (4.91)$$

$$B = 0,5\pi \cdot D, \quad (4.92)$$

де  $J$  – момент інерції хвостовика на початку стику.

Значення коефіцієнта податливості  $k$  залежить від геометрії поверхонь, властивостей матеріалів і натягу в з'єднанні та відповідно до експериментальних даних [140] в середньому  $k = 0,025$  мксм<sup>2</sup>/кГ, при гарному сполученні деталей коефіцієнт  $k = (0,01 \div 0,015)$  мксм<sup>2</sup>/кГ, при поганому –  $k = (0,08 \div 0,10)$  мксм<sup>2</sup>/кГ.

У такий спосіб можна записати:

$$\delta_{\text{РІК}}^{\text{і-вт}} = \delta_0 + \theta_0 \cdot L. \quad (4.93)$$

Аналогічно розраховуються деформації в інших стиках, водночас, змінюються тільки геометричні параметри стику.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Порівнюючи всі способи руху між собою, з огляду на можливості отримання як можна більшої точності при визначенні координати поверхні, є можливість стверджувати наступне:

1. Для всіх систем, які реєструють торкання чутливого елемента до об'єкту вимірювання (інструмент до деталі), загальна глибина руйнації є повністю залежною від швидкості входження у торкання та часу  $T$ .
2. Для всіх систем, які мають стале значення аналізу на торкання  $t_T$ , координата поверхні може бути визначеною за допомогою відомої швидкості  $k_i \cdot V_p$  [26, 27, 34, 41, 44].
3. Для всіх систем, які мають стале значення часу  $t_T$ , є можливість застосувати всі способи рухів без обмежень.
4. Для систем із нестабільним значенням часу  $t_T$ , найбільш ефективним є відтяжний спосіб руху інструмента.

## РОЗДІЛ 5

### АЛГОРИТМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТИ ТОРКАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ДО ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ

При створенні загального алгоритму вимірів при роботі системи контролю торкання різального інструмента до поверхні деталі необхідно врахувати низку специфічних алгоритмів, які з тією чи іншою частотою беруть участь щодо реалізації процесу вимірювання.

У першу чергу, сюди слід віднести алгоритми контролю СКТ, тобто, стартового контролю, шляхового контролю та відмови:

- алгоритми стартового контролю СКТ виконує загальний контроль роботи системи та контроль зв'язку із системою керування верстатом типу CNC;
- алгоритми шляхового контролю виконують технологічні операції щодо реєстрації стану «Присутності» (команди П та  $\bar{П}$ ) та стану «Торкання» (команди Т та ХХ), які є основними при визначенні координати поверхні заготовки (деталі);
- алгоритм роботи системи «Відмова» (команди В) є алгоритмом дій у випадку відмови роботи СКТ під час технологічного процесу обробки деталі.

Другою частиною є інформаційні відомості, які безпосередньо забезпечують виконання функції процесу торкання інструмента і деталі. Для підтримки нормальної роботи СКТ необхідно забезпечити її працю належною стартовою інформацією стосовно приблизного розташування поверхні деталі у просторі геометрії інструмента тощо.

Ця частина забезпечення роботи СКТ може умовно поділятися на три групи:

- інформація, що має суто геометричний характер;
- інформація, що має технологічний характер;
- інформація щодо використання алгоритмів роботи системи.

У загальній кількості, окрім нижче наведених алгоритмів (для простих систем СКТ), існують ще кілька, котрі використовуються у складних приладах і наразі не наводяться, оскільки в цьому немає необхідності.

#### **5.1. Інформаційне забезпечення роботи системи контролю торкання**

Задля ефективного використання СКТ у технологічному обладнанні при механічній обробці деталей необхідно забезпечити його роботу вхідними



інформаційними повідомленнями про наступні технологічні процеси та їх можливі величини із відповідними відхилами. Умовно таку інформацію можна поділити на дві окремі групи, тобто: інформація, котра має в собі перелік геометричних розмірів (координати) та інформація про відносний рух у системі «інструмент-деталь».

Інформацією забезпечення роботи СКТ у складі технологічного обладнання, яка враховує геометричний характер розташування об'єктів технологічного процесу, необхідно вважати наступну:

- координати розташування НБ (нульова база) (точно);
- координати розташування деталі (приблизно);
- кількість інструментів та їх геометричні параметри (приблизно).

Інформація про припуск обробки, тобто те що стосується безпосередньо процесу різання металу:

- можливий припуск заготовки;
- допуск на виготовлення деталі;
- глибина різання;
- швидкість різання;
- оберти інструмента;
- швидкість подачі;
- швидкість крокування.

Окрім цієї інформації, яка має виключно координатний та технологічний характер, для забезпечення належних умов виготовлення деталі, необхідно ввести наступну інформацію для ефективного використання алгоритмічного забезпечення:

- алгоритм „Старт-контроль”;
- алгоритм „Шлях-контроль”;
- алгоритм „Відмова”;
- алгоритм кількості крапок вимірювання та їх координати;
- алгоритм „Присутність”;
- алгоритм „Торкання”;
- коефіцієнт зміни швидкості при крокуванні  $k_i$ .

Особливістю роботи створеної системи контролю торкання є те, що цей прилад має ручне налагодження на швидкодію по каналу „Присутність” та каналу „Торкання”. Але, не зважаючи на це, до приладу є можливість підключати будь-які відчутники не тільки за електромагнітним принципом. У

зв'язку із цим, після виконання операцій налагодження в алгоритми роботи системи необхідно занести інформацію про швидкодію, відповідно, присутності  $t_n$  та торкання  $t_r$ .

## **5.2. Загальний алгоритм роботи системи контролю торкання у складі технологічного комплексу при виконанні обробки металу**

Перш, ніж розглядати окремі алгоритми роботи СКТ, необхідно розглянути їх з огляду на виконання загального технологічного процесу на верстаті (рис. 5.1), де: крок 1 – Ввімкнення СКТ, верстата та системи ЧПК; крок 2 – Відпрацювання алгоритму „Старт-контроль”; крок 3 – Відпрацювання алгоритму „Крок-вимірювання”, отримання координати торкання; крок 4 – Обчислення корекції на отриманий розмір; крок 5 – Введення корекції на отриманий розмір; крок 6 – Введення  $i$ -ої координати контролю; крок 7 – Обробка  $i$ -ої поверхні заготовки; крок 8 – Перехід до іншої оброблюваної поверхні.

Згідно цього алгоритму алгоритм роботи СКТ є часткою загального процесу механічної обробки заготовки на верстаті із системою ЧПК.

Цей алгоритм виконується наступним чином:

- ввімкнення верстата і СКТ;
- відпрацювання алгоритму „Старт-контроль”, за яким відбувається загальна перевірка працездатності СКТ у складі технологічного обладнання та створення команди, що дозволяє рух;
- відпрацювання команди „Крок-вимірювання” з метою отримання координати торкання;
  - за отриманою координатою обчислюється необхідна корекція глибини занурення інструмента у масу деталі;
  - за результатом обчислення корекція подається до рушійної системи верстата;
  - проведення обробки поверхні згідно технологічного процесу;
  - введення вірогідної координати поверхні після технологічного процесу;
  - відпрацювання алгоритму „Крок-вимірювання” для отримання координати поверхні торкання;
  - обчислення корекції на отриманий розмір.

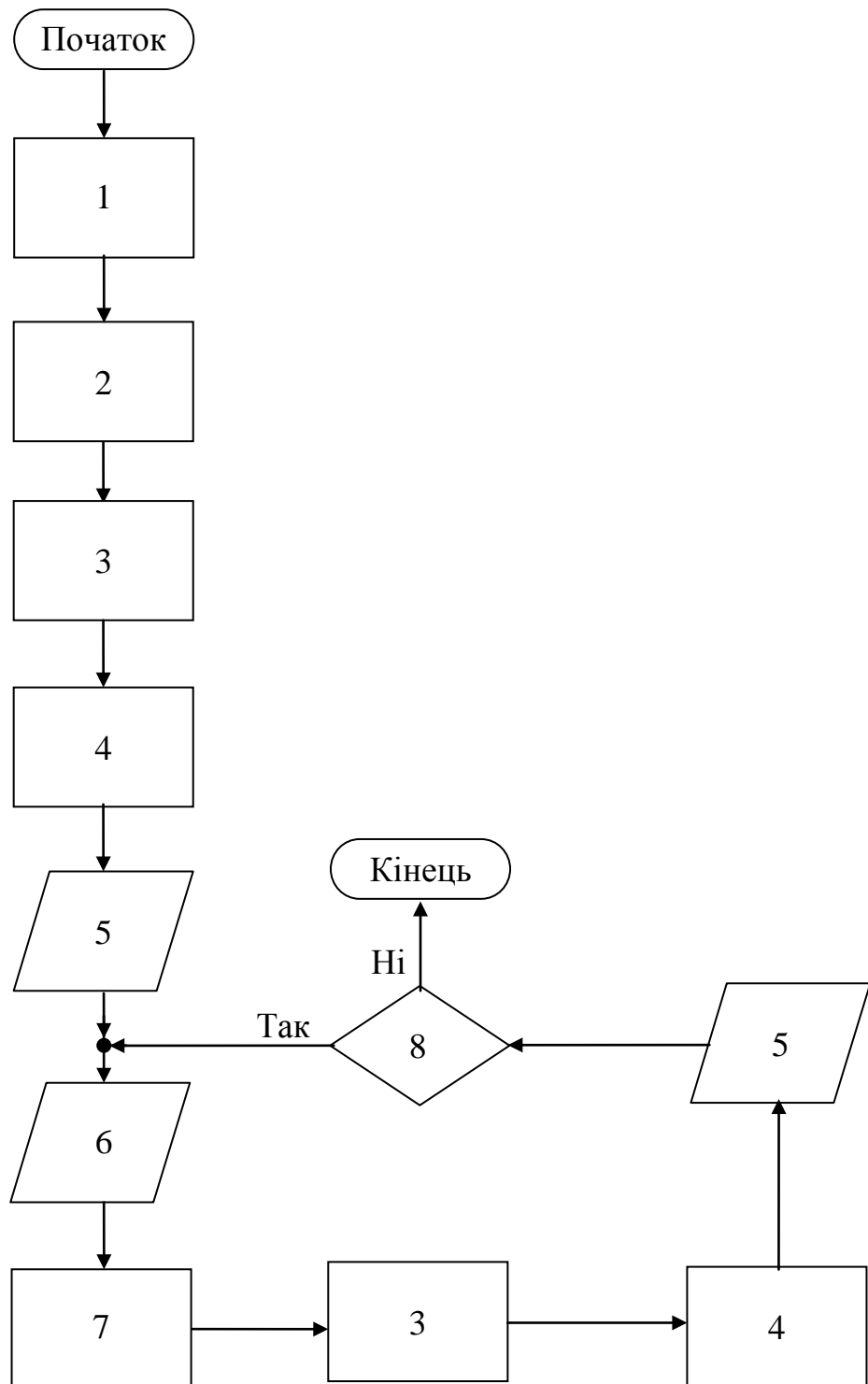


Рис. 5.1 Алгоритм роботи СКТ при виконанні технологічної операції

Використовуючи цей алгоритм, необхідно звернути увагу на те, що він має замкнутий цикл у своїй кінцевій частині. Цей цикл може багаторазово повторюватися залежно від необхідної точності виконання розміру. За часом наближення до бажаної координати поверхні необхідно зменшувати розміри кроку та кількість циклів вимірювання.

### **5.3. Алгоритми забезпечення контролю роботи системи контролю торкання**

До алгоритмів забезпечення контролю роботи СКТ необхідно віднести наступні:

- алгоритм «Старт-контроль»;
- алгоритм «Шлях-контроль»;
- алгоритм «Відмова».

Перед початком роботи СКТ перевіряється на дієздатність за допомогою алгоритму «Старт-контроль» (рис. 5.2).

Для цього шпиндель із встановленим інтегрованим інструментом або вимірювальною голівкою типу «М-17» розташовується у просторі верстата таким чином, щоб гарантовано не спрацював канал присутності та торкання системи контролю та вимірювання. Водночас, на виході СКТ повинні бути наступні сигнали:  $P = 0$ ,  $T = 0$ ,  $XX = 1$ , що відповідає робочому стану системи. Усі інші варіанти комбінацій сигналів сприймаються як неробочий стан СКТ.

Алгоритм роботи «Старт-контроль» працює наступним чином.

Спочатку вмикається СКТ. Після її ввімкнення вводяться параметри контролю, тобто значення сигналів  $P$ ,  $T$ ,  $XX$ .

Наступним кроком виконання алгоритму є порівняння введених параметрів з реальними сигналами на виході СКТ. Якщо порівняння дає позитивний результат то алгоритм створює команду «Готовність», якою сповіщає систему CNC про можливість виконання подальшої роботи.

Одночасно цим створюється команда «Рух дозволено», яка є дозволом на виконання руху інтегрованого інструмента у будь-якому напрямку. У випадку, якщо порівняння введених параметрів із реальними сигналами дає негативний результат, це оцінюється як логічна одиниця і записується в пам'яті системи керування як число  $B=1$  і порівнюється з числом  $A$ , занесеним у пам'ять, та ідентифікованим в алгоритмі. Число  $A$  є числом максимальної кількості відмов роботи СКТ. Поки виконується умова  $A > B$ , виробляються повторні пуски системи. Але з кожним повторним запуском число  $B$  збільшується на одиницю.

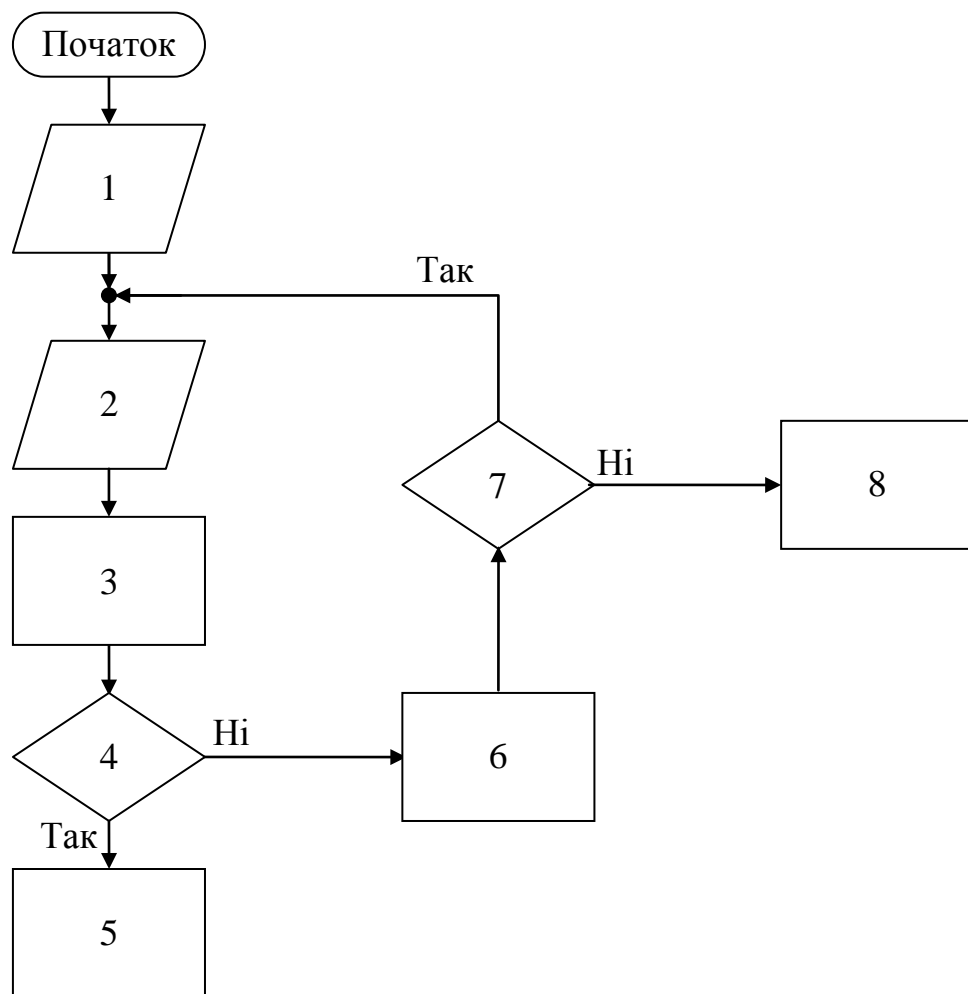


Рис. 5.2. Алгоритм роботи СКТ «Старт-контроль», де:  
 крок 1 – Введення параметрів підрахунку числа спроб  $A=3$ ,  $B=0$ ; крок 2 – Введення параметрів «Старт-контроль»  $P_{C-K}=0$ ,  $T_{C-K}=0$ ,  $XX_{C-K}=1$ ; крок 3 – Опитування системи. Отримання плинних параметрів системи  $P_i$ ,  $T_i$ ,  $XX_i$ ; крок 4 – Порівняння плинних параметрів системи з параметрами старт-контролю  $P_i = P_{C-K}$ ,  $T_i = T_{C-K}$ ,  $XX_i = XX_{C-K}$ ; крок 5 – Створення команди «Готовність». Рух дозволено без обмежень у просторі зі швидкістю  $V_i = k_i \cdot V_p$ ; крок 6 – Підрахунок числа спроб «Старт-контролю»  $B=B+1$ ; крок 7 – Порівняння числа спроб з заданим  $B < A$ ; крок 8 – Алгоритм «Відмова».

У випадку порушення цієї нерівності в дію вступає алгоритм роботи «Відмова».

Будь-яка СКТ завжди має постійний контроль за своєю роботою, так і створена система М-30ST теж має такий контроль. Але, якщо у всіх системах це виконується на рівні гальванічного зв'язку із системою керування типу CNC безпосередньо командою «Аварія», то система М-30ST має спеціальний алгоритм «Шлях-контроль», котрий виконує ці функції (рис. 5.3).

Принцип роботи алгоритму є наступним. Система М-30ST має три лінійні виходи: П, Т, ХХ. Значення сигналів на цих виходах мають можливість приймати рівні, котрі мають відповідну ідентифікацію (Табл. 3.1).

Таблиця 5.1.

Сигнали на виходах			Стан системи контролю торкання	Ідентифікація стану системи контролю торкання
П	Т	ХХ		
0	0	0	відмова роботи	Вимкнене живлення
0	0	1	робочий стан	«Рух дозволено»
0	1	0	відмова роботи	Несправність вихідного оптрону
0	1	1	відмова роботи	Несправність тригера
1	0	0	відмова роботи	Обрив лінії зв'язку між CNC та СКТ
1	0	1	робочий стан	Реєстрація «Присутності»
1	1	0	робочий стан	Реєстрація «Торкання»
1	1	1	відмова роботи	Несправність двох тригерів

Згідно вище означеного переліку алгоритм роботи «Шлях-контроль» постійно контролює вихідні сигнали СКТ і проводить відповідну ідентифікацію наступного необхідного алгоритму. За цією таблицею кодів визначається необхідність застосування алгоритму «Відмова», алгоритму роботи «Присутність» та алгоритму «Торкання».

У випадку відмови роботи СКТ в дію вступає алгоритм «Відмова» (рис. 5.4). За цим алгоритмом зупиняється подача та обертальний рух різального інструмента. Інструмент за спеціальною траєкторією виводиться у позицію старту ( $X_0$   $Y_0$   $Z_0$ ), після чого викликається оператор для з'ясування причин відмови роботи.

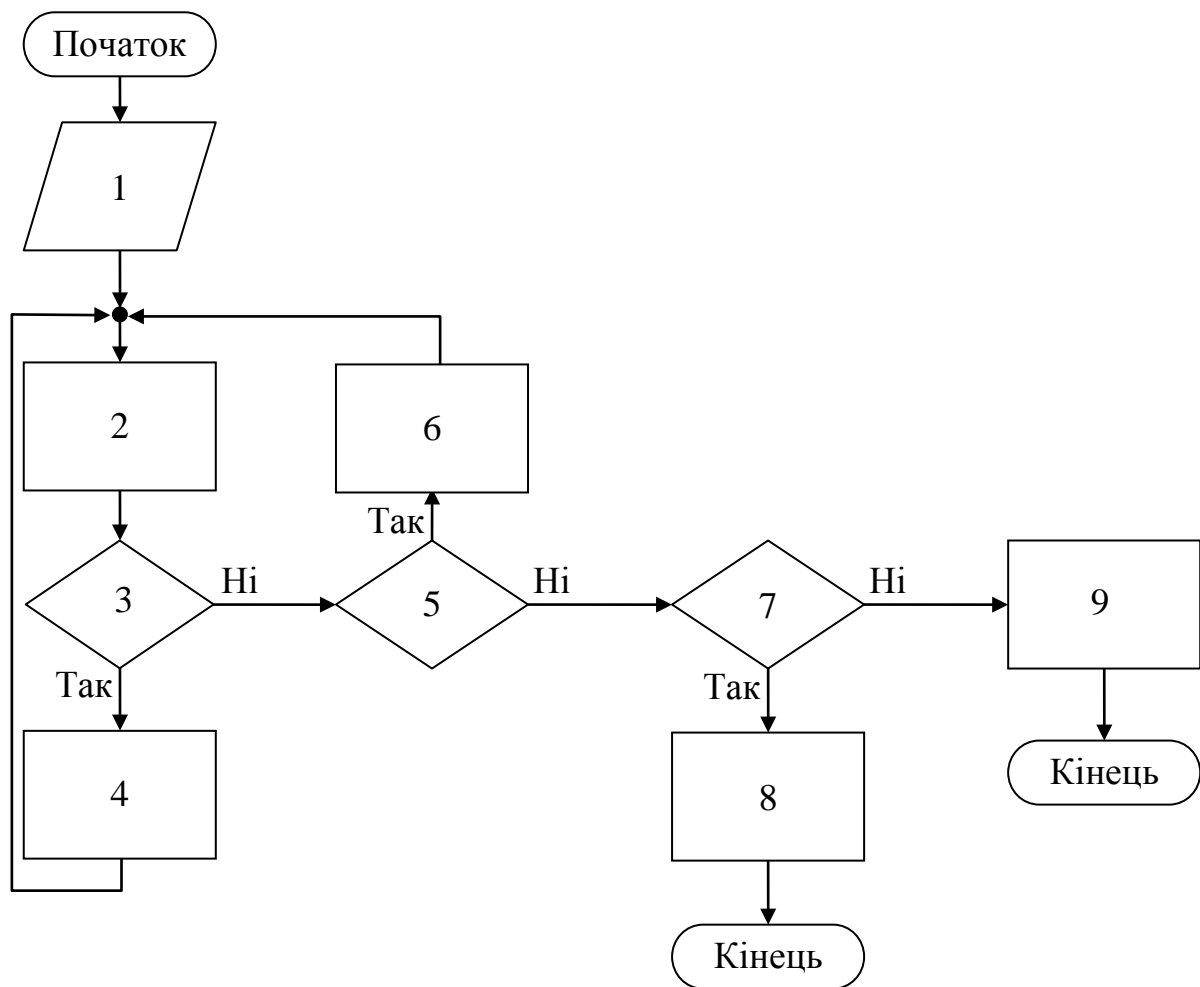


Рис. 5.3. Блок-схема алгоритму роботи системи «Шлях-контроль», де:  
 крок 1 – Введення параметрів шлях-контролю; крок 2 – Опитування системи.  
 Введення плинних параметрів системи  $\Pi_i$ ,  $T_i$ ,  $XX_i$ ; крок 3 – Порівняння  
 плинних параметрів системи з параметрами шлях-контролю:  $\Pi_i=0$ ;  $T_i=0$ ;  $XX_i=1$ ;  
 крок 4 – Рух дозволено без обмежень у робочому просторі верстата зі  
 швидкістю  $V_i = k_i \cdot V_p$ ; крок 5 - Порівняння плинних параметрів системи з  
 параметрами шлях-контролю:  $\Pi_i=1$ ;  $T_i=0$ ;  $XX_i=1$ ; крок 6 – Рух дозволено на  
 обмеженій швидкості  $V_{i+1} = k_{i+1} \cdot V_p$ ; крок 7 - Порівняння плинних параметрів  
 системи з параметрами шлях-контролю:  $\Pi_i=1$ ;  $T_i=1$ ;  $XX_i=0$ ; крок 8 - Зупинка  
 руху; крок 9 - Алгоритм «Відмова»

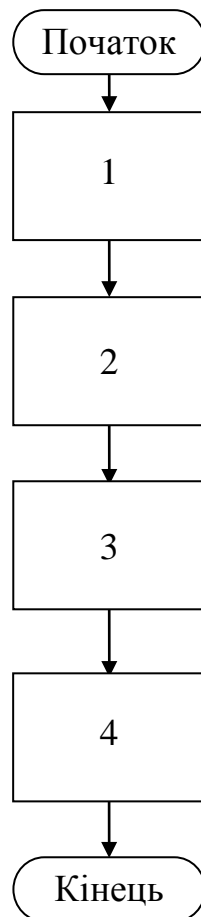


Рис. 5.4. Блок-схема алгоритму роботи системи контролю торкання «Відмова», де: крок 1 – Стоп подача та обертання інструмента; крок 2 – Повернення до позиції старту ( $X_0Y_0Z_0$ ) зі швидкістю  $V_i = k_i \cdot V_p$ ; крок 3 – Формування команди «Заборона руху»; крок 4 – Виклик оператора.

#### 5.4. Алгоритм «Торкання» системи контролю

При реалізації руху інструмента згідно діаграми рис. 4.1, 4.2, окрім алгоритмів контролю, необхідно мати і алгоритми забезпечення руху.

Оскільки рух утворюється шляхом реалізації ланцюга одиничних кроків, то і сам алгоритм є елементарною частиною цього ланцюга. Для виконання цього елементарного алгоритму існує передумова, тобто довжина кроку не повинна перебільшувати поле допуску на виконуваний розмір (4.41).

Згідно цього алгоритму (рис. 5.5) на верстаті можливо виконувати складні багатоступеневі торкання із метою визначення координати поверхні з різною точністю.



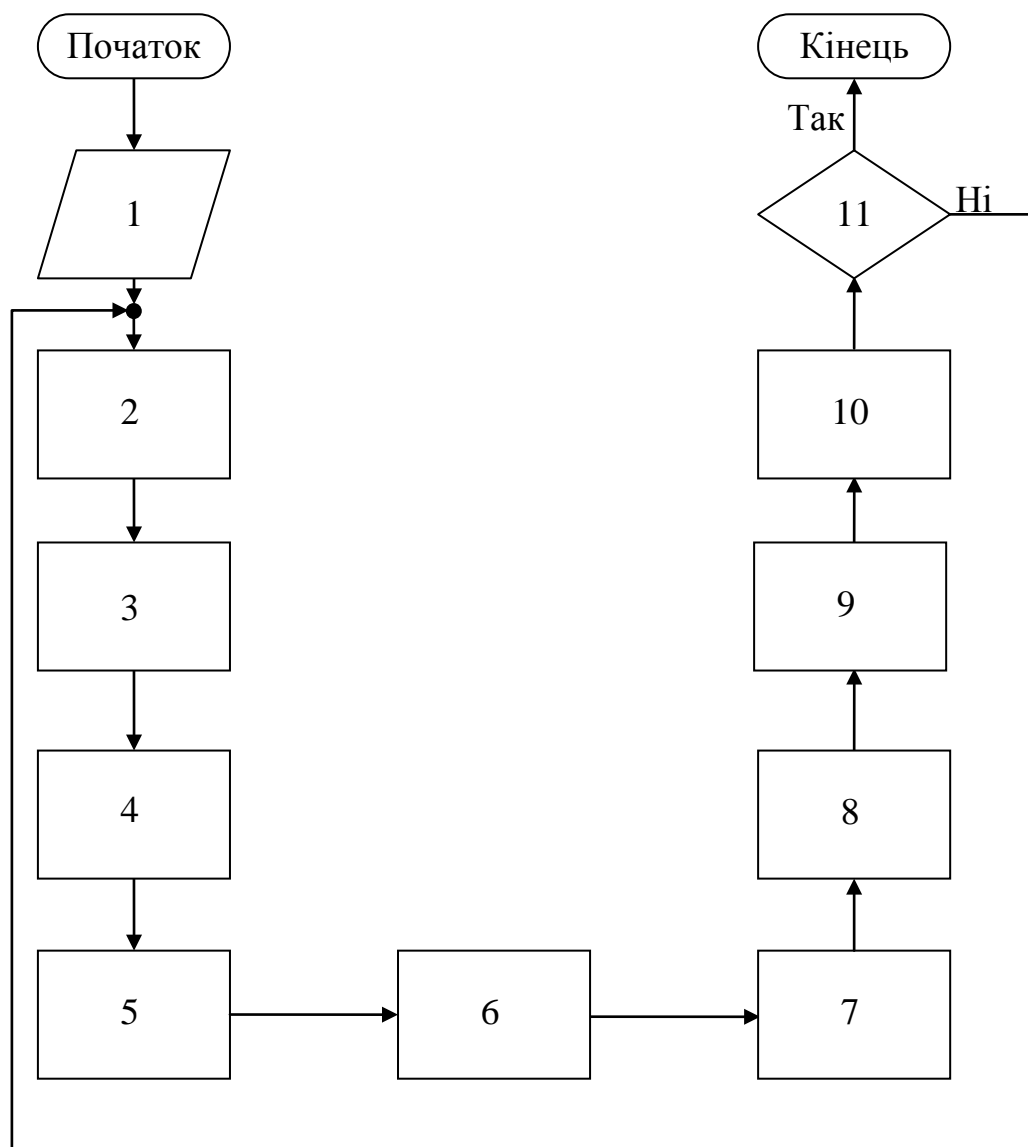


Рис. 5.5 Блок-схема алгоритму роботи системи контролю „Торкання”, де:  
 крок 1 – Введення параметру кількості крапок вимірювання  $C=0$ ; крок 2 – Фіксація координати торкання поверхні; крок 3 – Реверс руху; крок 4 – Крок  $l_{\text{ед}}$ ; крок 5 – Перегін інструмента на відстань  $l_{\text{тад}}$ , що визначається виразом (4.42); крок 6 – Зміна координати напрямку руху на попередню; крок 7 – Зменшення величини кроку  $l_{\text{ед}}/n$ ; крок 8 – Рух вперед по обраній координаті; крок 9 – Алгоритм роботи «Шлях-контроль»; крок 10 – Підрахунок кількості вимірів  $C=C+1$ ; крок 11 – Порівняння кількості вимірів  $C=2$

Загальна діаграма руху, що відображається на рис. 4.1, не обов'язково виконується у три ступеня. Адже на великих кроках (перший ступінь торкання) точність є досить замалою і тому може виконуватися лише за „чорнової” поверхні. Наразі, коли координата відома із точністю, більшою за перший крок, то використання в алгоритмі першого ступеню недоцільно з огляду на отримання істотної точності.

Аналогічна ситуація виникає і за відомості про точність координати розташування вище за другий ступінь. У цьому випадку спрацьовує той самий підхід, що і у попередній ситуації. Все це може бути автоматично враховано при кожному наступному технологічному процесі.

Незважаючи на це, подовження технологічного циклу вимірювання не відбувається, оскільки перші ступені вимірювання після відпрацювання замінюються звичайними штатними алгоритмами перегонів інструмента з крапки у крапку за відомими координатами.

### 5.5. Алгоритм роботи «Крок-вимірювання» системи

Для зручності проведення вимірів координати поверхні деталі (заготовки) алгоритми роботи «Шлях-контроль» та «Торкання» об'єднуються в один алгоритм «Крок-вимірювання» (рис. 5.6).

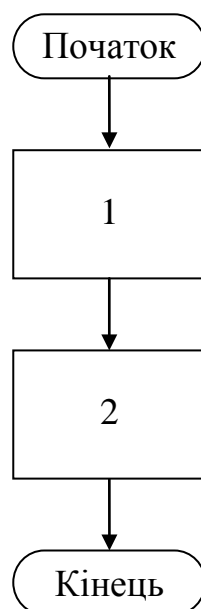


Рис. 5.6. Блок-схема алгоритму роботи системи «Крок-вимірювання», де: крок 1 – Алгоритм „Шлях-контроль”; крок 2 – Алгоритм „Торкання”

Як видно з загального алгоритму використання СКТ у складі технологічного процесу (рис. 5.1), такий алгоритм використовується у циклі двічі. Застосування цього алгоритму не обмежене типовими програмами вимірювання, як це відображено на рис. 5.1, і може бути пристосовано для будь-яких технологічних потреб на фрезерних верстатах та ОЦ.

### **5.6. Алгоритми функціонування АНБ-Т у складі системи ЧПК типу CNC**

Для використання розроблених приладів сумісно з верстатами були розроблені алгоритми та методики їх застосування. Оскільки алгоритми добре описані у низці авторських робіт [92, 110, 113], то обмежимося лише їх загальними характеристиками. Такі алгоритми можна поділити на 4 групи:

- алгоритми забезпечення контролю роботи СКТ;
- алгоритми функціонування обладнання з ЧПК та іншими приладами при проведенні вимірювань;
- алгоритми врахування похибок при виконанні налагодження технологічної операції на верстаті;
- алгоритми врахування похибок при виконанні технологічних переходів;
- методика врахування похибки.

До алгоритмів забезпечення контролю роботи БКТ необхідно віднести наступні:

- алгоритм «Старт-контроль»;
- алгоритм «Шлях-контроль»;
- процедура «Відмова».

При запуску АНБ-Т до роботи використовується алгоритм «Старт-контроль». При виконанні цього алгоритму (програми для CNC) необхідно дотримуватись значень сигналів, які відображені у табл. 2.1.

Водночас, система CNC проводить порівняльне опитування приладу згідно табл. 5.2.

Оскільки система контролю не може повністю забезпечити себе, існує ще і додатковий алгоритм контролю, призначений для оператора. Цей алгоритм контролю надає можливість визначитися з окремими недієздібними блоками.

Наступним кроком виконання алгоритму є порівняння введених параметрів із реальними сигналами на виході СКТ.

Якщо порівняння дає позитивний наслідок, то алгоритм створює команду „Готовність”, якою сповіщає систему CNC про можливість виконання подальшої роботи.

Одночасно із цим створюється команда «Рух дозволено», яка є дозволом на виконання руху РІ у будь-якому напрямку.

Таблиця 5.2

Значення сигналів на виходах БКТ

Сигнали на виходах			Стан системи контролю торкання	Ідентифікація стану системи контролю торкання
П	Т	ХХ		
0	0	0	відмова роботи	Вимкнене живлення
0	0	1	робочий стан	„Рух дозволено”
0	1	0	відмова роботи	Несправність вихідного оптрону або лінії зв'язку
0	1	1	відмова роботи	Несправність тригера або лінії зв'язку
1	0	0	відмова роботи	Обрив лінії зв'язку між CNC та БКТ
1	1	0	робочий стан	Реєстрація „Торкання”
1	1	1	відмова роботи	Несправність двох тригерів дефекти системи приладу

У випадку, якщо порівняння введених параметрів із реальними сигналами дає негативний результат, це оцінюється як логічна одиниця і записується в алгоритмі як число  $B = 1$  і порівнюється з числом  $A$ , занесеним у пам'ять алгоритму. Число  $A$  є число максимальної кількості відмов роботи СКТ. Доки виконується умова  $A > B$ , формуються повторні пуски системи. Але з кожним повторним запуском число  $B$  збільшується на одиницю.

У випадку порушення цієї нерівності в дію вступає процедура «Відмова». У випадку відмови роботи СКТ в дію вступає процедура «Відмова». За цим алгоритмом зупиняється подача та обертальний рух деталі.

Інструмент за спеціальною траєкторією виводиться у позицію старту ( $X_0$   $Y_0$   $Z_0$ ), після чого викликається оператор для з'ясування причин відмови роботи.

Принцип роботи алгоритму наступний. СКТ має три лінійні виходи: Т, ХХ, Г. Значення сигналів на цих виходах мають можливість приймати рівні, котрі мають відповідну ідентифікацію (табл. 5.2).

