

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Механіко-технологічний факультет  
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»  
Завідувач кафедри ММіР  
к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти  
на тему:  
**«Розробка пристосування для  
точної токарної обробки сферичних  
поверхонь деталей»**

Виконала здобувачка вищої освіти IV-го  
курсу групи ГМ-22-3  
ОПП «Галузеве машинобудування»  
спеціальності 133 «Галузеве  
машинобудування»

\_\_\_\_\_ Ярослава МИХАЙЛЕВСЬКА

Керівник роботи к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА

Рецензент:

\_\_\_\_\_

**Центральноукраїнський національний технічний університет**

|                              |                                              |
|------------------------------|----------------------------------------------|
| Факультет                    | Механіко-технологічний                       |
| Кафедра                      | Машинобудування, мехатроніки і робототехніки |
| Рівень вищої освіти          | перший (бакалаврський)                       |
| Галузь знань                 | 13 Механічна інженерія                       |
| Спеціальність                | 133 Галузеве машинобудування                 |
| Освітньо-професійна програма | Галузеве машинобудування                     |

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ММіР  
\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

\_\_\_\_\_ Михайлевській Ярославі Павлівні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка пристосування для точної токарної обробки  
сферичних поверхонь деталей

2. Керівник роботи: \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент Андрій ГРЕЧКА

3. Строк подання роботи до захисту \_\_\_\_\_ 01 червня 2026 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи

Мета роботи: розробка пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей шляхом забезпечення подачі різця по точній коловій траєкторії зі сталою його орієнтацією відносно дотичної в кожній точці зазначеної траєкторії з можливістю зміни її радіуса.

Завдання:

- огляд верстатів для здійснення токарної обробки та способів отримання сферичних поверхонь за такої обробки;
- огляд технічних рішень, що забезпечують рух інструменту при токарній обробці по коловій і прямій траєкторіях;
- розробка пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей на заміну поперечного супорта;
- виконання необхідних проєктних та перевірочних розрахунків конструктивних елементів пристосування.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи                                  | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1.    | Патентний огляд.                                     | 17.03                         | вик.     |
| 2.    | Огляд літературних джерел.                           | 27.03                         | вик.     |
| 3.    | Розробка кінематичної схеми.                         | 07.04                         | вик.     |
| 4.    | Ескізний проект вузла.                               | 17.04                         | вик.     |
| 5.    | Проектні та перевірочні розрахунки.                  | 24.04                         | вик.     |
| 6.    | Остаточне компонування пристосування.                | 01.05                         | вик.     |
| 7.    | Виконання графічної частини кваліфікаційної роботи.  | 22.05                         | вик.     |
| 8.    | Оформлення пояснювальної записки.                    | 29.05                         | вик.     |
| 9.    | Оформлення презентації роботи.                       | 31.05                         | вик.     |
| 10.   | Здача роботи на кафедрі та перевірка на антиплагіат. | 01.06                         | вик.     |
|       |                                                      |                               |          |

Дата видачі завдання

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

Здобувачка вищої освіти \_\_\_\_\_ Ярослава МИХАЙЛЕВСЬКА  
(підпис)Керівник роботи \_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА  
(підпис)

## **Анотація**

МИХАЙЛЕВСЬКА Ярослава. Розробка пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей. Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2026. – 48 с. Матеріали презентації 4 іл.

Розроблено пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей шляхом забезпечення подачі виконавчого органу по точній коловій траєкторії при збереженні сталості орієнтації відносно дотичної в кожній точці зазначеної траєкторії. Таке пристосування може працювати як в режимі точного відтворення колових траєкторій довільного радіуса, так і в режимі прямолінійних траєкторій.

Актуальність: використання силового столу з двома коловими рухами подачі ексцентрично розташованих один в одному елементів в якості пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей дозволяє суттєво покращити даний процес при збереженні можливості відтворювати рух по прямолінійним траєкторіям, що значно розширює технологічні можливості токарного верстата.

Практичне значення: розроблено пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей, сформульовані правила та визначені аналітичні залежності для забезпечення необхідних режимів його роботи, виконано необхідні проєктні та перевірочні розрахунки основних елементів.

Ключові слова: токарна обробка, сферична поверхня, точність.

## **Summary**

MYKHAILEVSKA Yaroslava. Development of a device for precise turning of spherical surfaces of parts. Qualification work at the first (bachelor's) level of higher education: CUNTU, 2026. – 48 p. Presentation materials 4 il.

A device has been developed for the precision turning of spherical component surfaces by ensuring the feed of the end effector along a precise circular trajectory while maintaining constancy of orientation relative to the tangent at each point of the specified trajectory. A transverse support based on a power module with two circular motions of feeding eccentrically arranged elements was developed. This device can work both in the mode of accurate reproduction of circular trajectories of arbitrary radius, and in the mode of rectilinear trajectories.

Topicality: using a power unit featuring two circular feed motions—generated by elements arranged eccentrically within one another—as a device for the precision turning of spherical surfaces allows for significant process improvement while retaining the capability for linear-path movement, thereby greatly expanding the lathe's technological capabilities..

Practical significance: A device has been developed for the precision turning of spherical component surfaces, rules have been formulated and analytical relationships defined to ensure the required operating modes, the necessary design and verification calculations for the main elements have been performed.

Keywords: lathe, spherical surface, precision.

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Механіко-технологічний факультет  
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»  
Завідувач кафедри ММіР  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти  
на тему:  
**«Розробка пристосування для  
точної токарної обробки сферичних  
поверхонь деталей»**

Виконала здобувачка вищої освіти IV-го  
курсу групи ГМ-22-3  
ОПП «Галузеве машинобудування»  
спеціальності 133 «Галузеве  
машинобудування»

\_\_\_\_\_ Ярослава МИХАЙЛЕВСЬКА

Керівник роботи к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА

Рецензент:

\_\_\_\_\_

| ЗМІСТ                                                                                       | сторінка |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| ВСТУП                                                                                       | 8        |
| РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ ОБРОБКИ ФАСОННИХ ПОВЕРХОНЬ НА<br>ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ З ЧПУ                   | 11       |
| 1.1 Особливості будови токарних верстатів з ЧПУ                                             | 11       |
| 1.2 Обробка фасонних поверхонь на токарних верстатах                                        | 17       |
| 1.3 Мета і задачі роботи                                                                    | 24       |
| РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ТОЧНОЇ<br>ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ  | 26       |
| 2.1 Силовий стіл з коловими рухами подач                                                    | 26       |
| 2.2 Пристосування для точної токарної обробки сферичних<br>поверхонь деталей                | 31       |
| 2.3 Розрахунок зубчатої передачі                                                            | 34       |
| 2.4 Розрахунок жорсткості підшипника обертання зубчастого<br>колеса внутрішнього зачеплення | 41       |
| ВИСНОВКИ                                                                                    | 45       |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                  | 47       |

## ВСТУП

Підвищення якості механічної обробки є однією з цілей розвитку сучасного верстатобудування та визначає шляхи удосконалення структури верстатів і верстатних комплексів, що нині випускаються, в першу чергу верстатів з ЧПУ, верстатів для багатоопераційної обробки типу «обробний центр» на основі токарного типу, важких верстатів, високоточних верстатів, автоматизованих і робототехнологічних комплексів і ліній, гнучких виробничих систем.

При обробці сферичних поверхонь на токарних верстатах однією з проблем є невідповідність складових вектора подачі виконавчих елементів та форми оброблюваної поверхні. Для отримання максимально точної сферичної поверхні зазвичай використовується метод копіювання. Даний метод не дозволяє оперативно змінювати радіус обробленої поверхні. Такого недоліку позбавлений метод дотику за умови, якщо траєкторія руху вершини різця буде максимально точно знаходитися на радіусі сфери, заданого на кресленні деталі. При цьому максимальна якість обробленої поверхні спостерігатиметься у тому випадку, коли інструмент в кожній точці траєкторії зберігатиме стале спрямування до дотичної, яка проведена через вершину різця до колової траєкторії його руху. В протилежному випадку спостерігатиметься нерівномірність умов різання в кожній точці траєкторії руху різця, буде помітна різниця у відстані, що її проходило кожна точка інструменту під час обробки. Опитані фактори сприятимуть нерівномірності зношування різця та, як наслідок, швидкої втрати точності отримуваних деталей.

На сучасних токарних верстатах реалізація методу дотику при обробці сферичних поверхонь у випадку застосування звичайного універсального інструменту траєкторія руху різця являє собою компіляційну сукупність прямих відрізків, які апроксимовано наближаються до кола. При сталому положенні різця відбувається кінематична зміна кута різця в плані, що

погіршуватиме якість обробки. Відтак постає питання забезпечення більш точного способу точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей.

В якості такого способу можна розглянути використання пристосування, яке б забезпечувало рух універсального інструменту по коловій траєкторії з можливістю оперативної зміни її радіуса по команді системи управління, а також забезпечувало б сталість положення інструменту до дотичної у кожній точці такої колової траєкторії. Виконання цих двох умов забезпечувало б максимально широку універсальність використання такого способу та задовольняло б вимоги до підтримання сталих умов різання по всій траєкторії. У випадку, коли б таке пристосування мало змогу працювати в режимі руху ще й по прямолінійній траєкторії, то таке технічне рішення відповідало б самим широким вимогам щодо універсального використання токарних верстатів. Відтак поставлене завдання становить практичну цінність.

