

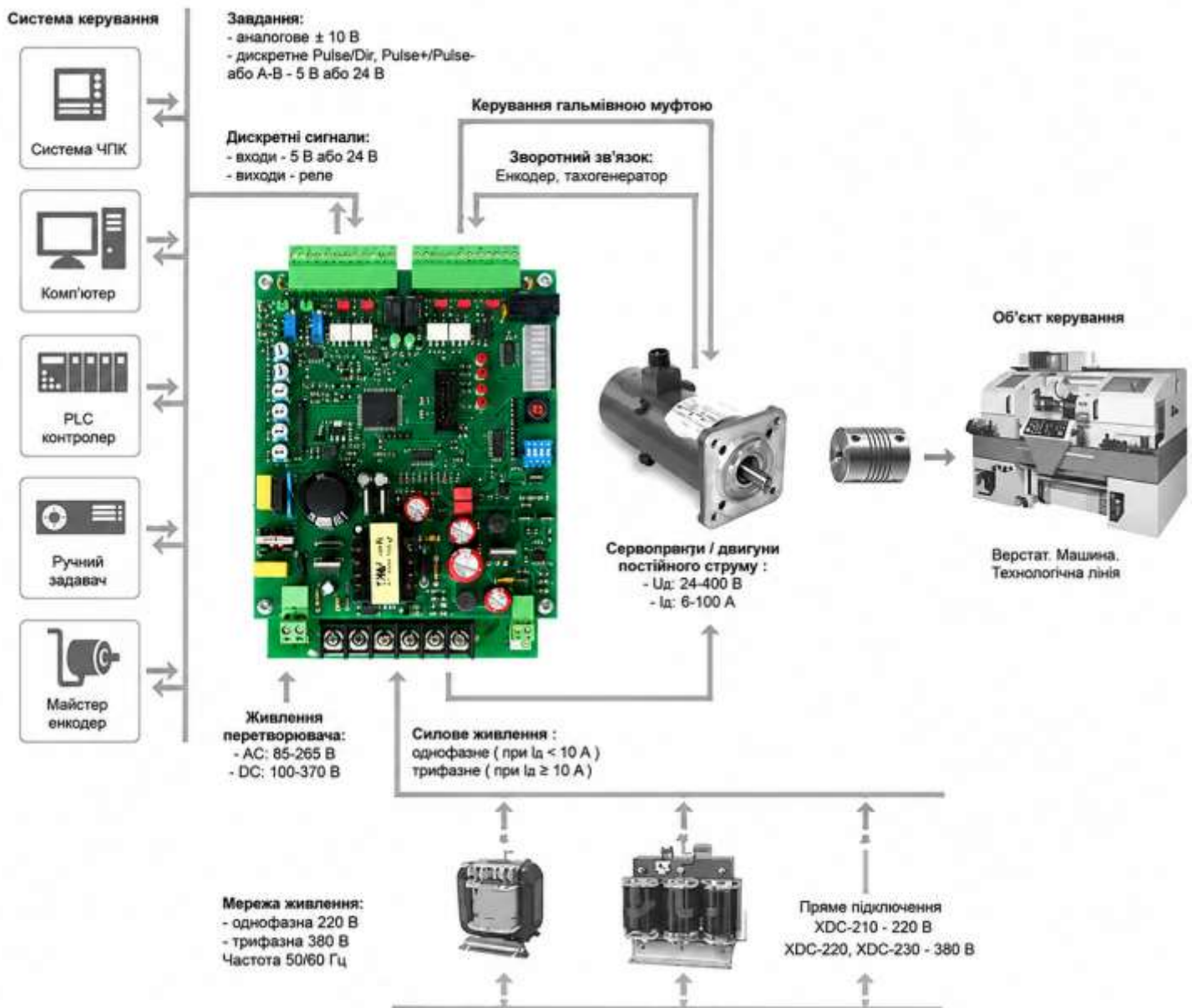
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ З ПРИВОДИ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ТА КЕРУВАННЯ РУХОМ

ТЕМА. ПРИВОДИ ГОЛОВНОГО РУХУ

Понятійний апарат: привод головного руху, шпиндель, електродвигун, частота обертання, крутний момент, потужність, швидкість різання, регулювання швидкості, діапазон регулювання, електропривод, сервошпиндель, інвертор, частотний перетворювач, ремінна передача, механічна коробка швидкостей, прямий привод, векторне керування, орієнтація шпинделя, жорстке нарізання різьби, гальмування шпинделя.

1. Призначення привода головного руху

Привод головного руху призначений для створення та передавання основного руху різання. На токарних верстатах він забезпечує обертання шпинделя із заготовкою, а на фрезерних верстатах - обертання шпинделя з інструментом.



Основними елементами привода є:

- електродвигун;
- силовий перетворювач;
- система керування;
- передавальний механізм;
- шпиндель;
- датчик частоти обертання;
- датчик положення або орієнтації шпинделя;
- система охолодження.

Привод головного руху визначає можливість верстата забезпечувати необхідну швидкість різання, потужність і крутний момент.

2. Основні вимоги до привода

До привода головного руху висувають такі вимоги:

- широкий діапазон регулювання частоти обертання;
- достатня потужність;
- високий крутний момент на малих частотах;
- стабільність частоти обертання під навантаженням;
- швидке прискорення та гальмування;
- висока точність регулювання;
- можливість реверсування;
- низький рівень вібрацій;
- надійність і теплова стабільність;
- можливість орієнтації шпинделя;
- сумісність із автоматичною зміною інструмента.

Для приводів верстатів з ЧПК важливими є два режими роботи:

- робота зі сталим крутним моментом на малих і середніх частотах;
- робота зі сталою потужністю на великих частотах.

Потужність, крутний момент і кутова швидкість пов'язані залежністю:

$$P = M\omega,$$

де ω — кутова швидкість шпинделя.

Для сучасних приводів головного руху характерний широкий діапазон регулювання частоти обертання. Для конкретних верстатів цей діапазон визначається типом двигуна, шпинделя та способом передавання руху. У дослідженнях приводів головного руху CNC зазначається, що вони повинні забезпечувати сталу потужність у широкому діапазоні частот. [[acta.fih.upt](http://acta.fih.upt.ro)]

3. Регулювання частоти обертання шпинделя

Частота обертання шпинделя задається в керуючій програмі адресою **S**. *Наприклад: S1500 M03*
Ця команда задає частоту обертання 1500 об/хв і запуск шпинделя в одному з напрямків.

Зміна частоти обертання може здійснюватися:

- зміною частоти живлення двигуна;
- зміною напруги;
- перемиканням механічних ступенів;
- застосуванням частотного перетворювача;
- використанням комбінованого електромеханічного регулювання.

У сучасних верстатах найчастіше застосовують регулювання частоти живлення асинхронного або синхронного двигуна за допомогою силового перетворювача.

Під час вибору частоти обертання враховують:

- діаметр оброблюваної поверхні;
- матеріал заготовки;
- матеріал інструмента;
- швидкість різання;
- тип операції;
- допустиме навантаження на шпиндель.

Для токарної обробки частоту обертання можна орієнтовно визначити:

$$1000v = n\pi D \Rightarrow n = \frac{1000v}{\pi D}$$

де n — частота обертання, об/хв;
 v — швидкість різання, м/хв;
 D — діаметр обробки, мм.

Фактичне значення обмежується максимально допустимою частотою обертання шпинделя та умовами безпечної роботи.

4. Режими запуску та зупинки

Для керування напрямком обертання шпинделя використовують допоміжні команди:

- **M03** - обертання в одному напрямку;
- **M04** - обертання у зворотному напрямку;
- **M05** - зупинка шпинделя.

Точне призначення кодів залежить від системи ЧПК, тому під час роботи необхідно користуватися документацією конкретного контролера.

Розгін і гальмування повинні виконуватися із заданою швидкістю. Різке збільшення частоти обертання може спричинити:

- ударні навантаження;
- прослизання заготовки;
- перевантаження двигуна;
- пошкодження інструмента;
- виникнення вібрацій.

Перед запуском шпинделя необхідно перевірити правильність закріплення заготовки, інструмента та захисного огороження.

5. Конструктивні схеми приводів

Привод із механічною коробкою швидкостей

Електродвигун працює разом із коробкою швидкостей, яка має кілька передавальних ступенів. Такий привод забезпечує високий крутний момент на низьких швидкостях.

Переваги:

- високий момент;
- ефективна передача потужності;
- можливість роботи з великими діаметрами;
- зменшення навантаження на двигун.

Недоліки:

- складніша конструкція;
- шум і зношування зубчастих передач;
- необхідність перемикання ступенів;
- наявність люфтів і механічних втрат.

Прямий привод шпинделя

У прямому приводі ротор двигуна безпосередньо з'єднаний зі шпинделем. Додаткова механічна передача відсутня.

Переваги:

- висока швидкодія;
- низький рівень шуму;
- зменшення люфтів;
- компактність;
- висока точність орієнтації шпинделя.

Недоліком є складність забезпечення великого крутного моменту на низьких швидкостях. Для важкої обробки можуть застосовуватися інші конструктивні рішення або додаткові механічні ступені.

Ремінний привод

У ремінному приводі двигун з'єднаний зі шпинделем через ремінь і шківи. Така схема дає змогу змінювати передавальне відношення та частково ізолювати шпиндель від вібрацій двигуна.

6. Зворотний зв'язок у приводі шпинделя

Для контролю частоти обертання використовують:

- тахогенератори;
- інкрементні енкодери;
- абсолютні енкодери;
- датчики положення шпинделя;
- датчики струму та моменту.