Згідно вище означеного переліку алгоритм «Шлях-контроль» постійно контролює вихідні сигнали СКТ і проводить відповідну ідентифікацію наступного необхідного алгоритму. За цією таблицею кодів визначається

необхідність застосування процедури, зокрема «Відмова», «Готовність», «Торкання».

Будь-яка СКТ завжди має постійний контроль за своєю роботою. Але, якщо у всіх системах це виконується на рівні гальванічного зв'язку з CNC безпосередньо командою «Аварія», то СКТ має спеціальний алгоритм «шлях-контроль», котрий виконує ці функції [92].

Особливістю проведення вимірів є те, що АНБ необхідно розташовувати у позиції виміру з метою налагодження верстату перед виконанням технологічної операції (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Варіант конструкції чутливої системи АНБ-Т

На рис. 5.8 наведено приклад виконання алгоритму обмірювання циліндричної деталі на токарному верстаті з CNC. При цьому оператор отримує діаметр деталі та її виліт зі шпинделя верстата, що дозволяє проводити відповідні корекції геометрії.

Вище наведені алгоритми з успіхом застосовуються і для токарних верстатів, і для фрезерних верстатів та ОЦ. Застосування цих алгоритмів для систем керування цих типів верстатів має єдину різницю в тому, що необхідно враховувати кількість координат, які притаманні даному обладнанню. Наразі існує можливість застосування таких алгоритмів на складних ОЦ, що мають до шести координат обробки деталей. У цьому випадку необхідно будувати спрощені алгоритмічні ланцюги, які повинні враховувати цей рух.



## **5.6. Методика врахування пружних деформацій системи технологічного обладнання, не охоплених зворотнім зв'язком**

Для підвищення метрологічних якостей процесу реєстрації торкання за умови відсутності в ПЧПК каналів фіксуючих сигнали «Присутність» і «Відстань» необхідно при обчисленні корекції врахувати пружні деформації системи технологічного обладнання, що згадуються в п.р. 4.4. Але, слід зауважити, що процес деформування елементів технологічної системи є багатofакторним і плинним у часі. Це обмежує можливу точність отриманої координати поверхні. Тому слід, наскільки це можливо, стабілізувати процеси, що протікають при торканні інструмента до поверхні деталі, для того, щоб зменшити динамічну складову деформації.

Слід зауважити, що розрахунки деформацій в режимі реального часу потребує велику кількість ресурсів системи ЧПК і не може бути використано на сучасному етапі розвитку систем керування. Тому доцільно запропонувати програмування в систему ЧПК спрощених процедур обчислення деформацій, які включатимуть постійні складові, що обраховані, або обчислені для конкретних верстатів, схем обробки, технологічного оснащення і ін.

Введення цих складових можна організувати через параметри ПЧПК. У цьому випадку необхідно розробити методики визначення (експериментального чи обчисленням) цих складових. Тоді на конкретному виробництві для конкретних верстатів і типових схем обробки, наборів технологічного оснащення тощо, визначають ці складові, також при налагодженні технологічного процесу задають потрібні значення параметрів системі ЧПК. Ця проблема потребує додаткових досліджень.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Обґрунтовані засади інформаційного забезпечення дії системи контролю торкання надають можливості ефективної роботи металообробного автоматизованого обладнання.
2. Створено низку алгоритмів виконання обміру деталі інтегрованим контрольно-вимірювальним інструментом, що мають універсальний характер виконання і легко вбудовуються в загальні алгоритми технологічних процесів.
3. Розроблені алгоритми є гнучкими щодо зміни швидкості руху, кількості торкань та точності визначення координати, що дозволяє підвищувати точність виготовлення прецизійних деталей в умовах автоматизованого виробництва.
4. Створена методика врахування пружних деформацій елементів технологічної системи обладнання дозволяє підвищувати точність виготовлення деталей у процесі механічної обробки.



## РОЗДІЛ 6

### ПОБУДОВА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТОРКАННЯ ДЛЯ ЗНОШЕНОГО МЕТАЛООБРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ

Ресурсозбереження застарілого обладнання із забезпеченням вимог до рівня сучасних операцій щодо точності виготовлення деталей не є можливим без новітніх систем контролю основних параметрів технологічного процесу. Проте створення такого контрольно-вимірювального обладнання вимагає врахування низки виробничих задач, які наразі є актуальними у приладобудівному виробництві.

Якщо розглядати весь комплекс проблем, які пов'язані із поставленою задачею, то необхідно, у першу чергу, виділити ситуацію, яка виникає стосовно моменту торкання як такого. За суто фізичними принципами можна виокремити основні параметри СКТ, які визначають якість її роботи, а саме:

- проблеми, що виникають у межах зони присутності, тобто ступінь точності визначення дистанції до ТО;
- проблеми, що виникають у момент торкання РІ та деталі;
- проблеми, що виникають під час входження РІ у суцільну масу деталі (панданну зону), тобто його проходження через усі зони технологічного об'єкту;
- побудова загального принципу контролю визначення моменту торкання;
- деградація металообробного обладнання у процесі експлуатації та методика її визначення.

Отже, актуальною є задача, що полягає у вирішенні проблеми просторової точності орієнтування різального інструмента відносно точності його орієнтування до поверхні деталі у робочому просторі верстата. Основна причина, як згадувалося вище, - це відсутність зв'язку між уявною та реальною системами координат. Таким чином, саме цьому питанню присвячені основні тези роботи з відповідною математичною обробкою результатів.

#### **6.1. Методика дослідження зони присутності технологічного об'єкту**

Як вже було обумовлено у [15, 29, 56, 92, 111, 112, 113, 143, 144, 145, 146, 147, 148], зона присутності АС, а у нашому випадку ТО, може мати лише три основні різновиди, які є можливість використати при реєстрації ТО. Саме ЗП надає можливість вчасно реагувати на наближення РІ до деталі. В основі реєстрації її потужності полягає принцип контролю польової структури під час

наближення РІ до поверхні деталі. Будь-яка зона присутності у своїй основі є польова структура, геометрія якої є залежною від геометрії деталі, а точніше від координати розташування зовнішніх поверхонь. Залежно від відстані до поверхні потужність змінюється нелінійно [33, 92, 148].

Серед усіх варіантів побудови зони присутності, як було обумовлено попередньо, необхідно визначити лише три, які створюють польову структуру поза межами РІ та деталі. В основі цього лежить теза про електромагнітні, акустичні та оптичні поля [26, 82, 92, 149, 150, 151, 152]. Звичайно, окрім цього, існують й інші польові структури як, наприклад, силові, що широко використовуються у сучасних методиках контролю металообробки [23, 36, 42, 65, 121, 123, 125, 153, 154, 155, 156, 157].

Проте, кожна з цих методик контролю має як свої позитивні, так і негативні сторони, що призводить до необхідності побудови комплексних приладів СКТ.

Безпосередньо у польовій структурі основним чинником є взаємодія між польовою структурою деталі та інструментом. Як наслідок, у дослідженні цієї ситуації маємо проблему з взаємодії панданних зон присутності інструмента і деталі.

Отже, необхідно було дослідити зону присутності у перерізі деталі і вздовж неї. Для цього використовувалися методики просторового руху із фіксацією однієї або двох координат, тобто для токарних верстатів:

$$\begin{aligned}x &= const, y = const, z = var; \\z &= const, x = const, y = var; \\y &= const, z = const, x = var.\end{aligned}\tag{6.1}$$

Для фрезерних верстатів та ОЦ:

$$\begin{aligned}z &= const, y = var; \\y &= const, z = var; \\x &= const, y = var.\end{aligned}\tag{6.2}$$

Розходження у номінаціях подовжніх та поперечних координат пояснюються конкретним математичним забезпеченням програм для кожної з модифікацій програм для CNC. Так, наприклад, верстати та CNC, що виготовлені 30-40 років тому назад, мали подовжню координату X, вертикальну Z та поперечну Y. Оскільки це викликало ускладнення при зв'язку зі звичайно прийнятими математичними уявленнями [94, 95, 158], то частина математичного забезпечення CNC була наближена до саме цих параметрів розташування координат. Звісно, що не всі промислові об'єднання та заводи

одночасно перейшли у нову систему координат. Тому, до маркування координат необхідно ставитися як до тимчасового явища.

Як було показано у авторських роботах [59, 92, 114, 148], найбільш ефективною з погляду використання є зона присутності на основі електромагнітного поля. Тому, при вимірюванні геометрії зони присутності використовувався індукційний електромагнітний відчутник [26, 35, 42, 78, 86, 111, 112, 115, 126, 144, 159, 160, 161]. Саме цей тип відчутника є найбільш чутливим до змін потужності електромагнітного поля і забезпечує усі виміри як у ЗП, так і у момент торкання РІ з деталлю. Отже, рух РІ разом з відчутником у робочому просторі верстата забезпечував відповідну кількість точок вимірювання та можливість графічної побудови польових структур.

Для того, щоб мати більш-менш достеменне уявлення про побудову польової структури ЕМП деталі у межах обсягів дослідження, планувалася квадратна або прямокутна координатна сітка, зв'язана з системою координат верстата. Геометрія сітки обиралася за принципами отримання максимально достеменної інформації про побудову польової структури деталі.

Так, наприклад, для польової структури деталі при токарній обробці обиралися сітки  $\square 50$ . У випадку, коли не помічалися якісь значні відхилення, густина сітки збільшувалася до  $\square 25$  та  $\square 10$ . На останньому етапі вимірювань сітка мала розміри прямокутника  $1 \times 10$  і  $0,1 \times 10$  мм (рис. 6.1). Основна причина подібних технологічних операцій дослідження дефектів у приповерхневому шарі деталі, яка мала б стати основою дефектоскопії технологічного об'єкту (рис. 6.2).

При фрезерній обробці та обробці на ОЦ, в основному, досліджувалася польова структура стола верстата і деталі, розташованій на ній. Водночас, координатна сітка обиралася із розмірами  $\square 100$  та  $\square 50$  мм (рис. 6.3). Основною метою цих досліджень було вивчення геометрії польових структур, які створюють навколо себе класичні геометричні фігури (куб, паралелепіпед). При цьому рух інструмента був обмежений зоною у 50 мм по периметру робочого столу, як непрацездатний. При дослідях використовувався стандартний псевдопілігримний або лінійний рух вимірювання, встановлений ДСТУ (рис. 6.4) [10, 11, 17, 23, 36, 87, 124, 153, 162, 163]. Окрім того, використовувалися нестандартні рухи вимірювання згідно авторської розробки, які мають опис у [27, 45, 46, 47, 89, 92, 96, 159, 164, 165, 166, 167].

Основною причиною застосування подібних дослідів було дослідження можливих систем побудови пошуку деталі на столі верстата.



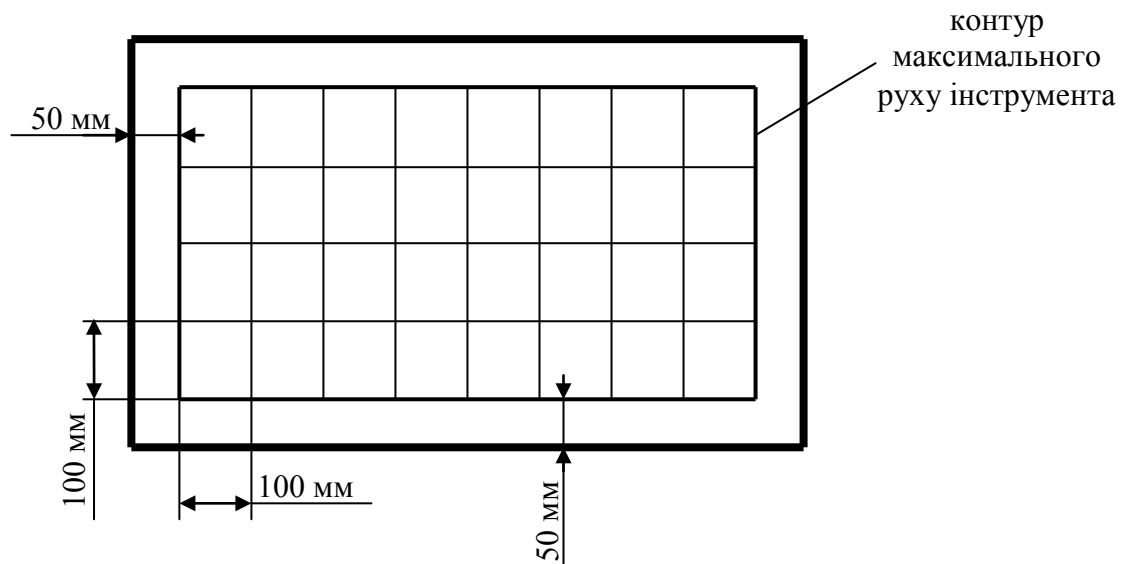


Рис. 2.3. Координатна сітка при вимірюваннях електромагнітної ЗП на фрезерних верстатах та ОЦ

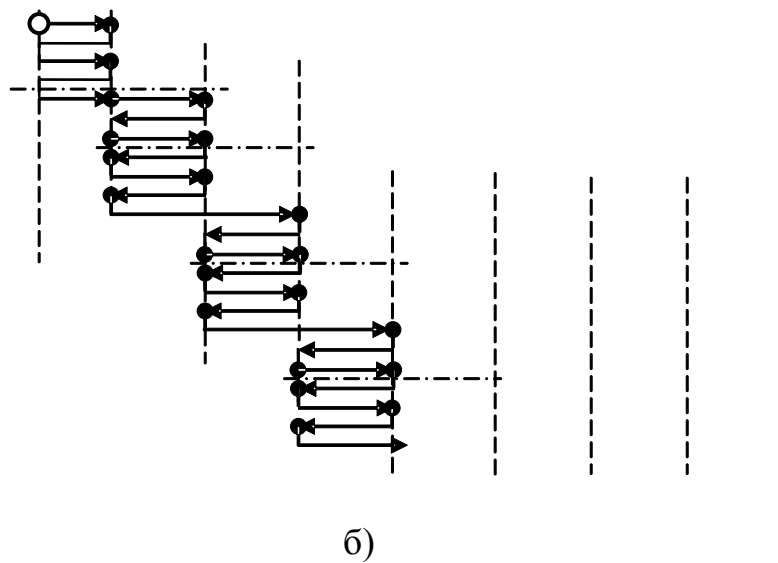
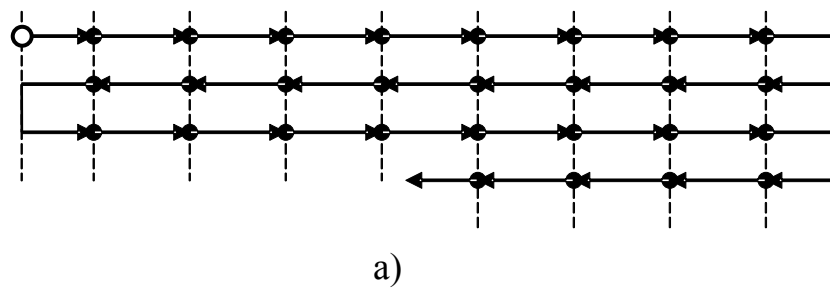


Рис. 6.4. Траєкторії руху інструмента з відчутником при визначенні ЗП деталі, де: а) лінійний крок; б) псевдопілігримний крок [51-53]

Оскільки ЗП є досить непевною і є залежною від конструкційних особливостей верстата, то дослідні роботи проводилися на різних типах верстатів як за габаритами так і прямим призначенням.

Дослідження поперечного перерізу ЗП проводилося на прецизійному верстаті типу ТПК-125. Особливістю цього верстата є те, що його шпиндель спирається на спіжневий підшипник ковзання. Одночасно з цим проводилися досліді по глибині врізання інструмента в деталь за різних швидкостей подачі в автоматичному режимі (ЧПК Н-22). Для керування цим процесом була розроблена спеціалізована програма та відповідна буферна плата. За результатами дослідних робіт будувалися графіки еквівалентного просторового струму, який є важливим параметром для розрахунку роботи СКТ.

На верстаті типу TNL-45 проводилося дослідження якості програмного забезпечення, яке має опис у [26, 78, 92, 161, 159, 164, 165, 166, 167]. Дослідження проводилося разом із модифікацією АНБ та системою CNC «FANUC-16M».

Основна задача досліджень полягала у визначенні якості роботи плати контролю металообробки (рис. 6.5) та спотворень, які утворює АНБ у загальній польовій структурі.

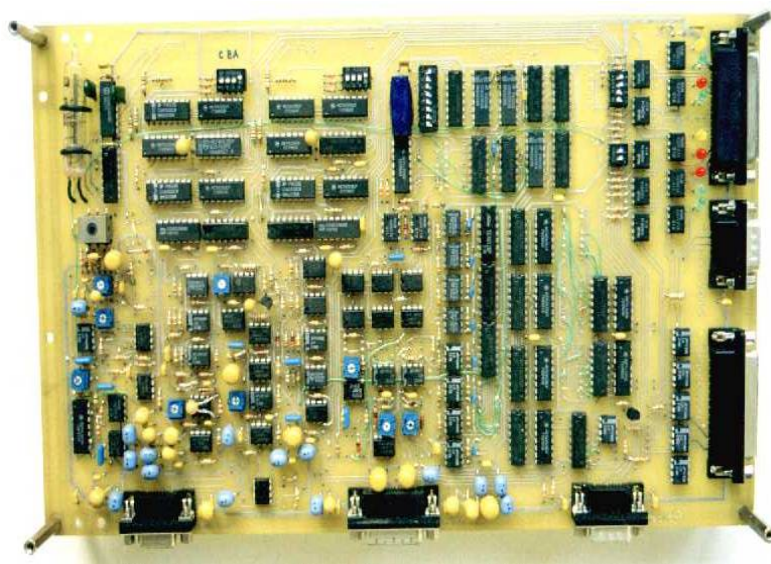


Рис. 6.5. Електронна плата контролю торкання інструмента і деталі

Окрім того, досліджувався зв'язок між потужністю ЕМП та відповідною реакцією системи CNC на нього. При цьому визначалися такі параметри як ЗП АНБ у неробочому і у робочому станах.

Згідно всіх вимірів оброблявся результат статичних і динамічних вимірів.

Оскільки, згідно законів електродинаміки, структура поля є залежною від геометрії об'єкта, а не від його потужності [70, 72, 168, 169, 170], то було розроблено спеціальний стенд-імітатор токарного верстата. Основна задача досліджень полягала у вивченні форми польової структури (конфігурації) ЕМП навколо деталі залежно від типової форми та матеріалу. При дослідженнях використовувалися топи Д16Т та Сталь 45, оскільки ці матеріали мають значне розходження у своїх магнітних властивостях. Площину стенду (Y, Z) було розподілено на квадрати 50×50 мм. У вузлах квадратів проводилося вимірювання ЕРС відчутника, потім складалася карта значень, яка оброблялася в середовищі MS Excel. Основна причина подібного підходу полягала у тому, що для СКТ більш важливим є конфігурація поля та відповідні рівні сигналу, а не реальна величина напруженості магнітного поля. Для того, щоб проводити подібні експерименти, практично всі СКТ у своєму складі мають узгоджуючий підсилювач.

Подібна методика використовувалася при вимірюваннях конфігурації магнітного поля на фрезерних верстатах та ОЦ. Так, наприклад, досліджувалася проста деталь у формі паралелепіпеда 300×100×50 мм, матеріал SN45. Деталь розташовували на столі верстата (ОЦ TNV-40M) вздовж координати x. Дослідження проводилися за допомогою плати СКТ (рис. 6.5) та системи CNC «SENTROL». Водночас, система СКТ налагоджувалася на величину еквівалентного струму.

Така ж сама методика використовувалася при досліді з обробкою матеріалу зі сталі. Форма деталі – куб. При цьому використовувався вертикально-фрезерний верстат типу 2С150ПМФ4МО із системою ЧПК типу 2С42-65-01.

## **6.2. Методика досліджень поля похибок позиціювання технологічних об'єктів**

В основі методики дослідження лежить визначення похибок верстатів на засадах ДСТУ [10, 11, 87, 171, 172], але з деякими відмінностями. Так, наприклад, якщо згідно ДСТУ досліджується весь робочий простір верстата, і потім визначається його точність, то це означало лише те, що у різних частинах робочого простору деталь може виконуватися з різною точністю. Але у приладобудуванні відсутні деталі, які б займали весь робочий простір верстата. Здебільшого всі деталі вписуються у розмір, не більший за кубічний дециметр.

Отже, близько 80-90% робочого простору просто не задіяні. Тобто, існують зони різної точності. Для того, щоб дослідити це явище, було розроблено спеціальний прилад, який працював разом із АВГ – М17 та СКТ М30-ST.

Розглянемо методику, завдяки якій обґрунтовується поняття зонної точності та градієнтометрії похибки. Тобто, якщо звернутися до прикладу вимірювання похибки на засадах [10, 11, 87], то необхідно зауважити, що будь-яка координата за таких вимірювань приймає два значення залежно від напрямку відносного руху інструмента.

Для цього модифікуємо типову схему [10, 11, 87] (рис. 6.5) у дещо іншому ракурсі, так, щоб стало більш зрозуміло вплив напрямку руху на точність позиціонування. При заданому русі із точки  $X_1$  у точку  $X_2$  верстат, користуючись своєю відліковою системою, відпрацьовує якусь уявну відстань  $L(U)$ .

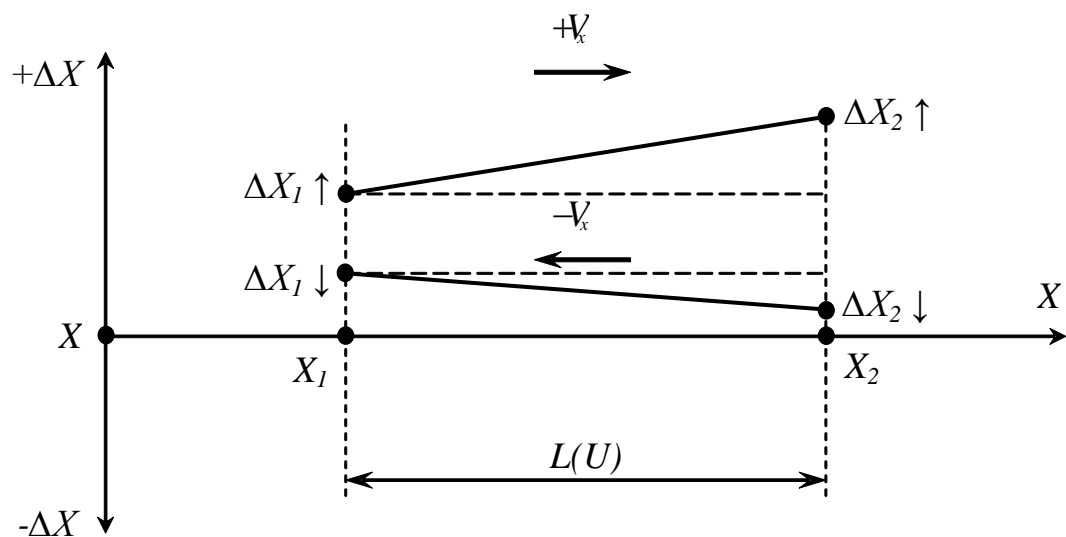


Рис. 6.5. Координатна похибка відпрацювання відстані  $L(U)$

Окрім того, ця відстань  $L(U)$  буде неоднозначно розташована у робочому просторі верстату, тобто для координати  $X_1$  це буде  $X_1 + \Delta X_1 \uparrow \leq X_1 \leq X_1 + \Delta X_1 \downarrow$ , а для координати  $X_2$  - це  $X_2 + \Delta X_2 \uparrow \leq X_2 \leq X_2 + \Delta X_2 \downarrow$ . Напрямок стрілки згідно нормативних документів [10, 11, 87] відповідає напрямку руху вимірювальної системи відносно площини робочої поверхні обробного верстата.

Така ситуація буде виправдовувати себе у тому випадку, коли інструмент рухається у робочому просторі верстата.



Якщо розглянути цей випадок як проекції на вісь  $X$  (рис. 6.6), то можна побачити низку розбіжностей у визначенні координати відстані  $L(U)$ .

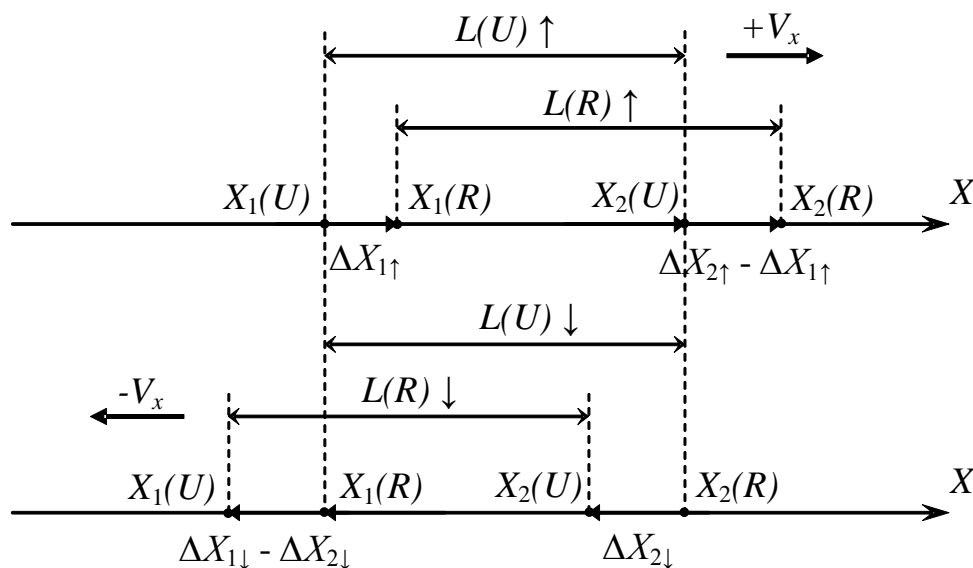
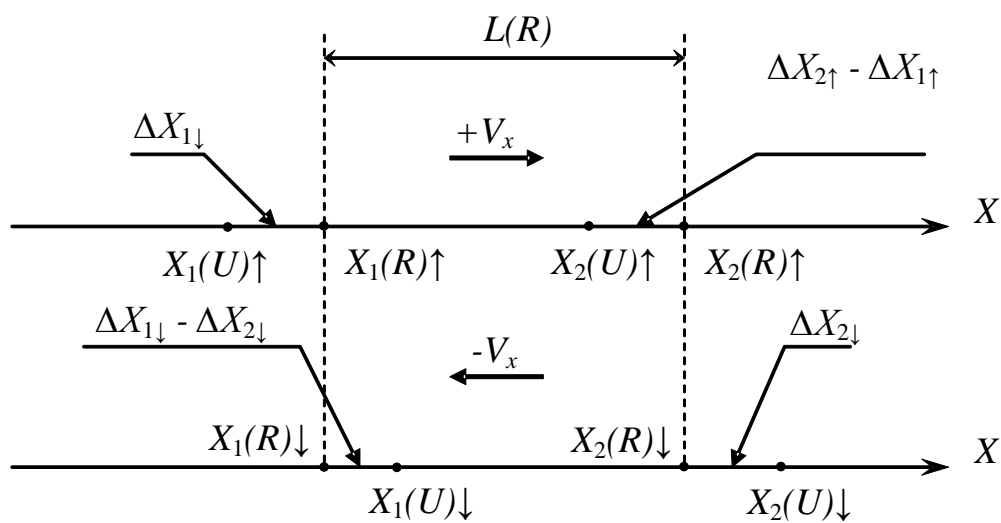


Рис. 6.6. Розбіжності у розташуванні в просторі відстаней  $L(U) \uparrow$ ,  $L(U) \downarrow$ ,  $L(R) \uparrow$  та  $L(R) \downarrow$

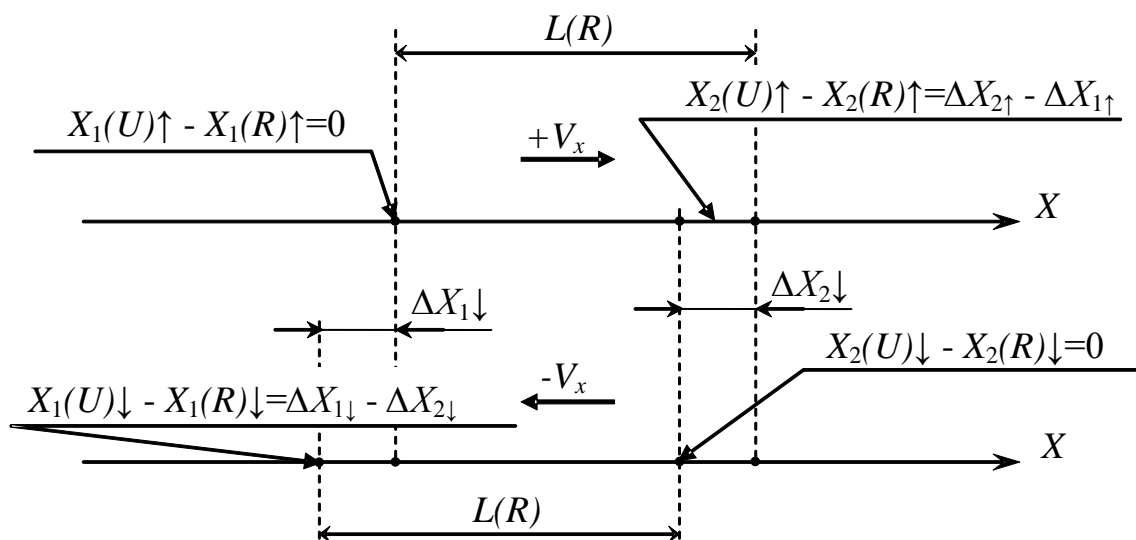
Звідси (з рис. 6.6) добре видно, що при такій роботі координатних систем верстату із системою CNC матиме постійні розбіжності в оцінці координат позиціонування та перебігу. Відстані  $L(R)$  та  $L(U)$  є не тільки різними, але і прив'язаними до різних координат, що не задовольняє вимогам точності.

Якщо розглянути цей випадок з огляду на те, що реальний розмір  $L(R)$  реалізовано у вигляді зразкової міри довжини, то така міра, встановлена на столі верстату, ОЦ чи у шпинделі токарного верстату, надасть можливість пов'язати уявні координати із реальними  $X_1(R)$  та  $X_2(R)$  тільки внаслідок утримання постійного напрямку руху (рис. 6.7,а).

За умови позитивного напрямку руху вимірювальної системи відлік координати  $X_1(U) \uparrow + \Delta X_{1\uparrow} \leq X_1 \leq X_1(U) \uparrow + \Delta X_{1\downarrow}$ , а з  $X_1 + \Delta X_{1\uparrow}$ , оскільки СКТ пов'язує в одне ціле  $X(U)$  та  $X(R)$ . При достеменному знанні  $L(R)$  кінцева координата руху буде  $X_2(U) \uparrow + \Delta X_{2\uparrow} - \Delta X_{1\uparrow}$ , а похибка прив'язки  $X_2(U)$  становитиме



а)



б)

Рис. 6.7. Прив'язка зразкової міри  $L(R)$  до системи координат за допомогою СКТ, де: а) прив'язка уявного розміру у відліковій системі верстату до реального розміру зразкової міри довжини; б) побудови до пояснення появи похибки прив'язки при використанні СКТ

$\Delta X_2 \uparrow - \Delta X_1 \uparrow$ , що значно менше як  $\Delta X_2 \uparrow$ , так і  $\Delta X_1 \uparrow$  (рис. 6.7,б).

При негативному русі інструмента все відбувається у зворотному напрямку, тільки прив'язка йде за координатою  $X_2(U)$ , до того ж система відліку дає зсув розміру  $L(R)$  у негативному напрямку на величину  $\Delta X_2 \downarrow$ , що призводить до уявного подвоєння координати площини обабіч зразка.

Отже, за умови такого способу вимірювання все залежить від напрямку руху інструмента, тобто при зміні напрямку руху на протилежний, первинна прив'язка до координати  $X_2$  зсув координат  $L(R)$  становитиме  $\Delta X_1 \uparrow$ .

Для виконання обраної методики необхідно виконувати наступні два правила:

- базова точка старту (прив'язки) повинна обиратися таким чином, щоб задовольняти всі можливі напрямки руху інструмента;
- напрямок руху інструмента необхідно обирати таким чином, щоб задовольнити умові необхідної точності, тобто при перегонах не затримуватися та максимально дотримуватися прямолінійності.

Якщо розглянути математичне підґрунтя, то у загальному вигляді в декартових координатах це можна уявити наступним чином.

Якщо вектор зразкової довжини  $L_3$  знаходиться у межах площини  $XU$  та орієнтований, наприклад вздовж осі  $X$ , то він утворить два кути –  $\alpha$  та  $\beta$  відносно осі  $X$  (рис. 6.8). На рис. 6.8 кути  $\alpha$  та  $\beta$  не показано через велику завантаженість схеми.

Розташування зразкової міри  $L_3$  (рис. 6.8,а) вздовж осі  $X$ , хоч і має відхилення, тобто кути  $\alpha$  та  $\beta$ , але їх величини є відносно малими, має значення не більше за один кутовий градус. За таких умов ці кути можна вважати занадто малими, щоб вони мали вплив на кінцевий результат. Теж саме стосується і кута  $\gamma$  між векторами  $L_3$  та  $L_b$  (рис. 6.8,б).

Ця залежність стає дедалі більш малоїстотною із подовженням зразкової міри  $L_3$ .

При довжині  $L_3$  у 100 мм вплив на  $L_b$  становитиме доли мікрометра. Відповідно проекції вектору  $\mathbf{n}$  на осі  $Y$  та  $Z$  будуть практично дорівнювати нулю.

Розташовуючи зразкову міру довжини за відповідними осями, можна отримати аналогічний результат.