**Мета і задачі роботи.** Метою даної роботи є розробка пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей шляхом забезпечення подачі різця по точній коловій траєкторії зі сталою його орієнтацією відносно дотичної в кожній точці зазначеної траєкторії з можливістю зміни її радіуса. Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- огляд верстатів для здійснення токарної обробки та способів отримання сферичних поверхонь за такої обробки;
- огляд технічних рішень, що забезпечують рух інструменту при токарній обробці по коловій і прямій траєкторіях;
- розробка пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей на заміну поперечного супорта;
- виконання необхідних проєктних та перевірочних розрахунків конструктивних елементів пристосування.

*Практичне значення* – розроблено пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей, сформульовані правила та визначені аналітичні залежності для забезпечення необхідних режимів його роботи, виконано необхідні проєктні та перевірочні розрахунки основних елементів.

## РОЗДІЛ 1

### МЕТОДИ ОБРОБКИ ФАСОННИХ ПОВЕРХОНЬ НА ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ З ЧПУ

#### 1.1 Особливості будови токарних верстатів з ЧПУ

Токарні верстати з ЧПУ за призначенням діляться на патронні, що призначені для обробки порівняно коротких консольно закріплених в затискному патроні деталей, центрові, які оснащуються задньою бабкою, та призначені для обробки валів у центрах, і патронно-центрові, найбільш універсальні [1].

Однією з основних рис в компоновці верстата є просторове розташування напрямних супорта: горизонтальне, в якому зберігається зовнішня подібність з універсальними токарними і револьверними верстатами, вертикальне або похиле, в яких перевагами є зручне обслуговування, легкий схід і видалення стружки. Розташування ходового гвинта між напрямними зменшує перекошення супорта і підвищує точність його переміщення.

В токарних верстатах нового покоління, крім основних операцій механічної обробки, передбачена можливість вимірювання оброблюваних деталей. Вимоги до точності таких верстатів та прийомів збереження її протягом тривалого часу є особливо високими.

Токарні верстати з ЧПУ як мінімум здійснюють переміщення по двом керованим координатам: по осі  $Z$  – переміщення супорта вздовж осі шпинделя; по осі  $Y$  – поперечне переміщення супорта перпендикулярно до цієї осі. На поперечному супорті встановлюється або різцетримач (якщо зміна інструменту відбувається з магазину), або револьверна поворотна інструментальна головка (РГ), вісь повороту якої може мати два різних положення: рівнобіжне з віссю  $Z$  або нормальне до площини  $ZX$ . Спостерігаються тенденції до оснащення верстатів двома та більше РГ.

Останнім часом намітилася також тенденція побудови токарних верстатів з ЧПУ не тільки на базі універсальних токарних, токарно-револьверних, патронно-центрових верстатів, але і на базі токарних автоматів, для яких характерною особливістю була наявність розподільчого валу, і які застосовувалися насамперед у масовому і багатосерійному типах виробництва.

Подальше підвищення продуктивності обробки і розширення технологічних можливостей токарних верстатів з ЧПУ розвивається у напрямку концентрації операцій, збільшення числа РГ і супортів, підвищення жорсткості конструкцій за рахунок нових компоновочних рішень (наприклад, похилі станини у компоновках верстатів фірми «Heid» (рис. 1.1).

Рис. 1.1. Компоновки токарних верстатів з ЧПУ фірми «Heid» при різних максимальних діаметрах  $D_{max}$  заготовки:  $a$  – 400, 530 мм;  $b$  – 560, 750, 900, 1200 мм

При токарній обробці на верстатах з ЧПУ, що мають традиційну компоновку, складно вести обробку одночасно більш ніж двома інструментами, тому що є лише два незалежних супорти (рис. 1.2,  $a$ ) з револьверними головками, одна з яких для зовнішньої обробки, а інша – для внутрішньої. Також може використовуватися інструмент в задній бабці.

Сучасні токарно-центрові верстати мають можливість обточувати заготовки одночасно з двох сторін (рис. 1.2,  $b$ ,  $в$ ) при кріпленні останніх за середню частину і підтримці з торців.

При розміщенні шпиндельної бабки між центрами (рис. 1.2,  $e$ ) та при забезпеченні її переміщення стає можливою високоточна обробка довгих деталей, що супроводжується концентрацією інструментів (обробка чотирма супортами). Подальше підвищення концентрації інструментів можливо на верстатах з принципово новими компоновочними рішеннями (рис. 1.2,  $з$ ), що

мають 3...5 супортів, повздовжні напрямні, та працюють за принципом розподілу припуску між різцями як по глибині, так і по довжині обробки. Однак при цьому ускладнюється подальше підвищення продуктивності, розширення технологічних можливостей верстата до багатоопераційного. Новий рівень розробок, за яким верстат наближається до напівавтомату багатосерійного виробництва, передбачає поділ переміщень робочого органа на основні (робочі) і допоміжні (налагоджувальні), та виконується роздільно супортами і незалежно від них ріжучими інструментами багаторізевого пристрою (рис. 1.2, *д, е*), у якому налагоджувальне переміщення різців здійснюється за допомогою крокових двигунів, а затиск – гідроциліндрами.

Фірма «Шисс-Фрорип» створила токарний прутковий автомат з ЧПУ (типу CNC) з двома супортами мод. THC30D з завантажувальним магазином для прутків, на якому комплектно виготовляються, а потім і збираються дві деталі різьбового з'єднання.

Фірма «Voley» за рахунок модульного принципу побудови розробила п'ять виконань токарного верстата з ЧПУ (рис. 1.3), що забезпечують високу точність обробки деталей по діаметру у всьому діапазоні частот обертання шпинделя. В цих верстатах передбачена можливість автономного приводу кожного інструмента, який встановлений в револьверній головці.

Рис. 1.2. Схеми концентрації операцій на токарних верстатах з ЧПУ

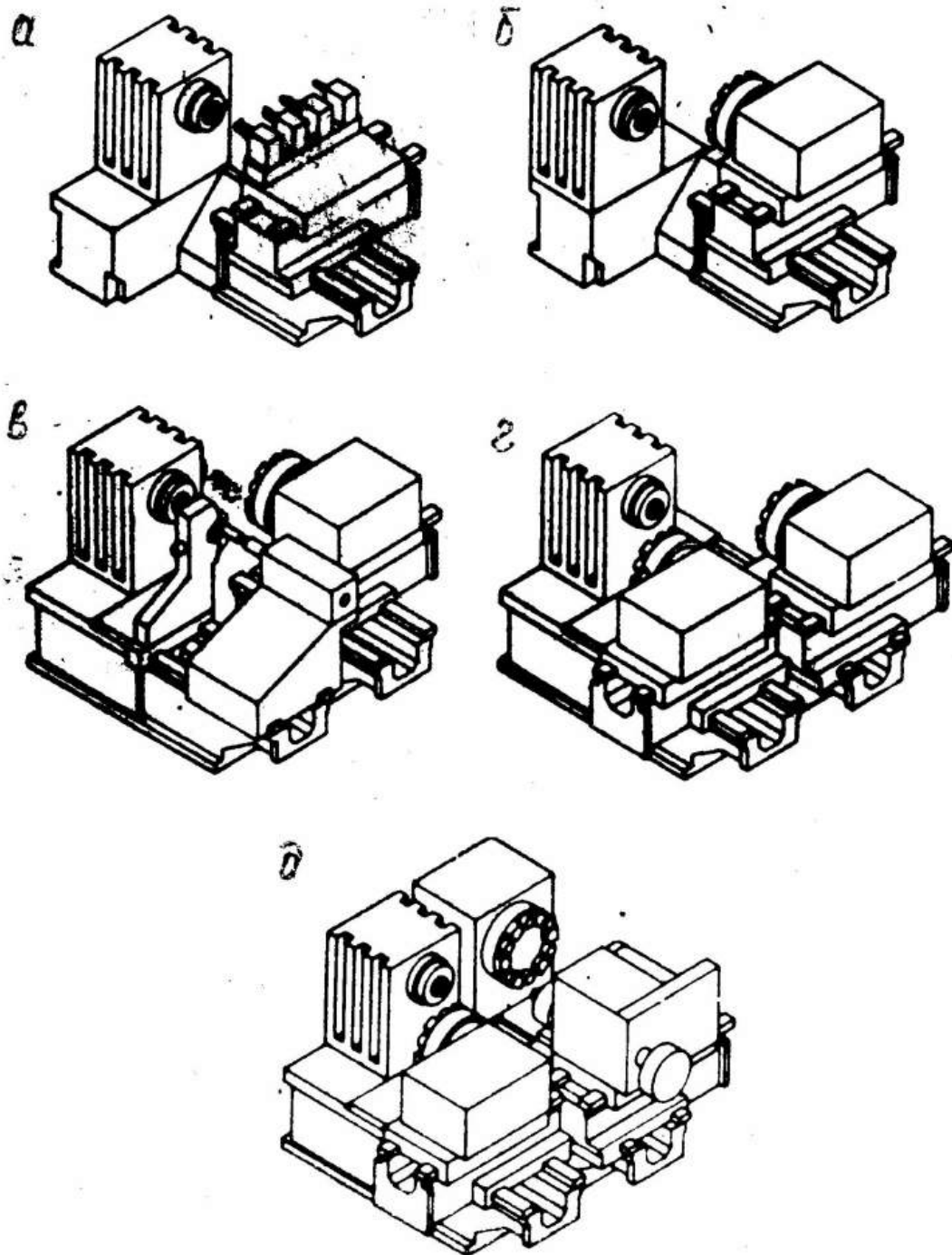


Рис. 1.3. Варіанти виконання токарних верстатів з ЧПУ фірми «Boley» на основі модульного принципу: *а* – двохкоординатний; *б* – двохкоординатний, оснащений 12-позиційною револьверною головкою (РГ); *в* – двохкоординатний, оснащений 12-позиційною РГ і задньою бабкою; *г* – чотирьохкоординатний, оснащений двома 12-позиційними РГ і шпиндельною бабкою; *д* – чотирьохкоординатний, оснащений двома 12-позиційними РГ і двома шпиндельними бабками

