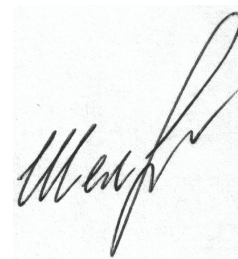


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Шелепко Ольга Володимирівна



УДК 62-231:621.9.04

**ПІДВИЩЕННЯ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БАГАТОКООРДИНАТНИХ ВЕРСТАТІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ**

05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі металорізальних верстатів та систем Центральноукраїнського національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Кириченко Андрій Миколайович,
Центральноукраїнський національний технічний
університет, м. Кропивницький,
декан механіко-технологічного факультету.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Дмитрієв Дмитро Олексійович,
Херсонський національний технічний університет,
м. Херсон,
професор кафедри транспортних систем і технічного
сервісу;

доктор технічних наук, професор
Яглінський Віктор Петрович,
Одеський національний політехнічний університет,
м. Одеса,
завідувач кафедри підйомно-транспортного і
робототехнічного обладнання.

Захист відбудеться «06» червня 2019 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради K23.073.02 в Центральноукраїнському національному технічному університеті за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр-т Університетський, 8.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр-т Університетський, 8.

Автореферат розіслано «03» травня 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Дідик О. К.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з перспективних напрямів розвитку верстатобудування є створення багатокоординатних верстатів паралельної структури (БВПС), які характеризуються високою швидкістю переміщення при достатній жорсткості для обробки складних деталей та вузлів.

Серед БВПС однією з найбільш розповсюджених є платформа Стюарта, яка забезпечує шість ступенів вільності робочого органа (РО). Її принциповим недоліком є недостатня для повноцінної п'ятикоординатної обробки можливість орієнтації РО (у межах $50 - 60^\circ$). До того ж, шість ступенів вільності РО є зайвими, оскільки обробка деталей звичайно ведеться по п'яти координатах, а шоста співпадає з віссю шпинделя. Тому практичний інтерес для використання у верстатному обладнанні представляють механізми з п'ятьма ступенями вільності зі спеціальним РО, зокрема «пентапод», у якому спеціальне розміщення шарнірних опор дозволяє обмежитися п'ятьма приводами з ланками змінної довжини і забезпечити можливість орієнтації РО у діапазоні більше 90 градусів навколо однієї з осей.

Для БВПС зі спеціальним РО існує необхідність вдосконалення методів розрахунку кінематичних залежностей, визначення величини та форми сукупного робочого простору (РП), приведеної до зони обробки жорсткості при різній орієнтації РО, обґрунтування вибору раціональної компоновки та геометричних параметрів, що визначає актуальність дисертаційної роботи.

Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі металорізальних верстатів та систем Центральноукраїнського національного технічного університету і пов'язана з тематикою науково-дослідної роботи кафедри на тему «Підвищення ефективності технологічного обладнання з механізмами паралельної структури» (номер державної реєстрації № 0111U000304) та держбюджетною темою «Теоретичні основи проектування багатокоординатних верстатів і машин з мехатронними стрижневими структурами та комп'ютерно-інтегрованими оптимальними робастними системами керування» (номер державної реєстрації № 0113U003084с).

Мета роботи полягає у підвищенні вихідних характеристик БВПС зі спеціальним РО, 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 залежно від орієнтації РО та виду обробки.

Об'єкт дослідження є багатокоординатний верстат паралельної структури зі спеціальним робочим органом.

Предметом дослідження є вплив компоновки та геометричних параметрів БВПС зі спеціальним РО на приведену просторову жорсткість та величину РП.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити узагальнену компонувальну схему і математичні моделі БВПС зі спеціальним РО, за допомогою чого визначити розміщення опорних шарнірів у просторі.

2. Вдосконалити метод розв'язання зворотної кінематичної залежності БВПС зі спеціальним РО, за допомогою чого визначити РП та приведену до зони обробки просторову жорсткість залежно від орієнтації РО та геометричних параметрів верстата.

3. Виконати обґрунтування раціональної компоновки, конструкції та геометричних параметрів БВПС зі спеціальним РО за характеристиками приведеної до зони обробки жорсткості та РП;

4. Обґрунтувати доцільність управління вихідними характеристиками БВПС зі спеціальним РО шляхом зміни геометричних параметрів залежно від орієнтації РО та виду обробки.

5. Спроекувати та виготовити дослідний зразок БВПС зі спеціальним РО, для якого експериментально виміряти жорсткість РО та приведену просторову жорсткість.

6. Сформулювати основні особливості проектування БВПС зі спеціальним РО та рекомендації з розширення їх технологічних можливостей, а також розробити нові конструкції БВПС зі спеціальним РО та їх вузлів.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі теоретичні дослідження базувалися на основних положеннях аналітичної геометрії, основ верстатобудування, мехатроніки, теорії механізмів і машин, векторних та матричних теоріях та комп'ютерного моделювання, а експериментальні дослідження проведені на спроектованому та виготовленому дослідному зразку БВПС зі спеціальним РО.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що у дисертації поставлено та розв'язано задачу підвищення вихідних характеристик БВПС зі спеціальним РО, шарніри якого мають спільну вісь, шляхом обґрунтування раціональної компоновки та геометричних параметрів, а також управління вихідними характеристиками шляхом цілеспрямованої зміни конфігурації розташування окремих шарнірних опор нерухомої основи верстата залежно від орієнтації РО та виду обробки. У процесі розв'язання цієї задачі отримано ряд нових наукових результатів:

1. Вперше розроблено узагальнену компонувальну схему і математичні моделі БВПС зі спеціальним РО, які характеризують розміщення опорних шарнірів у просторі, та відповідно вдосконалено його кінематичні залежності.

2. Вперше встановлено вплив компоновки та геометричних параметрів БВПС зі спеціальним РО на величину та форму 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.

3. Вперше запропоновано та науково обґрунтовано метод підвищення приведеної просторової жорсткості та розширення РП БВПС зі спеціальним РО шляхом цілеспрямованої зміни конфігурації розташування окремих шарнірних опор нерухомої основи.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Отримані теоретичні залежності об'єму та форми РП від геометричних параметрів БВПС зі спеціальним РО, що дають змогу визначитися із необхідною компоновкою обладнання на етапі проектування.

1. Запропонована методика 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.

2. Встановлено раціональну компоновку БВПС та схему спеціального РО, обґрунтовано вибір їх раціональних геометричних параметрів з точки зору приведеної жорсткості, описані основні особливості проектування та запропоновано методи розширення можливостей обробки на існуючій конструкції БВПС зі спеціальним РО.

3. На основі розроблених теоретичних залежностей вперше запропоновано нові конструкції БВПС зі спеціальним РО та їх елементів, які мають розширені функціональні можливості за критеріями приведеної жорсткості та РП і захищені патентами України.

4. Методики визначення приведеної до зони обробки жорсткості і РП, практичні рекомендації з вибору раціональної компоновки, конструкції та геометричних параметрів БВПС зі спеціальним РО і її компонентів та розроблені конструкції БВПС зі спеціальним РО з можливістю зміни геометричних характеристик під час роботи передано для подальших досліджень та впроваджень на НВФ «КІТ-КОНСАЛТИНГ» ТОВ, м. Кропивницький.

5. Розроблені методики використовуються у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету, а саме: окремі розділи використовуються у процесі викладання таких дисциплін: «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою», «Мехатронні системи верстатів» та «Проектування машин та обладнання».

Особистий внесок здобувача в одержанні наукових результатів. Основні теоретичні, практичні та експериментальні результати досліджень, що містяться у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належать ряд наукових результатів та положень, а саме: методика визначення загальної матриці просторової жорсткості БВПС зі спеціальним РО [2]; аналітичний метод розв'язання зворотної задачі кінематики та визначення діапазону переміщення штанг при заданій траєкторії руху РО [3]; в роботі [4] виконано розрахунок та аналіз РП і жорсткості для різних варіантів компоновок дослідного зразка БВПС зі спеціальним РО; розроблено методику проведення експериментальних досліджень жорсткості шарнірів спеціального РО БВПС та виявлення залежності переміщення у шарнірах під дією осьового та радіального навантаження [5]; розроблено методику вимірювання переміщення РО при навантаженні вздовж координатних осей, встановлено залежності похибки переміщення РО від зміни його положення відносно осі X при постійному навантаженні вздовж осей та визначено експериментальну матрицю жорсткості [6]; встановлено основні геометричні параметри та запропоновано раціональний варіант конструкції РО БВПС та визначено вплив геометричних параметрів РО на величину приведеної жорсткості БВПС зі спеціальним РО [7].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на XIV Міжнародній

конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки» (м. Київ, 25 – 26 жовтня 2014 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 15 – 18 вересня 2015 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 26 – 29 квітня 2016 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 24 – 27 квітня 2017 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 12 – 17 вересня 2017 р.); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті» (м. Кропивницький, 16 – 17 листопада 2017 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018» (м. Херсон, 12 – 16 вересня 2018 р.); науково-технічних конференціях викладачів, аспірантів та співробітників Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький, 2010 – 2018 рр.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, з них 7 друкованих праць у фахових виданнях (з яких у наукометричній базі цитування РІНЦ – 1 стаття, у міжнародній наукометричній базі даних eLIBRARY.RU – 2 статті та «Ulrich's Web Global Serials Directory», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», eLIBRARY.RU, «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services» – 1 стаття), 7 робіт у збірниках праць конференцій та 3 патенти.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури з 132 найменувань і додатків на 27 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 199 сторінок, з яких 135 сторінки основного тексту, 107 рисунків та 12 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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 й недоліки, порівняно з верстатами традиційної структури, приведені приклади деталей та їх матеріали, оброблені на БВПС. Також були розглянуті основні властивості верстатів: кінематика, РП, жорсткість, спритність та маніпулятивність.

Значний внесок у розвиток даного напрямку здійснили роботи вітчизняних учених, зокрема В. А. Крижанівського, І. І. Павленка, Ю. М. Кузнецова, В. Б. Струтинського, Д. О. Дмитрієва, А. М. Кириченка, В. П. Яглінського, І. А. Валявського та інших. Аналіз проведених досліджень засвідчує, що БВПС зі спеціальним РО типу пентапод потенційно мають ряд переваг над платформою Стюарта, зокрема, нижчу вартість за рахунок меншої кількості приводів, більш широкі можливості орієнтації РО. Авторами, які досліджують БВПС зі спеціальним РО, було визначено

кінематичні залежності шляхом знаходження довжини штанг за допомогою розв'язку двох квадратних рівнянь з урахуванням додаткових обмежень для вибору вірного рішення з кількох варіантів, що викликає зайві обчислювальні витрати. Велика кількість праць стосовно визначення РП та жорсткості присвячені дослідженню платформи Стюарта, що не дає змогу зробити однозначні висновки для БВПС зі спеціальним РО, оскільки він має ряд не розглянутих досі особливостей розрахунку порівняно з платформою Стюарта, насамперед, через несиметричність розміщення шарнірів на основі та співвісності шарнірів РО із шпинделем верстата.

