

Я.А. Степчин, к.т.н., доц.
В.В. Отаманський, асистент

Державний університет «Житомирська політехніка»

Аналіз та вдосконалення алгоритмів модульного принципу створення металорізальних верстатів з ЧПК

Розвиток верстатобудування як невід'ємної частини машинобудування є вагомим складовою економічного зростання будь-якої країни. Верстатобудування значною мірою визначає умови зростання промислового виробництва на основі використання новітніх технологій, обладнання, методів організації виробництва. Ефективність виробництва визначається рівнем його продуктивності, мінімальної вартості та комплексу показників якості кожного виробу.

У статті розглянуто основні етапи розвитку верстатобудування і вплив динаміки розвитку на кількісні та якісні показники металообробного обладнання. На основі довгострокових прогнозів розвитку виробничих систем алгоритм модульного створення нових верстатів є одним із перспективних шляхів для сучасного виробництва.

Виконано аналіз шляхів удосконалення процесу створення металорізального верстата та визначено основні умови досягнення максимальної його відповідності вимогам машинобудівного виробництва.

Показано, що використання електронних систем керування для створення необхідної кінематичної структури верстата з ЧПК забезпечує універсалізацію методів обробки та методів формоутворення для виготовлення усього різноманіття деталей. Це надає можливість зменшити кількість оригінальних модулів для створення верстата будь-якого призначення.

Визначено основні засади компоновки металорізальних верстатів з ЧПК за модульним принципом та розроблено алгоритм підбору модулів для створення конструкції верстата, що відповідає встановленим вимогам.

Ключові слова: ЧПК; модуль; мехатроніка; мотор-шпиндель; електродвигун.

Постановка проблеми. Розвиток машинобудування в цілому та верстатобудування як невід'ємної його частини є основою економіки будь-якої розвиненої країни. Саме розвиток верстатобудування визначає перспективи зростання промислового виробництва та його інноваційну складову: використання новітніх технологій, обладнання, прогресивних методів організації виробництва. Їх поєднання забезпечує сучасний рівень ефективності виробництва: продуктивності, мінімальної вартості та комплексу показників якості кожного виробу.

У розвитку верстатобудування як основи будь-якого матеріального виробництва можна виокремити декілька етапів, що характеризуються швидким, або й стрибкоподібним, зростанням продуктивності та суттєвим зниженням собівартості виготовлення виробів машинобудування. Якщо обмежитись періодом найбільш стрімкого зростання світового промислового виробництва, можна виокремити чотири етапи розвитку виробничих систем верстатобудування:

- перший етап: проміжок до 60-х років ХХ століття (без помітного застосування систем ЧПК), який характеризувався широким застосуванням універсальних верстатів в одиничному й серійному виробництві спеціальних верстатів і верстатів-автоматів у крупносерійному й масовому виробництві. Широке використання твердосплавних універсальних та спеціалізованих різальних інструментів, коротких кінематичних ланцюгів і конструкцій обладнання підвищеної жорсткості задовольняло вимоги щодо точності обробки і продуктивності у масовому негнучкому виробництві;

- другий, перехідний, етап: 60–80-ті роки ХХ століття, які характеризувалися швидким поширенням використання універсальних та спеціалізованих верстатів з ЧПК. Ці верстати часто конструктивно копіювали як верстати-прототипи, так і їхню технологію та схеми обробки, а відповідно й усі недоліки та обмеження. Основною перевагою застосування цих верстатів було відносно підвищення гнучкості виробництва та відхід від ручного управління обробкою у серійному виробництві;

- третій етап: 80-ті роки ХХ і початок ХХІ століття, які характеризуються широким використанням верстатів з ЧПК та обробних центрів, конструкція яких принципово відрізняється від верстатів-прототипів. Удосконалення електронної бази ЧПК, систем САПР, технології та схем обробки, застосування високошвидкісної та високопрецизійної обробки, нових інструментальних та конструкційних матеріалів, комплексне застосування мехатронних систем та систем з паралельною кінематикою дозволило перейти на новий рівень продуктивності та точності виготовлення деталей машин у серійному та одиничному виробництві. У масовому виробництві особливостями цього етапу є