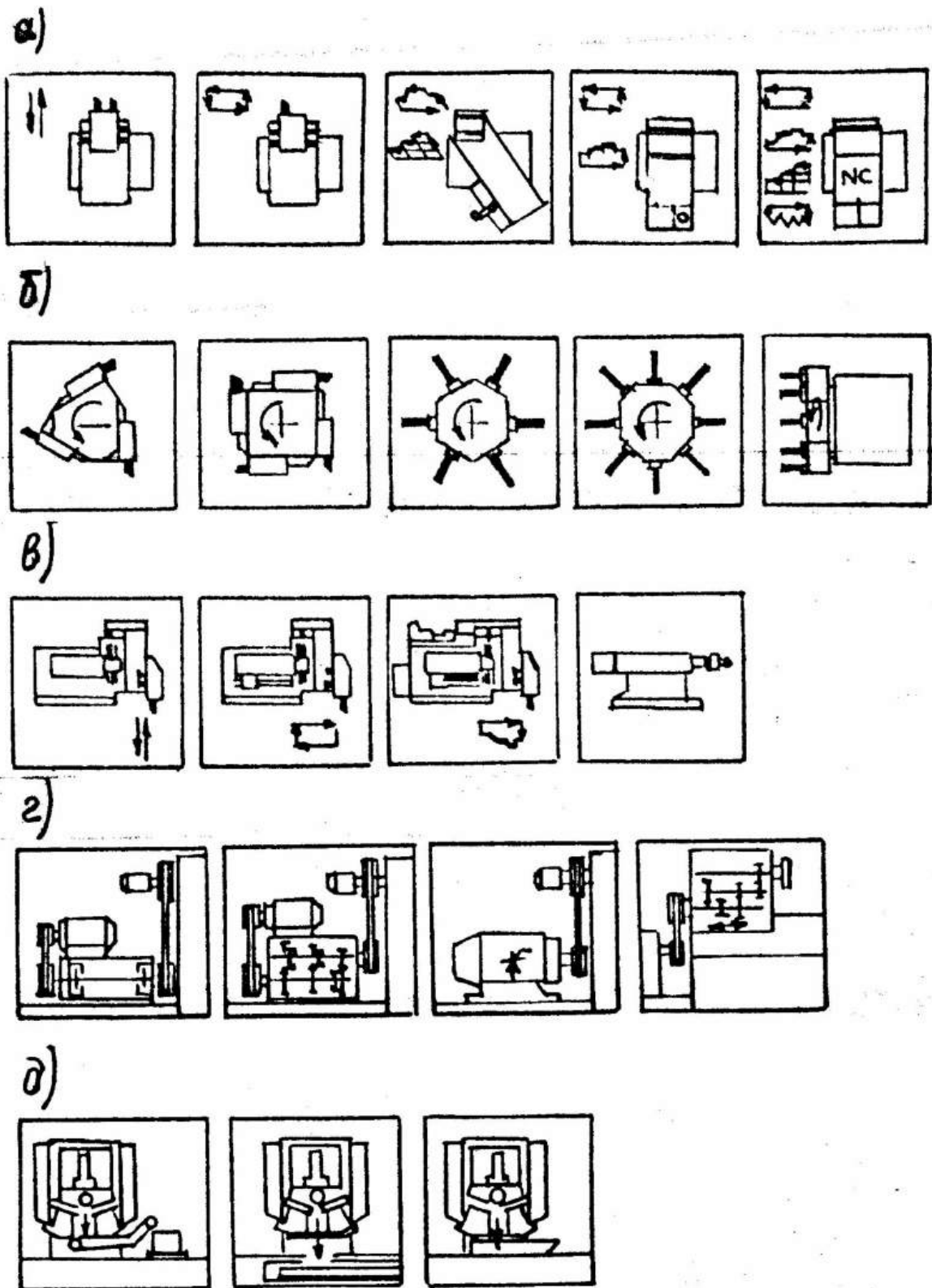


Рис. 1.4. Уніфіковані модулі токарних верстатів з ЧПУ фірми «Етаг»: а – нижні салазки; б – інструментальні системи до них; в – верхні салазки; г – приводи шпинделів виробів; д – стружкоприбиральний транспортер

Фірма «Emag» створила власну гаму одношпindelних і багатшпindelних токарних верстатів з ЧПУ на основі агрегатно-модульного принципу, з використанням пристроїв автоматичного маніпулювання виробами. Основними уніфікованими модулями токарних верстатів фірми «Emag» є станина, шпindelна бабка, супорти, завантажувальний механізм, несуча рама, огороження робочої зони обробки, електрошафи. За таким підходом основною тенденцією в створенні токарних верстатів з ЧПУ є використання агрегатно-модульного принципу побудови з уніфікованих вузлів [2] (рис. 1.4). Вузли верстата, до яких відносяться салазки, опорна задня бабка, верхні салазки, привід шпindelів виробу і стружкоприбиральний транспортер, можна застосовувати до всієї гами верстатів. За потреби салазки поставляються в лівому або правому виконанні, а інструментальні системи – у формі багаторізцевої державки або револьверної головки. На двохшпindelних або чотирьохшпindelних верстатах можна користуватися верхніми салазками з двох сторін або тільки з однієї сторони. Різноманітне виконання оснащення забезпечує високу економічну ефективність верстатів поряд з їх широкими технологічними можливостями, короткими термінами проєктування і виготовлення.

## 1.2 Обробка фасонних поверхонь на токарних верстатах

Поверхні деталей (як зовнішні, так і внутрішні) відносять до фасонних, якщо вони утворені криволінійною утворюючою, комбінацією прямолінійних утворюючих, розташованих під різними кутами до осі деталі, або комбінацією криволінійних і прямолінійних утворюючих [5, 6].

На токарних верстатах фасонні поверхні отримують:

- ручним або автоматичним поперечним і поздовжнім рухом подачі різця відносно заготовки з підгонкою профілю оброблюваної поверхні по шаблону;

- фасонними різцями, профіль яких відповідає профілю обробленої деталі;
- за допомогою пристосувань і копірних пристроїв, що дозволяють обробити поверхню заданого профілю;
- комбінуванням перерахованих вище методів.

Фасонними різцями обробляють поверхні довжиною до 60 мм (на великих верстатах довжиною до 150 мм) і перехідні поверхні радіусом до 20 мм. Чорнову обробку для підвищення продуктивності ведуть звичайними різцями. При використанні поворотних пристосувань вершина різця переміщається на кут  $\alpha$  по дузі кола радіусом  $R$ , обробляючи при цьому сферичну зовнішню (рис. 1.5, а) і внутрішню поверхні (рис. 1.5, б) або бочкоподібний профіль (рис. 1.5, в) заготовки. Різець переміщують зазвичай за допомогою черв'ячної передачі (рис. 1.5, г).

Сферичні поверхні заготовок середніх розмірів обробляють за допомогою важільних пристосувань різних конструкцій. Наприклад, одну опору важеля закріплюють на станині (рис. 1.6), іншу – на супорті. При подачі супорта до осі різця переміщається по радіусі  $R$ , обробляючи сферичну поверхню.

При обробці по копіру застосовують пристосування прямої дії (сила різання діє на копір; зношування й пружні деформації копіру великі, точність обробки низька) і пристосування з підсилювальним елементом. У пристосуваннях прямої дії копір установлюють співвісно з деталлю, кріплять на задній бабці за допомогою кронштейну позаду або попереду (рис. 1.7, а) верстата. При цьому ролик притискається до копіру з різною силою (рис. 1.7, б). При чистовій обробці застосовують схему II, на легких роботах – схему I, при чорновій обробці на важких роботах – схему III.

