

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Конструювання шпindelного вузла високошвидкісного
обробного центра з паралельною кінематикою**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МВ-41
спеціальності _____

133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва спеціальності)

Качор Р.І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Буховець В.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Кобельник В.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Крупа В.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра Конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Крупа В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Качору Ростиславу Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Конструювання шпindelного вузла високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою

Керівник роботи Буховець Валерій Миколайович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «21» 01 2026 року № 4/9-45

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22.06.2026р.

3. Вихідні дані до роботи Креслення деталі «Кронштейн»; конструкторська документація по горизонтальному обробному центру; матеріали по конструкціях моторизованих шпindelів фрезерних та багатоцільових верстатів з ЧПК

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ
2. Технологічний розділ
3. Конструкторський розділ
4. Безпека життєдіяльності, охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Схеми формування поверхонь на високошвидкісному обробному центрі (1 лист формату А1)
2. Компоновки високошвидкісних обробних центрів з паралельною кінематикою (1 лист формату А1)
3. Кінематична схема високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою (1 лист формату А1)
4. Шпindelний вузол високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою (2 листи формату А1)

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|-------------------------|---|-------------------|---------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Безпека життєдіяльності | | | |
| охорона праці | к.т.н., доцент Окіпний І.Б. | | |
| | | | |
| Нормоконтроль | к.т.н., доцент Кобельник В.Р. | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 25.01.2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1. | Особливості технологічної системи для високошвидкісної обробки | Тиждень 1 | |
| 2. | Аналіз конструкції обробних центрів з механізмами паралельної кінематики | Тиждень 1 | |
| 3. | Аналіз конструкції моторшпинделів для високошвидкісних обробних центрів з паралельною кінематичною структурою | Тиждень 1 | |
| 4. | Вибір технологічних баз. Розробка технологічного маршруту механічного оброблення деталі | Тиждень 2 | |
| 5. | Розроблення комплексної технологічної операції на високошвидкісному обробному центрі з ЧПК | Тиждень 2 | |
| 6. | Структура проектного моторизованого шпинделя головного руху | Тиждень 3 | |
| 7. | Вибір параметрів і технічних характеристик привідного двигуна | Тиждень 3 | |
| 8. | Розробка конструкції та розрахунок шпиндельного вузла мотор-шпинделя | Тиждень 4 | |
| 9. | Безпека життєдіяльності, охорона праці | Тиждень 5 | |
| 10. | Оформлення кваліфікаційної роботи | Тиждень 5 | |
| 11. | Захист кваліфікаційної роботи | Тиждень 6 | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент

_____ (підпис)

Качор Р.І.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Буховець В.М.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Качор Р.І. Конструювання шпиндельного вузла високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою. 133 – Галузеве машинобудування; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; м. Тернопіль, 2026 р.

В кваліфікаційній роботі приведено аналіз високошвидкісної обробки та високошвидкісних обробних центрів з паралельною кінематикою, приведено структуру та принципи роботи моторизованих шпинделів, їх класифікацію та аналіз ключових технологій, що в них використовуються. Розроблений технологічний маршрут механічного оброблення деталі, спроектовано операційну технологію, вибрано різальний і вимірювальний інструмент та вибрано режими різання. Проведено конструювання моторизованого шпинделя високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою для забезпечення високої продуктивності та точності високошвидкісної обробки деталей з поверхнями складної конфігурації. Вирішені питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: високошвидкісна обробка, високошвидкісний обробний центр, моторизований шпиндель, операційна технологія, різальний інструмент, жорсткість.

Kachor R.I. Design of the spindle unit of a high-speed machining center with parallel kinematics. 133 – Industrial machinery engineering; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2026.

The qualification work provides an analysis of high-speed machining and high-speed machining centers with parallel kinematics, the structure and principles of operation of motorspindles, their classification and analysis of key technologies used in

| | | | | | | | | |
|-----------|----------------|----------|-------|------|--------------------------------|---|-------|---------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | | | |
| Розробив | Качор Р.І. | | | | Анотація | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Перевірів | Буховець В.М. | | | | | Н | 3 | 2 |
| Н. контр. | Кобельник В.Р. | | | | | ТНТУ ім. І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль | | |
| Затв. | Крупа В.В. | | | | | | | |

them are given. The technological route of mechanical machining of the part is developed, the operating technology is designed, the cutting and measuring tool is selected and the cutting modes are selected. The design of a motorized spindle of a high-speed machining center with parallel kinematics is carried out to ensure high productivity and accuracy of high-speed machining of parts with surfaces of complex configuration. The issues of labor protection and life safety are resolved.

Keywords: high-speed machining, high-speed machining center, motorspindle, operating technology, cutting tool, stiffness.

| | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|--------------------------------|------|
| | | | | | <i>КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ</i> | Арк. |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підп.</i> | <i>Дата</i> | | 4 |

ЗМІСТ

| | | |
|--------|---|----|
| | ВСТУП | 7 |
| 1. | АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ | 8 |
| 1.1. | Характеристика висошвидкісної обробки різанням | 8 |
| 1.2. | Особливості технологічної системи для високошвидкісної обробки | 9 |
| 1.3. | Обробні центри з механізмами паралельної кінематики для реалізації високошвидкісної обробки | 11 |
| 1.4. | Призначення та конструкція високошвидкісного обробного центру з гібридною кінематичною структурою | 15 |
| 1.5. | Аналіз конструкції моторшпинделів для високошвидкісних обробних центрів з паралельною кінематичною структурою | 20 |
| 1.5.1. | Структура та принципи роботи моторизованого шпинделя | 20 |
| 1.5.2. | Класифікація моторизованих шпинделів та їх основні параметри | 22 |
| 1.5.3. | Загальні ключові технології для моторизованого шпинделя | 23 |
| 1.6. | Вибір напрямку розробки та завдання на кваліфікаційну роботу бакалавра | 26 |
| 2. | ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ | 29 |
| 2.1. | Характеристика об'єкту виробництва | 29 |
| 2.2. | Вибір технологічних баз | 32 |
| 2.3. | Розробка технологічного маршруту механічного оброблення деталі | 35 |
| 2.4. | Вибір металообробного обладнання | 35 |
| 2.5. | Розроблення комплексної технологічної операції на високошвидкісному обробному центрі з ЧПК | 36 |
| 2.5.1. | Вибір різального інструменту та вимірювального інструменту | 36 |
| 2.5.2. | Вибір режимів різання | 39 |

| | | | | | | | | | | |
|-----------|----------------|----------|-------|------|--------------------------------|--|--|--|-------|---------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | Зміст | | | | | |
| Розробив | Качор Р.І | | | | | | | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Перевірів | Буховець В.М. | | | | | | | Н | 5 | 2 |
| Н. контр. | Кобельник В.Р. | | | | | | | ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль | | |
| Затв. | Крупа В.В. | | | | | | | | | |

| | | |
|--------|---|----|
| 3. | КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ | 41 |
| 3.1. | Структура проєктованого моторизованого шпинделя головного руху | 41 |
| 3.2. | Вибір параметрів і технічних характеристик привідного двигуна | 42 |
| 3.3. | Графіки зміни потужності та обертового моменту на шпинделі | 43 |
| 3.4. | Розробка конструкції та розрахунок шпиндельного вузла мотор-шпинделя | 46 |
| 3.4.1. | Вибір компоновальної схеми шпиндельного вузла та типу опор | 46 |
| 3.4.2. | Розрахунок осьової та радіальної жорсткості опор шпиндельного вузла | 49 |
| 3.4.3. | Розрахунок радіальної жорсткості шпиндельного вузла | 53 |
| 3.4.4. | Розрахунок довговічності радіально-упорних підшипників комплексних опор шпиндельного вузла | 57 |
| 4. | БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ | 62 |
| 4.1. | Джерела небезпеки при високошвидкісній обробці різанням, пов'язані з високою швидкістю обертання різального інструменту | 62 |
| 4.2. | Джерела небезпеки при високошвидкісній обробці різанням, пов'язані з продуктами, що виділяються під час різання | 63 |
| 4.3. | Технічні засоби забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу при високошвидкій обробці | 64 |
| | ВИСНОВКИ | 68 |
| | ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ | 70 |
| | ДОДАТКИ | 74 |

ВСТУП

Технологія високошвидкісної обробки може вирішити багато труднощів при виготовленні деталей, таких як отримання особливої точності обробки та якості поверхні. Тому вона все ширше застосовується в різних галузях машинобудівного виробництва і зробила високошвидкісні обробні центри з ЧПК фундаментальним інструментом у цій галузі.

Високошвидкісні обробні центри з паралельною кінематикою є великою інновацією в галузі конструкцій машин останнього десятиліття. Їх окремі рішення успішно використовуються в промисловій практиці та починають займати позиції, де вони можуть продемонструвати свої переваги.

Моторизований шпиндель є ключовою функціональною частиною високошвидкісних обробних центрів з ЧПК, у тому числі з паралельною кінематикою, та одним з основних носіїв технології високошвидкісного різання. Під час високошвидкісної обробки моторизований шпиндель є оптимальним вибором для точного переміщення інструменту та передачі енергії, необхідної для здійснення різання.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена конструюванню моторизованого шпинделя високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою для забезпечення високої продуктивності та точності високошвидкісної обробки деталей з поверхнями складної конфігурації. Окрім того, робота передбачає розробку операційної технології кронштейну та вибір різального, контрольно-вимірювального інструменту та вибір режимів обробки для комплексної технологічної операції на високошвидкісному обробному центрі з паралельною кінематикою.

| | | | | | | | | |
|-----------|----------------|----------|-------|------|--------------------------------|--|-------|---------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | | | |
| | | | | | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | Вступ | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Розробив | Качор Р.І. | | | | | Н | 7 | 1 |
| Перевірів | Буховець В.М. | | | | | | | |
| Н. контр. | Кобельник В.Р. | | | | | | | |
| Затв. | Крупа В.В. | | | | | | | |
| | | | | | | ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль | | |

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Характеристика висошвидкісної обробки різанням

Високошвидкісна обробка (HSM) є однією з ключових технологій у сучасному виробництві. Значення високошвидкісної обробки, і особливо високошвидкісного фрезерування, у виробництві зросло, оскільки нові верстати та інструменти здатні застосовувати високі швидкості видалення матеріалу.

Високошвидкісна обробка дає можливість скоротити час процесу, з одного боку, та покращити точність та поверхню заготовки, з іншого боку. Високошвидкісна обробка здебільшого пов'язана із застосуванням високих швидкостей різання, які у 2-3 рази вищі, ніж при звичайному різанні [1-3].

Високошвидкісна обробка різанням характеризується комплексом наступних основних показників [1-3]:

- швидкості різання 1000...1200 м/хв. при обробці чорних металів і 4000...6000 м/хв при обробці кольорових металів;
- хвилинні робочі подачі до 5...10 м/хв і більше;
- швидкості швидких переміщень вузлів 60...120 м/хв при прискореннях 8...15 м/с;
- час позиціонування вузлів 0,5...2 с, автоматичної зміни інструментів (від «різу» до «різу») 2...3 с, розгону (гальмування) шпинделя 0.5...1 с.

Високошвидкісна обробка через високу вартість обладнання та інструменту економічно ефективна головним чином при виготовленні деталей, у яких переважає чистова обробка з малими перерізами стружки і зусиллями різання при високих швидкостях різання, є велика кількість поверхонь з невеликим робочим часом переходів (20...10 і менше секунд) та із частими змінами позиціонування вузлів і змінами інструментів [1-3].

| | | | | | | | | |
|-----------|------|----------------|-------|------|--------------------------------|--|-------|---------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | | | |
| Розробив | | Качор Р.І. | | | Аналітичний розділ | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Перевірів | | Буховець В.М. | | | | Н | 8 | 21 |
| Н. контр. | | Кобельник В.Р. | | | | ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль | | |
| Затв. | | Крупа В.В. | | | | | | |

Характеристика високошвидкісної обробки наведено на рис. 1.1.

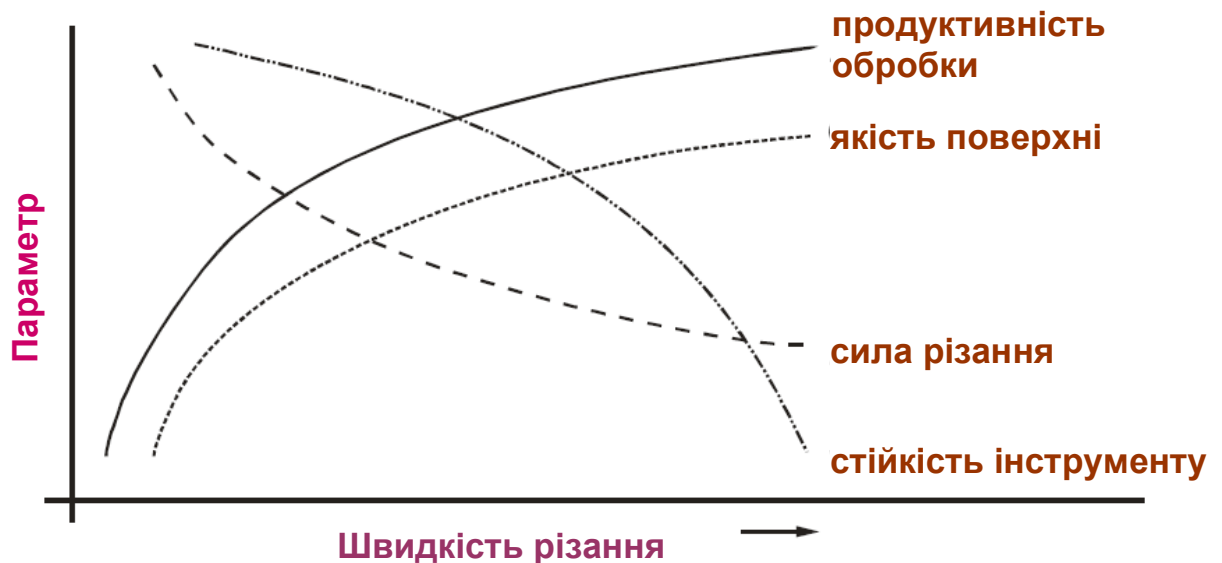


Рисунок 1.1 – Характеристика високошвидкісної обробки різанням

Хоча об'єм стружки та якість поверхні збільшуються з підвищенням швидкості різання, термін служби різального інструменту скорочується, а сили різання зменшуються. При високошвидкісній обробці менша кількість тепла, що утворюється в зоні різання, передається в заготовку та різальний інструмент, оскільки його значна частина відводиться разом зі стружкою. Менші тангенціальні навантаження на різальний інструмент спрощують конструкцію пристосування та дозволяють легко обробляти тонкостінні заготовки. Удосконалення матеріалу різального інструменту може подовжити термін служби інструменту, а високої твердості та термостійкості різальний матеріал може збільшити термін служби інструменту до прийнятного рівня [1-3].

1.2 Особливості технологічної системи для високошвидкісної обробки

Щоб скористатися перевагами високошвидкісної обробки, важливо синтезувати технологію, що включає верстат, інтерфейс інструменту та різальний інструмент. Усі окремі компоненти, що входять до цих трьох груп, повинні бути добре спроектовані та спроектовані на відповідному найвищому рівні та разом

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 9 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

повинні відповідати найсучаснішому дизайну та виконанню.

Конструкції верстатів для високошвидкісного різання повинні мати наступні особливості [1-3]:

- маса рухомих вузлів повинна бути мінімально-можливою за умови забезпечення необхідної жорсткості з використанням нових матеріалів і зварних конструкцій;

- рухомі вузли повинні мати масу, що мало що змінюється, в зв'язку з чим перевага повинна віддаватися компоновкам, в яких всі координатні переміщення має різальний інструмент (краще використовувати компоновку типу «Box in Box» з рухомою рамою для горизонтальної компоновки, а для вертикальних – компоновку з рухомою поперечиною типу «Gantry»;

- зміна інструментів переважно повинна здійснюватися з магазину безпосередньо в шпindel без використання недостатньо надійних проміжних маніпуляторів (так звана система «Pick Up»);

- особлива увага повинна приділятися вільному видаленню стружки з робочої зони при швидкісному різанні, оскільки її обсяг приблизно в 5 разів більше, ніж при силовому різанні;

- верстати повинні мати герметичну кабінетну огорожу.

Основні конструктивні рішення вузлів для високошвидкісних обробних центрів для забезпечення високошвидкісної обробки різанням приведені на рис. 1.2.

Конструкції інтерфейсу інструментів для високошвидкісної обробки повинні забезпечувати [1-3]: постійне і рівномірне затискання; високу статичну та динамічну жорсткість; передачу високого крутного моменту; точність повторного затиску та точність позиціонування інструменту; допустимий дисбаланс; автоматичну зміну інструменту; обмеження швидкості; адаптивність.

Інструмент для високошвидкісної обробки повинен забезпечувати [1-3]: обробку відповідного матеріалу заготовки, режими обробки, безпечне балансування, оптимальну швидкість різання; регулювання. Також він повинен

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 10 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

мати відповідний різальний матеріал, враховувати рівень технології верстатного обладнання та бути універсальним.

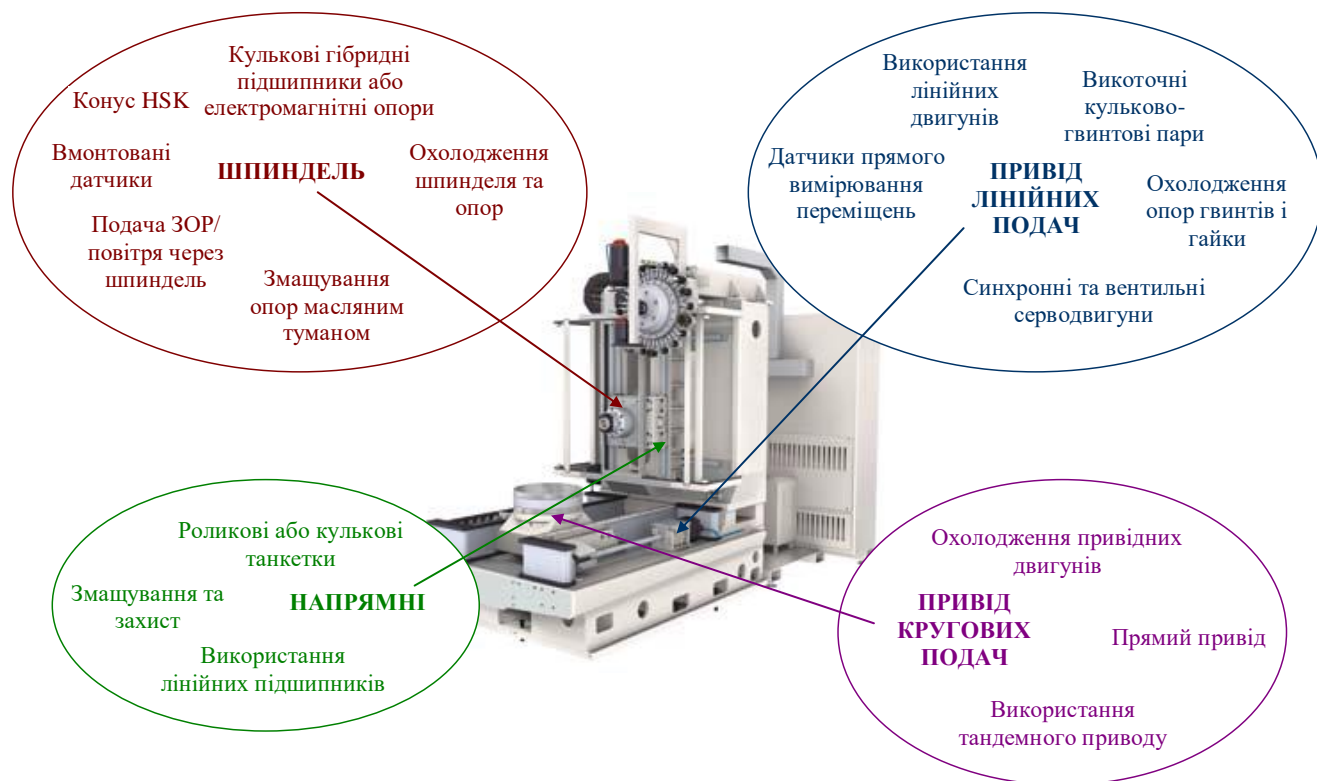


Рисунок 1.2 – Основні конструктивні рішення вузлів для високошвидкісних обробних центрів

1.3 Обробні центри з механізмами паралельної кінематики для реалізації високошвидкісної обробки

Верстати з паралельною кінематикою є перспективними пристроями в галузі високошвидкісної обробки. Їх сферами застосування є реалізація високошвидкісної у аерокосмічній та автомобільній промисловості. У цих сферах потрібно отримувати дешевші та якісніші деталі. Наприклад, нові конструкції планерів вимагають обробки 80% матеріалу монолітних плит для отримання складної геометрії в одній деталі [4]. У таблиці 1.1. приведені конкретні переваги та недоліки високошвидкісних обробних центрів з паралельною кінематикою [5].

Численні недоліки гексаподної структури, зокрема складна система охолодження та відносно велика площа розташування порівняно з робочою зоною, призвели до дуже низького визнання цієї концепції високошвидкісних

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 11 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

обробних центрів з паралельною кінематикою [5].

Таблиця 1.1. Переваги та недоліки високошвидкісних обробних центрів з паралельною кінематикою

| ПЕРЕВАГИ | НЕДОЛІКИ |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - жорсткість конструкції; - невеликі рухомі маси; - всі приводи переміщень ідентичні; - конструкція працює на розтяг/стиск; - невеликі переміщення частин при згині; - високі динамічні властивості | <ul style="list-style-type: none"> - складне управління, оскільки перетворення координат повинно виконуватися для всіх осей одночасно; - складні опорні вузли і складна система контролю положення робочого органу для забезпечення жорсткості і точності; - великі термічні ефекти по довжині; - задовільне відношення робочого простору до об'єму верстата; - обмежений кут нахилу для 5-ти осьової обробки |

Більшість верстатів, які успішно зарекомендували себе на практиці, є гібридними рішеннями, тобто лише деякі осі подачі мають паралельну кінематику. Решта осей розташовані послідовно [5].

На рис. 1.3 приведений компактний високошвидкісний обробний центр фірми CHIRON Werke [5], який виконує рух у площині X-Y за допомогою V-подібної паралельної кінематичної системи, так званого плоского біпода, з лінійними прямими приводами. Довжина висування двох поворотних осей дозволяє отримати доступ до будь-якої точки робочої площини XY. Рух у напрямку Z здійснюється традиційно за допомогою рухомої шпindelної головки, шарнірно з'єднаної з шпindelною платформою. Показана концепція верстата дозволяє значно зменшити рухомі маси, одночасно збільшуючи

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 12 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

жорсткість, забезпечуючи швидкість швидкого переміщення до 120 м/хв та прискорення по осях до 3g з часом зміни інструменту від стружки до стружки 1,2 секунди. Висока динаміка розгону моторшпинделя зі швидкістю до 40000 об/хв, а також пристрій зміни інструменту з часом заміни 0,5 с. забезпечують дуже короткий час від стружки до стружки.