Енкодер може визначати кутове положення шпинделя та обчислювати швидкість за частотою імпульсів. Зворотний зв'язок дає змогу підтримувати задану частоту обертання незалежно від зміни навантаження. Під час навантаження швидкість шпинделя може зменшитися. Система керування збільшує керуючий сигнал для привода та відновлює задану швидкість.

Датчик частоти обертання дає змогу підтримувати задану швидкість. **Датчик положення** використовується для орієнтації шпинделя, автоматичної зміни інструмента та синхронізації під час нарізання різьби.

До додаткових функцій привода належать:

- плавний розгін;
- гальмування;
- реверсування;
- орієнтація шпинделя;
- контроль перевантаження;
- обмеження максимальної частоти;
- стабілізація швидкості різання.

7. Особливості сучасних приводів

Сучасні приводи головного руху використовують цифрове керування, векторні алгоритми та замкнені контури швидкості й положення.

Це дає змогу:

- підтримувати частоту обертання при зміні навантаження;
- швидко реагувати на зміну режимів;
- контролювати крутний момент;
- виконувати жорстке нарізання різьби;
- автоматично діагностувати несправності;
- інтегрувати привод із системою ЧПК.

Під час жорсткого нарізання різьби система координує обертання шпинделя з лінійним переміщенням інструмента. Для цього необхідно точно знати кутове положення та частоту обертання шпинделя.

Висновок. Привод головного руху забезпечує обертання шпинделя та визначає продуктивність процесу різання. До нього висувають вимоги щодо потужності, крутного моменту, широкого діапазону регулювання, точності та стабільності роботи. У сучасних верстатах застосовують ремінні, редукторні та прямі приводи з цифровим керуванням і зворотним зв'язком. Вибір конструкції залежить від призначення верстата, діапазону частот обертання та характеру обробки.

Питання для самоперевірки

Яке призначення має привод головного руху?

Які основні вимоги висувають до привода шпинделя?

Якими способами регулюють частоту обертання шпинделя?

Чим відрізняється прямий привод від привода через механічну передачу?

Для чого потрібні датчики швидкості та положення шпинделя?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Одне правильне питання

Який орган верстата приводить в обертання привод головного руху?

- А. Шпиндель
- Б. Напрямна рейка
- В. Система змащування

2. Одне правильне питання

Яка адреса керуючої програми задає частоту обертання шпинделя?

- А. S
- Б. F
- В. T

3. Декілька правильних відповідей

Які вимоги висувають до привода головного руху?

- А. Стабільність частоти обертання
- Б. Достатня потужність і крутний момент
- В. Обов'язкова відсутність будь-якого керування

4. Декілька правильних відповідей

Для яких функцій можуть використовуватися датчики шпинделя?

- А. Контроль частоти обертання
- Б. Орієнтація шпинделя
- В. Вимірювання кольору заготовки

ТЕМА. ПРИВОДИ ПОДАЧ

Понятійний апарат: привод подачі, робочий орган, координатна вісь, сервомотор, двигун постійного струму, синхронний двигун, асинхронний двигун, кулькова гвинтова пара, лінійний привод, редуктор, муфта, направляюча, датчик положення, датчик швидкості, контур положення, контур швидкості, похибка позиціонування, люфт, жорсткість, швидкодія, плавність руху, подача, прискорення, гальмування.

1. Призначення приводів подач

Приводи подач забезпечують переміщення робочих органів верстата вздовж координатних осей.

Вони переміщують:

- супорт токарного верстата;
- стіл фрезерного верстата;
- повзун;
- шпиндельну бабку;
- інструментальний вузол;
- поворотні та нахильні осі.

Рух подачі може бути:

- поздовжнім;
- поперечним;
- вертикальним;
- поворотним;
- комбінованим.

Під час контурної обробки кілька приводів подач працюють одночасно. Система ЧПК узгоджує їхні переміщення та забезпечує задану траєкторію інструмента.

2. Вимоги до приводів подач

До приводів подач висувають такі вимоги:

- висока точність позиціонування;
- мала похибка переміщення;
- висока швидкодія;
- плавність руху;
- стабільність подачі;
- достатній крутний момент;
- широкий діапазон швидкостей;
- мала інерційність;
- висока жорсткість;
- відсутність або мінімізація люфтів;
- точне узгодження руху кількох осей;
- можливість швидкого розгону та гальмування.

Для приводів подач важливими є точне керування положенням, швидка реакція на команду, здатність працювати при змінному навантаженні та координація кількох осей під час контурної обробки. [congres.cran.univ-lorraine]

3. Структура привода подачі

Типову структуру привода подачі можна подати так:

До складу привода входять:

- двигун;
- підсилювач або сервопідсилювач;
- механічна передача;
- кулькова гвинтова пара;
- направляючі;
- датчик положення;
- датчик швидкості;
- регулятори;
- система керування.



4. Двигуни приводів подач

У приводах подач застосовують:

- двигуни постійного струму;
- асинхронні двигуни;
- синхронні двигуни з постійними магнітами;
- лінійні двигуни;
- серводвигуни.

Для сучасних верстатів найхарактернішими є синхронні серводвигуни з постійними магнітами. Вони забезпечують високий крутний момент при невеликих розмірах, швидку реакцію та точне керування.

Двигун повинен забезпечувати:

- необхідну швидкість;
- достатній момент;
- короткочасне перевантаження;
- плавний рух на малих швидкостях;
- швидке гальмування;
- роботу в обох напрямках.

5. Передавальний механізм

Передавальний механізм перетворює обертання двигуна на лінійне або поворотне переміщення робочого органа.

Найчастіше

використовують:

- кулькові гвинтові пари;
- зубчасті передачі;
- ремінні передачі;
- черв'ячні передачі;
- редуктори;
- муфти;
- лінійні модулі.

Кулькова гвинтова пара

складається з гвинта, гайки та кульок, які перекочуються між їхніми робочими поверхнями.

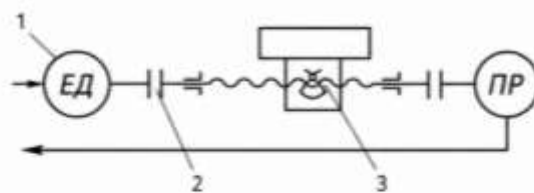
Вона забезпечує високу точність, мале тертя та можливість передавання значного зусилля.

До передавального механізму висувають вимоги:

- висока точність;
- жорсткість;
- мінімальний люфт;
- низьке тертя;
- зносостійкість;
- плавність руху;
- надійне змащування.

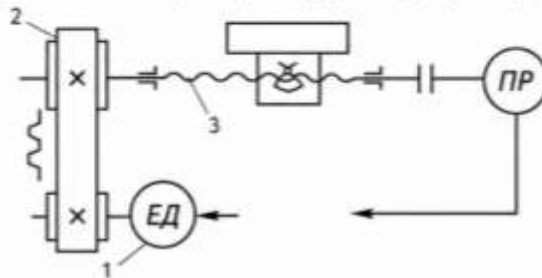
Похибка передавання, люфт і пружні деформації безпосередньо впливають на точність обробки.

а) Привід подачі через ходовий гвинт



1 – електродвигун
2 – муфта
3 – гвинтова передача
(ходовий гвинт з гайкою)
ПР – робочий орган (стіл, супорт тощо)

б) Привід подачі через зубчасту ремінну передачу



6. Датчики зворотного зв'язку

Датчики зворотного зв'язку передають до системи ЧПК інформацію про фактичне положення та швидкість робочого органа.

Застосовують:

- кругові енкодери;
- лінійні вимірювальні лінійки;
- тахогенератори;
- резольвери;
- індуктивні та магнітні датчики.

Датчик може бути встановлений на валу двигуна або безпосередньо на робочому органі.

Датчик на валу двигуна дає змогу контролювати поворот ротора, але не завжди враховує люфти та деформації механічної передачі. Датчик безпосередньо на робочому органі дає точнішу інформацію про фактичне положення стола або супорта.

7. Контури керування привода подачі

У приводі подачі можуть використовуватися три взаємопов'язані контури:

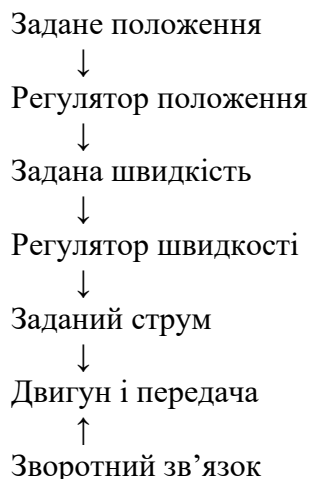
- контур струму;
- контур швидкості;
- контур положення.

Контур струму регулює електромагнітний момент двигуна. Він є найбільш швидкодіючим.

Контур швидкості підтримує задану швидкість переміщення. У разі зміни навантаження він коригує струм двигуна.

Контур положення визначає, чи досяг робочий орган запрограмованої координати. Якщо виникла похибка, система формує сигнал для її зменшення.

Загальна схема:



8. Точність і плавність руху

Точність привода подачі визначається його здатністю встановлювати робочий орган у задане положення.

На точність впливають:

- роздільна здатність датчика;
- крок гвинтової пари;
- люфт;
- пружна деформація;
- температурне розширення;
- похибка інтерполяції;
- жорсткість станини;
- якість регулювання.

Плавність руху особливо важлива на малих швидкостях. Нерівномірний рух може спричинити:

- хвилястість поверхні;
- сліди від інструмента;
- вібрації;
- погіршення точності;
- нерівномірність подачі.

Для забезпечення плавності застосовують цифрові регулятори, точні датчики, попереднє навантаження кулькових гвинтових пар і правильне налаштування сервосистеми.

9. Швидкодія та динаміка

Швидкодія характеризує, наскільки швидко привод реагує на зміну команди.