використання гнучких автоматизованих виробничих систем (ГВМ) – комплексів, ліній, дільниць, цехів, які поєднують високу продуктивність масового виробництва та швидку переналаджувальність;

- четвертий етап розпочався на початку XXI століття і триває дотепер. Його можна охарактеризувати як перехідний, який визначає характерні риси наближення виробництва до якісної зміни принципів створення будь-яких матеріальних виробів [1–3]. Основними елементами цього процесу є:

- максимальна автоматизація та інформатизація процесу проектування нових виробів, що забезпечує скорочення часу, витрат і підвищує гнучкість виробництва [3, 4];

- модульний принцип створення машин [3, 4], використання можливостей систем САПР з удосконалення (оптимізації) виробів на кожному етапі їх проектування та виготовлення [5–7];

- перехід від виготовлення заготовок із мінімальними припусками під механічну обробку до створення готових виробів будь-якої форми та розмірів [8];

- створення замкнених обробних систем зі штучним інтелектом на основі кількох верстатів (роботів, принтерів), здатних в автономному режимі спроектувати та виготовити будь-який виріб у певному діапазоні розмірів, характеристик, параметрів матеріалу, точності.

Спираючись на наведені довгострокові прогнози розвитку виробничих систем [1, 2, 11], є можливість скоротити час розробки нових верстатів для майбутнього виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні принципи побудови верстатів впливають із універсальних вимог (табл. 1) до будь-яких виробничих систем, які вимагають максимальної продуктивності виробництва та мінімальної його собівартості при забезпеченні необхідних точності й гнучкості (переналаджувальності) обладнання.

Саме для виконання цих вимог використовуються певні підходи під час створення металорізальних верстатів, що наведено у таблиці 1 [1–7, 12].

Таблиця 1

Загальні тенденції та практична реалізація підходів на шляху створення нового верстата

Загальні напрями та практична реалізація підходів на шляху створення нового верстата		Вимоги виробництва			
		максимальна			мінімальна собівартість
		продуктивність	точність	гнучкість	
1. Збільшення швидкості робочих рухів верстата (скорочення основного машинного часу обробки)	Використання регульованих високошвидкісних двигунів, мотор-шпинделів та лінійних електродвигунів поступального руху	++			++
2. Збільшення швидкості допоміжних рухів верстата (скорочення допоміжного часу обробки)		++			++
3. Збільшення потужності приводів (збільшення припусків на обробку та скорочення основного машинного часу):		+			+
4. Максимальне скорочення кінематичних ланцюгів (зменшення кількості стиків, консолей, рухомих пар)	Використання регульованих двигунів, мотор-шпинделів та лінійних електродвигунів поступального руху		++		+
5. Застосування розвинутих систем автоматичного управління високої гнучкості (систем ЧПК для забезпечення підвищеної складності та точності обробки)	Автоматизація розробки управляючої програми (вбудовування її в САПР) та універсальності оснащення верстата	+	+	++	++
6. Застосування вбудованих систем контролю і діагностики якості обробки з управлінням від системи ЧПК верстата		+	++	+	++
7. Модульний принцип створення верстатів з використанням мехатронних систем, систем паралельної кінематики, нетрадиційних компонок та генетико-морфологічного підходу	Оптимізація конструкції верстата з моменту вибору компоновки під визначені задачі до підбору високофункціональних уніфікованих модулів	+	+	+	+

Примітка: «+» – можливе зростання відповідного параметра; «++» – гарантоване зростання відповідного параметра

Спираючись на дані таблиці 1, можна зазначити більшу універсальність напрямів 5–7 з точки зору покращення усіх параметрів, що відповідають основним вимогам виробництва.

Якщо умовно віднести 3D-принтери для друкування виробів (деталей) до обладнання чорнової обробки (виготовлення точних заготовок високої складності), то з чотирьох вказаних у таблиці 1 вимог виробництва вони задовольняють максимально тільки параметри високої гнучкості й частково – продуктивності при одиничному виробництві. Основним недоліком є (у більшості випадків) неприйнятно висока вартість виробів з металів і сплавів (зі значним обмеженням їх номенклатури).