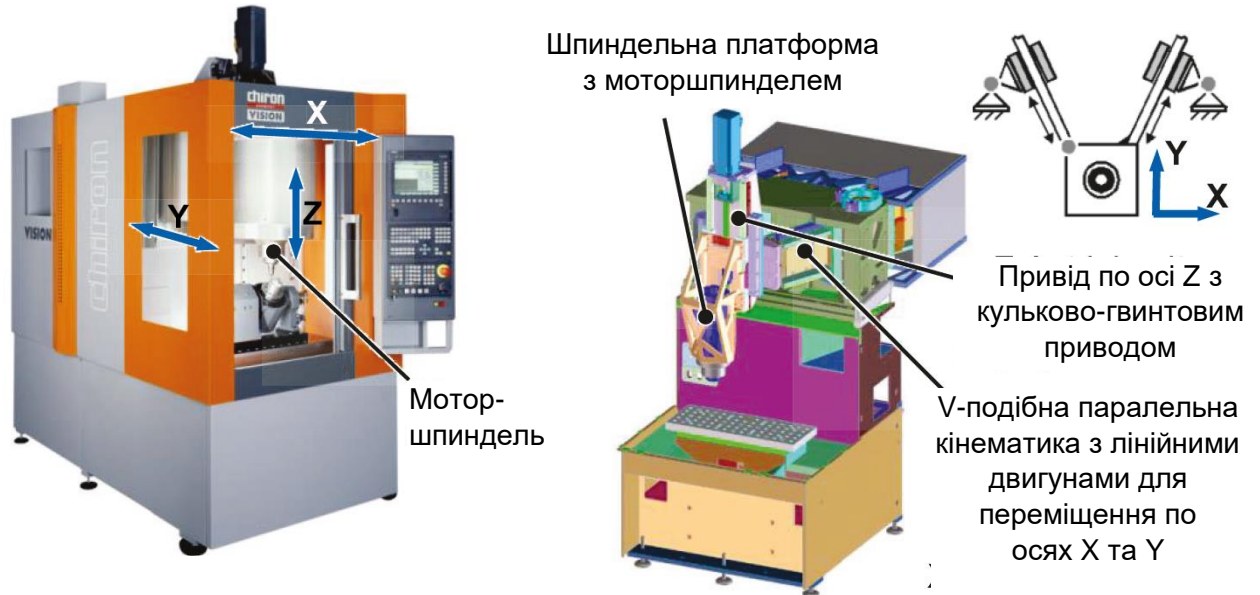


Рисунок 1.3 – Високошвидкісний обробний центр з V-подібною паралельною кінематикою фірми CHIRON Werke

Концепція високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою типу «біпод» з шатунними ланками приведена на рис. 1.4. Цей верстат складається з пінолі з моторшпинделем, яка рухається осі Z, та яка може переміщуватися в площині X-Y. Рух шпинделя по осях X-Y забезпечуються W-подібним з'єднувальним механізмом. Безлюфтові підшипники кочення в шарнірах з'єднувального механізму забезпечують жорстке з'єднання з низьким тертям. З'єднувальний механізм приводиться в рух двома телескопічними кульковими гвинтами. Телескопічні гвинти з'єднані з інструментальним шпинделем з одного боку та з шарнірно встановленою напрямною рамою з іншого. Для переміщення довжиною 500 мм по обох осях X та Y потрібні телескопічні гвинти загальною довжиною 1450 мм. Моторшпиндель завдяки пінолі дозволяє здійснювати подачу по осі Z з боку інструменту. Отже, цю концепцію верстата можна

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 13 |

використовувати як окремий верстат, так і як обробний модуль у складі гнучкої виробничої лінії.



Рисунок 1.4 – Конструктивне виконання та принципова схема високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою типу «біпод» з шатунними ланками

Концепція обробного центра типу «біглайд» з лінійними прямими приводами мод. GENIUS 500 фірми Cross Hüller приведена на рис. 1.5. Рух у площині X-Y здійснюється двома паралельними та перпендикулярними повзунами, що приводяться в рух лінійними двигунами. Точки з'єднання розташовані на повзунах, які керуються рамною станиною верстата. Ці конструктивні особливості, разом з інтеграцією лінійних прямих приводів, призводять до вищої жорсткості та динаміки верстата. Максимальна швидкість переміщення становить 120 м/хв при прискореннях 1,5g, що поєднується з жорсткістю системи понад 30 Н/мкм.

Аналогічну концепцію має обробний центр мод. TriJoint 900N фірми Kovosvit (Чехія) рис. 1.6 [6]. Верстат має дві нахилені під невеликим кутом до вертикалі стійки, по яких рухаються каретки від двох кульково-гвинтових приводів кожна. Дві жорсткі ланки біглайду приєднані до кареток та з'єднані між собою за допомогою безлюфтових підшипників кочення. Вони забезпечують переміщення у площині X-Y, а переміщення по осі Z здійснює стіл із заготовкою.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 14 |

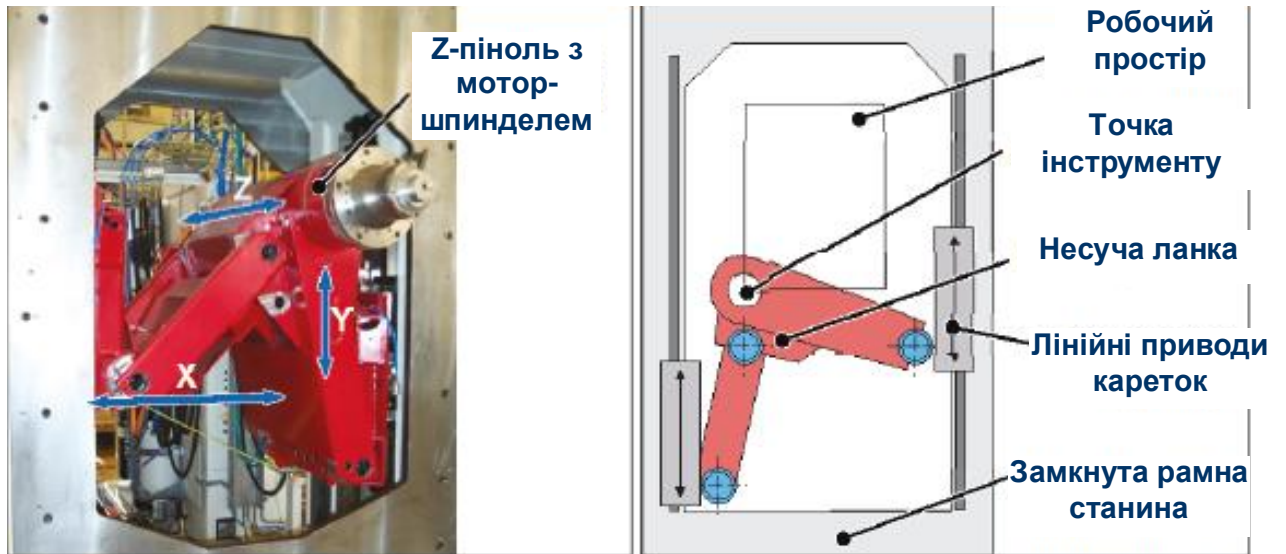


Рисунок 1.5 – Концепція обробного центра типу «біглайд» мод. GENIUS 500 фірми Cross Hüller з лінійними прямими приводами

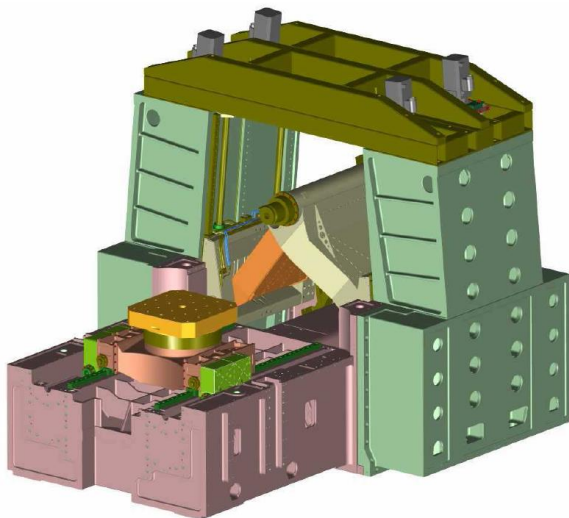


Рисунок 1.6 – Концепція обробного центра типу «біглайд» мод. TriJoint 900H фірми Kovosvit (Чехія)

1.4 Призначення та конструкція високошвидкісного обробного центру з гібридною кінематичною структурою

Високошвидкісний обробний центр типу «біпод» з гібридною кінематичною структурою містить станину (рис. 1.7) Т-подібної форми, що складається з двох частин. Станина встановлена на клинових опорах 22. На основній частині 2

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ

Арк.

15

станини опозитно одна одній жорстко кріпляться вертикальні стойки 3 і 4, з'єднані у верхній частині траверсою 7, на якій розташований інструментальний магазин 11 з автооператором зміни інструменту 12. Корпус горизонтального шпинделя 10 з'єднаний з важелями 8 і 9 механізму паралельної кінематики, який забезпечує його переміщення по двох координатах у вертикальній площині, перпендикулярній осі шпинделя, за рахунок переміщень кареток 5 і 6 вертикальними напрямними, що закріплені на стойках 3 і 4, і закриті кожухами 13 і 14. На приставній частині станини 1 розташовані індексний поворотний, горизонтально розташований, стіл 20 для закріплення заготовки, який у свою чергу встановлений на поперечному столі 19 горизонтального переміщення заготовки (рис. 1.7, рис. 1.8.).

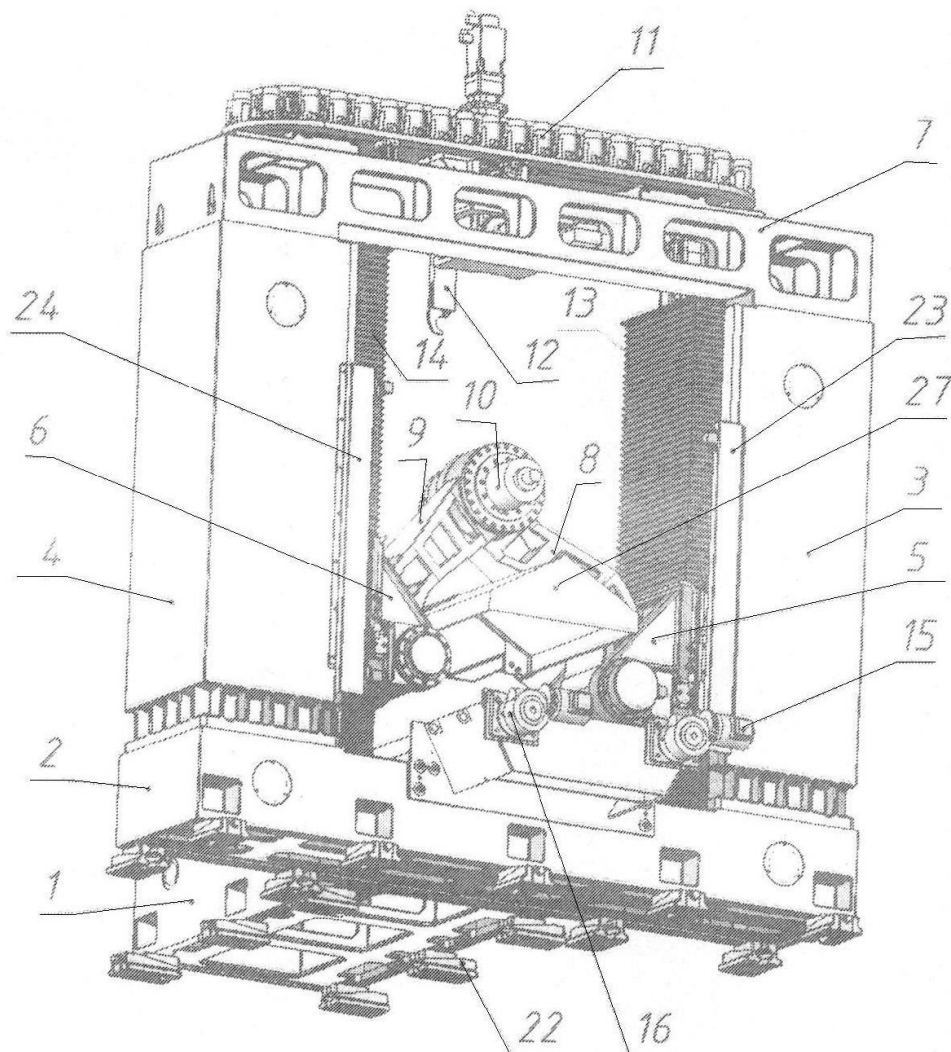


Рисунок 1.7 –Високошвидкісний обробний центр типу «біпод» з гібридною кінематичною структурою (вигляд ззаду)

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ

Арк.

16

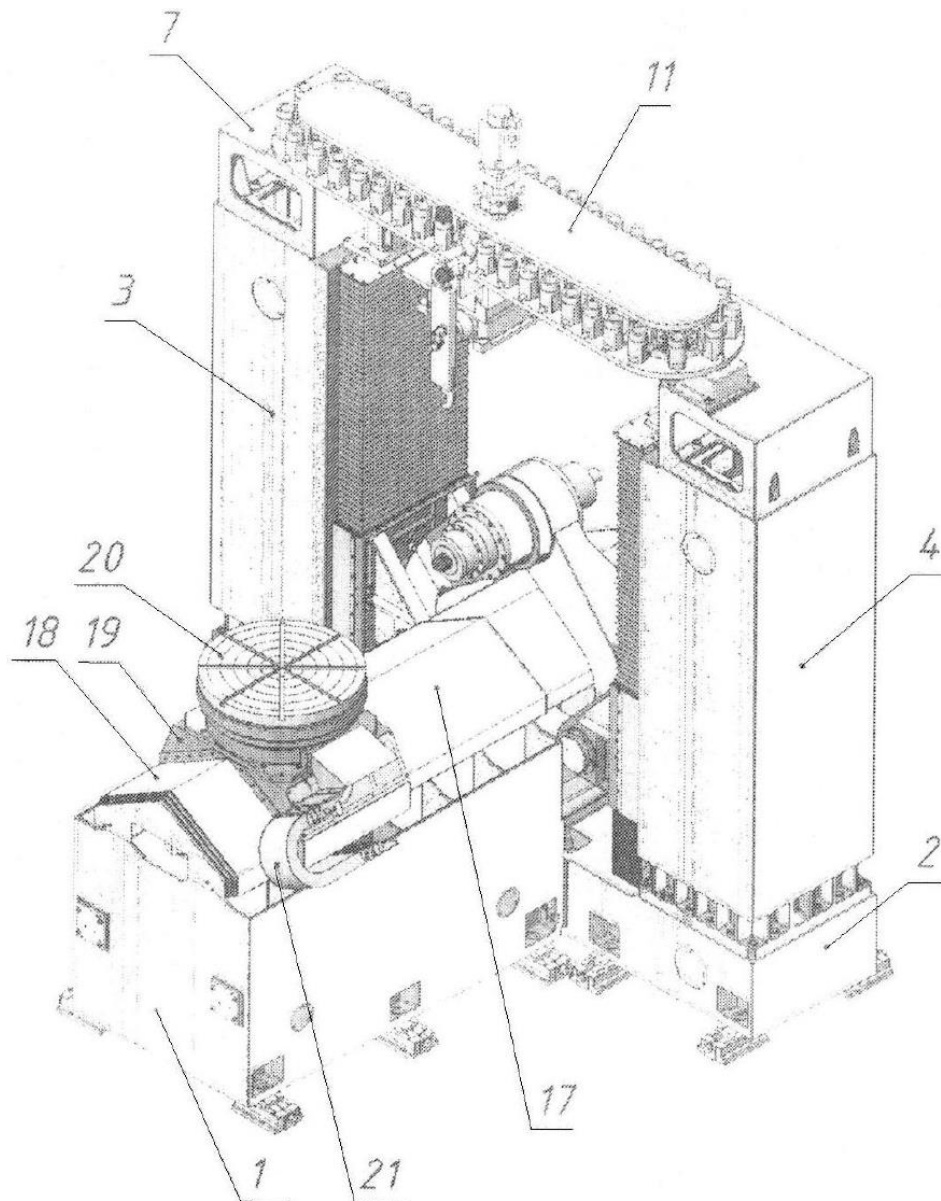


Рисунок 1.8 –Високошвидкісний обробний центр типу «біпод» з гібридною кінематичною структурою (вигляд спереду)

Каретки 5 і 6 по вертикальних напрямних стійок 3 і 4 переміщуються за рахунок передач гвинт-гайка кочення, при цьому їх рух реалізується слідкуючими приводами, лінійні датчики переміщення 23 і 24 яких також закріплені на стійках 3 і 4.

Поперечний стіл 19 з встановленим на ньому індексним поворотним столом 20 і заготовкою здійснює горизонтальні переміщення вздовж осі шпинделя по напрямних, закріплених на станині, за допомогою механізму, аналогічного використання для переміщення кареток 5 і 6.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 17 |

По краях приставної станини розташовані шнекові транспортери для видалення стружки з приводами 15 та 16 (рис. 1.9). Для забезпечення функціонування поворотного, індексного столу 20, служить гнучкий рукав 21 для електроенергії та робочих середовищ (повітря, масло та охолоджуюча рідина для прямого приводу столу), необхідні для роботи його виконавчих механізмів.

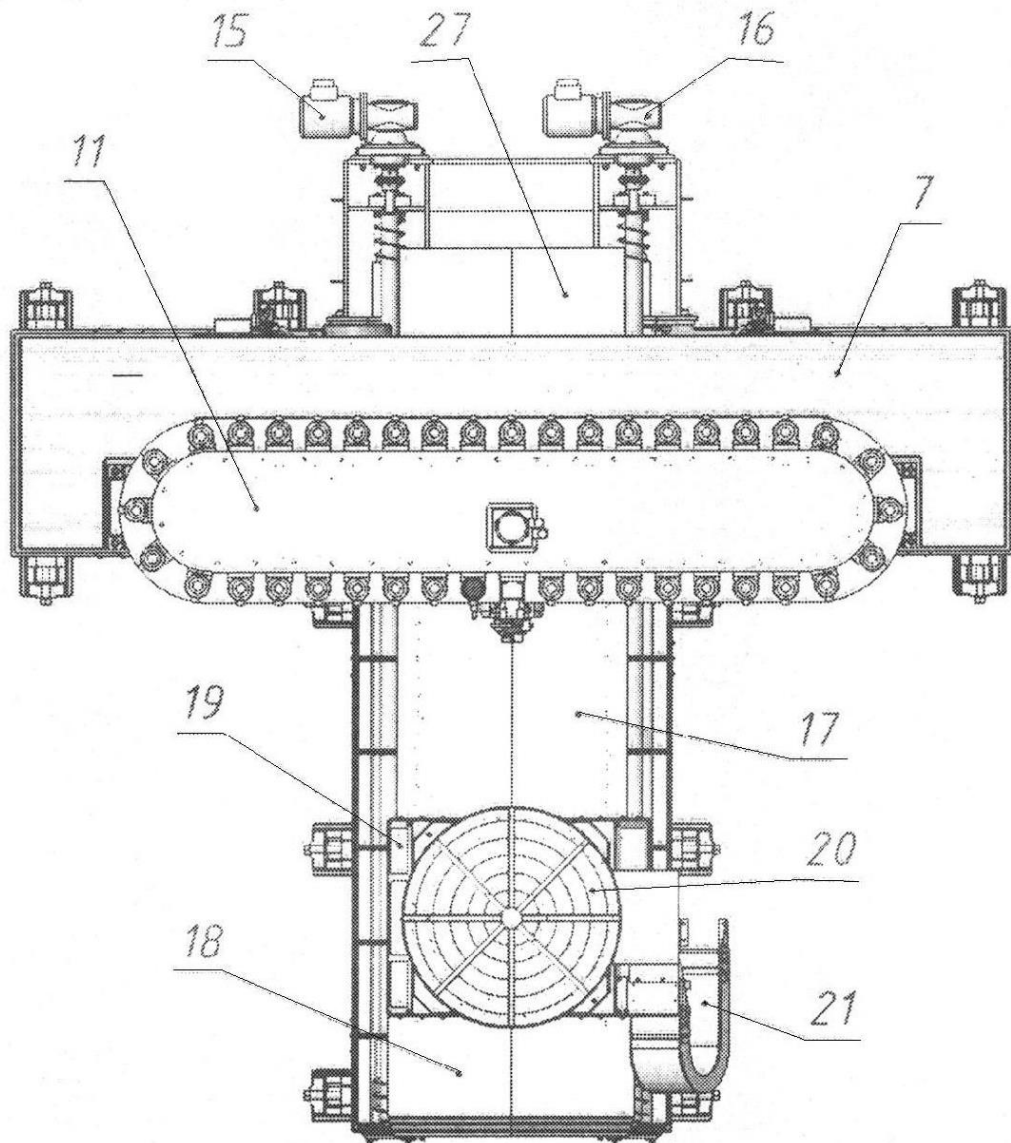


Рисунок 1.9 – Високошвидкісний обробний центр типу «біпод» з гібридною кінематичною структурою (вигляд зверху)

Важільний механізм паралельної кінематики (рис. 1.10) включає важелі 8 і 9, які у вихідному положенні симетрично розташовані відносно площини симетрії верстата. З одного боку важіль 8 жорстко, а важіль 9 шарнірно зв'язані з корпусом

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ

Арк.

18

інструментального шпинделя 10, з другого - з каретками 5 і 6 відповідно, за допомогою шарнірів 25 і 26.

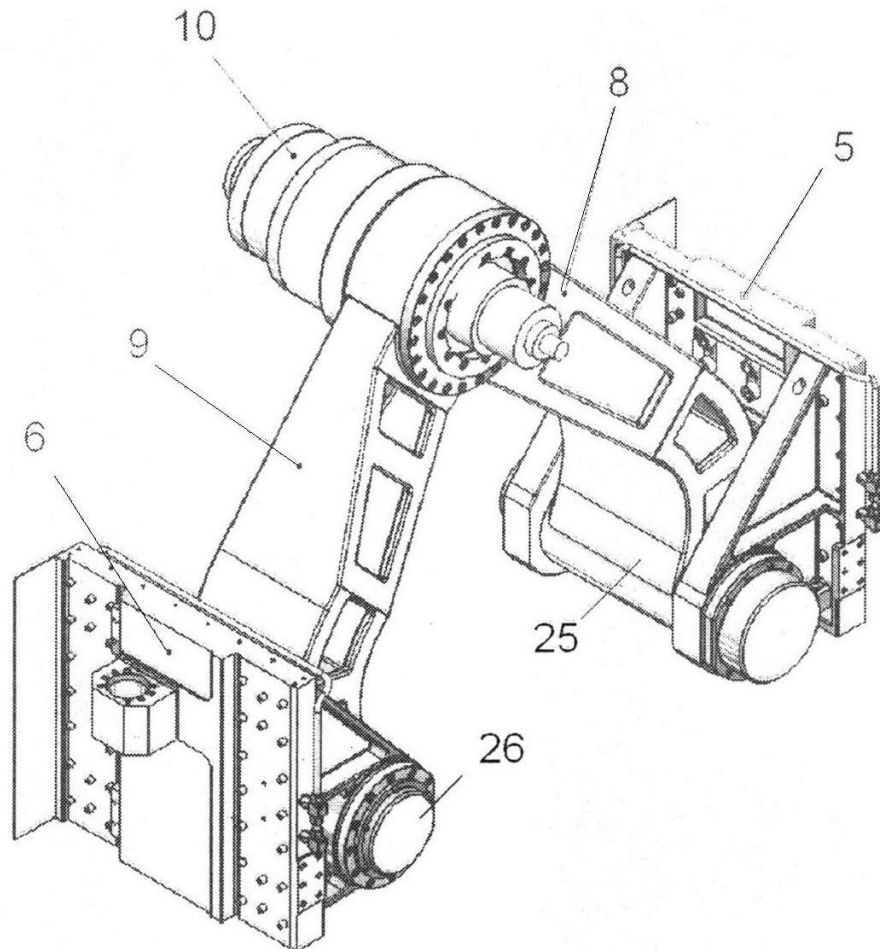


Рисунок 1.10 – Механізм паралельної кінематики високошвидкісного обробного центр типу

Важелі 8 і 9 механізму паралельної кінематики мають складну форму. Вони вигнуті в площині перпендикулярній осі шпинделя таким чином, що огинають при своєму русі захисний кожух 27 приставної станини, забезпечуючи максимальну компактність конструкції. Захисний кожух 27 призначений для запобігання попаданню стружки на елементи конструкції станини, і в поперечному перерізі має форму двосхилого даху зі схилами 17 і 18, яка забезпечує вільний схід стружки до шнекових транспортерів.