Другий розділ присвячено розробці методики теоретичних та експериментальних досліджень просторової жорсткості, робочого простору та кінематичних залежностей БВПС зі спеціальним РО.

В основу розробленої методики теоретичних досліджень геометричних та конструктивних параметрів БВПС зі спеціальним РО покладені визначені теоретичні залежності положення шарнірів основи у просторі від ряду заданих параметрів, таких як довжини умовних штанг L_i та проекційних кутів їх орієнтації ϑ_i , δ_i і ε_i . Розташування центрів карданних шарнірів A_i визначено відповідно до схеми (рис. 1) та позначені цифрами 1–5 на нерухомій основі, а осі шарнірів B_i співпадають з віссю РО.

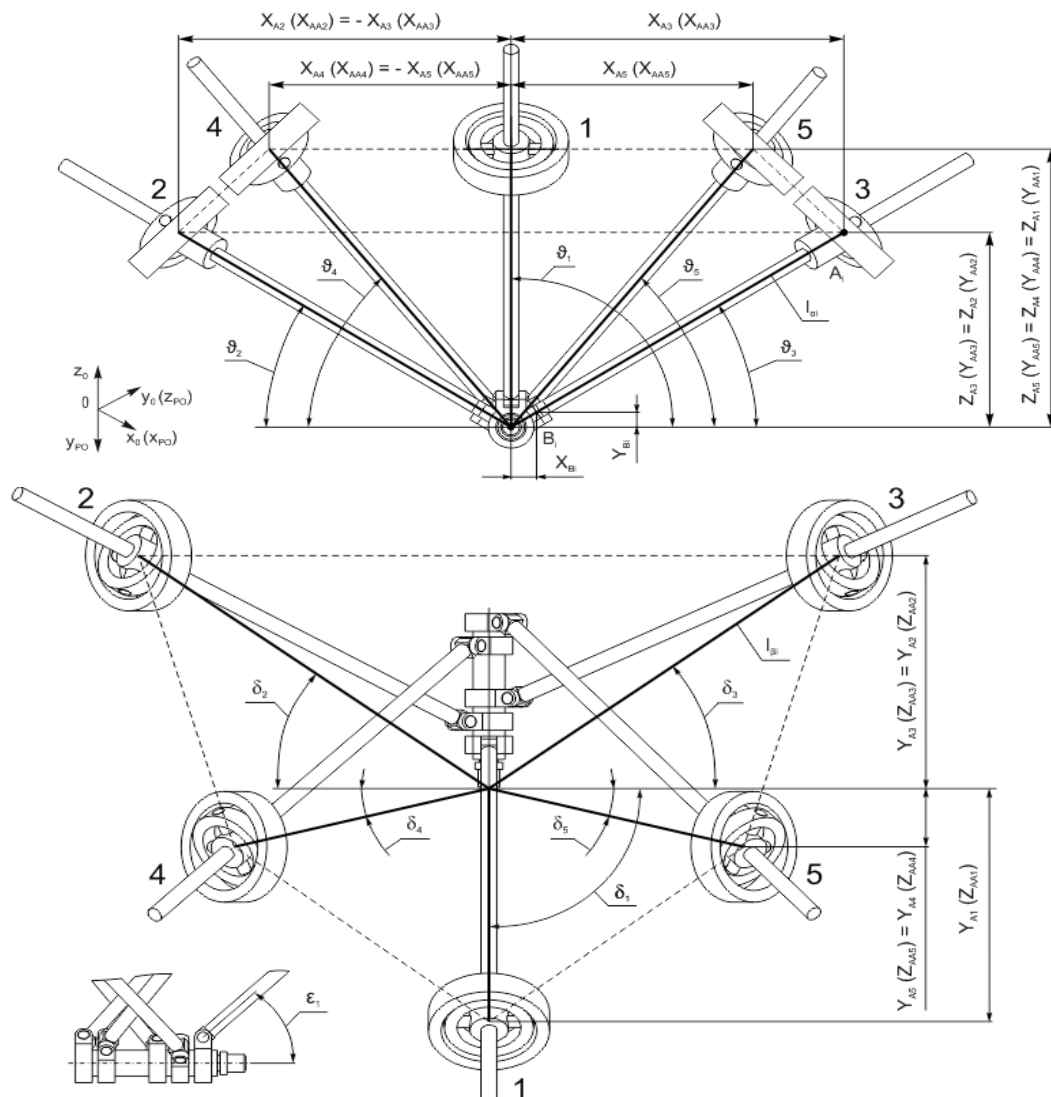


Рис. 1. Узагальнена компоновальна схема БВПС зі спеціальним РО

Визначено кути просторової орієнтації α_i , β_i умовних штанг БВПС зі спеціальним РО:

$$\alpha_i = \cos\left(\frac{\sin \beta_i}{\sin \vartheta_i}\right), \quad \beta_i = \cos\left(\sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg} \vartheta_i^2 \cdot \cos \delta_i^2 + 1}}\right). \quad (1)$$

Для встановлення залежностей координат положення шарнірів основи та РО у просторі визначено проекції довжин умовних штанг на основі формул (1): $l_{\alpha i} = L_i \cdot \cos \alpha_i$, $i = 2..5$; $l_{\beta i} = L_i \cdot \cos \beta_i$, $i = 2..5$; $l_{\alpha \varepsilon 1} = L_1 \cdot \sin \varepsilon_1$; $l_{\beta \varepsilon 1} = L_1 \cdot \cos \varepsilon_1$.

Вектори шарнірів основи:

$$\mathbf{ra}_1 = (l_{\alpha \varepsilon 1} \cdot \cos \vartheta_1, l_{\beta \varepsilon 1} \cdot \sin \delta_1, l_{\alpha \varepsilon 1} \cdot \sin \vartheta_1), \quad (2)$$

$$\mathbf{ra}_i = (l_{\alpha i} \cdot \cos \vartheta_i, l_{\beta i} \cdot \sin \delta_i, l_{\alpha i} \cdot \sin \vartheta_i), \quad i = 2..5 \quad (3)$$

Довжина штанги $A_i B_i$ згідно зі схемою (рис. 2) визначена таким чином:

$$q_i = \sqrt{(\sqrt{x_{Ai}^2 + y_{Ai}^2} - r)^2 + (z_{Ai} - z_{Bi})^2} \quad (4)$$

Координати точки В згідно зі схемою (рис. 3) визначено таким чином:

$$x_{Bi} = r \cdot \cos(\vartheta_i), \quad y_{Bi} = r \cdot \sin(\vartheta_i - 180^\circ), \quad (5)$$

де $\vartheta_i = \arccos\left(\frac{x_{AA_i}}{l_i}\right)$ – кути нахилу штанг, а величина проекційної довжини штанги

$$l_i = \sqrt{x_{AA_i}^2 + y_{AA_i}^2}.$$

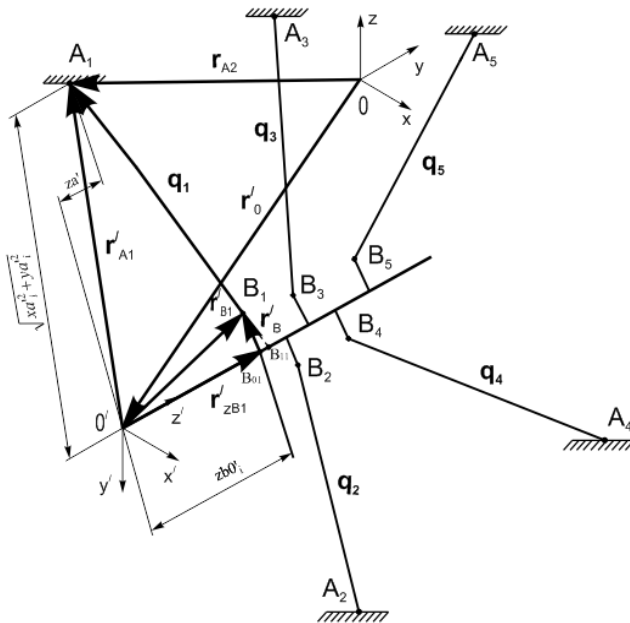


Рис. 2. Розрахункова схема БВПС зі спеціальним РО

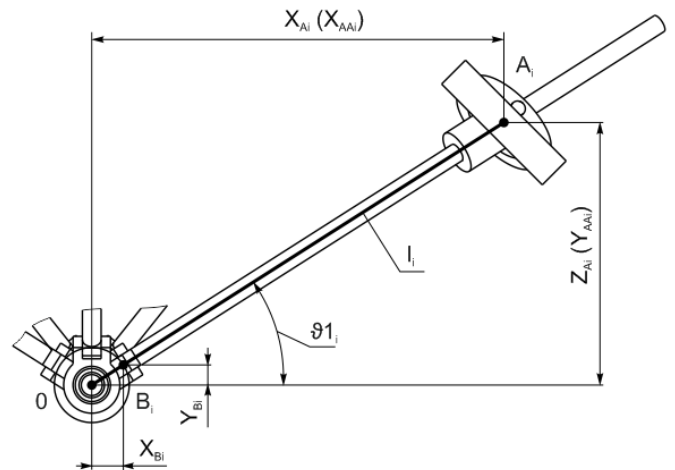


Рис. 3. Схема визначення вектора штанги

Визначено можливості обробки на БВПС зі спеціальним РО за рахунок геометричного методу побудови його РП. Схема побудови РП однієї штанги верстата з горизонтальною орієнтацією РО наведена на рис. 4, на якому позначено відстань 4-го шарніра РО до інструмента – Y_{b4} , центр карданного шарніра – точка

Б, приведенне положення карданного шарніра до центру інструмента – точка В, площини умовної симетрії роботи карданного шарніра відносно його центру – П1 та П2, ось симетрії – Г, обмеження по довжині штанги – R1 та R2.

