

## ВІДЗИВ ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу ШЕЛЕПКО Ольги Володимирівни  
"Підвищення вихідних характеристик багатокоординатних верстатів паралельної  
структури зі спеціальним робочим органом",  
яка подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Рукопис дисертації складається з переліку умовних позначень, символів та скорочень, вступу, п'яти розділів з висновками по кожному, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, додатків і за змістом є цілісним, завершеним науковим дослідженням.

### 1. Актуальність теми

У створенні матеріально-технічної бази, підвищенні економічного і культурного рівня суспільства важливішу роль виконують сучасні машини, промислові роботи, верстати і в тому числі роботи-верстати, які є невідомою частиною сучасного машинобудування. З кожним роком все більш набувають поширення і розвитку роботи-верстати типу багатокоординатних верстатів паралельної структури (БВПС). Серед множини БВПС виділяються роботи-верстати на основі механізмів паралельної структури типу гексапод і пентапод, які характеризуються не тільки високою швидкістю переміщення і точністю позиціонування при достатній жорсткості для обробки складних деталей та вузлів, а й більшою енергоємністю і продуктивністю у порівнянні з верстатами звичайної стандартної побудови.

Тому завдання вдосконалення методів розрахунку кінематичних залежностей робота-верстата типу пентапод, визначення величини та форми сукупного робочого простору (РП), приведеної до зони обробки жорсткості при різній орієнтації робочого органу (РО), обґрунтування вибору раціональної компоновки та геометричних параметрів визначають актуальність дисертаційної роботи.

Практичну значимість теми дисертації підтверджено науково-дослідними роботами, які позначені в авторефераті і виконані при особистій участі автора відповідно з державними та урядовими науково-технічними програмами.

**Мета роботи** полягає у підвищенні вихідних характеристик БВПС зі спеціальним робочим органом, шарніри якого мають спільну вісь, на основі обґрунтування раціональної компоновки механізму верстата, добору геометричних параметрів, а також управління вихідними характеристиками шляхом

цілеспрямованої зміни геометричних параметрів в залежності від орієнтації РО та виду обробки.

Досягнення цієї мети слід кваліфікувати як нове науково обґрунтоване вирішення важливої проблеми верстатобудування, що є суттєвим для розвитку теорії і практики сучасних виробничих систем, і тому тема дисертаційної роботи є актуальною.

## **2. Наукова новизна**

В авторефераті і рукопису дисертації автор наводить три пункти, які цілком обґрунтовано відповідають визначенню "наукова новизна". На думку офіційного опонента наведені тези чітко визначають нові наукові положення, отримані особисто дисертантом, а саме:

- *вперше* розроблено узагальнену компоувальну схему і математичні моделі БВПС зі спеціальним РО, які характеризують розміщення опорних шарнірів у просторі, та відповідно вдосконалено його кінематичні залежності;
- *вперше* встановлено вплив компоновки та геометричних параметрів БВПС зі спеціальним РО на величину та форму сукупного орієнтаційного РП та приведену до зони обробки жорсткість, що дало змогу встановити ділянки РП із максимальними показниками жорсткості, а значить і відповідно з мінімальними похибками обробки деталей;
- *вперше* запропоновано та науково обґрунтовано метод підвищення приведеної просторової жорсткості та розширення РП БВПС зі спеціальним РО шляхом цілеспрямованої зміни геометричних параметрів верстата за рахунок зміни конфігурації розташування окремих шарнірних опор нерухомої основи.

Безумовно фундаментальною теоретичною "родзинкою" дисертаційної роботи є концепція управління вихідними характеристиками БВПС залежно від орієнтації РО та виду обробки з можливістю зміни геометричних параметрів під час роботи.

## **3. Достовірність та обґрунтування наукових положень і висновків**

Основні наукові результати роботи отримані на основі фундаментальних положень і методів аналітичної геометрії, основах верстатобудування, мехатроніки, теорії механізмів і машин, векторних та матричних теоріях та комп'ютерного моделювання. Заслуговують особливої уваги та значення експериментальні дослідження, що проведені на спроектованому та виготовленому дослідному зразку БВПС зі спеціальним РО.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, подано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію щодо апробації роботи, її структури та обсягу, розкрито особистий внесок здобувача.

У першому розділі розглянуто поточний стан розвитку обладнання паралельної структури та основні їх переваги і недоліки у порівнянні із верстатами традиційної структури, приведені приклади деталей та їх матеріали, оброблені на БВПС. Також були розглянуті основні властивості роботів-верстатів: кінематика, РП, жорсткість, спритність та маніпулятивність.