Інструментальний шпиндель 10, переміщаючись заданою траєкторією, за рахунок механізму паралельної кінематики, та за допомогою закріпленого в ньому інструменту, обробляє заготовку складного профілю. Шпиндель 10

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ

Арк.

19

з'єднаний з важелями 8 і 9 механізму паралельної кінематики, що забезпечує його переміщення по двох координатах у вертикальній площині, перпендикулярній осі шпинделя, за рахунок переміщень кареток 5 і 6 по вертикальним напрямним, закріпленим на стойках 3 і 4.

При цьому переміщення індексного поворотного столу 20 із заготовкою в напрямку, перпендикулярному площині обробки, здійснюється за допомогою поперечного столу 19. Шнекові транспортери з приводами 15 і 16, розташовані по краях приставної станини, видаляють стружку.

1.5 Аналіз конструкції моторшпинделів для високошвидкісних обробних центрів з паралельною кінематичною структурою

1.5.1 Структура та принципи роботи моторизованого шпинделя

Інтеграція двигуна та шпинделя верстата дозволяє шпинделю стати відносно незалежним від загальної структури верстата, і його можна перетворити на «шпиндельний блок», зазвичай відомий як «моторизований шпиндель» [4].

Моторизований шпиндель складається з передньої кришки, задньої кришки, шпинделя, передньої підшипникової опори, задньої підшипникової опори, пристрою попереднього натягу підшипників, водяної сорочки, корпусу, статора та ротора (рис. 1.11). Статор моторизованого шпинделя виготовляється шляхом багаторазового пресування високоякісних листів кремнієвої сталі з високою магнітною проникністю, а сформований статор має перфоровані пази для вмонтування дроту у свою внутрішню порожнину. Ротор часто складається з шпинделя, залізного осердя та короткозамкненого ротора. Між ротором і статором є зазор, який називається повітряним зазором. Він забезпечує шлях для перетворення енергії електромагнітного поля статора в механічну енергію. Ротор встановлений на валу методом натягу та розташований між передньою і задньою підшипниковими опорами. Передача високого крутного моменту досягається за рахунок використання сили тертя, що виникає внаслідок натягу.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 20 |

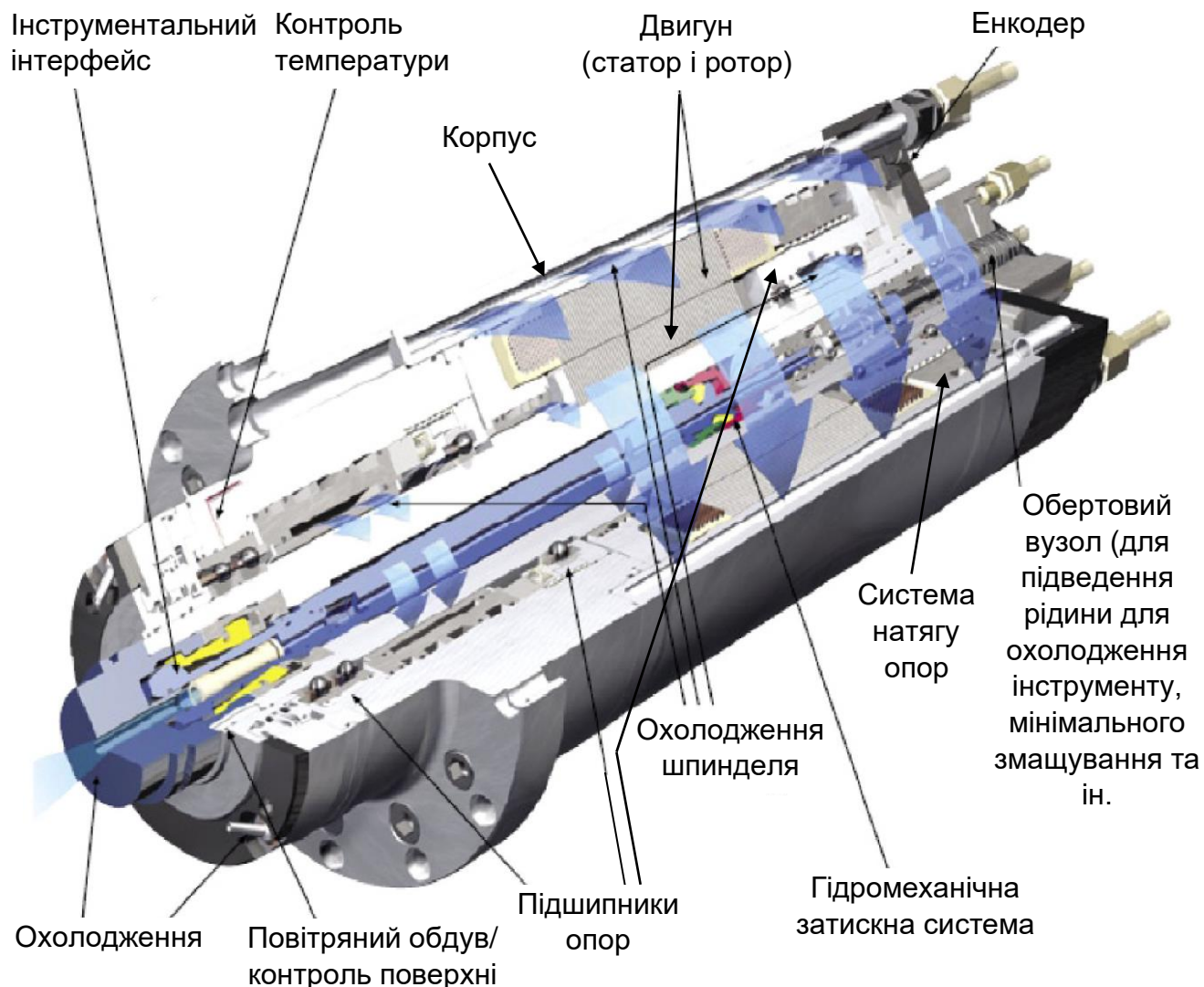


Рисунок 1.11 – Структура моторизованого шпинделя

Оскільки між внутрішнім отвором ротора та відповідною поверхнею шпинделя існує великий натяг, ротор необхідно нагріти приблизно до 200°C в масляній ванні під час складання, а потім швидко виконати гаряче пресування. Статор моторизованого шпинделя закріплений у корпусі шпинделя за допомогою охолоджувальної сорочки. Таким чином, ротор двигуна є головним валом верстата, а втулка шпинделя з мотором є основою двигуна. Зазвичай зубчастий диск встановлюється в задній частині шпинделя як індуктивний енкодер для досягнення повного замкнутого циклу керування двигуном. Внутрішній конічний отвір і торцева поверхня переднього кінця шпинделя використовуються для кріплення шпинделя та закріплення змінного хвостовика.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ

Арк.

21

1.5.2 Класифікація моторизованих шпинделів та їх основні параметри

Високошвидкісні моторизовані шпиндельні агрегати зазвичай класифікують за типами опорних підшипників, методами змащування, методами охолодження, галузями застосування та типами двигунів. Класифікація моторизованих шпинделів наведена в табл. 1.2 [4].

Таблиця 1.1. Класифікація моторизованих шпинделів

| Критерій класифікації | Тип моторизованого шпинделя |
|-----------------------|--|
| Підшипники опори | На підшипниках кочення, на магнітних підвісних підшипниках, на гідродинамічних (гідростатичних) підшипниках |
| Спосіб змащування | Змащуванням мастилом, змащуванням масляним туманом, змащуванням масло/повітря |
| Спосіб охолодження | З водяним охолодженням, з повітряним охолодженням, із самоохолодженням |
| Галузь застосування | Для токарної обробки, для фрезерної обробки, для абразивної обробки, для обробки осьовим інструментом, для вальцювальної обробки |
| Тип двигуна | Асинхронний моторизований шпиндель, синхронний моторизований шпиндель з постійними магнітами |
| Тип підшипника | З стальними кульками підшипника, з керамічними кульками підшипника, з керамічними підшипниками |

Технічні параметри моторизованого шпинделя, що використовується для високошвидкісних обробних центрів, включають переважно зовнішній діаметр установки, максимальну частоту обертання, розрахункову частоту обертання, діапазон частот обертання при постійній потужності, номінальну потужність та розрахунковий крутний момент [4].

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 22 |

1.5.3 Загальні ключові технології для моторизованого шпинделя

Високошвидкісний моторизований шпиндельний блок – це мехатронна система, що складається з механічної системи, системи керування, системи приводу та системи контролю [4].

Ключові технології для високошвидкісного моторизованого шпинделя включають [4]:

- технологію високошвидкісних високоточних підшипників;
- технологію змащення та охолодження маслом/повітрям;
- технологію високошвидкісних двигунів та приводів;
- технологію інженерної обробки деталей керамічних підшипників, а також технологію точного виготовлення та складання.

Крім того, моторизований шпиндель також спирається на допоміжні технології, такі як [4]:

- вбудований імпульсний енкодер;
- автоматична зміна інструменту;
- онлайн-автоматичне динамічне балансування;
- осьове позиціонування та точна компенсація;
- моніторинг підвищення температури та вібрації;
- газова герметизація торців шпинделя;
- системи конусного продувного потоку;
- моніторинг та діагностика несправностей та інші технології безпеки.

Технологія високошвидкісних високоточних підшипників.

Високошвидкісний високоточний підшипник є основним опорним компонентом високошвидкісного моторизованого шпинделя. Максимальна швидкість обертання моторизованого шпинделя залежить від розміру, конструювання та методів змащування підшипників. Тому для високошвидкісного високоточного моторизованого шпинделя підшипники повинні мати хороші високошвидкісні характеристики, високу динамічну вантажопідйомність, хороші характеристики змащування та низьке тепловиділення. Радіально-упорний

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 23 |

кульковий підшипник найбільше підходить для роботи на високих швидкостях. Він має багато переваг, таких як низький опір тертю, низьке енергоспоживання, низька вартість, легка серіалізація та стандартизація. Але він може створювати високу відцентрову силу та гіроскопічний момент під час обертання на високій швидкості. Гібридний керамічний кульковий підшипник є найчастіше використовуваним високошвидкісним підшипником кочення. Порівняно зі сталевими підшипниками з такими ж характеристиками та точністю, керамічний кульковий підшипник забезпечує вищу швидкість обертання, довший термін служби та нижчу температуру шпинделя [4].

Залежно від величини навантаження, форми, швидкості обертання тощо, зазвичай застосовуються компоновальні схеми підшипників [4], показані на рис.1.12.

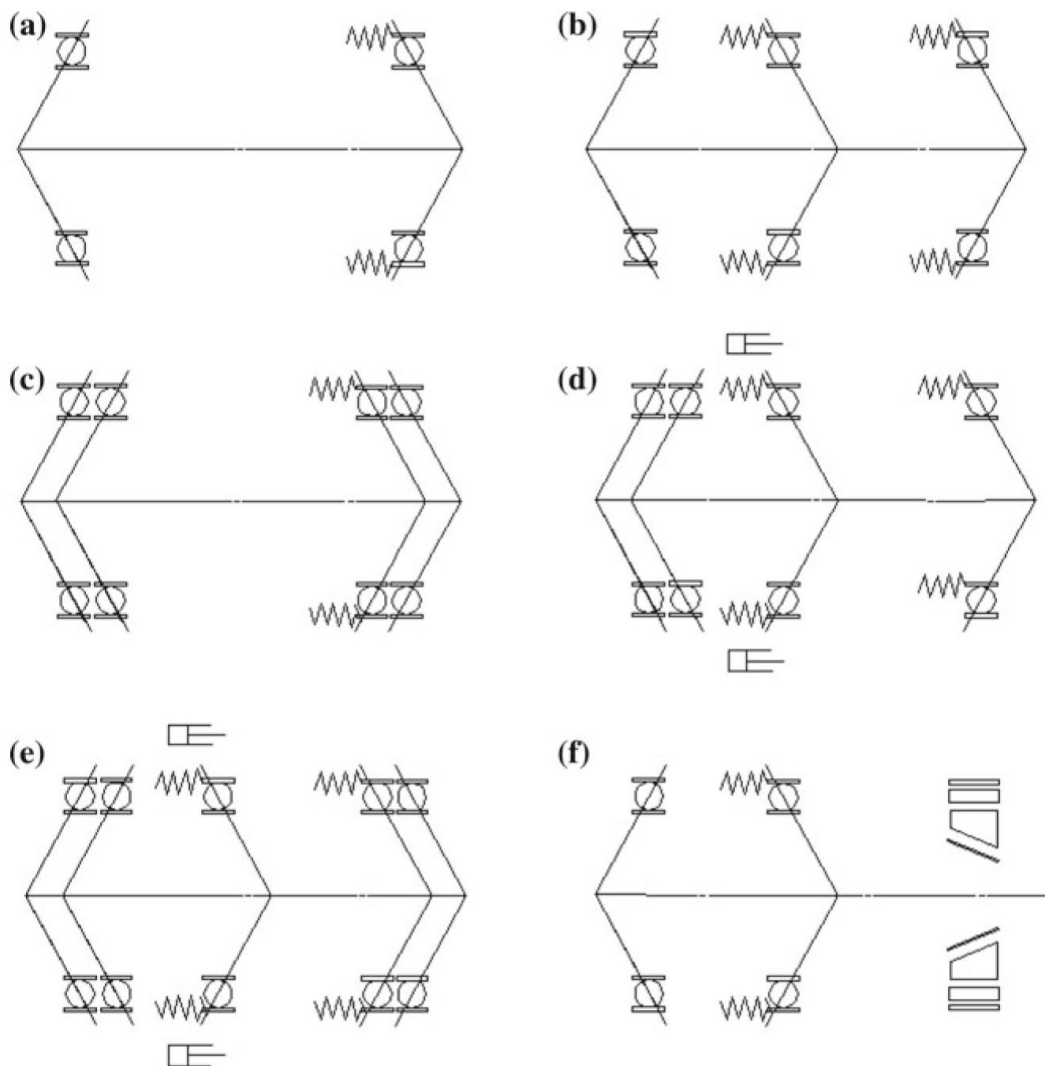


Рисунок 1.12 – Структура моторизованого шпинделя

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ

Арк.

24

Попередній натяг у опорі не тільки усуває осьовий зазор підшипника, але й покращує жорсткість підшипника та точність обертання шпинделя, а також запобігає вібрації. Жорсткий попередній натяг часто застосовується для моторизованих шпинделів з відносно низькою швидкістю обертання та відносно вузьким діапазоном швидкостей [4]. Для моторизованих шпинделів з високою швидкістю обертання та широким діапазоном швидкостей слід застосовувати пружний попередній натяг, щоб зменшити вплив температури або швидкості [4]. Пружний попередній натяг створюється за допомогою пружин.

Для моторизованих шпинделів з високими вимогами до експлуатаційних характеристик та терміну служби використовуються регульовані пристрої попереднього натягу [4].

Технологія змащування і охолодження

Змащення підшипників відіграє ключову роль у їхній роботі та функціонуванні. Мастило запобігає прямому контакту в підшипниках, утворюючи рідку плівку між кулькою, обоймою та сепаратором. Системи змащення можуть використовувати або консистентне мастило, або масляно-повітряні суміші [4].

В більшості моторизованих шпинделів застосовується оливо-повітряне змащення [4], оскільки воно змащує, очищує та охолоджує підшипники (рис.1.13).

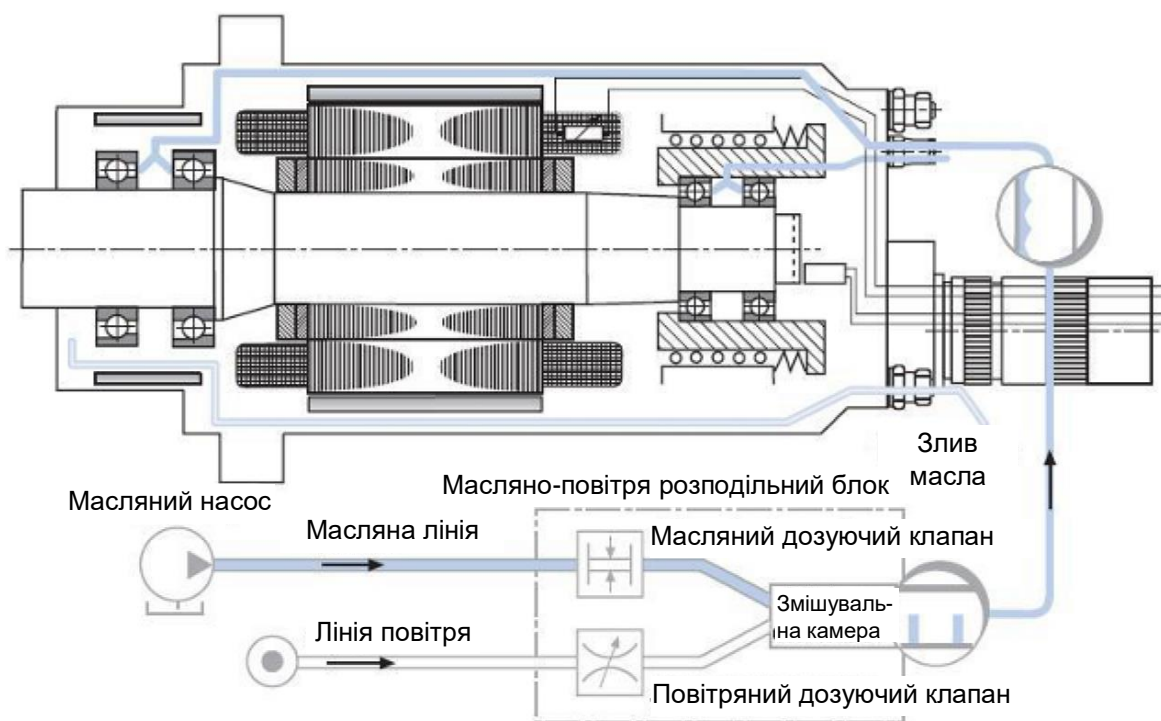


Рисунок 1.12 – Система оливо-повітряного змащення підшипників

Місця нагрівання в моторизованому шпинделі в основному включають статор двигуна та ротор і підшипники. Охолодження моторизованого шпиндельного двигуна та підшипника зазвичай досягається конвекцією охолоджувальних рідин [4]. Охолодження статора моторизованого шпинделя досягається шляхом проектування охолоджувальної сорочки зовні статора, що дає хороший ефект охолодження [4]. Охолодження ротора є відносно складним і зазвичай досягається за допомогою потоку мастила для підшипників, щоб відвести частину тепла [4].

Технологія приводу шпинделя

Конструкція двигуна визначає потужність, крутний момент та продуктивність моторизованого шпинделя. Двигун забезпечує механічний рух системи шпиндель-інструмент. В моторизованих шпинделях використовують електродвигуни, які можуть асинхронними або синхронними [4]. Швидкість обертання цих двигунів регулюється перетворювачами частоти, які є електронними силовими каскадами, що керують напругою та частотою, що подаються на двигун [4]. Методи векторного керування покращили продуктивність цих двигунів завдяки покращеному регулюванню швидкості та зменшенню часу розгону та уповільнення.

1.6 Вибір напрямку розробки та завдання на кваліфікаційну роботу бакалавра

Технологічна продуктивність обробки на високошвидкісному обробному центрі з паралельною кінематикою залежить від шпиндельної системи, яка є його ключовою функціональною частиною. Інтелектуальний моторизований шпиндель повинен забезпечувати відповідну максимальну частоту обертання та діапазон частот обертання при постійній потужності, номінальну потужність та розрахунковий крутний момент, а також володіти такими ключовими технологіями, як автоматичне розпізнавання параметрів двигуна, пригнічення

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 26 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

вібрацій, зменшення теплової деформації, автоматичне дозування кількості мастила, зменшення шуму тощо.

Тому розроблення конструкції моторизованого шпинделя високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою є важливою конструкторською задачею.

Метою роботи є конструювання моторизованого шпинделя високошвидкісного обробного центра з паралельною кінематикою для забезпечення високої продуктивності та точності високошвидкісної обробки деталей з поверхнями складної конфігурації.

Основні завдання:

1. Охарактеризувати високошвидкісну обробку різанням, проаналізувати область її використання та переваги у порівнянні з традиційною обробкою різанням

2. Розглянути особливості технологічної системи для високошвидкісної обробки. Проаналізувати основні конструктивні рішення вузлів для високошвидкісних обробних центрів для забезпечення високошвидкісної обробки різанням.

3. Провести аналіз конструкції обробних центрів з гібридною кінематикою, які містять механізми паралельної структури, для реалізації високошвидкісної обробки. Визначити їх переваги та недоліки.

4. Описати призначення, область застосування особливості компоновки та конструкції високошвидкісного обробного центра з гібридною кінематичною структурою.

5. Провести класифікацію моторизованих шпинделів та здійснити аналіз їх конструкції для високошвидкісних обробних центрів з паралельною кінематичною структурою.

6. Провести аналіз ключових технологій для моторизованого шпинделя, як мехатронної системи, що складається з механічної системи, системи керування, системи приводу та системи контролю.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 27 |

7. Провести аналіз об'єкту виробництва та технічних вимог до точності розмірів та розташування поверхонь, а також якості поверхневого шару. Провести вибір технологічних баз.

8. Розробити технологічний маршрут механічного оброблення деталі та операційну технологію на комплексну технологічну операцію обробки на високошвидкісному обробному центрі з ЧПК. Здійснити вибір різального, вимірювального інструменту та режимів різання.

9. Провести розрахунок потужності приводу та здійснити вибір привідного електродвигуна.

10. Вибрати структуру моторизованого шпинделя головного руху та здійснити вибір привідного електродвигуна. Побудовано графіки зміни потужності та обертового моменту на моторизованому шпинделі.