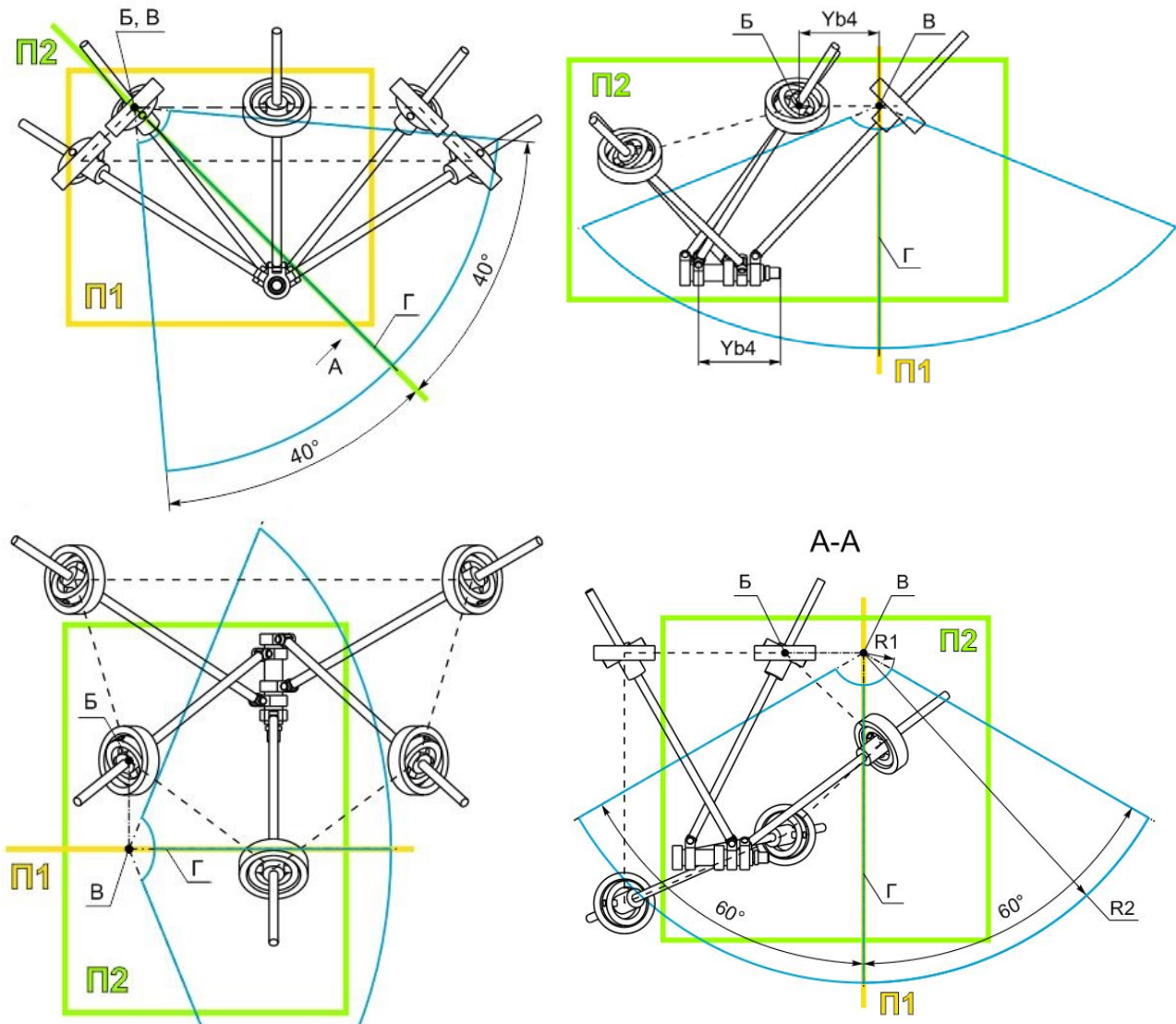


Рис. 4. Схема РП штанги верстата з горизонтальною орієнтацією РО

Розроблено методику визначення жорсткості БВПС зі спеціальним РО. Згідно з розрахунковою схемою (рис. 5) матриця просторової жорсткості механізму БВПС зі спеціальним РО визначається таким чином:

$$K = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 k_{\text{п}} \cdot \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_i^T & \sum_{i=1}^5 k_{\text{п}} \cdot \mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r}_{Ai} \times \mathbf{n}_i)^T \\ \left(\sum_{i=1}^5 k_{\text{п}} \cdot \mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r}_{Ai} \times \mathbf{n}_i)^T \right)^T & \sum_{i=1}^5 k_{\text{п}} \cdot \mathbf{r}_{Ai} \times \mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r}_{Ai} \times \mathbf{n}_i)^T + k_{\text{к}} \cdot \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_1^T \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $k_{\text{п}}$, $k_{\text{к}}$ – поступальна та крутильна жорсткість штанг, $\mathbf{n}_i$ – одиничний вектор напрямку штанги, $\mathbf{r}_{Ai}$ – радіус-вектор точки A_i .

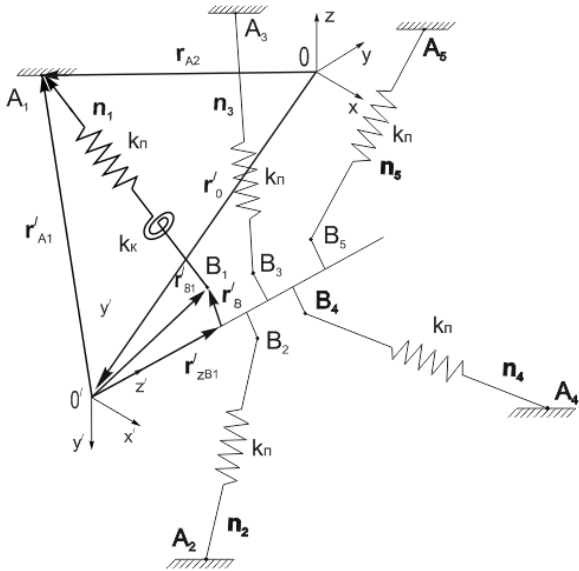


Рис. 5. Схема визначення матриці жорсткості механізму верстата

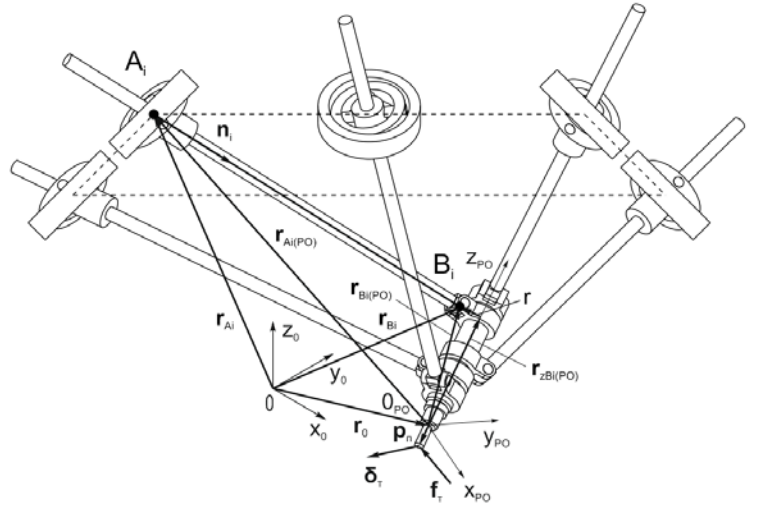


Рис. 6. Схема визначення приведеної жорсткості БВПС зі спеціальним РО

Для можливості оцінки характеру зміни пружних переміщень інструмента δ_T під дією сили технологічного навантаження $\mathbf{f}_T$ (рис. 6) визначено приведену до зони обробки матрицю поступальної жорсткості

$$K_{II} = \left[\left(\left(\sum_{i=1}^5 k_n \cdot \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_i^T \right)^{-1} + \left(\sum_{i=1}^5 k_n \cdot \mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r}_{Ai} \times \mathbf{n}_i)^T \right)^{-1} \times [\mathbf{p}_n]_x \right) - \right. \\ \left. - [\mathbf{p}_n]_x \times \left(\left(\sum_{i=1}^5 k_n \cdot \mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r}_{Ai} \times \mathbf{n}_i)^T \right)^{-1} \right)^T - \right. \\ \left. - [\mathbf{p}_n]_x \times \left(\sum_{i=1}^5 k_n \cdot \mathbf{r}_{Ai} \times \mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r}_{Ai} \times \mathbf{n}_i)^T + k_k \cdot \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_1^T \right)^{-1} \times [\mathbf{p}_n]_x \right]^{-1}, \quad (7)$$

де $[\mathbf{p}_n]_x = \begin{pmatrix} 0 & -p_{n3} & p_{n2} \\ p_{n3} & 0 & -p_{n1} \\ -p_{n2} & p_{n1} & 0 \end{pmatrix}$ – кососиметрична матриця 3x3, породжена радіус-вектором вершини інструмента.

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень спроектовано і виготовлено БВПС зі спеціальним РО (рис. 7). Верстат складається з основи 1, на якій розміщено п'ять карданних шарнірів 2 зі штангами змінної довжини 3. Іншим кінцем кожна штанга 3 прикріплена до РО 4 через шарніри 5 таким чином, що вісь кожної штанги 3 проходить через вісь РО 4. Оброблювана деталь встановлюється на стіл 6.

Характерною особливістю БВПС є встановлена здатність РО повертатися на кут більше 90° відносно однієї з осей, що дає змогу здійснювати обробку деталей із горизонтальною (рис. 7, б) та вертикальною орієнтацією РО (рис. 7, в), а також у проміжних положеннях, що значно збільшує сферу застосування верстата.

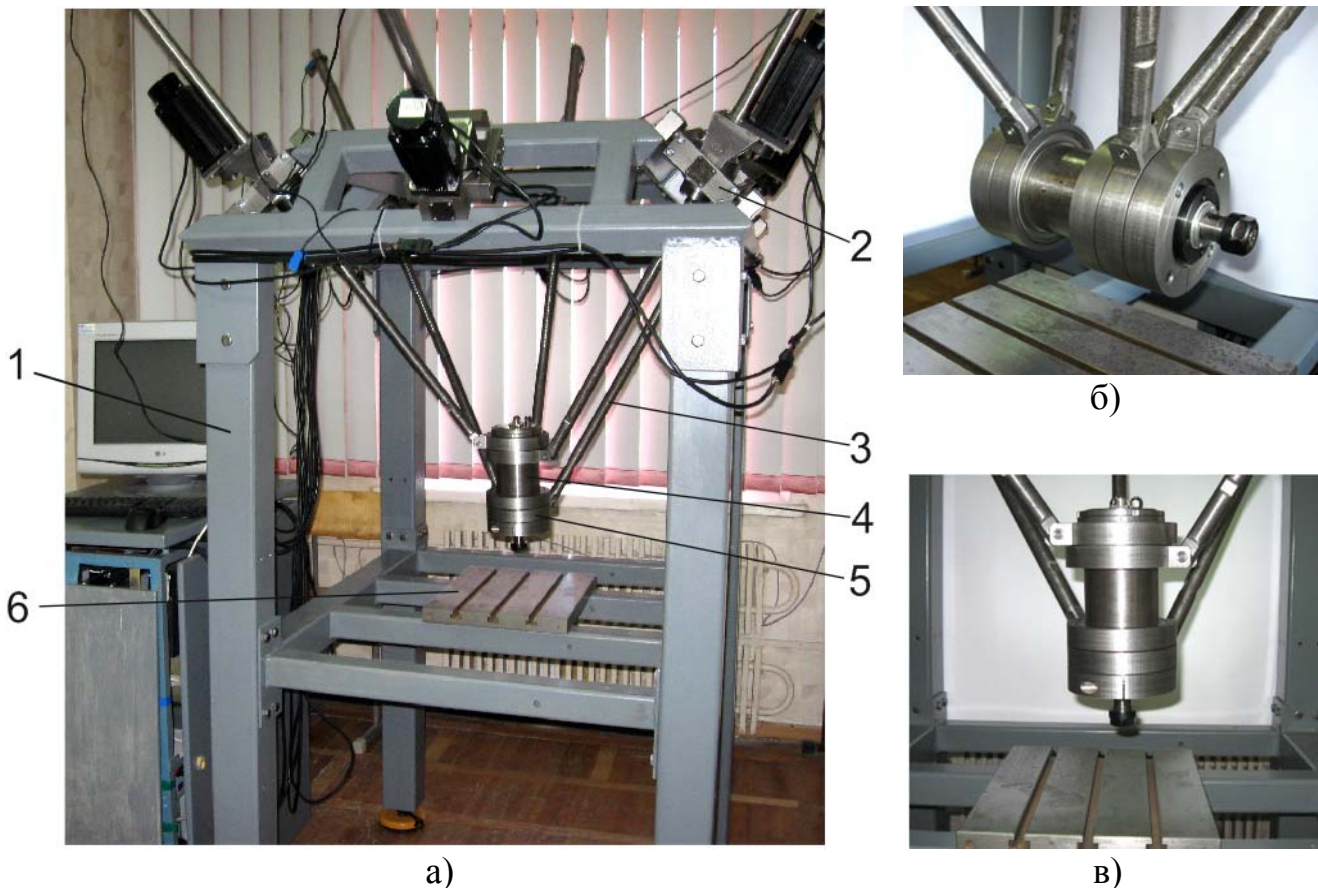


Рис. 7. БВПС зі спеціальним РО: а) загальний вигляд; б), в) варіанти орієнтації РО

Розроблена методика експериментальних досліджень просторової жорсткості БВПС зі спеціальним РО.