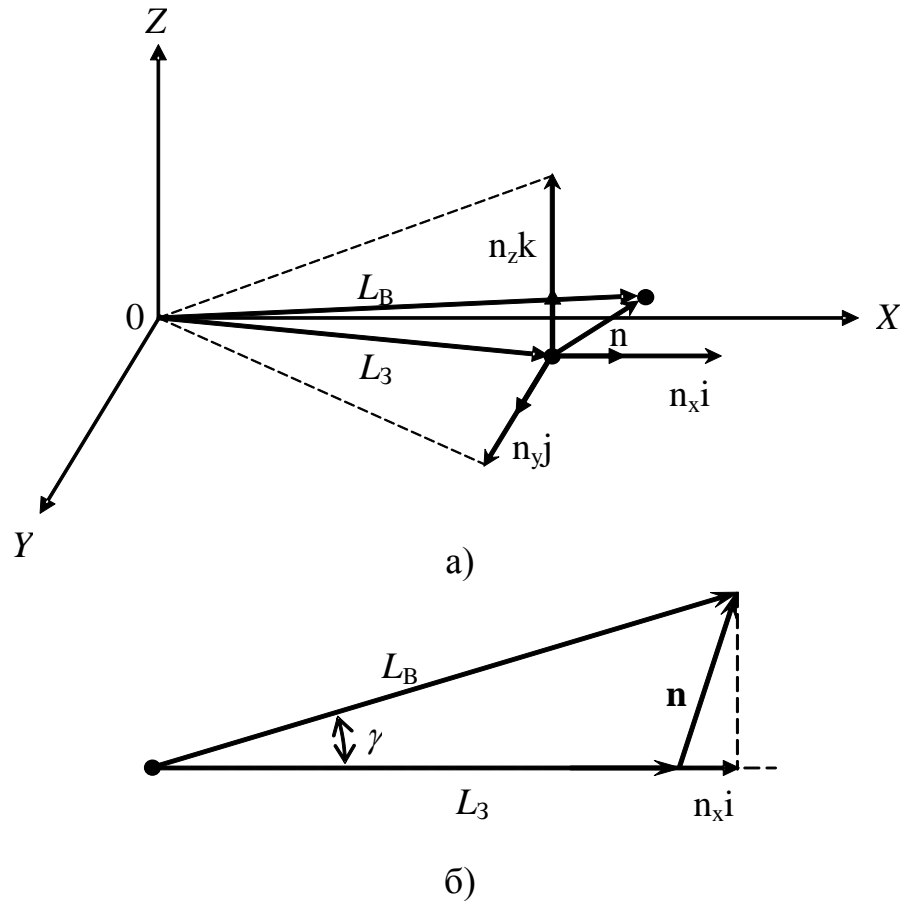


Рис. 6.8. Загальний випадок розташування зразкової міри довжини вздовж осі  $X$  (приклад), де: а) відхилення зразкової міри  $L_3$  від осі  $X$ ; б) відхилення зразкової міри  $L_3$  від вектору виміру  $L_B$

Звідси, як наслідок, матимемо наступні висновки, наведені нижче у формальному вигляді:

Вісь $X$	Вісь $Y$	Вісь $Z$	
$n_y \mathbf{j} \approx 0; n_z \mathbf{k} \approx 0$	$n_x \mathbf{i} \approx 0; n_z \mathbf{k} \approx 0$	$n_x \mathbf{i} \approx 0; n_y \mathbf{j} \approx 0$	(6.3)
$n_x \mathbf{i} = \mathbf{L}_{B_x} - \mathbf{L}_3$	$n_y \mathbf{j} = \mathbf{L}_{B_y} - \mathbf{L}_3$	$n_z \mathbf{k} = \mathbf{L}_{B_z} - \mathbf{L}_3$	

Якщо прийняти тезу, що на визначеній відстані  $L_3$  зберігається його лінійне співвідношення до величини нормального вектора  $\mathbf{n}$ , то відповідно відстань  $\mathbf{L}$ , пройдена верстатом у своїх координатах у цих межах, може бути визначена, як:

$$\frac{n_x}{L_3} \mathbf{i} = \mathbf{i} \text{grad} \mathbf{L}_x \quad ; \quad \frac{n_y}{L_3} \mathbf{j} = \mathbf{j} \text{grad} \mathbf{L}_y \quad ; \quad \frac{n_z}{L_3} \mathbf{k} = \mathbf{k} \text{grad} \mathbf{L}_z \quad (6.4)$$

$$L(X) = L(1 + \text{grad} L_x) \quad L(Y) = L(1 + \text{grad} L_y) \quad L(Z) = L(1 + \text{grad} L_z)$$

Тобто, у пам'яті системи керування верстатом типу CNC є можливість тримати не все поле похибок координат, а лише обмежений об'єм із визначеними градієнтами, які прив'язані до уявної системи координат верстату, але точність позиціонування інструмента при цьому значно зростає.

Користуючись усім вищесказаним, є можливість стверджувати, що у двокоординатній системі виміру та руху інструмента є можливість застосовувати наступну методику визначення точності позиціонування. Використовуючи тезу про напрямок руху та відповідно пов'язаний із ним градієнт точності, є можливість створити векторну діаграму за кутами в обхід замкненого контуру.

При отриманні вектора похибки у кутах за контурного способу руху (рис. 6.9,б) ми маємо відповідно дві проекції на осі  $X$  та  $Y$ , тобто нормальний вектор має дві проекції на ці осі  $n_x$  та  $n_y$ . Для крапки позиціонування  $A$  - це буде відповідно  $n_x^\downarrow$  та  $n_y^\downarrow$  (рис. 6.9,а).

Тут необхідно звернути увагу на те, що вектори проекцій мають протилежний знак напрямку руху.

Відповідно до кутів контуру руху це буде:

$$\begin{aligned} \text{Крапка } A: \quad n_A &= n_{x\downarrow} + n_{y\downarrow} \\ \text{Крапка } B: \quad n_B &= n_{x\uparrow} + n_{y\downarrow} \\ \text{Крапка } C: \quad n_C &= n_{x\uparrow} + n_{y\uparrow} \\ \text{Крапка } D: \quad n_D &= n_{x\downarrow} + n_{y\uparrow} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Є можливість отримати проекції векторів  $n_A$ ,  $n_B$ ,  $n_C$  та  $n_D$  (6.5) при використанні градієнтоміра [173, 174].

Як наслідок, для повносиметричного квадрату  $ABCD$  (рис. 6.9,б) маємо можливість отримати чотири вектори, прив'язані до уявної системи координат верстату. Маючи таку діаграму, як на рис. 6.9,б, є можливість отримати векторну суму похибки та її напрямок дії, тобто:

$$\overline{n_{\Sigma}} = \overline{n_A} + \overline{n_B} + \overline{n_C} + \overline{n_D}, \quad (6.6)$$

або як сума проєкцій у скалярних величинах користуючись (6.5):

$$n_{\Sigma} = (n_{x\downarrow} + n_{y\downarrow})_A + (n_{x\uparrow} + n_{y\downarrow})_B + (n_{x\uparrow} + n_{y\downarrow})_C + (n_{x\downarrow} + n_{y\uparrow})_D. \quad (6.7)$$

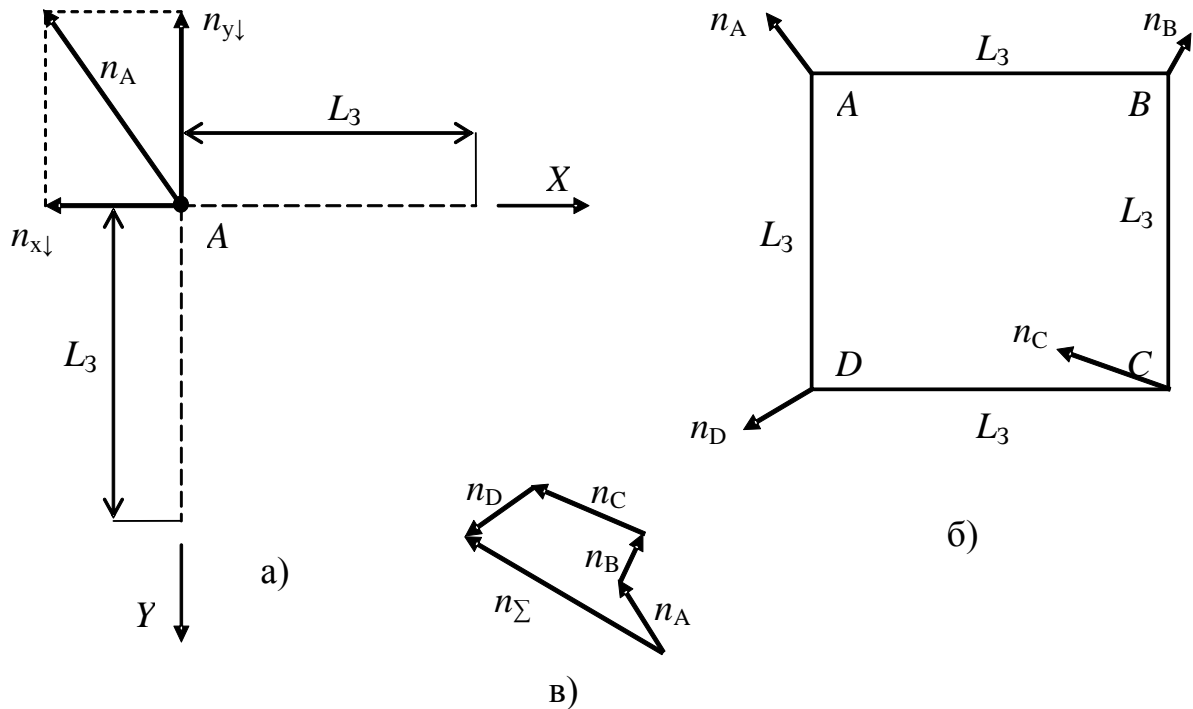


Рис. 6.9. Векторні діаграми похибок двокоординатної системи, де:  
а) утворення вектору похибки при куті контуру руху; б) діаграма похибок для замкненого контуру руху; в) сумарний вектор похибки в замкненому контурі руху

Відповідно за координатами  $X$  та  $Y$  це буде:

$$\begin{aligned} (n_{\Sigma})_X &= (n_{x\downarrow})_A + (n_{x\uparrow})_B + (n_{x\uparrow})_C + (n_{x\downarrow})_D \\ (n_{\Sigma})_Y &= (n_{y\downarrow})_A + (n_{y\downarrow})_B + (n_{y\downarrow})_C + (n_{y\uparrow})_D \end{aligned} \quad (6.8)$$

Отриманий таким чином вектор похибки та прив'язаний до центру системи координат елементарної площинки  $\Delta S$  не тільки буде визначати точність у її межах, але і визначати напрямок розвитку максимальної похибки.

Якщо технологічна площа обробки розбита на елементарні площинки  $\Delta S$  (рис. 6.10), то існує можливість визначити зони найгіршої обробки з огляду на точність.

Привабливість подібної методики має те підґрунтя, що градієнтомір, встановлений на робочій площині фрезерного верстату, надає можливість вирішити наступні проблеми загальної та зонної точності:

- за розмірами градієнта є можливість оцінювати можливу точність виконання розміру та приблизну відстань до полюсу найбільшої точності;
- напрямок градієнту вказує на площину найбільшої точності у межах полюсу точності.

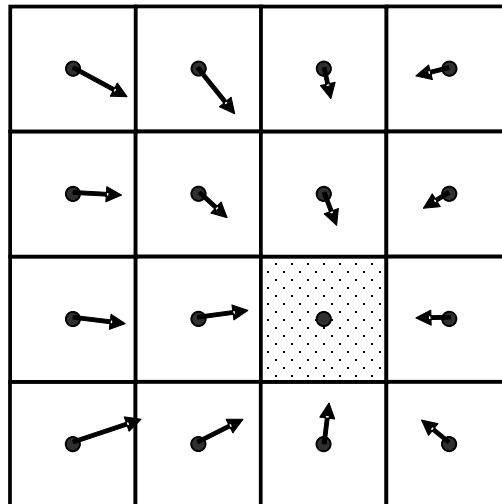


Рис. 6.10. Приклад розташування векторів по площі робочого столу ОЦ або токарного верстата з метою визначення найточнішого місця обробки

У трикоординатній системі руху є можливість використання двох основних методик.

Перша методика заснована на прямому перенесенні двокоординатної методики у трикоординатну. Водночас обмежуються градієнтами точності, отриманими на різних висотах по координаті  $Z$ , тобто відносно поверхні робочого столу (площини  $XY$ ) (рис. 6.11,а). Відстань між площинами вимірювання  $L_z$  є суто технологічною вимогою, яка не потребує зразкової довжини і формується стійкою CNC. Цей відносно простий метод надає можливість швидко обмежити зони необхідної точності звичайною інтерполяцією з однієї площини ( $ABCD$ ) до іншої ( $A'B'C'D'$ ) (рис. 6.11,б). Точність розташування цих поверхонь рівня буде залежною від кількості перерізів по визначеному об'єму. Тим не менш, така методика буде ефективною при незначних вимогах до полів допуску за координатою  $Z$ . Окрім того, при бажанні є можливість часткової інформації про точність за

координатою  $Z$ , користуючись кутами нахилу поверхонь рівня до площини  $XY$ .

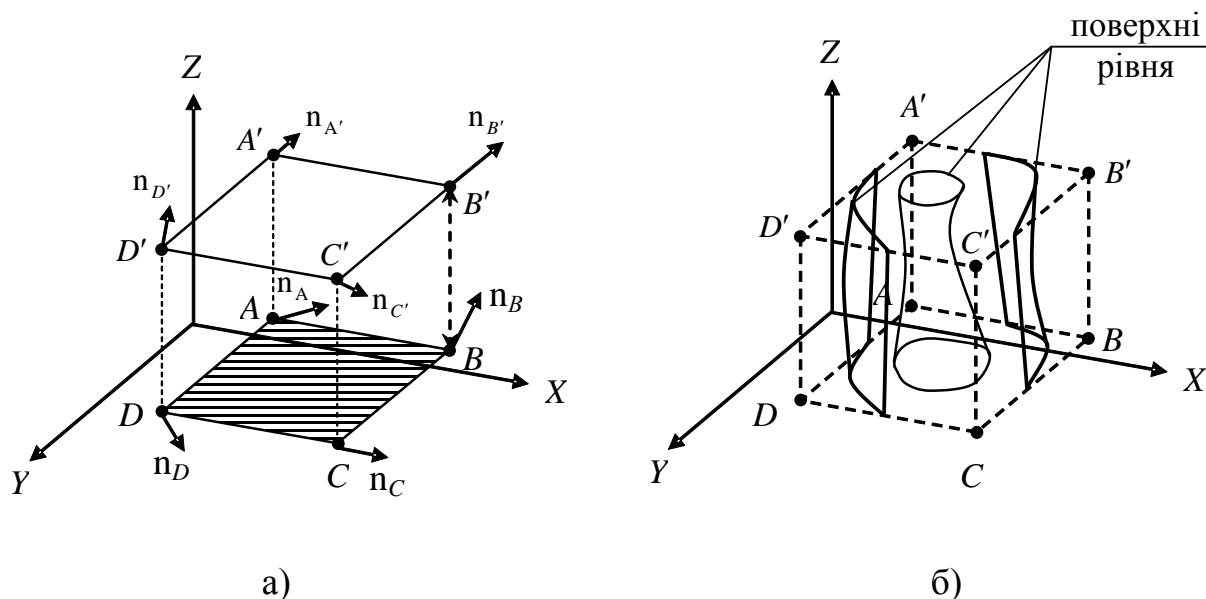


Рис. 6.11. Спрощена методика отримання розподілу по точності у межах визначеного об'єму, де: а) просторове розташування векторів похибки по різних рівнях; б) інтерполяція функції похибки.

За другою методикою використовується замкнений об'єм, побудований на засадах зразкових довжин  $L_3$ , або деяких інших. Водночас, бажано дотримуватися форми куба або паралелепіпеда, що значно спрощує процес обчислення (рис. 6.12).

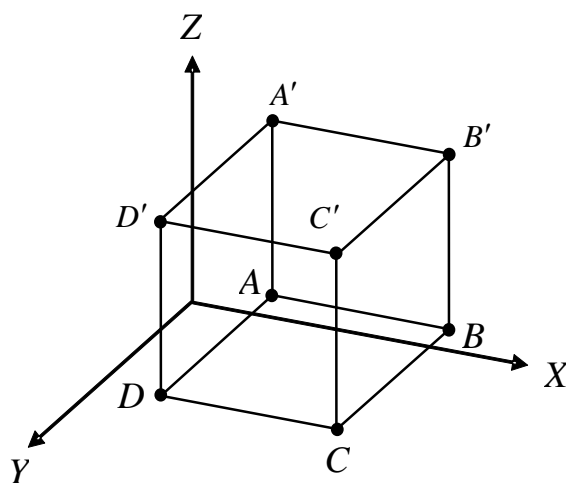


Рис. 6.12. Обмежений об'єм простору, побудований на зразковій геометричній фігурі типу куба або паралелепіпеда



У такий спосіб отримується вже не дві проекції градієнта у площині  $XU$ , а три, що надає можливість побудувати просторовий вектор точності (рис. 6.13) при кожній із вершин обраної форми. Отримані таким чином вектори будуть давати можливість визначити більш точно об'єми, у яких виконується необхідна технологічна точність (рис. 6.14).

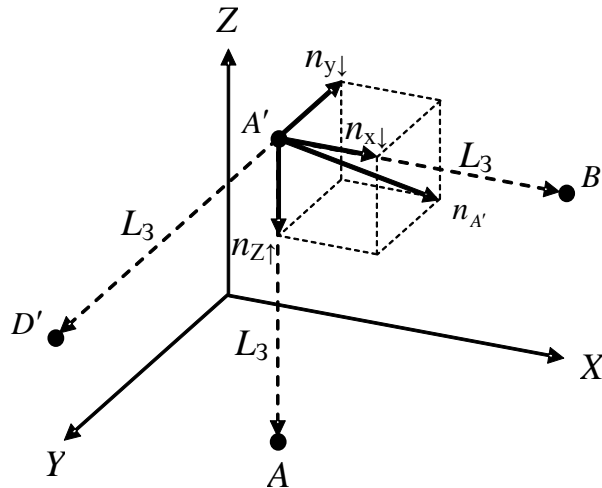


Рис. 6.13. Вектор точності при вершині замкнутого об'єму

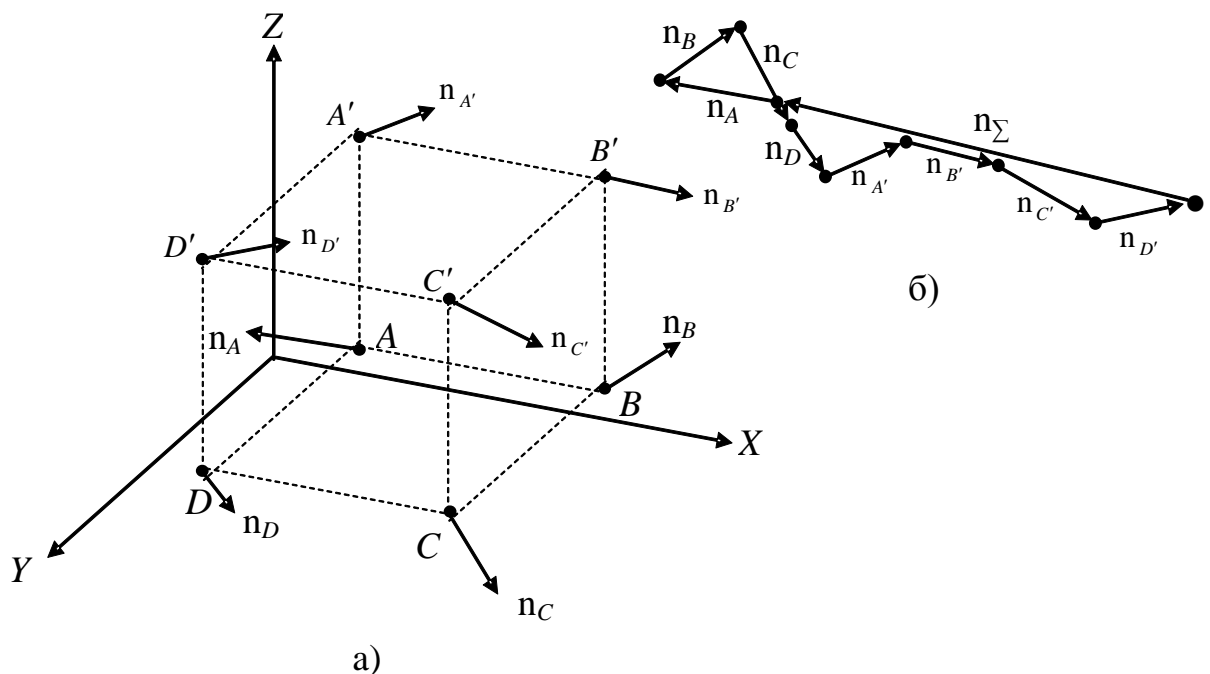


Рис. 6.14. Приклад розташування векторів точності для замкнутого об'єму та отримання підсумкового вектору  $n_{\Sigma}$  у просторі об'єму, де: а) розташування векторів точності в об'ємі зони точності; б) підсумковий вектор точності.

Підсумковий вектор  $\mathbf{n}_\Sigma$  у випадку трикоординатної системи можна приблизно оцінити як:

$$\mathbf{n}_\Sigma = \mathbf{n}_A + \mathbf{n}_{A'} + \mathbf{n}_B + \mathbf{n}_{B'} + \mathbf{n}_C + \mathbf{n}_{C'} + \mathbf{n}_D + \mathbf{n}_{D'} , \quad (6.9)$$

де кожний з векторів отримується за наступним принципом:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_A &= (\mathbf{n}_{x\downarrow})_A + (\mathbf{n}_{y\downarrow})_A + (\mathbf{n}_{z\downarrow})_A & \mathbf{n}_{A'} &= (\mathbf{n}_{x\downarrow})_{A'} + (\mathbf{n}_{y\downarrow})_{A'} + (\mathbf{n}_{z\uparrow})_{A'} \\ \mathbf{n}_B &= (\mathbf{n}_{x\uparrow})_B + (\mathbf{n}_{y\downarrow})_B + (\mathbf{n}_{z\downarrow})_B & \mathbf{n}_{B'} &= (\mathbf{n}_{x\uparrow})_{B'} + (\mathbf{n}_{y\downarrow})_{B'} + (\mathbf{n}_{z\uparrow})_{B'} \\ \mathbf{n}_C &= (\mathbf{n}_{x\uparrow})_C + (\mathbf{n}_{y\downarrow})_C + (\mathbf{n}_{z\downarrow})_C & \mathbf{n}_{C'} &= (\mathbf{n}_{x\uparrow})_{C'} + (\mathbf{n}_{y\downarrow})_{C'} + (\mathbf{n}_{z\uparrow})_{C'} \\ \mathbf{n}_D &= (\mathbf{n}_{x\downarrow})_D + (\mathbf{n}_{y\uparrow})_D + (\mathbf{n}_{z\downarrow})_D & \mathbf{n}_{D'} &= (\mathbf{n}_{x\downarrow})_{D'} + (\mathbf{n}_{y\uparrow})_{D'} + (\mathbf{n}_{z\uparrow})_{D'} . \end{aligned} \quad (6.10)$$

Модуль підсумкового вектору  $\mathbf{n}_\Sigma$  може бути обчислений за допомогою його проекцій на відповідні координатні осі:

$$n_\Sigma = \sqrt{X_\Sigma^2 + Y_\Sigma^2 + Z_\Sigma^2} , \quad (6.11)$$

де  $X_\Sigma$ ,  $Y_\Sigma$  та  $Z_\Sigma$  обчислюються на засадах векторних залежностей (6.10).

### 6.3. Вибір верстатного обладнання для виконання дослідних робіт

Для проведення дослідних робіт із перевірки викладених вище тез щодо ресурсозбереження зношеного метало-обробного обладнання було обрано верстат, що досить тривалий час експлуатувався в реальному промисловому виробництві та відповідно містив систему гнучкого керування роботою верстата.

Найбільш придатним врешті був обраний верстат 2С150ПМФ4 (Стерлітамакське верстатобудівельне виробниче об'єднання) із системою CNC типу 2С42-65 із математичним забезпеченням (рис. 6.15).

На момент виконання експериментальних дослідів загальний час роботи верстата становив чотирнадцять років в одну, дві та три робочих зміни.

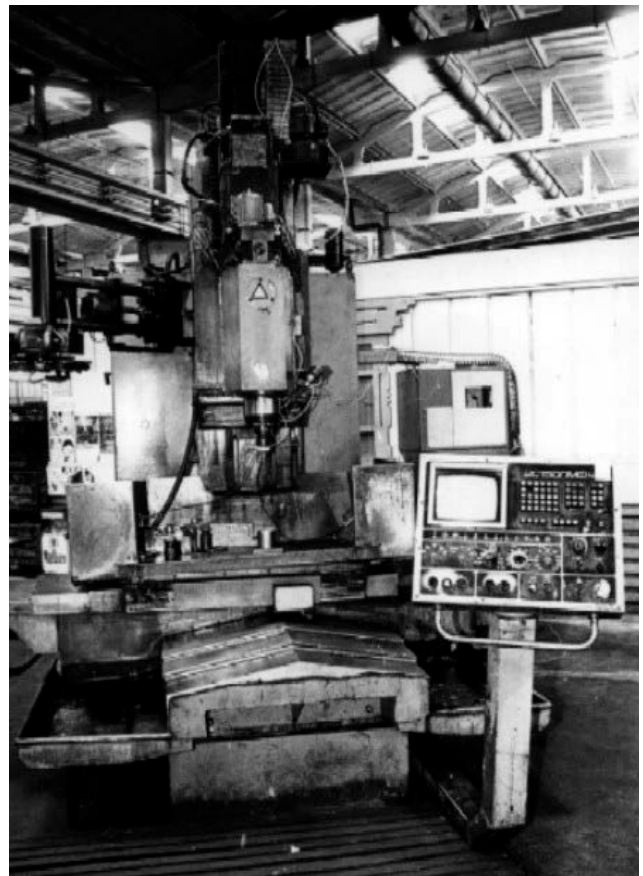


Рис 6.15. Обробний верстат 2С150ПМФ4 у заводських умовах.

Верстат мав один ремонт, пов'язаний із електромеханічною частиною, та попередню діагностику перед проведенням дослідів. На час проведення дослідів верстат виконував виготовлення деталей згідно загального технологічного плану заводу. Верстат належить заводу „Термопластавтомат” м. Хмельницький. Надалі наводяться засадні технічні дані верстата, які необхідно було використовувати у роботі [22, 175, 176].

Призначення та область використання системи верстата є наступними:

- Верстат багатоцільовий вертикальний свердлильно-фрезерно-розточувальний із хрестовим столом, автоматичною зміною інструмента із системою ЧПК, підвищеної точності, призначений до комплексної обробки деталей з першої установки у позиційному та контурному режимах програмного керування;

- На верстаті є можливість виконання свердління, зенкерування, розгортки отворів, нарізання різьб мітчиками, а також напівчистове та чистове, прямолінійне та контурне фрезерування деталей, чистова розточка отворів. Фрезерування по криці литва не дозволяється;

- Верстат обробляє всі різновиди металів та їх топів;

- Системою керування програмно задаються координатні рухи стола верстата, свердлильної головки, швидкості їх пересувань, частоти обертів шпинделю та зміна інструмента;

- Клас точності верстату П згідно ГОСТ 8-82Е;

- Межі діаметрів свердлення від 5 до 50 мм;

- Найбільший діаметр розточки – 160 мм;

- Межі нарізання різьб М6-М36;

- Найбільший діаметр торцевої фрези – 125 мм;

- Об'єм знімаємої стружки при фрезеруванні чавуну (HB=170) – 200 см<sup>3</sup>/хв;

- Розміри робочої поверхні столу: ширина – 500h14, довжина – 1000h14;

- Програмне пересування: X=800 мм, Y=500 мм, Z=710 мм;

- Дискретність відліку – 1 мкм;

- Кількість керуємих осей координат не менш чотирьох;

- Межі обертання шпинделю 28-4500 об/хв;

- Максимальний крутний момент – 430 Н·м;

- Максимальне зусилля подачі за координатами X та Y – 6000 Н, а за Z – 15000 Н;

- Межі робочих подач від 1 до 5000 мм/хв;

- Безступеневе керування подачі;
- Швидкість перегону – 12 м/хв.

Математичне забезпечення має наступні можливості.

- Система керування верстатом виконує наступні алгоритми:
  - формування пересування;
  - керування рушіями;
  - розкодування керуючої програми;
  - введення, редагування та виводу керуючої програми;
  - керування циклами автоматики верстата.

Програма створення пересувань забезпечує розрахунок координатних приростів у відповідності із визначеною швидкістю та типом інтерполяції, а також забезпечує реалізацію розгін-гальмування до відповідної швидкості (за лінійним законом). Розрахункові пересуви передаються до керуючої програми рушія через відтинки часу, кратні циклам таймерних переривань;

Програма керування рушієм виконує розрахунок керуючих дій до рушія на засадах порівняння інформації щодо плинного розташування виконавчого органу верстату, яка отримується від програм формування переміщень, керуючий вплив подаються згідно циклам переривання таймера;

- Система керування обробним верстатом має низку сервісних програм:
  - запис у пам'ять керуючої програми та підпрограм;
  - введення та виведення верстатних констант, параметрів і корекцій;
  - забезпечення різних режимів індикації;
  - редагування керуючої програми, верстатних констант і параметрів тощо.

На швидких ходах поза залежності від ручного чи автоматичного режиму залежність зміни розгону та гальмування має лінійний характер, що призводить до скорочення часу позиціювання інструмента в системі технологічного обладнання.

Окрім того, є можливим завдання в абсолютних значеннях та у приростах і при роботі за програмою, і у ручному режимі;

- Можливою є корекція на довжину та радіус інструмента із занесенням у відповідну частину пам'яті системи керування обладнанням.

Математичне забезпечення системи ЧПК верстата має також наступні функції:

- передбачено режим «Автоном», котрий надає можливість

відпрацьовування програми при вимкненому верстаті;

- передбачено режим «Навчання», коли в системі ЧПК запам'ятовуються режими обробки, замовлені оператором при обробці першої деталі, та використання цієї інформації для виготовлення наступних;
- передбачено адаптивне керування за потужністю головного рушія, тобто слідування за межами її відхилень;
- Передбачено контроль за зносом інструмента відповідно до потужності, яку споживає головний рушій.

Технічні характеристики системи ЧПК верстата забезпечують:

- робочу частоту контролю процесора – 80 Гц;
- ручну штовхаючу подачу: 10 мм/хв, 100 мм/хв, 1000 мм/хв ;
- ручну подачу для високоточного позиціювання: 1 мкм, 10 мкм та 100 мкм;
- можливість внутрішньо крокової корекції помилок.

Верстат забезпечується засобами вимірювання (контактні головки) ПВГ із відповідним математичним забезпеченням.

#### **6.4. Апаратне забезпечення дослідів. Принципи побудови системи реєстрації торкання та її периферійних модулів**

Для забезпечення належної точності та достовірності вимірювань у процесі експериментальних дослідів було розроблено спеціальну систему реєстрації торкання інструмента до поверхні деталі. В основу роботи приладу були закладені фізичні принципи, які мають опис у роботах [25, 27, 34, 103, 174, 177, 178, 179, 180, 181], але із відповідними удосконаленнями щодо ідеологічної та конструкційної побудови. Як було вказано у цих роботах, фізичний принцип дії системи дозволяє отримувати точність визначення координати торкання не гірше за 0,02 мкм. Попри досить значний показник точності у цих приладів існує суттєва вада, а саме досить посередня швидкодія ( $\approx 150$  мкс), яка, хоч і є досить високою у порівнянні із зарубіжними зразками, але може бути ще підвищена. Для вирішення цієї проблеми був застосований принцип спостереження за шумовою компонентою електромагнітного поля, тобто адаптивний спосіб налагодження на торкання.

При розробці було поставлено за мету створити такий спосіб та систему визначення координати торкання поверхні різального інструмента до деталі, в якому шляхом стабілізації резонансної частоти інформаційного сигналу, що

характеризує параметри електромагнітних полів інструмента і деталі, досягалося б підвищення якості реєстрації моменту торкання поверхні інструмента до деталі.

Наразі відомими є способи визначення координати торкання поверхні різального інструмента до деталі [182, 183], які передбачають встановлення в ТОС різального інструмента, охопленого осердям індукційного перетворювача, сигнал перетворювача підсилюють, відповідним чином оброблюють і реєструють фізичне торкання інструмента до деталі, водночас, система [183] забезпечує наступне. Інформаційний сигнал, за параметрами якого визначають присутність інструмента поблизу деталі та момент їх фізичного торкання, формують із інтегральної огибаючої шумової компоненти вихідного сигналу перетворювача, водночас постійно реєструють рівень її плинних значень і порівнюють їх з рівнем основного сигналу, ідентифікуючи малі відхилення рівня як стан присутності, а великі – як стан торкання інструмента до деталі.

Проте спосіб не забезпечує підтримку надійності та високої точності вимірювання координати поверхні різального інструмента під час виготовлення деталі в умовах автоматизованого виробництва, оскільки існує дрейф амплітуди інформаційного сигналу, який надходить від відчутника. Чинником дрейфу є два наступних явища.

По-перше, це температурні вади ферокерамічного осердя відчутника, які є дуже впливовими на магнітну проникність та на загальну індуктивність відчутника.

По-друге, система конструкції відчутника не надає можливості повноцінного захисту від впливу міжелектродної ємності між відчутником і масою верстата, що призводить до значної зміни робочої частоти інформаційного сигналу залежно від місця розташування відчутника.

По-третє, відчутник, встановлений на верстаті, постійно знаходиться під впливом його статичного та динамічного магнітного поля. Тому магнітна проникність відчутника весь час знаходиться у нестабільному стані та залежить від дрейфу потужності магнітного поля верстата, який у свою чергу є залежний від дрейфу магнітного поля Землі.

Усі ці чинники призводять до того, що відчутник ЕМП необхідно налагоджувати на резонансну частоту та додавати спеціальні засоби контролю амплітуди на його виході. Наразі розлагодження резонансної частоти може викликати зниження вихідної амплітуди за інші стабільні умови до 40% за рахунок зниження розлагодження резонансної частоти.

Тому для визначення координати торкання поверхні різального інструмента до деталі реєструють інформаційний сигнал, за параметрами якого визначають момент фізичного торкання поверхні інструмента до деталі, що характеризує параметри електромагнітних полів інструмента і деталі під час їх взаємодії, контролюють робочі частоти інформаційного сигналу, порівнюють їх із частотою керуючого сигналу, здійснюють обчислення відхилення від заданої частоти, а надалі виконують підтримку стабілізації резонансної частоти інформаційного сигналу. Це дає можливість формувати інформаційні сигнали про момент торкання верхівки інструмента до поверхні деталі для системи керування прецизійним верстатом.

Структурна блок-схема системи реєстрації торкання [184] (рис. 6.16) реалізує визначення координати торкання поверхні різального інструмента до поверхні заготовки при виготовленні деталі.

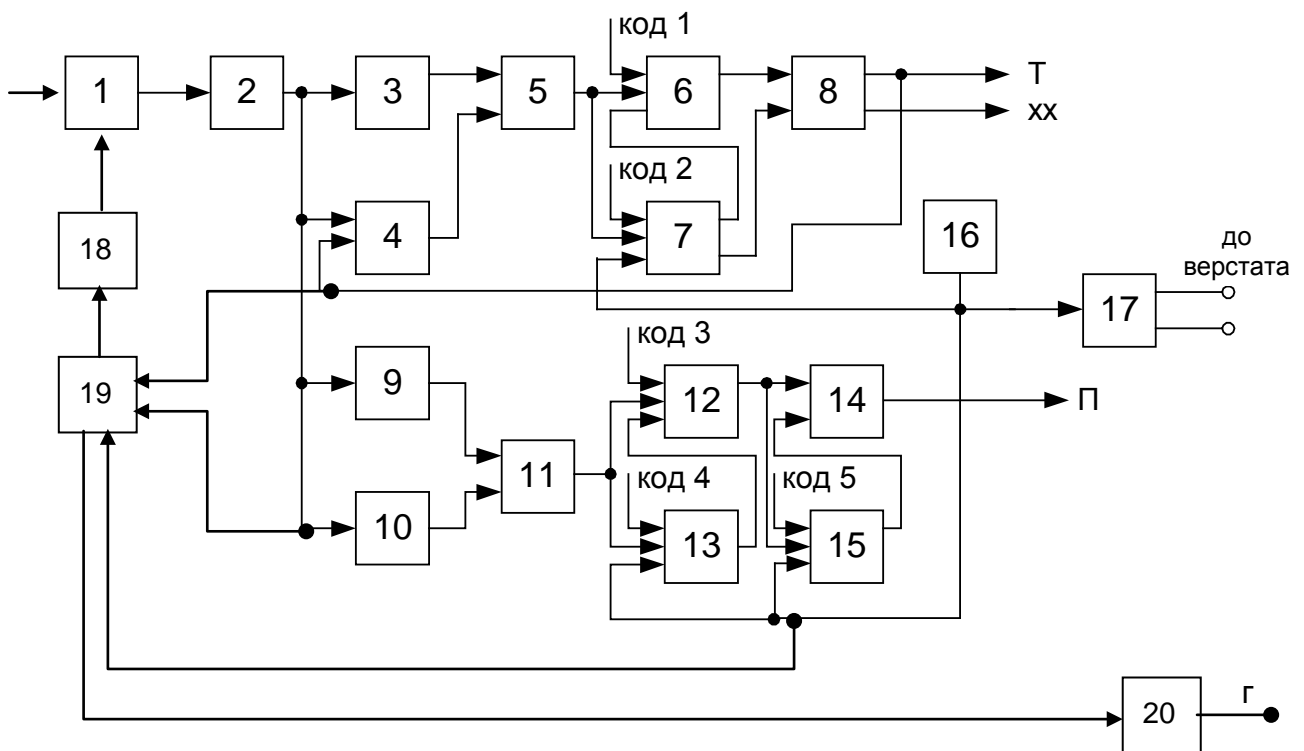


Рис. 6.16. Структурна блок-схема системи визначення координати торкання поверхні різального інструмента до поверхні заготовки

Сигнал із виходу первинного індукційного перетворювача 1, що встановлений на різальному інструменті, підсилюють підсилювачем 2 до

необхідного рівня. Підсилений сигнал перетворюють у пороговому детекторі 3, інтеграторі з підсиленням 4, яким керують, другому інтеграторі 9 та підсилювачі 10.