11. Провести проектування моторизованого шпинделя, здійснивши вибір його компоновальної схеми, автоматизований вибір та розрахунок довговічності підшипників опор, здійснити розрахунок жорсткості опор шпинделя та його радіальної жорсткості.

12. Передбачити заходи по охороні праці та безпеці життєдіяльності.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-035.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 28 |

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Характеристика об'єкту виробництва

Деталь «Кронштейн» являє собою консольну опорну деталь, яка служить для закріплення на її вертикальних площинах інших деталей (рис.2.1). Вона виготовляється з алюмінієвого деформованого сплаву марки АК-8 ГОСТ 4784-74, який має високі технологічні та механічні характеристики.

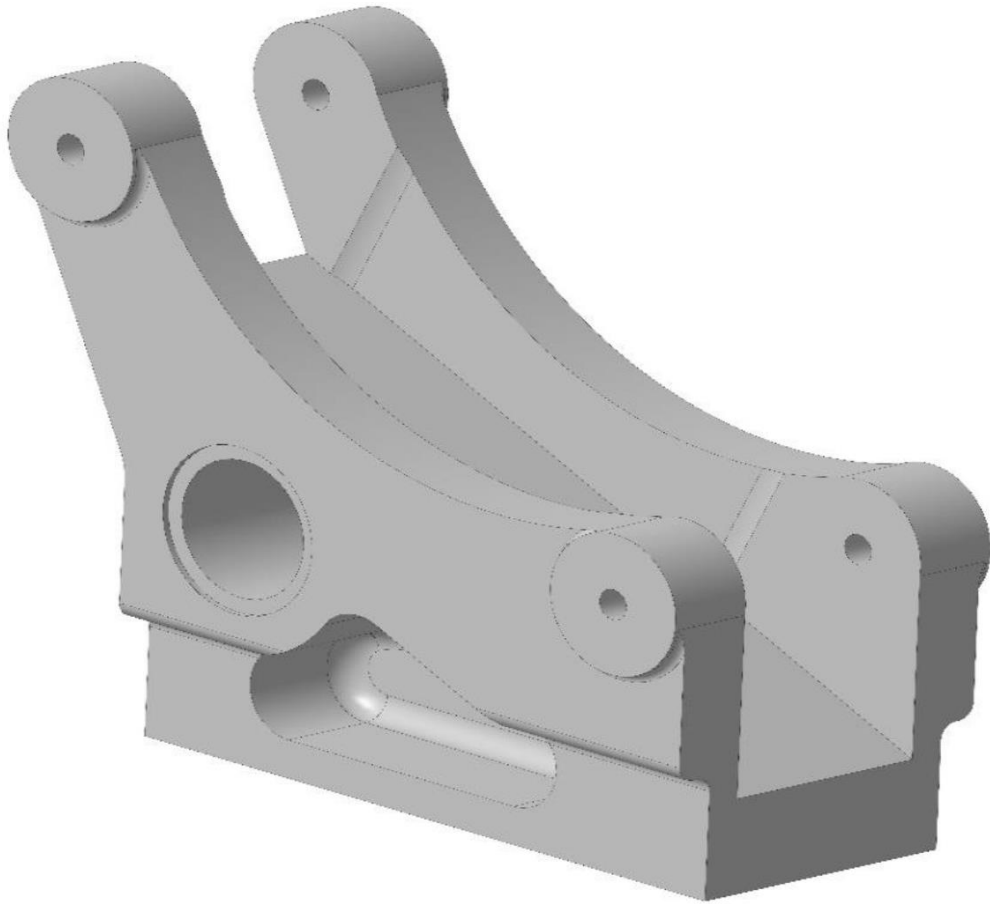


Рисунок 2.1 – 3D-модель деталі «Кронштейн»

Креслення деталі з нумерацією поверхонь, які необхідно обробити, приведені на рис. 2.2.

| | | | | | | | |
|-----------|----------------|----------|-------|------|---|-------|---------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | | |
| Розробив | Качор Р.І. | | | | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Перевірів | Буховець В.М. | | | | Н | 29 | 12 |
| Н. контр. | Кобельник В.Р. | | | | ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м.Тернопіль | | |
| Затв. | Крупа В.В. | | | | | | |

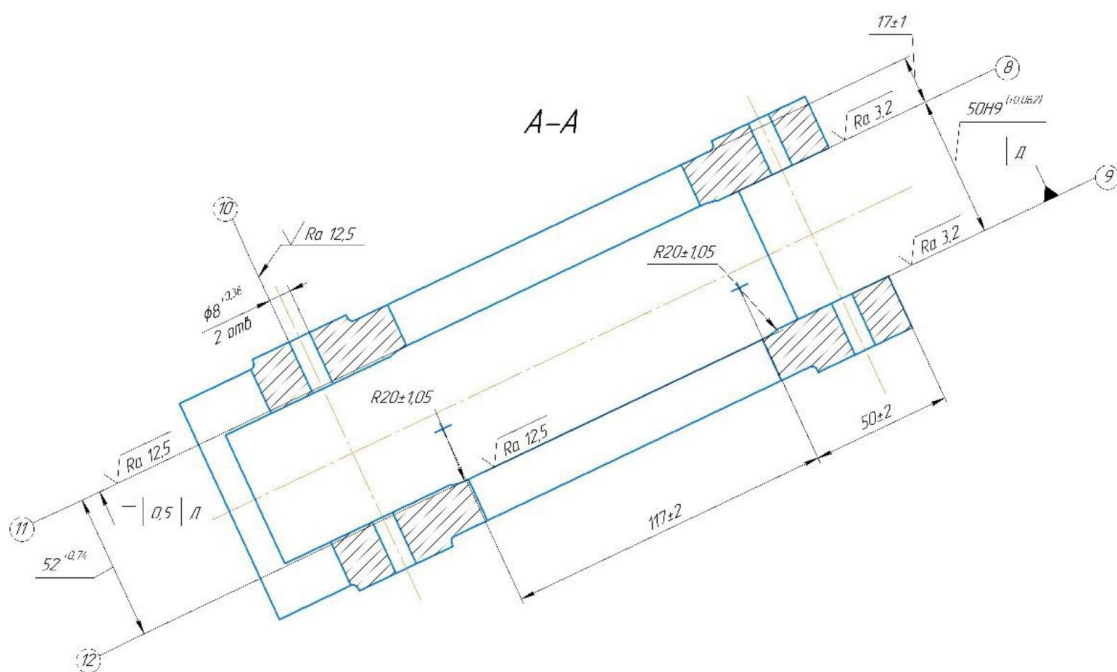
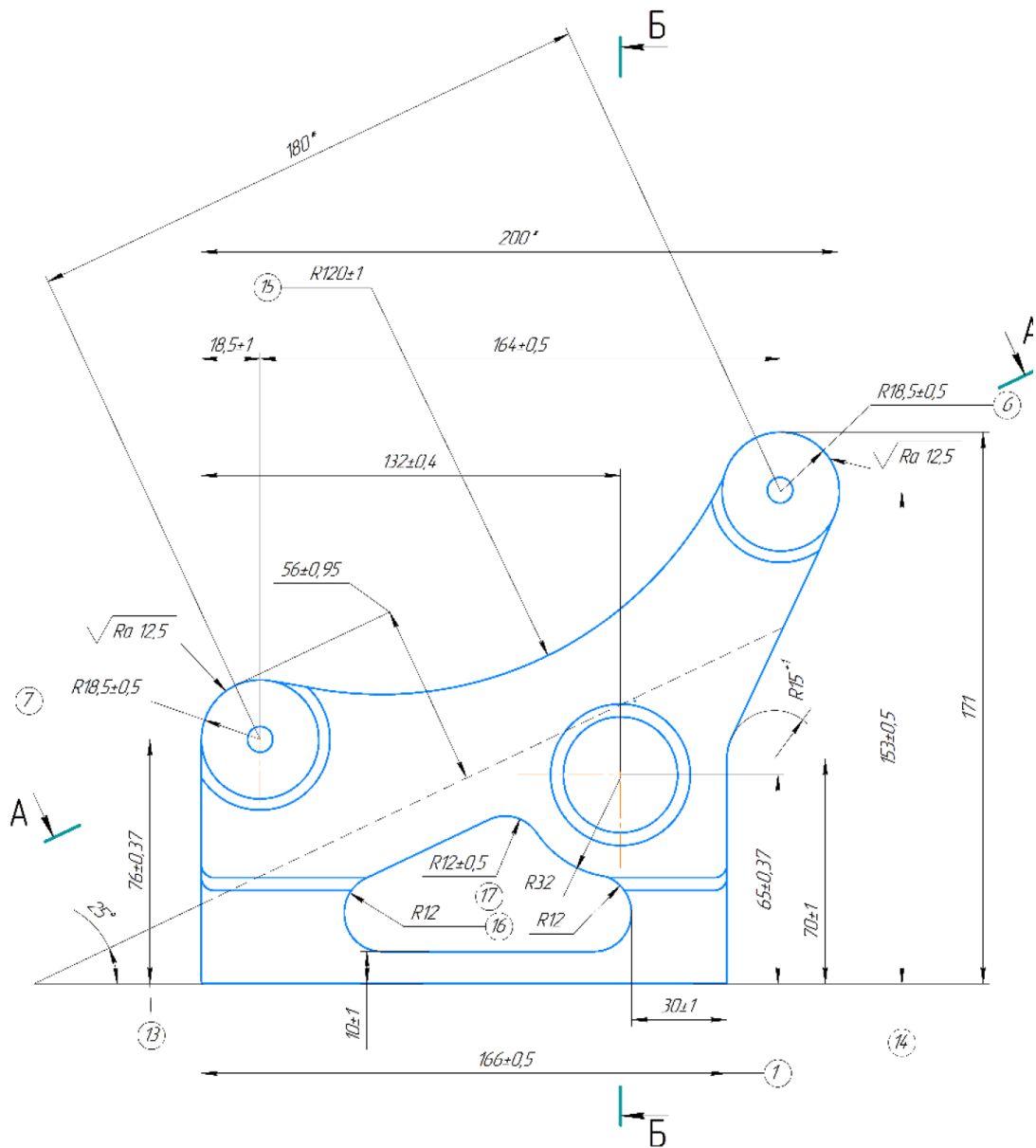


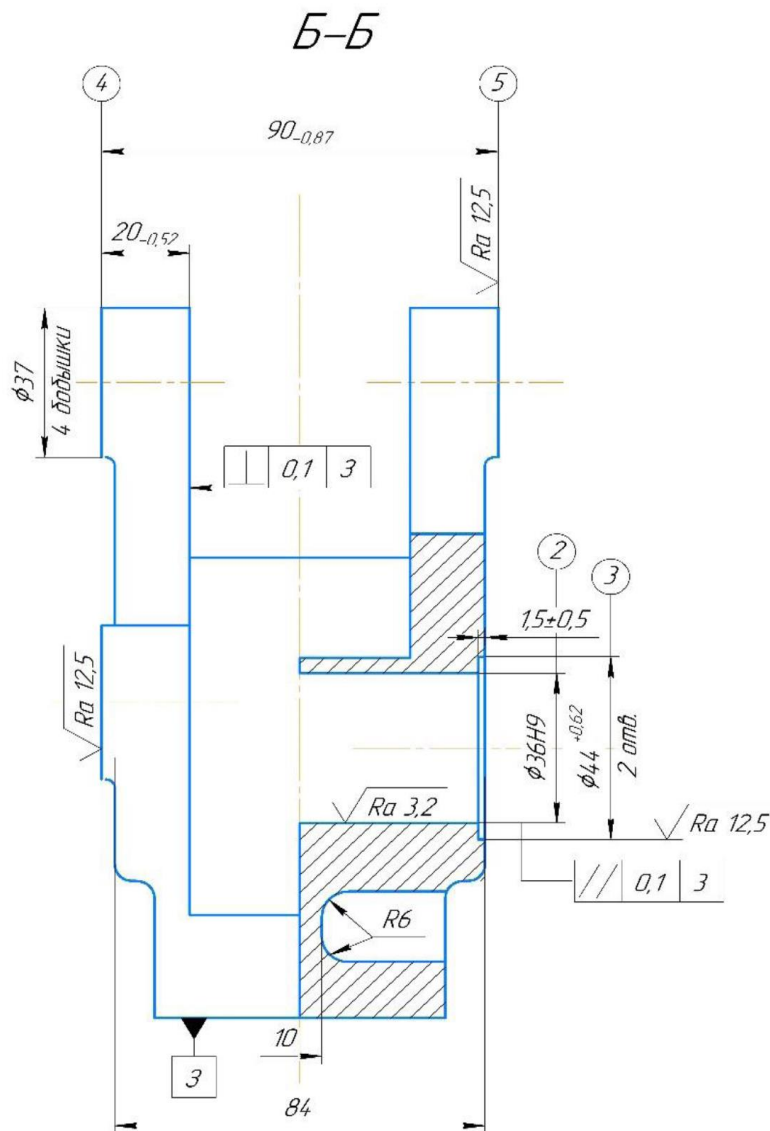
Рисунок 2.2 – Креслення деталі з нумерацією оброблюваних поверхонь

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ

Арк.

30



Продовження рис. 2.2

На основі аналізу технічних вимог до деталі необхідно забезпечити наступну точність розмірів:

- 1) основного отвору $\phi 36H9$ та розміру $50H9$ по базі Д за 9-м квалітетом;
- 2) решти розмірів:
 - діаметральних $\phi 44^{+0,62}$; $\phi 8^{+0,36}$;
 - радіальних $R20 \pm 1,05$; $R12 \pm 0,5$; $R18,5 \pm 0,5$; $R15^{+1}$; $R120 \pm 1$; $R6$ по H14\$
 - лінійних: $90_{-0,87}$; $20_{-0,52}$; $1,5 \pm 0,5$; 17 ± 1 ; 50 ± 2 ; 117 ± 2 ; $52^{+0,74}$; $166 \pm 0,5$; 10 ± 1 ; $76 \pm 0,37$; 30 ± 1 ; $65 \pm 0,37$; 70 ± 1 ; $153 \pm 0,5$; 10 , 84 , 171 по H14.

На основі аналізу технічних вимог до деталі також необхідно забезпечити наступну точність розташування поверхонь:

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 31 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

- допуск паралельності осі отвору $\varnothing 36H9$ щодо бази 3 не більше 0,1 мм;
- допуск симетричності поверхні $52^{+0,74}$ відносно бази Д не більше 0,5 мм;
- допуск перпендикулярності поверхні $20_{-0,52}$ відносно бази 3 не більше 0,1 мм.

Також необхідно забезпечити якість поверхневого шару:

- шорсткість поверхні отвору $\varnothing 36H9$ та розміру $50H9$ Ra 3,2 мкм;
- шорсткість інших оброблюваних поверхонь Ra 12,5 мкм.

2.2 Вибір технологічних баз

Вибір технологічних баз визначає точність лінійних розмірів, відносного положення поверхонь, одержуваних у процесі обробки, вибір різальних та вимірювальних інструментів, верстатних пристроїв та продуктивність обробки [7, 8].

Вихідними даними для вибору технологічних баз креслення деталі з усіма необхідними технічними вимогами та умови розташування і роботи деталі у вузлі [7, 8].

Для першої операції як бази застосовуються чорнові необроблені поверхні, якими є поверхня з R18,5 і поверхня $76 \pm 0,37$. Чистовими базами в даному випадку є технологічна база 3 (пов. 1 на рис. 2.2), поверхня $65 \pm 0,37$.

На першій операції (005 - Вертикально-фрезерна) обробляються дві бази за два установи для наступної технологічної операції: база 3 і поверхня з розміром $65 \pm 0,37$. Схеми базування заготовки на цій операції приведені на рис. 2.3. При цьому деталь встановлюється у спеціальний пристрій.

На наступній операції (операція 010 - Комплексна на високошвидкісному обробному центрі із ЧПК) за 2 установи обробляються всі поверхні деталі, до яких ставляться відповідні вимоги щодо точності та шорсткості. Схеми базування деталі на цій операції приведені на рис. 2.4.

Вибрані бази забезпечують дотримання всіх принципів базування: принципу постійності баз та принципу суміщення баз.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 32 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

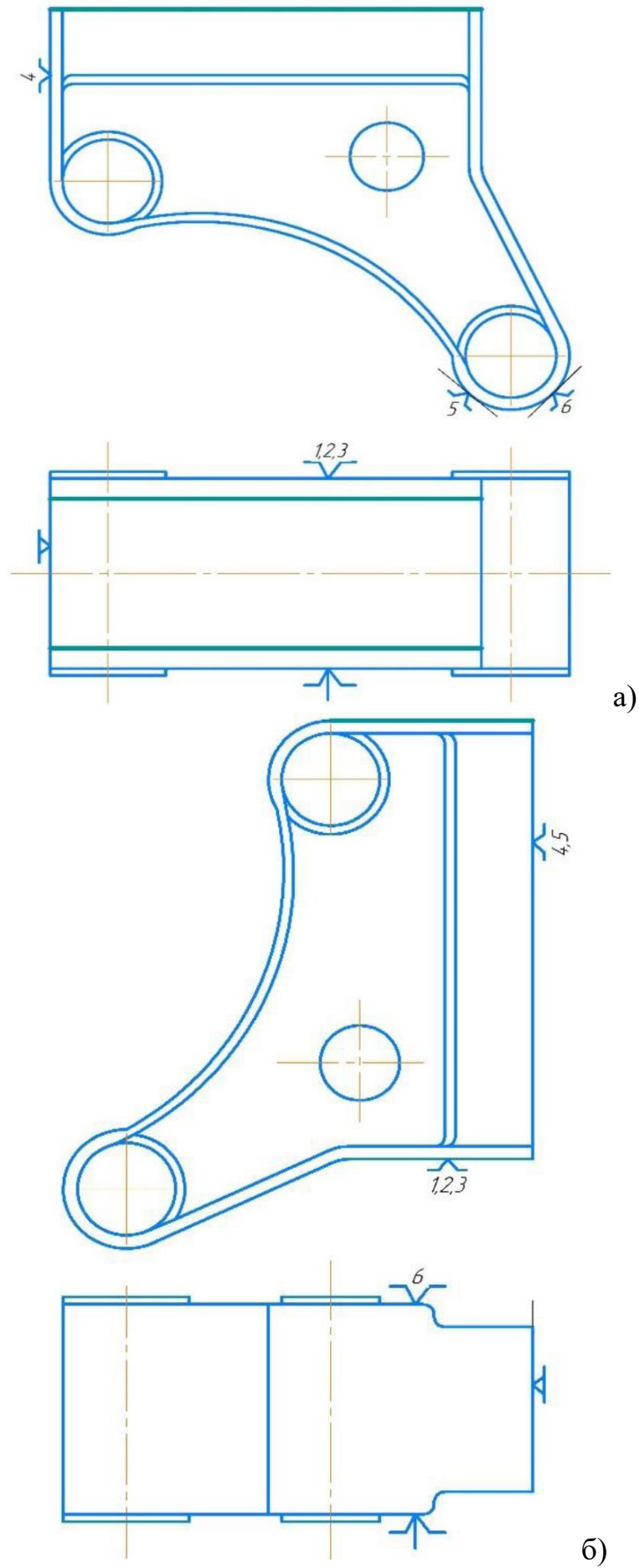


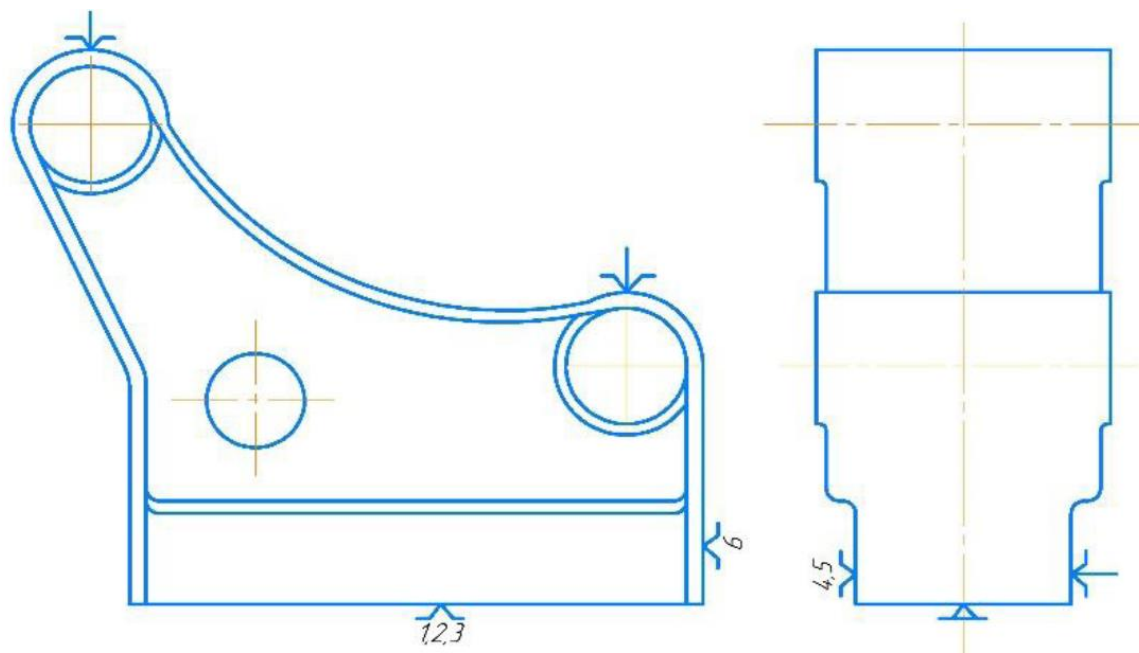
Рисунок 2.3 – Базування деталі на операції 005: а) установ А; б) установ Б

| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |

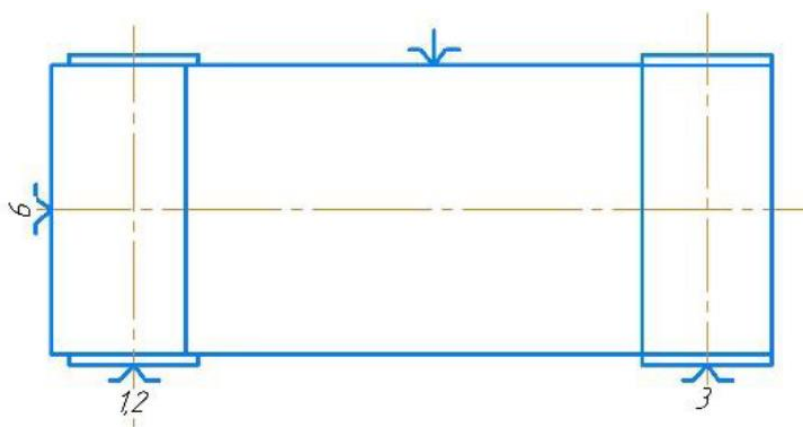
КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ

Арк.

33



а)



б)

Рисунок 2.4 – Базування деталі на операції 010: а) установ А; б) установ Б

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ

Арк.