Висока швидкодія необхідна для:

- скорочення холостих переміщень;
- швидкого розгону;
- точного проходження кутів і радіусів;
- обробки складних контурів;
- узгодження руху кількох осей.

Однак надмірне збільшення швидкодії може спричинити коливання або нестійкість системи. Тому регулятори налаштовують так, щоб забезпечити компроміс між швидкістю реакції, точністю та стійкістю.

Висновок. Приводи подач переміщують робочі органи верстата вздовж координатних осей і забезпечують формування траєкторії обробки. Їхня структура включає двигун, підсилювач, механічну передачу, робочий орган і датчики зворотного зв'язку. Основними вимогами є точність, швидкодія, плавність, жорсткість і мінімальний люфт. У сучасних верстатах застосовують замкнені сервосистеми з контурами струму, швидкості та положення.

Питання для самоперевірки

Яке призначення мають приводи подач?

Які вимоги висувають до приводів подач?

З яких основних елементів складається привод подачі?

Яке призначення має кулькова гвинтова пара?

Яку роль виконують контури струму, швидкості та положення?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Одне правильне питання

Який механізм найчастіше перетворює обертання двигуна на лінійне переміщення стола або супорта?

- А. Кулькова гвинтова пара
- Б. Система охолодження
- В. Захисне огороження

Правильна відповідь: А.

2. Одне правильне питання

Який контур безпосередньо контролює відповідність фактичного положення заданій координаті?

- А. Контур положення
- Б. Контур освітлення
- В. Контур змащування

3. Декілька правильних відповідей

Які вимоги висувають до приводів подач?

- А. Висока точність
- Б. Плавність руху
- В. Мінімальний або відсутній люфт

4. Декілька правильних відповідей

Які елементи входять до структури привода подачі?

- А. Двигун
 - Б. Передавальний механізм
 - В. Датчик зворотного зв'язку
-

ТЕМА. СЕРВОДВИГУНИ

Понятійний апарат: серводвигун, сервопривод, ротор, статор, постійний магніт, обмотка, електромагнітний момент, сервопідсилювач, інвертор, енкодер, резольвер, контур струму, контур швидкості, контур положення, зворотний зв'язок, регулятор, широтно-імпульсна модуляція, момент двигуна, позиціонування, динамічна точність, перевантажувальна здатність, синхронний двигун, асинхронний двигун.

1. Поняття серводвигуна

Серводвигун - це двигун, призначений для точного керування положенням, швидкістю та моментом. На відміну від звичайного двигуна, серводвигун працює як частина замкненої системи. Система постійно порівнює задане та фактичне значення керованого параметра й коригує роботу двигуна.

У приводах верстатів з ЧПК серводвигуни застосовують:

- у приводах подач;
- у приводах поворотних осей;
- у приводах головного руху;
- у приводах зміни інструмента;
- у механізмах орієнтації шпинделя.

2. Конструкція серводвигуна

Типовий серводвигун складається з:

- статора;
- ротора;
- обмоток;
- постійних магнітів або електромагнітної системи;
- корпусу;
- підшипників;
- вала;
- датчика положення;
- гальма, якщо воно передбачене конструкцією;
- з'єднувального кабелю.

У сучасних приводах подач широко застосовують синхронні двигуни з постійними магнітами. Ротор такого двигуна створює магнітне поле, а статорні обмотки формують обертове електромагнітне поле.

3. Принцип дії серводвигуна

Система ЧПК задає положення, швидкість або момент. Сервоконтролер порівнює задане значення з фактичним і формує керуючий сигнал.

Послідовність роботи:

1. Система ЧПК формує завдання.
2. Регулятор визначає похибку.
3. Драйвер формує струми у фазах двигуна.
4. Створюється електромагнітний момент.
5. Ротор і вал починають рухатися.
6. Енкодер вимірює фактичне положення або швидкість.
7. Сигнал повертається до регулятора.
8. Керуючий сигнал коригується.

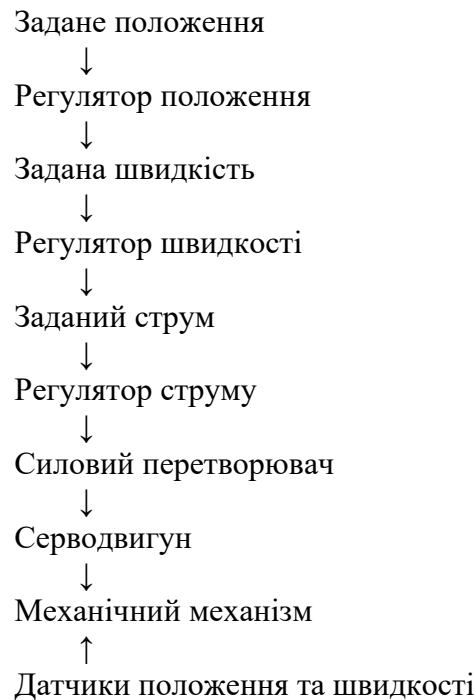
Сервопривод постійно пристосовує роботу двигуна до зміни навантаження.

4. Контури керування серводвигуном

Сучасний сервопривод зазвичай має ієрархічну структуру контурів:

- **Контур струму** - регулює струм обмоток двигуна, а отже — його електромагнітний момент. Він має найвищу швидкодію.
- **Контур швидкості** підтримує задану швидкість обертання двигуна. Сигнал фактичної швидкості отримують від енкодера, резольвера або іншого датчика.
- **Контур положення** забезпечує досягнення заданої координати. Він може використовувати інформацію від енкодера двигуна або лінійного датчика, встановленого на робочому органі.

Загальна схема:



Швидкодія внутрішнього контуру струму значною мірою визначає загальну якість сервосистеми. Для високої продуктивності необхідна достатня швидкість обробки сигналів і оновлення керуючого впливу.^[1]

5. Датчики серводвигуна

Для зворотного зв'язку використовують:

- інкрементні енкодери;
- абсолютні енкодери;
- резольвери;
- тахогенератори;
- лінійні вимірювальні системи.

Енкодер визначає положення вала за кількістю імпульсів або цифровим кодом. За зміною положення за одиницю часу можна визначити швидкість.

Абсолютний енкодер може зберігати інформацію про положення навіть після вимкнення живлення, тоді як інкрементна система часто потребує повторного базування.

Для високоточного верстата датчик може встановлюватися не лише на валу двигуна, а й безпосередньо на робочому органі. Це дає змогу враховувати похибки механічної передачі.

6. Серводвигуни у приводах подач

У приводах подач серводвигун повинен забезпечувати:

- точне позиціонування;
- плавний рух на малих швидкостях;
- швидкий розгін;
- швидке гальмування;

- реверсування;
- стабільний момент;
- роботу зі змінним навантаженням;
- синхронізацію з іншими осями.

Завдяки замкненому керуванню система може компенсувати відхилення між заданим і фактичним положенням.

Під час фрезерування складного контуру декілька серводвигунів працюють одночасно. Якщо одна вісь рухається із запізненням, форма деталі буде спотворена. Тому точне узгодження роботи приводів має особливе значення.

7. Серводвигуни у приводах головного руху

У приводах головного руху серводвигун забезпечує:

- регулювання частоти обертання шпинделя;
- підтримання швидкості під навантаженням;
- швидке прискорення;
- гальмування;
- реверсування;
- регулювання крутного моменту;
- орієнтацію шпинделя;
- синхронізацію під час нарізання різьби.

У шпиндельному приводі важливо забезпечити широкий діапазон швидкостей і достатню потужність. На низьких частотах потрібен значний крутний момент, а на високих — стабільна робота з допустимою потужністю.

Переваги серводвигунів

До основних переваг належать:

- висока точність позиціонування;
- замкнений контроль положення та швидкості;
- швидка реакція на зміну команди;
- стабільна робота при змінному навантаженні;
- високий момент у широкому діапазоні швидкостей;
- можливість короткочасного перевантаження;
- плавний рух на малих швидкостях;
- точна координата кількох осей;
- автоматичний контроль помилок;
- можливість діагностики;
- висока повторюваність обробки.
- Для серводвигунів характерні висока точність положення, швидка динамічна реакція та стабільний момент у широкому діапазоні швидкостей. [radonix.co]

Недоліки та вимоги до експлуатації

До недоліків серводвигунів належать:

- складніша система керування;
- вища вартість;
- необхідність застосування датчиків;
- складніше налагодження;
- вимоги до параметрів сервопідсилювача;
- потреба в діагностиці кабелів і зворотного зв'язку.

Неправильне налаштування регуляторів може спричинити:

- коливання;
- перерегулювання;
- шум;
- нагрівання двигуна;
- нестабільність положення;
- помилки сервосистеми.

Під час експлуатації перевіряють стан кабелів, роз'ємів, датчиків, механічних передач, системи охолодження та параметрів регулювання.

Висновок. Серводвигун є складовою замкненої системи керування, яка забезпечує точне регулювання положення, швидкості та моменту. Його робота ґрунтується на взаємодії двигуна, сервопідсилювача, регуляторів, механічної передачі та датчиків зворотного зв'язку. Серводвигуни широко застосовують у приводах подач і головного руху завдяки високій точності, швидкодії, плавності та можливості роботи зі змінним навантаженням.

Питання для самоперевірки

1. Що називають серводвигуном?
2. З яких основних частин складається серводвигун?
3. Яке призначення мають контури струму, швидкості та положення?
4. Які датчики використовують у серводвигунах?
5. Які переваги забезпечує застосування серводвигунів у верстатах з ЧПК?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Одне правильне питання

Який контур серводвигуна безпосередньо регулює електромагнітний момент через струм обмоток?