Мета дослідження – виконати аналіз принципів конструювання металорізальних верстатів з ЧПК та вдосконалити алгоритм підбору уніфікованих модулів для створення раціональної конструкції верстата, що відповідає встановленим вимогам виробництва.

Викладення основного матеріалу дослідження. Аналіз шляхів удосконалення процесу створення металорізального верстата (таблиця 1) дає можливість виокремити основні умови досягнення його відповідності вимогам виробництва:

1. Максимальне спрощення механічної частини верстата з широким застосуванням мехатронних систем (типових електромеханічних елементів або окремих вузлів):

– у приводах обертального головного руху: перехід від системи регульованій електродвигун-шпindel до мотор-шпindelів у вигляді уніфікованих модулів [9, 10] (рис. 1);

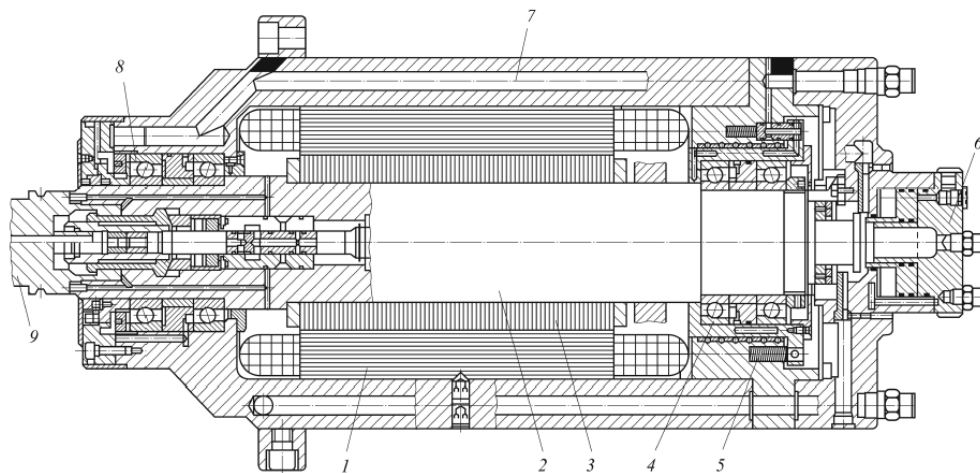


Рис. 1. Загальна конструкція мотор-шпindelа: 1 – статор; 2 – шпindel; 3 – ротор; 4 – задня опора шпindelа; 5 – пружини для створення попереднього натягу; 6 – гідроциліндр; 7 – канали системи охолодження мотор-шпindelа; 8 – передня опора шпindelа; 9 – оправка

– у приводах поступального головного руху та руху подач: перехід від системи регульованій електродвигун-передача гвинт-гайка кочення до плоских або штокових лінійних електродвигунів [10] (рис. 2, а);

– у приводах обертального руху подач: перехід від системи регульованій електродвигун-беззазорна високоточна механічна передача до вбудованого високомоментного електродвигуна [10] (рис. 2, б, в).