34

2.3 Розробка технологічного маршруту механічного оброблення деталі

Розроблений технологічний маршрут механічного оброблення деталі «Кронштейн» приведений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Технологічний маршрут виготовлення деталі

| № операції | Назва технологічної операції | Зміст технологічної операції |
|------------|--|--|
| 005 | Вертикально-фрезерна | Установ А: Фрезерувати пов.1 (база 3). Установи Б: Фрезерувати пов. 13. |
| 010 | Комплексна на високошвидкісному обробному центрі з ЧПК | Установ А: 1. Фрезерувати 4 бобишки (пов. 4, 5); 2. Фрезерувати паз із двох сторін (пов. 16, 17); 3. Свердлити отв. Ø30 мм напрохід (пов. 2); 4. Розвернути отв. Ø36Н9 мм (пов. 2); 5. Цекувати отв. Ø44 мм з двох сторін (пов.3); 6. Фрезерувати паз розміром 48 попередньо (пов. 8, 9); 7. Свердлити 4 отв. Ø8 мм з двох сторін (пов. 10); 8. Фрезерувати паз 50Н9 з R20 остаточно (пов. 11, 12). Установ Б: 1. Фрезерувати облой (пов. 6, 7, 14, 15). |

2.4 Вибір металообробного обладнання

Згідно рекомендацій [7-9] здійснюємо вибір металообробного обладнання для виконання операцій технологічного процесу.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 35 |

Результати вибору записуємо у табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Технологічне обладнання для реалізації технологічного процесу

| Номер операції | Назва операції | Назва і модель металорізального верстату |
|----------------|--|--|
| 005 | Вертикально-фрезерна | Вертикально-фрезерний верстат мод. 6M13П |
| 010 | Комплексна на високошвидкісному обробному центрі з ЧПК | Обробний центр типу «біглайд» мод. GENIUS 500 фірми Cross Hüller |

2.5 Розроблення комплексної технологічної операції на високошвидкісному обробному центрі з ЧПК

2.5.1 Вибір різального інструменту та вимірювального інструменту






Від вибраного різального інструменту залежить якість оброблюваної поверхні та точність обробки. Різальний інструмент для оснащення обробного центра в умовах середньосерійного виробництва повинен мати такі властивості: високу різальну здатність; сприятливі умови стружковідведення; висока стійкість [7-9]. До інструментів, які задовольняють наведені вище вимоги, відносяться інструменти таких світових виробників, як Sandvik Coromant; Garant; Kennametal та ін. [10-12].

Вибрані різальні інструменти приведені у табл. 2.3

Таблиця 2.3. Різальні інструменти для реалізації технологічної операції

| № з/п | Назва переходу | Різальний інструмент |
|-------|-----------------------------------|---|
| 1. | Фрезерувати 4 бобишки (пов. 4, 5) | Торцева фреза Ø38,1 мм, державка RA390-038R19-11H фірми |

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 36 |





| | | |
|----|--|---|
| | | Sandvik Coromant; пластини R390-11T320E-NL H13A фірми Sandvik Coromant  |
| 2. | Фрезерувати паз із двох сторін (пов. 16, 17) | Кінцева (твердосплавна) фреза №202281 Ø20 мм фірми Garant  |
| 3. | Свердлити отв. Ø30 мм напрохід (пов. 2) | Свердло Ø30 мм державка 880-D3000L32-03 фірми Sandvik Coromant; пластини фірми Sandvik Coromant  |
| 4. | Розвернути отв. Ø36H9 мм (пов. 2) | Розвертка Ø36H9 №P16003 фірми Garant  |
| 5. | Цекувати отв. Ø44 мм з двох сторін (пов.3) | Цековка комбінована Ø44 мм №156730 фірми GFS  |

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ

Арк.

37

| | | |
|----|--|---|
| 6. | Фрезерувати паз розміром 48 попередньо (пов. 8, 9) | Тристороння дискова фреза Ø200 мм N331.32-200 S 50 LM 17.50 фірми Sandvik Coromant; пластини R(L) 331.1A-11 5015H-WL 1130 фірми Sandvik Coromant  |
| 7. | Свердлити 4 отв. Ø8 мм з двох сторін (пов. 10) | Твердосплавне свердло Ø8 мм №1223068 фірми Garant  |
| 8. | Фрезерувати паз 50H9 з R20 остаточно (пов. 11, 12) | Кінцева твердосплавна фреза №202281 Ø 20 фірми Garant  |
| 9. | Фрезерувати облой (пов. 6, 7, 14, 15) | Кінцева твердосплавна фреза №202281 Ø 20 фірми Garant  |

Для комплексної технологічної операції на обробному центрі з ЧПК вибрано наступний вимірювальний інструмент [13, 14]:

- скоба 90x14 8102-0052x14 ГОСТ 18355-73;
- щуп 3мм ГОСТ 8925-68;

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 38 |

- штангенрейсмус ШЦ-I-125-0,1;
- штангенрейсмус ШЦ-II 160-0,1;
- шаблон R120 6068-0149 спеціальний;
- штангенглибиномір ШГ-160;
- кутомір УМ-15 ГОСТ 5378-66;
- калібр 50Н9 8154-0104 спеціальний;
- скоба 20h14 8102-0015h14 ГОСТ 18355-73;
- пробка 30h14 8133-0946 спеціальна;
- штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1;
- пробка 44Н14 8133 - 0957Н14.

2.5.2 Вибір режимів різання

Для комплексної технологічної операції на високошвидкісному обробному центрі з ЧПК вибрано наступні режими різання на основі рекомендацій фірм-виробників інструменту Sandvik Coromant; Garant [10, 11].

Частота обертання шпинделя визначалася за залежністю:

$$n = \frac{1000 \cdot 60 \cdot V}{\pi D}, \text{ об/хв} \quad (2.1)$$

де V – швидкість різання;

D – діаметр різального інструменту (фрез, свердел, розвертки, цековки)

Вибрані режими різання приведені у табл. 2.4

Таблиця 2.4. Вибрані режими різання для реалізації технологічної операції

| № переходу | Кількість проходів | Кількість позицій | Режими різання | | | |
|------------|--------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------|
| | | | Глибина різання, t , мм | Подача на оберт, S , мм/об (мм/зуб) | Частота обертання шпинделя, n , об/хв | Швидкість різання, V , м/хв |
| 1 | 2 | 2 | 3 | 0,18 | 4358 | 520 |

Продовження табл. 2.4

| | | | | | | |
|---|---|---|-----|------|------|-----|
| 2 | 4 | 2 | 28 | 0,20 | 4140 | 130 |
| 3 | 1 | 1 | 2,5 | 0,17 | 4883 | 460 |
| 4 | 1 | 1 | 3 | 0,17 | 2212 | 250 |
| 5 | 1 | 2 | 4 | 0,12 | 289 | 40 |
| 6 | 3 | 1 | 61 | 0,11 | 636 | 400 |
| 7 | 4 | 2 | 4 | 0,17 | 5917 | 150 |
| 8 | 1 | 1 | 61 | 0,20 | 4140 | 130 |
| 9 | 4 | 1 | 5 | 0,20 | 4140 | 130 |

| | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 40 |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підп.</i> | <i>Дата</i> | | |

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Структура проектаного моторизованого шпинделя головного руху

Моторизований шпиндель (рис. 3.1) є мехатронним модулем, який об'єднує в одному блоці шпиндель з опорами, вбудований електродвигун, механізм затиску інструментальної оправки, датчик зворотного зв'язку за положенням шпинделя та датчиків системи діагностики [4]. Він обслуговується підсистемами охолодження двигуна та опор шпинделя, змащування опор, очищення інструментального конуса, а також підсистемою подачі змащувально-охолоджувальної рідини [4].

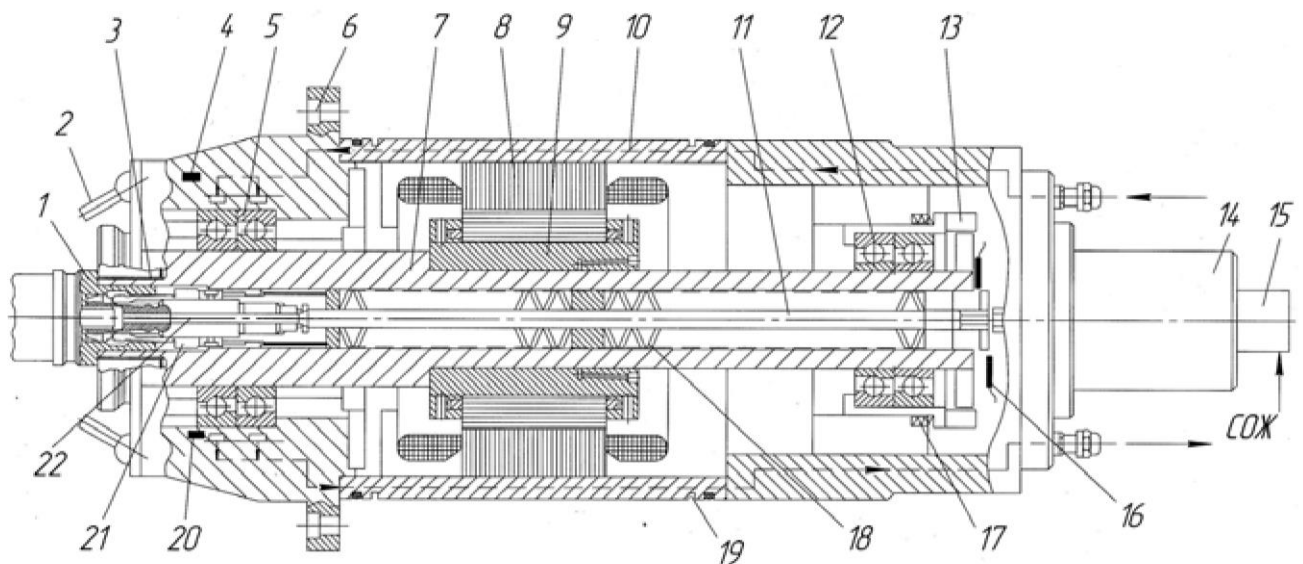


Рисунок 3.1 – Складові проектаного моторизованого шпинделя головного руху

Привідний двигун складається із гільзи 9 з ротором, встановлених на шпинделі 7, та статора 8, поміщеного у корпус 10. Для охолодження статора використовується вода з антикорозійними присадками, що проходить по гвинтовому закритому каналу 19. Шпиндель 7 встановлений на опорах 5 і 12, що скомпоновані з високошвидкісних прецизійних радіально-упорних кулькових

| | | | | |
|--------------------------------|----------------|----------|--|-------|
| КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |
| Розробив | Качор Р.І. | | | |
| Перевірів | Буховець В.М. | | | |
| Н. контр. | Кобельник В.Р. | | | |
| Затв. | Крупа В.В. | | | |
| Конструкторський розділ | | | Літ. | Аркуш |
| | | | Н | 41 |
| | | | ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль | |

підшипників. Натяг у підшипниках забезпечується пружинами 17 або іншими пристроями створення попереднього натягу. Для підведення та відведення охолоджувальної рідини підшипників 5, у корпусі передбачені поздовжні отвори 10. Ущільнення опор, як правило лабіринтне, при цьому для передньої опори передбачено повітряне блокування. Для управління шпинделем за швидкістю обертання і його положенням встановлено датчик 13. Отвори 6 у фланці призначені для кріплення моторшпинделя в корпусі шпиндельної бабки.

Сопла 2 служать для направлення в зону різання змащувально-охолоджувальної рідини (ЗОР), що вводиться через муфту 15. Якщо охолодження здійснюється через тіло інструменту, ЗОР надходить по каналу, що є в тязі 11, а потім по отвору 22. На задньому фланці знаходяться штуцери: для подачі стисненого повітря, що використовується для обдування інструментальної оправки; для входу та виходу ЗОР; для подачі стисненого повітря у повітряне ущільнення. На задньому фланці також знаходяться електричні роз'єми: для підведення силового живлення та заземлення; для живлення датчиків механізму затиску інструменту та датчика швидкості обертання шпинделя.

Для затягування інструментальної оправки 1 служить пакет тарілчастих пружин 18, що діють на важелі 21 механізму захоплення. Оправка звільняється гідроциліндром 14. Затиск і звільнення оправлення контролюються датчиками 16. Перед закріпленням нової оправки конічні поверхні її і гнізда шпинделя, а також їх торці очищуються стиснутим повітрям, що надходить каналом 3.

У моторшпиндель вбудовані датчики системи діагностування його стану: датчики 20 температури шпиндельних опор; датчики температури двигуна, що знаходяться в обмотці статора; вібродатчик 4, що контролює рівень вібрацій моторшпинделя; датчик, що контролює осьове зміщення шпинделя.

3.2 Вибір параметрів і технічних характеристик приводного двигуна

Виходячи із кінематичних та силових характеристик приводу головного руху верстата-аналога вибираємо вмонтовуваний синхронний електродвигун

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 42 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

мод.1FE1084-6WR-1 фірми Siemens, технічні характеристики якого подані у табл.3.1 [15].

Таблиця 3.1. Технічні характеристики синхронного двигуна 1FE1084-6WR-1

| № з/п | Характеристика привідного двигуна | Значення |
|-------|---|----------|
| 1. | Номінальна потужність, P_n , кВт | 27,2 |
| 2. | Номінальний обертовий момент, M_n , Н·м | 130 |
| 3. | Максимальний обертовий момент, M_{max} , Н·м | 215 |
| 4. | Номінальна частота обертання, $n_{ном}$, хв^{-1} | 2000 |
| 5. | Максимальна частота обертання, $n_{ном}$, хв^{-1} | 9000 |
| 6. | Постійна напруга, $V/1000 \text{ хв}^{-1}$ | 150 |
| 7. | Номінальний струм, I_n , А | 60 |
| 8. | Максимальний струм, I_{max} , А | 120 |
| 9. | Момент інерції ротора, J_m , $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ | 0,02067 |

Розміри ротора привідного синхронного електродвигуна 1FE1084-6WR-1 приведені на рис. 3.2. Значення розмірів відповідно до [15]: $d=74$ мм; $d1=74,2$ мм; $db=80$ мм; $L1=235$ мм; $L2=200$ мм; $L3=195$ мм; $L4=30$ мм; $L5=38,5$ мм.

Розміри статора привідного синхронного електродвигуна 1FE1084-6WR-1 приведені на рис. 3.3. Значення розмірів відповідно до [15]: $D=190$ мм; $D1=188$ мм; $D2=189,5$ мм; $L=295$ мм; $L2=200$ мм; $L3=195$ мм; $L4=30$ мм; $L5=38,5$ мм.

3.3 Графіки зміни потужності та обертового моменту на шпинделі

Важливими технічними параметрами моторизованого шпинделя, що використовується в обробних центрах, є зміна потужності та обертового моменту на шпинделі в різних режимах роботи синхронного вмонтованого електричного двигуна. Графіки зміни потужності та обертового моменту на шпинделі для привідного вмонтованого синхронного електродвигуна мод.1FE1084-6WR-1 фірми Siemens [15] приведені на рис. 3.4.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 43 |

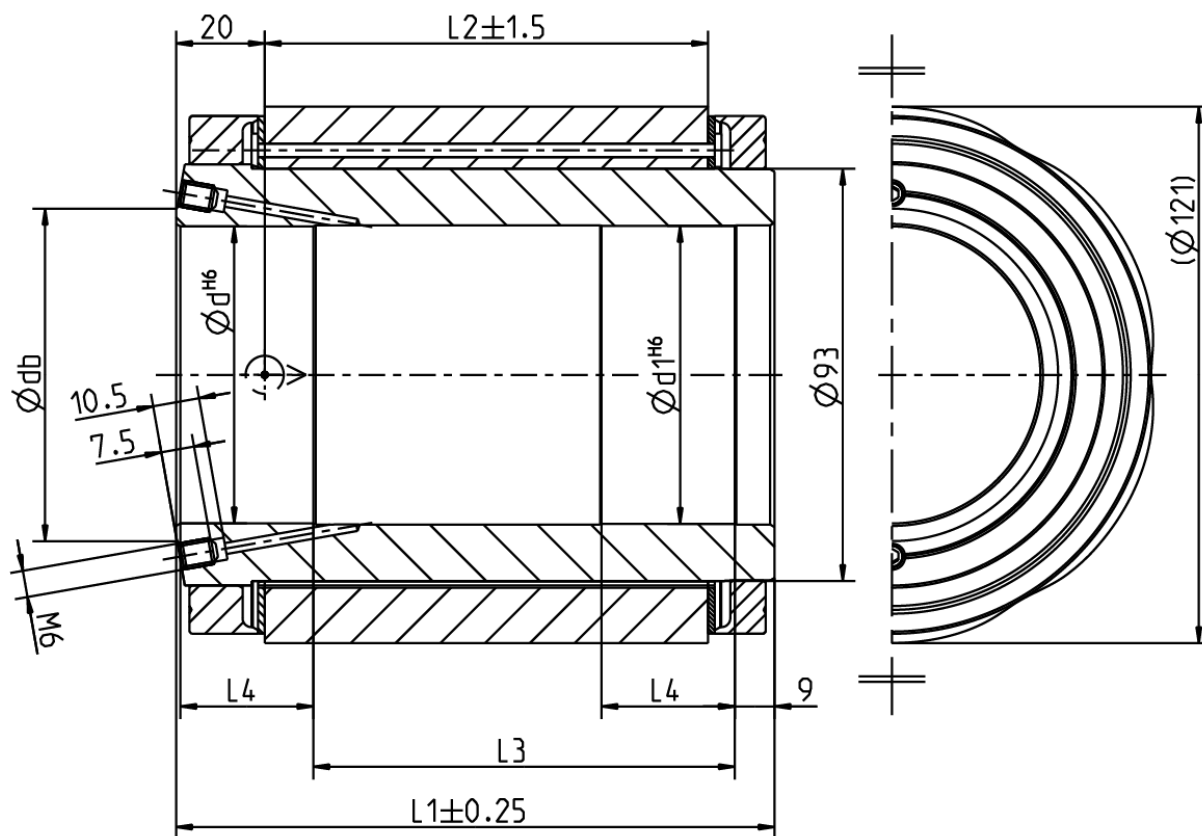


Рисунок 3.2 – Розміри ротора привідного синхронного електродвигуна

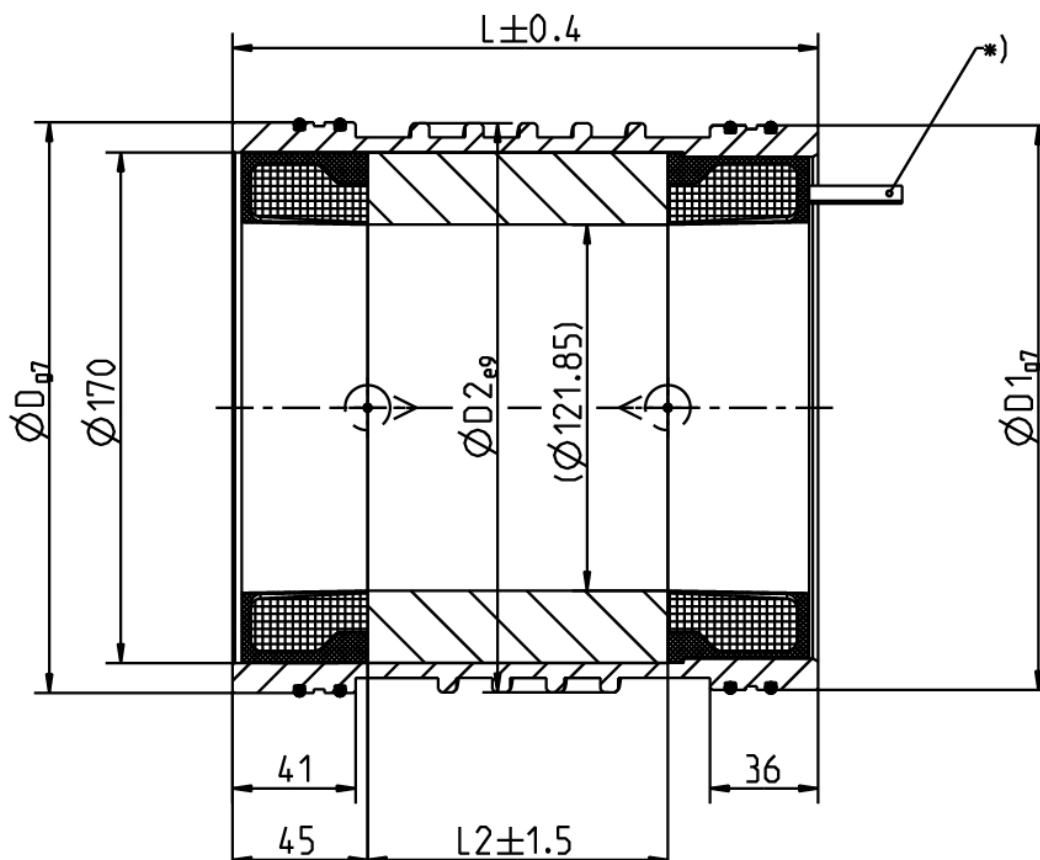


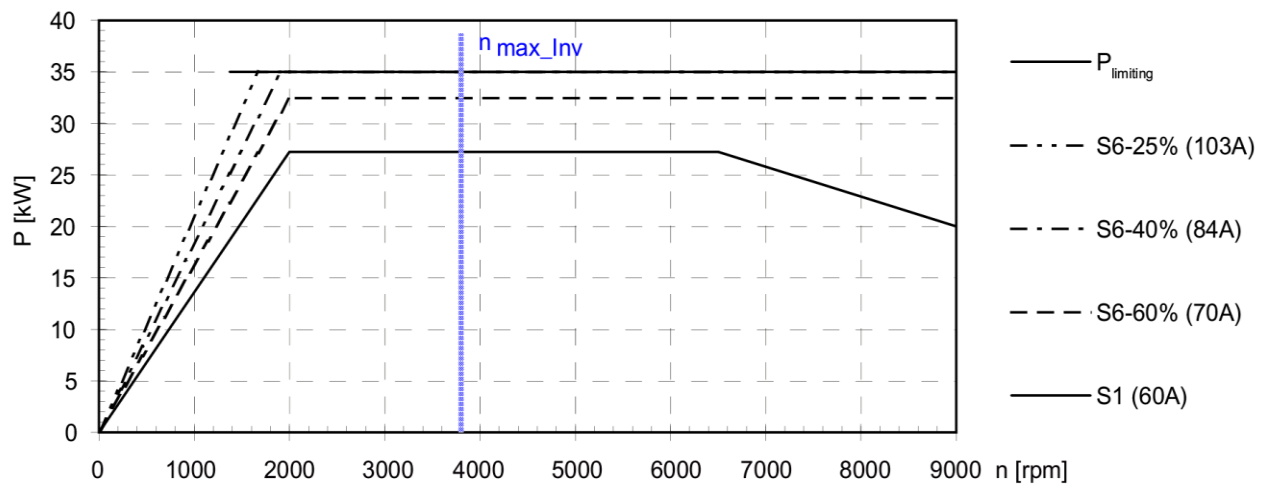
Рисунок 3.3 – Розміри статора привідного синхронного електродвигуна

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |
| | | | | |

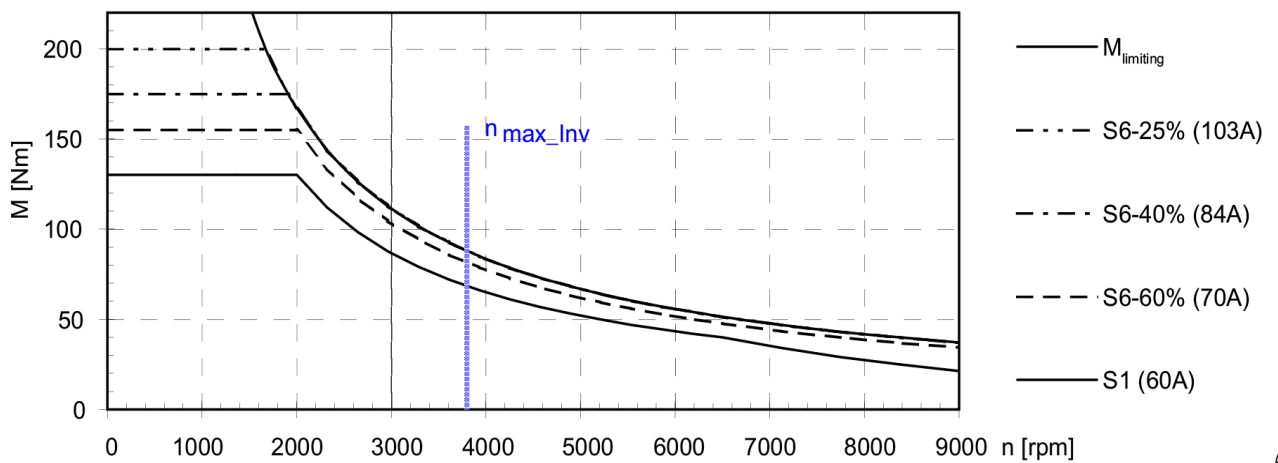
КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ

Арк.

