

Похильчук І. О., к.т.н., доцент, Стрілець О. Р., к.т.н., доцент
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ, ОБЛАДНАННЯ ТА СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ СУЧАСНИМИ ВЕРСТАТАМИ ДЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

Наведено приклади верстатів та обладнання для механічної обробки матеріалів, що найчастіше зустрічаються на підприємствах України. Описано переваги і недоліки таких верстатів при виконанні специфічних робіт по обробці матеріалів різанням. Проаналізовані засоби автоматизації керування, що використовують вказані верстатні комплекси. Подана узагальнена блок-схема комплексів числового програмного керування. Аналіз конструкції, обладнання та способів керування сучасними верстатами для механічної обробки матеріалів показав, що основними чинниками, які впливають на точність, продуктивність та зручність при обслуговуванні сучасних верстатів, є використання беззаяорних передач, жорстких конструкцій напрямних, спеціальних приводів подачі та головного руху, спеціальних датчиків, спеціальних пристроїв автоматичної зміни інструментів і заготовок, цифрової індикації положення робочих органів верстата.

Ключові слова: верстат; механічна обробка; різання; обладнання; числове програмне керування.

Постановка проблеми. Автоматизація технологічного процесу механічної обробки відбувається в умовах крупносерійного та масового виробництва, де використовуються верстати-автомати, які прийшли на зміну універсальним і спеціалізованим верстатам. Верстати-автомати керуються за допомогою механічних пристроїв, які нерентабельні в умовах дрібносерійного та разового виробництва, у зв'язку зі складністю їх переналагодження. Виникла потреба у засобах автоматизації, які дозволили б проводити часте переналагодження верстатів при обробці невеликих партій або окремих деталей. Ця проблема вирішується застосуванням верстатів з електронними системами керування, які називаються верстатами з числовим програмним керуванням (ЧПК).



Верстати з ЧПК є органічним поєднанням верстата для розмірної обробки деталі з керуючим комп'ютером.

Перші конструкції таких верстатів будувалися за традиційними компоновками і навіть на базі існуючого обладнання. Електроавтоматика верстата була дещо видозмінена, з'явився пристрій з ЧПУ, а в конструкції в основному змінювалася коробка подач. Замість неї були встановлені крокові приводи з гідропідсилювачами. Досвід експлуатації таких верстатів показав необхідність проєктування верстатів спеціально для задач числового програмного керування. Тому важливою практичною проблемою є пошук основних факторів впливу і виділення основних напрямків вдосконалення конструкції верстатів та обладнання для механічної обробки матеріалів, що сприятимуть ефективнішій інтеграції числового програмного керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1] наводиться системна класифікація сучасних верстатних комплексів, які визначаються використанням високоавтоматизованого основного технологічного обладнання та його допоміжних підсистем. Зазначається, що сучасний верстатний комплекс може працювати як автономно, так і бути вмонтованим в систему більш високого рангу.

В [2] викладена короткий аналіз переваг та недоліків різних типів інструменту для різання металу. Основна увага звертається на конструкції різних ножиць для розкрою листового металу.

Багато дослідників, зокрема [3; 4], згодні, що верстати з ЧПК здатні виконувати широкий спектр операцій з високою точністю і ефективністю, що дозволяє значно підвищити продуктивність виробництва. Застосування ЧПК дозволяє автоматизувати виробничі процеси, зменшити час на переналагодження обладнання, підвищити точність обробки деталей і знизити витрати на виробництво, що особливо важливо в сучасних умовах конкуренції та постійно зростаючих вимог до якості продукції.

В [5] наведено дослідження процесів фрезерування контурів, що характеризуються квазістаціонарним характером. Це призводить до необхідності призначення режиму різання для всього контуру виходячи з найбільш несприятливих умов різання на конкретній ділянці.

З огляду на описані вище дослідження актуальною задачею є знаходження шляхів вдосконалення сучасних верстатних комплексів за рахунок покращення їх різального обладнання, приводів та систем керування.

Метою роботи є отримання розуміння про параметри, що істотно впливають на сумісну роботу складних механічних систем та елементів числового програмного керування та знаходження шляхів покращення взаємодії за рахунок вдосконалення конструкції механічної частини.