В результаті аналізу відомих досліджень встановлено, що серед обладнання паралельної структури БВПС типу пентапод зі спеціальним РО потенційно мають ряд переваг над верстатами традиційної побудови – нижча вартість за рахунок меншої кількості приводів, більша можливість орієнтації РО.

Встановлено, що велика кількість праць стосовно визначення РП та жорсткості по дослідженню верстатів на основі платформи Стюарт, не дає змогу зробити однозначні висновки для БВПС зі спеціальним РО типу пентапод.

Виявлено, що дослідження щодо раціональних конструктивних параметрів БВПС зі спеціальним РО відсутні, а широкий досвід стосовно верстатів на основі платформи Стюарта неможливо застосувати внаслідок їх особливостей конструкції.

Встановлено також, що відсутні дослідження щодо підвищення приведеної просторової жорсткості та розширення РП БВПС зі спеціальним РО шляхом цілеспрямованої зміни геометричних параметрів верстата за рахунок зміни конфігурації розташування окремих шарнірних опор нерухомої основи.

Вищесказане обумовлює актуальність відповідних досліджень і наукових розробок. За результатами аналізу визначено комплекс наукових завдань і основні напрямки щодо їх вирішення.

У другому розділі представлена розроблена методика теоретичних досліджень конструктивних параметрів БВПС зі спеціальним РО, що в подальшому надало змогу дисертанту встановити раціональні геометричні параметри розміщення карданних шарнірів основи. Крім того, вдосконалено однозначний аналітичний метод визначення зворотної кінематики БВПС зі спеціальним РО, що у порівнянні з відомим дає змогу скоротити час на обчислення та мінімізувати похибки розрахунку. На основі розробленої автором схеми побудови РП встановлено, що для БВПС зі спеціальним РО із ланками змінної довжини робочий простір характеризується кутами нахилу штанг верстата в просторі, діапазоном зміни довжин штанг та розміщенням шарнірів, що з'єднують штанги з РО.

На основі розробленого методу визначення нормального вектора штанг запропоновано розрахункову схему та методику розрахунку приведеної матриці жорсткості БВПС зі спеціальним РО. Представлена БВПС зі спеціальним РО із ланками змінної довжини спроектована і виготовлена автором для підтвердження теоретичних досліджень. До того ж наведено розроблену методику щодо

виготовленого стенду експериментальних досліджень жорсткості механізму БВПС із ланками змінної довжини при осьовому та радіальному навантаженні.

У *третьому розділі* наведено розроблені аналітичні моделі визначення змін довжин штанг в залежності від переміщення РО у просторі вздовж осей, а також кутів повороту РО навколо відповідних осей, що дозволило встановити необхідні довжини штанг для забезпечення переміщення РО по заданій траєкторії. Для оцінки точності відпрацювання координатних переміщень РО за заданими траєкторіями руху проведено моделювання за допомогою пакету SolidWorks Motion.

Безсумнівну цінність мають побудовані трьохвимірні моделі РП БВПС зі спеціальним РО в залежності від змін діапазону довжин штанг, визначені величини їх об'єму та встановлені залежності величини РП від довжин штанг. Розроблена методика та наведені результати обчислення матриці жорсткості у РП шляхом зміни координат полюсу РО, побудовані графіки залежності поступальної та крутильної жорсткості при розміщенні полюсу вздовж вертикальної осі та побудовані лінії рівної поступальної жорсткості у напрямках координатних осей.

В результаті наукових розробок встановлено основні геометричні параметри, запропоновано п'ять варіантів конструкцій спеціального РО БВПС та визначена більш раціональна конструкція. Розроблено схему розташування шарнірів основи для БВПС зі спеціальним РО за показниками жорсткості та величиною і формою РП. Встановлено раціональне розташування першого шарніра основи та запропоновано методику управління жорсткістю механізму під час роботи верстата шляхом зміни вертикального положення двох шарнірних опор.

У *четвертому розділі* представлено результати експериментальних досліджень за розробленою методикою, за якими встановлено, що жорсткість шарнірів РО у напрямку осі шпинделя у 5-7 разів більша, ніж у радіальному напрямку. Проведено порівняння теоретично та експериментально визначених матриць жорсткості з горизонтальною та вертикальною орієнтацією РО для різних положень у просторі за елементами головної діагоналі матриць жорсткості та власними значеннями, а також побудовані еліпсоїди жорсткості.

Максимальна різниця результатів теоретичних на експериментальних досліджень при горизонтальній орієнтації РО за елементами головної діагоналі матриць жорсткості складає 19,8 %, а при вертикальній орієнтації 19,4 %, що є допустимою величиною. Максимальна різниця результатів за власними значеннями матриць при горизонтальній орієнтації РО складає 19,9 %, а при вертикальній орієнтації 19,3 %, що є також допустимою величиною. Орієнтація еліпсоїдів жорсткості у просторі для всіх положень РО у просторі співпадає.