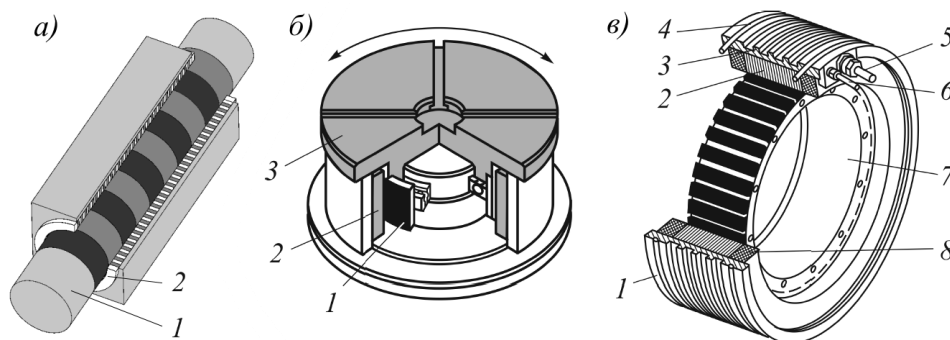


Рис. 2: а – схема штокового лінійного електродвигуна (1 – шток з постійними магнітами, 2 – обмотка статора); б – схема поворотного столу металорізального верстата з вбудованим високомоментним електродвигуном (1 – ротор, 2 – статор, 3 – поворотний стіл); в – схема вбудованого високомоментного електродвигуна фірми Siemens (1 – статор; 2 – набірний сердечник статора; 3 – канали для охолодження; 4 – ущільнення; 5, 6 – кабелі живлення; 7 – ротор з постійними магнітами; 8 – обмотки статора)

Крім зростання продуктивності за рахунок підвищення швидкостей, досягається висока точність, жорсткість та швидкодія. Зменшення загальної кількості прецизійних передач, опор, напрямних і корпусних деталей забезпечує зниження вартості верстата;

2. На вищому рівні організації процесу виробництва: забезпечення можливості автоматизації програмування верстата (створення управляючої програми обробки конкретної деталі) за рахунок вбудовування його системи ЧПК в загальну САПР, тобто переходом від креслення (3D-моделі деталі або збірки) за допомогою САМ-системи безпосередньо до її виготовлення на верстаті. Це дозволяє суттєво скоротити час на підготовку виробництва, підвищити його універсальність та знизити собівартість;

3. На нижчому рівні організації процесу виробництва: вбудовування системи активного контролю оброблюваної деталі або інструменту в загальну систему самодіагностики верстата з ЧПК.

У результаті, сучасний верстат з ЧПК перетворюється в ланку нерозривного ланцюга процесу отримання готового виробу, в якому кожна складова оптимізована для виконання своїх основних функцій.

Основні складові сучасного металорізального верстата з ЧПК трансформувалися, але в них, як і раніше [13], можна виокремити дві основні принципово відмінні системи:

– приводів (головного, подачі, позиціонування та маніпулювання) – складної мехатронної системи, механічна складова якої вводить основні обмеження на використання верстата по габаритах та складності форм оброблюваної деталі, точності, продуктивності;