Виклад основного матеріалу. Призначення верстата, умови виробництва та характеристики деталей, що виготовляються, висувають певні вимоги до конструкції верстатів з ЧПК. Конструкції верстатів з ЧПК та їхні різновиди визначаються видом виробництва, типом деталей, що обробляються, точністю виготовлення тощо. Розглянемо верстати, що поширені сьогодні на підприємствах України.

Для автоматизації разового і дрібносерійного виробництва, коли переналагодження обладнання проводиться після кожного виробу або неодноразово протягом зміни, широко використовуються верстати з відносно низьким ступенем автоматизації: універсальні верстати з пристроями цифрової індикації та керування (ПЦІК), а також верстати з оперативною системою числового програмного керування, наприклад, вертикально-фрезерні верстати з оперативним керуванням: моделі 6Т12Ф20-1 та 6Т13Ф20-1 (рис. 1). На цих верстатах, які оснащені поворотним круглим столом, ділильною головкою та іншими пристроями, можна обробляти деталі складної конфігурації, які мають вертикальні та горизонтальні площини, пази, уступи і т. д., здійснювати нескладні свердлильні і розточувальні роботи.



Рис. 1. Фрезерний станок модель 6Т12Ф20-1



Для керування верстатом застосовуються ПЦІК «Люмо-61», які працюють датчиками вимірювання – фотоімпульсними вимірювальними перетворювачами з дискретністю 10 мкм. При програмуванні верстата в пам'ять пристрою ПЦІК можна до 100 програмних кадрів, причому ввести програму можна з креслення або в режимі «Автозапис», тобто при обробці першої деталі. Програмування здійснюється за трьома координатами, а обробка в позиційному режимі по одній. На верстаті можна працювати в трьох режимах: ручному, покадровому і автоматичному. Привод головного руху – ступінчастий, з 18 швидкостями обертання шпинделя від 31,5 до 1600 об/хв, приводи подачі – безступінчасті з електродвигунами постійного струму.

Токарні верстати з оперативною системою керування випускаються в двох типорозмірах і декількох модифікаціях – моделі 16В16Т1 (рис. 2) і 16К20Т1. Верстати призначені для серійного, дрібносерійного і разового виробництва для всіх видів токарної обробки. Верстати мають оперативну систему числового програмного керування з пультом «Електроніка НЦ-31». ПЦІК «Електроніка НЦ-31» забезпечує оперативне введення керуючих програм, редагування з клавіатури пульта безпосередньо на робочому місці та керування верстатом. Програму також можна вводити з касети зовнішньої пам'яті.



Рис. 2. Загальний вид станка 16В16Т1

Пристрій ЧПК забезпечує контурне керування одночасно за двома координатами (за допомогою сервоприводів): з лінійною та круговою інтерполяцією. У пам'ять ПЧПК введені стандартні робочі цикли: точіння конусів, обробка будь-яких дуг кіл, нарізування різьб, поздовжнє і поперечне точіння з розділенням величини припуску і

т.д. Такі цикли спрощують роботу оператора і скорочують час на введення програми в пам'ять пристрою.

На верстатах моделі 16B16T1 ПЧПК розташований у задній частині верстата (праворуч) на стійці з пультом керування на рівні обличчя оператора, а на верстаті 16K20T1 (рис. 3) він вмонтований на супорті верстата.

У цих моделях верстатів використовується плавне регулювання поздовжніх і поперечних подач від високомоментних двигунів М2 і М3 постійного струму з фото імпульсними датчиками зворотного зв'язку. На верстаті моделі 16K20T1 в якості привода головного руху використовується двигун постійного струму з тиристорним перетворювачем безступінчастого регулювання в двох діапазонах.