Із сигналу шумів інтегруванням виділяють його низькочастотну огинаючу, котру постійно порівнюють із заданим шумовим сигналом. Для цього підбирають підсилення обох сигналів (основного та інтегрованого) таким чином, щоб тільки сплески амплітуди основного сигналу перевищували рівень інтегрованого. У випадку, коли торкання інструмента до деталі відсутнє, рівень сигналу невеликий і змінюється тільки у випадку руху інструмента на деталь. При цьому пороговий детектор 3 сигналу не пропускає через його малу величину. Натомість підсилений сигнал за допомогою підсилювача 10 надходить до компаратора 11. На опорний вхід компаратора 11 надходить огинаюча сигналу з інтегратора 9.

Водночас присутність інструмента поблизу деталі реєструють, як кількість імпульсів за інтервал часу, котрий визначають спеціальним кодом, як і межа кількості імпульсів. Якщо їх менше за число встановлене кодом, то це ідентифікують як перешкоду. Однак, якщо ця кількість перевищує встановлену межу, утворюють сигнал реєстрації «Присутності», і після цього інформацію стирають в очікуванні нового накопичення.

При виході із зони присутності відпрацьовують чередування імпульсів, яке повертає початковий стан сигналів. Підсилення у підсилювачі 10 та інтеграторі 9 підбирають таким чином, щоб кількість імпульсів на виході компаратора 11 була мінімальною. У цьому випадку в лічильнику 12 не відбувається переповнення за інтервал часу, який встановлюють таймером 13. Код максимального числа, яке може бути записане у лічильник 12, встановлюють подачею команди «Код 3». Інтервал часу, який утворює лічильник 13 за допомогою тактових імпульсів з тактового генератора 16, утворюють за допомогою команди «Код 4».

При збільшенні сигналу, коли інструмент є поблизу від деталі, амплітуда сигналу значно зростає. При цьому рівень сигналу з підсилювача 10 зростає значно швидше за опорний рівень сигналу з інтегратора 9. Лічильник 12 за визначений інтервал часу («Код 4», таймер 13) добирає необхідне число за «Кодом 3» і утворює імпульс, який переводить тригер 14 у протилежний стан, створюючи інформаційну команду «Присутність». Одночасно цей же імпульс зупиняє роботу другого таймера 15, який створює імпульси скидання для повернення тригера 14 у попередню позицію. Імпульси на виході другого



таймера 15 зникають. У випадку зменшення сигналу процес проходить у зворотньому порядку. Лічильник 12 вже не нараховує достатню кількість імпульсів, і сигнал на його виході зникає. Другий таймер 15 розблоковують, тоді починають створювати на його виході імпульси, котрі переводять тригер 14 у попередній стан. Команда «Присутність» зникає.

Спосіб функціонує лише при умові підмагнічування, тобто в масі верстата створюють ЕМП як наслідок функціонування тактового генератора 16, вихідний сигнал якого підсилюють підсилювачем потужності 17 та подають до технологічного обладнання.

Для забезпечення максимальної ефективності та точності характеристик контролю електромагнітного поля інструмента і деталі виконують підтримку стабілізації резонансної частоти інформаційного сигналу. Для цього спеціалізованим блоком 18 керування здійснюють зміну частоти налагодження індукційного відчутника 1 у кілька разів при застосуванні фазового автоматичного підналагодження частоти (ФАПЧ) блоком 19. водночас блок 19 отримує інформацію про частоту із підсилювача 2, генератора 16 опорної частоти та тригера 8. Отриманий підсилений інформаційний сигнал порівнюють із опорним сигналом блоку 16. Водночас, якщо не існує заборони у вигляді сигналу «Т», який надходить від тригера 8, блок 19 ФАПЧ працює у вільному режимі, контролюючи робочу частоту відчутника 1 через блок 18.

У випадку торкання інструмента до деталі корисний, сигнал зростає значно більше, ніж при реєстрації «Присутності». Водночас, як і у випадку реєстрації «Присутності», реєструють інтегральний рівень корисного сигналу, котрий є опорним для реєстрації торкання. Сигнал торкання є величиною, зверхньою до порогу, який встановлено у пороговому детекторі 3. На виході порогового детектора 3 виникає сигнал, котрий надходить до сигнального входу першого компаратора 5. Опорний рівень для першого компаратора 5 утворюють на засадах того ж сигналу. Вхідний сигнал надходить до інтегратора із підсиленням 4, яким керують, який створює на своєму виході огинаючу, яка є опорним рівнем для компаратора 5. Оскільки огинаюча, котру виробляє інтегратор із керуючим підсиленням 5, є трохи запізненою у часі по відношенню до основного сигналу, то лише частина сигналу з порогового детектора перевищує опорний рівень. Відповідно до цього перший компаратор 5 утворює пакет сигналів, котрі надходять до лічильника 6.

Кількість імпульсів у пакеті, які мають перевищувати сигнал від можливої перешкоди, встановлюють командою «Код 1». У випадку, коли кількість

імпульсів перевищує їх кількість, визначену командою «Код 1», на виході лічильником 6 створюють сигнал реєстрації торкання.

Таймер 7 створює на своїх виходах імпульсні сигнали, синхронізовані з кожним першим імпульсом у пакеті сигналів, який надходить з виходу компаратора 5, створюючи на своєму першому виході сигнали повернення лічильника 6 у попередній стан. Якщо кількість імпульсів, яка надходить у лічильник 6 менша за число, встановлене командою «Код 1», то його ідентифікують як «перешкода», але, якщо кількість їх більша за встановлений «Код 1», то сигнал на виході лічильника 6 переводить тригер 8 у протилежний стан. На своєму першому виході тригер 8 створює інформаційний сигнал «Торкання», на другому інформаційному виході тригера 8 зникає сигнал «Холостий хід». Для впевненої підтримки сигналу «Торкання» він з першого виходу тригера 8 надходить до інтегратора із керованим підсиленням 4. При надходженні цього сигналу інтегратор 4 значно зменшує підсилення і, як наслідок, опорний рівень на вході у компаратор 5. Величину опорного рівня на вході компаратора 5 знижують, що значно поліпшує якість утримання сигналу «Торкання».

У випадку виходу різального інструмента із торкання до поверхні деталі кількість імпульсів у визначеному інтервалі часу менша за необхідну, і лічильник 6 постійно повертають до стартового стану під впливом сигналу з першого виходу таймера 7. Імпульсні сигнали на другому виході таймера 7 переключають тригер 8 у стан інформаційного сигналу «Холостий хід». Сигнал «Торкання» із тригера 8 надходить до блоку 19 ФАПЧ і блокує його роботу. Водночас, у блоці 19 ФАПЧ запам'ятовують останнє значення керуючого сигналу та постійно передають на блок 18 керування для підтримки робочої частоти відчутника 1 у визначеному режимі. Блокування здійснюють лише за наявності сигналу «Торкання». Одночасно із цими процесами у блоці 19 ФАПЧ формують інформаційний сигнал про готовність до роботи відчутника 1 у вигляді команди «Готовність», яка через буферний пристрій 20 надходить до системи CNC верстата.

Отже, є можливість за досить простих апаратурних рішень значно підвищити ефективність роботи системи визначення моменту торкання об'єктів технологічного процесу обробки металу і, як наслідок, підвищити межу точності визначення поверхні торкання інструмента до деталі, яку отримують у такий спосіб. Це призводить до підвищення якості реєстрації моменту торкання поверхні інструмента до деталі та формування інформаційних сигналів про

момент торкання верхівки інструмента до поверхні деталі для системи керування прецизійним верстатом, що підвищує точність виготовлення деталі.

Так, наприклад, при роботі з інструментальним відчутником торкання було



Рис. 6.17. Приклад розташування модулю системи «М-30ST» на верстаті.

отримано швидкодію в 80 мкс. При використанні вимірювальної головки електромагнітного типу «Майстер-17» швидкодія становила 70 мкс.

Основний модуль «М-30ST» обробки інформації системи реєстрації та визначення координати торкання (рис. 6.17) має друковану плату елек-

тронного монтажу, розташовану в середині металевого корпусу. У корпусі є два отвори зі встановленими в них роз'ємами зв'язку із периферійним відчутниковим елементом та системою ЧПК верстата. Для можливості використання низки різноманітних відчутників на передню панель корпусу основного модулю системи виведено ручки керування частотою та підсилення.

Окрім того, на передню панель основного модулю виведено індикатор рівня сигналу та індикатори команд «Торкання», «Присутність» та «Холостий хід».

При проведенні дослідів із експлуатації створеної контрольно-вимірювальної системи використовувалися два типи периферійних модулів відчутників:

- інструментальний відчутник;
- вимірювальна головка „Майстер-17”.

За конструкцією інструментальний відчутник (рис. 6.18) є феррокерамічним кільцем ( $90 \times 100 \times 2.5$ ,  $W = 600$  Вт,  $f_p = 100$  кГц), що є встановленим у дюралеве кільце (топ Д16АТ). Конструкційно кільце, яке має розташований у своєму корпусі електромагнітний відчутник, є майже повною копією кільця, яке призначене для захисту кульових підшипників шпинделю. Інструментальний відчутник замінює захисне кільце кульових підшипників шпинделю. Одночасно в ньому розташовані світлові індикатори, які виконують функції термінового повідомлення системи керування верстатом про наявність ситуації «Присутність», «Торкання» та «Холостий хід».

Другий тип відчутника, котрий використовувався при різнобічних вимірюваннях – це вимірювальна головка «Майстер-17» (рис. 6.19).



Рис. 6.18. Загальний вигляд інструментального відчутника, встановленого на шпинделі верстата.

Вимірювальна головка має гнучку щуп-штангу довжиною 80 мм із можливістю відхилення вимірювальної кінцівки  $\pm 20$  мм за координатами X та Y. Відхилення за координатою Z станове 10 мм. Головка забезпечена особистою індикацією «Присутність», «Торкання» та «Холостий хід», як і периферійний модуль інструментального відчутника. Приклад загального розташування контрольно-вимірювального комплексу на верстаті відображено на світлині (рис. 6.20). Вимірювальну систему було змонтовано таким чином, щоб забезпечувалася можливість позачергового використання периферійних модулів, тобто або інструментального відчутника, або вимірювальної головки.

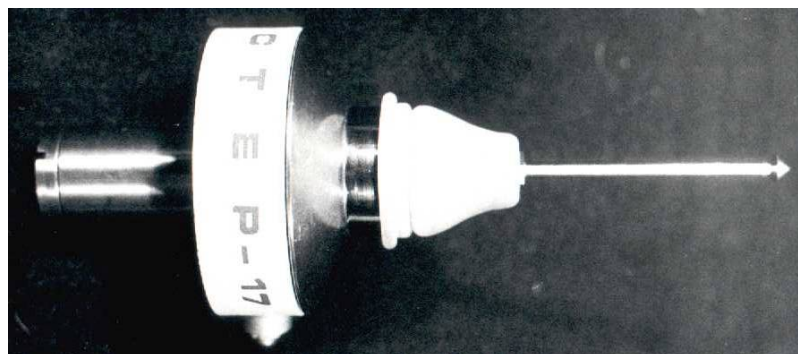


Рис. 6.19. Вимірювальна головка «Майстер-17» як периферійний модуль загальної системи визначення координати торкання інструмента до поверхні деталі

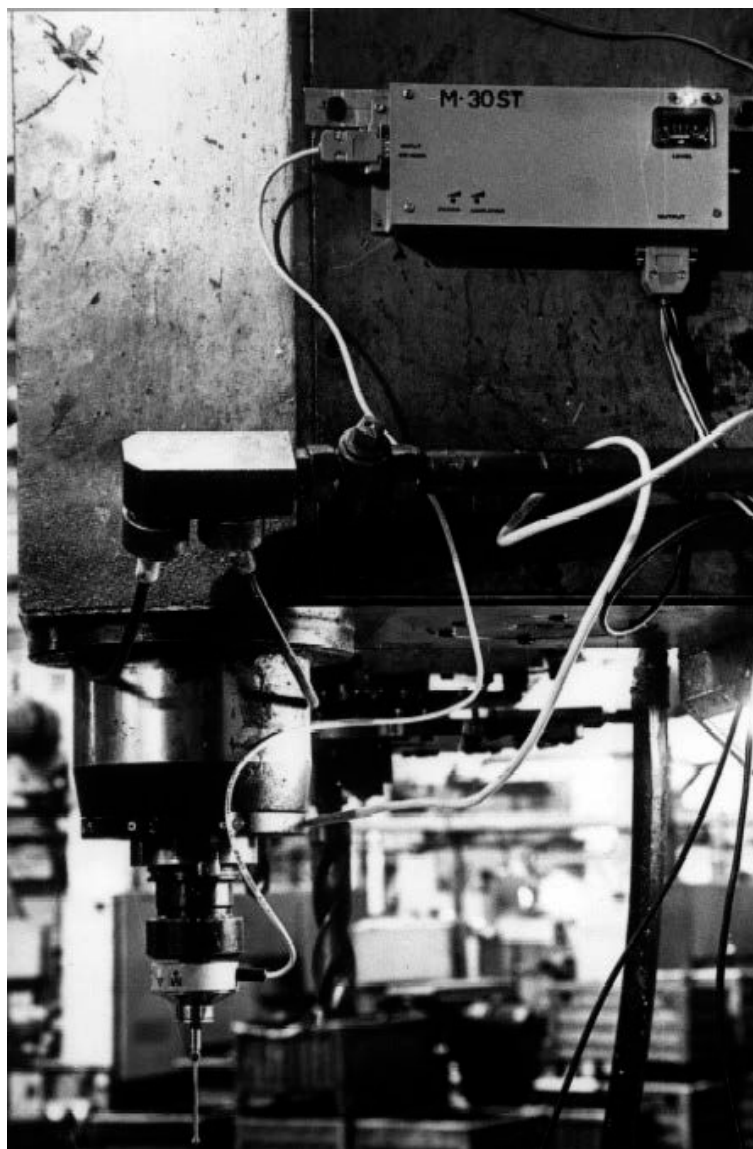


Рис. 6.20. Розташування контрольно-вимірювального комплексу «М-30ST» у складі обробного верстату

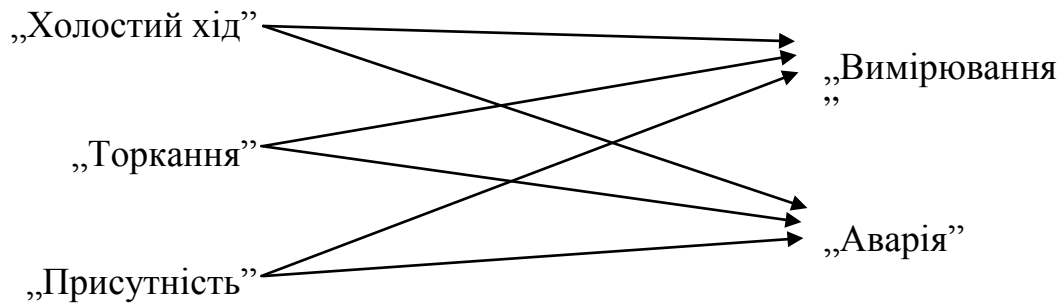
Вихідні сигнальні кабелі системи приєднувалися до відповідних входів системи керування верстатом типу CNC - 2C42-65. Задля гальванічної розв'язки використовувалися оптрони PC817.

Оскільки ця система ЧПК має тільки два входи, які стосуються роботи із системами вимірювання, а саме «Вимірювання» та «Аварія», то в процесі експериментальних дослідів використовувалися різні комбінації з'єднань для отримання належного ефекту.

Такі комбінації були наступними:

**M-30ST**

**2C42-65**



Стосовно монтажу на обробному верстаті модуль «М-30ST» контрольно-вимірювальної системи має свої особливості у порівнянні із низкою приладів, котрі вирішують аналогічні технологічні задачі [26, 49, 55, 57, 58, 59, 60].

На відміну від цих приладів створений модуль системи [34] має кілька варіантів ввімкнення у технологічну будову верстата. Це відбувається тому, що з огляду на електрофізичні процеси не тільки сучасний верстат, але й усі інші елементи технологічного комплексу можуть розглядатися як фрагменти електромагнітних ланцюгів.

Подібні ланцюги у своїй сукупності створюють загальні кола циркуляції електричних струмів і магнітних полів, притаманних лише визначеному типу або модифікації верстата. Тому раціональність використання будь-якого верстата або технологічного обладнання з огляду на максимальну ефективність залежить від того, наскільки достеменно застосовано вимірювальні комплекси щодо всього технологічного простору. У цьому питанні запропонованому приладу досить суттєво програють закордонні конструкції у яких цей параметр значно обмежено.

У новій конструкції передбачена наявність стороннього генератора поля з дипольним виходом. Маючи такий вихід, модуль має можливість створювати різні за потужністю та геометрією електромагнітні поля.

Можна навести схеми електричних моделей ТОС, котрі можуть бути використаними при подальших розробках схем контрольно-вимірювальних пристроїв для систем керування процесом лезвійної механічної обробки на CNC-верстатах (рис. 6.21, 6.22) [185].

Схеми мають наступні активні та пасивні компоненти:

- $E_1(t)$  та  $E_3(t)$  - еквівалентні генератори змінної напруги по підтримці фізичного принципу роботи системи торкання;
- $E_2(t)$  - еквівалентний генератор напруги ближньої присутності;

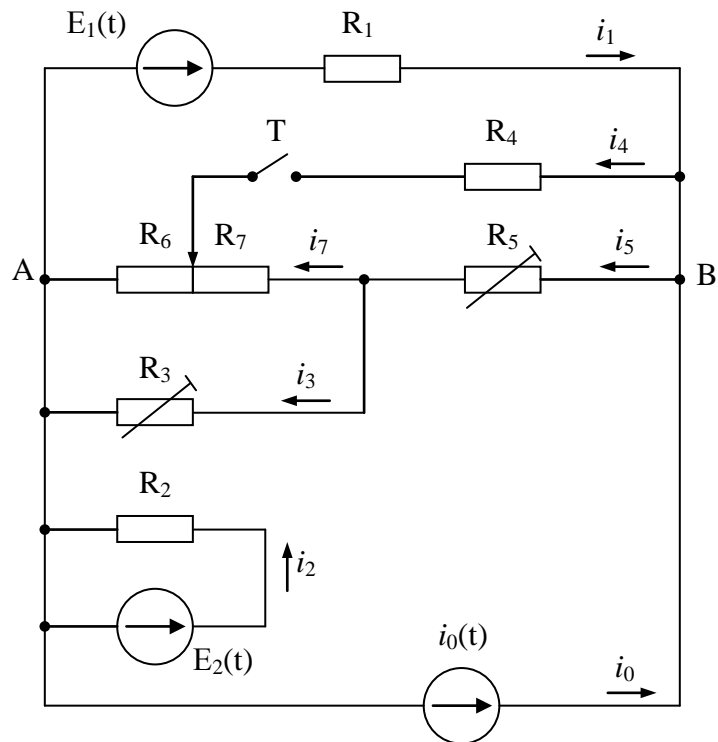


Рис. 6.21. Схема електричної моделі токарного верстата

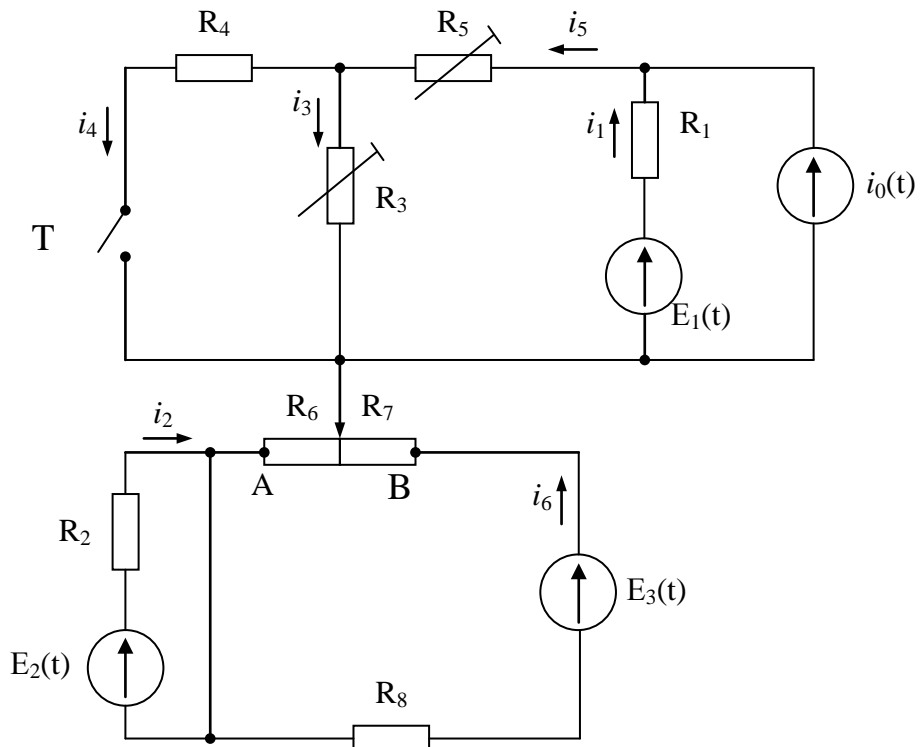


Рис. 6.22. Схема електричної моделі фрезерного верстата і ОЦ

- $i_0(t)$  - еквівалентний генератор шумового струму;
- $R_1$  та  $R_9$  - еквівалентний внутрішній опір генераторів напруги;
- $R_3$  - еквівалентний опір шпинделю верстата;
- $R_4$  - еквівалентний опір зони торкання;
- $R_5$  - еквівалентний опір пінолі верстата;
- $R_6$  та  $R_7$  - еквівалентні частини опору деталі відносно точки торкання;
- $R_2$  - еквівалентний опір кола ближньої присутності;
- ключ "Т" - імітатор торкання.

Стосовно моделювання електричних явищ у токарних верстатах необхідно зробити наступні висновки:

- перерозподіл струмів, хоч і впливає на величину сигналу при торканні, але не є вирішальним при реєстрації торкання і слабо діє на кінцевий результат у межах точності обладнання;
- перерозподіл струмів досить сильно впливає на розмір зони присутності навколо деталі, що позитивно відбивається на точності визначення її розмірів і, як наслідок, не вимагає спеціальних конструктивних заходів для усунення цього недоліку.

Фрезерні верстати та ОЦ мають ті ж самі ситуації торкання, що і у токарних верстатах, але значно простіше моделюються. Єдине невелике ускладнення, яке має система торкання при роботі, – це застосування одного або більшої кількості генераторів струму для забезпечення підтримки фізичного принципу роботи  $E_1(t)$  та  $E_3(t)$ .

Ці джерела повинні бути незалежними, наприклад, джерело  $E_1(t)$  обслуговує шпиндельну частину верстата, а джерело  $E_3(t)$  обслуговує робочий стіл із деталлю.

Електричні моделі верстатів, що визначають процес торкання інструмента до деталі та призначені для розрахунку процесів торкання технологічних об'єктів на основі їх елементарних фізичних властивостей, надають можливість отримати необхідну точність процесу обробки.

Стосовно плану проведення дослідів використовувалася симетрична схема ввімкнення генератора поля.

Загальну схему розташування модулю реєстрації торкання на верстаті наведено на рис 6.23. За умови такого ввімкнення нульовий полюс (середина диполя) приєднується до маси обробного верстата у межах розташування модулю відчутника торкання на необертаємих елементах конструкції верстата



(крапка А за рис. 6.23). Задля рівномірного розподілу поля крайні виходи дипольного генератора вмикаються у крапках В та С, які розташовані на максимальній відстані одна від одної у межах робочого стола.

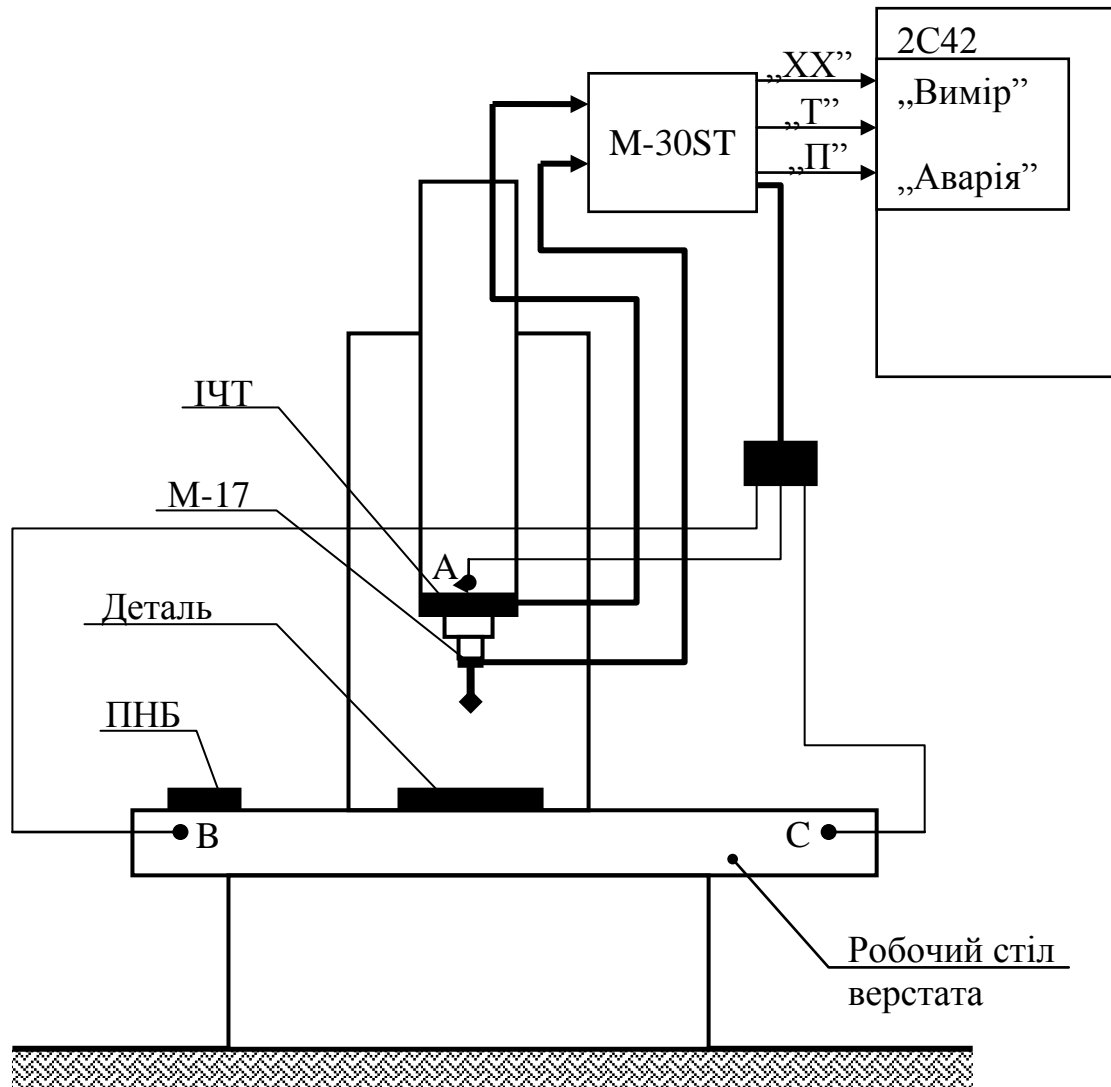


Рис 6.23. Принцип симетричного гальванічного з'єднання модулю реєстрації торкання М-30ST з обробним верстатом.

#### 6.4.1. Активні та пасивні нульові бази та методика їх використання у дослідних роботах

Активні та пасивні нульові бази (АНБ, ПНБ) є приладами, які стаціонарно використовуються у складі комплексів контролю процесів металообробки.

Основне призначення АНБ та ПНБ – об'єднання нульової точки координат інструмента, верстата і деталі.

За призначенням нульові бази можуть мати два основних різновиди: для токарних верстатів і фрезерних верстатів або ОЦ. Основна причина такого розподілу – це конструкційні особливості цих верстатів.

Основні випробування були проведені за допомогою АНБ-Т, яка виконує контроль за двома координатами. Варіанти для фрезерних верстатів або ОЦ АНБ-Ф (АНБ-ОЦ) є більш складнішими, оскільки виконують функції контролю за трьома координатами. Особливо це стосується визначення координат у площині столу ( $x$ ,  $y$ ) тому, що необхідно виконати контроль торкання бокової панданної зони фрезерного інструмента і панданної зони нульової бази.

Орієнтуючись на все обумовлене вище, розглянемо принципи побудови АНБ-Т та методику її застосування.

Активна нульова база (АНБ-Т) для токарних верстатів призначена:

- для визначення початкових координат ( $X$ ,  $Y$ ) різального інструмента;
- для прив'язки верхівки різального інструмента до системи координат верстата;
- для вимірювання плинного зносу різального інструмента в процесі металообробки;
- для контролю базування деталі у шпинделі металообробного верстата перенесенням координати із АНБ-Т на поверхню деталі.

#### **6.4.2. Узагальнена методика роботи комплексу при проведенні дослідних робіт**

При проведенні дослідних робіт використовувалися наступні прецизійні металообробні верстати.

Верстати токарної групи:

- Токарний верстат «IKEGAI» AT25Z із системою керування CNC типу «FANUC-6M» (рис. 6.24) (двадцять років роботи у цехових умовах);
- Токарний верстат TNL-45 із системою керування CNC типу «FANUC-18M» (рис. 6.25) (новий верстат, лабораторні умови роботи);
- Токарний верстат «Schaubling-150» із системою HP5529 (рис. 6.26) (новий верстат, лабораторні умови роботи);
- Токарний верстат ТПК-125В із системою ЧПК типу Н-22 (рис. 6.27) (лабораторні умови роботи впродовж десяти років);
- Токарний верстат HI-EC010E із системою керування CNC «CENTROL»



Рис. 6.24. Верстат IKEGAI AT25Z



Рис. 6.25. Верстат TNL-45



Рис. 6.26. Токарний верстат Schaublin-150



Рис. 6.27. Токарний верстат ТПК-125В

(рис. 6.28) (робота у цехових умовах впродовж десяти років);

- Універсальний токарний верстат, модель 1А616 (рис. 6.29) (робота у заводських та лабораторних умовах впродовж сорока років).



Рис. 6.28. Токарний верстат HI-ECO 10E



Рис. 6.29. Токарний верстат 1А 616

Верстати фрезерної групи та ОЦ:

- Обробний центр TNV-40 M із системою керування CNC типу «FANUC-16» (рис. 6.30) (лабораторні умови роботи упродовж п'яти років);
- Фрезерний верстат Deckel FP3NC із системою ЧПК типу Grundig Dialog 3E (рис. 6.31) (цехові умови роботи впродовж двадцяти років);

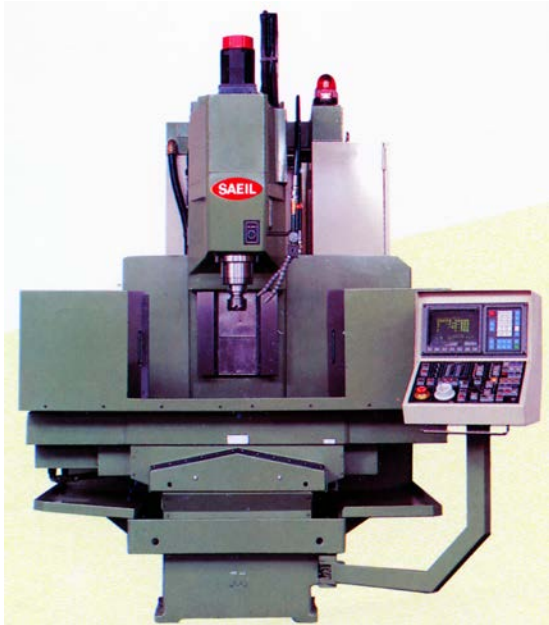


Рис. 6.30. Обробний центр TNV-40M



Рис. 6.31. Фрезерний верстат Deckel FP3NC

- Обробний центр IP-320 із системою CNC типу «FANUC-6M» (рис. 6.32) (цехові умови роботи у лінії ГВС впродовж п'ятнадцяти років);
- Обробний центр 2C150ПМФ4 із системою CNC типу 2C42-65 (рис. 6.15) (цехові умови роботи впродовж п'ятнадцяти років);
- Універсальний фрезерний верстат типу 671 (рис. 6.33) (робота у цехових та лабораторних умовах впродовж сорока років).

Узагальнену побудову комплексу дослідження показано на рис. 6.34 [186].

У цьому комплексі АНБ-Т та СКТ разом із блоком контролю стану металообробки були роз'єднані. При розробці приладу останні два блоки були виконані, як об'єднані, наприклад, як для FANUC-16M єдиною платою, так і для М-30ST-2 в окремих модулях. Водночас, для підвищення достеменності в окремих дослідах виходи АНБ-Т та СКТ проходили операцію з логічного підсумку. Єдиний недолік подібного досліду полягав у тому, що необхідно було виготовити спеціалізовану перехідну плату (логічну схему), яка б поєднувала між собою сигнали АНБ-Т та СКТ.





Рис. 6.32. Обробний центр ІР-320



Рис. 6.33. Універсальний фрезерний верстат типу 671

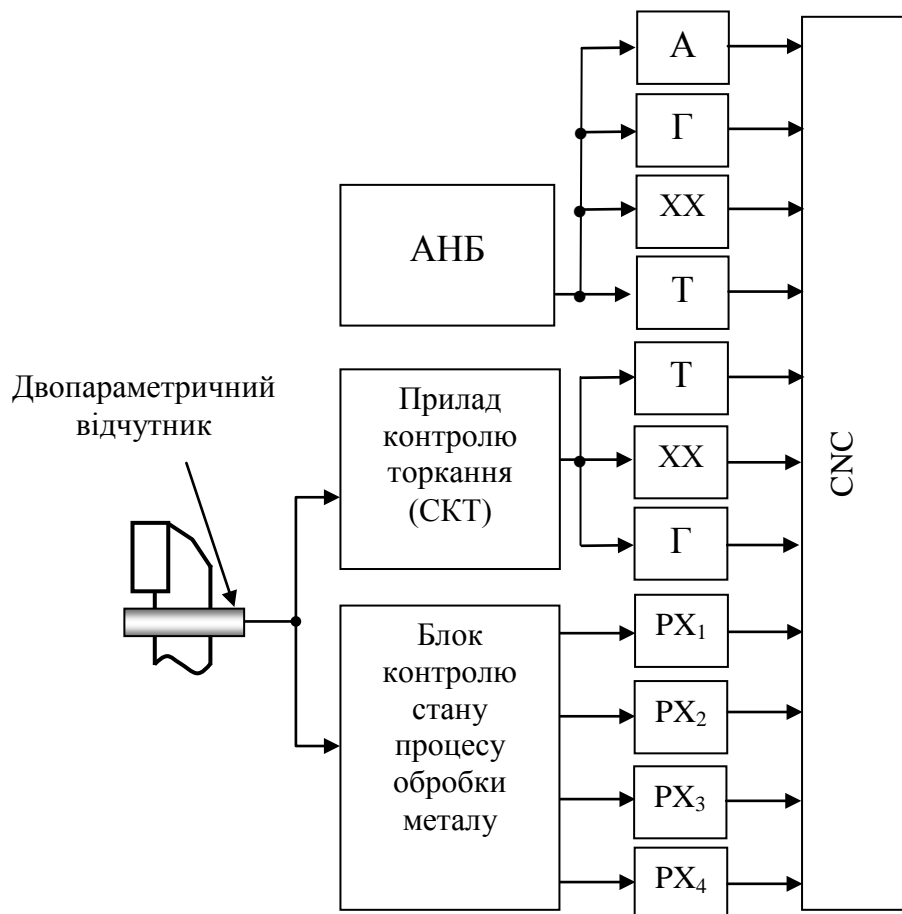


Рис. 6.34. Узагальнена побудова комплексу дослідження за допомогою АНБ-Т

На дослідницькому комплексі підтримувалася відповідна методика руху під час проведення експерименту (рис. 6.35). Водночас, стартова позиція різального інструмента (А) виконувалася у режимі «обнуління» верстата. У цій же позиції проводився контроль АНБ-Т та СКТ.