– управління та контрольно-вимірювальних пристроїв, яка в цілому теж є мехатронною системою, але з домінуючою електронною складовою: відповідним комп'ютерним обладнанням контрольно-вимірювальними пристосуваннями, системами спостереження та діагностики. Електронна складова системи є більш гнучкою і визначається набором пакетів прикладних програм.

У таблиці 2 наведено результати узагальнення необхідних рухів формоутворення для виготовлення найбільш поширених типових деталей [3] з використанням універсальних інструментів на верстаті з ЧПК.

Таблиця 2

Рухи формоутворення для виготовлення найбільш поширених типових деталей на верстатах з ЧПК

Деталь – тіло обертання		
Круглі стрижні, вали, диски, фланці, порожнисті тіла, втулки		Поєднання методів формоутворення
Точіння	Обробка тільки зовнішніх та внутрішніх поверхонь, симетричних осі обертання заготовки: мінімум 2 керовані координати	копіювання і сліду, сліду і сліду
Свердлування		сліду і сліду
ГР : Oz;	РПП: П _{і1} + П _{і2} або П _з + П _і або П _{з1} + П _{з2}	
Фрезерування, шліфування	Обробка зовнішніх та внутрішніх поверхонь не симетричних осі обертання заготовки: мінімум 4 (2) керовані координати	сліду і дотику, копіювання і дотику
Свердлування		сліду і сліду
ГР: Oi;	РПП: П _{і1} + П _{і2} + П _{і3} або П _з + П _{і1} + П _{і2} або П _{з1} + П _{з2} + П _{і1} ...	
Деталь – не тіло обертання		
Корпусні, пластини, кришки, некруглі стержні (важелі)		Поєднання методів формоутворення
Фрезерування, шліфування	Обробка відкритих лінійчатих поверхонь: мінімум 3 керовані координати	сліду і дотику, копіювання і дотику
Свердлування		сліду і сліду
ГР: Oi;	РПП: П _{і1} + П _{і2} + П _{і3} або П _з + П _{і1} + П _{і2} або П _{з1} + П _{з2} + П _{і1} ...	
Фрезерування, шліфування	Обробка закритих лінійчатих поверхонь: мінімум 3 керовані координати	сліду і дотику, копіювання і дотику
Свердлування		сліду і сліду
ГР: Oi;	РПП: П _{і1} + П _{і2} + П _{і3} або П _з + П _{і1} + П _{і2} або П _{з1} + П _{з2} + П _{і1} ...	
Фрезерування, шліфування	Обробка відкритих і закритих нелінійчатих поверхонь: мінімум 4 керовані координати	сліду і дотику, копіювання і дотику
Свердлування		сліду і сліду
ГР: Oi;		
РПП: П _{і1} + П _{і2} + П _{і3} + П _{і4} або П _з + П _{і1} + П _{і2} + П _{і3} або П _{з1} + П _{з2} + П _{і1} + П _{і2} ...		