44



а)



б)

Рисунок 3.4 –Графіки зміни потужності (а) та обертового моменту (б) на шпинделі для привідного синхронного електродвигуна мод.1FE1084-6WR-1

Як видно із графіків (рис. 3.4) точкою перелому постійного крутного моменту та постійної потужності, коли двигун працює неперервно (режим S1), є точка номінальної частоти обертання, яка рівна 2000 об/хв. У цій точці крутний момент та потужність двигуна мають максимальні значення, і при цьому досягається оптимальна робоча ефективність. При максимальній частоті обертання робоча ефективність моторизованого шпинделя є низькою, тому він не повинен працювати на цій частоті обертання протягом тривалого часу.

Індикаторами крутного моменту моторизованого шпинделя є максимальний та номінальний крутні моменти. Якщо крутний момент, що сприймається моторизованим шпинделем, перевищує максимальне значення, його швидкість обертання різко зменшиться, навіть до нуля. Тому миттєвий максимальний

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ

Арк.

45

крутний момент під навантаженням не може перевищувати максимальний крутний момент моторизованого шпинделя, а його робочий крутний момент повинен бути трохи нижчим за номінальний крутний момент під час роботи шпинделя.

3.4 Розробка конструкції та розрахунок шпиндельного вузла мотор-шпинделя

3.4.1 Вибір компоувальної схеми шпиндельного вузла та типу опор

Кінець шпинделя високошвидкісного обробного центра з ЧПК повинен мати конструкцію, яка дозволяє автоматично закріплювати інструменти та оправки з хвостовиком виконання А, конструкція і розміри якого регламентовані стандартами ISO 12164-1 та DIN 69893.

Виходячи із найбільшого розміру встановлюваних оправок з інструментом у шпиндель верстата-аналога, вибираємо передній кінець шпинделя HSK 80 із розмірами, приведеними на рис. 3.5 [16].

Виходячи із потужності моторизованого шпинделя та його максимальної частоти обертання $n_{\max}=9000$ об/хв вибрано схему опор шпинделя, приведену на рис. 3.6, для якої параметр $dn_{\max} \cdot 10^5 = 8,8-12,0$ мм/хв [17]. Така компоновка шпинделя передбачає розташування по схемі «тандем» двох кулькових радіально-упорних підшипників у передній та задній опорах, які у шпиндельному вузлі відтворюють схему «О». Це призводить до додаткового збільшення жорсткості в осьовому напрямку [18].

Підшипники задньої опори встановлені в рухомій нефіксованій лінійній втулці, яка навантажується пружинами, що розміщені по колу. Лінійна кулькова втулка забезпечує відносний рух з низьким тертям між корпусом і незафіксованою втулкою. Завдяки поєднанню осьового руху та прикладання сили пружиною, попередній натяг у пакеті підшипників задньої опори значною мірою не залежить від різниці температур між зовнішнім і внутрішнім кільцями. Тому

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 46 |

попередній натяг задньої опори залишається майже постійним у всьому діапазоні частот обертання шпинделя.

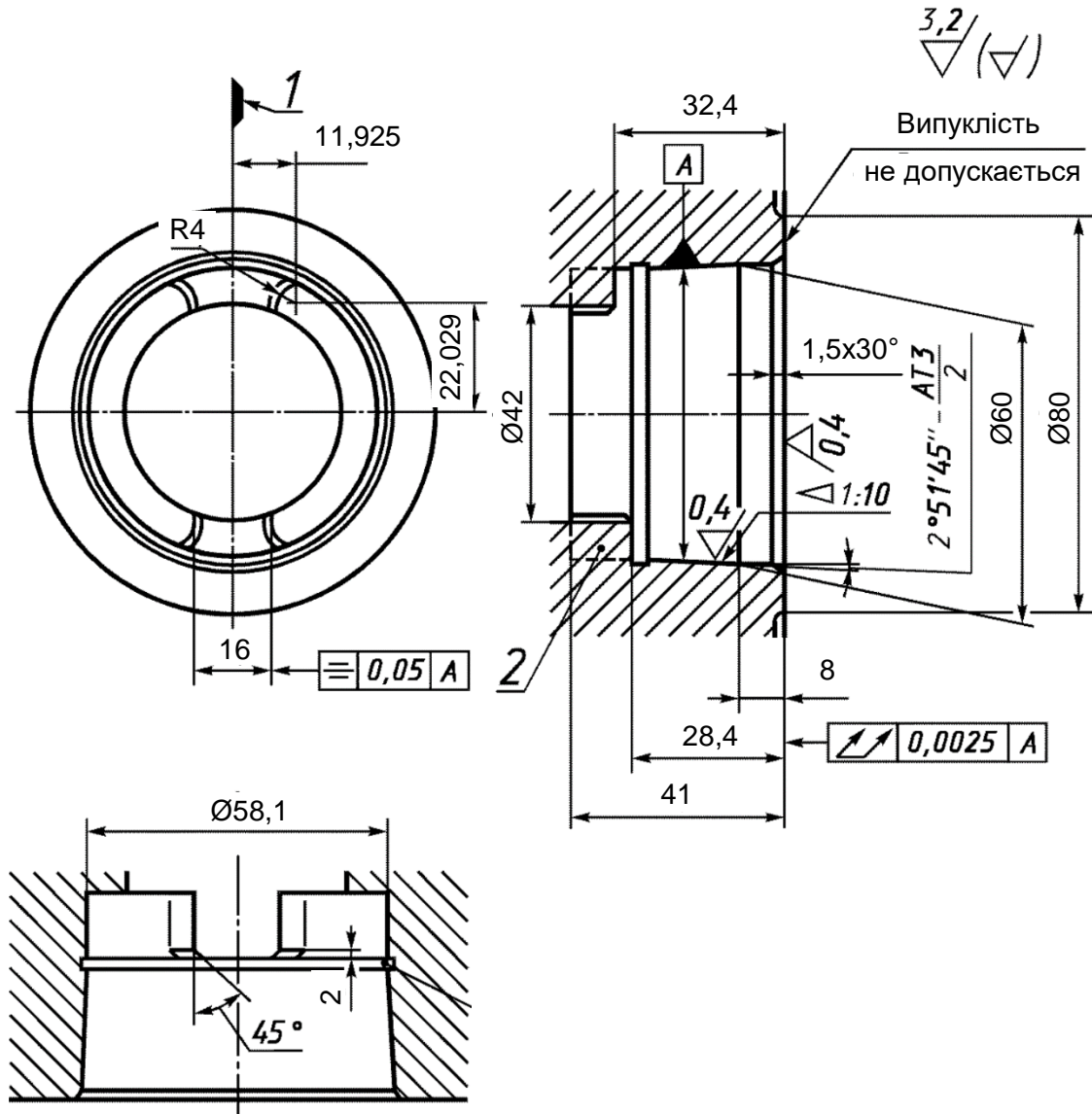


Рисунок 3.5 – Розміри приєднувального кінця шпинделя HSK 80

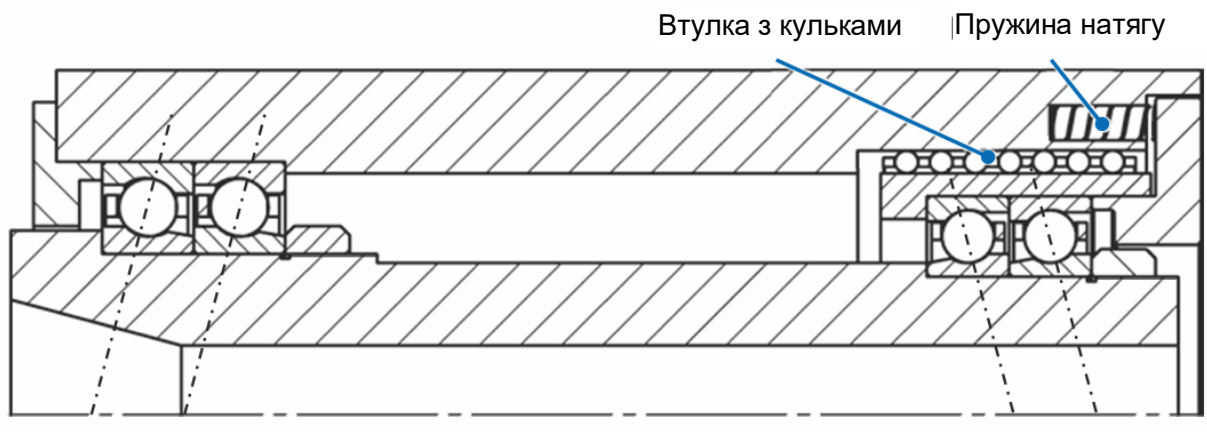


Рисунок 3.6 – Компонувальна схема швидкохідного шпинделя на радіально-упорних кулькових підшипниках

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ

Арк.

47

Діаметр шийки шпинделя під передню опору визначаємо за залежністю [17]:

$$D = \frac{P_n}{0,1 \dots 0,35}, \quad (3.1)$$

де P_n – номінальна потужність моторизованого шпинделя, кВт.

Підставивши значення у залежність (3.1), отримаємо:

$$D = \frac{27,2}{0,1 \dots 0,35} = 272 \dots 77,7 \text{ мм.}$$

Виходячи із діаметра шпинделя під посадку ротора привідного вмонтованого синхронного електродвигуна, який рівний 74 мм, приймаємо діаметр шийки шпинделя під передню опору $D = 100$ мм.

Виходячи із конструктивних міркувань діаметр шийки шпинделя під задню опору приймаємо $d = 65$ мм.

Тоді параметр швидкохідності моторизованого шпиндельного вузла:

$$d \cdot n_{\max} = 100 \cdot 9000 = 9 \cdot 10^5 \text{ мм/хв.}$$

Отже компоновальна схема шпиндельного вузла по швидкохідності вибрана правильно.

В якості опор шпиндельного вузла виберемо радіально-упорні підшипники з керамічними кульками та сталевими кільцями фірми GMN. Вибір підшипників здійснимо за допомогою пакета прикладних програм Globus фірми GMN [19], головне меню якого приведене на рис. 3.7.

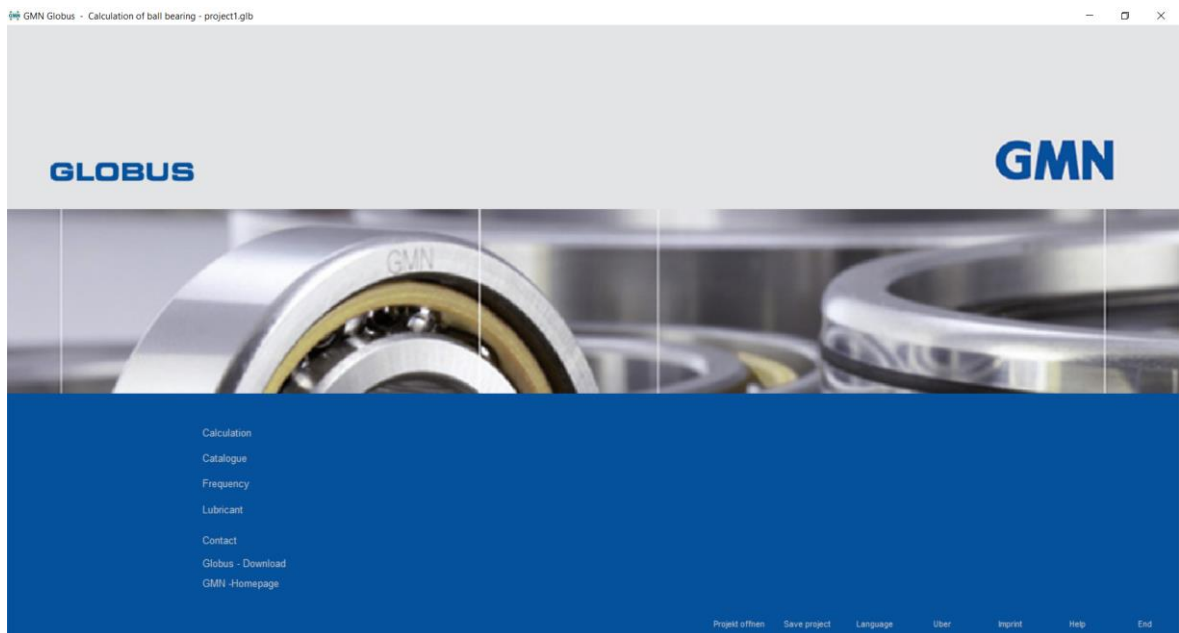


Рисунок 3.7 – Головне меню пакета прикладних програм Globus фірми GMN

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 48 |

Відкривши вкладку «Catalogue» та ввівши внутрішній діаметр підшипника 100 мм і матеріал кульки «Ceramic» (рис. 3.8) за допомогою пакета прикладних програм Globus обрано шпиндельний підшипник передньої опори марки HY S 61920 C TA P4+ фірми GMN, геометричні, кінематичні параметри та параметри навантаження якого приведені у додатку 1.

У цій самій вкладці ввівши внутрішній діаметр підшипника 65 мм і матеріал кульки «Ceramic» (рис. 3.9) обрано шпиндельний підшипник задньої опори марки HY S 6013 C TA P4+ фірми GMN, геометричні, кінематичні параметри та параметри навантаження якого приведені у додатку 2.

GMN Globus - Calculation of ball bearing - project1.glb

GMN Data Sheet
High Precision Ball Bearing

Spindle Ball Bearing
HY S 61920 C TA P4+

GMN Globus v10.4.4479
Date: 07.04.2026

BALL BEARING DATA

| | | |
|---------------------|------|---------------------|
| Designation | []: | HY S 61920 C TA P4+ |
| Bearing design | []: | S |
| bearing type / size | []: | 61920 |
| Ball material | []: | Ceramic |
| Cage | []: | TA |
| Seal | []: | - |
| Precision | []: | P4+ |

GEOMETRICAL DATA

| | | | |
|--------|--------|--------|--|
| d | [mm]: | 100 | Bore diameter |
| D | [mm]: | 140 | Outer diameter |
| B | [mm]: | 20 | Width of single bearing |
| Dw | [mm]: | 11,906 | Ball diameter |
| Z | [pcs]: | 25 | Number of balls |
| r 1,2 | [mm]: | 0,6 | Chamfer (min) |
| r 3,4 | [mm]: | 0,6 | Chamfer, open side (min) |
| d1 | [mm]: | 112,8 | Outer diameter of inner ring |
| d2 | [mm]: | - | Outer diameter of inner ring (open side) |
| dT | [mm]: | 116,5 | Oiling nozzle position |
| dm | [mm]: | 120 | Pitch circle diameter |
| D1 | [mm]: | 127,2 | Inner diameter of outer ring |
| ra max | [mm]: | 0,6 | Undercut of associated component |
| rb max | [mm]: | 0,6 | Undercut of associated component (open side) |

Рисунок 3.8 – Вікно параметрів вибраного підшипника передньої опори

3.4.2 Розрахунок осьової та радіальної жорсткості опор шпиндельного вузла

Відповідно до [17] опори, які складаються із декількох кулькових радіально-упорних підшипників, називаються комплексними. Їх можна подати у вигляді двох умовних опор.

GMN Data Sheet
High Precision Ball Bearing

Spindle Ball Bearing
HY S 6013 C TA P4+

GMN Globus v10.4.4479
Date: 07.04.2026

BALL BEARING DATA

| | | |
|---------------------|------|----------------------|
| Designation | []: | HY S 6013 C TA P4+ |
| Bearing design | []: | S |
| bearing type / size | []: | 6013 |
| Ball material | []: | Ceramic |
| Cage | []: | TA |
| Seal | []: | 2RZ on request |
| Precision | []: | P4+ (UP+ on request) |

GEOMETRICAL DATA

| | | | |
|--------|-------|-------|--|
| d | [mm] | 65 | Bore diameter |
| D | [mm] | 100 | Outer diameter |
| B | [mm] | 18 | Width of single bearing |
| Dw | [mm] | 9,525 | Ball diameter |
| Z | [pcs] | 23 | Number of balls |
| r 1,2 | [mm] | 1,1 | Chamfer (min) |
| r 3,4 | [mm] | 1 | Chamfer, open side (min) |
| d1 | [mm] | 76,9 | Outer diameter of inner ring |
| d2 | [mm] | - | Outer diameter of inner ring (open side) |
| dT | [mm] | 79,9 | Oiling nozzle position |
| dm | [mm] | 82,5 | Pitch circle diameter |
| D1 | [mm] | 88,2 | Inner diameter of outer ring |
| ra max | [mm] | 1 | Undercut of associated component |

Рисунок 3.9 – Вікно параметрів вибраного підшипника задньої опори

Передню і задню опори моторизованого шпинделя представляємо у вигляді комплексних опор, що складаються з умовних опор 1 та 2 з числом підшипників в умовних опорах $i_1=1$ та $i_2=1$ (рис. 3.10).

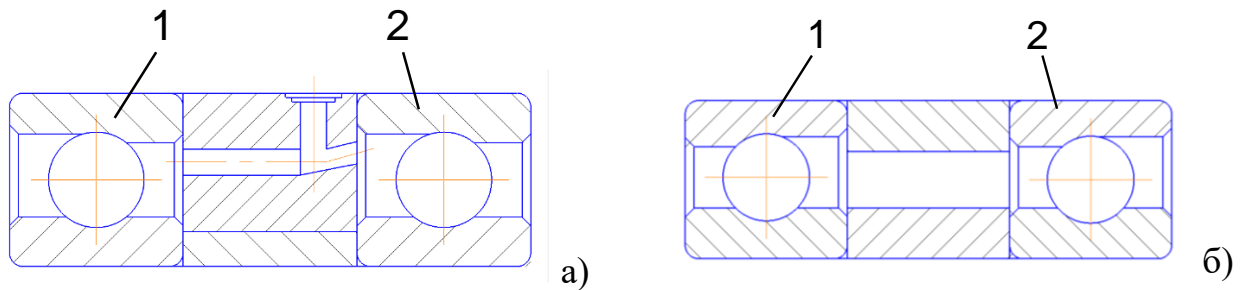


Рисунок 3.10 – Передня (а) та задня (б) комплексні опори моторизованого шпиндельного вузла

Осьова жорсткість комплексної опори моторизованого шпинделя визначиться за залежністю [17]:

$$j_o = 1,5 \cdot C^{\frac{2}{3}} \cdot F_H^{\frac{1}{3}} \cdot \left(i_1^{\frac{2}{3}} + i_2^{\frac{2}{3}} \right), \quad (3.2)$$

де C – коефіцієнт жорсткості підшипника, F_H - сила натягу;

i_1, i_2 - число підшипників в умовних опорах 1 і 2;

α - фактичний кут контакту в підшипнику, який змінюється під дією попереднього натягу.

Коефіцієнт жорсткості підшипника визначається за залежністю [17]:

$$C = 10^5 \cdot z \cdot \sin^{\frac{5}{2}} \alpha \cdot \sqrt{1,25 d_{\kappa}}, \quad (3.3)$$

де z – число тіл кочення в підшипнику;

d_{uu} - діаметр кульки.

Визначаємо осьову жорсткість передньої опори моторизованого шпинделя, яка складається з двох радіально-упорних підшипників марки NU S 61920 C TA P4+ фірми GMN. Для цих підшипників за даними додатку 1 число тіл кочення в підшипнику $z = 25$, діаметр кульки $d_{\kappa} = 11,9$ мм, кут контакту в підшипнику $\alpha_{\kappa} = 15^{\circ}$, сила попереднього середнього натягу $F_H = 790$ Н.

$$\text{При } \frac{F_H \cdot 1000}{z \cdot (d_{uu})^2} = \frac{790 \cdot 1000}{25 \cdot (11,9)^2} = 239, \Delta\alpha = 1,1^{\circ} [17].$$

Тоді $\alpha = \alpha_{\kappa} + \Delta\alpha = 15^{\circ} + 1,1^{\circ} = 16,1^{\circ}$.

Підставивши значення у (3.3) отримаємо:

$$C = 10^5 \cdot 25 \cdot \sin^{\frac{5}{2}} 16,1 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 11,9} = 3,4 \cdot 10^5.$$

Тоді за залежністю (3.2) осьова жорсткість передньої комплексної опори:

$$j_{on} = 1,5 \cdot (3,4 \cdot 10^5)^{\frac{2}{3}} \cdot 790^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1^{\frac{2}{3}} + 1^{\frac{2}{3}} \right) = 135 \cdot 10^3 \text{ Н/мм.}$$

Визначаємо осьову жорсткість задньої опори моторизованого шпинделя, яка складається з двох радіально-упорних підшипників марки NU S 6013 C TA P4+ фірми GMN. Для цих підшипників за даними додатку 2 число тіл кочення в підшипнику $z = 23$, діаметр кульки $d_{\kappa} = 9,53$ мм, кут контакту в підшипнику $\alpha_{\kappa} = 15^{\circ}$, сила попереднього середнього натягу $F_H = 525$ Н.

$$\text{При } \frac{F_H \cdot 1000}{z \cdot (d_{uu})^2} = \frac{525 \cdot 1000}{23 \cdot (9,53)^2} = 251, \Delta\alpha = 1,11^{\circ} [17].$$

Тоді $\alpha = \alpha_{\kappa} + \Delta\alpha = 15^{\circ} + 1,11^{\circ} = 16,11^{\circ}$.