Після цього інструмент переводимо у позицію вимірювання (АНБ-Т, рис. 6.35), де фіксуються координати  $x_0$ ,  $y_0$  верхівки інструмента у системі координат верстата, тобто виконується операція прив'язки.

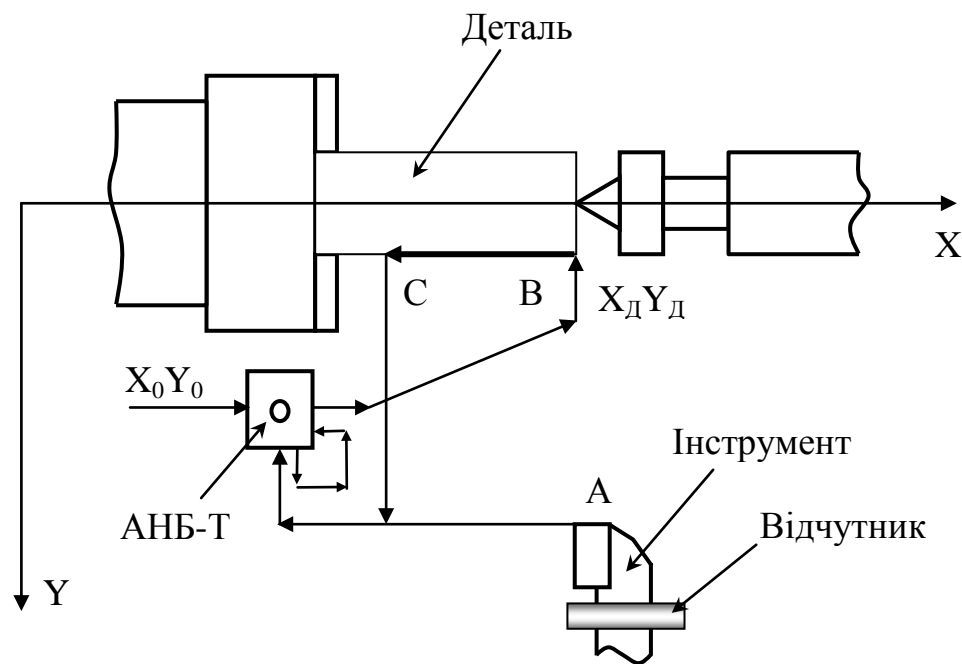


Рис. 6.35. Траєкторія руху інструмента під час обробки та контрольних вимірювань

Наступним кроком є вимірювання діаметру деталі  $X_d$  та  $Y_d$  (рис. 6.36). Для цього РІ переведено у позицію вимірювання В, а потім С. Координати фіксуються у CNC. Після чого проводиться повторний цикл вимірювання.

При різних дослідях встановлювалися відповідні режими обробки з відповідним зворотнім циклом обміру. Всі результати накопичувалися у відповідній базі даних у системі CNC. За накопиченими результатами проводилася відповідна математична обробка даних та корекція режимів обробки.

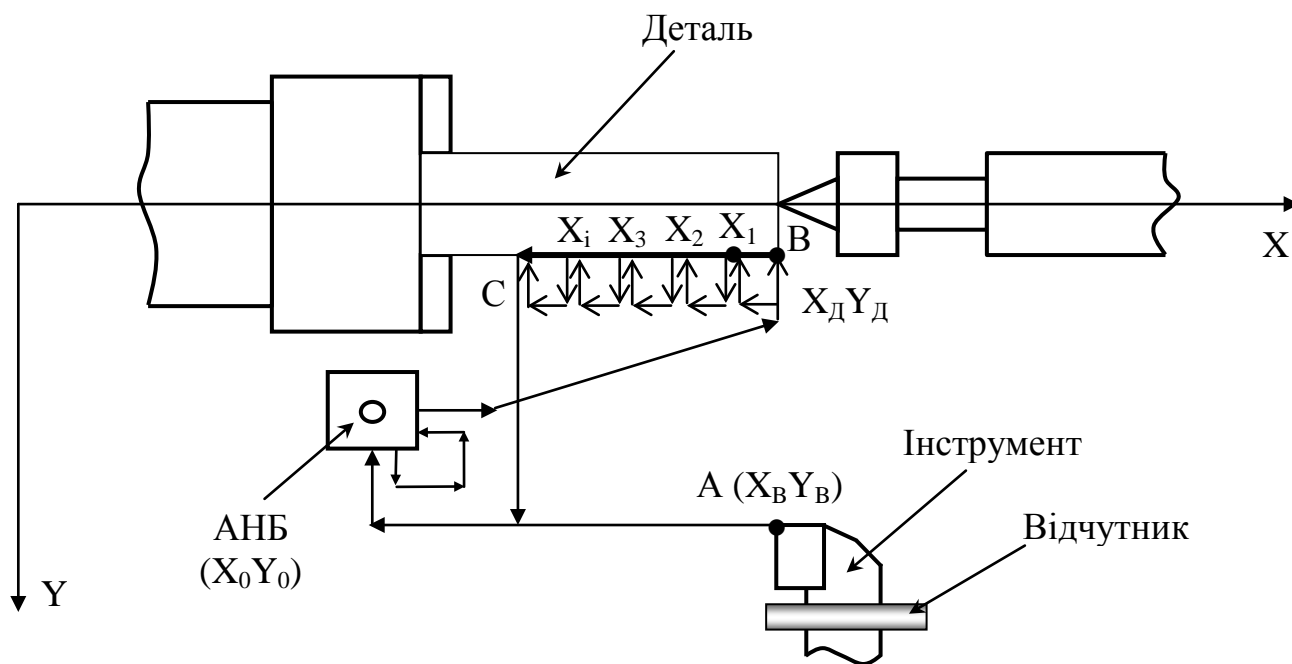


Рис. 6.36. Траєкторія руху інструмента під час контрольних вимірювань геометрії деталі

#### 6.4.3. Методика дослідження точності позиціонування різального інструмента на фрезерних верстатах та ОЦ

Дослідження точності позиціонування фрезерного інструмента на ОЦ в основному виконувалося на типових верстатах:

- обробний центр TNV-40M (рис. 6.30) із системою ЧПК FANUC OMC;
- фрезерний верстат Deckel FP3NC із системою ЧПК типу Crundig Dialog 3E (рис. 6.31);
- вертикально-фрезерний верстат 2C150ПМФ4МО із системою ЧПК типу 2C42M (рис. 6.15);
- обробний центр IP-320 із системою ЧПК типу FANUC-6M (рис. 6.32);
- верстат Schubling-150 (рис. 6.26) із системою оптичного визначення координати типу Hewlett-Packard HP5529;
- вертикально-фрезерний верстат 2C150ПМФ4МО із системою ЧПК типу 2C42-65 (рис. 6.15);
- вертикально-фрезерний верстат типу 671 універсального призначення (рис. 6.33).

Методика дослідів була наступною.

На верстатах досліджувалися можливості системи контролю процесу металообробки у широкому діапазоні режимів. Режими обробки обиралися у межах можливостей верстата, тобто діапазону подач та обертів інструмента. Окрім того, використовувався весь наявний інструмент, який може працювати сумісно з верстатом.

Водночас, вирішувалися дві основні задачі:

- по-перше, якість визначення координати поверхні деталі;
- по-друге, можливість якісного контролю процесу металообробки, тобто реєстрації можливих надзвичайних ситуацій.

При дослідіх використовувався модуль контролю спеціально розроблений для системи CNC типу FANUC-0MC. Окрім того, на верстаті проходили досліді, пов'язані із визначенням зони присутності АНБ та зони присутності типових деталей точних приладів.

На верстаті Deckel FP3NC проводили досліді з вивчення просторових похибок за допомогою градієнметра Г-1 та його модифікації. Система градієнметра працювала сумісно із АВГ типу М-17 та модулем М30-ST.

На вертикально-фрезерному верстаті 2С150ПМФ4МО проводилися досліді по реєстрації моменту торкання боковою частиною пальцевої фрези. Одночасно проводилися досліді по вивченню ступеню зношуваності поверхні робочого столу верстата (вертикальна градієнтометрія панданної зони).

При вивченні геометрії (зносу) робочої поверхні столу використовувалися рухи за траєкторіями згідно рис. 6.4. Рух при входженні у торкання обирався згідно авторських методик, які наведені в літературі [92].

## **6.5. Методики проведення експериментальних робіт із дослідження стану обробного обладнання**

При проведенні експериментальних робіт необхідно було провести низку дослідів, які б підтвердили загально вироблену концепцію всієї роботи. Оскільки реалізувати вироблене програмно-математичне забезпечення системи CNC 2С42 було неможливо, то всі експерименти проводились таким чином, щоб довести працездатність окремих її фрагментів. Така ситуація виникла з того, що на сьогодні перепрограмування системи CNC вимагає значних коштів. Окрім того, таке перепрограмування має сенс робити у тому випадку, коли верстат забезпечується СКТ. Це може бути не тільки М-3OST, але й ряд інших систем, які виконують схожі функції контролю. Застаріла конструкція 2С42 має суттєві недоліки своєї побудови, оскільки має тільки два входи, які мають



можливість працювати із СКТ, в той час як, наприклад, “FANUC-NC” має чотири таких входи. Така обмеженість суттєво відбивається на можливостях використання СКТ.

#### **6.5.1. Методика проведення контролю геометричних руйнацій робочої поверхні стола**

При проведенні оцінки розмірів руйнацій робочої поверхні стола верстата використовувалась наступна методика.

1) Всю поверхню робочого столу верстата було розподілено на квадрати із стороною у 100 мм. Як наслідок, було отримано сітку вимірювань 500 x 900 мм. По периметру залишалась незадіяна стрічка шириною у 50 мм. Загальна кількість вимірюваних крапок  $6 \times 10 = 60$ . При проведенні таких вимірів було зроблено 1200 вимірів у автоматичному режимі.

2) У зв'язку із тим, що поверхня робочого столу має руйнації, які перевищують точність вимірювань (1 мкм), а технологічні елементи деталі та пристосувань мають чіткий інтегрувальний характер, то при вимірюваннях використовували спеціальну плитку. Інтегрувальна плитка мала розміри 50 x 50 x 20 мм. Плитка, яка використовувалася у експериментах, виготовлена із магнітного топу ЮНДК із напруженням магнітного поля від 25 до 30 А\М. Грані плитки поліровані із висотою мікронерівності не гірше за 0,1 мкм.

3) Вимірювання величини руйнацій робочої поверхні проводилось у два способи:

а) використання стандартної технологічної програми, яка є у системі програмування 2C42 стосовно вимірювальних головок. У якості вимірювальної головки використовувалася головка М-17 у комплексі із модулем М-30ST. Ввімкнення виходів М-30ST до стійки 2C42: вихід “Т” → “вимірювання”. Водночас, весь комплекс відпрацьовував програму, закладену до 2C42, тобто команду G05.

б) вимірювання координати безпосередньо фрезерним інструментом з використанням стандартної програми G05 неможливе, оскільки ця програма руху виконує багаторазове торкання [22, 46], а використання фрезерного інструмента в цьому режимі призводить до збою системи ЧПК. Тому для отримання належного результату вихід “Т” СКТ приєднувався до входу “аварія” 2C42, який виконує просту команду зупинки руху вздовж координати. Для отримання належної точності (1 мкм) швидкість подачі обиралася досить невеликою, тобто 2 мм/хв. Для порівняння можливо розглянути систему, яка

має опис у [35] і має швидкість 60 мм/хв, але вона працює разом із системою CNC “FANUC” із надшвидкісним входом реагування (2C42 – 20 мс, “FANUC” – 100 мкс).

Загальне уявлення про процес вимірювання можна отримати із рис. 6.37 при роботі основного М-30ST із периферійним модулем головки М17 та фрезерним інструментом (фреза  $\varnothing 40$ ) (рис. 6.38).



Рис. 6.37. Фото процесу роботи вимірювальної головки М-17 із інтегрованою плиткою при вимірюванні руйнацій робочої поверхні



Рис. 6.38. Фото процесу роботи фрезерного інструмента при вимірюванні руйнацій робочої поверхні столу верстата

При проведенні вимірів руйнацій робочої поверхні столу верстата були отримані наступні результати, які відображено у табл. 6.1, при використанні головки М-17 із М-30ST, а також отримано значення нерівності робочого столу верстата, отримані за допомогою фрези ( $\varnothing 40$ ) в комплексі з М-30ST (табл. 6.2).

Таблиця 6.1. Середні значення нерівності робочого столу верстата, отримані за допомогою вимірювальної головки M17 в комплексі з модулем M-30ST

Y (мм)	мкм									
500	210	300	250	240	220	190	140	120	130	150
400	185	270	205	235	190	170	120	80	120	145
300	115	150	130	90	75	60	45	25	80	100
200	95	90	-20	60	35	28	25	23	35	50
100	20	-35	-103	-96	-100	-105	-95	-90	-5	40
0	0	-50	-130	-140	-130	-120	-110	-100	-40	30
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
	X(мм)									

Таблиця 6.2. Середні значення нерівності робочого столу верстата, отримані за допомогою фрези ( $\varnothing 40$ ) в комплексі з модулем M-30ST

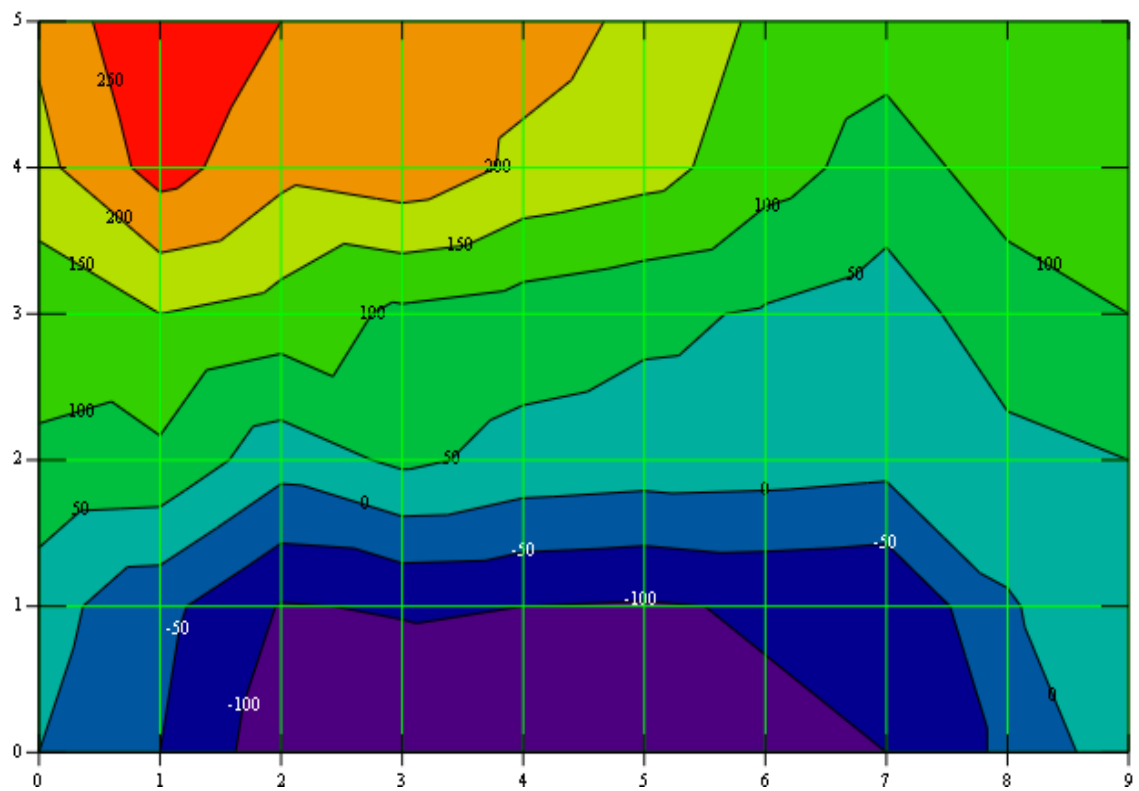
Y (мм)	мкм									
500	220	317	260	246	235	203	153	135	137	158
400	195	280	217	240	205	186	118	87	125	152
300	117	157	138	107	86	67	56	36	88	107
200	103	99	-7	80	35	40	40	30	46	56
100	25	-27	-86	-77	-103	-89	-76	-80	5	45
0	0	-40	-105	-131	-133	-117	-95	-97	-25	37
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
	X(мм)									

За результатами, отриманими із вищезгаданих дослідів, були побудовані карти-схеми руйнації робочої поверхні стола (рис. 6.39, 6.40). Окрім того, було обчислено різницю між цими вимірами (рис. 6.41).

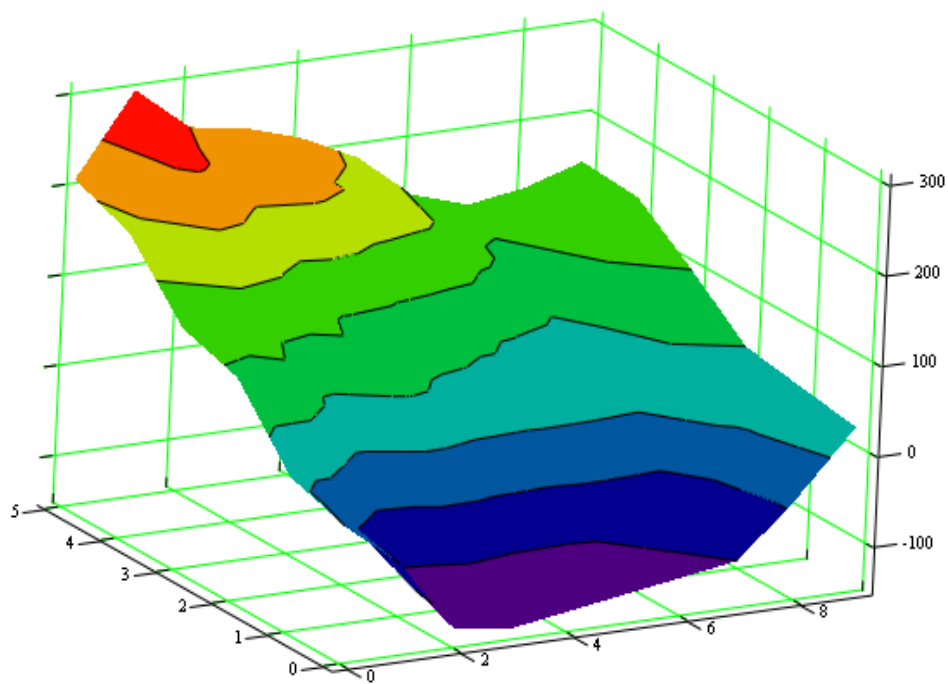
Як показали проведені експерименти, існує різниця між методиками виміру. Основним чинником розходжень є те, що на відміну від периферійного модулю АВГ M17, котрий торкається інтегрувальної плитки у центрі, крапка торкання торцем фрези є невизначеною в координатах плитки (рис. 6.38). Оскільки плитка за кожної нової установки змінює кут нахилу своєї вимірювальної площини, залежно від загальної руйнації, то це призводить до збільшення результатів вимірів [187, 188].

#### 6.5.1.1. Результати дослідження зонної точності верстатів із системою керування ЧПК

Дослідження зонної точності проводились на кількох типах верстатів. На рис. 6.42 та рис. 6.43 показано результати дослідів для двох верстатів Deckel моделі FP3NC із системою ЧПК типу Dialog 3E (рис. 6.31).

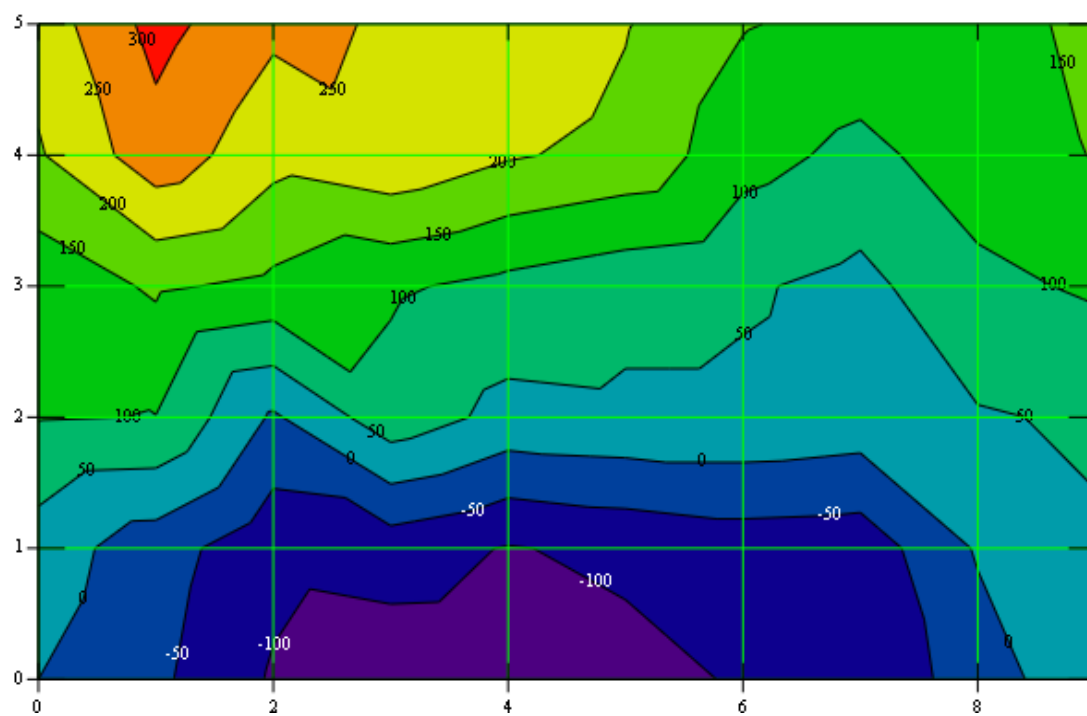


а)

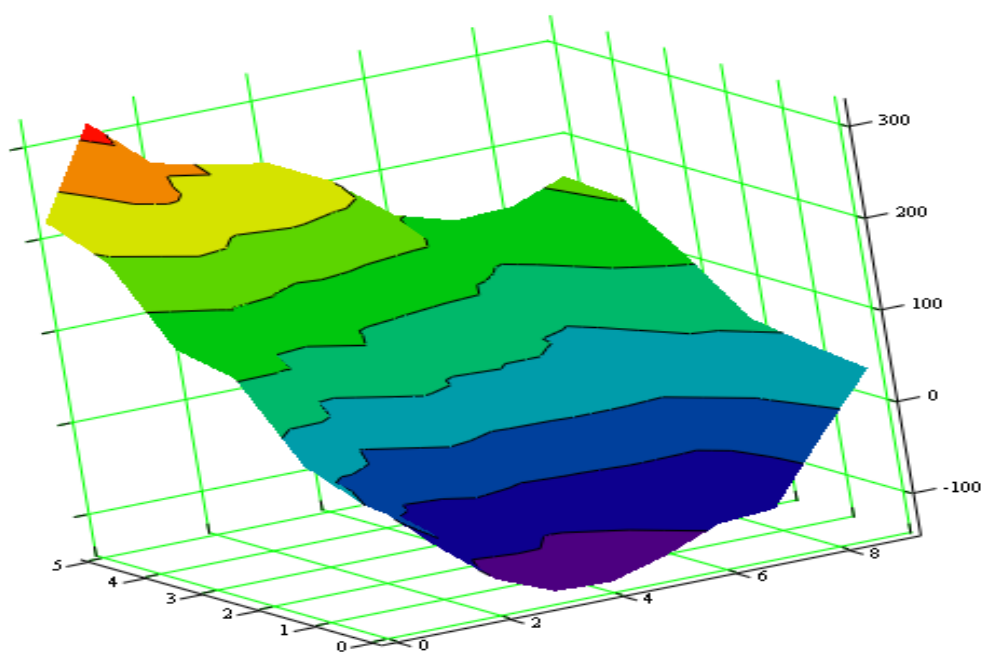


б)

Рис. 6.39. Руйнації робочої поверхні стола, отримані при використанні модулю АВГ-М17, де: а – карта-схема стола, б – просторове розташування руйнацій поверхні робочого стола



а)



б)

Рис. 6.40. Руйнації робочої поверхні стола, отримані при використанні фрези ( $\varnothing 40$ ), де: а – карта-схема стола, б – просторове розташування руйнацій поверхні робочого стола

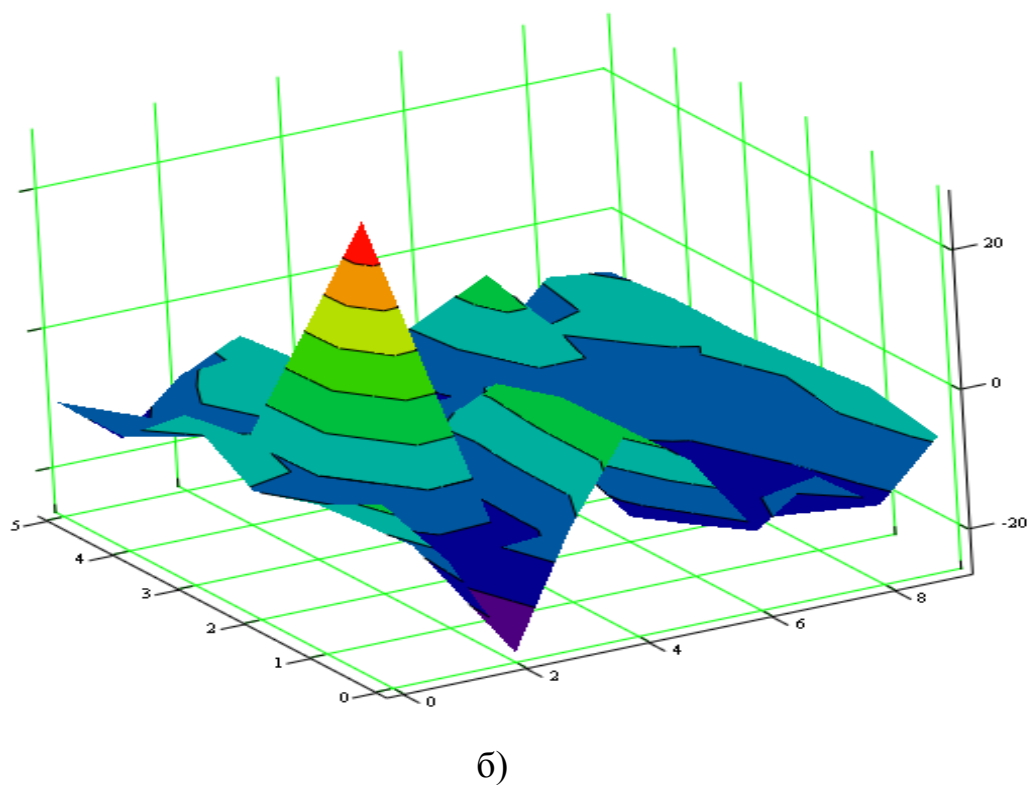
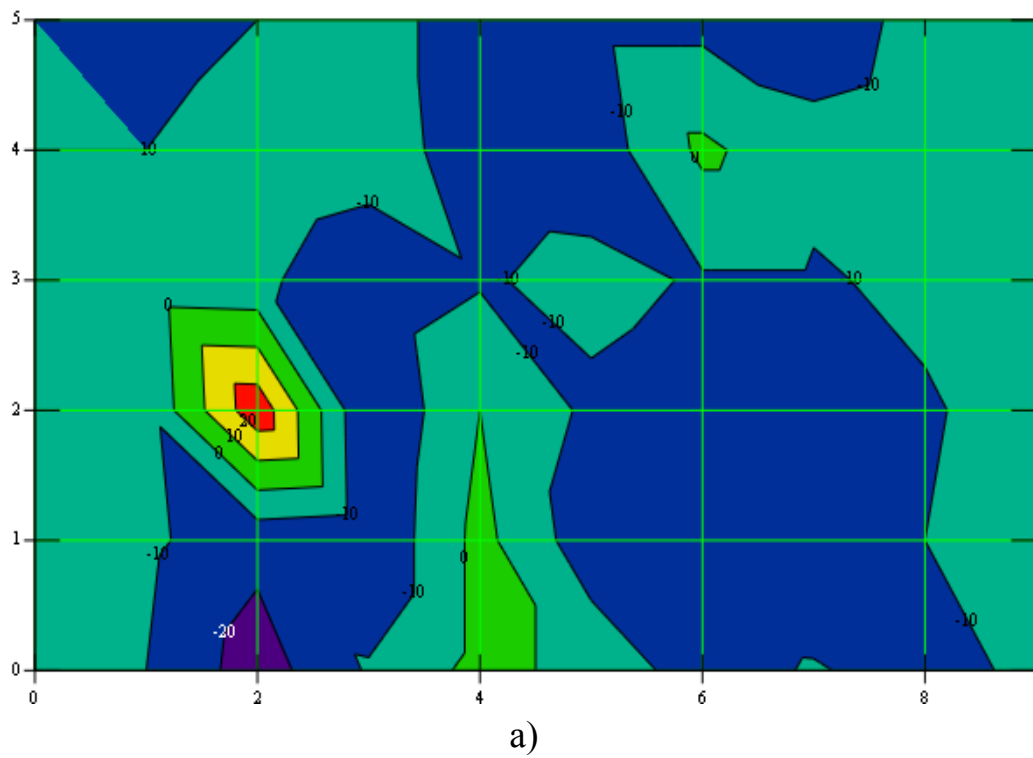


Рис. 6.41. Розходження при вимірах руйнацій модулем АВГ-М17 та фрезерного інструмента, де: а – карта-схема стола, б – просторове розташування руйнацій поверхні робочого стола

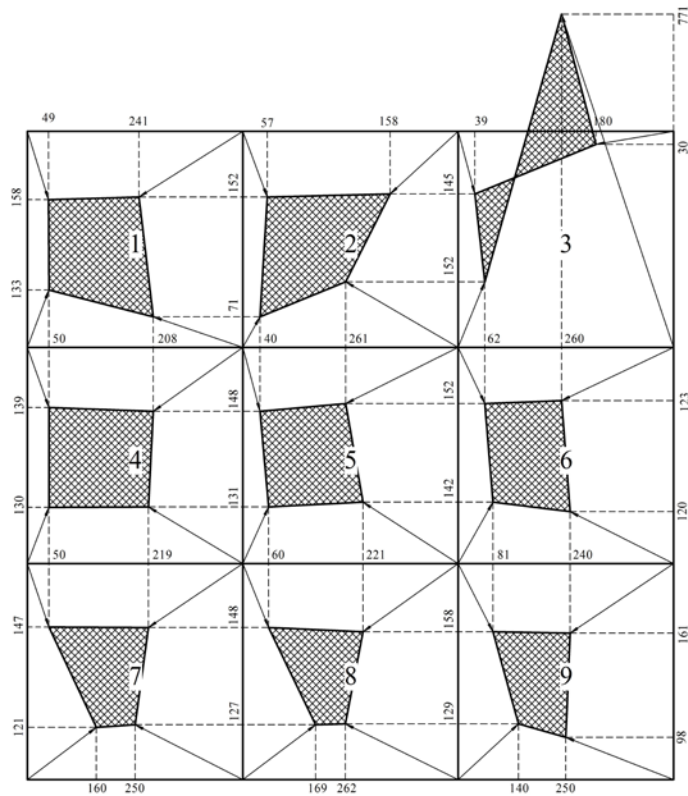


Рис. 6.42. Карта зонної точності верстату Deckel моделі FP3NC на рівні 50 мм від поверхні столу (шаг сітки - 50×50 мм) (перший верстат).

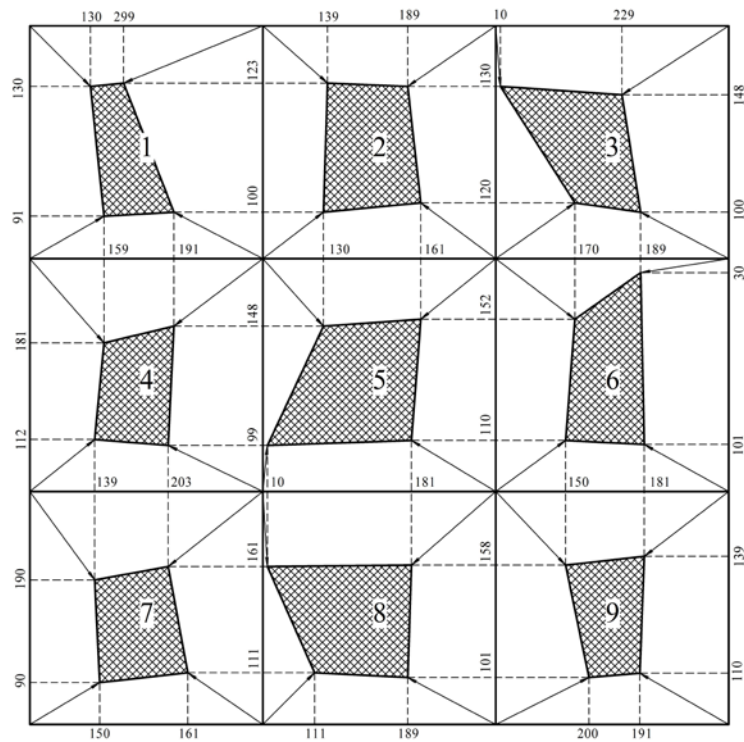


Рис. 6.43. Карта зонної точності верстату Deckel моделі FP3NC на рівні 50 мм від поверхні столу (шаг сітки - 50×50 мм) (другий верстат).



Вибір цих верстатів пояснюється наступними чинниками.

По-перше, обидва верстати знаходяться у цеху поряд.

По-друге, обидва верстати мають однаковий віковий ресурс, і весь час виконували приблизно одну і ту ж роботу (виготовлення деталі).

По-третє, верстати цієї моделі мають робочий стіл у формі квадрата, що більше пасує просторовому уявленню похибки, ніж прямокутний.

Експериментальні досліді проводилися за допомогою АВГ М-17 та СКТ М-30ST-2 (рис. 6.17, рис. 6.19) та градієнтометрів (рис. 6.44, рис. 6.45) [89, 164].

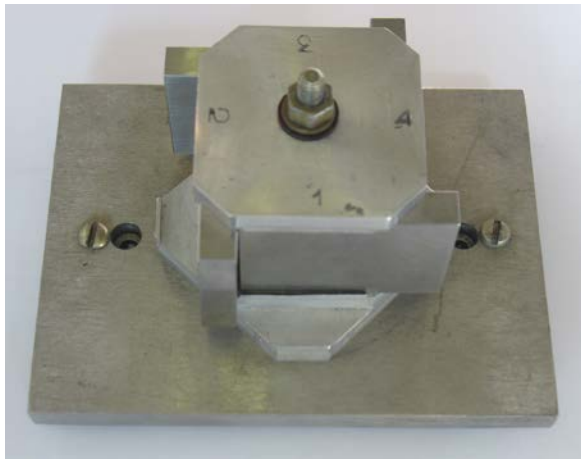


Рис. 6.44. Дослідний градієнтометр на базі плиток Йогансона (база 50×50)



Рис. 6.45. Градієнтометр Г-1 (база 75×75)

За результатами вимірювання побудовано карти зонної точності на базі вимірювання градієнтів похибки, за якими можна визначати ступінь неоднорідності похибок у робочому просторі обробного верстату.