Примітка: ГР – головний рух, РПП – рух подачі і позиціонування, О, П – обертальний і поступальний рух інструмента і/або заготовки (з) відповідно

З таблиці 2 видно, що використання універсального інструменту та електронних систем для створення необхідної кінематичної структури верстата з ЧПК забезпечує уніфікацію методів обробки й методів формоутворення для виготовлення усього діапазону форм та розмірів поверхонь деталей. Це надає можливість зменшити кількість оригінальних модулів для створення верстата будь-якого призначення.

На основі аналізу принципів конструювання металорізальних верстатів з ЧПК розроблено загальний алгоритм визначення необхідних складових (вузлів, систем) верстата з ЧПК та їх взаємозв'язку залежно від основних визначальних характеристик оброблюваної деталі (рис. 3).

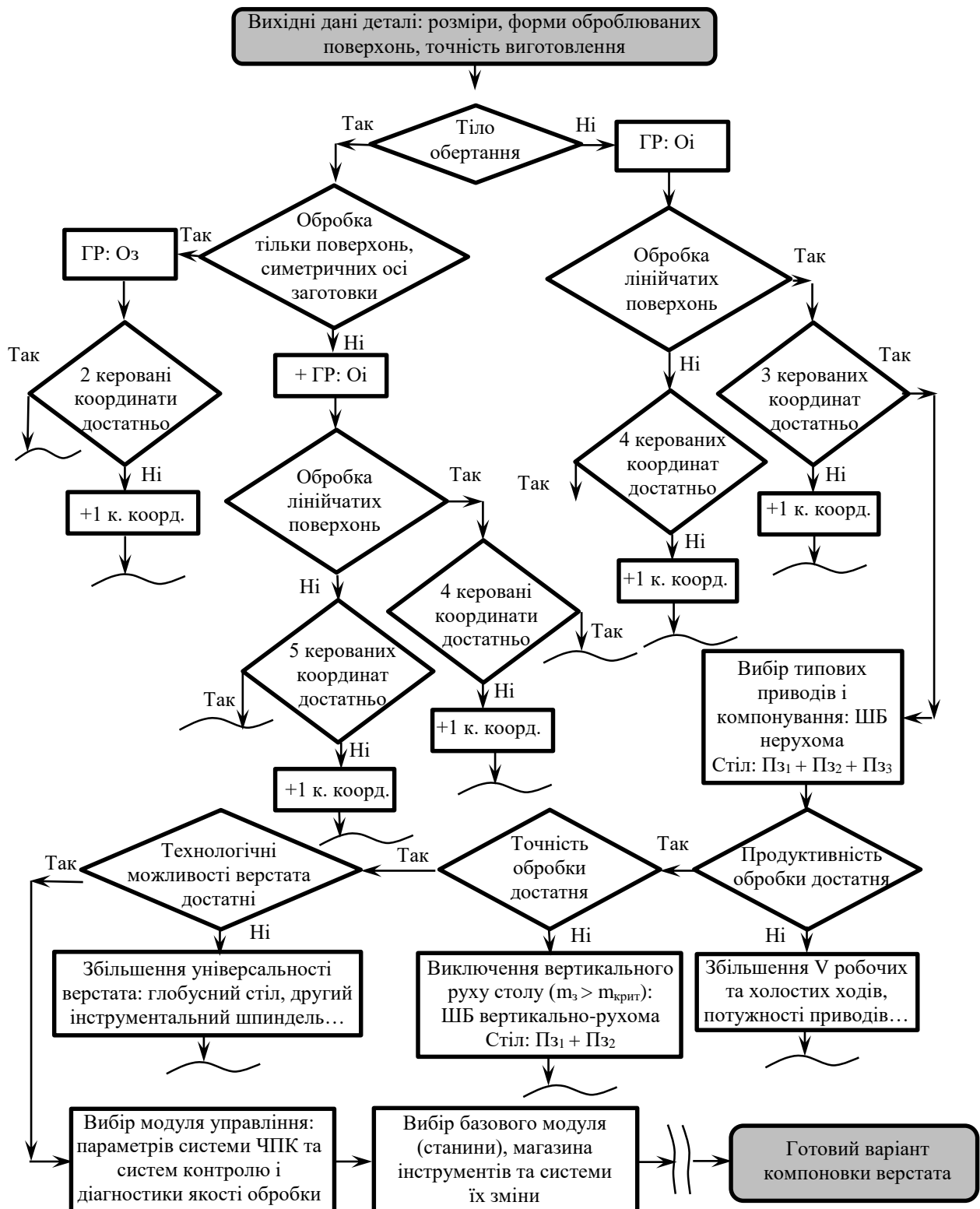


Рис. 3. Алгоритм визначення необхідних складових верстата з ЧПК

Алгоритм, схему якого зображено на рисунку 3, має певні обмеження:

– послідовність розглянуто тільки для одного з варіантів вибору параметрів систем верстата;

– окремі (внутрішні) цикли вибору обмежені одною ітерацією (як під час визначення кількості керованих координат, так і при досягненні необхідних параметрів точності, продуктивності та забезпеченні певних технологічних можливостей верстата);

– в алгоритм не введені специфічні вимоги до верстата й умови, що накладаються обмеженнями номенклатури та конструктивними і технологічними параметрами існуючих універсальних компоновальних модулів; тому компоновка верстата може мати певні конструктивні особливості.

Наприклад, під час введення в алгоритм уточнюючих призначень проєктованого верстата вимог, є можливість отримати декілька компоновань верстатів (рис. 4), що різняться розташуванням інструментального шпинделя, місткістю магазину інструментів, рухливістю вузлів, що забезпечують рухи формоутворення.