- А. Контур струму
- Б. Контур положення
- В. Контур охолодження

2. Одне правильне питання

Який елемент забезпечує вимірювання фактичного положення вала серводвигуна?

- А. Енкодер
- Б. Ремінь
- В. Підшипник

3. Декілька правильних відповідей

Які параметри можуть регулюватися в сервосистемі?

- А. Положення
- Б. Швидкість
- В. Крутний момент

4. Декілька правильних відповідей

Які переваги мають серводвигуни у верстатах з ЧПК?

- А. Висока точність позиціонування
- Б. Швидка реакція на зміну команди
- В. Плавний рух на малих швидкостях

ТЕМА. КРОКОВІ ДВИГУНИ

Понятійний апарат: кроковий двигун, статор, ротор, обмотка, крок, кроковий імпульс, кроковий режим, мікрокрокування, драйвер, фазова обмотка, електромагнітний момент, кроковий привод, відкрита система керування, замкнена система керування, пропуск кроків, момент утримання, пусковий момент, частота імпульсів, серводвигун, енкодер, позиціонування.

1. Призначення крокових двигунів

Кроковий двигун - це електричний двигун, вал якого повертається на певний кут під дією окремих керуючих імпульсів.

На відміну від звичайного двигуна, який обертається безперервно, кроковий двигун виконує дискретні кутові переміщення. Кожен імпульс відповідає одному кроку або частині кроку.

Крокові двигуни застосовують у:

- простих приводах подачі;
- навчальних верстатах з ЧПК;
- малогабаритних фрезерних верстатах;
- 3D-принтерах;
- координатних столах;
- плотерах;
- механізмах позиціонування;
- системах автоматизації з невисокими навантаженнями.

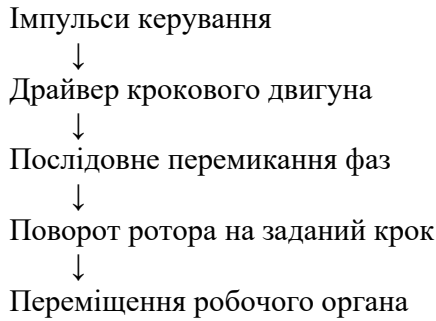


2. Принцип дії крокового двигуна

Основними частинами крокового двигуна є **статор** із фазовими обмотками та **ротор**. Під час подавання струму на окрему обмотку створюється магнітне поле, до якого повертається ротор.

Якщо обмотки вмикаються у визначеній послідовності, ротор повертається на заданий кут. Напрямок обертання залежить від порядку перемикання фаз.

Схематично процес можна подати так:



Кут одного кроку визначається конструкцією двигуна та кількістю фаз.

Поширеним є крок $1,8^\circ$, але конкретне значення залежить від моделі двигуна.

Кількість імпульсів визначає величину переміщення, а частота імпульсів — швидкість обертання. Для двигуна з кутом кроку α кількість кроків на один оберт визначають:

$$N = \frac{360^\circ}{\alpha}$$

Якщо двигун має крок $1,8^\circ$, один оберт відповідає 200 повним крокам.

Приклади (типові значення в ЧПК-верстатах):

Кут кроку α	Кількість кроків N
$1,8^\circ$	200 кроків/об
$0,9^\circ$	400 кроків/об
$7,5^\circ$	48 кроків/об
15°	24 кроки/об

3. Конструктивні різновиди

За конструкцією ротора крокові двигуни поділяють на:

- реактивні;
- з постійними магнітами;
- гібридні.

Гібридні крокові двигуни поєднують властивості

реактивних двигунів і двигунів із постійними магнітами. Вони мають зубчастий ротор і забезпечують малий кут кроку та достатній момент.

За схемою підключення обмоток розрізняють:

- уніполярні двигуни;
- біполярні двигуни.

Біполярні двигуни зазвичай забезпечують більший момент, але потребують складнішого драйвера, який змінює напрямок струму в обмотках.

4. Драйвер крокового двигуна

Безпосередньо підключати обмотки крокового двигуна до виходу системи ЧПК не можна. Між контролером і двигуном установлюють драйвер.

Драйвер виконує такі функції:

- підсилює керуючі сигнали;
- формує струми у фазових обмотках;
- задає послідовність перемикання фаз;
- забезпечує мікрокрокування;
- обмежує струм;
- захищає двигун від перевантаження;
- може формувати сигнали аварії.

Основними сигналами керування часто є:

STEP — імпульс кроку;

DIR — напрямок обертання;

ENABLE — дозвіл роботи.

5. Мікрокрокування

Мікрокрокування - це режим, у якому повний крок двигуна поділяється на декілька дрібніших кроків.

Наприклад, один повний крок може бути поділений на:

- 2;
- 4;
- 8;
- 16;
- 32 або більше мікрокроків.

Мікрокрокування забезпечує:

- плавніший рух;
- зменшення вібрацій;
- зменшення шуму;
- підвищення роздільної здатності;
- кращу якість поверхні під час малих переміщень.

Однак збільшення кількості мікрокроків не означає пропорційного збільшення реальної точності. На точність також впливають люфти, жорсткість механізму, навантаження та похибка самого двигуна.

Переваги крокових двигунів

Основними перевагами є:

- проста конструкція;
- невисока вартість;
- просте керування імпульсами;
- можливість точного дискретного переміщення;
- високий момент утримання;
- відсутність обов'язкової потреби в енкодері;
- зручність використання у навчальних системах;
- простота обслуговування.

Кроковий двигун може утримувати ротор у заданому положенні навіть без обертання. Це є корисним під час позиціонування робочого органа.

Недоліки крокових двигунів

У разі перевищення допустимого навантаження двигун може пропустити один або кілька кроків. Якщо система не має датчика зворотного зв'язку, контролер не дізнається про помилку.

Основні недоліки:

- можливість пропуску кроків;
- зменшення моменту зі зростанням швидкості;
- нагрівання навіть у стані утримання;
- вібрації та резонанс;
- обмежена швидкодія;
- відсутність автоматичного контролю фактичного положення у відкритій системі;
- зниження точності при змінному навантаженні.

Тому крокові двигуни доцільно застосовувати тоді, коли навантаження відоме, а вимоги до динаміки та точності не є надмірно високими.

8. Порівняння крокових двигунів і серводвигунів

Ознака	Серводвигун	Кроковий двигун
Зворотний зв'язок	Зазвичай наявний	Може бути відсутній
Контроль положення	Фактичний	Розрахунковий у відкритій системі
Швидкодія	Висока	Нижча
Робота зі змінним навантаженням	Стабільна	Можливий пропуск кроків
Момент на високій швидкості	Краще підтримується	Зменшується
Плавність	Висока	Залежить від мікрокрокування
Вартість	Вища	Нижча
Налагодження	Складніше	Простіше
Застосування	Промислові верстати	Прості та навчальні системи

Серводвигуни переважно використовують у високошвидкісній обробці, коли змінюється навантаження або потрібно гарантувати точність положення. Крокові двигуни придатні для простіших, повільніших і економічніших систем.[\[dgflexprecision\]](http://dgflexprecision)

Висновок. Кроковий двигун перетворює послідовність електричних імпульсів на дискретні кутові переміщення. Його перевагами є простота, невисока вартість і зручність керування. Основним недоліком є можливість пропуску кроків при перевантаженні або надмірній швидкості. Серводвигуни мають вищу швидкодію та точність, але є складнішими й дорожчими. Вибір між кроковим і серводвигуном визначається точністю, навантаженням, швидкістю та призначенням обладнання.

Питання для самоперевірки

Що називають кроковим двигуном?

Як послідовність імпульсів впливає на рух ротора?

Яке призначення має драйвер крокового двигуна?

У чому полягають переваги та недоліки мікрокрокування?

Чим крокові двигуни відрізняються від серводвигунів?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Одне правильне питання

Що визначає кількість імпульсів, поданих на кроковий двигун?

- А. Величину переміщення
- Б. Колір ізоляції обмотки
- В. Температуру охолоджувальної рідини

2. Одне правильне питання

Який пристрій формує струми у фазових обмотках крокового двигуна?

- А. Драйвер
- Б. Кулькова гвинтова пара
- В. Датчик температури

3. Декілька правильних відповідей

Які недоліки характерні для крокових двигунів?

- А. Можливість пропуску кроків
- Б. Зменшення моменту на великих швидкостях
- В. Обов'язкова наявність складного енкодера

4. Декілька правильних відповідей

Які переваги мають серводвигуни порівняно з кроковими?

- А. Вища швидкодія
- Б. Контроль фактичного положення
- В. Більша придатність до роботи зі змінним навантаженням

ТЕМА. КУЛЬКОГВИНТОВІ ПЕРЕДАЧІ ТА ЛІНІЙНІ ПЕРЕМІЩЕННЯ

Понятійний апарат:кулькогвинтова передача, кулькова гвинтова пара, гвинт, гайка, кулька, доріжка кочення, рециркуляція кульок, крок гвинта, ходовий гвинт, лінійне переміщення, осьове зусилля, жорсткість, люфт, попереднє натягування, зворотний хід, точність позиціонування, тертя, змащування, теплове розширення, температурна компенсація, лінійний енкодер.

1. Призначення кулькогвинтової передачі

Кулькогвинтова передача призначена для перетворення обертального руху двигуна на точне лінійне переміщення робочого органа верстата.

Вона використовується у приводах:

- поздовжніх переміщень;
- поперечних переміщень;
- вертикальних осей;
- координатних столів;
- супортів;
- шпиндельних бабок.