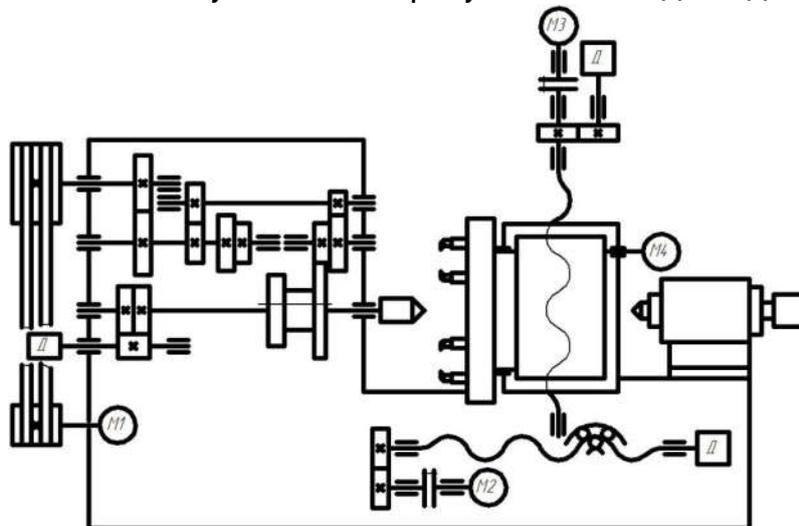


Рис. 3. Кінематична схема станка моделі 16K20T1

Інструменти закріплюються в автоматичному шестипозиційному різцетримачі. На верстатах моделі 16B16T1 використовуються двошвидкісні реверсивні асинхронні електродвигуни у поєднанні з автоматичною коробкою швидкостей та механічним перебором, яка забезпечує програмоване перемикання 12 ступенів частот обертання шпинделя для кожного з двох діапазонів. Інструмент на цих верстатах закріплюється в двох однопозиційних швидкоз'ємних різцетримачах (задньому та передньому).

Для середньосерійного виробництва, в якому верстати можуть багаторазово переналаштовуватися (наприклад, до 20 разів протягом тижня), широко використовуються верстати з ЧПК з універсальною системою керування (тобто з підготовкою програм КП на верстаті або за допомогою ПК). Верстати, як правило, мають пристрої автоматичної зміни інструмента та можливість інтеграції в



роботизовані верстатні комплекси. До таких верстатів відносяться патронно-центрові токарні верстати (рис. 4), які мають схоже компонування. Верстати призначені для виконання всіх видів токарної обробки деталей складної конфігурації в патроні або в центрах.

На відміну від звичайних токарних верстатів з горизонтальними напрямними, ці токарні верстати використовують похилі напрямні для забезпечення легкого доступу до інструментів, полегшуючи встановлення заготовки та створюються хороші умови сходу та прибирання стружки. Висока жорсткість конструкції, велика потужність (25–30 кВт) головного привода та висока частота обертання шпинделя (до 2500 об/хв) дозволяють проводити чорнову і чистову обробку заготовки в одному положенні різними інструментами. На верстатах використовуються приводи головного руху та плавно регульовані подачі з двигунами постійного струму. Автоматична зміна інструменту здійснюється за допомогою дванадцятипозиційної інструментальної головки. Для обробки нежорстких деталей передбачено кронштейн, на якому встановлюється швидкозмінний автоматичний люнет. Задня бабка і кронштейн люнета оснащені автоматичним приводом, що дозволяє після механічної обробки деталі в центрах, затискаючи правий кінець деталі люнетом і відвівши задню бабку, здійснювати обробку отвору.

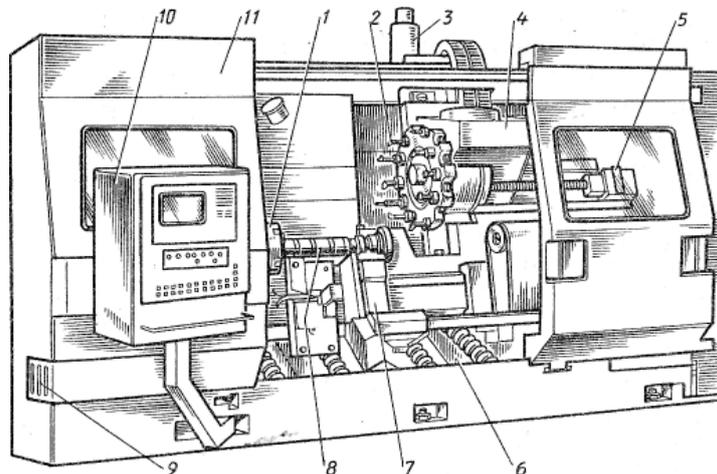


Рис. 4. Токарний патронно-центровий станок:

- 1 – шпиндель; 2 – інструментальний магазин; 3 – привод поперечної подачі;
- 4 – привод повороту магазину; 5 – привод поздовжньої подачі;
- 6 – шнековий транспортер; 7 – кронштейн люнета; 8 – деталь; 9 – привод головного руху; 10 – пульт ПЧПК; 11 – захисні дверцята

Для видалення стружки доступний шнековий транспортер. Пристрої з ЧПК на поворотному кронштейні програмованого типу НЦ 80-31 або 2С42 забезпечують виготовлення виробів заданих розмірів та конфігурацій за двома координатами, а також виконання технологічних команд: вибір частоти і напрямку обертання шпинделя, подачі супорта; зміна інструменту; підвід та затиск люнета; забезпечення прискорених рухів; включення руху задньої бабки, подачі охолоджуючої рідини і т.д. Є можливість оперативного керування верстатом. Захист оператора ПЧПК і навколишнього середовища від охолоджуючої рідини забезпечується спеціальними захисними дверцятами з оглядовими віконцями.

На токарних верстатах такого типу при роботі в середньосерійному і серійному виробництві дуже важливо вміти вчасно оцінювати знос інструменту. Для цього в підшипники шпинделя інтегровані спеціальні датчики, які дозволяють на дисплеї з ПЧПК фіксувати зусилля різання. Коли знос досягає граничного значення (це значення заноситься в пам'ять ПЧПК) відбувається автоматична зміна інструмента.

Основні тенденції в області створення верстатів для обробки обертових тіл: збільшення потужності верстатів до 30 кВт і вище; збільшення частоти обертання шпинделя до 8000 об/хв; підвищення ступеня автоматизації вантажно-розвантажувальних робіт; застосування осьового інструменту для фрезерування.

Для керування верстатами в серійному виробництві використовується ще один вид керування – циклове, яке умовно відноситься до числового програмного керування.

При цьому частково або повністю програмується цикл роботи верстата (режим обробки, зміна інструменту), а переміщення робочих органів не програмується, вони забезпечуються за допомогою заздалегідь налаштованих колійних перемикачів, упорів, барабанів. Програма роботи цих верстатів задається за допомогою штекерних панелей, панелей перемикачів. Іноді програма вводиться з керуючого пристрою або з програмованого командного апарату.

Блок-схема комплексу числового програмного керування наведено на рис. 5.