У *п'ятому розділі* описані основні особливості проектування БВПС зі спеціальним РО при визначенні раціональної компоновки та її параметрів в залежності від заданих технічних характеристик. Підтверджено працездатність спроектованого і виготовленого дослідного зразку БВПС зі спеціальним РО верстата, на якому в подальшому оброблено заготовку та отримано деталь із обробленими дільницями згідно заданої траєкторії. При цьому контур дільниць має чисту поверхню.

Запропоновано конструкцію штанги змінної довжини із можливістю усунення зазорів в шарнірах, завдяки тому, що підшипники карданного підвісу та карданного шарніру виконані у вигляді еластичних вставок з конічними поверхнями та оснащені пружними пристроями.

Для збільшення величини приведеної до зони обробки жорсткості рекомендовано збільшити радіус шарніра РО, перший шарнір розташовувати таким чином, щоб відстань від шарніра до інструмента була мінімально можливою, а також збільшувати загальну довжину РО. Розглянуто варіанти розширення можливості обробки для БВПС зі спеціальним РО шляхом удосконалення існуючої конструкції. Запропоновано та науково обґрунтовано метод підвищення приведеної просторової жорсткості та розширення РП БВПС зі спеціальним РО шляхом цілеспрямованої зміни геометричних параметрів верстата за рахунок переміщення окремих шарнірних опор основи.

Принципові наукові положення дисертаційної роботи в цілому є достатньо теоретично обґрунтованими і не викликають сумнівів. Застосування сучасних методів математичного моделювання та аналізу є коректним, а наведені результати комплексного моделювання та практичного впровадження підтверджують достовірність наукових положень і висновків дисертації.

#### **4. Важливість для науки і національної промисловості результатів дисертації**

*Наукова цінність роботи* полягає в тому, що на основі комплексних наукових досліджень створено математичні моделі і комп'ютерні процедури підвищення вихідних характеристик БВПС зі спеціальним робочим органом, шарніри якого мають спільну вісь, на основі обґрунтування раціональної компоновки механізму верстата, добору геометричних параметрів, а також управління вихідними характеристиками шляхом цілеспрямованої зміни геометричних параметрів в залежності від орієнтації РО та виду обробки.

*Практичне значення.* Розроблені математичні моделі підвищення вихідних характеристик БВПС зі спеціальним робочим органом а також методики та алгоритми можуть бути використані для наступних практичних цілей:

- отримання залежності об'єму та форми РП від геометричних параметрів БВПС зі спеціальним РО, дають змогу визначитися із необхідною компоновкою обладнання на етапі проектування;
- визначення приведеної до зони обробки жорсткості БВПС зі спеціальним РО у просторі при різних варіантах орієнтації РО, що дає змогу встановити ділянки РП із максимальними показниками жорсткості для забезпечення точної обробки деталей та вузлів;
- використання основних особливостей проектування БВПС зі спеціальним РО при визначенні раціональної компоновки, встановлення раціональної конструкції спеціального РО БВПС та обґрунтування вибору раціональних геометричних параметрів з точки зору приведеної жорсткості верстата;
- використання методів розширення можливостей обробки на існуючій конструкції БВПС зі спеціальним РО;
- патенти, отримані автором, свідчать не тільки про наукову новизну, але й подальше удосконалення механізму роботів-верстатів типу пентапод.

*Рекомендації щодо впровадження отриманих в дисертації результатів.*

За результатами проведених теоретичних досліджень і комп'ютерного моделювання отримано ряд науково-практичних результатів, які опрацьовані та впроваджені: при схемному проектуванні сучасних моделей роботів-верстатів типу пентапод на підприємстві НВФ «КІТ-КОНСАЛТІНГ» ТОВ, м. Кропивницький; в навчальному процесі при викладанні дисципліни «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою».

Результати досліджень реалізовані у технічних рішеннях, які підтверджують можливість створення конкурентоспроможних конструкцій роботів-верстатів типу пентапод.

## **5. Повнота публікації результатів досліджень**

Основний зміст роботи викладено з необхідною повнотою у 17 друкованих роботах у фахових виданнях, з них 7 друкованих праць у фахових виданнях, 7 робіт у збірниках праць конференцій та 3 патенти.

## **6. Зауваження щодо змісту і оформлення дисертації**

6.1. Стор. 22. Спірно і не обґрунтовано є вираз «верстати типу пентапод потенційно мають ряд переваг над платформою Стюарта»;

6.2. Стор. 22. Спірно і не обґрунтовано є вираз, «для платформи Стюарта, яка має шість ступенів вільності робочого органу, принциповим недоліком є недостатня для повноцінної п'ятикоординатної обробки можливість орієнтації РО». Відомо, що чим більше ступенів вільності конструкції, тим більша можливість зміни її орієнтації.