В ідеальному випадку, з огляду на наявність градієнту похибок, затемнена область на верстаті буде являти собою прямокутник або квадрат, розташований в центрі зони.

Проте реально існує спотворення геометричної форми та зсув цієї області всередині зони. Розміри затемненої області якісно характеризують точність у цій зоні, чим більша за розмірами затемнена геометрична область, тим вища



точність у цій зоні. Окрім того, чим більше геометричне відхилення області від ідеальної (прямокутник, квадрат), тим більші спотворення отримає деталь у процесі обробки (виготовлення).

Внаслідок проведених дослідів були зроблені наступні висновки.

Для першого верстату (рис. 6.42) є характерною більш висока точність відпрацювання переміщень вздовж осі  $X$  зліва направо та дещо меншою вздовж осі  $Y$  у напрямку знизу вгору. Найбільш точно координатні переміщення відпрацьовуються у зонах 4, 5, 6. Особливістю роботи градієнтометра є те, що за його показниками можливе визначення збою у системі координат ЧПК. Наочно це видно у третьому квадранті, який перевірявся кілька разів. У цьому випадку зона точності отримується у вигляді або трикутника, або «метелика».

Для другого верстату (рис. 6.43) є складним визначитися із загальною характеристикою точності відпрацювання переміщень вздовж осей, найбільш точно координатні переміщення відпрацьовуються у зонах 5 і 8.

Загальне порівняння цих верстатів показує, що перший верстат є менш зношеним і найменш втратив точність координатних переміщень.

#### **6.5.1.2. Результати дослідів із вимірювання руйнації робочого столу фрезерного верстата 2C150 ПМФ4**

Згідно обумовленої методики вимірювань було проведено дослідні роботи на верстаті 2C150 ПМФ4 (рис. 6.15) щодо вимірювання дрейфу нерівностей робочої поверхні через два місяці роботи верстата в дві зміни на добу.

При проведенні вимірів руйнацій робочої поверхні столу верстата були отримані наступні результати, які відображено у табл. 6.3, табл. 6.4.

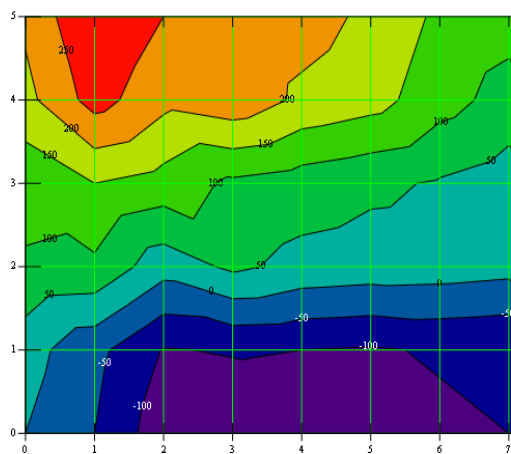
Таблиця 6.3. Середні значення нерівності (мкм) робочого столу верстата, отримані за допомогою вимірювальної головки M17 в комплексі із M-30ST та CNC 2C42-65

	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
	X(мм)									
0	0	-45	-125	-135	-127	-117	-112	-106	-35	38
100	21	-30	-100	-96	-100	-107	-93	-90	-7	39
200	93	94	-17	65	37	29	30	25	34	49
300	125	155	132	94	77	68	47	29	81	105
400	190	265	200	233	192	169	113	81	121	144
500	212	295	245	230	225	180	135	122	127	145
Y (мм)										

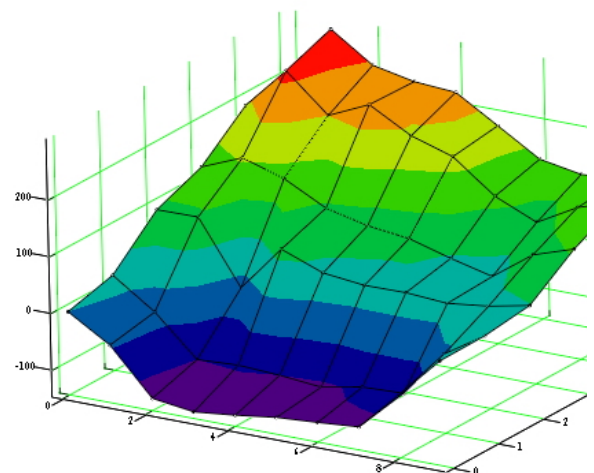
Таблиця 6.4. Середні значення нерівності (мкм) робочого столу верстата, отримані за допомогою фрези ( $\varnothing 40$ ) в комплексі з основним модулем М-30ST та CNC 2C42-65

	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
	X(мм)									
0	0	-37	-100	-127	-129	-120	-97	-100	-30	38
100	35	-33	-91	-83	-105	-94	-81	-83	3	47
200	107	105	-8	82	37	44	44	35	47	58
300	121	163	144	115	92	75	64	42	91	113
400	200	285	220	246	210	191	122	94	127	154
500	225	320	265	250	237	205	157	140	140	160
Y (мм)										

За результатами, отриманими із вищезгаданих дослідів, були побудовані карти-схеми руйнацій робочої поверхні стола фрезерного верстата (рис. 6.46, рис. 6.47).



а)



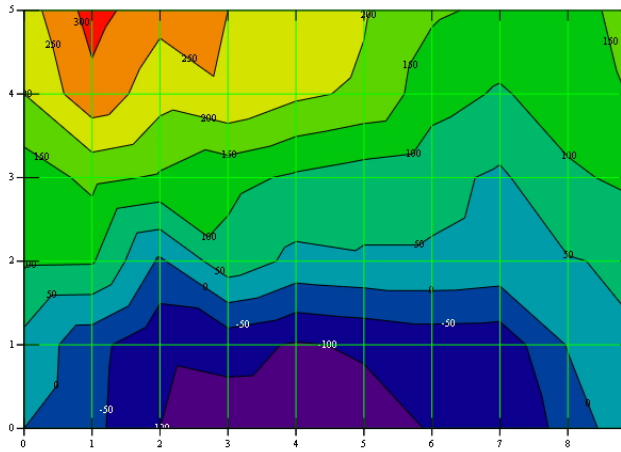
б)

Рис. 6.46. Руйнації робочої поверхні стола, отримані при вимірюванні периферійним модулем АВГ-М17, де: а - карта-схема стола у межах столу; б - просторове розташування руйнацій поверхні.

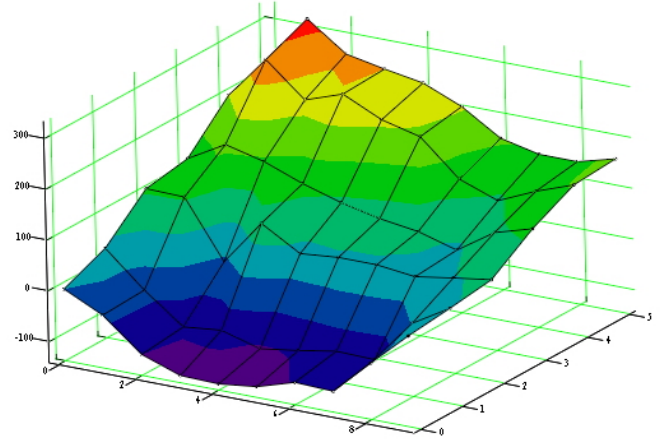
Окрім того, було обчислено різницю між цими вимірами (рис. 6.48).

У процесі проведення дослідів визначалися дуальність позиціювання різального інструмента за координатою  $X$ .

Дані щодо ефекту дуальності позиціонування різального інструмента за координатою  $X$ , отримані внаслідок проведення експериментальних дослідів стану фрезерного обладнання, наведені у табл. 6.5 та рис. 6.49.

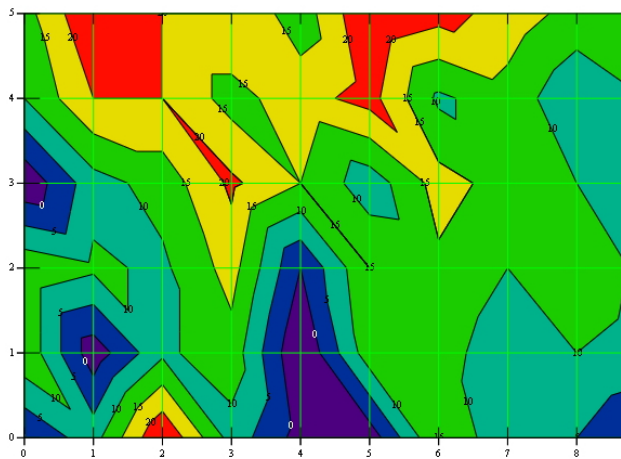


а)

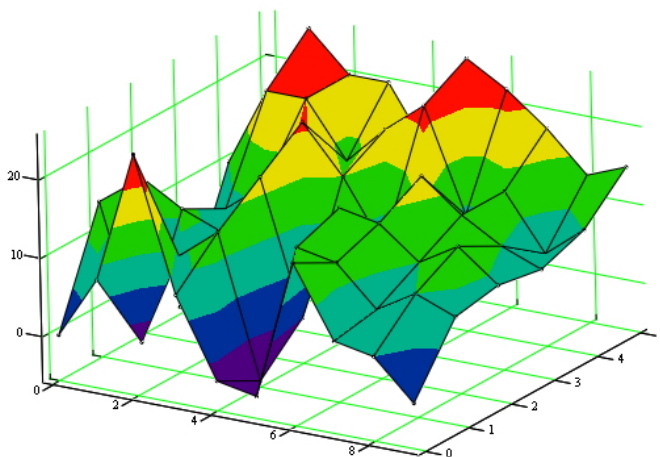


б)

Рис. 6.47. Руйнації робочої поверхні стола, отримані при вимірюванні фрезою ( $\varnothing 40$ ), де: а - карта-схема стола у межах стола; б - просторове розташування руйнацій.



а)

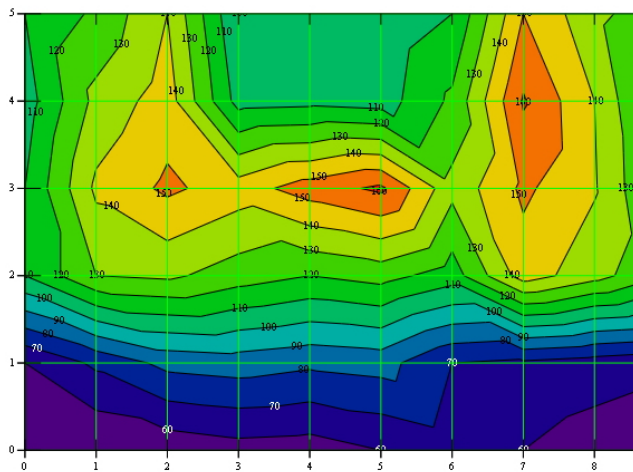


б)

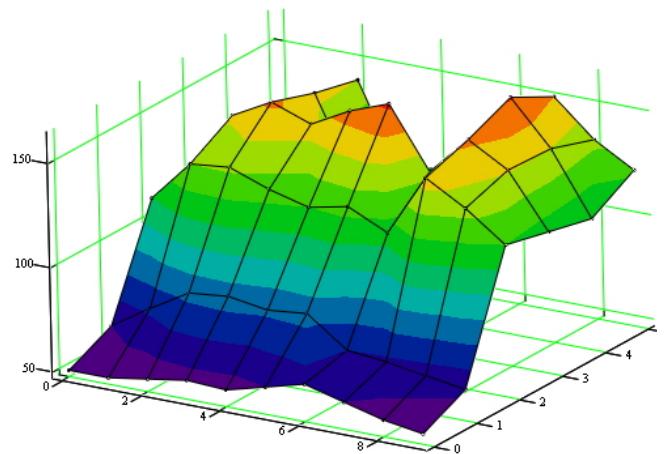
Рис. 6.48. Розходження при вимірах руйнацій периферійним модулем АВГ-М17 та фрезерним інструментом, де: а - карта-схема стола у межах стола; б - просторове розташування руйнацій поверхні.

Таблиця 6.5. Середні значення дуальності (мкм) у площині  $XU$  (вздовж координати  $X$ ) верстата, отримані за допомогою вимірювальної головки М17 в комплексі з CNC 2C42-65

	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
	X(мм)									
0	50	50	53	56	55	60	65	60	55	52
100	60	72	83	85	82	84	70	68	65	62
200	110	130	132	125	120	124	115	145	134	120
300	110	142	152	145	155	162	133	152	141	115
400	105	133	145	106	107	105	122	161	140	110
500	110	122	140	100	105	102	110	150	133	122
Y (мм)										



а)



б)

Рис. 6.49. Середнє статистичне значення дуальності координати у межах площини  $XU$  за координатою  $X$  АВГ М17 та М-30СТ (мкм), де: а - карта-схема стола у межах робочого простору верстату; б - просторове розташування руйнацій поверхні.

Проведені експерименти показали, що існує різниця між методиками виміру. Як показали посередні досліди, основним чинником розходжень є те, що на відміну від АВГ М17, котра торкається інтегрувальної плитки у центрі, крапка торкання торцем фрези невизначена у координатах плитки.

Оскільки плитка за кожної нової установки міняє кут нахилу своєї вимірювальної площини залежно від загальної руйнації, то це призводить до

збільшення результатів вимірів. Одночасно досліди довели, що найбільшому руйнівному впливу піддалася частина робочого стола, яка була не захищена фрезерним пристосуванням.

Дуальність, як явище притаманне рушійній системі будь-якого верстата, у першу чергу, має вплив на точність координат, які окреслюють межі розташування контуру деталі, що обробляється [92, 93]. Цей висновок був зроблений після визначення розмірів деталей та типового руху різального інструмента вздовж цієї траєкторії.

#### **6.5.1.3. Результати досліджень глибини руйнацій при негативних технологічних процесах**

При негативних технологічних процесах дуже важливою є ситуація, коли РІ врізається у поверхню ТО. Особливо важливо це у двох випадках, а саме:

- визначення координати поверхні при обмеженому (конкретно визначеному) полі допуску;
- нештатні (аварійні) ситуації, коли різальний інструмент на великій швидкості врізається у поверхню деталі.

В обох вищезначених випадках розвиток подій, пов'язаних з цими ситуаціями, є вимогою виконання двох умов.

Перша умова є умовою виключно метрологічною або технологічною, яка вимагає виконати деталь згідно технічного завдання.

Друга умова є умовою виконання блокувальних дій стосовно технологічного обладнання, тобто не дозволити його руйнування.

Основою подібних ситуацій є збої систем керування (CNC), які призводять до занадто великих величин швидкості подачі різального інструмента у бік поверхні деталі. Для того, щоб імітувати подібну ситуацію, вихід «сигнал присутності» підключався до відповідних входів систем CNC, а саме «Skip Signal». Оскільки попередньо була відома координата поверхні деталі, то оцінювалася різниця між нею та координатою зупинки інструмента.

Досліди проводилися на верстатах ТПК-125В та TNL-45 (рис. 6.50).

У результаті проведених експериментальних дослідів було з'ясовано, що:

- глибина врізання РІ у масу ТО має значну залежність від швидкості обертання;
- на малих подачах та великих швидкостях обертання торкання фізичних мас РІ та ТО відсутнє;

- система формування сигналу «зона присутності» має властивість повного блокування надзвичайних ситуацій.

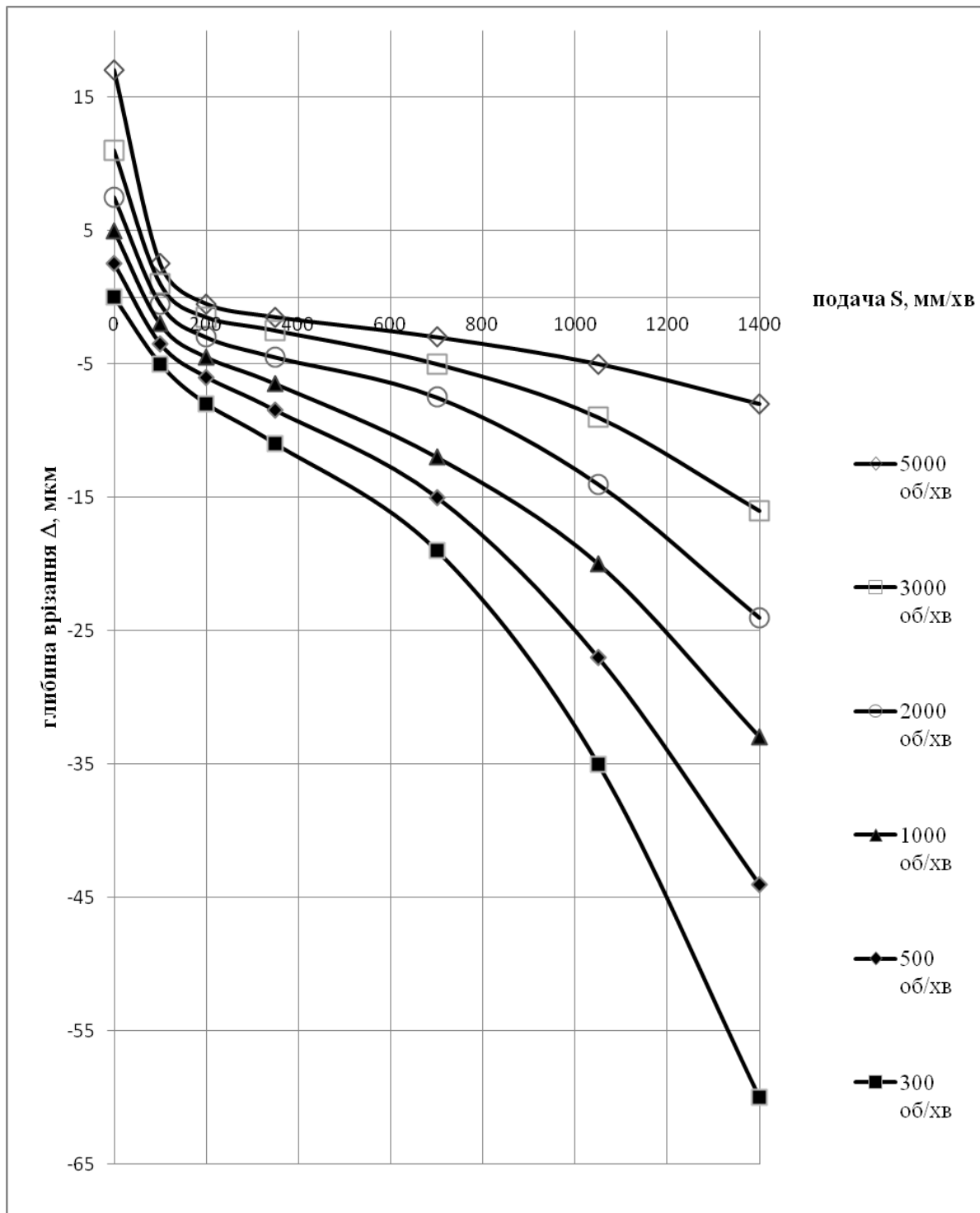


Рис. 6.50. Залежність глибини врізання від швидкості подачі інструмента і швидкості обертання деталі (пара Т15К6-Ст45)

### 6.5.2. Методика проведення контролю люфтів за координатними осями верстата

При визначенні люфтів координатних осей верстата використовувалася периферійна вимірювальна головка М-17 (рис. 6.51, поз. 1) у комплексі із основним модулем М-30ST, встановленим на поверхню фрезерного верстата.



Рис 6.51. Вимірювання люфта координатних рушіїв верстата за допомогою вимірювальної головки М-17 та плити Йогансона

У якості зразкового елемента довжини було застосовано кінцеві міри (рис. 6.51, поз. 2) 50 та 100 мм (плитки Йогансона).

При вимірюванні плитка встановлювалася на магнітну плитку (рис. 6.51, поз. 3).

Такі вимірювання проводилися за всіма трьома координатами фрезерного верстата. Торкання для обміру проводилося як у автоматичному режимі із використанням команди G05, так і в ручному покроковому за умови режиму 1 мкм/крок.

За результатами експериментальних дослідів було отримано графічну схему, що пояснює ефект дуальності поверхні стола верстата та процес його визначення, що відображено на рис. 3.3.

Використання подібної методики дозволяє швидко та із великою точністю визначати наявність та величини люфтів гвинтової пари верстата в різних точках робочого столу.

Це надає можливість визначатися із найменш зношеною частиною верстата, а також є можливість вводити необхідні параметри корекції до пам'яті системи CNC керування роботою фрезерного верстата.



### 6.5.3. Методика визначення жорсткості верстата

Для визначення жорсткості верстата за координатами обробки було обрано деталь, яка за формою є наближеною до куба (рис. 6.52). Матеріал деталі – Сталь 45.



Рис. 6.52. Фото умовної деталі, яка виконувалася під час дослідів щодо жорсткості верстату, зносу інструмента і відхилень геометрії поверхні робочого стола верстата

Для підтримки чистоти досліду обробка велася контурним фрезеруванням. Кожна грань куба перевірялася за допомогою головки периферійного модулю М-17 на геометричні відхилення таким чином, щоб відхилення не становили більше, ніж 5 мкм по всій площині деталі. Як інструмент використовувалася фреза  $\varnothing 40$  мм. Частота обертання шпинделя становила 500 об/хв, а подача – 2,4 мм/хв. По підготовленій поверхні проводилося фрезерування за контуром із глибинами занурення інструмента 1, 2, 3 і 4 мм. Після проходу кожного контуру проводилося по шість вимірів на кожній грані у середньому перетині за допомогою модулю головки М-17 та штатної програми G05 системи керування роботою ТОС.

Незалежні контрольні вимірювання повністю довели тезу про дуальність поверхні вимірювання (див. п.р. 3.2.1).

За результатами проведених вимірювань побудовано графічні залежності (рис. 6.53, рис. 6.54), а також вираховано жорсткість фрезерного верстата за координатами X та Y (рис. 6.55).



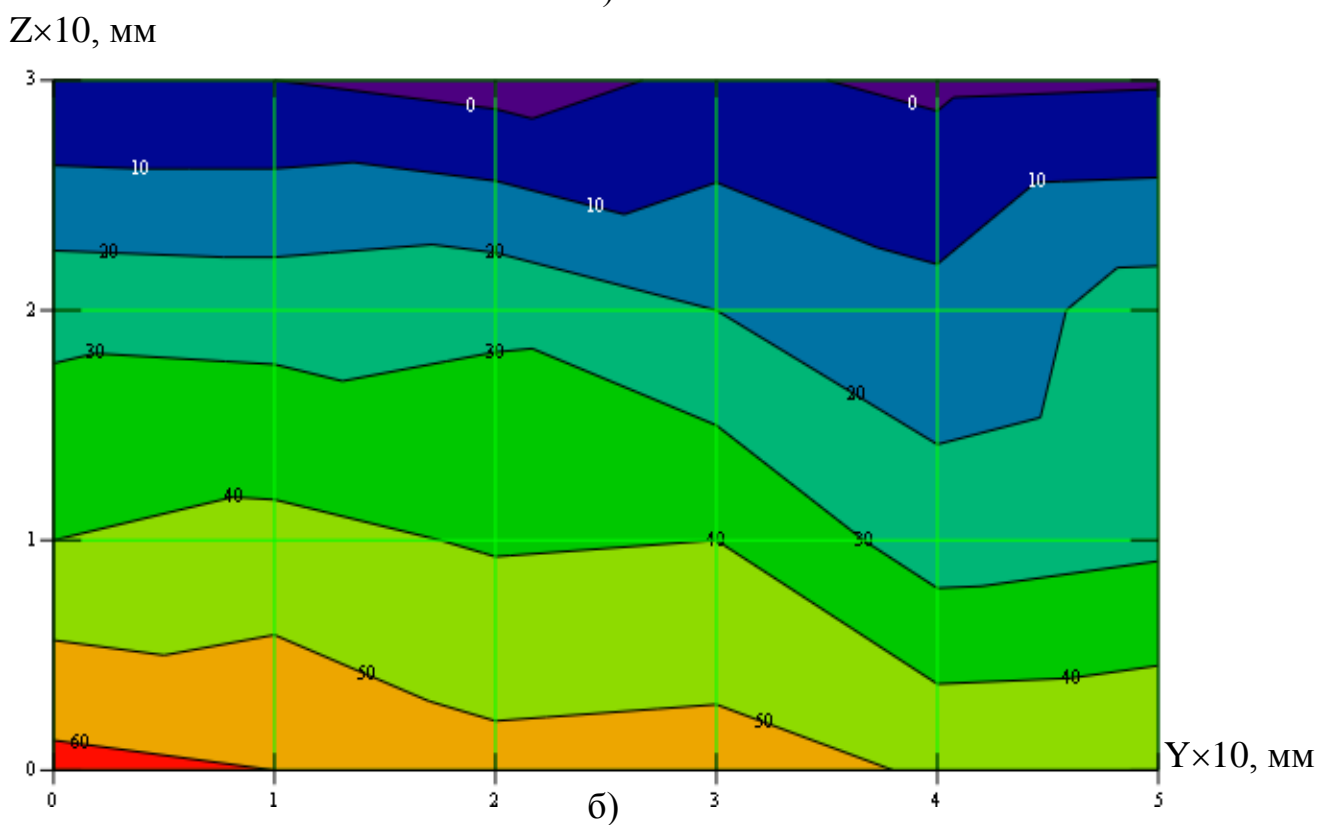
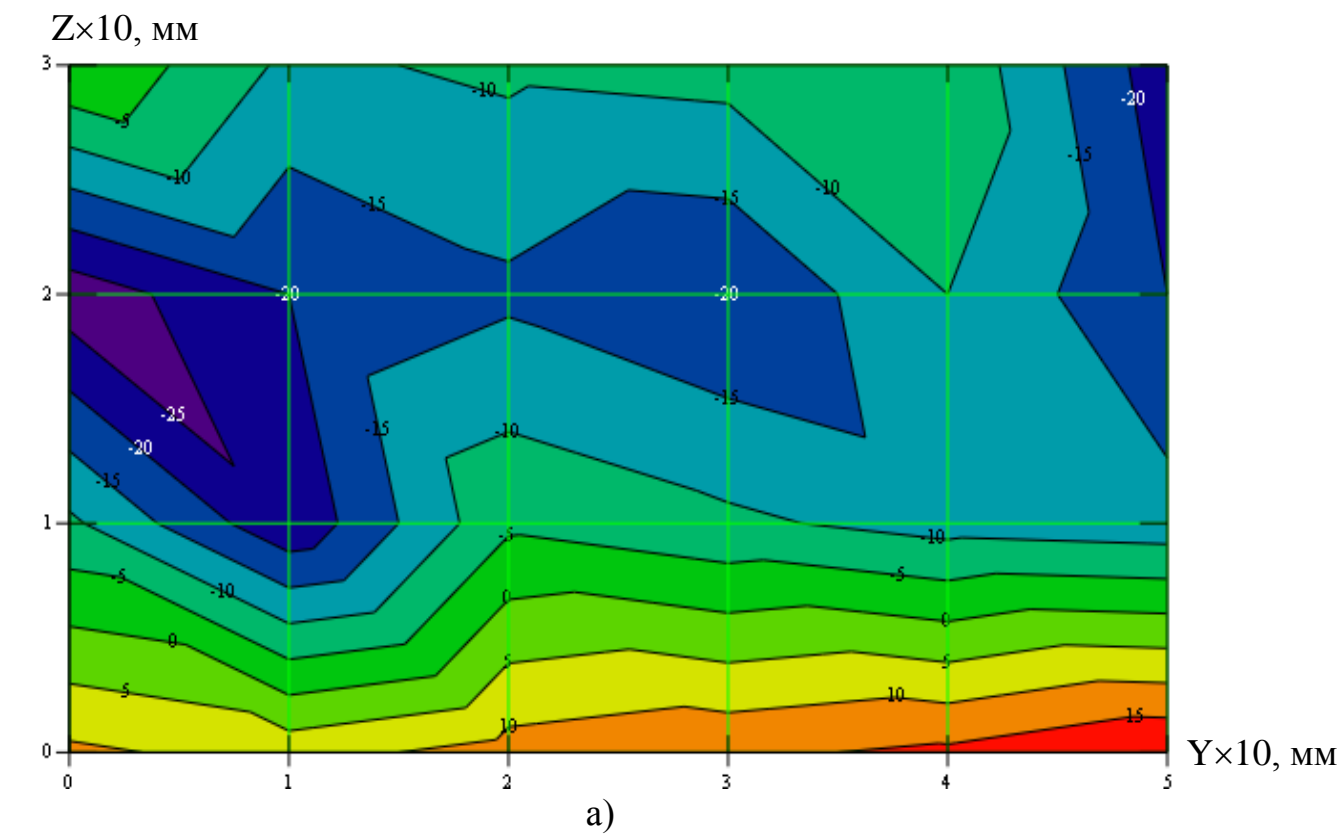


Рис. 6.53. Карта геометричних відхилень поверхні деталі за координатою X,  
де: а) після фрезерування зліва; б) після фрезерування справа.

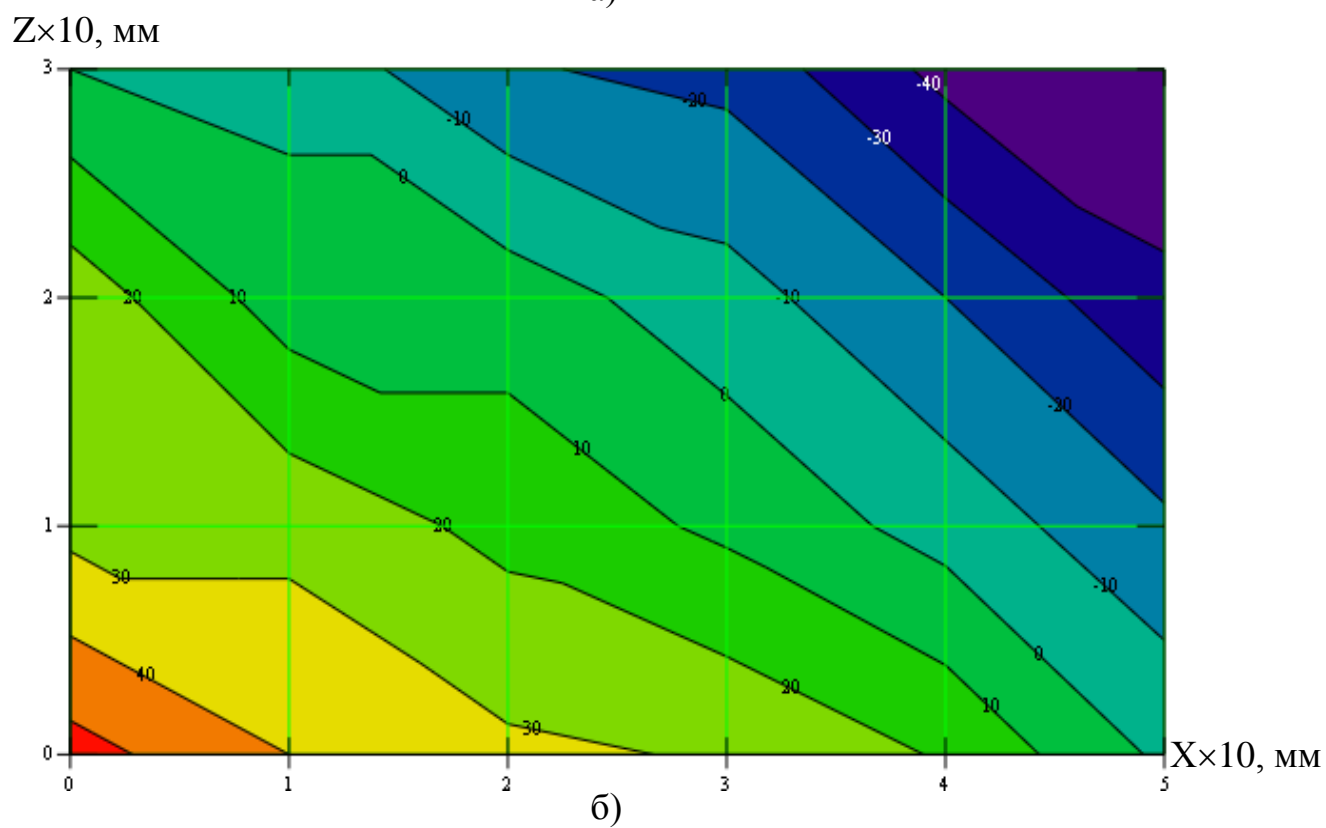
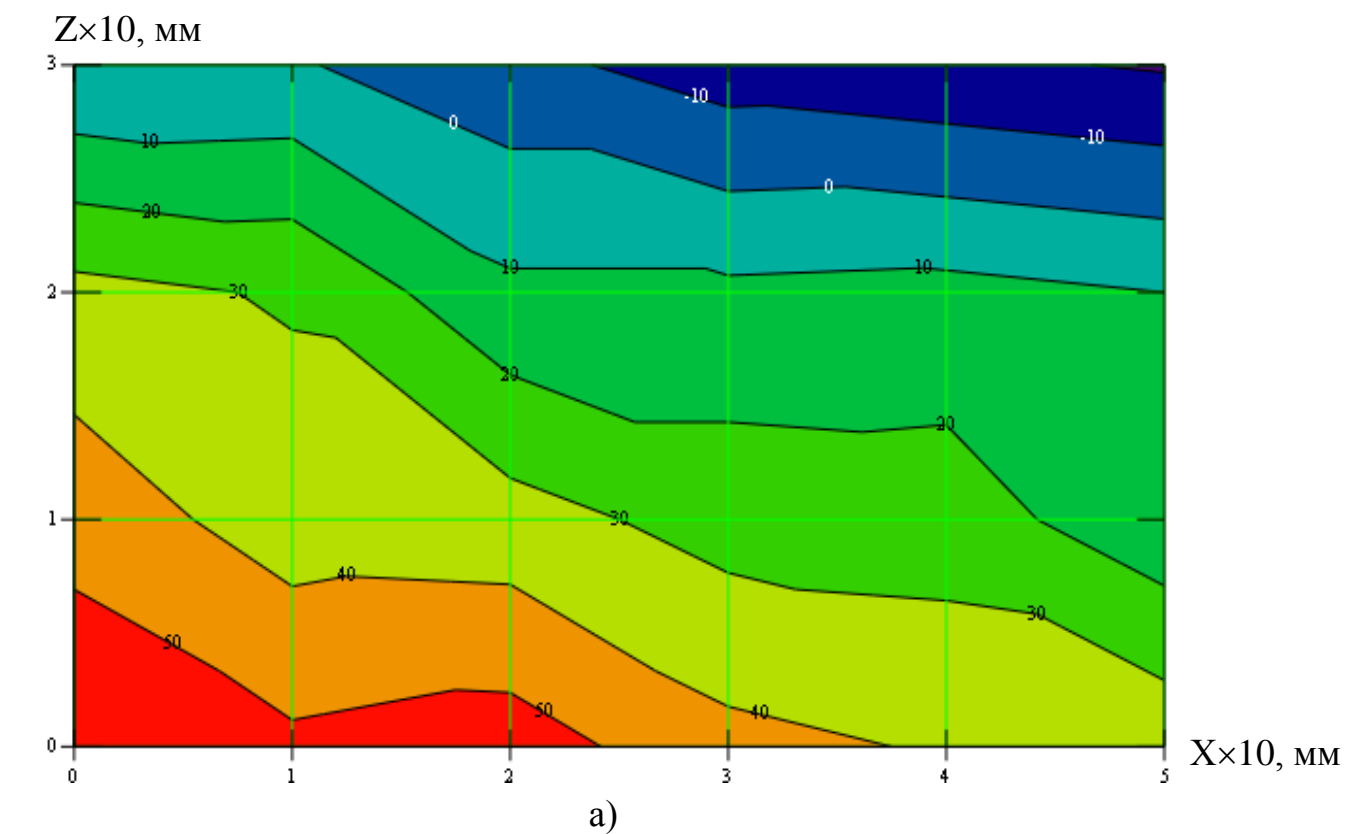


Рис. 6.54. Карта геометричних відхилень поверхні деталі за координатою  $Y$ , де: а) після фрезерування ззаду; б) після фрезерування спереду.