Більшість лінійних осей сучасних верстатів з ЧПК використовують кулькову гвинтову пару для перетворення обертання серводвигуна на точне та потужне лінійне переміщення. [[renishaw](https://www.renishaw.com)]

2. Конструкція кулькогвинтової передачі

Основними елементами є:

- гвинт;
- кулькова гайка;
- металеві кульки;
- канали рециркуляції;
- опорні підшипники;
- муфта;
- захисні ущільнення;
- система змащування.

На поверхні гвинта та всередині гайки виконані гвинтові доріжки кочення. Між ними розміщуються кульки.

Під час обертання гвинта кульки перекочуються по доріжках і передають зусилля від гвинта до гайки. Через спеціальний канал кульки повертаються до початку робочої ділянки, утворюючи замкнений контур циркуляції.

3. Принцип перетворення руху

Якщо гвинт обертається, гайка переміщується вздовж його осі. Якщо гайка закріплена на робочому органі, її лінійне переміщення спричиняє переміщення стола або супорта.

Величина переміщення за один оберт визначається ходом гвинта:

$$L = n \cdot p,$$

де:

L — лінійне переміщення;

n — кількість обертів;

p — крок або хід гвинта.

Для гвинта з ходом 10 мм один повний оберт гайки або гвинта відповідає переміщенню на 10 мм.

Якщо двигун має N керуючих імпульсів на оберт, теоретичне переміщення на один імпульс становить:

$$\Delta x = \frac{p}{N}$$

Якщо крок ходового гвинта $p = 5$ мм, а двигун має $N = 200$ кроків/об (при куті кроку $\alpha = 1,8^\circ$), то:

$$\Delta x = \frac{5}{200} = 0,025 \text{ мм/імпульс}$$

Тобто кожен імпульс переміщує стіл верстата всього на 0,025 мм (25 мікрон).

Практичне значення: ця величина визначає **точність позиціонування** верстата з ЧПК. Чим менше Δx , тим точніше система може відпрацьовувати задані координати. Ця дискретність є базовою характеристикою, яку враховують при виборі крокового двигуна та ходового гвинта для досягнення потрібної точності обробки. Якщо в кінематиці є ще й редуктор (передавальне число i) між двигуном і гвинтом, формула ускладнюється: $\Delta x = p/(N \cdot i)$.

Фактична точність залежить не лише від цього значення, а й від похибки гвинта, люфту, жорсткості та точності зворотного зв'язку.

4. Переваги кулькогвинтових передач

Порівняно з традиційними гвинтовими передачами ковзання кулькогвинтові передачі мають:

- низьке тертя;
- високий коефіцієнт корисної дії;
- малий знос;
- високу точність;
- можливість попереднього натягування;
- високу жорсткість;
- добру повторюваність;
- можливість роботи на значних швидкостях.

Висока ефективність дозволяє використовувати двигуни меншої потужності або отримувати більшу швидкість при тій самій потужності.

5. Точність і жорсткість

Точність лінійного переміщення залежить від:

- точності виготовлення гвинта;
- крокової похибки;
- осьового люфту;
- попереднього натягування;
- жорсткості опор;
- пружних деформацій;
- температури;
- точності датчика;
- стану напрямних.

Жорсткість визначає здатність передачі протистояти деформації під дією осьового навантаження.

Низька жорсткість може спричинити:

- відхилення робочого органа;
- вібрації;
- похибку розміру;
- затримку під час зміни напрямку;
- погіршення якості поверхні.

Під час конструювання враховують діаметр гвинта, довжину, спосіб закріплення та частоту обертання.

6. Люфт кулькогвинтової пари

Люфт - це переміщення або кутовий зазор, за якого напрямок руху вже змінився, але робочий орган ще не почав переміщатися у новому напрямку.

Причинами люфту можуть бути:

- зношування кульок і доріжок;
- неправильне попереднє натягування;
- ослаблення гайки;
- зношування опор;
- деформація муфти;
- помилки монтажу.

Люфт особливо помітний під час зміни напрямку руху. Якщо система не компенсує його, фактична траєкторія відрізнятиметься від запрограмованої.

7. Компенсація люфту

Компенсація люфту може здійснюватися механічним або програмним способом.

Механічна компенсація

До механічних способів належать:

- попереднє натягування гайки;
- застосування здвоєних гайок;
- регулювання опорних підшипників;
- заміна зношених кульок;
- правильне регулювання муфти;
- усунення ослаблення кріплень.

Механічне усунення люфту є кращим способом, оскільки відновлює точність самої передачі.

Програмна компенсація

Система ЧПК може мати параметр компенсації люфту. Під час зміни напрямку контролер додає до команди певну величину переміщення.

Проте програмна компенсація:

- не усуває фізичний знос;
- залежить від правильності вимірювання;
- може бути різною для різних напрямків;
- не компенсує всі пружні та температурні похибки.

Значення компенсації визначають за результатами вимірювання, а не встановлюють довільно.

8. Теплові деформації

Під час роботи кулькогвинтова пара нагрівається через:

- тертя;
- високу частоту обертання;
- навантаження;
- роботу двигуна;
- тепло від шпинделя або зони різання.

Нагрівання спричиняє теплове розширення гвинта. Якщо гвинт подовжується, фактичне положення робочого органа змінюється.

Теплова похибка є одним із важливих джерел похибки позиціонування високошвидкісних верстатів з ЧПК.[\[journal.mmi.kpi\]](http://journal.mmi.kpi)

9. Компенсація теплових деформацій

Для зменшення теплових похибок застосовують:

- попередній прогрів верстата;
- охолодження гвинта;
- правильне змащування;
- температурні датчики;
- математичні моделі теплового розширення;
- програмну температурну компенсацію;
- лінійні вимірювальні системи.

Лінійний енкадер, установлений безпосередньо на осі, вимірює фактичне переміщення робочого органа. Це дає змогу врахувати розширення гвинта та виконувати коригування в реальному часі.[\[renishaw\]](http://renishaw)

Висновок. Кулькогвинтова передача перетворює обертання двигуна на точне лінійне переміщення робочого органа. Її основними перевагами є низьке тертя, висока точність, жорсткість і можливість роботи на значних швидкостях. На точність впливають люфт, похибка кроку, пружні деформації та нагрівання. Люфт усувають механічним регулюванням або компенсують програмно, а теплові деформації зменшують охолодженням, температурними моделями та використанням лінійних датчиків.

Питання для самоперевірки

Яке призначення має кулькогвинтова передача?

З яких основних елементів складається кулькова гвинтова пара?

Як обертання гвинта перетворюється на лінійне переміщення?

Що таке люфт і як він впливає на точність обробки?

Якими способами компенсують люфт і теплові деформації?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Одне правильне питання

Яке основне призначення кулькогвинтової передачі?

- А. Перетворення обертального руху на лінійний
- Б. Охолодження електродвигуна
- В. Вимірювання температури заготовки

Правильна відповідь: А.

2. Одне правильне питання

Що є основним елементом, який забезпечує перекошування між гвинтом і гайкою?

- А. Кулька
- Б. Ремінь
- В. Щітка

3. Декілька правильних відповідей

Які фактори впливають на точність кулькогвинтової передачі?

- А. Люфт
- Б. Теплове розширення
- В. Жорсткість і точність виготовлення

4. Декілька правильних відповідей

Які способи застосовують для компенсації теплових деформацій?

- А. Охолодження гвинта
- Б. Температурну компенсацію
- В. Використання лінійного датчика

ТЕМА. ІНТЕРПОЛЯЦІЯ РУХІВ

***Понятійний апарат:** інтерполяція, інтерполятор, траєкторія руху, опорна точка, початкова точка, кінцева точка, проміжна точка, лінійна інтерполяція, кругова інтерполяція, гвинтова інтерполяція, координатна вісь, контурне керування, швидкість подачі, вектор переміщення, параметрична функція, G00, G01, G02, G03, площа інтерполяції, радіус дуги, центр дуги, апроксимація.*

1. Поняття інтерполяції

Інтерполяція в системі ЧПК — це розрахунок проміжних координат, необхідних для переміщення інструмента між заданими опорними точками за певною траєкторією.

У керуючій програмі програміст зазвичай задає початкову та кінцеву точки руху. Система ЧПК самостійно визначає послідовність проміжних положень і формує команди для приводів координатних осей.

Наприклад, якщо задано переміщення з точки:

X10 Y10

у точку:

X50 Y30

інтерполятор розраховує, як одночасно повинні рухатися осі X та Y, щоб інструмент пройшов заданою траєкторією.

Інтерполяція особливо важлива для контурної обробки, коли одночасно рухаються дві або більше координатних осей.

2. Завдання інтерполятора

Інтерполятор виконує такі **функції**:

- визначає проміжні координати;
- узгоджує рух кількох осей;
- підтримує задану швидкість подачі;
- формує цифрові команди приводам;
- забезпечує задану геометрію траєкторії;
- враховує напрямки руху;
- обробляє лінійні та кругові команди;
- координує рух із допоміжними функціями.

У системі ЧПК інтерполятор повинен працювати достатньо швидко, щоб переміщення інструмента було плавним, а траєкторія — близькою до заданої.

3. Лінійна інтерполяція

Лінійна інтерполяція забезпечує рух інструмента по прямій лінії між початковою та кінцевою точками.

У багатьох системах ЧПК лінійну інтерполяцію задають командою:

G01 X... Y... Z... F...

Наприклад:

G01 X50 Y30 F200

означає переміщення до точки X50, Y30 із заданою подачею.

Для прямолінійного переміщення система повинна забезпечити пропорційне співвідношення швидкостей осей. Якщо одна вісь рухається швидше за іншу, інструмент не пройде точно по прямій. Для двох координат рівняння прямої можна записати:

$$x = x_0 + \lambda(x_1 - x_0),$$

$$y=y_0+\lambda (y_1-y_0),$$

де λ змінюється від 0 до 1, x_0, y_0 — координати початкової точки, x_1, y_1 — координати кінцевої точки.