Першим етапом експериментальних досліджень є визначення жорсткості шарнірів РО шляхом вимірювання їх переміщень під осьовим та радіальним навантаженням, для чого розроблено та виготовлено вимірювальний стенд для експериментальних досліджень (рис. 8). РО 1 верстата кріпиться жорстко на столі 2, а навантажувальна планка 3 безпосередньо кріпиться на вилці 4 шарніра 5. Контроль величини зусилля навантаження на шарнір РО виконується за допомогою динамометра 6, а величина переміщення у шарнірах фіксується індикаторами 7.

Другим етапом є дослідження жорсткості БВПС зі спеціальним РО в просторі, для чого розроблено схеми для вимірювання переміщень РО при навантаженні вздовж осей X , Y та Z та виготовлено відповідне оснащення для БВПС (рис. 9). Спеціальний РО 1 БВПС фіксується у заданій горизонтальній орієнтації завдяки подачі живлення на двигуни верстата. Навантаження РО 1 відбувається за допомогою гвинта 2, який розміщується вздовж осі X , Y або Z залежно від напрямлення дії навантаження, а контроль величини зусилля прикладеної сили виконується динамометром 3. Величина переміщення РО 1 фіксується індикаторами 4.

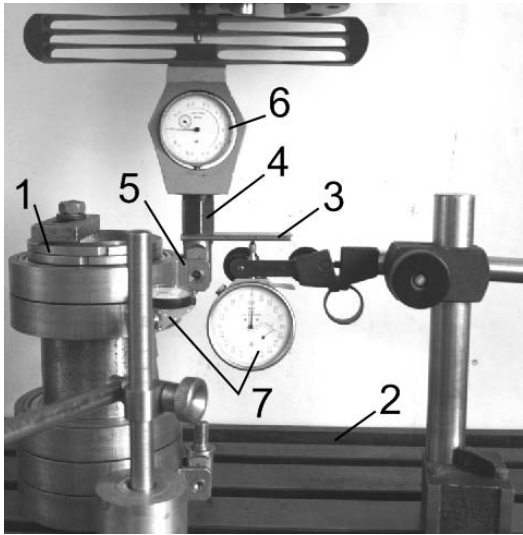


Рис. 8. Дослідний стенд для вимірювання переміщень у шарнірах РО

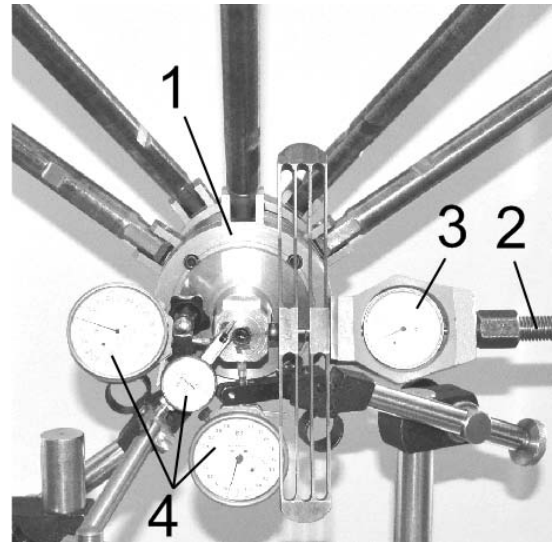
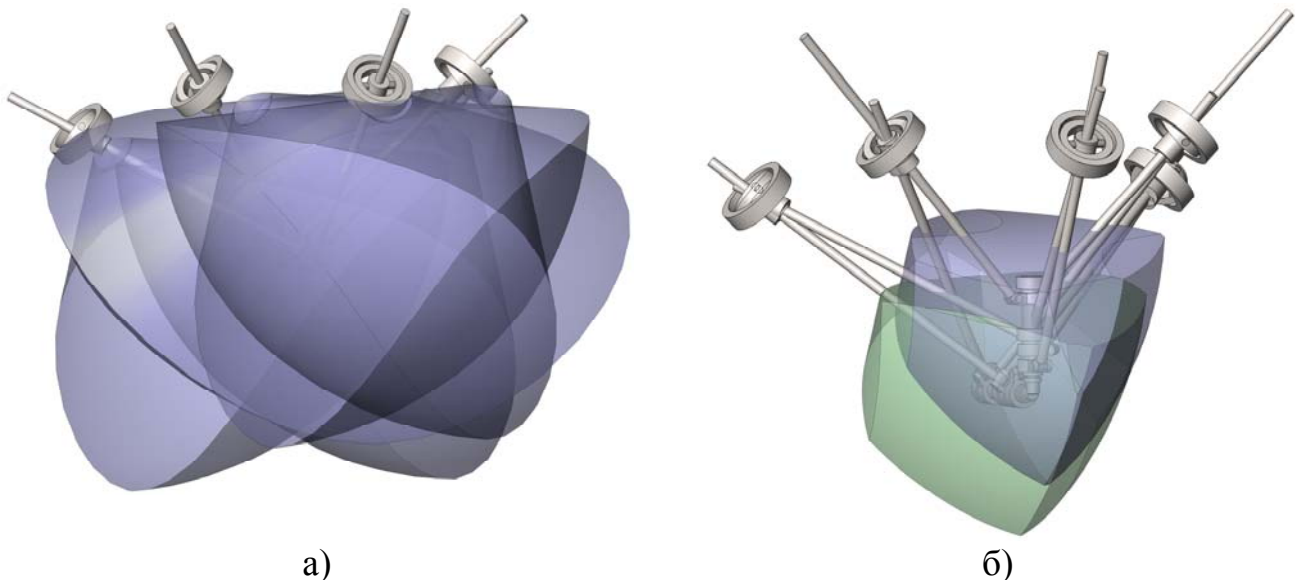


Рис. 9. Дослідний стенд для вимірювання переміщень РО при навантаженні вздовж осі X

У **третьому розділі** проведено теоретичне дослідження кінематичних залежностей, робочого простору та просторової жорсткості БВПС зі спеціальним РО.

На основі запропонованої геометричної методики отримання РП виконано його побудову для БВПС зі спеціальним РО за допомогою спроектованої спрощеної 3D моделі верстата (рис. 10).



а)

б)

Рис. 10. РП БВПС зі спеціальним РО:

а) всіх п'яти штанг; б) із вертикальною та горизонтальною орієнтацією РО

Побудовано тривимірні моделі РП БВПС зі спеціальним РО залежно від змін діапазону довжин штанг та визначено величину їх об'єму, а отримані результати зведено у табл. 1.

Графічне зображення РП і значення його об'єму залежно від довжини штанг

Максимальна довжина штанги, м	Мінімальна довжина штанги, м		
	0,10	0,35	0,60
1,5	 0,4154 мЗ	 0,3998 мЗ	 0,2267 мЗ
1,25	 0,2595 мЗ	 0,2440 мЗ	 0,1112 мЗ
1,0	 0,0875 мЗ	 0,0759 мЗ	 0,0067 мЗ

Визначено залежність зміни приведеної до зони обробки жорсткості у РП, шляхом зміни координат полюсу РО в межах від -0,20 м до 0,20 м по осях X, Y та Z (рис. 11 а, б, в) та побудовано просторові діаграми координатної приведеної поступальної жорсткості у напрямках координатних осей на рівні $z = 0,30$ м (рис. 11 г, д, е).