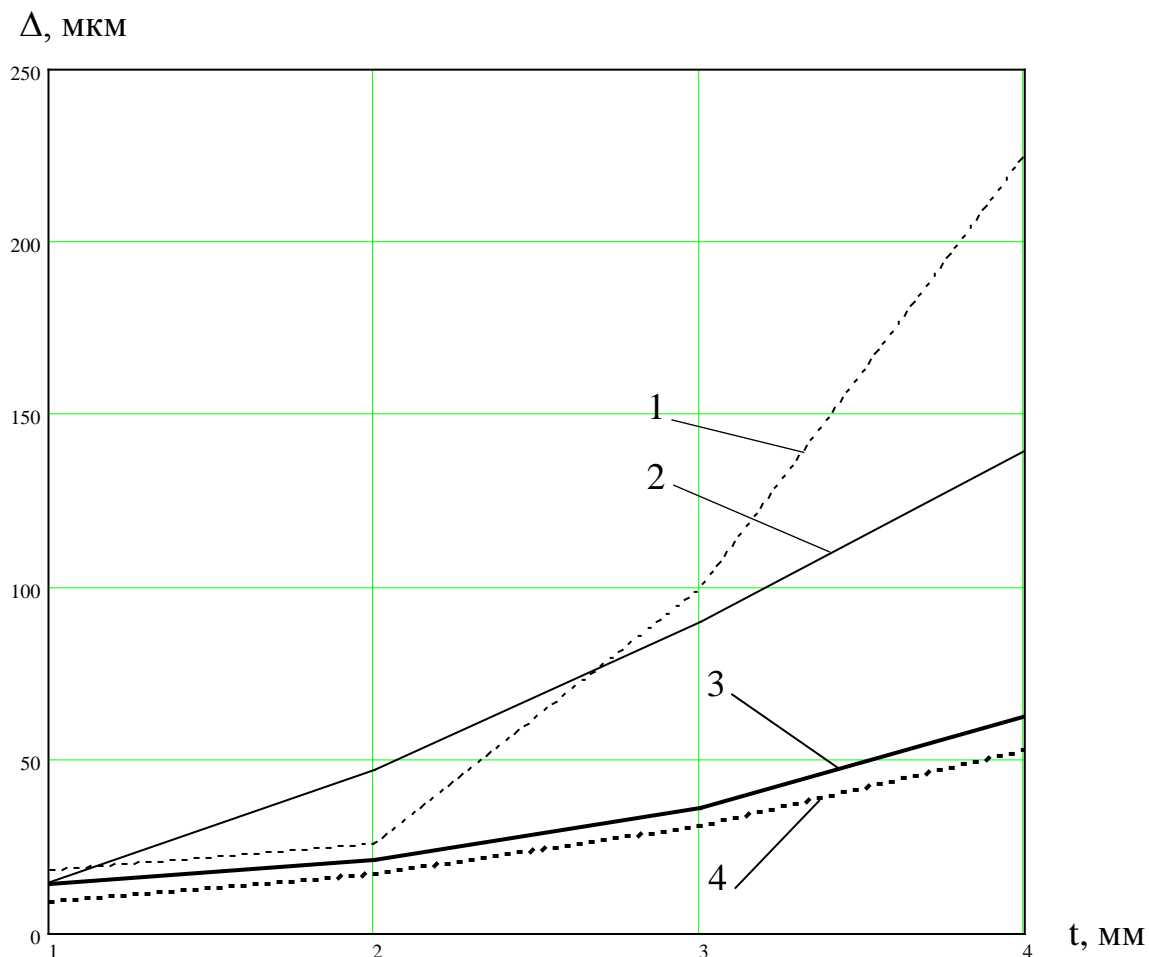


Рис. 6.55. Результати експериментального дослідження жорсткості верстата, де: 1 – фрезерування кубу зліва (координата X); 2 – фрезерування кубу справа (координата X); 3 – фрезерування кубу спереду (координата Y); 4 – фрезерування кубу ззаду (координата Y).

Проведені експериментальні дослідження повністю довели можливість підвищення точності вимірювань та визначення жорсткості фрезерного обладнання внаслідок застосування створеної контрольно-вимірювальної системи, що може підтримувати ресурс роботи зношеного обладнання.

#### 6.5.4. Методика визначення зносу різального інструмента

Для визначення величини зносу різального інструмента були спочатку проведені підготовчі роботи аналогічно попередньому досліді (див. п.р. 6.5.3). Щодо інструмента, то для більш наближеної до виробничої ситуації було обрано фрезу, яка пройшла переточку ( $\varnothing 17,2$  мм). Режим роботи наступний: обертання різального інструмента – 750 об/хв; подача – 20 мм/хв; глибина –

1 мм. Після безперервного фрезерування за контуром проводилося вимірювання геометричних відхилень по кожній із граней. Для цього по кожній грані проводилося по 24 виміри, якими обмірювалася площа 40×60 мм (сітка вимірів є 10×10 мм). Вимірювання проводилося периферійним модулем – вимірювальною головкою М-17.

Основною метою експериментального дослідження було визначення місць інтенсивного зносу різального інструмента в різних його перетинах. Для цього було застосовано методику інтегрування відхилень отриманої поверхні від ідеальної на чотирьох рівнях горизонтального перетину куба. За результатами цих вимірювань було побудовано карти геометричних відхилень граней. Згідно цих карт було побудовано графіки зносу інструмента (рис. 6.56).

$h_z$ , мкм

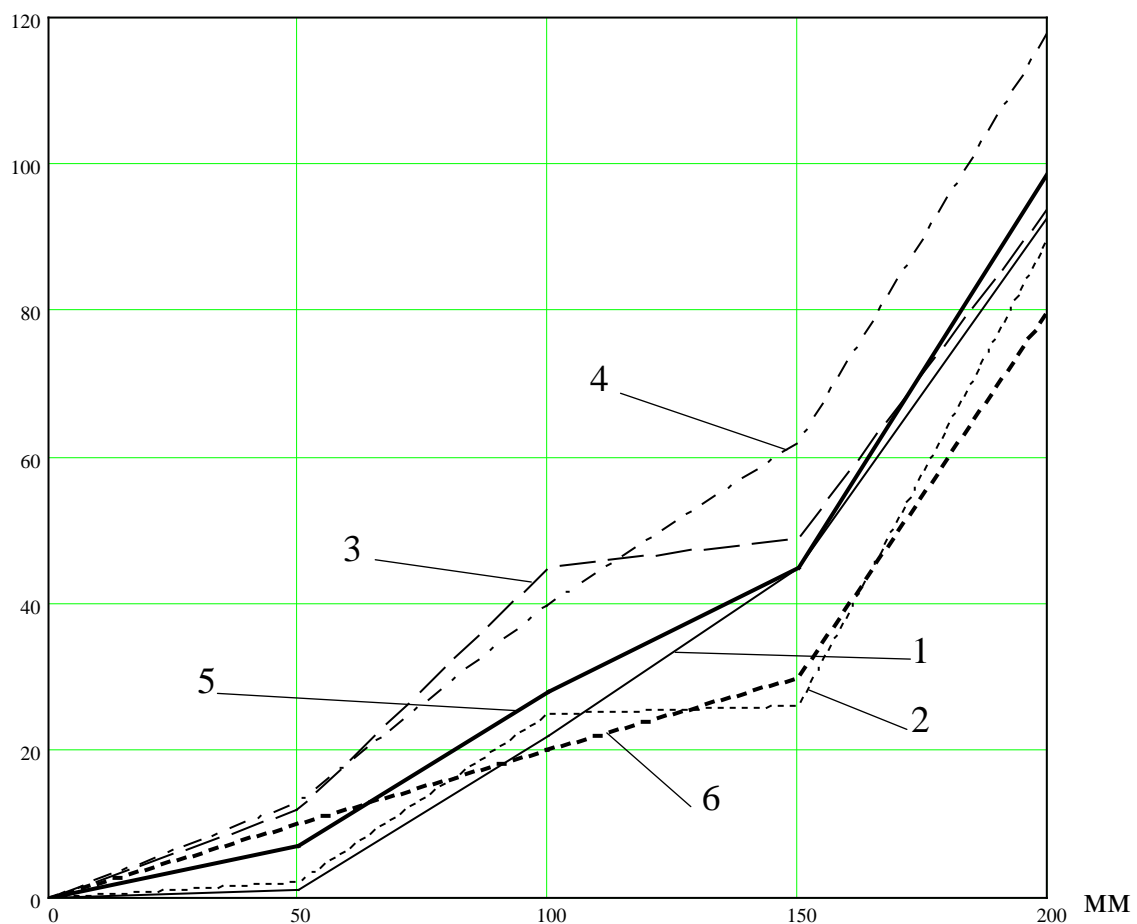
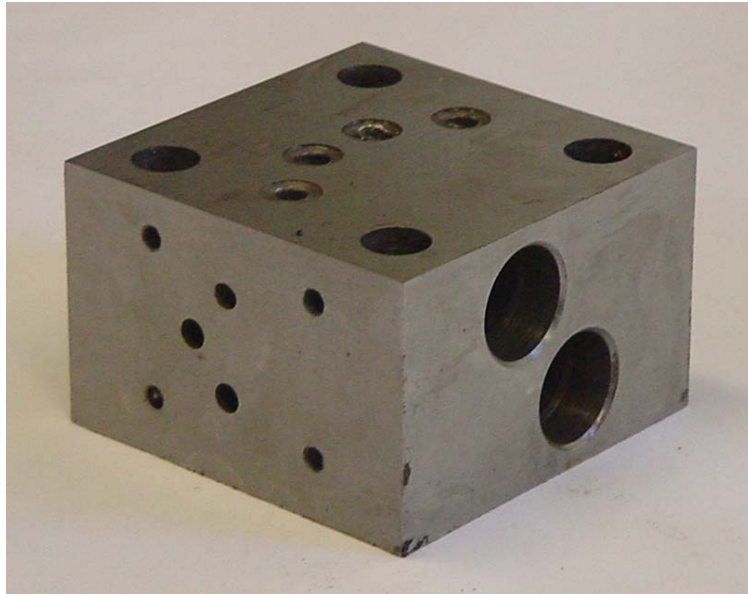


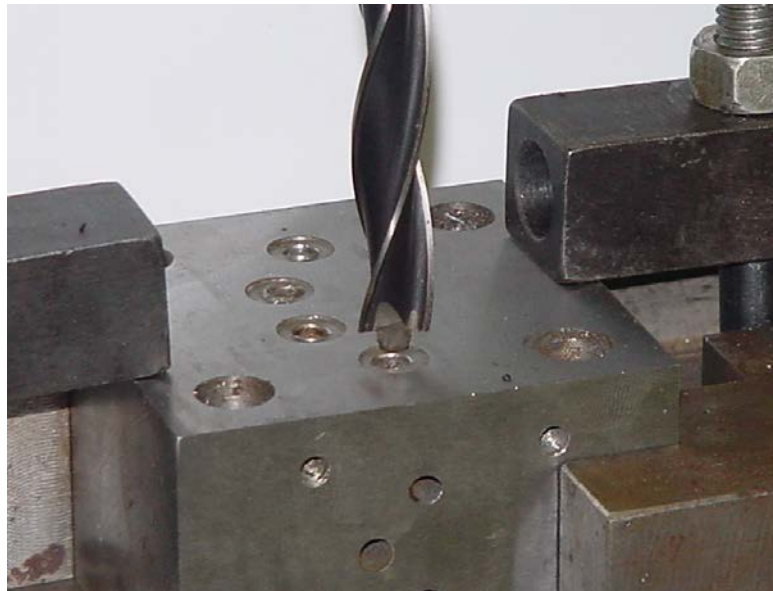
Рис. 6.56. Результати дослідження зносу різального інструмента в різних перетинах, де: 1 – відстань 5 мм від верхівки фрези; 2 – відстань 15 мм від верхівки фрези; 3 – відстань 25 мм від верхівки фрези; 4 – відстань 35 мм від верхівки фрези; 5 – середнє значення зносу інструмента; 6 – результати середніх вимірювань мікрометром.

### 6.6. Практичне застосування системи контролю торкання в умовах сучасного виробництва

При проведенні дослідних робіт у виробничих умовах на верстаті із системою ЧПК було поставлено задачу, яка вимагала великої точності виконання. Для цього було обрано деталь гідросистеми із циліндричними комірками глибиною в 1,8 мм (рис. 6.57). Необхідна точність виконання розміру цієї деталі становить не гірше за 10 мкм.



а)



б)

Рис. 6.57. Приклад використання СКТ у виробничому процесі, де: а) загальний вигляд деталі гідросистеми; б) момент технологічного процесу обробки

У цехових умовах комірка виконувалася центр-зенкером спеціальної форми. Для цього використовувалося поступове наближення до необхідного розміру, коли інструмент по мірі заглиблення виводився з зони обробки. За кожного виходу інструмента із маси деталі необхідно було прочистити зону обробки (стисле повітря), і після цього провести вимір глибини мініметром. Загальна кількість таких технологічних циклів могла сягати п'яти разів, що значно подовжувало час виконання деталі, мало незручності та вимагало високої кваліфікації оператора.

Використовуючи можливості СКТ та особливості конструкції деталі, було розроблено нову технологію виготовлення комірок.

Для виготовлення комірок за новою технологією площина їх розташування використовувалася як базова, оскільки мала високий клас чистоти поверхні ( $0.2\sqrt[3]{}$ ). Оскільки центральна частина центр-зенкера при входженні в отвір, відносно якого робилася комірка, торкалася бокової поверхні, то досягти необхідної точності розміру було неможливо через невизначеність координати торкання. Для того, щоб визначитись із цією координатою, верхівкою зенкеру торкалися спочатку поверхні розташування комірок, визначаючи таким чином її координату і відпрацьовуючи операцію прив'язки до поверхні старту обробки.

На наступному етапі визначалася відстань від різальної кромки до верхівки. Для цього інструмент виводився у край деталі за координатою X або Y. Відпрацьовувалося торкання різальної кромки із поверхнею, внаслідок чого отримувалася координата її розташування відносно поверхні обробки. Надалі виводилися необхідні корекції за допомогою інструмента.

Користуючись отриманою інформацією, відроблялося дві методики:

а) торкання верхівкою інструмента в місці очікуваної обробки; фіксація координати торкання та введення необхідної корекції до ПЧПК; вихід на координату зенкування та виготовлення комірки;

б) торкання різальною кромкою поверхні деталі на краю деталі; фіксація координати торкання та введення необхідної корекції до ПЧПК; вихід на координату зенкування та виготовлення комірки.

Як показали досліди, точність виготовлення за першим методом є більш високою, але не враховує інтенсивності зносу різальної кромки. Основним чинником високої точності було визнано те, що координата торкання отримується безпосередньо на місці майбутньої комірки.

За другим методом, хоч і можливе автоматичне врахування плинного зносу інструмента, але базова поверхня за кожної установки нової деталі мала різні кути нахилу до площини робочої поверхні столу верстата. Це було перевірено перехресними дослідями, і повністю підтвердило цю тезу.

Використання вищеописаних методик дозволило виконувати виготовлення комірки з одного технологічного проходу обробки.

### **6.7. Методика підтримки точності верстатів із системою ЧПК при застосуванні системи контролю торкання**

При встановленні СКТ із периферійними модулями на верстат із системою ЧПК виникають наступні проблеми які пов'язані з їх сумісною роботою:

- для виконання операцій із визначення координати торкання інструмента до деталі необхідно провести деякі удосконалення верстату;
- фізичний принцип роботи СКТ висуває низку вимог щодо використаного інструмента й обладнання;
- необхідно виконати умови щодо розташування електромагнітних відчутників на верстаті;
- необхідно виконати умови щодо систем реєстрації інформаційного сигналу, його передачі та її обробки;
- необхідно переробити математичне та алгоритмічне забезпечення системи CNC керування обробним технологічним обладнанням.

Подібні викладені методики доцільно застосовувати при підготовці майбутніх кваліфікованих працівників з обробки металу [190, 191, 192], які працюють на верстатах з ЧПК з достатньо довготривалим ресурсом експлуатації. Запропоновані авторами методики дозволять відновити ресурс верстат та забезпечити потрібну точність виготовлення деталей на зношеному обладнанні.

#### **6.7.1. Вимоги до механічної частини верстата**

Основною проблемою при використанні СКТ із вище означеним фізичним принципом роботи полягає у нестабільності електричного опору в ланцюгу: верстат-інструмент-деталь-притискування.

Найбільш вразливою частиною цього кола є контактні поверхні шпинделя з масою верстату. Якщо без обертання шпинделя електричний опір шпинделя є статичним і не має ніякого впливу на якість визначення моменту торкання, то

при його обертанні опір підвищується і негативно впливає на процес, що є вкрай небажаним. Чим більші оберти на шпинделі тим більший електричний опір між ним та верстатом. Врешті-решт опір стає занадто великим для нормального спрацювання системи.

Для боротьби з цим явищем необхідно витримати стабільним електричний опір контактних поверхонь, але виконання певних переробок у шпинделі не є можливим через сталу конструкцію цієї частини верстату. Тому вихід є через застосування невеликих механічних пристосувань у межах шпинделя. Найпростішим таким пристосуванням є спеціальний центр, розташований на осі шпинделя, який складається із кульової опори, притиснутої до маси шпинделя. За такої конструкції, як би не оберталася кулька, в опорі завжди буде існувати мінімум дві крапки на її поверхні, де швидкість обертання дорівнює нулю. Такі системи пройшли випробовування і довели свою працездатність у широкому діапазоні швидкостей обертання.

#### **6.7.2. Вимоги до розташування периферійних модулів електромагнітних відчутників у складі верстата**

Внаслідок специфіки своєї роботи електромагнітний відчутник повинен розташовуватися якомога ближче до обертаємої частини шпинделя.

З огляду на максимальну ефективність його роботи найкращім місцем розташування периферійних модулів електромагнітних відчутників є на кільці, що закриває нижню частину шпинделя (підшипники) і охоплює його обертаєму частину.

Безпосереднє базування відчутника на цьому кільці не є оптимальним, оскільки обмежує простір використання інструмента. Тому найбільш достеменним варіантом монтажу є його встановлення безпосереднє у масі захисного кільця.

Зробити це можна двома способами.

За першим варіантом доробляється штатне кільце верстата, а за другим виготовляється нове, як це відображено на рис. 6.58.

Привабливість другого варіанту полягає в тому, що існує можливість використання матеріалів зі специфічними магнітними властивостями, що поліпшує роботу контрольно-вимірювальної системи в цілому. Приклад виконання такого кільця наведено на рис. 6.18.



### 6.7.3. Вимоги до узгодження системи контролю торкання із системою керування CNC

При вирішенні питання узгодження СКТ зі системою CNC керування фрезерним обладнанням виникає низка проблем, які необхідно вирішити для досягнення відповідної ефективності роботи всього комплексу взагалі.

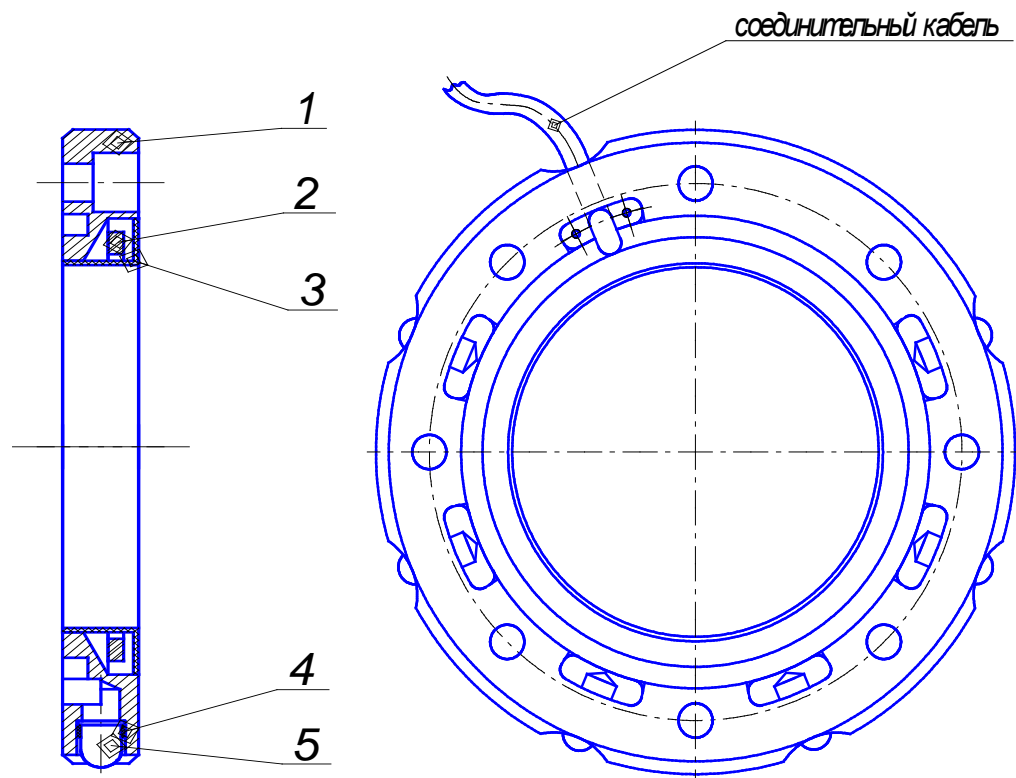


Рис. 6.58. Приклад виконання електромагнітного відчутника, де: 1 – корпус; 2 – феромагнітне осердя з обмоткою; 3 – захисний пластиковий кожух; 4 – кільце; 5 – світлодіод.

Першочерговою проблемою є низька швидкодія старих процесорів систем CNC (р. 1, п.р. 6.3). Як наслідок, існує бар'єр точності, яку можна отримати за максимальної швидкодії подачі, тісно пов'язаний зі швидкістю роботи процесора. Так, максимальна швидкість подачі при використанні стійки керування 2C42-65 становить 2 мм/хв за швидкістю прийняття рішення про зупинку 20 мс. Стійка має лише два інформаційні входи для СКТ – «Вимірювання» та «Аварія», що значно звужує можливості використання систем торкання.

Для порівняння система «FANUC-NC» має чотири швидкісні входи для роботи з СКТ із відповідною швидкістю реагування 100 мкс, 500 мкс, 1200 мкс та 2,5 мс, що надає можливості досягти вже швидкості у 60 мм/хв без втрати точності, тобто у 30 разів більше за 2C42.

Звідсіля можна дійти висновку про те, що існує нагальна проблема різкого підвищення швидкодії не стільки всього процесора, скільки якості швидкісного зв'язку із СКТ та формування відповідних команд.

Другою нагальною проблемою є кількість каналів зв'язку між СКТ та CNC. Модуль M-30ST є однією із найпростіших систем торкання з ручним встановленням режиму роботи та контролю, але вже існує проблема узгодження із системою керування роботою ТОС. Частково використання інформаційних каналів СКТ, хоч і можливе, але не оптимальне.

#### **6.7.4. Вимоги до алгоритмічного забезпечення роботи системи контролю торкання із системою CNC верстата**

При роботі СКТ нового типу із системою CNC керування роботою верстата штатне програмно-алгоритмічне забезпечення не є задовільним, оскільки існує різниця у способах визначення координати поверхні (п.р. 4.1).

На малих швидкостях подачі, які запрограмовані у штатній програмі G05 при роботі з периферійним модулем системи - головкою M-17, практично ці розходження непомітні. Але при можливості перепрограмування програми G05 на більш високі швидкості слід очікувати значних похибок, тому алгоритм команди слід достеменно переробляти.

Суттєвим недоліком цієї програми є те, що вона виконує торкання в одній крапці поверхні, і не є можливим утворювати розгортку по поверхні у вигляді ланцюга вимірювань. Для цього необхідно задаватися ланцюгом із алгоритмів (програмного забезпечення), побудованих на засадах формування команди G05. Проте, наприклад, основний модуль M-30ST контролю торкання має можливість оцінювати геометричні відхилення поверхні (хвилястість, шорсткість). Тобто існує нагальна проблема перепрограмування алгоритмів вимірювання згідно (розд. 5).

Ще одним недоліком штатної програми вимірювання є блокування обертального руху шпинделя.

У цьому вигляді програма не дає можливості працювати з інструментом у межах маси деталі. Це створює певні незручності та більшу невизначеність із отриманою координатою поверхні, як було доведено у п.р. 3.2.

Обертальний рух інструмента надає можливість вкрити більшу за розмірами площу вимірами, ніж статичний. Така ситуація призводить до того, що при використанні системи 2C42 неможливо, наприклад, проводити одночасно обробку поверхні та контроль якості торкання. Внаслідок цього втрачається ще одна важлива функція СКТ – контроль стану інструмента в процесі виготовлення точної деталі. Наявність штатної команди E7 (адаптивний контроль обробки) не може повністю вирішити цю проблему оскільки має межі застосування.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 6

1. Розроблено новий контрольно-вимірювальний комплекс для використання на верстатах із системою ЧПК [34], який підвищує точність, навіть зношеного обладнання, себто підвищує ресурс його роботи при виготовленні точних деталей приладів.
2. Розроблено низку нових методик для визначення похибок роботи зношених верстатів із ЧПК різних типів, які надають можливості підвищення ресурсу роботи та необхідної точності виготовлення деталей.
3. Доведена дієздатність розроблених методик із використанням СКТ нової конструкції в реальному приладобудівному виробництві.
4. Проведені експериментальні дослідження щодо застосування СКТ на реальних деталях технологічного процесу, зокрема фрезерної обробки, які довели доцільність використання в автоматизованому виробництві.
5. Вироблено практичні умови та вимоги до застосування СКТ у комплексі з системами CNC керування технологічним обладнанням щодо підтримки загальної точності та подовження ресурсу роботи зношеного верстата, які є доцільними для опанування працівниками промислового виробництва.

## ПІСЛЯМОВА

Розглянуто сучасний стан верстатного парку більшості промислових підприємств України та зроблено висновки щодо способів підтримки їх у належному стані, які полягають у тому, що потрібним наразі є розвиток методів та технічних засобів щодо ресурсозбереження обробного технологічного обладнання, зокрема фрезерних верстатів як одного з найбільш поширених типів обладнання. Визначено пріоритетні напрями роботи стосовно підтримки точності верстатів із системою ЧПК.

Визначено, що головним напрямом підтримки точності роботи верстатів є необхідність у високоякісній реєстрації моменту торкання інструмента до поверхні деталі, яку оброблюють.

Створено теоретичні засади багаторазового швидкісного торкання різального інструмента до поверхні деталі при її обробці, на підставі яких запропоновано низку нових методик для визначення похибок роботи зношених верстатів із ЧПК різних типів, які надають можливості підвищення ресурсу роботи та необхідної точності виготовлення деталей.

Розроблено базове алгоритмічне забезпечення роботи СКТ у складі з ЧПК, що забезпечує підтримку роботи обладнання за умови його значного терміну експлуатації.

Проведено експериментальні досліді із застосування запропонованого контрольно-вимірювального комплексу в складі металообробного фрезерного обладнання в реальних заводських умовах, який підвищує точність, навіть зношеного обладнання, себто підвищує ресурс його роботи при виготовленні точних деталей приладів.

Вироблено умови підтримки працездатності верстатів з ЧПК при застосуванні СКТ, які довели доцільність створених вимог до системи контролю, а також можливість ресурсозбереження зношених верстатів.

Результати дослідження обумовлюють теоретичні засади збереження ресурсу та підтримку належної точності роботи зношеного металообробного обладнання та їх практичне підтвердження, що доведене експериментальними дослідями в умовах приладобудівного виробництва.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Балакшин, Б.С. Основы технологии машиностроения [Текст] / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1966. – 556 с.
- 2 Тепинкичиев, В.К. Металлорежущие станки [Текст] / В.К. Тепинкичиев, Л.В. Красниченко, А.А. Тихонов, Н.С. Колев. – М.: Машиностроение, 1970. – 464 с.
- 3 Бочков, В.М. Обладнання автоматизованого виробництва [Текст] / В.М. Бочков, Р.І. Сілін. – Львів: Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 2000. – 380 с.
- 4 Основы технологической подготовки производства приборов; под общ. ред. В.А.Остафьева [Текст]. – К. : Вища школа, 1977. – 172 с.
- 5 Ковшов, А.Н. Технология машиностроения [Текст] / А.Н. Ковшов. – М. Машиностроение, 1987. – 320 с.: ил.
- 6 Лещенко, В.А. Станки с числовым программным управлением [Текст] / В.А. Лещенко, Н.А. Богданов и др. - М.: Машиностроение, 1988. - 568 с.
- 7 Кузнецов, Ю.Н. Станки с ЧПУ [Текст] / Ю.Н. Кузнецов. - К.: Вища шк., 1991. – 287с.
- 8 Справочник по промышленной робототехнике [Текст]: в 2-х кн. Кн.1; под ред. Ш. Нофа; пер. с англ. Д.Ф. Миронова и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.: ил.
- 9 Алексеев, А.Н. Ремонт станков. Теория и реализация САПР [Текст] / А.Н. Алексеев. – К.: ИСМО, 1998. – 280 с.
- 10 ДСТУ 2926-94 „Системи якості. Комплекси керування якістю системні технологічні. Основні положення.” [Текст]
- 11 ДСТУ 2927-94 „Системи якості. Комплекси керування якістю системні технологічні. Загальні вимоги до інформаційно-технологічних моделей керування якістю.” [Текст]
- 12 Феофанов, А.Н. Исследование координатно-силовых столов автоматических линий и агрегатных станков [Текст] / А.Н. Феофанов, Т. И. Музафаров, В. А. Ривкин // Станки и инструменты. – № 6. – 1989. – С. 15-18.
- 13 Точность производства в машиностроении и приборостроении; под ред. А. Н. Гаврилова [Текст]. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.
- 14 Сборный твердосплавный инструмент / Г. Л. Хае, В. М. Гах, К. Г. Громаков и др.; под общ. ред. Г. Л. Хае. – М.: Машиностроение, 1989.

- 256 с.; ил. – (Б-ка інструментальщика)
- 15 Медвідь, М. В. Теоретичні основи технології машинобудування [Текст] / М. В. Медвідь, В. А. Шабайкович. – Львів: Видавниче об'єднання «Вища школа», 1976.
  - 16 Мясников, В.А. Программное управление оборудованием [Текст] / В.А. Мясников, М.Б. Игнатьев, А.М. Покровский. – Л.: Машиностроение (Ленинград. отд-ние), 1974. – 270 с.
  - 17 Обработка металлов резанием: Справочник технолога; под общ. ред. А.А. Панова [Текст] / А. А. Панов, В.В. Аникин, Н. Г. Бойм и др. – М. : Машиностроение, 1988. – 736 с.; ил.
  - 18 Булло, С.И. Проверка точности консольно-фрезерных станков по изготовленному образцу [Текст] / С. И. Булло, Л. Ц. Маркович, С. И. Радомысельский // Станки и инструмент. – 1972. – № 9.
  - 19 Гавриш, А.П. Автоматизация технологической подготовки машиностроительного производства [Текст] / А.П. Гавриш, А.И. Ефремов. – К.: Техника, 1982. – 215 с.
  - 20 Меламед, Г. Надежность и долговечность станочных систем [Текст] / Г. Меламед, Ф. Счастливенко. – Минск, 1967. – 224 с.
  - 21 Управление качеством продукции : Справочник [Текст]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 464 с.
  - 22 Инструкция по программированию ЛР.395ПМФ4. Руководство по программированию. Завод им. Я. М. Свердлова [Текст], 1985.
  - 23 Контроль и диагностика в ГПС: монография; под ред. Б.И. Черпакова. Кн. 7 [Текст]. – М. : Высшая школа, 1989. – С. 30 - 80.
  - 24 Глоба, Л.С. Інтелектуальні методи розрахунку та оптимізації режимів різання [Текст] / Л. С. Глоба, Р. С. Сілін // Вісник Технологічного університету «Поділля». – 2000. – № 1. – С. 92 – 96.
  - 25 Скицюк, В.І. Технологія торкання у металообробці та нова класифікація приладів торкання [Текст] // Високі технології в машинобудуванні. Зб. наук. праць ХДПУ. – Харків, 2000. – Вип. 1(3). – С. 231 - 241.
  - 26 Скицюк, В. І. Технологія ТОНТОР: монографія [Текст] / В. І. Скицюк, К. Г. Махмудов, Т. Р. Ключко. – К.: Техніка, 1993. – 80 с.
  - 27 Скицюк, В. І. Технологія торкання технологічних об'єктів. Основні засади. Ч. 1 [Текст] / В. І. Скицюк, Р. С. Сілін // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – № 1. – С.27 – 30.
  - 28 Сафронкин, Г. В. Датчик контроля деталей и инструмента [Текст]

- / Г. В. Сафронкин // Приборы и системы управления. – 1991. – № 9. – С. 36.
- 29 Николаенко, В. М. Электрическая измерительная система для анализа распределения потенциалов и профилей поверхностей [Текст] / В. М. Николаенко, В. Г. Панов, М. И. Гросман // Станки и инструменты. – 1979. – № 11.
- 30 Федотов, А.В. Применение измерительных головок на обрабатывающих центрах / А. В. Федотов, А. Н. Компанейц [Текст] // Станки и инструменты. – 1989. – № 4. – С. 24 - 25.
- 31 Методы управления точностью токарной обработки на станках с ЧПУ типа CNC [Текст]. Кужидэм Збигнев. Киев, спец. ВАК 05.08.01 канд. техн. наук, 1987.
- 32 Pat. 2172224 USA MKI B23Q 17/22. Machine tool contact detector [Текст]. – № 8522624. Заявл. 12.09.1985. Опубл. 15.03.1985. Daishowa Seiki Co Ltd (Japan).
- 33 Патент 30120 Україна, МКІ 6 В 23 Q 17/22. Спосіб реєстрації присутності та торкання різального інструмента [Текст] / В.І.Скицюк, М.В.Скицюк. – Заявка № 97126364. Заявл. 29.12.97; Опубл. 12.11.2000. – Бюл. № 15. – 7 с.
- 34 Патент 52357А Україна, МКИ В23Q17/00, G05B19/18. Адаптивний спосіб реєстрації присутності та торкання різального інструменту до деталі [Текст] / В.І. Скицюк, Р.С. Сілін. Заявка №2002043045. Заявл. 15.04.2002. Пріоритет 16.12.2002. Опубл. 16.12.2002., Бюл. №12.
- 35 DAISHOWA SEIKI CO., LTD. FA Dept. CATALOG №52,53,51,63,68. [Текст]. 1998.
- 36 Технические средства диагностирования: Справочник [Текст] / В.В.Клюев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; под общ. ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.
- 37 Методы акустического контроля металлов: монография [Текст] / Н.П.Алёшин, В.Е.Белый, А.Х. Вовилкин и др.; под ред. Н.П. Алёшина. - М. : Машиностроение, 1989. – 456 с.
- 38 Белокур И.П. Дефектоскопия материалов и изделий [Текст] / Белокур И.П., Коваленко В.А. – К. : Тэхніка, 1989. – 192 с.
- 39 Chu, C.N. Monitoring and Diagnosis for Abnormak. States of Machine Tools [Текст] / C.N.Chu, W.T.Kwon // Journal of Korean Society of precision Engineering. – Apr. 1994. – Vol. 11. – № 2.
- 40 А.с. 653088 СССР, МКИ В23Q 15/00. Система автоматического