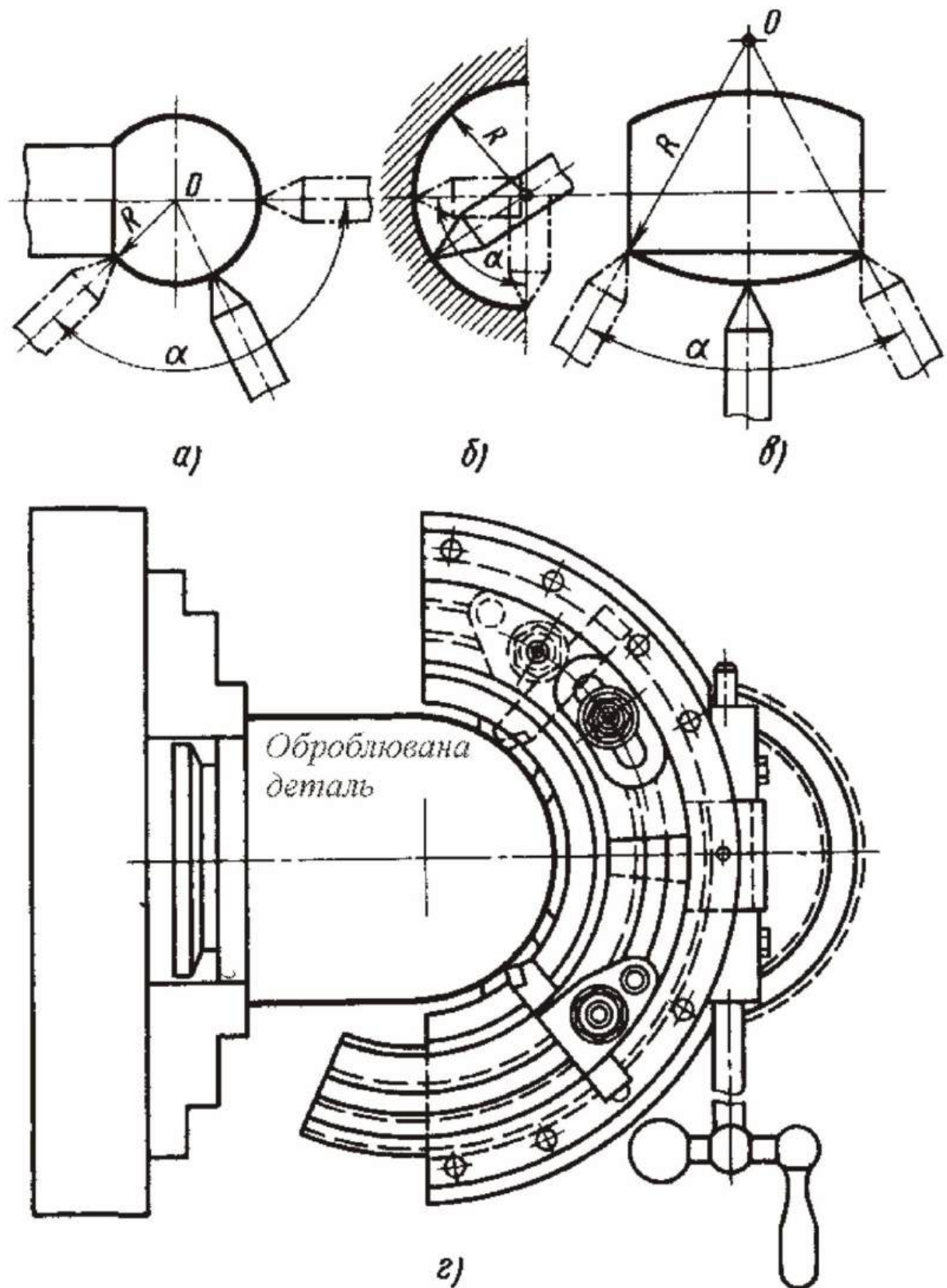


Рис. 1.5. Схеми обробки фасонних поверхонь заготовок

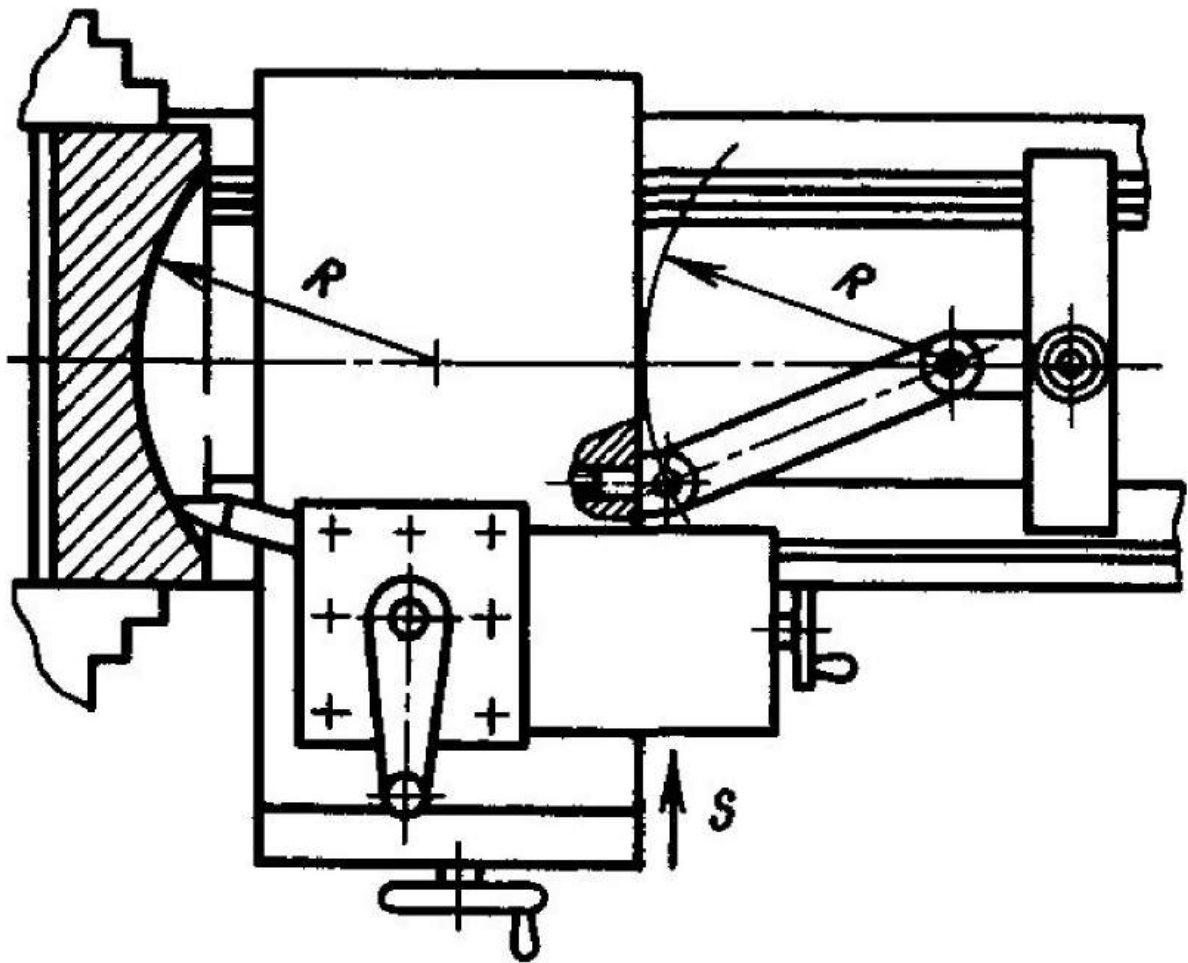


Рис. 1.6. Схема обробки сферичних поверхонь заготовок

У найбільш точних пристосуваннях замість ролика використовують ножовий щуп. Для обробки поверхонь з кутами підйому профілю більше  $35^\circ$  застосовують розтянуті копірні лінійки. За допомогою спеціального механізму така лінійка переміщується відносно щупа з більшою швидкістю, що дозволяє на лінійці зробити кути підйому меншими, ніж на деталі.

За допомогою гідросупорту можливо обробити поверхні з діаметрами, що збільшуються чи зменшуються, але не більш, ніж на величину  $D - d < l$ , де  $l$  – довжина оброблюваної ділянки. Застосування гідросупорту забезпечує підвищення продуктивності в 1,5–2 рази.

Спеціальними чашковими інструментами обробляють сферичні внутрішні (рис. 1.8, а) і зовнішні (рис. 1.8, б – г) поверхні радіусом  $R$ .