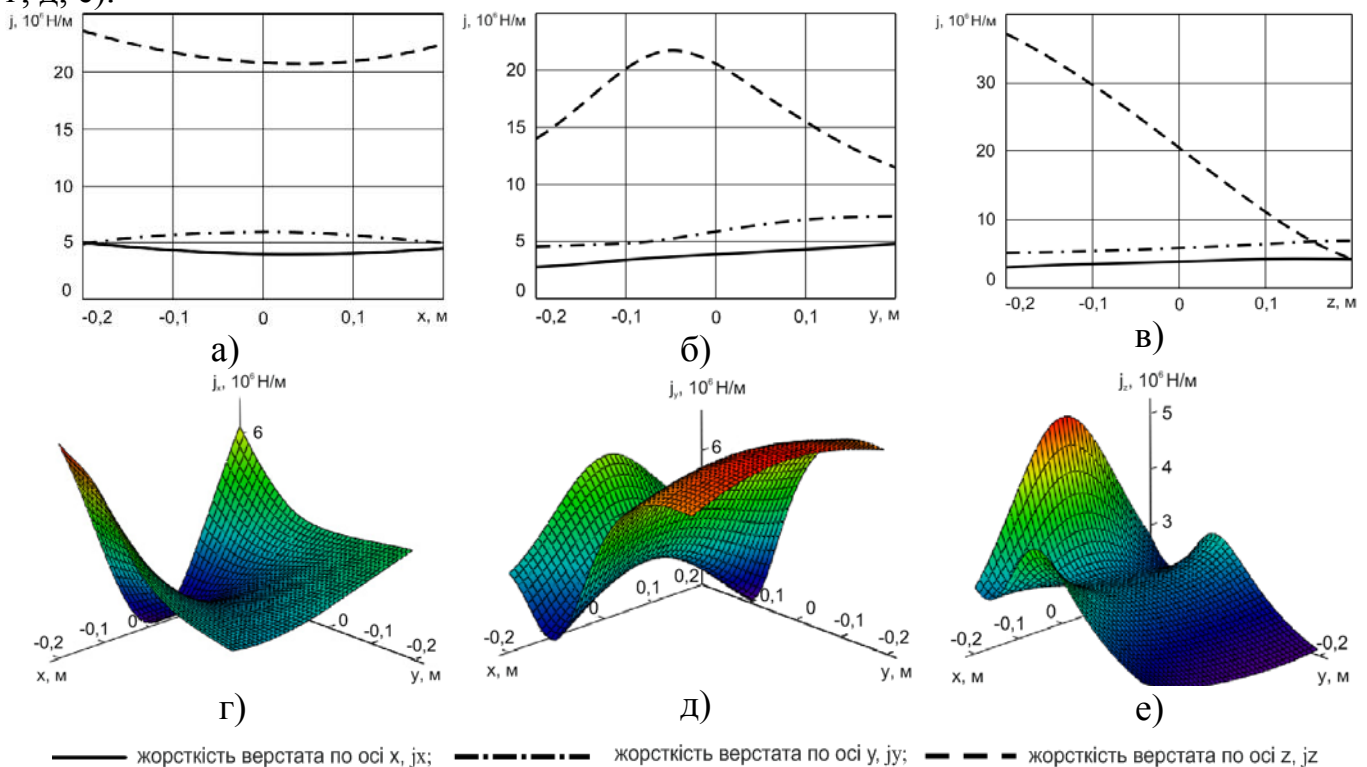


Рис.11. Приведена поступальна жорсткість верстата від положення РО в просторі

Встановлено, що найбільша приведена поступальна жорсткість у напрямку осі Z перевищує жорсткість штанги у 1,5 раза, а у напрямку осей X та Y спостерігається зменшення жорсткості у 1,3 раза, порівняно із жорсткістю штанги. Максимальна приведена поступальна жорсткість у напрямку осі X збільшується при віддаленні від площини YOZ , жорсткість у напрямку осі Y збільшується при віддаленні від площини XOZ , а у напрямку осі Z збільшується при віддаленні від площини XOZ та при від'ємних значеннях положення РО вздовж осі Y .

На основі розроблених математичних моделей жорсткості механізму БВПС визначено раціональну конструкцію спеціального РО, шляхом порівняння п'яти можливих варіантів з різним розташуванням шарнірів (різною кількістю шарнірів у групах) на РО, а саме 1-4 (рис. 12), 2-3, 3-2, 4-1 та 1-1-1-1-1 за критерієм приведеної поступальної жорсткості у напрямках координатних осей. Відповідно до отриманих залежностей (рис. 14) встановлено, що раціональною конструкцією РО є 3-2, яка забезпечує максимальні показники координатної жорсткості у РП.

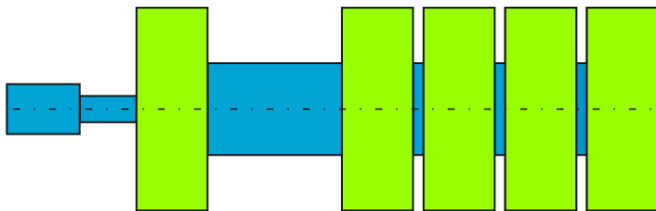


Рис. 12. Схема компоновки РО 1-4

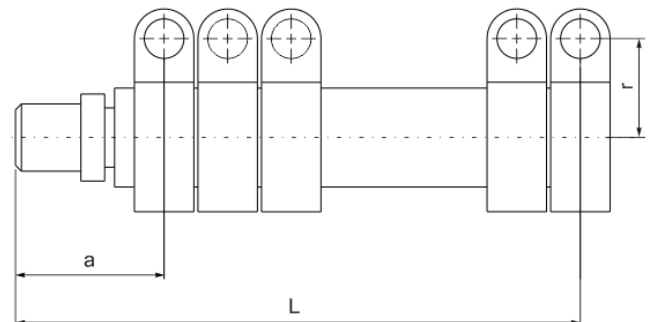
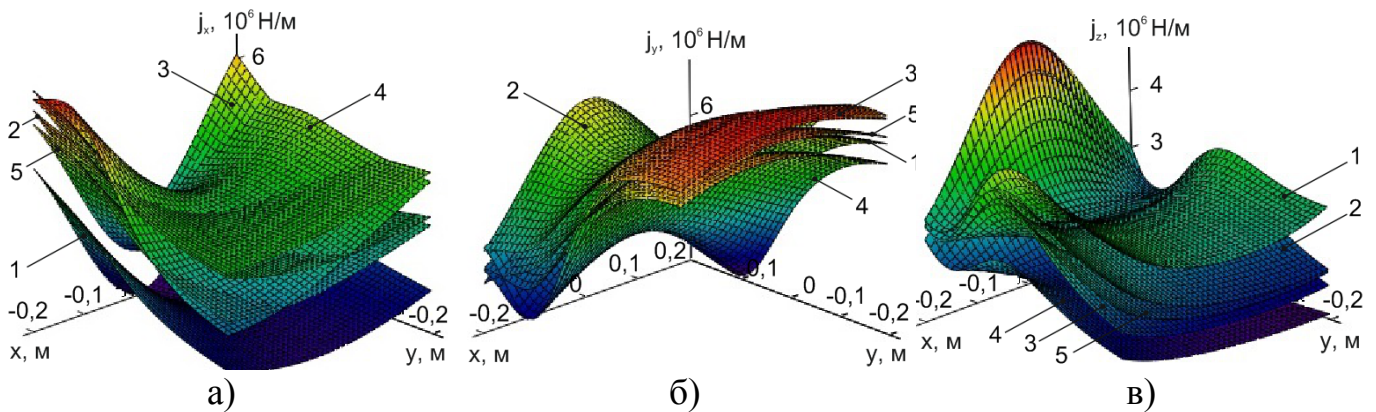


Рис. 13. Геометричні параметри РО



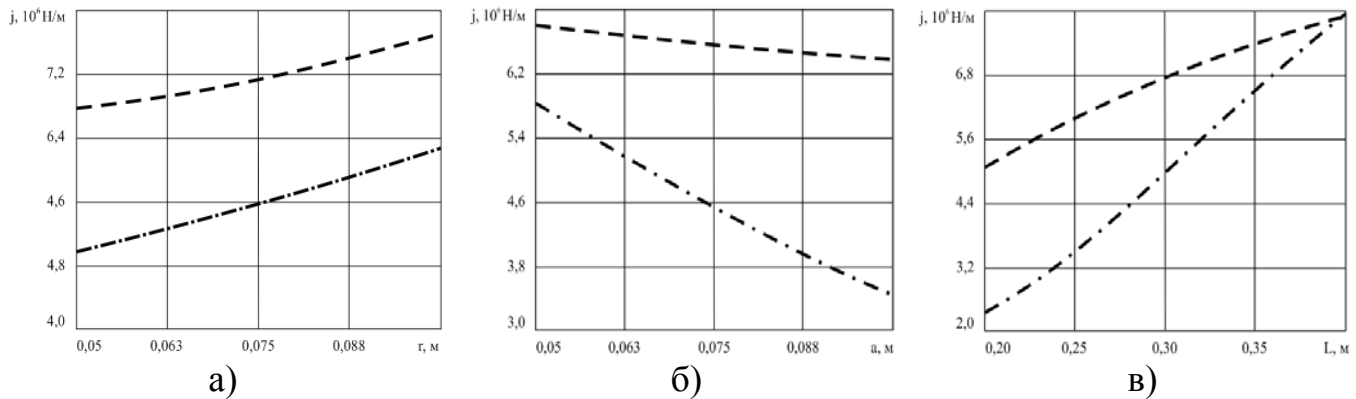
1 – компоновка 3-2, 2 – компоновка 1-1-1-1-1, 3 – компоновка 2-3, 4 – компоновка 1-4, 5 – компоновка 4-1

Рис. 14. Просторові діаграми приведеної поступальної жорсткості механізму верстата з вертикальною орієнтацією РО у напрямках координатних осей:

а) вздовж осі X , б) вздовж осі Y , в) вздовж осі Z

На основі розроблених математичних моделей жорсткості механізму верстата запропоновано рекомендації щодо вибору раціональних геометричних параметрів РО, до яких відносяться відстань a першого шарніра від переднього кінця РО, радіуса шарніра r та загальна довжина РО L (рис. 13), шляхом визначення їх впливу

на величину приведеної до зони обробки жорсткості БВПС зі спеціальним РО з вертикальною та горизонтальною орієнтацією РО (рис. 15).



— . . . — вертикальна орієнтація РО, — — — горизонтальна орієнтація РО
Рис. 15. Залежність приведеної жорсткості j від геометричних параметрів РО:
а) радіус шарніра, б) розміщення першого шарніра, в) загальна довжина РО

Встановлено, що для підвищення величини приведеної до зони обробки жорсткості необхідно збільшувати радіус шарніра РО, розташовувати перший шарнір на мінімальній відстані до інструмента, а також збільшувати загальну довжину РО.

Проведено аналіз впливу розташування першого шарніра основи БВПС зі спеціальним РО на показники приведеної до зони обробки жорсткості та величину РП із вписаним в ньому кубом заданого об'єму, що складає $0,25 \text{ м}^3$ (рис. 16).

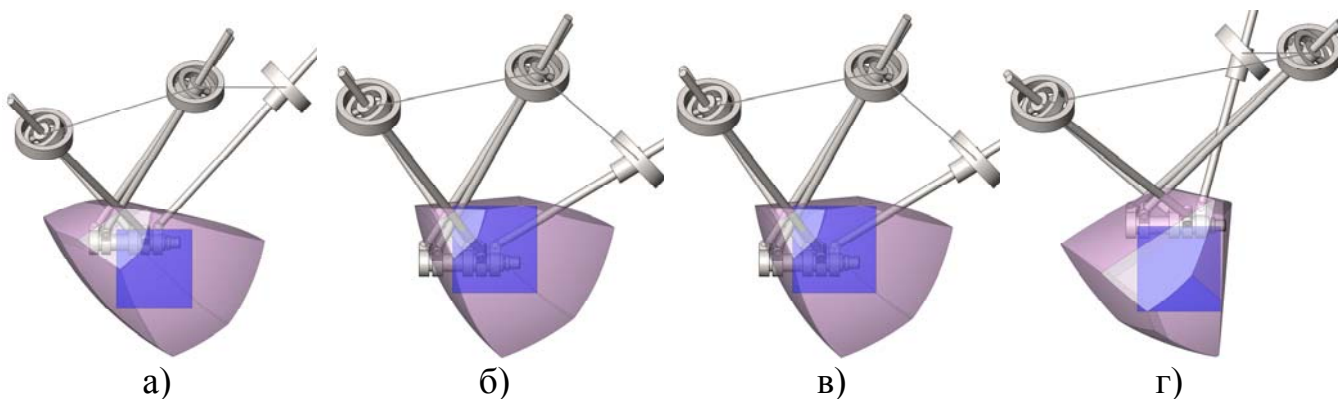


Рис. 16. РП для різних варіантів розташування першого шарніра основи БВПС зі спеціальним РО

На основі отриманих результатів середньої жорсткості (рис. 17) та об'єму РП (рис. 18) БВПС зі спеціальним РО доведено, що кращими є компоновки 1 та 3, що порівняно із 2 і 4, дозволить обробку більш габаритних деталей із більшою точністю.