- регулювання геометричних параметрів оброблюваної деталі на станку [Текст] / В.Л.Заковоротний, А.Н.Зацепин, В.Н.Поплавський, С.А.Раков. Заявка №2052905/25-08. Заявл. 13.08.74. Опубл. 25.03.79. Бюл.№11.
- 41 Контроль, діагностика і прогнозування обробки металів різанням по переходним процесам [Текст]. Махмудов Кобулджон Гафурович. Київ, спец. ВАК 05.03.01 д-р техн. наук, 1994.
- 42 Остаф'єв, В. А. Діагностика процесу металообробки [Текст] / В. А. Остаф'єв, В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик. – К.: Техніка, 1991. – С. 70 – 90.
- 43 Активний контроль розмірів; под ред. С. С. Волосова [Текст] / С. С. Волосов, М. Л. Шлейфер, В. Я. Рюмкін і др. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.
- 44 Зелик, В. П. Многоканальне пристрій для віброакустичної діагностики металорежущих станків [Текст] / В. П. Зелик і др. // Металлорежущі станки. – 1990. – 18. – С. 50 – 54.
- 45 Скицюк, В.І. Технологія торкання технологічних об'єктів. Основні способи торкання. Ч. 2 [Текст] / В. І. Скицюк, Р. С. Сілін // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – № 2.
- 46 Скицюк, В.І. Технологія торкання технологічних об'єктів. Багаторазове торкання технологічних об'єктів. Ч. 3 [Текст] / В. І. Скицюк, Р. С. Сілін // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – № 3. – С.143 - 150.
- 47 Скицюк, В.І. Технологія торкання технологічних об'єктів. Загальна класифікація способів торкання та дуальність поверхні. Ч. 4 [Текст] / В. І. Скицюк, Р. С. Сілін // Вісник Технологічного університету «Поділля». – 2002. – № 4. – С. 159 - 162.
- 48 А.с. 1734958 СССР. МКИ В 23 В 25/06. Система прогнозування стану режущих інструментів [Текст] / В.В. Кокаровцев, В.А.Остаф'єв, Ю.Н.Камаєв і др. Заявка № 3831491/08. Заявл. 20.12.84. Опубл. 23.05.92. Бюл. № 19
- 49 Відчутники контрольно-вимірювальних систем : монографія [Текст] / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб, Т.Р. Клочко. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 240 с., іл.
- 50 Оптичні вимірювання для механічної обробки деталей : монографія [Текст] / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, Т.Р. Клочко. – К.: НТУУ «КПІ»,

2009. – 332 с., іл.
- 51 Пат. 4786220 USA МКИ В23С 7/00. Cutting tool wear monitor [Текст] / John M. Fildes. Заявка № 53,643. Заявл. 26.05.1987. Опубл. 10.22.1988.
  - 52 Пат. 3694637 США, МКИ G 01 N 19/02. Method and apparatus for detecting tool wear [Текст] / A.I.Edwin, T.I.Vlach. Заявка № 83173; Заявл. 22.10.70; Опубл. 26.09.72; НКИ 235-151.3.
  - 53 А.с. 1180756 СССР, МКИ G01N 3/58. Устройство для определения состояния режущего инструмента в процессе резания [Текст] / В.А.Остафьев, К.Г.Махмудов, В.И.Скицюк. Заявка № 3685202/25-28. Заявл. 03.01.84. Опубл. 23.09.85. Бюл. № 35. – 3 с.
  - 54 Пат. 4145816 США МКИ G 01 В 7/02, НКИ кл. 33/171. Щуп для станков, имеющий круговой трансформатор. Spindle probe with orbital transformer. [Текст] / Stobbe R.E., Jobs lone R. Kearney & Trecker Corporation (West Allis, WI). Заявка № 853764. Заявл. 21.11.1977. Опубл. 27.03.1979. – 14 с.
  - 55 Pat. 5001464 USA МКИ G08B 021/00. Contact detecting system in a machine tool [Текст] / Yuzuru; Tanaka. Daishowa Seiki Co., Ltd.. No.: Заявка № 450552. Заявл. 14.12.1989. Опубл. 19.03.1991. – 11 с.
  - 56 So-Young Lee. Monitoring of Chatter Vibration by Laser Displacement Signal [Текст] / So-Young Lee, Eui-sik Chang // Journal of the Korean Society of Precision Engineering. – 1995. – № 1. – Р. 16 - 20.
  - 57 Pat. 4396322 USA, МКИ В23Q 11/00. Contact detecting apparatus [Текст] / Keajf Nomaza. – №218678. Заявл. 22.10.80. Опубл. 02.08.83.
  - 58 Заявка 57-36103 Япония, МКИ В23 Q 17/00. Устройство для обнаружения контакта [Текст]. Заявка №52-136554; Заявл. 11.14.77; Опубл. 02.08.88. – №2-903.
  - 59 Chang, H.S. In-process Monitoring of Machine Tool Statement using Magnetic Sensor [Текст] / H.S. Chang, V.I. Skitsiouk, H.S. Kim, H. Ono, К.Н. Cha, N.I. Cho // Proceeding of the 6th Advanced Manufacturing System // Workshop, Seoul, 1998. –1998. – № 6. – Р. 223 - 228.
  - 60 Заявка № 57-39863 Япония, МКИ В23 Q 17/00, В23 В 49/00. Устройство для аварийных ситуаций металлорежущих станков с ЧПУ при повреждении режущего инструмента [Текст]. Заявка № 49-139154; Заявлено 12.02.74; Опубл. 24.08.82.
  - 61 Заявка № 59-53145 Япония, МКИ В23 Q 17/00. Устройство определения повреждения инструмента [Текст]. Заявка № 57-163205; Заявл. 21.09.82.

Опубл. 27.03.84.

- 62 Автоматизированные методы определения обрабатываемости металлов [Текст] / К. Г. Махмудов, В. А. Остафьев, А. А. Мирзаев. – К. : Випол. – 1995. – 91 с., ил.
- 63 Автоматическая бесконтактная система поднастройки режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ [Текст]. Кривошлыков Алексей Юрьевич. Киев, спец. ВАК 05.03.01 канд. техн. наук, 1988.
- 64 Качество машин: Справочник; в 2 т.; под ред. А.Г. Суслова. [Текст] - М.: Машиностроение, 1995.
- 65 Армарего, И. Дж. А. Обработка металлов резанием: монография; пер. с англ. В. А. Пастунова [Текст] / И. Дж. А. Армарего, Р. Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
- 66 Галкин, В.А. Обеспечение регламентных показателей точности токарных станков [Текст] / В. А. Галкин, В. Н. Паншин, А. В. Пуш // Станки и инструменты. – № 6. – 1989. – С. 8 - 11.
- 67 Кретинин, В.П. О связи параметров износа инструмента и шероховатости обработанной поверхности [Текст] / В.П. Кретинин, О.В. Кретинин, А.В.Денисенко // Вопросы повышения качества и производительности изготовления деталей машин на металлорежущих станках. – 1974. – Т.30, вып. 17. – С.14 - 15.
- 68 Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учеб. пособ. В 10 т. Т. II. Теория поля. – 7-е изд. исправл. [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 512 с.
- 69 Парселл, Э. Электричество и магнетизм; пер. с англ. [Текст] / Э. Парселл; под ред. А. И. Шальникова и А. О. Вайсенберга, изд. 2-е, исправл. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. – 440 с.
- 70 Калашников, С. Г. Электричество: учеб. пособ. 5-е изд., исправл. и доп. [Текст] / С. Г. Калашников. – М.: Наука. Главная ред. физ. – мат. литер., 1985. – Общий курс физики. – 576 с., ил.
- 71 Кухаркин, Е. С. Основы инженерной электрофизики. Ч. 1. Основы технической электродинамики: учеб. пособ. для студентов вузов [Текст] / Е. С. Кухаркин; под ред. П. А. Ионкина. – М.: Высш. школа, 1969. – 510 с.
- 72 Кузмичев, В. Е. Законы и формулы физики [Текст] / В. Е. Кузмичев. – К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.
- 73 Скицюк, В.І. Руйнуюче торкання технологічних об'єктів [Текст] / В.І. Скицюк, Р.І. Сілін // Вісник Технологічного університету «Поділля»,

- Хмельницький. – 2002. – № 6. – С. 82 - 89.
- 74 Епифанов, В.В. Физика твёрдого тела: монография [Текст] / В.В. Епифанов. - М.: Высшая школа, 1965. – 276 с.
- 75 Польцер, Г. Основы трения и изнашивания : монография [Текст] / Г. Польцер, Ф. Майснер; пер. с нем. О.Н. Озерского, В.Н. Пальянова; под ред. М. М. Добычина. – М. : Машиностроение, 1984. – 264 с.
- 76 Skytsiouk, V. Monitoring of object surface for the intelligent production equipment [Текст] / V. Skytsiouk, M. Klotchko, T. Klotchko // Научные труды IV Международной НПК «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права. Книга ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. – М. – 2003. – С. 121 - 126.
- 77 А.с. 1565612 СССР, МКИ В 23 С 5/06. Торцовая фреза [Текст] / В.А. Остафьев, В.Ф. Нагайцев, Т.Р. Ключко. Заявка № 4494319. Заявл. 27.06.1988. Оpubл. 22.01.1990. Бюл. № 6.
- 78 Скицюк, В.І. Контроль технологічного процесу механічної обробки деталей за параметрами польових структур об'єктів [Текст] / В.І. Скицюк, М.М. Ключко, Т.Р. Ключко // Зб. тез 5-й н.-т. конфер. «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів», КДТУ, м. Кременчук, 2006. –С.75-76.
- 79 Ключко, Т.Р. Моделювання динаміки технологічного процесу для контролю якості токарної обробки деталей типу “вал” [Текст]. Сб. Резание и инструмент в технологических системах. Вып. 57. Харьков: ХГПУ. –2000. -С. 115 – 121.
- 80 Skytsiouk, V. Monitoring of a object surface for the intelligent production equipment [Текст] / V. Skytsiouk, M. Klotchko, T. Klotchko // Научные труды III Международной научно-практической конференции «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика» 23-26 сентября, 2003. – Ялта-Киев.: АТМ Украины. -2003. –С.85-91.
- 81 Костин, П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов: Учеб. пособие для профессионально-технических училищ [Текст]. – М. Машиностроение, 1990. – 256 с.: ил.
- 82 Засоби контролю процесів механообробки надточних деталей: монографія [Текст] / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб, Т.Р. Ключко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 516 с., іл.
- 83 ГОСТ 18372-73 “Фрезы концевые твердосплавные. Технические условия” [Текст]

- 84 ГОСТ 20533-75 - ГОСТ 20539-75 “Фрезы концевые, оснащенные твердосплавными коронками и винтовыми пластинами” [Текст]
- 85 Справочник инструментальщика [Текст] / [И.А. Ординарцев и др.]; под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 845, [1] с.: ил.; 22 см. – (БИ: Б-ка инструментальщика).
- 86 Диагностика работоспособности режущего инструмента при чистовом точении на основе электромагнитных явлений [Текст]. Шевченко, Вадим Владимирович. Киев, спец. ВАК 05.03.01 канд. техн. наук, 1985.
- 87 ГОСТ 27843-88. Станки металлорежущие. Методы проверки точности позиционирования [Текст]. Введ. 01.01.90. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 19 с.
- 88 Скицюк, В. І. Ефект дуальності поверхні торкання та його вплив на точність визначення координати поверхні [Текст] / В. І. Скицюк, О. О. Плотников, Л. С. Глоба // Збірн. наук. праць Кіровоградського держ. техн. ун-ту. – 2003. – Вип. № 13. – С. 174 – 180.
- 89 Скицюк, В.І. Градієнтометрія зонної точності верстатів [Текст] / Л.С. Глоба, О.О. Плотников / Збірн. тез допов. IV НТК ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 26-27 квітня 2005 р., м. Київ, ПБФ, НТУУ “КПІ”. – 2005. – С.89-90.
- 90 Skytsiouk, V.I. Determination of the coordinates of the pathological zones in the mass of the biological object [Текст] / V.I. Skytsiouk, T. R. Klotchko // Microwave & Telecommunication Technology, (IEEE Xplore), 2013. – Vol. 2. – P. 1083 - 1084.
- 91 Скицюк, В.І. Метод визначення координат патологічних зон у біологічних об’єктах за вектором градієнту розподілу їх польових структур / Т.Р. Ключко, В.І. Скицюк [Текст] // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2011. – Вип. 42. – С.184-194.
- 92 Скицюк, В.І. Теоретичні засади технології ТОНТОР : монографія [Текст] / Г. С. Тимчик, Т. Р. Ключко, В. І. Скицюк. – К. : НТУУ «КПІ», 2006. – 234 с.
- 93 Скицюк, В.І. Фізичні засади технології ТОНТОР: монографія [Текст] / Г.С. Тимчик, Т.Р. Ключко, В.І. Скицюк. - К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 352 с., іл. – Бібліогр.: с. 342–349.
- 94 Бронштейн, И.Н. Семендяев К.А. Справочник по математике [Текст]. – М.: Наука, 1967. – 608 с.
- 95 Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся

- втузов. 13-е изд., исправл. [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
- 96 Скицюк, В.І. Стенд для дослідження електромагнітного поля циліндричної деталі на токарному верстаті [Текст] / В.І.Скицюк, М.С. Кінареєв, М.Г. Мосієвич, М.В. Грищенко, В.І. Науменко / Третя НТК «Приладобудування 2004: Стан і перспективи». Збірка наукових праць (20-21 квітня 2004 р., м. Київ, Україна). – К.: - 2004. – с. 73
  - 97 Барнс, Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами [Текст] / Дж. Барнс; пер. с англ. В.А. Исаакяна; под ред. Б.Н. Файзулаева. – М.: Мир, 1990. – 238 с., ил.
  - 98 Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов [Текст] / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
  - 99 Zhong-min, Wang. Способ мониторинга износа режущего инструмента [Текст] / Wang Zhong-min, Wang Xin-yi // J. Beijing Inst. Technol. – 2001. –10, № 1. – С. 101 – 107.
  - 100 Загалеєв, М. Р. Диагностика РИ методом контролю термо-едс [Текст] / М. Р. Загалеєв, М. Ю. Сарілов / Науч. – техн. творчество аспирантов и студентов: 27-я Науч. –техн. конф. аспирантов и студентов. Комсомольска-на-Амуре гос.техн.ун-та, К-на-Ам., 18 – 28 апр. 1997 г.: тез.докл. – С. 8.
  - 101 Крєтинин, О.В. Исследование спектра ТЭДС и сил при резании [Текст] // Научн. тр., ГПИ. – Горький, 1970. – Т.26, вып.4. – С. 33-37.
  - 102 Спектор, С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений: Учеб. пособие для вузов [Текст]. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1987. – 320 с.: ил.
  - 103 Смайт, В. Электростатика и электродинамика [Текст]; пер. с 2-го амер. изд. А. В. Гапонова и М. А. Миллера. – М.: Иностранная литература, 1954. – 804 с.
  - 104 Носсель, Ю. Я. Электрические поля постоянных токов [Текст]. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. – 1986. – 160 с.
  - 105 Говорков, А. Г. Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах [Текст] / А. Г. Говорков, С. Д. Купалян. – М.: Высш. школа, 1963. – 372 с.
  - 106 Маделунг, Э. Математический аппарат физики. Справочное руководство [Текст] / Э. Маделунг, пер. с 6-го нем. изд. М.А. Иглицкого; под ред. В.И. Левина. – М.: Изд. ФИЗМАТГИЗ, 1960. – 620 с.: ил.
  - 107 Вонсовский, С.В. Магнетизм [Текст] / С.В. Вонсовский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. –

- (Проблемы науки и технического прогресса). – 208 с.
- 108 Ремизов, Л. Т. Естественные радиопомехи [Текст] / Л. Т. Ремизов. – М.: Наука, 1985. – 200 с.
- 109 Chapman, F.W. Propagation of audiofrequency radio waves to great distances [Текст] / F. W. Chapman, R. C. V. Macario // Nature. – 1956. – Vol. 177, N 4516. – P. 930 – 933.
- 110 Контроль та керування процесом торкання для підвищення якості виробів приладобудування [Текст]. Скицюк Володимир Іванович. Київ, спец. ВАК 05.11.14 технологія приладобудування, канд. техн. наук, 2001.
- 111 Скицюк, В. І. Технологія ТОНТОР для автоматизованого прецизійного контролю якості [Текст] / В. І. Скицюк, Т. Р. Ключко / Зб. Приладобудування – 96, м. Віниця (м. Судак), Віницький ДТУ. – Т. 1. – 1996. – С. 84.
- 112 Скицюк, В.І. Технология ТОНТОР [Текст] / В. І. Скицюк, К. Г. Махмудов, В.А. Остафьев, К.Б. Халилов. Научный технический сборник Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”. – К.: Изд-во “Международ. фин. агенство”, 1997. – с.5.
- 113 Скицюк, В.І. Контроль технологічного процесу механічної обробки деталей за параметрами польових структур об’єктів [Текст] / В. І. Скицюк, Т.Р. Ключко, М.М. Ключко / V Всеукраїнська науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів». Тези наукових доповідей. – Кременчук: КДПУ, 2006. – С.75-76.
- 114 Скицюк, В. І. Фізичні основи ближньої електромагнітної взаємодії інструменту та деталі при токарній металообробці [Текст] / В. І. Скицюк, Г. С. Тимчик // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2002. – № 5. – С. 131 – 134.
- 115 Скицюк, В.І. Застосування сигналу електромагнітного поля деталі та інструмента у процесі контролю металообробки [Текст] / В. І. Скицюк, Г. С. Тимчик, М. М. Ключко // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2003. – № 4 (21). – С.30-37.
- 116 Скицюк, В.І. Енергетичні процеси металообробки при виготовленні деталей надточних приладів [Текст] / В.І.Скицюк, Г.С. Тимчик, М.М. Ключко, В.Г. Цірук / Збірн. тез доповідей V НТК ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 25-26 квітня 2006 р., м. Київ, НТУУ „КПІ”. – 2006. – с. 114-115.

- 117 Скицюк, В.І. Модель енергетики процесу металообробки [Текст] / В.І.Скицюк, М.М. Ключко, В.Г. Цірук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2006. – Вип. 31. – С.103-112.
- 118 Коробов, Ю. М. Электрический износ при трении и резании металлов [Текст] / Ю. М. Коробов, Г. А. Прейс. – К. : Техника, 1976. – 200 с.
- 119 Астахов, А. В. Курс общей физики. Т. 2. Электромагнитное поле [Текст] / А. В. Астахов, Ю. М. Широков. – М. : Изд. ФИЗМАТГИЗ, 1980. – 360 с.: ил.
- 120 Евтихеев, Н.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов [Текст] / Н.Н. Евтихеев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.: ил.
- 121 Артамонов, С.А. Адаптивное управление процессом токарной обработки на станке с ЧПУ [Текст] / С.А. Артамонов // Станки и инструмент. – 1975. - №5. - С. 10-20.
- 122 Свешников, В.К. Станочные гидроприводы [Текст]: Справочник. 3-е изд. / В.К. Свешников. - М.: Машиностроение, 1995.
- 123 А.с. 1370517 СССР, МКИ G01N 3/40. Твердомер [Текст] / В.І.Скицюк, В.А.Остафьев, З.В.Кужидэм (Польша). Заявка № 4115136/25-28. Заявл. 30.06.86. Опубл. 30.01.89. Бюл. № 4. – 4 с..
- 124 Технология машиностроения (специальная часть): Учебн. для машиностр. спец. вузов [Текст] / А.А. Гусев, Е.Р. Ковальчук, И.М. Колесов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.: ил.
- 125 Скицюк, В.І. Формалізація стану різального інструмента при механообробці на верстатах з ЧПК [Текст] / В.І. Скицюк, Г.С. Тимчик, М.М. Ключко / Збірн. тез доповідей IV НТК ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 26-27 квітня 2005 р., м. Київ, ПБФ, НТУУ “КПІ”. – 2005. – С.109-110.
- 126 Скицюк, В.І. Точність верстатів з ЧПК та методика її визначення [Текст] / В. І. Скицюк, О.О. Плотников, Л.С. Глоба. / Третя науково-технічна конференція «Приладобудування 2004: Стан і перспективи». Збірник наук. праць (20-21 квітня 2004 р., м. Київ, Україна). – К.: - 2004. – с. 75-76.
- 127 Скицюк, В.І. Дуальність координати технологічних об’єктів у системі координат металообробляючого обладнання [Текст] / В.І.Скицюк, О.О.Плотников, Л.С.Глоба // Технологія і техніка друкарства. – 2004. - № 1. –С.67-73.



- 128 Данко, П.Е. Высшая математика в упражнениях и задачах. Ч. II: Учеб. пособие для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Е.П. Данко, А.Г. Попов, Т.Я. Кожевникова. – М.: Высш. школа, 1980. – 365 с., ил.
- 129 Скицюк, В.І. Математична модель втрати точності обладнання з ЧПК у вигляді векторної польової структури та методика визначення її параметрів для конкретного верстата [Текст] / В.І.Скицюк, О.О.Плотников, Л.С.Глоба / Труды пятой международной научно-практической конференции. Современные информационные и электронные технологии, 17-21 мая 2004 г., г. Одесса, Украина: - 2004. – с. 96.
- 130 Скицюк, В.І. Методика визначення вектору похибки роботи металорізальних верстатів з ЧПК [Текст] / В.І.Скицюк, Л.С.Глоба / Тези першої міжнар. науково-техн. конфер. “Машинобудування та металообробка - 2003”, 17-19 квітня 2003 р., м. Кіровоград.
- 131 Ostafiev, V. F. A new electromagnetic contact sensing technique for enhancing machine accuracy [Текст] / V. F. Ostafiev, K. Venuvinod Patri // Manufacturing science and engineering. – 1997. – Med. – Vol. 6 – 1. – Vol. 1. – ASME 1997. – P.113 – 119.
- 132 Скицюк, В.І. Методика торкання поверхні деталі боковою різальною стрічкою фрезерного інструменту з метою визначення координати її поверхні [Текст] / В.І. Скицюк, Р.С. Сілін // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2002. - №1. - С.133-138.
- 133 Тахман, С.И. Деформация стружки при цилиндрическом и торцевом фрезеровании [Текст] / С.И. Тахман, Г.М. Батарчук // Резание металлов и технологическая точность деталей в машиностроении. Ч.1; под ред. Ю.А. Розенберга. – Курган. – 1968.
- 134 Исследование особенностей контурного фрезерования с целью достижения заданной точности и повышения производительности обработки на фрезерных станках с ЧПУ [Текст]. Тахман, С.И. Новосибирск, спец. ВАК 05.02.08 канд. техн. наук, 1974, 35с.
- 135 Кушнир, В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластических материалов: монография [Текст] / В.С. Кушнир. – Иркутск, изд-во Иркутского ун-та, 1982. – 180с.
- 136 Проников, А.С. Расчет и конструирование металлорежущих станков:

- монографія [Текст] / А.С. Проников. – М.: Высшая школа, 1962. – 422 с.
- 137 Бравичев, В.А., Металлорежущие станки: монография [Текст] / В.А. Бравичев, В.И. Гайдар и др.. – М.: МАШГИЗ, 1955. – 660 с.
- 138 Ананьин, С.Г. Металлорежущие станки: монография [Текст] / С.Г.Ананьин, Н.С. Ачеркан и др.. – М.: МАШГИЗ, 1957. – 1015 с.
- 139 Металлорежущие станки: монография [Текст]; под ред. Тепинкичиева В.К. – М.: Машиностроение, 1973. – 471 с.
- 140 Левина, З.М. Контактная жесткость машин: монография [Текст] / З.М. Левина, Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1971. – 246 с.
- 141 Саргсян, А.Е. Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов: учебник [Текст] / А.Е. Саргсян. – М. : Изд-во АСВ, 1998. – 240 с., с илл.
- 142 Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / Г.С. Писаренко, А.П.Яковлев, В.В. Матвеев; отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Наук. думка, 1988 – 736 с.
- 143 Скицюк, В. І. Технологія ТОНТОР [Текст] / В. І. Скицюк // Вісті українських інженерів (Ukrainian Engineering News). – 1993. – XLVIII. – 4. – С. 10 – 14.
- 144 Скицюк, В. І. Новый метод прогнозирования состояния автоматизированной обработки металлов [Текст] / В. І. Скицюк, М. М. Ключко // Вісник Інж. академії України. – 2006. – Бюл. 2 – 3. – С. 114 – 121.
- 145 Оптичні вимірювання для механічної обробки деталей: Монографія [Текст] / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, Т.Р. Ключко. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 332 с., іл.
- 146 Скицюк, В. І. Технологічний фантом [Текст] / В. І. Скицюк, М. В. Скицюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2002. – № 24. – С. 149 – 155.
- 147 Кудинов, В.А. Динамика станков [Текст] / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
- 148 Скицюк, В. І. Порівняльний аналіз способів руху за довжиною кроку при вимірюванні розмірів циліндричних деталей [Текст] / В.І. Скицюк, І.М. Діордіца. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – Вып. 13. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2010. – 560 с., с. 500-504.

- 149 Ключко, Т.Р. Метод контролю граничного стану різального інструмента при токарній обробці матеріалів [Текст] / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, Т.Р. Ключко // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. –1999. – № 2. – С. 101 - 107.
- 150 Патент 6505 Україна МКІ(7) В23 В25/06. Система контролю стану різального інструмента [Текст] / Скицюк В.І., Ключко М.М., Т.Р. Ключко. Заявка № 20040907437. Заявл. 13.09.2004. Опубл. 16.05.2005. Бюл. № 5, 2005.
- 151 Ключко, Т.Р. Лазерная гибридная система контроля качества механо-обработки [Текст] / Т.Р. Ключко // Сучасне машинобудування. – 2000. – № 1-2. – С. 22 – 27.
- 152 Ключко, Т.Р. Метод автоматизованої діагностики процесу обробки деталей різанням [Текст] / Г.С. Тимчик, Т.Р. Ключко / Автоматизация: проблемы, идеи, решения (АПИР), СевНТУ, 9-13 сентября 2009 г., г. Севастополь.
- 153 Старков, В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве: монография [Текст] / В.К. Старков. - М.: Машиностроение, 1989.
- 154 Скицюк, В. І. Аналіз сучасного стану приладів контролю точності торкання інструменту з деталлю та шляхи подальшого розвитку [Текст] / В. І. Скицюк // Сучасне машинобудування. – 2000. – № 1. – С. 20 – 30.
- 155 Бауман, Э. Измерение сил электрическими методами [Текст]; пер. с нем. / Э. Бауман. – М.: МИР, 1978. – 431 с.
- 156 Проектирование датчиков для измерения механических величин [Текст]; под ред. Е. П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с., ил.
- 157 Абанин, В. А. Тензорезисторные датчики силы [Текст] / В. А. Абанин, В. Н. Ромашкин // Приборы и системы управления. – 1999. – № 12. – С. 25– 27.
- 158 Графіки функцій. Довідник. [Текст] / Н.О.Вірченко, І.І.Ляшко, К.І. Швецов. – К.: Наук. думка, 1977. – 320 с.
- 159 Скицюк, В. И. Автоматическая настройка и поднастройка режущих инструментов на токарных станках с ЧПУ [Текст] / В. И. Скицюк, В. А. Остафьев, В. В. Шевченко // Технология и организация производства. – 1989. – № 3. – С. 15 – 17.
- 160 Скицюк, В. И. Устройство контроля состояния сверл в многошпиндельных головках [Текст] / В. И. Скицюк, В. А. Остафьев, Т.Р. Ключко // Технология и организация производства. – 1991. – № 3. –С. 33 - 35.

- 161 Ключко, Т.Р. Розробка алгоритмів функціонування лазерних гібридних акустооптичних аналізаторів стану процесу токарної обробки металів [Текст] / Г.С. Тимчик, Т.Р. Ключко, М.М. Ключко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 4. – С.33 - 37.
- 162 Сафроган, Р.Э., Эксплуатация станков с числовым программным управлением [Текст] / Р.Э. Сафроган, А.Э. Полонский, Г.А. Таурит. – К.: Техника, 1974. – 318 с.
- 163 Коваль, М. И. Сравнительный анализ составляющих погрешности обработки на тяжелом станке с ЧПУ [Текст] / М. И. Коваль, Г. А. Игонин // Станки и инструмент. – 1979. – № 9. – С. 8 – 11.
- 164 Скицюк, В. І. Градієнтометрія зонної точності верстатів [Текст] / В. І. Скицюк, О. О. Плотников // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2004. – Вип. 28. – С. 132 – 138.
- 165 Скицюк, В.І. Автоматическая настройка и позиционирование инструмента на станке с ЧПУ. Технология и автоматизация машиностроения [Текст] / В.І. Скицюк, К.Г. Махмудов, В.А. Остаф'єв: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1992. – Вып. 49. – С.66-68.
- 166 Скицюк, В.І. Вимірювання форми деталі у статичному стані та лінійному детермінованому русі різального інструмента [Текст] / В.І. Скицюк, І.М. Діордіца, В.І. Науменко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2005. – Вип. 29. – С.68-74.
- 167 Скицюк, В.І., Діордіца, І.М., Науменко, В.І. Засади визначення відхилень форми перерізу деталей циліндричного типу [Текст] / В.І. Скицюк, І.М. Діордіца, В.І. Науменко // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія машинобудування. – 2004. – Вип.45. – с.126-131.
- 168 Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учеб. пособ. В 10 т. Т. II. Теория поля. – 7-е изд. исправл. [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 512 с.
- 169 Парселл, Э. Электричество и магнетизм; пер. с англ. [Текст] / Э. Парселл; под ред. А. И. Шальникова и А. О. Вайсенберга, изд. 2-е, исправл. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. – 440 с.
- 170 Кухаркин, Е. С. Основы инженерной электрофизики. Ч. 1. Основы технической электродинамики: учеб. пособ. для студентов вузов [Текст] / Е. С. Кухаркин; под ред. П. А. Ионкина. – М.: Высш. школа, 1969. – 510 с.
- 171 Детали и механизмы металлорежущих станков: монография [Текст]. Т. 1;

- под ред. проф. Решетова Д.Н. – М.: Машиностроение, 1972. – 663 с.
- 172 Справочник по технической механике [Текст]; под общ. ред. акад. Динника А.Н. – М.-Л.: ОГИЗ, 1949. – 734 с.
- 173 Патент 62421А Україна. Спосіб та пристрій для визначення градієнта точності металообробних верстатів з ЧПК [Текст] / Л. С. Глоба, В. І. Скицюк, О. О. Плотников. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”. Заявка №2003032421. Заявл. 20.03.2003. Пріоритет 15.12.2003. Опубл. 15.12.2003. Бюл. № 12.
- 174 Скицюк, В.І. Спосіб та пристрій визначення градієнту точності металообробляючих верстатів з ЧПК [Текст] / В.І. Скицюк, О.О. Плотников, Л.С. Глоба / СИЭТ-2003. Труды 4 международной научно-практической конфер. Современные информационные и электронные технологии, 5-6 июня 2003 г., Одесса, 2003. – С. 353.
- 175 Станок многоцелевой вертикальный сверлильно-фрезерно-расточный с крестовым столом, ЧПУ, АСИ, повышенной точности. Модель СС2ВО5ПМФ4. Руководство по эксплуатации. Часть 1. [Текст]
- 176 Станок многоцелевой вертикально-фрезерно-расточный с крестовым столом, ЧПУ, АСИ, повышенной точности. Модель 2С150ПМФ4. Руководство по эксплуатации. Часть 2. Электрооборудование. [Текст]
- 177 Maeda Yoshiaki. Control mapping of cutting tool face with the aid of digital image processing technique [Текст] // Bull. Jap. Soc. Precis. Eng. – 1987. – 21, №2. – Р. 136 - 138.
- 178 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле [Текст]: Учебн. для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. – 8-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.
- 179 Патент № 30278 України на корисну модель. Спосіб реєстрації вібрацій об'єктів в електромагнітному полі [Текст] / В. І. Скицюк, Т.Р. Ключко, М.М. Ключко. Заявка № 200709566. Заявл. 23.08.07. Опубл. 25.02.2008 р., Бюл. № 4.
- 180 Патент № 30279 України на корисну модель. Електромагнітно-акустичний відчутник [Текст] / В. І. Скицюк, Т.Р. Ключко, М.М. Ключко. Заявка № 200709567. Заявл. 23.08.07. Опубл. 25.02.2008 р., Бюл. № 4.
- 181 Скицюк, В.І. Двопараметрична система інтегрованого аналізу динаміки різання для верстатів з ЧПК [Текст] / В. І. Скицюк, Т.Р. Ключко, М.М. Ключко / Інтегровані інформаційні технології та системи. Наук.-практ.

- конф. мол. учених та аспірантів. 29-31 жовтня 2007 року, Київ, Нац.авіац.ун-т. Зб. тез. – С. 39.
- 182 Патент № 17046 на винахід Україна, МКІ В23Q 15/00. Спосіб контролю торкання інструменту та деталі з високою точністю та надійністю [Текст] / В.І. Скицюк, В.О. Остаф'єв, К.Г. Махмудов. Заявка № 95114882. Заявл. 15.11.95. Опубл. 31.10.97. Бюл. № 5.
- 183 Патент 52357А на винахід, Україна, МКІ В23Q17/00, G05B19/18. Адаптивний спосіб реєстрації присутності та торкання різального інструменту до деталі [Текст] / В.І. Скицюк, Р.С. Сілін. Заявка №2002043045. Заявл. 15.04.2002. Пріоритет 16.12.2002. Опубл. 16.12.2002., Бюл. №12.
- 184 Заявка u201312745 на корисну модель. МПК<sup>7</sup> В23Q 17/00. Спосіб визначення координати торкання поверхні різального інструмента до деталі [Текст] / В.І. Скицюк, Т.Р. Ключко. Рішення 01.03.2014 р.
- 185 Скицюк, В.І. Фізичні засади контролю взаємодії різального інструмента з деталлю на основі вимірювання змінного струму [Текст] / В.І. Скицюк, М.М. Ключко // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – 2005. – Вип. 29. – С. 75 – 84.
- 186 Скицюк, В.І. Методика визначення точності виготовлення деталей надточних приладів у процесі механообробки на CNC-верстатах [Текст] / В.І. Скицюк, Т.Р. Ключко, М.М. Ключко / Збірн. тез допов. VI науково-технічної конференції ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 24-25 квітня 2007 р., м.Київ, ПБФ, НТУУ«КПІ». – 2007.– С.131-132.
- 187 Скицюк, В.І. Вплив аргумента функції на технологічні можливості технічних систем [Текст] / В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб / Збірн. тез допов. XII Міжнародної науково-технічної конференції ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 23 - 24 квітня 2013 р., м. Київ, ПБФ, НТУУ “КПІ”. – 2013. – С. 101 – 103.
- 188 Скицюк, В.І. Аналітичне дослідження реалізації уявних функцій для координатних систем руху верстатного обладнання [Текст] / В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2013. - Вип. 45. – С. 136-141.
- 189 Скицюк, В.І. Моделювання поверхні абстрактного технологічного об'єкту при точних вимірюваннях [Текст] / В.І. Скицюк, Т.Р. Ключко / Збірн. тез допов. XIII Міжнародної науково-технічної конференції ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 23 – 24 квітня 2014 р.,

- м. Київ, ПБФ, НТУУ “КПІ”. – 2014. – С. 95 - 96.
- 190 Вайнтрауб М.А. Концепция формирования профессиональной компетентности будущих квалифицированных рабочих по металлообработке [Текст] // Социально – гуманитарный вестник Юга России. – 2013. – Вип. №7 (27). – С. 11 – 18.
- 191 Вайнтрауб М.А. Пути повышения теоретической и практической подготовки будущих рабочих по обработке металла [Текст] // ТА’ЛІМ ТЕХНОЛОГІЯЛАРИ. – 2013. – Вип. №3 (41). – С. 63 – 68.
- 192 Вайнтрауб М.А. Педагогическая система профессиональной подготовки будущих рабочих по металлообработке [Текст] // Альманах современной науки и образования. – 2013. – Вип. №3 (70). – С. 56 – 62.