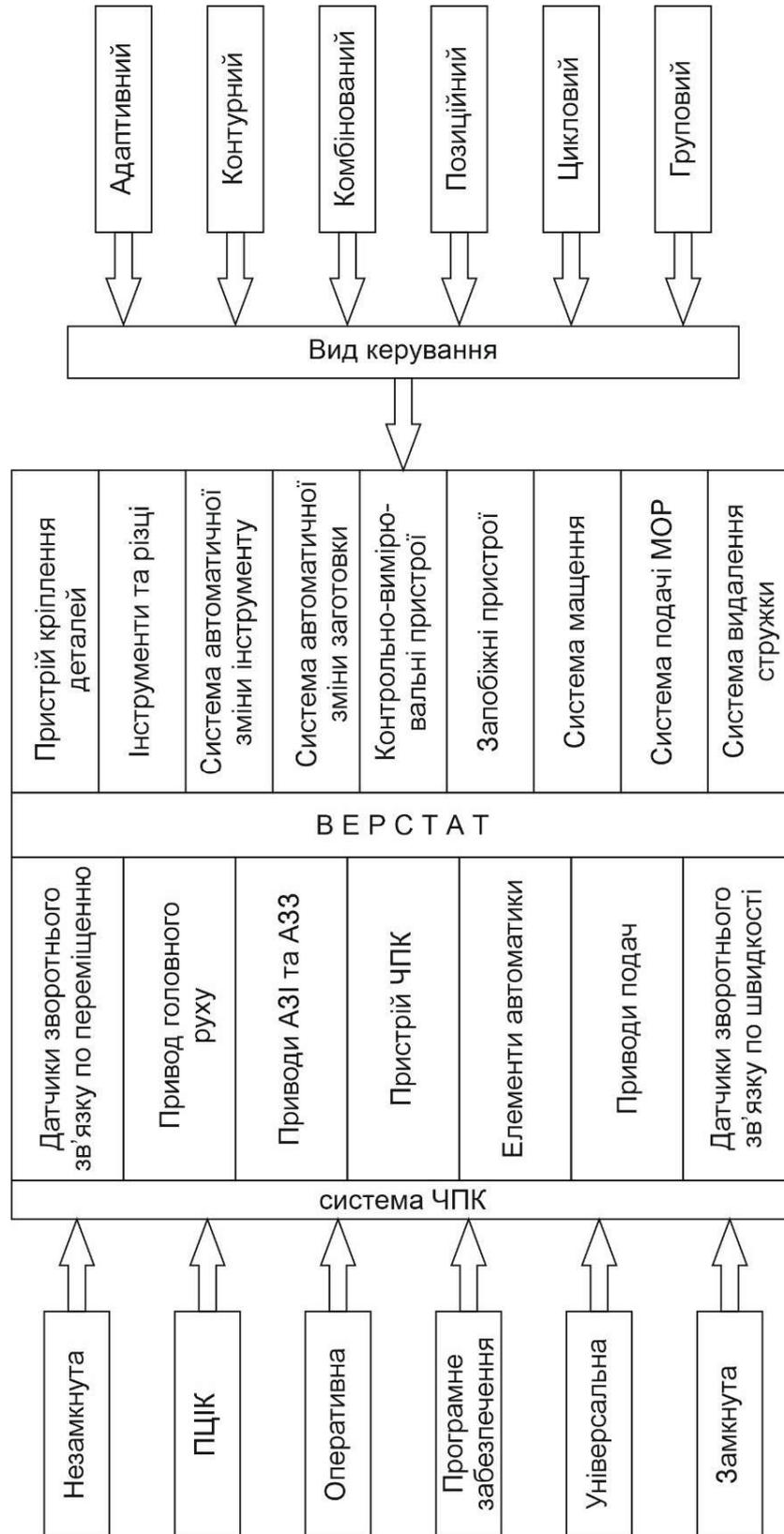


Рис. 5. Комплекс числового програмного керування

У програмованих пристроях з ЧПК (типу CNC) функції розшифровки даних, введення до пам'яті, запам'ятовування в буферній пам'яті, порівняння, обчислення, інтерполяції та інші передаються ПК, яка вводиться до ПЧПК (рис. 6).