4. Швидкість подачі під час лінійної інтерполяції

Швидкість подачі **F** задається в керуючій програмі. Вона може виражатися в:

- мм/хв;
- мм/об;
- дюймах/хв;
- інших одиницях залежно від режиму системи.

Під час одночасного руху кількох осей задана подача зазвичай розглядається як швидкість переміщення результуючої траєкторії, а не окремої осі.

Система ЧПК розподіляє рух між приводами так, щоб інструмент переміщувався за заданою прямою зі встановленою швидкістю.

5. Кругова інтерполяція

Кругова інтерполяція забезпечує рух інструмента по дузі кола.

У більшості систем використовують:

G02 — кругова інтерполяція за годинниковою стрілкою;

G03 — кругова інтерполяція проти годинникової стрілки.

Конкретний напрямок залежить від вибраної площини та правила огляду координатної системи. Тому перед програмуванням необхідно визначити площину інтерполяції.

Найчастіше використовують:

G17 — площадь XY;

G18 — площадь XZ ;

G19 — площадь YZ .

Кругова інтерполяція може задаватися:

- координатами центра дуги;
- радіусом;
- кінцевою точкою;
- кутом або іншими параметрами, якщо це передбачено системою.

У документації Beckhoff команда G02 описується як рух по круговій або гвинтовій дузі до запрограмованої точки з поточною швидкістю.[\[infosys.beckhoff\]](https://www.beckhoff.com/en/products/plc/controllers/rt-controller-tx2-ethernet-ip/doc/6879317main_en.pdf)

6. Задання центра дуги

Центр дуги може задаватися відносними координатами від початкової точки. У багатьох системах для цього використовують адреси:

I — зміщення центра по осі X;

J — зміщення центра по осі Y;

K — зміщення центра по осі Z.

Приклад:

G02 X40 Y20 I10 J0 F150

У цьому випадку система повинна визначити дугу за кінцевою точкою та зміщенням центра.

В інших системах допускається задання радіуса:

G03 X40 Y20 R15 F150

Правила використання I, J, K і R залежать від конкретної системи ЧПК. Тому програміст повинен користуватися документацією відповідного контролера.

7. Побудова траєкторії між опорними точками

Для побудови траєкторії система виконує такі операції:

- Зчитує початкове положення інструмента.
- Аналізує команду керуючої програми.
- Визначає кінцеву точку.
- Визначає тип траєкторії.
- Вибирає активну площину.
- Розраховує проміжні координати.
- Розподіляє рух між приводами.
- Підтримує задану подачу.
- Передає команди до приводів.

Контролює фактичне переміщення за сигналами зворотного зв'язку.

Під час руху по складному контуру окремі лінійні та кругові ділянки послідовно з'єднуються. Опорні точки повинні бути задані так, щоб між ними можна було однозначно побудувати необхідну траєкторію.

8. Апроксимація складних поверхонь

Не всі складні поверхні можна описати однією лінійною або круговою командою. У такому випадку поверхню апроксимують великою кількістю коротких відрізків або дуг.

САМ-система може сформулювати програму з багатьма кадрами:

G01 X10.2 Y5.4

G01 X10.8 Y6.1

G01 X11.5 Y6.8

G01 X12.1 Y7.6

Чим менша відстань між опорними точками, тим точніше траєкторія наближається до заданої поверхні.

Однак збільшення кількості кадрів призводить до:

- зростання обсягу програми;
- збільшення часу її обробки;
- підвищення вимог до пам'яті;
- можливого зниження плавності при недостатній швидкодії системи.

Тому під час створення програми вибирають раціональний крок апроксимації.

9. Інтерполяція та багатокоординатний рух

У багатоосьових верстатах одночасно можуть керуватися:

- три лінійні осі;
- дві лінійні та одна поворотна;
- три лінійні та дві поворотні;
- інші комбінації координат.

Система ЧПК повинна синхронізувати лінійні та кутові переміщення. Це необхідно для обробки:

- похилих поверхонь;
- лопаток;
- прес-форм;
- складних корпусних деталей;
- просторових криволінійних поверхонь.

Помилка узгодження осей може спричинити порушення геометрії деталі, появу слідів на поверхні або перевищення допустимої похибки.

Висновок. Інтерполяція забезпечує розрахунок проміжних координат і формування траєкторії руху інструмента між заданими опорними точками. Лінійна інтерполяція формує прямолінійну траєкторію, а кругова — дугу кола. Команди G01, G02 і G03 є типовими засобами задання відповідних рухів, однак їхні точні правила залежать від конкретної системи ЧПК. Для складних поверхонь використовують апроксимацію відрізками, дугами або просторовими траєкторіями.

Питання для самоперевірки

Що називають інтерполяцією в системі ЧПК?

Яке призначення має інтерполятор?

Чим відрізняються лінійна та кругова інтерполяція?

Які команди використовують для задання лінійного та кругового руху?

Чому під час обробки складних поверхонь застосовують апроксимацію?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Одне правильне питання

Яка команда зазвичай задає лінійну інтерполяцію?

- A. G01
- Б. G02
- В. M30

2. Одне правильне питання

Яка команда зазвичай задає кругову інтерполяцію проти годинникової стрілки?

- A. G03
- Б. G00
- В. G04

3. Декілька правильних відповідей

Які завдання виконує інтерполятор системи ЧПК?

- A. Розраховує проміжні координати
- Б. Узгоджує рух кількох осей
- В. Формує команди для приводів

4. Декілька правильних відповідей

Які параметри можуть використовуватися для задання кругової інтерполяції?

- A. Кінцева точка дуги
- Б. Центр дуги або його зміщення
- В. Радіус дуги

ТЕМА. КЕРУВАННЯ ШПИНДЕЛЕМ

Понятійний апарат: шпиндель, привод шпинделя, частота обертання, швидкість різання, крутний момент, потужність, регулятор швидкості, частотний перетворювач, серводвигун, енкодер, тахогенератор, зворотний зв'язок, орієнтація шпинделя, фіксоване положення, нульова мітка, синхронізація, нарізання різьби, жорстке нарізання різьби, зміна інструмента, гальмування шпинделя.

1. Призначення шпинделя

Шпиндель є основним обертовим робочим органом верстата. На токарному верстаті він обертає заготовку, а на фрезерному — інструмент.

Привод шпинделя повинен забезпечувати:

- задану частоту обертання;
- необхідний крутний момент;
- плавний розгін і гальмування;
- стабільність швидкості під навантаженням;
- реверсування;
- точне позиціонування;
- синхронізацію з рухом подачі.

Основними параметрами шпинделя є частота обертання n , крутний момент M і потужність P . Їхній взаємозв'язок визначається залежністю:

$$P = M\omega$$

Де ω — кутова швидкість шпинделя.

2. Керування частотою обертання

Частота обертання шпинделя задається в керуючій програмі адресою **S**, наприклад: **S1200 M03**. У цьому прикладі задається частота обертання 1200 об/хв і запуск шпинделя в одному з напрямків.

Для керування частотою обертання застосовують:

- асинхронні двигуни з частотними перетворювачами;
- синхронні серводвигуни;
- двошвидкісні або багатошвидкісні двигуни;
- механічні коробки передач;
- комбіновані електромеханічні системи.

Частотний перетворювач змінює частоту та напругу живлення двигуна, завдяки чому регулюється швидкість обертання.

У сучасних верстатах система ЧПК формує команду заданої швидкості, а привод шпинделя забезпечує її фактичне виконання. Якщо використовується зворотний зв'язок, фактична швидкість контролюється енкодером або іншим датчиком.

2. Режими запуску та зупинки

Для керування напрямком обертання шпинделя використовують допоміжні команди:

M03 — обертання в одному напрямку;

M04 — обертання у зворотному напрямку;

M05 — зупинка шпинделя.

Точне призначення кодів залежить від системи ЧПК, тому під час роботи необхідно користуватися документацією конкретного контролера.



Розгін і гальмування повинні виконуватися із заданою швидкістю. Різке збільшення частоти обертання може спричинити:

- ударні навантаження;
- прослизання заготовки;
- перевантаження двигуна;
- пошкодження інструмента;
- виникнення вібрацій.

Перед запуском шпинделя необхідно перевірити правильність закріплення заготовки, інструмента та захисного огороження.

4. Постійна швидкість різання

Під час токарної обробки система може підтримувати сталу швидкість різання, навіть якщо діаметр оброблюваної поверхні змінюється.

Зв'язок між швидкістю різання та частотою обертання має вигляд:

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000}$$

де:

v_c — швидкість різання, м/хв;

D — діаметр обробки, мм;

n — частота обертання, об/хв.

Звідси:

$$n = \frac{1000 v_c}{\pi D}$$

Якщо діаметр заготовки зменшується, для підтримання сталої швидкості різання частота обертання повинна збільшуватися. Однак система встановлює граничне значення частоти, щоб не допустити небезпечного перевищення швидкості.

5. Зворотний зв'язок у приводі шпинделя

Для контролю частоти обертання використовують:

- тахогенератори;
- інкрементні енкодери;
- абсолютні енкодери;
- датчики положення шпинделя;
- датчики струму та моменту.

Енкодер може визначати кутове положення шпинделя та обчислювати швидкість за частотою імпульсів. Зворотний зв'язок дає змогу підтримувати задану частоту обертання незалежно від зміни навантаження.

Під час навантаження швидкість шпинделя може зменшитися. Система керування збільшує керуючий сигнал для привода та відновлює задану швидкість.

6. Орієнтація шпинделя

Орієнтація шпинделя - це встановлення його в певне кутове положення.