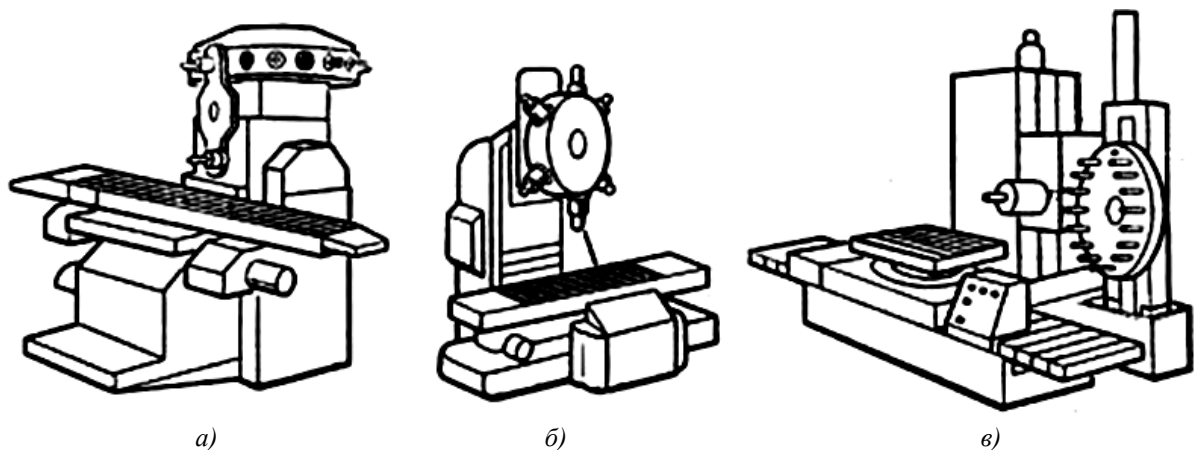


Рис. 4. Варіанти конструкції верстата, створеного за модульним принципом для обробки корпусних деталей (3 керовані координати)

Створення верстатів з новим компонованням за модульним принципом дає можливість скоротити час їхньої розробки з дотриманням всіх вимог сучасного та майбутнього виробництва.

Висновки:

1. Виконаний аналіз принципів компоновання металорізальних верстатів з ЧПК показує, що до основних умов їх відповідності сучасним вимогам виробництва належать:

– максимальне спрощення механічної частини верстата з широким застосуванням мехатронних систем; таким чином досягається висока точність, жорсткість та швидкодія, зменшення загальної кількості прецизійних вузлів забезпечує зниження вартості верстата;

– забезпечення можливості автоматизації програмування верстата за рахунок вбудовування його системи ЧПК в загальну САПР;

– вбудовування системи контролю оброблюваної деталі або інструмента в загальну систему самодіагностики верстата з ЧПК.

2. Сучасний верстат з ЧПК перетворюється в ланку ланцюга процесу отримання готового виробу, в якому кожна складова оптимізована для виконання своїх основних функцій.

3. Широка універсалізація оснащення та використання електронних систем для створення необхідної кінематичної структури верстатів з ЧПК забезпечує уніфікацію методів обробки й методів формоутворення для виготовлення усього діапазону форм та розмірів поверхонь деталей, що надає можливість зменшити кількість оригінальних модулів для створення верстата будь-якого призначення.

4. Розроблений авторами алгоритм визначення необхідних складових систем верстата, залежно від основних визначальних характеристик оброблюваної деталі, дозволяє автоматизувати процес проєктування будь-якого верстата з ЧПК на основі модульного принципу компоновання.

Список використаної літератури:

1. Кузнецов Ю.Н. Будущее станкостроения – сердцевины машиностроения / Ю.Н. Кузнецов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2017. – № 2 (55). – С. 25–35.
2. Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем / В.Ф. Шинкаренко. – К. : Наукова думка, 2002. – 288 с.
3. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення : навч. посібник для студентів вищих навчальних закладів / Ю.М. Кузнецов, О.Ф. Саленко, О.О. Харченко, В.Т. Щетинін. – Київ–Кременчук–Севастополь : Точка, 2014. – 500 с.

4. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : підручник, Ч. 1 : Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання / В.А. Крижанівський, Ю.М. Кузнєцов, А.М. Кириченко та ін. – Кіровоград, 2003. – 422 с.
5. Подураев Ю.В. От механики к мехатронике: ведущая тенденция развития современных производственных машин / Ю.В. Подураев // Приводная техника. – 2003. – № 4. – С. 16–20.
6. Jikai Liu A survey of manufacturing oriented topology optimization methods / Liu Jikai, Ma Yongsheng // Advances in Engineering Softwar. – 2016. – August. – P. 161–175.
7. Шевцов С.Н. Методы оптимизации конструкций / С.Н. Шевцов. – Ростов-на-Дону, 2010. – 97 с.
8. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2013. – 221 с.
9. Abele E. Machine tool spindle units. CIRP Annals / E.Abele, Y.Altintas, C.Brecher // Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 59, № 2. – P. 781–802.
10. Neugebauer R. Mechatronic Systems for Machine Tools. CIRP Annals / R.Neugebauer, B.Denkens, K.Wegener // Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 56, № 2. – P. 657–686.
11. Веселовська Н.Р. Перспективи розвитку гнучких комп'ютерно-інтегрованих виробничих систем / Н.Р. Веселовська, В.Б. Струтинський, О.В. Зелінська // Наукові нотатки : міжвузівський збірник (напрямок «Інженерна механіка»). – Луцьк : Луцький державний технічний університет, 2009. – № 25, Ч. 1. – С. 53–64.
12. Веселовська Н.Р. Аналіз сучасного стану верстатних комплексів механічної обробки в машинобудуванні / Н.Р. Веселовська // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Машинобудування. – 2012. – № 64. – С. 91–99.
13. Металлорежущие станки / под. ред. В.Э. Пуша. – М. : Машиностроение, 1986. – 588 с.