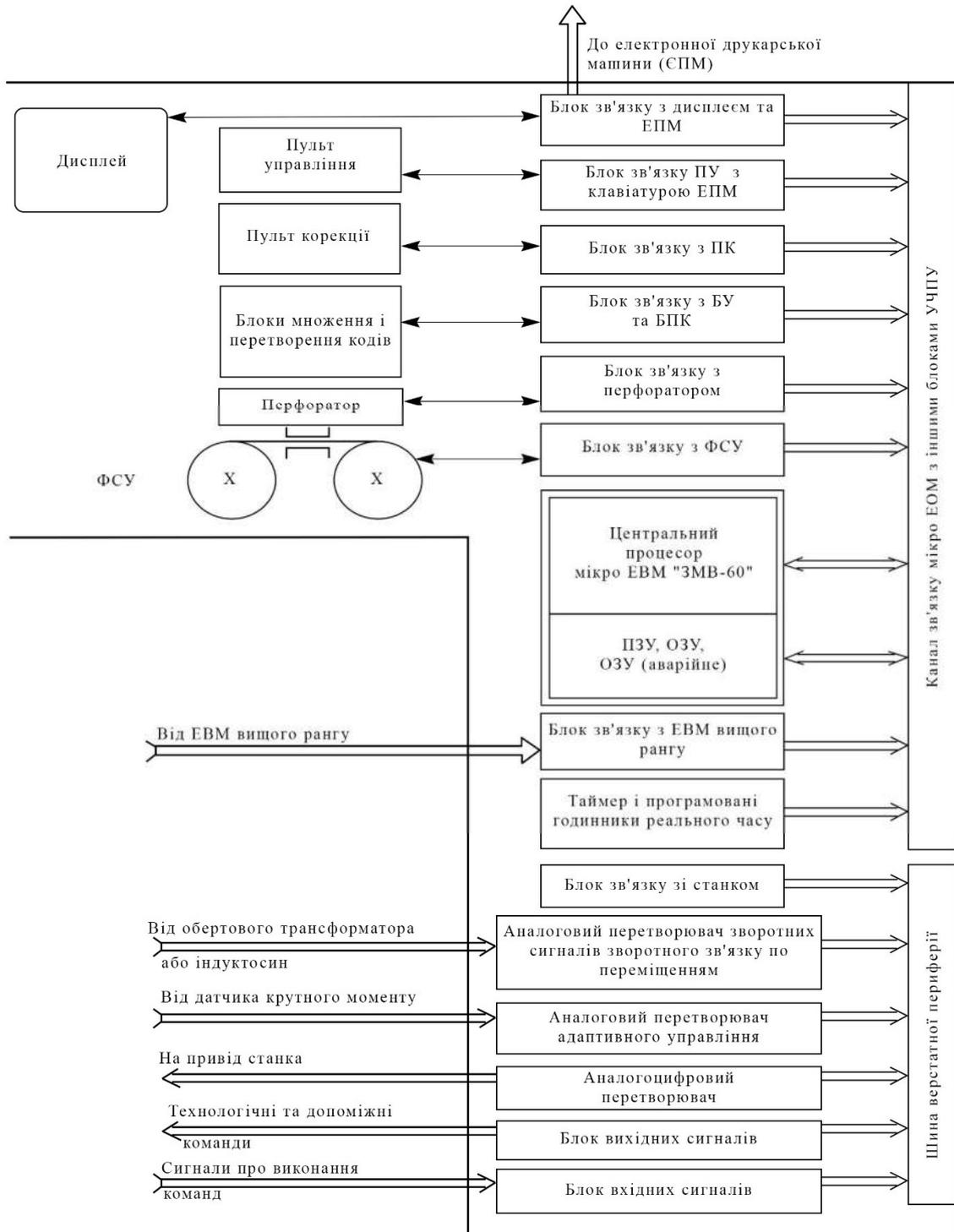


Рис. 6. Структурна схема ПЧПК програмованого типу



Програмовані ПЧПК можна розділити на два типи. У пристроях першого типу алгоритми керування задаються в основному при виготовленні. У таких пристроях керування здійснюється без зміни апаратної частини, за допомогою програмно-математичного забезпечення. У пристроях другого типу алгоритми керування програмуються. Мікропроцесор з введеною в нього програмою може як завгодно змінювати вміст пам'яті для виконання функцій керування. З'являється можливість використовувати такі пристрої для керування різними верстатами, промисловими роботами і вимірювальними системами. Одним із показників програмованих ПЧПК є об'єм пам'яті, який визначається обсягом інформації, що зберігається в ній і виражається в тисячах одиниць двійкової системи (Кбіт) або тисячах байт (Кбайт).

У пристроях з ЧПК (типу СМС) є хоча б одна мікроЕОМ. Це обчислювальна система, виконана на базі мікропроцесорних великих інтегральних схем (ВІС) і містить, крім мікропроцесора (МП), декілька ВІС пам'яті (ОЗУ, ПЗУ, ППЗУ), тактовий генератор і схему зв'язку з верстатом. Центральним вузлом обробки даних є мікропроцесор (програмована ВІС), який складається з арифметично-логічного пристрою і керуючого пристрою. Програма роботи МП являє собою послідовність команд, записаних в ПЗУ. Його основне призначення полягає в обробці інформації, отриманої від верстата, промислового робота, вимірювальних пристроїв, терміналів, зчитувачів перфострічки, телетайпів і т. д. та керуванні системою на основі цієї інформації. Мікропроцесори з'єднуються з ПЧПК системою шин (адресна шина, шина даних і шина керування).