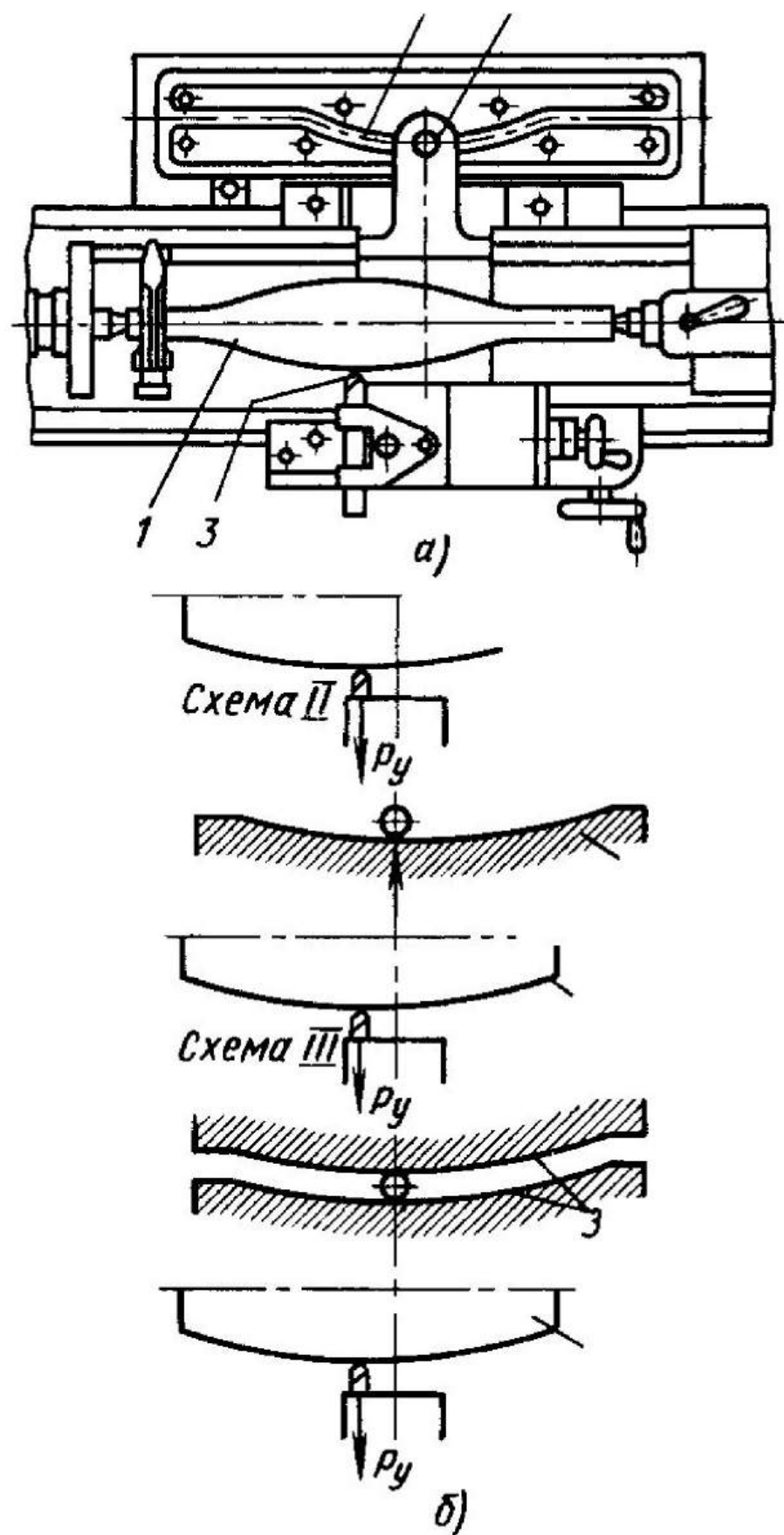


Рис. 1.7. Схеми обробки фасонних поверхонь заготовок по копіру

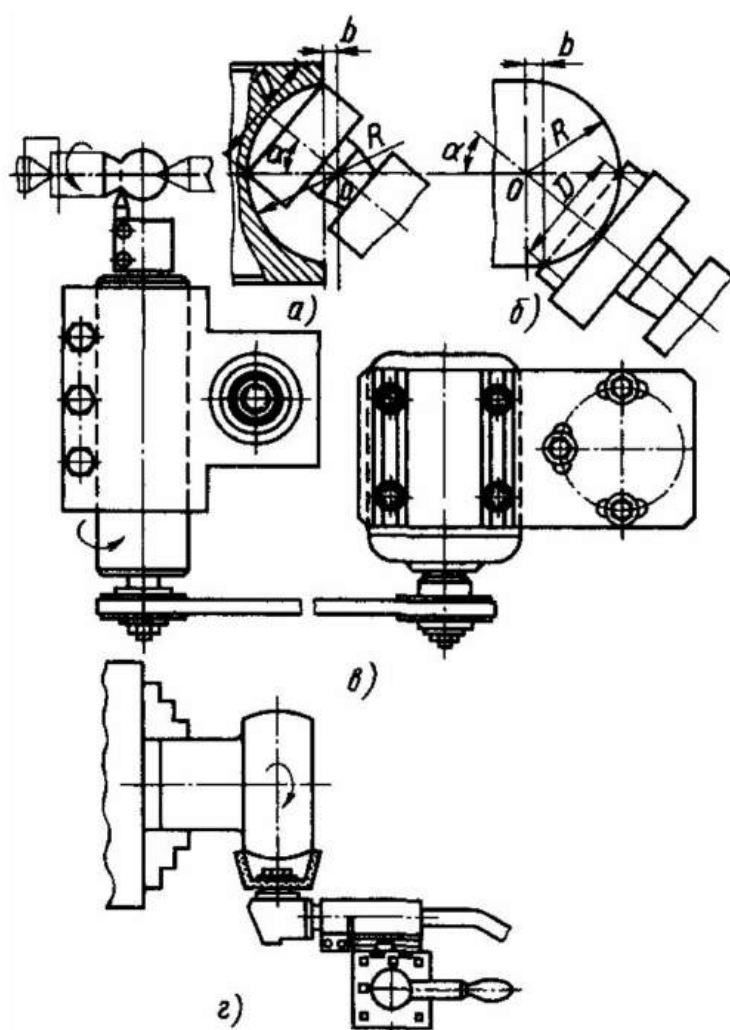


Рис. 1.8. Схеми обробка заготовок чашковими інструментами

Шпиндель інструмента встановлений під кутом  $\alpha$ :

$$\sin \alpha = \frac{D}{2R}, \quad D = \sqrt{2R(R - b)},$$

де  $D$  — діаметр чашкового інструмента;  $b$  — відстань між вершиною інструмента й центром сфери.

Інструмент при обробці обертається від спеціального привода.

Сучасні системи ЧПУ [8] дозволяють вести обробку по постійному циклу. При складанні програми задають вихідний і необхідний контур.

Система ЧПУ автоматично формує керуючі команди для виконання обробки. Схеми переміщення інструментів при обробці основних ділянок поверхні наведені на рис. 1.9 і 1.10. Зазвичай ці ділянки обробляють чорновими, а потім чистовими різцями.

Рис. 1.9. Схеми переміщень прохідних різців при обробці основних ділянок поверхонь: а – лівого різця; б – правого різця; I – ескіз ділянки поверхні; II – схеми переміщень

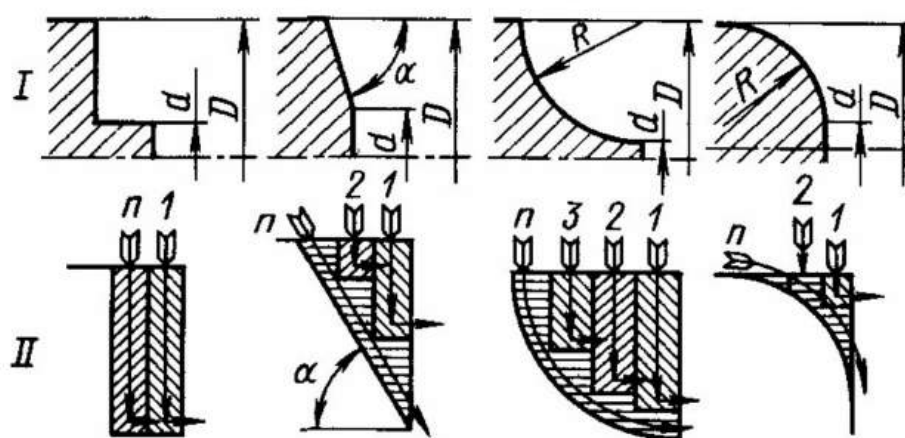


Рис. 1.10. Схеми переміщень підрізного різця при обробці основних ділянок поверхонь: I – ескіз ділянки поверхні; II – схеми переміщень

### 1.3 Мета і задачі роботи

В якості бази, до якої будуть вноситися зміни, обираємо токарний верстат з ЧПУ моделі 16K20Ф3. Ці верстати залишаються розповсюдженими в Україні. До того ж є чимало прикладів модернізації даного верстата, які з урахуванням його початкової підвищеної точності дозволяють продовжити його експлуатацію.

Показано, що метод сліду і метод дотику забезпечують більшу точність в обробці сферичних поверхонь при використанні універсального інструменту. Проте в верстатах з ЧПУ з їх прямолінійними траєкторіями подачі досягти необхідної точності дуже важко. Пошук технічних рішень, які

б забезпечували рух універсального інструменту по коловій траєкторії, бажано з можливістю зміни радіуса такої траєкторії, з одночасним забезпеченням сталості положення інструменту до дотичної у кожній точці кола, що забезпечить максимально широку універсальність застосування такого способу при задоволенні вимог до сталих умов різання на траєкторії, привів до силового вузла з коловими рухами подач. Закладені в нього принципи пропонується використати для проектування токарного верстата з покращеними характеристиками для обробки сферичних поверхонь. Дане технічне рішення дає можливість здійснювати рух вихідного органу по коловій траєкторії довільного радіусу. До того ж є механізм сталої орієнтації вихідного органу. Якщо буде можливість перемикає режим його роботи, то вихідний орган зможе переміщатися зі сталою орієнтацією до обраного незмінного вектора, так і змінювати свою орієнтацію, залишаючись незмінним до дотичної в точках колової траєкторії.