6.3. Стор. 22. П'ять ступенів вільності механізму паралельної структури не обов'язково означає обробку по п'яти координатах. По шостій, яка співпадає з вісью шпинделя, теж можлива обробка тому, що шпиндель має змогу переміщення вздовж своєї осі.

6.4. У розділі 1 не розглянуто порівняння з функціональними можливостями високоманевреного робота-верстата типу Tricert, що має три незалежні приводи механізму паралельної структури (транспортуючі ступені вільності) і три орієнтуючі ступені вільності шпинделя та виконує обробку по шести координатах.

6.5. На рис. 1.15 (стор. 43) та рис. 2.7 (стор. 65) зображено крутильні жорсткості штанг гексаподу та пентаподу, відповідно. Однак механізми паралельної структури гексаподу та пентаподу побудовані так, що в штангах не можуть виникати деформації кручення. Штанги гексаподу та пентаподу сприймають тільки деформації стискання-розтягування. Це самі головні переваги таких конструкцій.

6.6. У другому розділі при побудові розрахункової схеми (рис. 2.1 і рис. 2.2) не вказано тип шарнірів на рухомій платформі РО і не достатньо описано їх кінематичні можливості.

6.7. Стор. 58. Кути просторової орієнтації твердого тіла з одною нерухомою точкою (штанг пентаподу) названі кутами Крилова. В дійсності це кути Ейлера, в яких пізніше Крилов запропонував інший відлік тільки одного третього кута повороту. Тому, їх називають кутами Ейлера-Крилова.

6.8. Стор. 70. Термін «прискорення» краще замінити на термін «пришвидшення».

6.9. Стор. 83, розділ 3. На рис. 3.1 представлено графіки залежностей довжин штанг від переміщень РО вздовж координатних осей. Але ні в розділі 2 ні в розділі 3 не вказано: де знаходиться початок осей координат і як ці осі розташовані відносно шарнірів основи. Вказано лише, що точка О знаходиться на нерухомій основі.

6.10. Стор. 88. На рис. 3.4 зображено повороти РО відносно вертикальної осі Z, але на рис. 3.2 не наведено графік зміни довжин штанг при повороті навколо цієї осі.

При повороті шпинделя навколо своєї поздовжньої осі змінюється просторова орієнтація центру першого шарніру рухомої опори, а тому змінюється і довжина штанги.

6.11. На стор. 126 наведено результат визначення (4.3) сполучної податливості. Але не відомо за якими формулами виконано це визначення, і взагалі ніде не пояснено значення терміну «сполучна податливість».

6.12. В роботі зовсім не приділена увага особливим конфігураціям механізму пентаподу з кінематичною та динамічною сингулярністю.

6.13. Не розглянуто також конфігурації механізму з можливою неоднозначністю.

## **7. Відповідність дисертації встановленим вимогам**

Дисертаційна робота "Підвищення вихідних характеристик багатокоординатних верстатів паралельної структури зі спеціальним робочим органом", є самостійно виконаною кваліфікованою науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані теоретичні результати та результати експериментальних досліджень. По темі, предмету дослідження і змістом дисертація відповідає науковій спеціальності 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

Робота в цілому є завершеною, її зміст та оформлення відповідають сучасним вимогам нормативних документів МОН України до кандидатських дисертацій. У дисертації вирішена важлива наукова і прикладна проблема — розроблені основи підвищення вихідних характеристик БВПС зі спеціальним робочим органом шляхом обґрунтування раціональної компоновки механізму верстата, добору геометричних параметрів, а також управління вихідними характеристиками шляхом цілеспрямованої зміни геометричних параметрів в залежності від орієнтації РО та виду обробки.

Отримані в дисертації результати мають істотне практичне значення і використовуються на машинобудівних та спеціальних виробничих підприємствах.



Головні положення дисертаційної роботи з достатньою повнотою викладено в опублікованих у спеціальних виданнях наукових роботах. Зміст автореферату і основні положення дисертації ідентичні.

Автор дисертаційної роботи "Підвищення вихідних характеристик багатокоординатних верстатів паралельної структури зі спеціальним робочим органом" – ШЕЛЕПКО Ольга Володимирівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

Офіційний опонент, завідувач кафедри  
підйомнотранспортного і робототехнічного обладнання  
Одеського національного політехнічного університету,  
доктор технічних наук, професор

В. П. Яглінський

Підпис професора В. П. Яглінського засвідчую  
Вчений секретар ОНПУ



В. І. Улевчук