Оператор може вступити в діалог з ПЧПК за допомогою спеціальних зовнішніх пристроїв: пульта управління, друкарської машинки і т.д. Внутрішні цикли керування вводяться до запам'ятовуючого пристрою у вигляді ПМО. Приклади серійних програмованих пристроїв з ЧПК, побудованих на базі універсальної мікроЕОМ «Електроніка 60 М»: 2С85, 2С42, 2Р22. Випускаються також пристрої на базі спеціалізованої мікроЕОМ «Електроніка НЦ-31» та універсальної обчислювальної системи «Електроніка НЦ 80-31». Програмовані ПЧПК призначені для керування багатоінструментальними і координатно-розточувальними верстатами з програмуванням по восьми координатах при одночасному керуванні трьома. Програмування може здійснюватися як в абсолютних значеннях координат (при позиціонуванні), так і по кроках (при контурній обробці). ПЧПК працює з сервоприводами та з

датчиками зворотного зв'язку типу трансформатора що обертається. Даний пристрій має функціонально-модульний принцип конструкції, тобто всі функціональні блоки пристрою виконані у вигляді модулів (завершених пристроїв).

МікроЕОМ типу «Електроніка-60» забезпечує алгоритми керування вводу-виводу інформації, обчислення траєкторій та швидкостей переміщення робочих органів, подачею керуючих команд та ін. Під загальним керуванням від ЕОМ пристрій забезпечує позиціонування робочих органів у задане положення, контурну обробку деталей, цифрову індикацію та подачу технологічних команд, дозволяє вносити корекції до програми на радіус і довжину інструментів, швидкість головного руху та руху подачі, здійснює редагування програми керування. Пристрій може працювати в різних режимах, керувати типовими технологічними циклами, захищати від перевантажень та коротких замикань, забезпечувати адаптивне керування по двох каналах, записувати керуючу програму в оперативну пам'ять та зберігати системно-технічні та функціональні програми (алгоритми керування) в постійному запам'ятовуючому пристрої. Інформація з перфострічки зчитується фотопристроєм, надходить до запам'ятовуючого пристрою центрального процесора та запам'ятовується там. Центральний процесор здійснює весь процес обробки інформації (включаючи інтерполяцію) з урахуванням даних корекції програми та сигналів зворотного зв'язку та виводить її на електронні блоки, в тому числі і на блок керування приводами. Останній формує напругу керування приводами. Зчитування інформації в здійснюється в режимі старт-стоп з керуванням від центрального процесора. Блок перетворення кодів забезпечує перетворення інформації, записану двійково-десятковим кодом, у двійковий код і навпаки. Відкориговані перфострічки та їхні дублікати отримують за допомогою перфоратора, при цьому всі необхідні додаткові дані можуть бути зафіксовані електронною друкарською машинкою. За допомогою пульта корекції можна змінювати швидкість головного руху на 40–140%, а швидкість подачі від 0 до 120% від запрограмованої.

Переривання програми на заданих інтервалах часу, відлік часових інтервалів, а також зв'язок із зовнішніми перериваючими пристроями здійснюються через таймер. Кожен канал управління приводом складається з двох цифро-аналогових перетворювачів: один перетворює код помилки переміщення, а інший здійснює перетворення з врахуванням компенсації швидкості. Всі



перетворення, підсумовування та подача сумарного сигналу на електропривод верстату здійснюються в напрузі, яка відповідає полярності та величині. Блок адаптивного контролю задає оптимальний закон керування приводом подач. Аналоговий сигнал, отриманий від датчиків крутного моменту, перетворюється в цифрову форму та подається в блок керування приводом. Вся інформація при вводі програми та її редагуванні відображається на екрані дисплея.

На практиці поряд з мікропроцесорними ПЧПК (типу 2С42-65 і ін.) використовуються і мультипроцесорні, в яких використовується декілька мікропроцесорів, які забезпечують паралельну обробку інформації та розподіл керування.