Підставивши значення у (3.3) отримаємо:

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 51 |

$$C = 10^5 \cdot 23 \cdot \sin^{\frac{5}{2}} 16,11 \cdot \sqrt{1,25 \cdot 9,53} = 3,22 \cdot 10^5.$$

Тоді за залежністю (3.2) осьова жорсткість задньої комплексної опори:

$$j_{oz} = 1,5 \cdot (3,22 \cdot 10^5)^{\frac{2}{3}} \cdot 525^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1^{\frac{2}{3}} + 1^{\frac{2}{3}} \right) = 114 \cdot 10^3 \text{ Н/мм.}$$

Радіальна жорсткість умовної опори визначиться за залежністю:

$$j_{r1(2)} = \frac{K_4 \cdot i_{1(2)}^{\frac{2}{3}} \cdot j_o}{1,5 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \left(i_1^{\frac{2}{3}} + i_2^{\frac{2}{3}} \right)}, \quad (3.4)$$

де K_4 – коефіцієнт, що характеризує розподіл навантаження між тілами кочення;

За [17] $K_4 = 0,52$.

Для передньої опори моторизованого шпинделя радіальна жорсткість умовних опор 1 та 2:

$$j_{r1}^n = j_{r2}^n = \frac{0,52 \cdot 1^{\frac{2}{3}} \cdot 135 \cdot 10^3}{1,5 \cdot \operatorname{tg}^2 15^\circ \left(1^{\frac{2}{3}} + 1^{\frac{2}{3}} \right)} = 326 \cdot 10^3 \text{ Н/мм.}$$

Для задньої опори моторизованого шпинделя радіальна жорсткість умовних опор 1 та 2:

$$j_{r1}^3 = j_{r2}^3 = \frac{0,52 \cdot 1^{\frac{2}{3}} \cdot 114 \cdot 10^3}{1,5 \cdot \operatorname{tg}^2 15^\circ \left(1^{\frac{2}{3}} + 1^{\frac{2}{3}} \right)} = 275 \cdot 10^3 \text{ Н/мм.}$$

Радіальна жорсткість комплексної опори складається із жорсткості двох умовних опор. З урахуванням похибки складання та регулювання умовних опор приймають [17]:

$$j_r = 0,7(j_{r1} + j_{r2}) \quad (3.5)$$

Радіальна жорсткість комплексної передньої опори моторизованого шпинделя:

$$j_r^n = 0,7(j_{r1}^n + j_{r2}^n) = 0,7(326 \cdot 10^3 + 326 \cdot 10^3) = 456 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 52 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

Радіальна жорсткість комплексної задньої опори моторизованого шпинделя:

$$j_r^3 = 0,7(j_{r1}^3 + j_{r2}^3) = 0,7(275 \cdot 10^3 + 275 \cdot 10^3) = 385 \cdot 10^3 \text{ Н/мм.}$$

3.4.3 Розрахунок радіальної жорсткості шпиндельного вузла

У відповідності компонувальної схеми шпиндельного вузла його розрахункова схема для визначення жорсткості приведена на рис. 3.11.

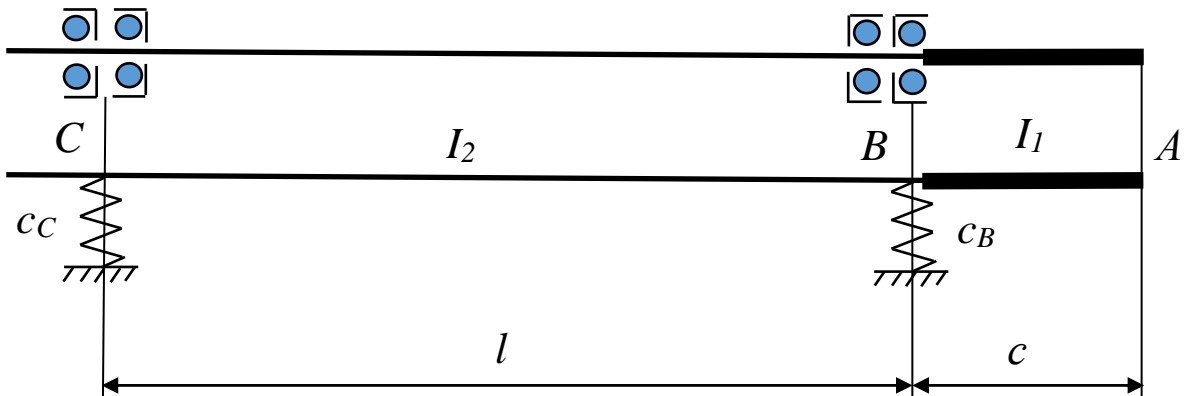


Рисунок 3.11 – Розрахункова схема шпиндельного вузла моторизованого шпинделя

Визначаємо геометричні параметри шпиндельного вузла моторизованого шпинделя.

Діаметр наскрізного отвору в шпинделі:

$$d_0 = (0,5...0,7)d = (0,5...0,7) \cdot 75 = 37...52,5, \text{ мм} \quad (3.6)$$

де d – діаметр міжопорної частини шпинделя.

З врахуванням урахуванням розмірів механізму затиску інструменту приймаємо діаметр наскрізного отвору в шпинделі $d_0 = 50$ мм.

На основі ескізного проекту враховуючи довжину ротора та ширину передньої і задньої опор шпинделя приймаємо міжопорну віддаль $l = 390$ мм.

Враховуючи розміри та конструкцію переднього кінця шпинделя та на основі ескізного проекту приймаємо виліт переднього кінця шпинделя $c = 200$ мм.

Геометрія тіла спроектованого шпинделя для визначення моментів інерції перерізу його ділянок приведена на рис. 3.12.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 53 |

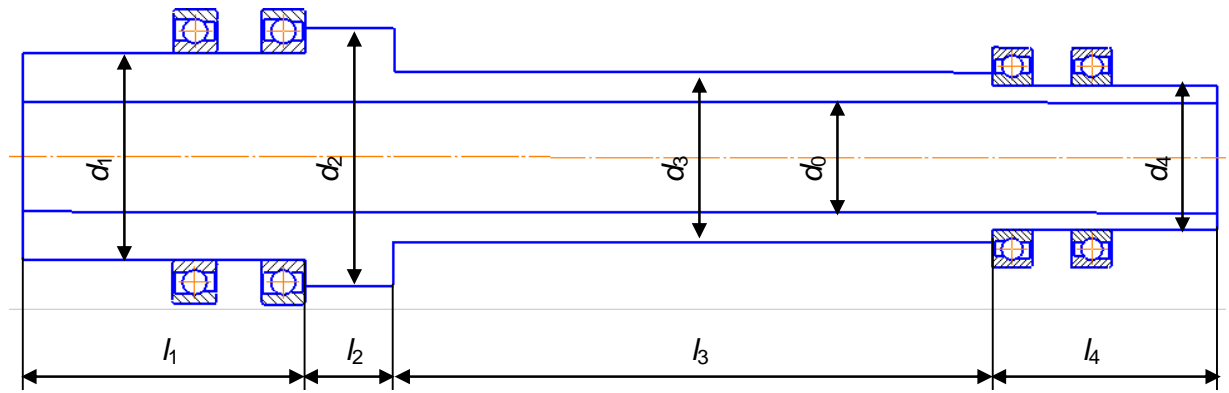


Рисунок 3.12 – Геометрія тіла спроектованого шпинделя

Для визначення моментів інерції різних ділянок шпинделя необхідно перейти до єдиних діаметрів на відповідних ділянках.

Середній діаметр поверхні в міжопорній частині шпинделя:

$$d_c = \frac{d_2 \cdot l_2 + d_3 \cdot l_3 + d_4 \cdot l_4}{l_2 + l_3 + l_4} = \frac{116 \cdot 40 + 74 \cdot 270 + 65 \cdot 100}{40 + 270 + 100} = 76 \text{ мм.}$$

Момент інерції консольної частини шпинделя:

$$I_1 = \frac{\pi}{64} \cdot (d_1^4 - d_o^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (100^4 - 50^4) = 4,6 \cdot 10^6 \text{ мм}^4.$$

Момент інерції міжопорної частини шпинделя:

$$I_2 = \frac{\pi}{64} \cdot (d_c^4 - d_o^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (76^4 - 50^4) = 1,33 \cdot 10^6 \text{ мм}^4.$$

Радіальна податливість комплексної передньої опори моторизованого шпинделя:

$$k_B = \frac{1}{j_r^n} = \frac{1}{456 \cdot 10^3} = 2,19 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н.}$$

Радіальна податливість комплексної задньої опори моторизованого шпинделя:

$$k_C = \frac{1}{j_r^3} = \frac{1}{385 \cdot 10^3} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н.}$$

Вихідні дані для розрахунку жорсткості шпиндельного вузла моторизованого шпинделя приведені у табл. 3.2.

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

Таблиця 3.2 - Вихідні дані для розрахунку жорсткості

| №п | Назва величини, позначення, одиниці вимірювання | Значення |
|----|--|----------------------|
| 1. | Момент інерції перерізу переднього кінця моторизованого шпинделя I_1 , мм ⁴ | $4,6 \cdot 10^6$ |
| 2. | Момент інерції перерізу міжопорної частини моторизованого шпинделя I_2 , мм ⁴ | $1,33 \cdot 10^6$ |
| 3. | Модуль пружності для матеріалу шпинделя E , Н/мм ² | $2,1 \cdot 10^5$ |
| 4. | Радіальна податливість опори B k_B , мм/Н | $2,19 \cdot 10^{-6}$ |
| 5. | Радіальна податливість опори C k_C , мм/Н | $2,6 \cdot 10^{-6}$ |
| 6. | Міжопорна віддаль шпинделя l , мм | 390 |
| 7. | Довжина консольної частини шпинделя c , мм | 95 |

Коефіцієнт впливу податливості переднього кінця шпинделя:

$$\delta_A = \alpha'_{AA} + \alpha''_{AA}, \quad (3.7)$$

де α'_{AA} - коефіцієнт впливу податливості пружної балки на жорстких опорах;

α''_{AA} - коефіцієнти впливу податливості жорсткої балки на пружних опорах.

Для визначення коефіцієнтів впливу податливості пружної балки на жорстких опорах використаємо метод Верещагіна [20]:

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{1}{EI_i} M_i \omega_i, \quad (3.8)$$

де M_i - площа i -ї ділянки епюри згинального моменту;

ω_i - координата центру ваги ділянки першої епюри, взята на другій епюрі згинального моменту.

Визначаємо коефіцієнт впливу податливості α'_{AA} . Розрахункова схема для його визначення якого приведена на рис. 3.13.

Використовуючи метод Верещагіна

$$\alpha'_{AA} = \frac{1}{EI_1} M_1 \omega_1 + \frac{1}{EI_2} M_2 \omega_2, \quad (3.9)$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 55 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

$$\text{де } M_1 = \frac{1}{2}c^2; \omega_1 = \frac{2}{3}c; M_2 = \frac{1}{2}cl; \omega_2 = \frac{2}{3}c.$$

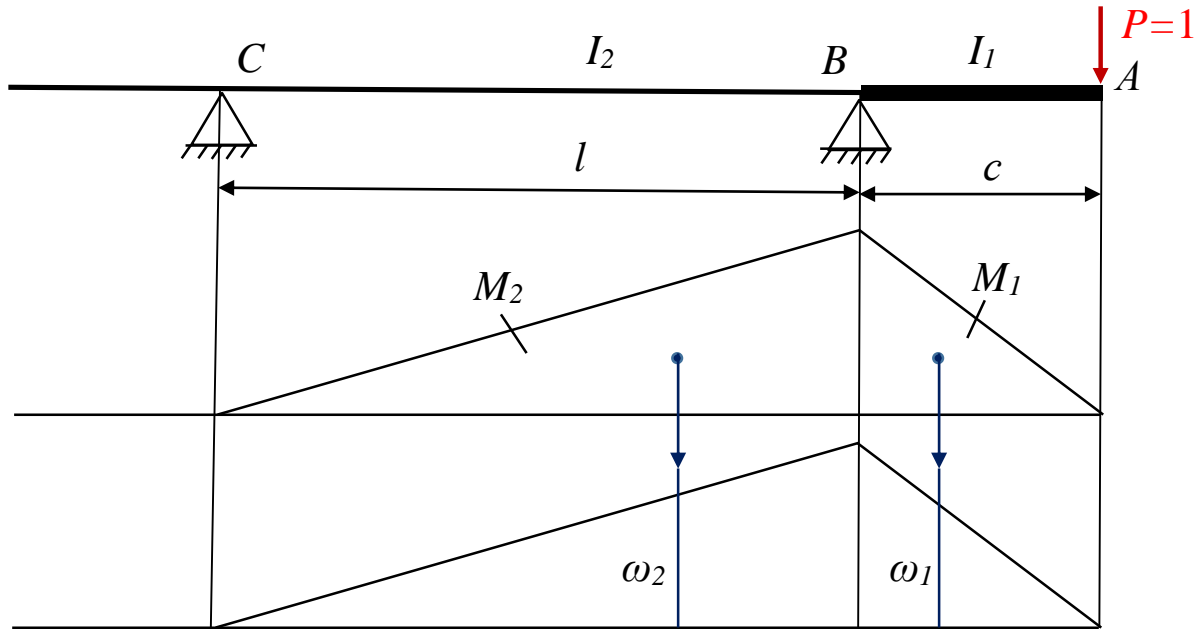


Рисунок 3.13 – Розрахункова схема для визначення коефіцієнту впливу податливості α'_{AA}

Підставивши залежності та значення величин у (3.9) отримаємо:

$$\alpha'_{AA} = \frac{c^3}{3EI_1} + \frac{lc^2}{3EI_2} = \frac{95^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 4,6 \cdot 10^6} + \frac{390 \cdot 95^2}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1,33 \cdot 10^6} = 4,49 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н.}$$

Визначаємо коефіцієнт впливу податливості α''_{AA} за формулою:

$$\alpha''_{AA} = \frac{(l+c)^2}{l^2} k_B + \frac{c^2}{l^2} k_C. \quad (3.10)$$

Підставивши значення у (3.10) отримаємо:

$$\alpha''_{AA} = \frac{(390+95)^2}{390^2} \cdot 2,19 \cdot 10^{-6} + \frac{95^2}{390^2} \cdot 2,6 \cdot 10^{-6} = 3,53 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н.}$$

Коефіцієнт впливу податливості переднього кінця моторизованого шпинделя у відповідності до (3.7)

$$\alpha_{AA} = 4,49 \cdot 10^{-6} + 3,53 \cdot 10^{-6} = 8,02 \cdot 10^{-6} \text{ мм/Н.}$$

Жорсткість переднього кінця моторизованого шпинделя:

$$j_{sp} = \frac{1}{\alpha_{AA}} = \frac{1}{8,02 \cdot 10^{-6}} = 124 \cdot 10^3 \text{ Н/мм} = 124 \text{ Н/мкм.}$$

| | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |

КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ

Арк.

56

3.4.4 Розрахунок довговічності радіально-упорних підшипників комплексних опор шпиндельного вузла

Для розрахунку довговічності підшипників опор шпиндельного вузла необхідно знайти радіальні навантаження на опори.

Необхідна потужність різання при високошвидкісній обробці визначається за залежністю [9, 21]:

$$N_p = \frac{P_z \cdot V}{60 \cdot 1000} \text{ кВт}, \quad (3.11)$$

де P_z - тангенціальна складова сили різання;

V - швидкість різання при високошвидкісній обробці.

Із залежності (3.11) тангенціальна складова сили різання

$$P_z = \frac{60 \cdot 1000 \cdot N_p}{V} \text{ Н}. \quad (3.12)$$

Необхідна потужність різання буде рівна номінальній потужності синхронного вмонтованого електродвигуна приводу шпинделя, тобто $N_p = P_n = 27,2$ кВт.

При високошвидкісній обробці сталі кінцевою твердосплавною фрезою рекомендована швидкість різання $V = 500$ м/хв [1-4].

Підставивши значення у залежність (3.12), отримаємо:

$$P_z = \frac{60 \cdot 1000 \cdot 27,2}{500} = 3260 \text{ Н}.$$

Радіальна складова сили різання складає $(0,3...0,5)P_z$ [9, 21], тобто

$$P_y = (0,3...0,5)P_z = 0,4 \cdot P_z = 0,4 \cdot 3260 = 1304 \text{ Н}.$$

Осьова складова сили різання складає $(0,2...0,4)P_z$ [9, 21], тобто

$$P_x = (0,2...0,4)P_z = 0,3 \cdot P_z = 0,3 \cdot 3260 = 978 \text{ Н}.$$

Радіальна сила від тангенціальної та радіальної складових сили різання, яка діє на шпиндель буде рівна:

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2} = \sqrt{3260^2 + 1304^2} = 3510 \text{ Н}.$$

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 57 |

Знайдемо реакції опор склавши рівняння рівноваги:

$$\begin{aligned}\sum M_B &= P c_1 - R_c l = 0 \\ \sum M_C &= P(c_1 + l) - R_B l = 0\end{aligned}\quad (3.13)$$

де $c_1 = c + c_0 = 95 + 85$ мм – довжина консолі з врахуванням довжини інструменту з оправкою $c_0 = 85$ мм.

З першого рівняння отримаємо:

$$R_c = \frac{P \cdot c}{l} = \frac{3510 \cdot 180}{390} = 1620 \text{ Н.}$$

З другого рівняння отримаємо:

$$R_B = \frac{P \cdot (c_1 + l)}{l} = \frac{3510 \cdot (180 + 390)}{390} = 5130 \text{ Н.}$$

Отже, радіальне навантаження, яке сприймається двома підшипниками передньої комплексної опори моторизованого шпинделя складає 5130 Н; двома підшипниками задньої комплексної опори – 1620 Н.

Осьове навантаження на передню комплексну опору моторизованого шпинделя складає з врахуванням середнього попереднього натягу 1770 Н. На задню комплексну опору моторизованого шпинделя осьове навантаження буде рівне тільки силі середнього попереднього натягу – 525 Н, оскільки задня опора не сприймає осьового навантаження.

Розрахунок довговічності підшипників опор шпиндельного вузла здійснимо за допомогою пакета прикладних програм Globus фірми GMN [19].

Заповнивши вихідні дані у вкладці «Calculate» для шпиндельного підшипника передньої опори марки NU S 61920 C TA P4+ фірми GMN (рис. 3.14) та провівши його автоматизований розрахунок, отримаємо результати, приведені на рис. 3.15 та у додатку 3.

За результатами розрахунку при таких навантаженнях номінальний ресурс роботи підшипника $L_{10} = 14\,989$ год., а термін служби буде становити $L_{ном} = 749\,438$ год.

Заповнивши вихідні дані у вкладці «Calculate» для шпиндельного підшипника задньої опори марки NU S 6013 C TA P4+ фірми GMN (рис. 3.16) та

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 58 |

провівши його автоматизований розрахунок, отримаємо результати, приведені на рис. 3.17 та у додатку 4.

GMN Globus - Calculation of ball bearing - project1.glb

Calculation

Design Type: Spindle Ball Bearing (i)

Ball Bearing description: HY S 61920 C TA (i) Alpha0 [°]: 15 C [N]: 51 500 C0 [N]: 55 500

Ball material: Ceramic (i)

Cage: TA (i)

Precision: P4+ (i)

Load profile: Constant (i)

Axial load Fa [N]: 885 (i)

Radial load Fr [N]: 2565 (i)

Speed n [1/min]: 9000 (i)

Failure probability [%]: 10 (i) Factor a1: 1,00

Operating temperature t [°C]: 70 (i) Factor ft: 1,00

Lifespan L10 [h]: (i)

Lifespan Lnm [h]: (i)

Lubricant: Oil (i)

Lubrication description: AEROSHELL FLUID 12 (i) Basisoil: ESTER T(min) [°C]: -50 T(max) [°C]: 120

Degree of contamination: Normal cleanliness (i) Ec-factor: 0,70
Oil filtered through a fine filter; Typical conditions in a greased-for-life bearings with shields

Ball Bearing

Load

Lubrication

Рисунок 3.14 – Вихідні дані у вкладці «Calculate» для шпиндельного підшипника передньої опори

GMN Globus - Calculation of ball bearing - project1.glb

Calculation

Results

| | | | |
|--|--------------------|--|-------------------|
| Service life L10: | L10 [h] : | 14 989 | |
| Lifetime: | Lnm [h] : | 749 438 (see result rating: kappa) | |
| Factor failure probability: | a1 [-] : | 1,00 | |
| Factor temperature: | ft [-] : | 1,00 | |
| Service life: | also [-] : | 50,00 | Load values |
| Static load rating: | C0 [N] : | 55 500 | |
| Dynamic load rating: | C [N] : | 51 500 | |
| Ermudungsgrenzbelastung: | CU [N] : | 1 908 | |
| Statische Aquivalente Belastung: | P0 [N] : | 2 565 | |
| Aquivalente Belastung: | P [N] : | 2 565 | |
| Static measure: | fs = C0/P0 [-] : | 21,64 | Speed values |
| Speed characteristic at operating speed: | n x dm [mmv/min] : | 1 080 000 | |
| Drehzahlkennwerte zulässig: | n x dm [mmv/min] : | Ball bearing: 2 100 000 | |
| Grenzdrehzahlen zulässig: | ng [1/min] : | Ball bearing: 17 500 | Lubricant values |
| Contamination coefficient: | ec [-] : | 0,70 | |
| Temperature range: | t [°C] : | minimum -50,00 maximum 120,00 | |
| Kinetische Viskosität: | Nue [Ns/m²] : | 40°C: 14,30 100°C: 3,70 | |
| Viskosität Betriebstemperatur: | Nue [Ns/m²] : | 70°C: 6,55 Bezugviskosität: Nue1 [Ns/m²] : 70°C: 4,33 | |
| Viskositätsverhaeltnis kappa: | kappa [-] : | 1,51 | Result evaluation |
| Operating speed: | n [1/min] | geprüft - in Ordnung | |
| Operating temperature: | t [°C]: | geprüft - in Ordnung | |
| Statische Tragfähigkeit: | fs = C0/P0 [-] : | geprüft - in Ordnung (fs=C0/P0>2.5) | |
| Schmierverhältnisse: | kappa [-] : | Befriedigende Schmierverhältnisse. Contact partners are usually separated by lubrication film | |

Рисунок 3.15 – Результати автоматизованого розрахунку шпиндельного підшипника передньої опори

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 59 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

Calculation

| | | | | |
|---------------------------------|----------------------|---------|---|--------------|
| Design Type | Spindle Ball Bearing | (i) | | Ball Bearing |
| Ball Bearing description | HY S 6013 C TA | (i) (≡) | Alpha0 [°]: 15 C [N]: 34 500 C0 [N]: 33 500 | |
| Ball material | Ceramic | (i) | | |
| Cage | TA | (i) | | |
| Precision | P4+ | (i) | | |

| | | | | |
|-------------------------------------|----------|-----|-----------------|------|
| Load profil | Constant | (i) | | Load |
| Axial load Fa [N] | 263 | (i) | | |
| Radial load Fr [N] | 810 | (i) | | |
| Speed n [1/min] | 9000 | (i) | | |
| Failure probability [%] | 10 | (i) | Factor a1: 1,00 | |
| Operating temperature t [°C] | 70 | (i) | Factor ft: 1,00 | |
| Lifespan L10 [h] | | (i) | | |
| Lifespan Lnm [h] | | (i) | | |

| | | | | |
|--------------------------------|--------------------|---------|---|-------------|
| Lubricant | Oil | (i) | | Lubrication |
| Lubrication description | AEROSHELL FLUID 12 | (i) (≡) | Basist: ESTER T(min) [°C]: -50 T(max) [°C]: 120 | |
| Degree of contamination | Normal cleanliness | (i) | Ec-factor: 0,55 Oil filtered through a fine filter; Typical conditions in a greased-for-life bearings with shields | |