References:

1. Kuznetsov, Yu.N. (2017), «Budushchee stankostroeniya – serdtsseviny mashinostroeniya», *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*, No. 2 (55), pp. 25–35.
2. Shynkarenko, V.F. (2002), *Osnovy teorii' evoljucii' elektromehaničnyh system*, Naukova dumka, Kyi'v, 288 p.
3. Kuznjecov, Ju.M., Salenko, O.F., Harchenko, O.O. and Shhetynin, V.T. (2014), *Tehnologichne obladnannja z ChPK: mehanizmy i osnashhennja, navch. posibnyk dlja studentiv vyshhyh navchal'nyh zakladiv*, Točka, Kyi'v–Kremenčuk–Sevastopol', 500 p.
4. Kryzhaniv'skij, V.A., Kuznjecov, Ju.M., Kyrychenko, A.M. and other (2003), *Agregatno-modul'ne tehnologichne obladnannja, pidruchnyk, Vol. 1* «Pryncypy pobudovy agregatno-modul'nogo tehnologičnogo obladnannja», Kirovograd, 422 p.
5. Poduraev, Yu.V. (2003), «От механіки к мехатроніке: vedushchaya tendentsiya razvitiya sovremennykh proizvodstvennykh mashin», *Privodnaya tekhnika*, No. 4, pp. 16–20.
6. Jikai, Liu and Yongsheng, Ma (2016), «A survey of manufacturing oriented topology optimization methods», *Advances in Engineering Softwar*, August, pp. 161–175.
7. Shevtsov, S.N. (2010), *Metody optimizatsii konstruktsii*, Rostov-na-Donu, 97 p.
8. Zlenko, M.A., Popovich, A.A. and Mutylina, I.N. (2013), *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii*, Izd-vo politekhn. un-ta, SPb., 221 p.
9. Abele, E., Altintas, Y. and Brecher, C. (2010), «Machine tool spindle units. CIRP Annals», *Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 781–802.
10. Neugebauer, R., Denkens, B. and Wegener, K. (2007), «Mechatronic Systems for Machine Tools. CIRP Annals», *Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 2, pp. 657–686.
11. Veselov'ska, N.R., Strutyński, V.B. and Zelins'ka, O.V. (2009), «Perspektyvy rozvytku gnuchkyh komp'juterno-integrovanyh vyrobnych system», *Naukovi notatky, mizhvuziv'skij zbirnyk, naprjam Inzhenerna mehanika*, Luc'kij derzhavnyj tehničnyj universytet, Luc'k, No. 25, Part 1, pp. 53–64.
12. Veselov'ska, N.R. (2012), «Analiz suchasnogo stanu verstatnyh kompleksiv mehanichnoi' obrobky v mashynobuduvanni», *Visnyk NTUU «KPI»*, Serija *Mashynobuduvannja*, No. 64, pp. 91–99.
13. Pusha, V.E. (ed.) (1986), *Metallorėzhushchie stanki*, Mashinostroenie, M., 588 p.

Степчин Ярослав Анатолійович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри галузевого машинобудування державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- динаміка механічних систем;
- математичне моделювання.

E-mail: tmkts_syaa@ztu.edu.ua.

Отаманський Валентин Владиславович – асистент кафедри галузевого машинобудування державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- динаміка механічних систем;
- математичне моделювання;
- конструювання металообробних верстатів.

E-mail: mvs_ovv@ztu.edu.ua.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2020.