**Мета і задачі роботи.** Метою даної роботи є розробка пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей шляхом забезпечення подачі різця по точній коловій траєкторії зі сталою його орієнтацією відносно дотичної в кожній точці зазначеної траєкторії з можливістю зміни її радіуса. Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- огляд верстатів для здійснення токарної обробки та способів отримання сферичних поверхонь за такої обробки;
- огляд технічних рішень, що забезпечують рух інструменту при токарній обробці по коловій і прямій траєкторіях;
- розробка пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей на заміну поперечного супорта;
- виконання необхідних проектних та перевірочних розрахунків конструктивних елементів пристосування.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ТОЧНОЇ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

#### 2.1 Силовий стіл з коловими рухами подач

Проведений в попередньому розділі огляд методів обробки фасонних і сферичних поверхонь показав велику складність їх отримання на токарних верстатах навіть при їх управлінні від систем ЧПУ. Складність обробки насамперед позначається на зниженні точності отриманих деталей, до того ж падає продуктивність процесу. Очікувано поліпшити дані показники може зміна запропонованого нижче силового столу за патентом України на корисну модель № 3998 [9] з урахуванням специфіки токарної обробки.

В основу винаходу була поставлена задача підвищення жорсткості, зниження ваги, а також спрощення конструкції.

Поставлена задача була вирішена тим, що платформа кріпиться до гільзи, яка ексцентрично розташована в напрямних на диску, що зв'язаний через зубчасту і черв'ячну передачі з приводом обертання, та, в свою чергу, ексцентрично розташованому на напрямних в іншому диску, що обертається по напрямним корпусу і з'єднаний через черв'ячну передачу з приводом обертання. За іншим варіантом, що забезпечує розширені технологічні можливості силового столу, його платформа має додатковий привід подачі в напрямку, перпендикулярному до площини переміщення дисків.

Основою конструкції силового столу, як видно з рис. 2.1, являється корпус 1, в якому по напрямним обертається диск 2. На диску 2 з ексцентриситетом розташований диск 3. В свою чергу в диску 3 з ексцентриситетом розташована гільза 4, до якої з однієї сторони жорстко кріпиться платформа 5, а з протилежного торця – зубчасте колесо 6. Співвісно з зубчастим колесом 6 на корпусі 1 жорстко закріплено зубчасте колесо 7, причому ділильні діаметри цих коліс рівні. В зчеплення з даними

колесами входить зубчасте колесо 8, що вільно обертається на осі 9, яка жорстко закріплена на диску 3 по осі його обертання. До диску 3 також прикріплена гільза 10 з жорстко закріпленим зубчастим колесом 11, що складає передачу внутрішнього зачеплення з колесом 12, яке жорстко закріплене на гільзі 13. Осі обертання зубчастого колеса 11 і диску 3 співпадають. Гільза 13 по напрямним обертається в гільзі 14, яка нерухомо з'єднана з диском 2. На гільзі 14 розташовується черв'ячне колесо 15, що входить в зачеплення з черв'яком 16. Обертання черв'яка 16 здійснюється від двигуна 17. Аналогічно на гільзі 13 зі сторони протилежній колесу 12 кріпиться зубчасте колесо 18, що входить в зачеплення з черв'яком 19. Обертання черв'яка 19 здійснюється від двигуна 20. Осі обертання черв'ячних коліс 15 і 18 та диску 2 співпадають.

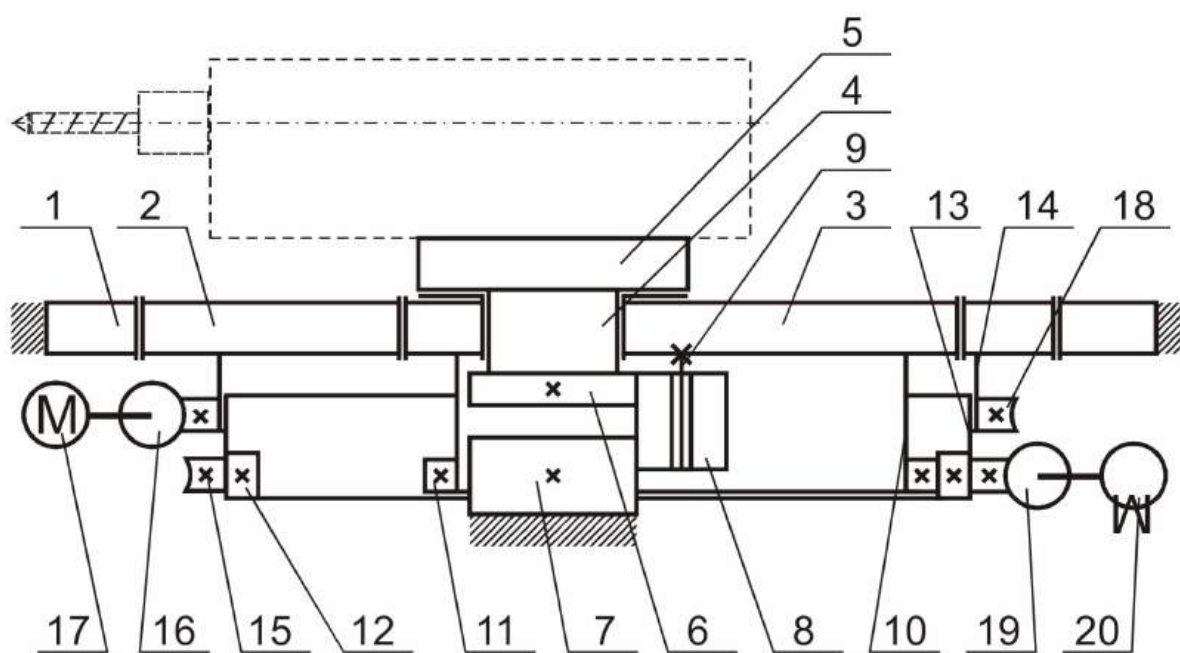


Рис. 2.1. Схема силового столу

Принцип роботи механізму подачі силового столу полягає у тому, що лінійні координатні переміщення у площині обертання дисків 2 і 3 будуть отримуватися внаслідок узгоджених взаємних поворотів диску 2 з ексцентрично розташованим у ньому диском 3 та диску 3 з ексцентрично

розташованою у ньому гільзою 4. При необхідності виконання руху гільзи 4 з закріпленою на ній платформою 5 по прямому відрізку система управління розраховує кут повороту диску 2 відносно корпусу 1 та диску 3 відносно диску 2. Диск 3 зв'язаний з корпусом 1 через гільзу 10, зубчасту передачу 11-12, черв'ячну передачу 18-19 і двигун 20. Із-за перекочування зубчастого колеса 11 по зубчастому колесу 12 диск 3 отримуватиме додатковий поворот. Система управління розраховує величину даного додаткового повороту і корегує величину кута повороту диску 3. Таким чином, взаємно пов'язані колові рухи дисків 2 і 3 перетворюються у рух гільзи 4 по прямому відрізку у площині згаданих колових рухів елементів.

При необхідності забезпечення паралельності напрямку орієнтації платформи 5 при її послідовних положеннях використовується планетарний механізм 6-8 з обов'язковою умовою рівності ділительних діаметрів зубчастих коліс 6 і 7 і розташуванням сателітного колеса 8 співвісно з диском 3. Переміщення осі гільзи 4 супроводжується перекочуванням зубчастого колеса 6 по зубчастому колесу 8 на кут, що буде рівним куту перекочування зубчастого колеса 8 по нерухомо закріпленому на корпусі 1 зубчастому колесу 7, але в протилежному напрямку. Таким чином, забезпечується паралельність напрямку орієнтації платформи 5 в її послідовних положеннях.

Систему координат  $XO_1Y$ , в якій переміщується гільза 4, відповідно прив'язано до точки  $O_1$  перетину осі диску 2 з площиною переміщень гільзи 4, як то показано на рис. 2.2. У довільному початковому положенні гільзи 4, що позначене точкою  $O_3$  і має координати  $x, y$ , вісь диску 3 буде займати положення, яке позначене точкою  $O_2$ . Система управління за координатами точки  $O_3$  розраховує кут  $b$  між відрізками  $O_1O_2$  і  $O_2O_3$  та кут  $d$  між відрізком  $O_1O_2$  і віссю  $O_1Y$  за наступними залежностями:

$$b = \arccos \frac{L_1^2 + L_2^2 - x^2 - y^2}{2L_1L_2},$$

$$d = \arctg \frac{x}{y} - \arcsin \sqrt{\frac{4L_1^2 L_2^2 - (L_1^2 + L_2^2 - x^2 - y^2)^2}{4L_1^2 (x^2 + y^2)}},$$

де  $L_1$  – довжина відрізка  $O_1O_2$ ,

$L_2$  – довжина відрізка  $O_2O_3$ ,

$x, y$  – поточні координати точки  $O_3$ .

Рис. 2.2. Схема роботи силового столу

При переміщенні гільзи 4 у наступну точку своєї заданої траєкторії системою управління визначаються координати цієї точки у системі координат  $XO_1Y$  і за цими координатами будуть розраховані кути  $b\phi$  і  $d\phi$  для цього положення точки і різниця між кутами  $b\phi$  і  $b$  та  $d\phi$  і  $d$ :

$$Db = b\phi - b, Dd = d\phi - d.$$

Диск 2 необхідно буде повернути на кут  $Dd$ . При цьому диск 3 внаслідок зачеплення зубчастих коліс 11 і 12 повернеться на додатковий кут  $g$ :

$$g = Dd \times \frac{R_1}{R_2},$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – радіуси ділільних кіл зубчастих коліс 12 і 11 відповідно.