Рисунок 3.16 – Вихідні дані у вкладці «Calculate» для шпиндельного підшипника задньої опори

Calculation

Results

| | | | |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|--|
| Service life L10: | L10 [h] : | 143 090 | |
| Lifetime: | Lnm [h] : | 7 154 487 (see result rating: kappa) | |
| Factor failure probability: | a1 [-] : | 1,00 | |
| Factor temperature: | ft [-] : | 1,00 | |
| Service life: | aiso [-] : | 50,00 | |

| | | | |
|---|------------------|--------|-------------|
| Static load rating: | C0 [N] : | 33 500 | Load values |
| Dynamic load rating: | C [N] : | 34 500 | |
| Ermüdungsgrenzbelastung: | C0 [N] : | 1 256 | |
| Statische Aquivalente Belastung: | P0 [N] : | 810 | |
| Aquivalente Belastung: | P [N] : | 810 | |
| Static measure: | fs = C0/P0 [-] : | 41,36 | |

| | | | |
|---|-------------------|-------------------------|--|
| Speed characteristic at operating speed: | n x dm [mm/min] : | 742 500 | |
| Drehzahlkennwerte zulässig: | n x dm [mm/min] : | Ball bearing: 2 145 000 | |
| Grenzdrehzahlen zulässig: | ng [1/min] : | Ball bearing: 26 000 | |

| | | | |
|---------------------------------------|---------------|--|--|
| Contamination coefficient: | ec [-] : | 0,55 | |
| Temperature range: | t [°C] : | minimum -50,00 maximum 120,00 | |
| Kinetische Viskosität: | Nue [Ns/m²] : | 40°C: 14,30 100°C: 3,70 | |
| Viskosität Betriebstemperatur: | Nue [Ns/m²] : | 70°C: 6,55 Bezugsviskosität: Nue1 [Ns/m²] : 70°C: 5,22 | |
| Viskositätsverhaeltnis kappa: | kappa [-] : | 1,25 | |

| | | | |
|---------------------------------|------------------|---|-------------------|
| Operating speed: | n [1/min] | geprüft - in Ordnung | Result evaluation |
| Operating temperature: | t [°C]: | geprüft - in Ordnung | |
| Statische Tragfähigkeit: | fs = C0/P0 [-] : | geprüft - in Ordnung (fs=C0/P0>2.5) | |
| Schmierverhaeltnisse: | kappa [-] : | Befriedigende Schmierverhaeltnisse. Contact partners are usually separated by lubrication film | |

Рисунок 3.17 – Результати автоматизованого розрахунку шпиндельного підшипника задньої опори

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------------|------------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. 60 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

За результатами розрахунку при таких навантаженнях номінальний ресурс роботи підшипника $L_{10} = 143\,090$ год., а термін служби буде становити $L_{ном} = 7\,154\,487$ год.

| | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|--------------------------------|-----------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підп.</i> | <i>Дата</i> | | 61 |

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Джерела небезпеки при високошвидкісній обробці різанням, пов'язані з високою швидкістю обертання різального інструменту

Вплив відцентрових сил. Багатократне збільшення частот обертання - приблизно 5-10 разів у порівнянні із звичайним різанням - призводить до зростання відцентрових сил. Чим складніша конструкція системи, що обертається, і більші її інерційні характеристики, тим вища ймовірність її руйнування. Уламки зруйнованого елемента, що вирвалися при високій швидкості обертання, володіючи великою кінетичною енергією і довільною траєкторією руху, в змозі викликати важкі поранення людей і пошкодження елементів верстата. Змінні пластини різального інструменту – основне джерело небезпеки [1, 2] – у стані відокремитися від оправки внаслідок ненадійного (з конструктивних причин та поганого складання) та недостатньо міцного (при перевищенні допустимої частоти обертання) закріплення. Уламки матеріалу пластин можуть утворитися при їх крихкому руйнуванні (за наявності фабричного дефекту, перевищенні сил затягування).

Вплив коливань. Монолітні різальні інструменти через відсутність у них змінних пластин зменшують ступінь ризику. Незважаючи на це, при великому вильоті різальний інструмент може зруйнуватися під впливом резонансних коливань. Чим більше виліт [1, 2], тим нижча власна частота, тим більша ймовірність виникнення механічного резонансу. При цьому інструмент може зруйнуватись ще до початку різання. Коливання можуть виникнути також при конструктивній несиметричності різального інструменту – наприклад, за наявності єдиного каналу для відведення стружки у кінцевих фрезах, площин типу Weldon на циліндричній поверхні хвостовика і т.д.

| | | | | | | | | |
|-----------|----------------|----------|-------|------|--|--|-------|---------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | | | |
| Розробив | Качор Р.І. | | | | Безпека життєдіяльності, основи охорони праці | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| Перевірів | Окіпний І.Б. | | | | | Н | 62 | 6 |
| Н. контр. | Кобельник В.Р. | | | | | ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль | | |
| Затв. | Крупа В.В. | | | | | | | |

Вплив дисбалансу. Хвостовик повинен забезпечити міцне, жорстке, точне та надійне закріплення з одного боку ріжучого інструменту, а з іншого – зібраних різального інструменту та хвостовика у шпинделі [1, 2]. Затискна оправка може бути причиною радіального биття встановленого в ній різального інструменту, причому в міру зношування поверхонь, що з'єднуються, якість базування і закріплення зменшується, що призводить до зростання відцентрових сил [1, 2]. Обертובה система, що потрапила в механічний резонанс, створює згинальні моменти, що чинять несприятливий вплив на функціональну надійність системи затиску інструменту в шпинделі [1, 2]. Радіальне биття має місце при неспіввісності циліндричного отвору оправки та базової конічної поверхні. Недостатньо висока власна жорсткість самого хвостовика, а також низька контактна жорсткість стику «хвостовик-шпиндель» призводять до згину, втрати симетричності та дисбалансу. Зростаючі відцентрові сили викликають ослаблення затиску хвостовика; у найбільш несприятливому варіанті хвостовик аварійно випаде із шпинделя [1, 2]. Шпиндельний вузол – складова частина системи, що обертається, носій її основного інерційного навантаження. До нього пред'являються найбільш жорсткі вимоги щодо точності, жорсткості, надійності, дисбалансу тощо. Незалежно від цього, в ході його роботи може мати місце дисбаланс, пов'язаний із зміною положенням тарілчастих пружин в радіальному напрямку, після чергового циклу «затиск-розтиск» хвостовика інструменту.

4.2 Джерела небезпеки при високошвидкісній обробці різанням, пов'язані з продуктами, що виділяються під час різання

При сухій обробці повітря, що подається під тиском, призводить до зростання в навколишній атмосфері твердих частинок, пилу, газів. Переважає пилоутворення, яке особливо інтенсивне при обробці графіту. Озонування та іонізування повітря, як робочого флюїду, створює нові джерела небезпеки. Тривале вдихання озону може спричинити незворотні наслідки дихальної системи. Вищі концентрації небезпечні навіть за короткочасному вдиханні [22-

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 63 |

24]. Іони повітря мають здатність з'єднуватися з частинками пилу в робочій зоні, утворюючи важкі іони, які затримуються в дихальних шляхах людини в набагато більшій кількості, ніж нейтральний пил. Таким чином зароджуються та розвиваються захворювання органів дихання [22-24].

При квазісухій обробці в повітрі зростає (залежно від тривалості та інтенсивності роботи верстата) присутність масла, яке може потрапити в дихальні шляхи та викликати низку захворювань та дискомфорт оператора верстата. Виникає небезпека займання масла.

При квазірідкій обробці на поверхнях деталі та робочої зони верстата не залишаються сліди етанолу, але концентрація парів може перевищити безпечні для здоров'я значення; виникає небезпека займання парів етанолу.

При криогенній обробці небезпечні для здоров'я високі концентрації газоподібного азоту та діоксиду вуглецю. Підвищена концентрація азоту може спровокувати асфікцію з наступною тахікардією, прискореним диханням, зниженою координацією тощо. [22-24]. Надлишок діоксиду вуглецю в повітрі погіршує увагу, викликає головний біль, задишку, фізичну та розумову втому. Як наслідок, розвиваються захворювання органів дихання та серцево-судинної системи [22-24].

4.3 Технічні засоби забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу при високошвидкій обробці

Балансування шпинделя проводиться обов'язково на території виробника. Рекомендована якість балансування від G0,4 до G1 [1, 2, 25]. Щоб уникнути аварійних ситуацій, шпиндельний вузол оснащується системою датчиків [26].

Незалежно від коректно проведених дій з підготовки різального інструменту, ймовірність виникнення аварійних пошкоджень інструментального оснащення завжди існує; продукти відходу процесу різання не повинні залишати зону верстата. У зв'язку з цим наявність захисту робочої зони є обов'язковою. Захист це не просто огорожа, а споруда «кабінетного типу», в якій розміщується верстат.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 64 |

Таким чином створюються умови для найбільшого захисту людей від небезпечних процесів, що відбуваються в робочій зоні. Зона спостереження складається з міцних та пружних багатошарових органічних стекел з відповідним покриттям проти механічного зношування та впливу ультрафіолетового випромінювання.

Перевага надається різальному інструменту з конструктивно закладеною симетрією, зі спрощеною та надійною схемою закріплення змінних пластин. Неприпустима робота інструменту з неміцно закріпленими пластинами, а також з перетягнутими (що може призвести до крихкості та руйнування). Не можна допускати роботу інструменту, на поверхні пластин або оправки яких мають тріщини, незалежно від їхнього розміру [1, 2].

В області інструментальних хвостовиків використовуються хвостовики типу HSK, головна особливість яких - короткий порожнистий конус, завдяки чому зменшується маса та момент інерції хвостовика [25]. Базування здійснюється одночасно за конусом і торцем, що підвищує точність і жорсткість стику зі шпинделем. Сила зтяжки хвостовика зростає зі зростанням частоти обертання шпинделя. Найчастіше використовуються три типи патронів: з цанговим, гідропластовим та термодформаційним затиском [25].

Незважаючи на заводське балансування, цехове балансування різального інструменту в зборі з хвостовиком, що проводиться у двох площинах з якістю G2,5, є обов'язковим. Перед кожним завантаженням інструменту в магазин/шпиндель слід повторювати балансування [25]. Встановлений у шпинделі інструмент піддається попередньому обертанню на тій самій частоті, на якій він працюватиме. Слід уникати роботи інструменту на частотах, що збігаються з його власними. Потрібно строго дотримуватись обмеження на найбільшу частоту обертання, рекомендовану виробником.

На додаток до «класичного» методу балансування шляхом видалення або додавання маси у двох площинах, були розроблені системи балансування, інтегровані зі шпинделем [27, 28]. Для зменшення вібрацій під час роботи шпинделя використовується програма активного балансування з використанням

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 65 |

методу коефіцієнтів впливу для розрахунку оптимального положення коригувальних мас, а також може бути використаний пристрій активного балансування [27, 28]. Програма активного балансування керує спеціальним пристроєм, вимірюючи величину вібрації, фазовий кут, швидкість обертання, положення балансувального ротора та розраховує коригування для відповідного встановлення коригувальних мас для балансування шпинделя під час роботи [27, 28]. Без живлення балансувальний ротор зберігає своє положення та обертається разом з віссю обертання.

Наявність кабінетного захисту далеко не достатньо для усунення небезпеки від впливу небезпечних для здоров'я продуктів, що супроводжують обробку без ЗОР. Верстатобудівники розміщують ще низку систем для очищення повітря, орієнтованих на відповідні джерела небезпеки. Масляні аерозолі, що утворилися в робочому просторі, пил і тверді частинки відводяться за допомогою аспіраційних систем; повітря очищається шляхом проходження каскаду фільтрів [22-24]. Для грубої очистки застосовуються механічні фільтри, які розміщуються зазвичай над верстатом, але можуть бути розташовані збоку, на підлозі, за верстатом [22-24]. Для тоншої очистки в каскад фільтрів вбудовується електростатичний фільтр, що працює на принципі іонізації повітря коронним розрядом [22-24]. Наконечники шлангів системи евакуації відходів можуть мати стаціонарне та мобільне розташування. Контейнери для збирання відходів – зазвичай об'ємні споруди, що розміщуються поруч із верстатом на цеховому фундаменті [22-24]. Застосовується також система централізованого збору відходів, яка обслуговує кілька верстатів одночасно [22-24]. Для утримання твердих частинок і пилу, не відведених аспіраційною системою, використовується додатковий пристрій до системи, що є щіткою, що захищає зону навколо джерела пилоутворення.

Для очищення поверхонь робочої зони верстата водяний струмінь, що подається під тиском, видаляє основну частку забруднень; не ефективна при очищенні жирових відкладень, може спричинити корозію. Віддається перевага очищенню робочої зони верстата сухим льодом, ефект дії якого ґрунтується на прояві термічного шоку, при якому забруднення охолоджується до крихкого

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 66 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

стану, що сприяє відшаровуванню від поверхні. Забезпечує високу швидкість обробки приблизно в 2-4 рази вище, ніж при традиційних способах очищення. Відсутні вторинні відходи завдяки сублимації сухого льоду.

Для запобігання загорянню застосовується пристрій для гасіння полум'я в робочій зоні верстата.

| | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|--------------------------------|-----------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підп.</i> | <i>Дата</i> | | 67 |

ВИСНОВКИ

1. Охарактеризовано висошвидкісну обробку різанням, проаналізовано область її використання та переваги у порівнянні з традиційною обробкою різанням.

2. Розглянуто особливості технологічної системи для високошвидкісної обробки. Проведено огляд та аналіз основних конструктивних рішень вузлів для високошвидкісних обробних центрів, що забезпечують високошвидкісну обробку різанням.

3. Проведено аналіз конструкції високошвидкісних обробних центрів з гібридною кінематикою, які містять механізми паралельної структури для переміщення інструменту.

4. Приведено призначення, область застосування, особливості компоновки та конструкції високошвидкісного обробного центру з гібридною кінематичною структурою.

5. Приведено структуру та принципи роботи моторизованих шпинделів високошвидкісних обробних центрів з паралельною кінематичною структурою та їх класифікацію.

6. Проведено аналіз ключових технологій, які використовуються у моторизованих шпинделях, як мехатронних системах, що складаються з механічної системи, системи керування, системи приводу та системи контролю.

7. Охарактеризовано об'єкту виробництва з точки зору забезпечення технічних вимог стосовно точності розмірів та розташування поверхонь, а також якості поверхневого шару.

8. Проведено вибір технологічних баз на основі креслення деталі з технічними вимогами та основі умови розташування і роботи деталі у вузлі.

9. Розроблений технологічний маршрут механічного оброблення деталі,

| | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------|--------------|-------------|--------------------------------|--|--------------|----------------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | | | |
| | | | | | | | | |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підп.</i> | <i>Дата</i> | Висновки | <i>Літ.</i> | <i>Аркуш</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Розробив</i> | <i>Качор Р.І.</i> | | | | | <i>Н</i> | 68 | 2 |
| <i>Перевірів</i> | <i>Буховець В.М.</i> | | | | | | | |
| <i>Н. контр.</i> | <i>Кобельник В.Р.</i> | | | | | | | |
| <i>Затв.</i> | <i>Крупа В.В.</i> | | | | | | | |
| | | | | | | ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м. Тернопіль | | |

що включає дві технологічні операції: вертикально-фрезерну та комплексну на високошвидкісному обробному центрі з ЧПК.

10. Здійснено вибір металообробного обладнання для виконання операцій технологічного процесу.

11. Розроблено комплексну технологічну операцію на високошвидкісному обробному центрі з ЧПК: спроектовано операційну технологію, вибрано різальний та вимірювальний інструмент та вибрано режими різання.

12. Вибрано структуру моторизованого шпинделя головного руху та вмонтований синхронний електродвигун мод.1FE1084-6WR-1 фірми Siemens з номінальною потужністю 27,2 кВт, номінальним крутним моментом 130 Нм та діапазоном частот обертання 0...9000 об/хв. Побудовано графіки зміни потужності та обертового моменту на моторизованому шпинделі.

13. Виходячи із потужності максимальної частоти обертання вибрано компоновальну схему моторизованого шпинделя, що передбачає розташування по схемі «тандем» двох кулькових радіально-упорних підшипників у передній та задній опорах.

14. За допомогою пакета прикладних програм Globus фірми GMN проведено автоматизований вибір підшипників опор моторизованого шпинделя. В якості підшипників опор вибрано радіально-упорні підшипники з керамічними кульками та сталевими кільцями марок NU S 61920 C TA P4+ та NU S 6013 C TA P4+ фірми GMN.

15. Проведено розрахунок осьової та радіальної жорсткості комплексних опор шпиндельного вузла. З використанням методу коефіцієнтів впливу податливості проведено розрахунок радіальної жорсткості шпиндельного вузла, яка за розрахунками складає 124 Н/мкм.

16. За допомогою пакета прикладних програм Globus фірми GMN проведено автоматизований розрахунок довговічності підшипників опор шпиндельного вузла.

17. Вирішені питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 69 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Bert P. Erdel. High-speed Machining – Dearborn, Michigan, 2003. – 264 p.
2. Tönshoff H, Hollmann, F. Hochgeschwindigkeitsspanen. – Wiley-VCH Verlag, 2005 – 527 s.
3. Denkena B., Tönshoff H.K. Spanen. Grundlagen. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011 – 426 s.
4. L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz. Machine Tools for High Performance Machining. – Springer-Verlag London Limited, 2009 – 442 s.
5. Brecher C., Weck M. Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1. Maschinenarten und Anwendungsbereiche – Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2019 – 507 s.
6. Valášek, M. et al.: Design-by-Optimization and Control of Redundantly Actuated Parallel Kinematics Sliding Star// Multibody System Dynamics. – 2005. – №3-4. – p. 251-267.
7. Добрянський, С. С. Технологічні основи машинобудування [Електронний ресурс]: підручник для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафеев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.
8. Яковенко І. Е. Технологічні основи машинобудування: навчальний посібник для студентів спеціальностей 131 – Прикладна механіка, 133 –Галузеве машинобудування / І.Е. Яковенко, О.А. Пермяков, А.В. Фесенко – Харків: НТУ «ХП», 2022. – 421с.
9. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник/ Ю.Є. Паливода, А.Є. Дячун, Р.Я. Лещук – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.

| | | | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------|--------------|-------------|--------------------------------|--|--|---|--------------|----------------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | | | | | |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підп.</i> | <i>Дата</i> | Перелік посилань | | | | | |
| <i>Розробив</i> | <i>Качор Р.І.</i> | | | | | | | <i>Літ.</i> | <i>Аркуш</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Перевірів</i> | <i>Буховець В.М.</i> | | | | | | | Н | 70 | 4 |
| <i>Н. контр.</i> | <i>Кобельник В.Р.</i> | | | | | | | ТНТУ ім І. Пулюя, гр. МВ-41, м.Тернопіль | | |
| <i>Затв.</i> | <i>Крупа В.В.</i> | | | | | | | | | |

10. Каталоги Sandvik Coromant [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://polidecktech.com/all-catalogs/catalog-sandvik-coromant/> (дата звернення: 01.03.2026).

11. Cutting tool on tour. Highlights and new products 2019/2020 Режим доступу: https://ecatalog.hoffmann-group.com/eng_GB_GBP/catalogs/21050006/pdf/complete.pdf

12. Metal Cutting Bookshelves [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kennametal.com/us/en/resources/catalogs-literature.html> (дата звернення: 01.03.2026).

13. Метрологія [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Н.М. Защепкіна. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 397 с.

14. Вимірювальний інструмент [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://siltech.com.ua/index.php/kataloh-tovariv/category/55-vimiryuvalnij-instrument> (дата звернення: 03.03.2026).

15. SINAMICS S120 Synchronous Built-in Motors 1FE1. Configuration Manual 06/2010 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://manuals.plus/m/1f20888be409a9828c96d57fd23810b1bb463eec37db5aae1f047f30f9cff61c.pdf> (дата звернення: 05.04.2026).

16. ISO 12164-4: 2008. Hollow taper interface with flange contact surface. Part 4: Dimensions of receivers for stationary tools [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/42001/9061e368177947c8b524ae8d1eaaa9bf/ISO-12164-4-2008.pdf> (дата звернення: 05.04.2026).

17. Верба І.І., Даниленко О.В. Статичний розрахунок шпиндельних вузлів на опорах кочення: Методичні вказівки до виконання розрахунків у дипломних проектах та курсових проектах з дисциплін «Металорізальні верстати», «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованого виробництва», «Конструювання обладнання металообробних цехів» для студентів напряму підготовки 6.050503, спеціальностей «Металорізальні верстати та системи» та

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | 71 |

«Інструментальне виробництво» і спеціальностей 7.05050201, 8.05050201 «Технологія машинобудування». Частина 1. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 104 с.

18. Brecher C., Weck M. Machine Tools Production Systems 2. Design, Calculation and Metrological Assessment – Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2021 – 840р.

19. Software Globus GMN [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.gmn.de/en/ball-bearings/service-desk/download/> (дата звернення: 06.04.2026).

20. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів: Підручник/ Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський – К.: Вища школа, 2004. – 665с.

21. Гагалюк А.В., Паливода Ю.Є. Процеси виготовлення машин. Частина 1: технологічні основи машинобудування: навчальний посібник. – Тернопіль: Осадца Ю.В., 2025. – 308 с.

22. Пістун І.П., Стець Р.Є., Трунова І.О. Охорона праці в галузі машинобудування. Навчальний посібник (стереотипне видання) – Суми: Університетська книга, 2023 – 556 с.

23. Мезенцева І.О. Безпека виробничих процесів і устаткування. Частина І. Організаційні та технічні заходи безпеки трудового процесу – НТУ «ХПІ», Харків, 2022. – 246 с.

24. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях: Методичний посібник – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.

25. Кузнєцов Ю.М. Затискні механізми для високопродуктивної та високоточної обробки різанням: Монографія/ Ю.М. Кузнєцов, В.Н. Волошин, П.М. Неделчева, Ф.В. Ель-Дахабі. – Габрово: Університетське в-во «Васил Априлов», 2010. – 724 с.

26. Abele E. Machine tool spindle units/ Y. Altintas, C. Brecher// CIRP Annals-Manufacturing Technology – 2010 - №59 – p. 781–802.

27. Moon J.D., Development of theActive Balancing Device for High-Speed Spindle System Using Influence Coefficients/ J.D. Moon, B.S. Kim, S.H. Lee //

| | | | | | | |
|-----|------|----------|-------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 72 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | | |

International Journal of Machine Tools and Manufacture – 2006. – №46(9). – p. 978–987.

28. Neumeuer D. Active Balancing for High Speed Machining Objectives and Limits/ D. Neumeuer, M. Kaufeld// 7th International Conference on High Speed Machining Proceedings, 28. und 29. Mai 2008. – Darmstadt: Meisenbach Verlag GmbH, Bamberg, pp. 978-980.

| | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|--------------------------------|------|
| | | | | | <i>КРБ 22-038.00.00.000 ПЗ</i> | Арк. |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підп.</i> | <i>Дата</i> | | 73 |