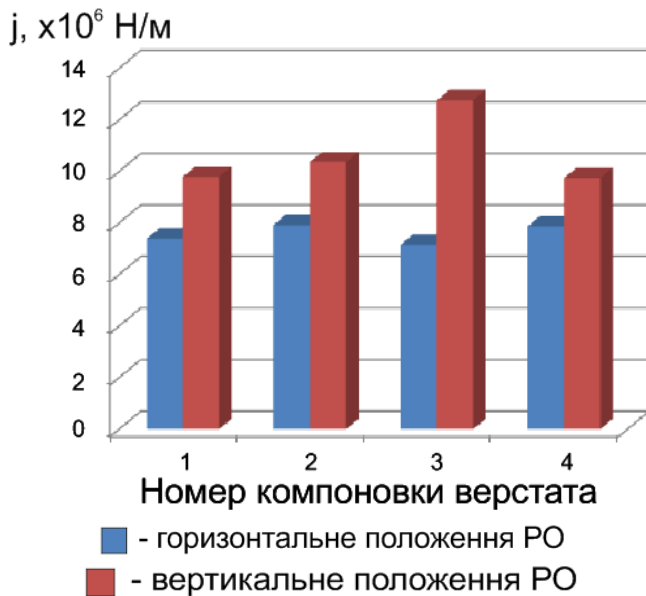


Рис. 17. Приведена середня жорсткість компоновки БВПС зі спеціальним РО

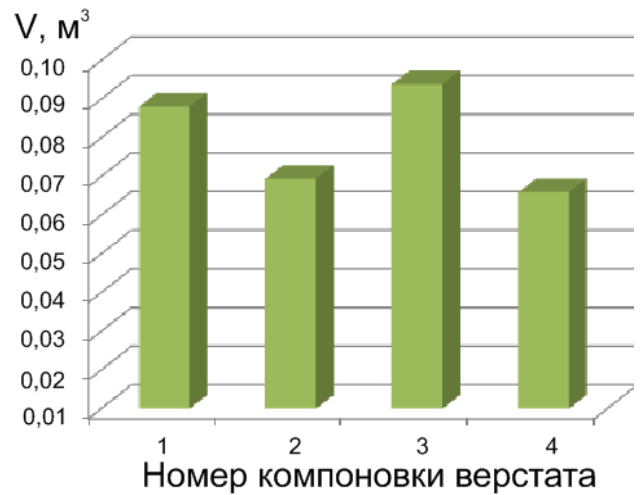


Рис. 18. Об'єм РП компоновки БВПС зі спеціальним РО

Проведено аналіз раціонального розташування інших шарнірів основи БВПС зі спеціальним РО. На основі формул (1) – (5) побудовано залежності впливу зміни координат розташування шарнірів основи на величину приведеної до зони обробки жорсткості верстата (рис. 19) та РП.

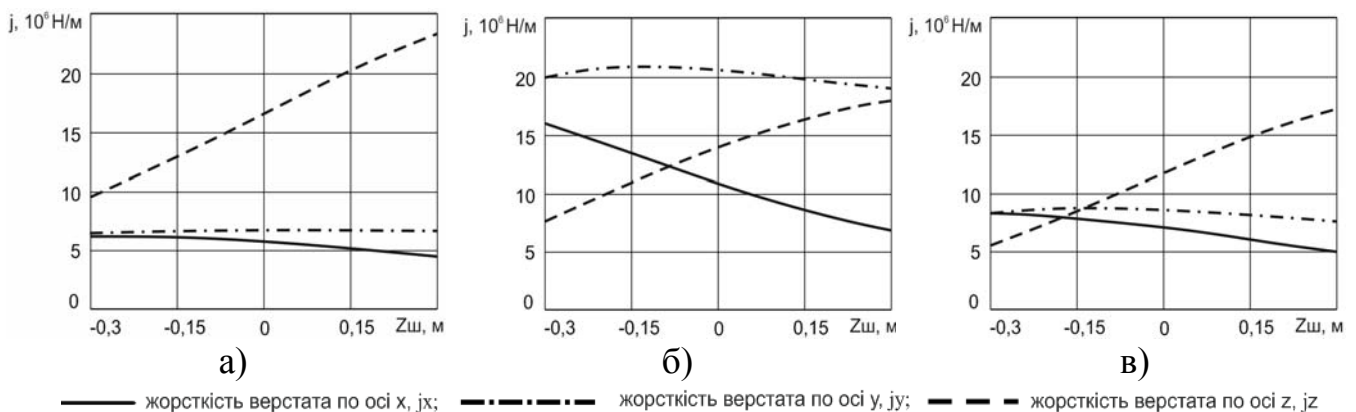


Рис. 19. Залежність приведеної жорсткості j від положення опор основи по осі z :
 а) з вертикальною орієнтацією РО, б) з горизонтальною орієнтацією РО,
 в) з нахилом РО під 45° відносно горизонту

Оскільки максимальна жорсткість при свердлінні з вертикальною орієнтацією РО буде спостерігатися при крайньому верхньому розміщенні опор, а з горизонтальною орієнтацією РО у крайньому нижньому положенні, запропоновано під час роботи верстата змінювати положення двох шарнірних опор основи вздовж координати Z . На рис. 20 представлена зміна форми та об'єму сукупного РП від розташування шарнірних опор основи відносно координати Z .

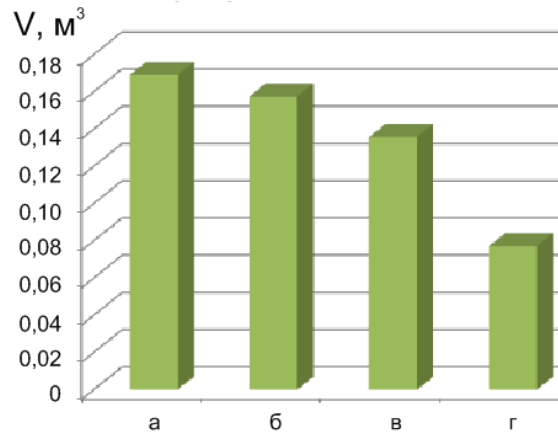
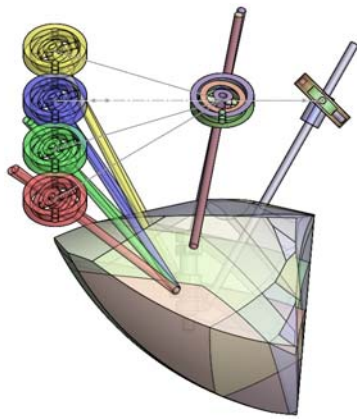


Рис. 20. РП при зміні положення шарнірних опор основи вздовж координати Z

У **четвертому розділі** представлено результати експериментальних досліджень визначення пружних деформацій шарнірних опор РО при радіальному та осьовому навантаженні (рис. 19, 20).

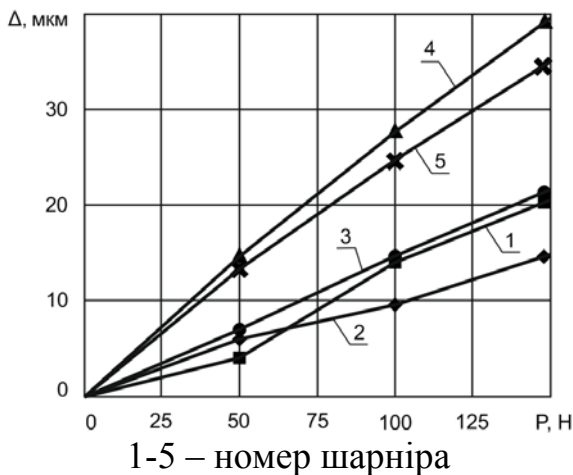


Рис. 19. Залежності осьового переміщення шарнірів РО від навантаження

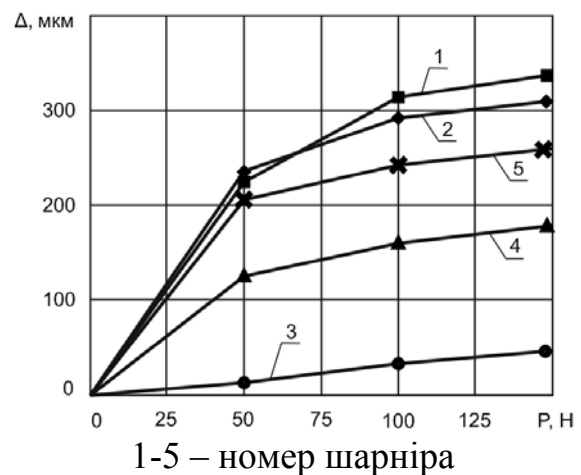


Рис. 20. Залежності радіального переміщення шарнірів РО від навантаження

Експериментально встановлено, що жорсткість шарнірів РО у напрямку осі шпинделя у 5 – 7 разів більша, ніж у радіальному напрямку.

Найбільша різниця між елементами головної діагоналі теоретично та експериментально визначеної матриць жорсткості БВПС зі спеціальним РО у заданому положенні РО становить 5,9%. Максимальна різниця результатів за власними значеннями матриць складає 11,5 %. Орієнтація еліпсоїдів жорсткості у просторі співпадає (рис. 21).

Для перевірки працездатності та кінематичних залежностей БВПС зі спеціальним РО спроектовано 3D модель деталі в середовищі SolidWorks, програму обробки якої згенеровано за допомогою САМ-системи

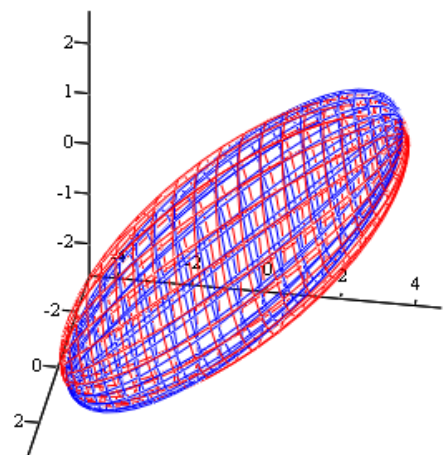


Рис. 21. Порівняння еліпсоїдів жорсткості

HSMWorks з використанням постпроцесора для LinuxCNC. Заготовка оброблялася двозубою кінцевою фрезою діаметром 3 мм, режими різання: частота обертання шпинделя 10000 хв-1, подача 1000 мм/хв, глибина різання 1...3 мм (рис. 22). Обробку деталі виконано успішно відповідно до заданої траєкторії, контур оброблених карманів має чисту поверхню, розміри відповідають заданим.