Таким чином, диск 3 необхідно буде повернути не на кут  $Db$ , а на кут  $Db\phi$ :

$$Db\phi = Db - g.$$

Поворот дисків 2 і 3 відбувається одночасно, пропорційно до величини кутів  $\text{Db}\phi$  і  $\text{Dd}$ . При умові  $L_1 = L_2$  площа можливого знаходження гільзи 4 буде максимально можливою, оскільки стає доступною зона поблизу осі диску 2.

Якщо осі гільзи 4 та диску 2 будуть співпадати, то рух гільзи 4 вздовж відрізка  $O_1O_2$  стане неможливим. В такому випадку системі управління необхідно повернути диск 2 на прямий кут, після чого можна розпочинати рух гільзи 4 в необхідному напрямку.

Дане технічне рішення пропонується в якості прототипу пристосування для здійснення точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей.

## 2.2 Пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей

На рисунку 2.3 представлена спроба конструктивної реалізації схеми з патенту України на корисну модель № 3998 [9] з удосконаленням у вигляді двох електромагнітних муфт, що забезпечують можливість перемикавання режиму орієнтації платформи пристосування.

Дане пристосування оригінальної конструкції для здійснення точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей складається з станини 1, на ободі якої виконані колові напрямні. По даним напрямним обертається зовнішній диск 2. Обертання на зовнішній диск 2 передається через черв'ячне колесо 3, що жорстко приєднане до нього. Осі зовнішнього диску 2 і черв'ячного колеса 3 співпадають. В зовнішньому диску 2 з ексцентриситетом виконані колові напрямні, по яким обертається внутрішній диск 4. Обертання на диск 4 передається через зубчасте колесо 5, причому вісь даного колеса співпадає з віссю внутрішнього диску 4. Обертання на зубчасте колесо 5 передається через зубчасте колесо 6, яке на підшипнику 7 встановлене на зовнішньому диску 2. Осі диску 2 і зубчастого колеса 6 співпадають. Зубчасте колесо 5 і зубчасте колесо 6 утворюють зубчасту

передачу внутрішнього зачеплення. Обертання на зубчасте колесо 6 передається через жорстко пов'язане з ним черв'ячне колесо 8. Осі зубчастого колеса 6 і черв'ячного колеса 8 співпадають. У внутрішньому диску 4 з ексцентриситетом до осі його обертання виконані напрямні, по яким обертається стрижень 9 з жорстко приєднаною до нього платформою 10. Ексцентриситети розташування внутрішнього диску 4 відносно зовнішнього диску 2 та стрижня 9 відносно внутрішнього диску 4 однакові за величиною.

### Рис. 2.3 Будова пристосування

До стрижня 9 зі сторони, яка є протилежною кріпленню платформи 10, жорстко приєднується зубчасте колесо 11. Осі зубчастого колеса 11 і стрижня 9 співпадають. До внутрішнього диску 4 співвісно до нього приєднана електромагнітна муфта 13, на осі якої обертається зубчасте колесо 12. Вмикання і вимикання електромагнітної муфти 13 забезпечує або жорсткий зв'язок зубчастого колеса 12 з внутрішнім диском 4, або вільне обертання зубчастого колеса 12.

Співвісно з зовнішнім диском 2 до станини 1 через електромагнітну муфту 15 приєднується зубчасте колесо 14. Вмикання і вимикання електромагнітної муфти 15 забезпечує або жорсткий зв'язок зубчастого колеса 14 зі станиною 1, або вільне обертання зубчастого колеса 14. Зубчасте колесо 12 є проміжним для кінематичного поєднання зубчастих коліс 11 і 14.

Обертання на черв'ячні колеса 3 і 8 передається через черв'як 16, окремий для кожного черв'ячного колеса. Обертання на обидва черв'яки 16 передається від електродвигунів 17.

При жорсткому з'єднанні зубчастого колеса 14 зі станиною 1 повинне забезпечуватися вільне обертання зубчастого колеса 12. В протилежному випадку, при вільному обертанні зубчастого колеса 14 повинне забезпечуватися жорстке з'єднання зубчастого колеса 12 з внутрішнім диском 4. При жорсткому з'єднанні зубчастого колеса 14 зі станиною 1

кутова орієнтація платформи 10 буде незмінною по відношенню до станини 1. При жорсткому з'єднанні зубчастого колеса 12 з внутрішнім диском 4 кутова орієнтація платформи 10 буде незмінною по відношенню до внутрішнього диску 4.

До платформи 10 пристосування кріпиться револьверна головка. Зовнішній вигляд та складальний кресленик пристосування наведені в ілюстративному матеріалі до даної роботи. Кінематичні співвідношення, наведені у попередньому пункті, є актуальними і для пропонованого пристосування.

### 2.3 Розрахунок зубчастої передачі

Дана передача передає обертання на внутрішній диск. Параметри висхідного контуру даної передачі прийняті згідно ГОСТ 13755-81. Оскільки колеса даної передачі будуть піддаватися загартовуванню, проєктний розрахунок буде виконано з визначенням модуля передачі [7]. Розрахункова формула для даного випадку має вигляд:

$$m^3 K_m^3 \sqrt[3]{\frac{T_{2F} K_{Fb} Y_{FS1}}{u Z_1^2 Y_{bd} S_{FP1}}},$$

де  $K_m$  – допоміжний коефіцієнт, для прямозубих передач  $K_m = 14$ ;

$T_{2F}$  – крутний момент, що передається передачею,  $T_{2F} = 587$  Н·м,

$K_{Fb}$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження по довжині вінця  $K_{Fb} = 1.05$ ;

$Y_{FS1}$  – коефіцієнт форми зуба, залежить від приведенного числа зубів:

$Z_{1IP} = Z_1 = 172$ , число зубів слід приймати попередньо, для даного випадку прийнято, що  $Y_{FS1} = 3.55$ ;

$Z_1$  – число зубів зубчастого колеса;

$\psi_{bd}$  – коефіцієнт довжини зуба, попередньо рівний  $\psi_{bd} = 0.023$ ;

$s_{FP1}$  – допустиме напруження при розрахунку на згин:

$$s_{FP1} = \frac{s_{F\lim b} \times Y_N}{S_{F\min}} Y_R Y_X Y_d K_R,$$

де  $s_{F\lim b}$  – межа витривалості матеріалу зубів коліс, що розраховуються, для віднульового циклу, у даного випадку слід приймати  $s_{F\lim b} = 580$  МПа;

$Y_N$  – коефіцієнт довговічності, при довготривалій експлуатації слід приймати  $Y_N = 1.0$ ;

$Y_R$  – коефіцієнт, що враховує вплив шорсткості перехідної поверхні, у даному випадку слід приймати  $Y_R = 1.05$ ;

$Y_X$  – коефіцієнт, що враховує розміри зубчатого колеса, для попередньо прийнятих розмірів слід приймати  $Y_X = 1.0$ ;

$Y_d$  – коефіцієнт, що враховує градієнт напруг та чутливість матеріалу до концентрації напруг, у даному випадку слід приймати  $Y_d = 0.98$ ;

$S_{F\min}$  – коефіцієнт запасу міцності для запобігання руйнування від втомлюваності матеріалу, у даному випадку слід приймати  $S_{F\min} = 1.7$ ;

$K_R$  – коефіцієнт реверсивності прикладеного навантаження, у даному випадку слід приймати  $K_R = 0.75$ .

Розраховане значення допустимого напруження при розрахунку на згин, з урахуванням прийнятих коефіцієнтів:

$$s_{FP1} = \frac{s_{F\lim b} \times Y_N}{S_{F\min}} Y_R Y_X Y_d K_R = \frac{580 \times 1}{1.7} \times 1.05 \times 1.0 \times 0.98 \times 0.75 = 263 \text{ МПа.}$$

Розраховане значення модуля передачі:

$$m = K_m \sqrt[3]{\frac{T_{2F} \times K_{Fb} \times Y_{FS1}}{u \times Z_1^2 \times Y_{bd} \times S_{FP1}}} = 14 \times \sqrt[3]{\frac{587 \times 1.05 \times 3.55}{0.593 \times 72^2 \times 0.023 \times 263}} = 3.84 \text{ мм.}$$

Після заокруглення в більшу сторону модуль передачі  $m = 4.0$  мм.

Визначення модуля передачі дає можливість виконати проєктний розрахунок геометричних параметрів евольвентної зубчастої передачі внутрішнього зачеплення.

Вихідні дані до розрахунку:

Модуль  $m = 4.0$  мм.

Кут профілю зуба  $\alpha = 20^\circ$ .

Число зубів шестерні  $z_1 = 102$ .

Число зубів колеса  $z_2 = 172$ .

Кут нахилу зубів  $\beta = 0^\circ$ .

Коефіцієнт різниці зміщень  $x_d = x_2 - x_1 = 0$ , поділ даного коефіцієнта на складові стандартом не регламентується.

Розрахункові параметри.