Для цього система:

- визначає фактичне положення шпинделя;
- порівнює його із заданим;
- зменшує швидкість обертання;
- зупиняє шпиндель у потрібній позиції;
- активує сигнал готовності до подальшої операції.

Орієнтація необхідна для:

- автоматичної зміни інструмента;
- правильного входження шпонки у паз інструментального блока;
- встановлення інструмента у визначене положення;
- роботи приводного інструмента;
- нарізання різьби;
- шліцера або спеціальної обробки;
- вимірювання положення шпинделя.

Положення орієнтації може визначатися енкодером, референтною міткою або окремим датчиком.

7. Синхронізація шпинделя та подачі

Під час нарізання різьби необхідно синхронізувати обертання шпинделя з осьовим переміщенням інструмента.

Якщо крок різьби дорівнює p , а шпиндель обертається зі швидкістю n , осьова подача повинна відповідати:

$$v_f = p \cdot n,$$

де v_f — швидкість осьового переміщення, мм/хв, p — крок різьби, мм/об.

Будь-яке порушення синхронізації може спричинити неправильний крок різьби або пошкодження інструмента.

Для жорсткого нарізання різьби шпиндель працює як координатна вісь: система ЧПК контролює його кутове положення та узгоджує його з лінійним рухом подачі.

Висновок. Керування шпинделем охоплює регулювання частоти обертання, напрямку, розгону, гальмування, навантаження та кутового положення. Система ЧПК може підтримувати сталу швидкість різання, контролювати фактичну швидкість і виконувати точну орієнтацію шпинделя. Синхронізація шпинделя з подачею є необхідною умовою якісного нарізання різьби та виконання автоматичної зміни інструмента.

Питання для самоперевірки

Які основні функції виконує привод шпинделя?

Як здійснюється керування частотою обертання шпинделя?

Для чого застосовують зворотний зв'язок у приводі шпинделя?

Що називають орієнтацією шпинделя?

Чому під час нарізання різьби необхідно синхронізувати шпиндель і подачу?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Одне правильне питання

Яка команда зазвичай задає частоту обертання шпинделя?

- A. S
- B. G
- B. T

2. Одне правильне питання

Для чого виконується орієнтація шпинделя?

- A. Для встановлення шпинделя у визначене кутове положення
- B. Для подавання охолоджувальної рідини
- B. Для вимірювання довжини заготовки

3. Декілька правильних відповідей

Для яких операцій потрібна орієнтація шпинделя?

- A. Автоматична зміна інструмента
- B. Жорстке нарізання різьби
- B. Визначення положення шпинделя

4. Декілька правильних відповідей

Які пристрої можуть контролювати швидкість або положення шпинделя?

- A. Енкодер
 - B. Тахогенератор
 - B. Датчик положення
-

ТЕМА. АВТОМАТИЧНА ЗМІНА ІНСТРУМЕНТА

Понятійний апарат: автоматична зміна інструмента, АТС, інструментальний магазин, револьверна головка, інструментальна позиція, інструментальний блок, інструментальний конус, захват, механізм зміни, шпиндель, орієнтація шпинделя, датчик положення, інструментальний номер, команда T, допоміжна команда M06, затискання інструмента, розтискання інструмента, позиціонування, блокування, контроль інструмента.

1. Призначення автоматичної зміни інструмента

Автоматична зміна інструмента призначена для швидкої заміни інструмента без ручного втручання оператора.

Застосування автоматичної зміни дає змогу:

- скоротити допоміжний час;
- обробляти деталь кількома інструментами;
- автоматизувати послідовність операцій;
- підвищити продуктивність;
- зменшити кількість повторних базувань;
- використовувати багатоопераційні технологічні цикли.

Автоматичні пристрої зміни інструмента є важливою частиною обробних центрів. Вони зберігають інструменти у магазині та автоматично подають потрібний інструмент до шпинделя.[\[slideshare\]](#)



2. Інструментальні магазини

Інструментальний магазин призначений для зберігання набору інструментів і подавання вибраного інструмента до механізму зміни.

Основними типами магазинів є:

- дискові;
- барабанні;
- ланцюгові;
- касетні;
- стелажні;
- матричні.

Дисковий магазин має гнізда, розташовані по колу.

Барабанний магазин також використовує кругове розміщення інструментів і може бути компактним.

Ланцюгові та **стелажні** магазини застосовують, коли потрібно зберігати велику кількість інструментів. Кожне гніздо магазину має номер. Система ЧПК повинна знати відповідність між номером гнізда та номером інструмента.



3. Револьверні головки

Револьверна головка використовується переважно на токарних і токарно-фрезерних верстатах.

Вона має кілька інструментальних позицій, розташованих по колу.

Під час зміни інструмента головка повертається, встановлюючи потрібну позицію в робоче положення.

Револьверна головка може містити:

- різці;
- свердла;
- розточувальні оправки;
- різьбонарізні інструменти;
- приводні фрези;
- інструменти для торцевої обробки.



Поворот головки здійснюється електричним, гідравлічним або

комбінованим приводом. Після встановлення необхідної позиції спрацьовує механізм фіксації.

4. Конструкція автоматичного пристрою зміни

Типовий пристрій автоматичної зміни інструмента може містити:

- інструментальний магазин;
- механізм подавання магазину;
- двопозиційний або багатопозиційний захват;
- привод повороту;
- механізм переміщення захвата;
- механізм затискання інструмента;
- датчики положення;
- блокування;
- систему керування.

На обробних центрах часто використовують двозахватний механізм. Один захват утримує інструмент, який знаходиться у шпинделі, а другий — новий інструмент.

Для правильного виконання зміни необхідні:

- зупинка шпинделя;
- орієнтація шпинделя;
- відведення робочого органа у безпечну позицію;
- правильне позиціонування магазину;
- контроль затискання та розтискання;
- підтвердження завершення операції.

5. Програмування зміни інструмента

У керуючій програмі номер інструмента часто задається адресою **T**, а команда зміни — **M06**.

Приклад:

T01 M06

Цей запис означає вибір інструмента №1 і виконання його автоматичної зміни.

У деяких системах команда **T** лише вибирає інструмент або позицію магазину, а команда **M06** фактично запускає процес зміни. В інших системах логіка може відрізнятися.

Після зміни інструмента необхідно активувати відповідні корекції його довжини та радіуса.

6. Алгоритм автоматичної зміни інструмента

Типовий алгоритм має такий вигляд:

1. Система зчитує команду вибору інструмента.

- 2.Перевіряється номер інструмента.
- 3.Робочий орган переміщується у безпечну позицію.
- 4.Шпиндель зупиняється.
- 5.Виконується орієнтація шпинделя.
- 6.Шпиндель розтискає інструмент.
- 7.Магазин установлює потрібний інструмент у позицію зміни.
- 8.Захват захоплює інструмент зі шпинделя.
- 9.Другий захват захоплює новий інструмент.
- 10.Механізм виконує поворот або переміщення захвата.
- 11.Новий інструмент установлюється у шпиндель.
- 12.Шпиндель затискає інструмент.
- 13.Виконується повернення захвата та магазину.
- 14.Датчики перевіряють положення механізмів.
- 15.Система дозволяє продовжити виконання програми.

У реальних конструкціях окремі етапи можуть виконуватися в іншій послідовності. Наприклад, магазин може попередньо вибрати наступний інструмент під час поточної обробки.

7. Контроль і блокування

Для запобігання помилкам система автоматичної зміни має датчики:

- положення магазину;
- положення захвата;
- наявності інструмента;
- затискання інструмента;
- орієнтації шпинделя;
- положення револьверної головки;
- закриття дверей;
- завершення повороту.

Якщо датчик не підтверджує необхідне положення, система формує повідомлення про помилку та блокує подальший рух.

Типові причини несправностей:

- неправильне положення магазину;
- відсутність інструмента у гнізді;
- неповне затискання;
- неправильна орієнтація шпинделя;
- забруднення конуса;
- пошкодження захвата;
- несправність датчика;
- недостатній тиск пневматичної або гідравлічної системи.

8. Вимоги до експлуатації

Перед роботою необхідно:

- перевірити правильність установлення інструментів;
- переконатися у відповідності номера інструмента та гнізда;
- очистити конічні поверхні;
- перевірити стан захватів;
- перевірити роботу датчиків;
- не допускати перебування сторонніх предметів у зоні зміни;
- переконатися, що шпиндель повністю зупинився.

Не можна вручну втручатися у роботу механізму зміни під час автоматичного циклу. Налагодження, очищення та обслуговування виконують після зупинки обладнання та відповідно до інструкції виробника.

Висновок. Автоматична зміна інструмента забезпечує послідовну роботу верстата з кількома інструментами без ручного втручання оператора. Основними пристроями є інструментальні магазини та револьверні головки. Для безпечної зміни необхідні правильна зупинка й орієнтація шпинделя, переміщення механізму у визначеній послідовності та контроль датчиками. Система блокування не допускає продовження роботи, якщо інструмент або механізм зміни перебуває у неправильному положенні.

Питання для самоперевірки

Яке призначення має автоматична зміна інструмента?

Які типи інструментальних магазинів застосовують у верстатах з ЧПК?

Де переважно використовують револьверні головки?

Які основні етапи містить алгоритм автоматичної зміни інструмента?

Які датчики та блокування забезпечують безпеку роботи АТС?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Одне правильне питання

Який пристрій призначений для зберігання набору інструментів?

- А. Інструментальний магазин
- Б. Тахогенератор
- В. Система охолодження

3. Декілька правильних відповідей

Що необхідно виконати перед автоматичною зміною інструмента?

- А. Зупинити шпиндель
- Б. Орієнтувати шпиндель
- В. Відвести робочий орган у безпечну позицію.