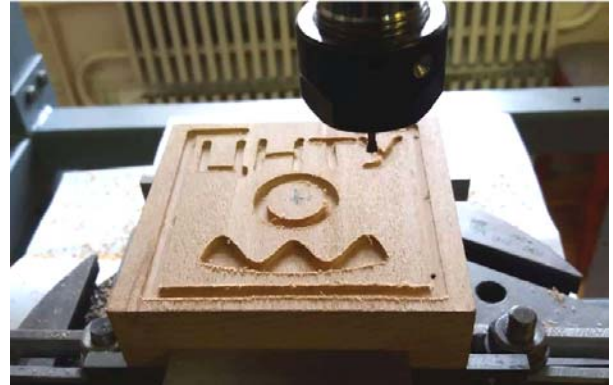


Рис. 22. Обробка деталі на БВПС зі спеціальним РО

У **п'ятому розділі** представлено основні особливості проектування БВПС зі спеціальним РО при визначенні раціональної компоновки та її параметрів залежно від заданих технічних характеристик.

На основі проведених досліджень сформульовані основні особливості проектування БВПС зі спеціальним РО. Запропоновано нову конструкцію БВПС зі спеціальним РО та їх елементів, які захищені патентами України. Запропоновано методи розширення можливостей обробки на існуючій конструкції БВПС зі спеціальним РО.

Запропоновано та науково обгрунтовано метод підвищення приведеної просторової жорсткості та розширення РП БВПС зі спеціальним РО шляхом цілеспрямованої зміни геометричних параметрів верстата за рахунок переміщення

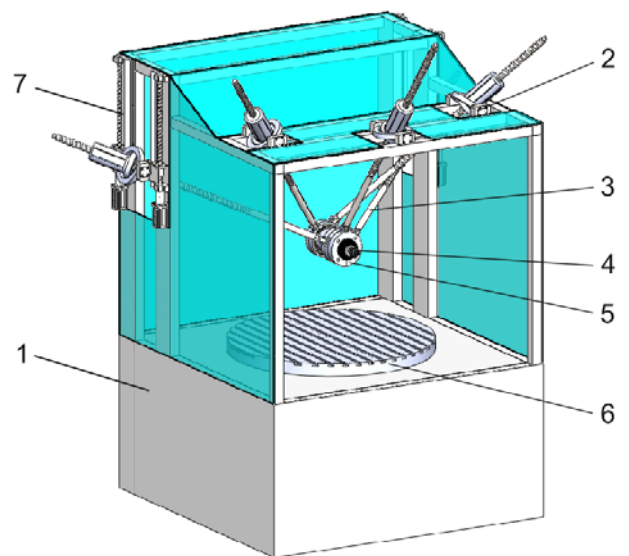


Рис. 23. Конструкція БВПС зі спеціальним РО

окремих шарнірних опор основи. Верстат (рис. 23) складається з основи 1, на якій розташовані напрямні 7 із шарнірами основи 2, а інші шарніри розташовані безпосередньо на основі 1. Шарніри основи 2 з'єднані зі штангами змінної довжини 3, а іншим кінцем кожна штанга 3 прикріплена до РО 4 через шарніри 5 таким чином, що вісь кожної штанги 3 проходить через вісь РО 4. Оброблювана деталь встановлюється на стіл 6.

Особливістю конструкції верстата є переміщення двох шарнірів основи 2 по напрямних 7 вздовж осі Z, що дає змогу обрати їх раціональне розташування залежно від типу обробки. Встановлено, що запропонована конструкція дозволяє підвищити приведену до зони обробки жорсткість на 25...50% та збільшити РП на 9 – 18% залежно від виду обробки та орієнтації РО (рис. 24).

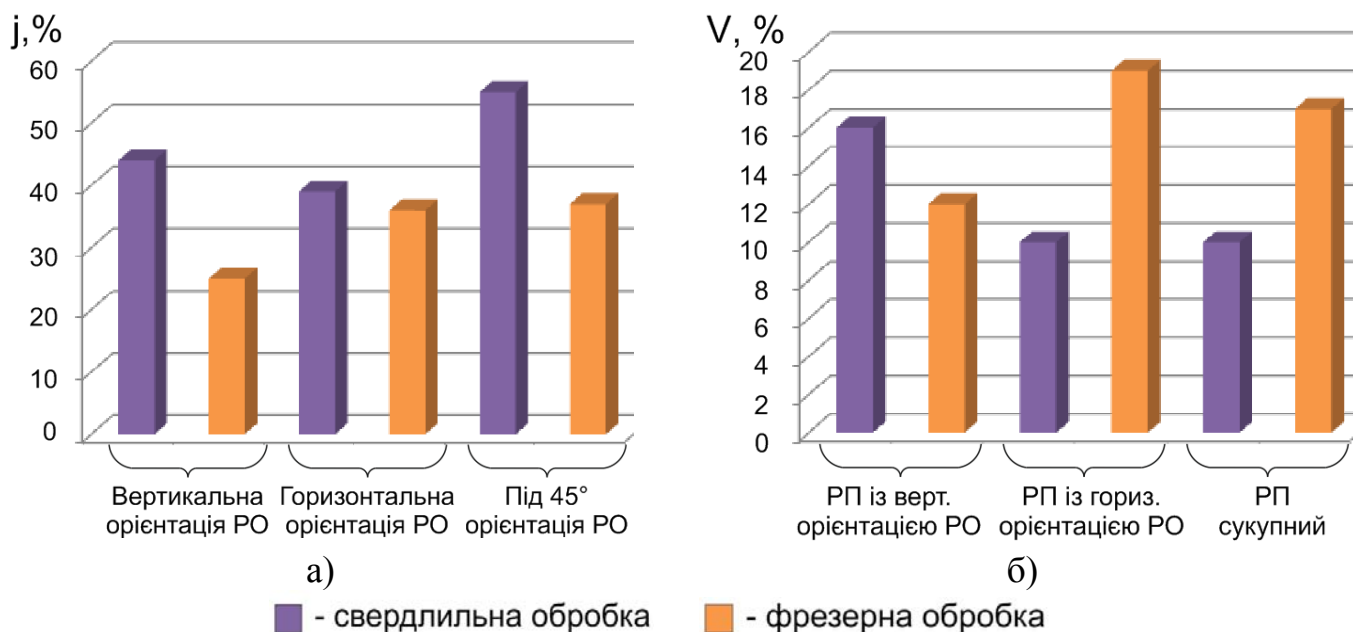


Рис. 24. Збільшення приведенної жорсткості (а) та РП (б) запропонованої конструкції БВПС зі спеціальним РО

Очікуваний економічний ефект від експлуатації запропонованого БВПС зі спеціальним РО складає 32500 грн. на 15000 шт. деталей.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну задачу підвищення вихідних характеристик БВПС зі спеціальним РО, шарніри якого мають спільну вісь, завдяки обґрунтуванню раціональної компоновки і геометричних параметрів верстата, а також шляхом цілеспрямованої зміни геометричних параметрів залежно від орієнтації РО та виду обробки.

Результати досліджень, представлені у роботі, дозволяють зробити такі загальні висновки:

1. Розроблено узагальнену компонувальну схему і математичні моделі БВПС зі спеціальним РО, які характеризують розміщення опорних шарнірів у просторі, та удосконалено аналітичний метод визначення зворотної задачі кінематики БВПС зі

спеціальним РО, що порівняно з існуючим методом дає змогу скоротити час на обчислення та мінімізувати похибки розрахунку. Встановлено характер зміни довжин штанг залежно від переміщення РО вздовж осей, а також кутів нахилу РО. За результатами розрахунків та проведеного моделювання з використанням програмного комплексу SolidWorks Motion доведено і продемонстровано можливість при обраних конструктивних параметрах отримання діаграм зміни довжин штанг для відпрацювання робочим органом верстата заданої функціональної траєкторії.

2. На основі викладеної методики графічної побудови РП БВПС зі спеціальним РО у середовищі SolidWorks було отримано тривимірну модель РП із вертикальною та горизонтальною орієнтацією РО та встановлено відмінності у формі, розміщенні та об'ємі отриманого простору. На основі отриманого сукупного орієнтаційного РП БВПС зі спеціальним РО встановлено залежність його об'єму від змін діапазону довжин штанг. Зокрема, для досягнення об'єму РП верстата $0,2 \text{ м}^3$ мінімальні та максимальні довжини штанг складають 0,35 м та 1,18 м або 0,6 та 1,42 м, що безпосередньо визначає габаритні розміри верстата.

3. За допомогою розробленої методики розрахунку загальної приведеної до зони обробки жорсткості БВПС зі спеціальним РО встановлено, що жорсткість у напрямку осі X при вертикальному розміщенні РО та під кутом 45° в середньому перевищує жорсткість штанги змінної довжини у 2,5 раза, а при горизонтальному положенні – у 1,7 раза. Жорсткість у напрямку осі Y при вертикальному положенні РО приблизно дорівнює жорсткості штанги, а під кутом 45° та горизонтальному положенні перевищує її у 1,5 раза. Жорсткість у напрямку осі Z при вертикальному положенні РО перевищує жорсткість штанги у 1,5 раза, а при під кутом 45° та горизонтальному положенні – у 2,5 раза. Для всіх положень РО максимальна поступальна жорсткість у напрямку осі X збільшується при віддаленні від площини YOZ, жорсткість у напрямку осі Y збільшується при віддаленні від площини XOZ, а у напрямку осі Z спостерігається у центрі РП. Отримані результати дають змогу обрати зону обробки деталі із заданими показниками жорсткості механізму БВПС зі спеціальним РО і забезпечити необхідну точність обробки.

4. Встановлено, що за запропонованим критерієм жорсткості БВПС раціональним варіантом компоновки РО є розміщення його шарнірних опор вздовж осі групами 3-2 від переднього кінця шпинделя. Величина приведеної до зони обробки жорсткості зростає із збільшенням загальної довжини РО, збільшенням радіуса шарнірів РО та наближенні першого шарніра до переднього кінця шпинделя, причому при вертикальній орієнтації РО цей вплив сильніший, ніж при горизонтальній.

5. Експериментальними дослідженнями розробленої та виготовленої конструкції РО встановлено, що жорсткість його шарнірів у напрямку осі шпинделя у 5 – 7 разів більша, ніж у радіальному напрямку. Експериментальні вимірювання переміщень РО на спроектованому та виготовленому БВПС з горизонтальною та вертикальною орієнтацією РО при навантаженні по осях X, Y та Z при зміні положення РО в просторі показали, що максимальні переміщення по осях співпадають із напрямком дії навантаження. При навантаженні РО з горизонтальною орієнтацією вздовж осі X максимальне переміщення Δx складає 55 мкм, а при вертикальній орієнтації у 1,4

раза більше. При навантаженні РО з горизонтальною та вертикальною орієнтацією вздовж осі Y максимальні переміщення Δu суттєво не відрізняються. При навантаженні РО з горизонтальною орієнтацією вздовж осі Z максимальне переміщення Δz складає 109 мкм, а при вертикальній орієнтації у 5 разів менше. Розроблена методика і отримані результати розрахунків з використанням побудованих еліпсоїдів жорсткості дають змогу визначити можливі просторові орієнтації деталі та інструмента з мінімальними пружними переміщеннями.

6. Порівняння теоретично та експериментально визначених матриць жорсткості при горизонтальній та вертикальній орієнтації РО для різних положень у просторі виконано за елементами головної діагоналі матриць жорсткості та власними значеннями. Максимальна різниця результатів теоретичних та 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 для всіх положень РО у просторі співпадає.