Висновки

1. Аналіз конструкції, обладнання та способів керування сучасних верстатів для механічної обробки матеріалів показав, що необхідна точність на сучасних верстатах досягається за рахунок використання безззорних передач, жорстких конструкцій шпинделя, напрямних кочення («танкеток») зі сталевими шліфованими напрямними, спеціальних приводів подачі та головного руху, спеціальних датчиків.

2. Підвищена продуктивність отримується за рахунок підвищення режимів різання, використання спеціальних пристроїв автоматичної зміни інструментів і заготовок, проведення вимірювань під час або після механічної обробки безпосередньо на верстаті за допомогою спеціальних вимірювальних пристроїв, з використанням інструментів, заздалегідь налаштованих поза верстатом, застосуванням багатшпіндельних головок та ін.

3. Зручність при обслуговуванні верстата досягається за рахунок оперативного керування верстатом, цифрової індикації положення робочих органів верстата в кожен момент часу, використанням автоматичних загороджувальних пристроїв, відводу стружки від зони обробки та ін.

1. Веселовська Н. Р. Аналіз сучасного стану верстатних комплексів механічної обробки в машинобудуванні. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2012. № 64. С. 91–98. 2. Віштак І. В., Кобилянський Є. О. Огляд обладнання для механічної обробки металу. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. Вип. 2. С. 15–22. 3. Ковальов В. А., Гаврушкевич А. Ю., Гаврушкевич Н. В. Інноваційне обладнання автоматизованого виробництва. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням. Київ :

КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 158 с. **4.** Neto A., Romero F. Industry 4.0 and Technological Evolution in CNC Machines. *Proceedings of the 18th European Conference on Innovation and Entrepreneurship*. 2023. Vol. 18, No. 2, P. 942–950. **5.** Petrakov Y. V., Myhovych A. V. Stabilization of contour milling on CNC machines. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. 2025. Vol. 12(1). Pp. A1–A11.

REFERENCES:

1. Veselovska N. R. Analiz suchasnoho stanu verstatnykh kompleksiv mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*. 2012. № 64. S. 91–98. **2.** Vishtak I. V., Kobylianskyi Ye. O. Ohliad obladnannia dlia mekhanichnoi obrobky metalu. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. 2016. Vyp. 2. S. 15–22. **3.** Kovalov V. A., Havrushkevych A. Yu., Havrushkevych N. V. Innovatsiine obladnannia avtomatyzovanoho vyrobnytstva. Konstruktyvni osoblyvosti ta osnovy prohramuvannia verstativ z chyslovyim prohramnym keruvanniam. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. 158 s. **4.** Neto A., Romero F. Industry 4.0 and Technological Evolution in CNC Machines. *Proceedings of the 18th European Conference on Innovation and Entrepreneurship*. 2023. Vol. 18, No. 2, P. 942–950. **5.** Petrakov Y. V., Myhovych A. V. Stabilization of contour milling on CNC machines. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. 2025. Vol. 12(1). Pp. A1–A11.

Pokhylchuk I. O., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Strilets O. R., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

ANALYSIS OF THE DESIGN, EQUIPMENT AND CONTROL METHODS OF MODERN MACHINE TOOLS FOR MACHINING MATERIALS

Examples of machines and equipment for mechanical processing of materials, which are most often found at enterprises of Ukraine, have been given. The advantages and disadvantages of such machines have been described when performing specific work on processing materials by cutting. The control automation tools used by these machine complexes have been analyzed. A generalized block diagram of numerical control complexes has been presented. Analysis of the design, equipment and control methods of modern machines for mechanical processing of materials has shown that the required accuracy on modern machines is achieved through the use of gapless



gears, rigid spindle structures, rolling guides ("wedges") with grinded steel guides, special feed and main movement drives, special sensors. Increased productivity is obtained by increasing cutting modes, using special devices for automatic change of tools and workpieces, taking measurements during or after machining directly on the machine using special measuring devices, using tools pre-configured outside the machine, using multi-spindle heads, etc. Convenience in machine maintenance is achieved due to operational control of the machine, digital indication of the position of the working bodies of the machine at each moment of time, the use of automatic barriers, chip removal from the processing area.

***Keywords:* machine tool; machining; cutting; equipment; numerical control.**