2. Одне правильне питання

Який код часто використовують для команди автоматичної зміни інструмента?

- А. M06
- Б. G01
- В. G90

4. Декілька правильних відповідей

Які елементи входять до системи автоматичної зміни інструмента?

- А. Інструментальний магазин
- Б. Механізм захвата
- В. Датчики положення

ТЕМА. КОРЕКТОРИ ІНСТРУМЕНТА, РОБОЧІ НУЛІ ТА СИСТЕМИ КООРДИНАТ ДЕТАЛІ

Понятійний апарат: коректор інструмента, корекція довжини, корекція радіуса, корекція зносу, довжина інструмента, радіус фрези, радіус вершини різця, таблиця інструментів, нуль деталі, робочий нуль, машинний нуль, система координат деталі, машинна система координат, зміщення нуля, G54, G55, G56, G43, G44, G49, G40, G41, G42, вимірювання інструмента, щуп, прив'язка інструмента.

1. Призначення коректорів інструмента

Коректор інструмента — це числове значення, яке враховує геометричні розміри або зношування конкретного інструмента.

У системі ЧПК програміст задає траєкторію робочої точки інструмента, а коректор допомагає системі визначити фактичне положення різальної кромки.

Коректори необхідні тому, що інструменти мають різні:

- довжини;
- діаметри;
- радіуси;
- форми;
- положення різальної кромки;
- ступені зношування.

Застосування коректорів дає змогу не змінювати основну програму щоразу після заміни або вимірювання інструмента.

2. Корекція довжини інструмента

Корекція довжини особливо важлива на фрезерних верстатах і обробних центрах.

У таблиці інструментів зберігається відстань від базової точки інструментального блока до робочої точки інструмента. Для різних інструментів ця відстань може відрізнятися.

Під час виконання програми система враховує:

- довжину інструмента;
- положення шпинделя;
- нуль деталі;
- задану координату Z;
- номер коректора.

У багатьох системах корекція довжини активується командами типу: **G43 H01**

де **H01** відповідає номеру коректора довжини інструмента.

В інших системах можуть використовуватися інші формати команд, тому позначення необхідно перевіряти за документацією конкретного контролера.

3. Введення довжини інструмента

Загальний порядок введення довжини інструмента:

1. Установити інструмент у шпиндель або вимірювальний пристрій.
2. Вибрати відповідний номер інструмента.
3. Виміряти відстань до робочої точки.
4. Відкрити таблицю коректорів.
5. Ввести отримане значення у відповідний рядок.
6. Перевірити одиниці вимірювання.
7. Зберегти значення.
8. Виконати контрольне переміщення.

Вимірювання може виконуватися:

- ручним торканням поверхні;
- інструментальним щупом;
- автоматичним вимірювальним пристроєм;
- попередньо встановленим вимірювачем;
- за даними інструментального пресетера.

Неправильне значення довжини може спричинити врізання інструмента в заготовку або обробку на неправильній глибині.

4. Корекція радіуса фрези

Під час фрезерування система повинна враховувати радіус фрези. Керуюча програма може задавати контур деталі, а фактична траєкторія центра фрези повинна бути зміщена від цього контуру на величину радіуса.

Для цього застосовують корекцію радіуса:

- G41** — корекція зліва від контуру;
- G42** — корекція справа від контуру;
- G40** — скасування корекції.

Напрямок «ліворуч» або «праворуч» визначається відносно напрямку руху інструмента.

Корекція радіуса дає змогу:

- використовувати інструменти різного діаметра;
- компенсувати зношування фрези;
- коригувати розмір деталі;
- не змінювати координати всього контуру.

Під час увімкнення корекції необхідно передбачити достатню довжину підвідної ділянки, щоб система могла плавно перейти на зміщену траєкторію.

5. Корекція радіуса вершини різця

У токарній обробці різець має заокруглену вершину, а не ідеальну математичну точку.

Для точного формування контуру система враховує:

- радіус вершини різця;
- напрямок встановлення різця;
- положення різальної кромки;
- орієнтацію інструмента;
- знос вершини.

Якщо радіус вершини не врахувати, особливо під час обробки конічних, дугових і фасонних поверхонь, виникне похибка профілю.

Коректор радіуса вершини вводять у таблицю інструментів. Номер коректора пов'язують із відповідним інструментом у програмі.

6. Корекція зношування

У процесі роботи інструмент поступово зношується. Замість зміни всієї програми оператор може внести невелику корекцію зношування.

Корекція зношування використовується для:

- уточнення розміру;
- компенсації зменшення довжини інструмента;
- компенсації зміни радіуса;
- коригування положення різальної кромки.

Важливо розрізнити геометричну корекцію та корекцію зношування:

- геометрична корекція описує фактичні розміри нового інструмента;
- корекція зношування враховує поступову зміну цих розмірів під час роботи.

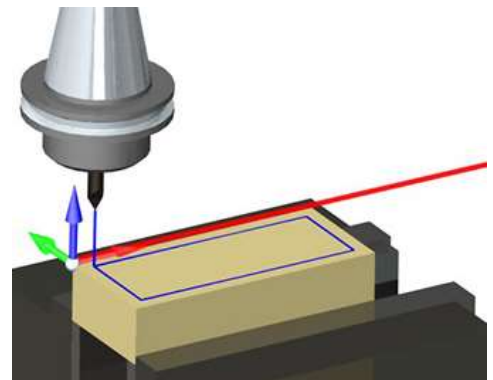
Невеликі корекції можна вносити за результатами вимірювання готової деталі.

7. Робочий нуль деталі

Робочий нуль — це початок системи координат деталі, відносно якого записується керуюча програма.

Його можна встановити:

- на торцевій поверхні;
- у центрі заготовки;
- у куті деталі;
- на осі обертання;
- у центрі отвору;
- на базовій площині.



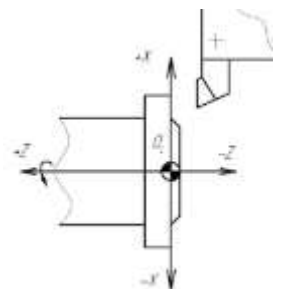
Вибір нуля повинен бути пов'язаний із технологічними базами та кресленням деталі.

Для фрезерної обробки часто задають:

X0, Y0 у центрі або куті заготовки;
Z0 на верхній базовій поверхні.

Для токарної обробки:

X0 зазвичай відповідає осі шпинделя;
Z0 встановлюють на торцевій базі деталі.



8. Робочі системи координат

Для зберігання положення нуля деталі застосовують робочі системи координат:

G54

G55

G56

G57

G58

G59

Ці команди вибирають відповідну систему координат деталі. У кожній системі зберігаються зміщення по координатних осях.

Після активування, наприклад, **G54**, координати програми інтерпретуються відносно нуля, записаного у цій системі.

Команди **G54–G59** широко використовуються для окремих пристроїв, різних заготовок або кількох позицій на столі верстата.[\[centroidcnc\]](#)

9. Узгодження систем координат

Для узгодження системи координат деталі з машинною системою необхідно:

- установити заготовку;
- визначити базові поверхні;
- виміряти положення нуля деталі;
- визначити машинні координати базової точки;
- записати отримані значення у таблицю робочих нулів;
- активувати потрібну систему координат;
- перевірити положення інструмента;
- виконати пробне переміщення.

На фрезерному верстаті нуль по осі **X** можна визначити крайовим шукачем або щупом, нуль по **Y** - аналогічним способом, а нуль по **Z** - торканням інструмента до базової поверхні. Такий підхід використовується під час установлення робочого зміщення типу G54.[\[resources.utec\]](#)

10. Взаємозв'язок робочого нуля та коректора інструмента

Робочий нуль визначає положення деталі, а коректор інструмента - положення робочої точки інструмента.

Якщо неправильно встановлено робочий нуль:

- вся деталь буде зміщена;
- інструмент може врізатися в заготовку;
- порушиться розташування отворів;
- зміниться положення контуру.

Якщо неправильно введено коректор:

- виникне помилка глибини;
- зміниться розмір обробки;
- фреза може врізатися в поверхню;
- різець працюватиме не тією ділянкою кромки.

Перед запуском програми необхідно окремо перевірити:

- активну систему координат;
- значення робочого нуля;
- номер інструмента;
- номер коректора;
- довжину інструмента;
- радіус фрези або вершини різця.

Висновок. Коректори інструмента враховують його довжину, радіус, положення робочої точки та зношування. Робочий нуль визначає початок системи координат деталі, а робочі зміщення G54–G59 забезпечують зв'язок між системою координат деталі та машинною системою верстата. Для точного й безпечного програмування необхідно правильно виміряти інструмент, установити нуль деталі, ввести відповідні коректори та перевірити їх перед запуском програми.

Питання для самоперевірки

3. Що називають коректором інструмента?
4. Для чого вводять корекцію довжини інструмента?
5. Яке призначення мають корекції G40, G41 і G42?
6. Що таке робочий нуль деталі?
7. Як узгоджується система координат деталі з машинною системою координат?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Одне правильне питання

Для чого використовують коректор довжини інструмента?

- А. Для врахування фактичної довжини інструмента
- Б. Для зміни кольору інструмента
- В. Для охолодження шпинделя

2. Одне правильне питання

Яка команда зазвичай вибирає першу робочу систему координат деталі?

- А. G54
- Б. G01
- В. M06

3. Декілька правильних відповідей

Які параметри можуть вводитися до таблиці коректорів інструмента?

- А. Довжина інструмента
- Б. Радіус фрези або вершини різця
- В. Значення зношування

4. Декілька правильних відповідей

Що необхідно перевірити перед запуском програми?

- А. Активну систему координат
- Б. Номер і корекцію інструмента
- В. Значення робочого нуля