7. 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 на нерухомій основі. Встановлено, що запропонований метод та конструкція БВПС дозволяє підвищити приведену до зони обробки жорсткість на 39 – 55% для свердильної обробки, на 25 – 37 % для фрезерної обробки (залежно від орієнтації РО) та збільшити об'єм РП верстата на 9 – 18%, що дає змогу зменшити пружні деформації під час обробки та розширити номенклатуру оброблюваних деталей.

8. Сформульовані основні особливості проектування БВПС зі спеціальним РО та розроблено методи розширення можливостей обробки на існуючій конструкції БВПС зі спеціальним РО. Запропоновано нову конструкцію БВПС зі спеціальним РО та їх елементів, які захищені патентами України. Результати досліджень передано для впровадження на НВФ «КІТ-КОНСАЛТИНГ», м. Кропивницький.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Пономаренко О. В. Робочий простір п'ятикоординатного верстата з паралельною структурою. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин (Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник)*. Кіровоград, 2011. Вип. 41, ч. II. С. 232–236.
2. Кириченко А. М., Шелепко О. В., Черновол М. І. Просторова жорсткість верстата з механізмом паралельної структури «пентапод». *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин (Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник)*. Кіровоград, 2012. Вип. 42, ч. II. С. 187–190.

3. Кириченко А. М., Шелепко О. В., Сапон С. П. Кінематика п'ятикоординатного верстата з паралельною структурою. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. Чернігів, 2013. № 3 (67). С. 100–104. (стаття включена до міжнародної наукометричної бази даних eLIBRARY.RU).
4. Кириченко А. М., Шелепко О. В. Вибір компоновки багатокоординатного верстата паралельної структури з ланками змінної довжини. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету (Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація)*. Кіровоград, 2015. № 28. С. 3–8.
5. Кириченко А. М., Шелепко О. В. Експериментальне дослідження жорсткості шарнірів робочого органа багатокоординатного верстата паралельної структури «пентапод». *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон, 2015. № 4 (55). С. 31–35. (стаття включена до наукометричної бази РІНЦ).
6. Шелепко О. В., Кириченко А. М., Гречка А. І. Експериментальне визначення жорсткості багатокоординатного верстата паралельної структури «пентапод». *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету (Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація)*. Кропивницький, 2018. № 31. С. 104–110.
7. Шелепко О. В., Кириченко А. М. Вибір раціональної конструкції робочого органа верстата-пентапода за критерієм приведеної жорсткості. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2018. Вип. 5 (112). С. 81–86. (стаття включена у міжнародну наукометричну базу даних eLIBRARY.RU, «Ulrich's Web Global Serials Directory», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», eLIBRARY.RU, «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services»).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Шелепко О. В., Кириченко А. М. Розвиток багатокоординатних верстатів паралельної структури. *Проблеми та перспективи розвитку науки: матеріали XIV міжнар. наук.-прак. конф., м. Київ, 25-26 жовт. 2014 р. Київ, 2014. Т. 1. С. 19–21.*
9. Шелепко О. В., Кириченко А. М. Експериментальне дослідження багатокоординатного верстата паралельної структури «пентапод». *Сучасні технології промислового комплексу: матеріали всеукр. наук.-практ. конф., м. Херсон, 15-18 верес. 2015 р. Херсон, 2015. Вип. 2. С. 160–161.*
10. Шелепко О. В., Кириченко А. М. Моделювання руху багатокоординатного верстата паралельної структури «Пентапод». *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VI міжнар. наук.-прак. конф., м. Чернігів, 26-29 квіт. 2016 р. Чернігів, 2016. С. 124–125.*
11. Шелепко О. В., Кириченко А. М., Гречка А. І. Визначення конструктивних параметрів багатокоординатного верстата паралельної структури «Пентапод». *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали*

- VII міжнар. наук.-прак. конф., м. Чернігів, 24-27 квіт. 2017 р. Чернігів, 2017. Т. 1. С. 106–107.
12. Шелепко О. В., Кириченко А. М., Гречка А. І. Експериментальне визначення пружних деформацій багатокоординатного верстата паралельної структури «пентапод». *Сучасні технології промислового комплексу*: матеріали III міжнар. наук.-прак. конф., м. Херсон, 12-17 верес. 2017 р. Херсон, 2017. Вип. 3. С. 236 – 237.
 13. Kyrychenko A., Shelepko O., Alibraheemi M. Pentapod kinematics module for LinuxCNC. *Автоматика та комп'ютерно-інтегровані технології у промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та транспорті*: матеріали всеукр. наук.-практ. Інтерн.-конф., м. Кропивницький, 16-17 листоп. 2017 р. Кропивницький, 2017. С. 15–17.
 14. Шелепко О. В., Кириченко А. М. Приведена жорсткість верстата-пентапода. *Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018*: матеріали IV міжнар. наук.-прак. конф., м. Херсон, 12-16 верес. 2018 р. Херсон, 2018. Вип. 4. С. 97–98.

*Опубліковані праці, які додатково відображають
наукові результати дисертації:*

15. Верстат: пат. 67445 Україна: МПК В23Q 7/00. № u201107981; заявл. 24.06.2011; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 4. 2 с.
16. Штанга змінної довжини: пат. 70002 Україна: МПК В23Q 3/00, В23В 31/00. № u201112836; заявл. 01.11.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10. 2 с.
17. Робочий орган п'ятикоординатного верстата: пат. 84552 Україна: МПК F16C 11/08. № u201304945; заявл. 17.04.2013; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20. 2 с.

АНОТАЦІЯ

Шелепко О. В. Підвищення вихідних характеристик багатокоординатних верстатів паралельної структури зі спеціальним робочим органом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-технічного завдання підвищення вихідних характеристик багатокоординатних верстатів паралельної структури (БВПС) зі спеціальним робочим органом (РО), шарніри якого мають спільну вісь, завдяки обґрунтуванню раціональної компоновки і геометричних параметрів верстата, а також шляхом цілеспрямованої зміни геометричних параметрів залежно від орієнтації РО та виду обробки.

Для БВПС зі спеціальним РО було вдосконалено однозначний аналітичний метод визначення зворотної кінематики, розроблено узагальнену компонувальну схему та математичні моделі, які характеризують розміщення опорних шарнірів у просторі. Визначено робочий простір (РП) та приведену до зони обробки

просторову жорсткість залежно від орієнтації РО, компоновки та геометричних параметрів БВПС зі спеціальним РО.

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 БВПС зі спеціальним РО.

Виконано експериментальне вимірювання жорсткості РО та приведеної просторової жорсткості, для чого розроблено та виготовлено діючий зразок БВПС зі спеціальним РО та розроблено відповідне оснащення.

На основі проведених досліджень сформульовано основні особливості проектування БВПС зі спеціальним РО та рекомендації з розширення їх технологічних можливостей, а також розроблено нові конструкції БВПС зі спеціальним РО та їх вузлів.

Ключові слова: верстат паралельної структури, спеціальний робочий орган, робочий простір, штанга змінної довжини, жорсткість.

АННОТАЦИЯ

Шелепо О. В. Повышение выходных характеристик многокоординатных станков параллельной структуры со специальным рабочим органом. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты». – Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий, 2019.

Диссертация посвящена решению актуального научно-технического задания, а именно повышению выходных характеристик многокоординатных станков параллельной структуры (МСПС) со специальным рабочим органом (РО), шарниры которого имеют общую ось, благодаря обоснованию рациональной компоновки и геометрических параметров станка, а также путем целенаправленного изменения геометрических параметров в зависимости от ориентации РО и вида обработки.

Для МСПС со специальным РО было усовершенствовано однозначный аналитический метод определения обратной кинематики, разработана обобщенная компоновочная схема и математические модели, которые характеризуют размещения шарниров основы в пространстве. Определено рабочее пространство (РП) и приведенную к зоне обработки пространственную жесткость в зависимости от ориентации РО, компоновки и геометрических параметров МСПС со специальным РО.

Обоснован метод повышения приведенной пространственной жесткости и расширение РП МСПС со специальным РО путем целенаправленного изменения геометрических параметров станка за счет изменения конфигурации расположения отдельных шарниров неподвижной основы МСПС со специальным РО.

Выполнено экспериментальное измерение жесткости РО и приведенной пространственной жесткости, для чего разработано и изготовлено действующий образец МСПС со специальным РО и разработано соответствующее оснащение.

На основе проведенных исследований сформулированы основные особенности проектирования МСПС со специальным РО и рекомендации по расширению их технологических возможностей, а также разработаны новые конструкции МСПС со специальным РО и их узлов.

Ключевые слова: станки параллельной структуры, специальный рабочий орган, рабочее пространство, штанга переменной длины, жесткость.

ABSTRACT

Shelepko O. V. Improvement of output characteristics of multiaxis parallel kinematic machines with special effector. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.03.01 "Processes of Machining, Machines and Tools". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem, namely, to increase the output characteristics of multiaxis parallel kinematic machine with a special effector whose hinges have a common axis, by substantiating rational layout and geometric parameters, as well as management of output characteristics by purposeful displacement of base joints depending on the orientation of the working body and the type of machining.

For multiaxis parallel kinematic machine with special effector and variable length links an unambiguous analytical method for determining reverse kinematics has been improved, a generalized composite scheme and mathematical models that characterize the placement of joints in space have been developed. Workspace is defined and the spatial stiffness is reduced to the zone of processing, depending on the orientation of the working body, the layout, and geometric parameters of the machine. The workspace areas with the highest stiffness parameters are determined, and hence with the minimum machining errors.

The method of increasing the reduced spatial stiffness and extending the workspace of multi-coordinate parallel kinematic machine with a special effector is proposed by purposeful displacement of base joints.

Experimental measurements of stiffness of end effector joints and the reduced spatial stiffness of the developed and manufactured operating model of multiaxis parallel kinematic machine with special effector have been made and the appropriate equipment has been developed.

A comparison of theoretically and experimentally determined matrices of stiffness takes place along the elements of the main diagonal of the matrices and of their own values, as well as the ellipsoids of stiffness.

For checking the efficiency and kinematic dependencies of the multiaxis machine of a parallel structure with special effector, the machining of custom part was performed,= with the CNC program generated using HSMWorks with LinuxCNC postprocessor.

On the basis of the research, the method for design of multiaxis parallel kinematic machine with special effector along with recommendations for the expansion of their

technological capabilities has been formulated. New designs of multiaxis parallel kinematic machines with a special effector have been developed.

Key words: parallel kinematic machine, special effector, workspace, variable length link, spatial stiffness.

Підписано до друку 26.04.2019 р. Формат 60х90¹/₁₆.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9
Наклад 100 прим. Замовлення № 488.
Віддруковано на ризографі в видавничому центрі «Принт-центр»
04053, м.Київ, вул. Січових Стрільців, 26А
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16
<http://www.printc.kiev.ua>; E-mail: printcentr@ukr.net