Ділильний коловий крок зубів:

$$p = \pi m = 3.14 \times 4.0 = 12.56 \text{ мм.}$$

Кут профілю торцевий:

$$\text{tga}_t = \frac{\text{tga}}{\cos \beta} = \frac{\text{tg} 20^\circ}{\cos 0^\circ} = 0.364,$$

$$\alpha_t = \arctg 0.364 = 20^\circ \text{ Equation.3 .}$$

Кут зачеплення:

$$\operatorname{inv} a_{tw} = \frac{2x_d \operatorname{tg} a}{z_2 - z_1} + \operatorname{inv} a_t = \text{Equation.3} \quad \frac{2 \times 0 \times \operatorname{tg} 20^\circ}{172 - 102} + \operatorname{inv} 20^\circ = 0.0149,$$

$$\alpha_{tw} = 20^\circ.$$

Міжосьова відстань:

$$a_w = \frac{(z_2 - z_1)m \cos a_t}{2 \cos b \cos a_{tw}} = \frac{(172 - 102) \times 4.0}{2 \cos 0^\circ} \times \frac{\cos 20^\circ}{\cos 20^\circ} = 140 \text{ мм.}$$

Ділильний діаметр шестерні:

$$d_1 = \frac{z_1 m}{\cos b} = \frac{102 \times 4.0}{\cos 0^\circ} = 408 \text{ мм.}$$

Ділильний діаметр колеса:

$$d_2 = \frac{z_2 m}{\cos b} = \frac{172 \times 4.0}{\cos 0^\circ} = 688 \text{ мм.}$$

Передатне відношення  $u$ :

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{172}{102} = 1.686.$$

Початковий діаметр шестерні:

$$d_{w1} = \frac{2a_w}{u - 1} = \frac{2 \times 140}{1.686 - 1} = 408 \text{ мм.}$$

Початковий діаметр колеса:

$$d_{w2} = \frac{2a_w u}{u - 1} = \frac{2 \times 40 \times 1.686}{1.686 - 1} = 688 \text{ мм.}$$

Діаметр вершин зубів шестерні:

$$d_{a1} = d_1 + 2(h_a^* + x_1)n = 408 + 2(1 + 0)4.0 = 416 \text{ мм.}$$

Діаметр вершин зубів колеса:

$$d_{a2} = d_2 - 2(h_a^* - x_2 - 0.2)n = 688 - 2(1 - 0 - 0.2)4.0 = 678.4 \text{ мм.}$$

Діаметр впадин зубів шестерні:

$$d_{f1} = d_1 - 2(h_a^* + c^* - x_1)n = 408 - 2(1 + 0.2 - 0)4.0 = 398.6 \text{ мм.}$$

Діаметр впадин зубів колеса:

$$d_{f2} = d_2 + 2(h_a^* + c^* + x_2)n = 688 + 2(1 + 0.2 + 0)4.0 = 617.6 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт торцевого перекриття:

$$e_a = \frac{e}{e} 1.88 - 3.2 \frac{a}{e z_1} - \frac{1}{z_2} \frac{\ddot{u}}{\ddot{u}} \cos b = \frac{e}{e} 1.88 - 3.2 \frac{a}{e 102} - \frac{1}{172} \frac{\ddot{u}}{\ddot{u}} \cos 0^\circ = 1.87.$$

Коефіцієнт осьового перекриття:

$$e_b = \frac{pm}{\sin b} = \frac{3.14 \times 4}{\sin 0^\circ} = 0.$$

Сумарний коефіцієнт перекриття:

$$e_v = e_a + e_b = 1.87 + 0 = 1.87.$$

Для підтвердження працездатності розрахованої зубчатої евольвентної передачі внутрішнього зачеплення необхідно провести її розрахунок на контактну міцність. Умова міцності в такому випадку має вигляд:

$$s_H = Z_E Z_H Z_e \sqrt{\frac{F_t \times K_A K_{Hv} K_{Hb} K_{Ha}}{b \times d_1} \frac{u-1}{u}} \leq s_{HP},$$

де  $F_t$  – колова сила на ділильному діаметрі в торцевому перетині:

$$F_t = \frac{2T}{d} = \frac{2 \times 87 \times 1000}{408} = 2870 \text{ Н},$$

$K_A$  – коефіцієнт, що враховує зовнішнє динамічне навантаження, у даному випадку слід приймати  $K_A = 1$ ;

$K_{Hv}$  – коефіцієнт, що враховує динамічне навантаження, яке виникає в зачепленні, у даному випадку слід приймати  $K_{Hv} = 1.01$ ;

$K_{Hb}$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантажень по довжині контактних ліній, у даному випадку слід приймати  $K_{Hb} = 1.05$ ;

$K_{Ha}$  – коефіцієнт, що враховує розподіл навантаження між зубами, у даному випадку для прямозубих коліс слід приймати  $K_{Ha} = 1.0$ ;

$Z_E$  – коефіцієнт, що враховує механічні властивості матеріалів спряжених зубчастих коліс, у даному випадку слід приймати  $Z_E = 190$ ;

$Z_H$  – коефіцієнт, що враховує форму спряжених поверхонь зубів в полюсі зачеплення, у даному випадку слід приймати  $Z_H = 2.49$ ;

$Z_e$  – коефіцієнт, що враховує сумарну довжину контактних ліній, у даному випадку слід приймати  $Z_e = 0.84$ ;

$s_{HP}$  – допустиме напруження при розрахунку на контактну міцність, розраховується за формулою:

$$s_{HP} = \frac{s_{H \lim} \times Z_N}{S_{H \min}} Z_L Z_R Z_v Z_X,$$

де  $s_{H \lim}$  – допустиме напруження при довготривалому навантаженні з постійним режимом, у даному випадку слід приймати  $s_{H \lim} = 850$  МПа;

$Z_N$  – коефіцієнт довговічності, у даному випадку при довготривалій експлуатації слід приймати  $Z_N = 1.0$ ;

$Z_L$  – коефіцієнт, що враховує наявність змащення, у даному випадку слід приймати  $Z_L = 1.0$ ;

$Z_R$  – коефіцієнт, що враховує шорсткість спряжених поверхонь зубів, у даному випадку слід приймати  $Z_R = 0.95$ ;

$Z_v$  – коефіцієнт, що враховує колову швидкість, у даному випадку слід приймати  $Z_v = 0.99$ ;

$Z_X$  – коефіцієнт, що враховує розмір зубчатого колеса, у даному випадку слід приймати  $Z_X = 1.0$ ;

$S_{H\min}$  – коефіцієнт запасу міцності, у даному випадку слід приймати  $S_{H\min} = 1.2$ .

Розраховане значення допустимого напруження:

$$s_{HP} = \frac{s_{H\lim} \times Z_N}{S_{H\min}} Z_L Z_R Z_v Z_X = \frac{850 \times}{1.2} \times 0.95 \times 0.99 \times = 665 \text{ МПа.}$$

Перевірка умови працездатності зубчастої передачі внутрішнього зачеплення по контактній міцності:

$$\begin{aligned} s_H &= Z_E Z_H Z_e \sqrt{\frac{F_t \times K_A K_{Hv} K_{H\beta} K_{Ha}}{b \times d_1} \frac{u-1}{u}} = \\ &= 190 \times 2.49 \times 0.84 \sqrt{\frac{2870 \times 1.01 \times 0.05 \times 1.686-1}{16 \times 408} \times \frac{1.686-1}{1.686}} = \\ &= 173 \text{ МПа} < s_{HP} = 665 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Умова міцності виконується, працездатність передачі забезпечена.

#### 2.4 Розрахунок жорсткості підшипника обертання зубчастого колеса внутрішнього зачеплення

Даний підшипник є нестандартним, і окрім тіл кочення складається з трьох днталей: кільця з канавкою напівкруглого профілю, яке є частиною зубчастого колеса внутрішнього зачеплення, базового кільця з канавкою з четвертю круглого профілю, яке приєднане до зовнішнього диску, та притискного кільця з канавкою з четвертю круглого профілю, яке утримує кульки і створює необхідний натяг. Умови роботи даного підшипника

подібні до роботи радіально-упорних підшипників, аналогічним чином буде здійснюватися їх розрахунок [7].

Максимальною осьовою силою, що діє на даний підшипник, є дотична сила у черв'ячному зачепленні. Вона дорівнює:

$$F_{\text{дот}} = \frac{2T_1}{d_1} = \frac{2 \cdot 7500}{32} = 468.75 \text{ Н.}$$

Відповідно до даної сили визначається сила натягу. Таким чином  $F_{a \text{ max}} = F_{\text{дот}}$ . Зовнішня осьова сила, за якої натяг однієї з умовних опор повністю знімається, визначається з наступної залежності:

$$F_{a \text{ max}} = 1.5 \frac{C}{i_1} + \frac{C}{i_1} \frac{i_2^2}{i_1} F_H,$$

де  $F_H$  – сила натягу

$i_1$  та  $i_2$  – число витків з тілами кочення в опорі 1 і 2 відповідно.

Відповідно

$$F_{a \text{ max}} = 1.5 \frac{C}{i_1} + \frac{C}{i_1} \frac{i_2^2}{i_1} F_H = 1.5 F_H,$$

$$F_H = \frac{F_{a \text{ max}}}{1.5} = \frac{468.75}{1.5} = 312.5 \text{ Н.}$$

Осьова жорсткість умовної опори визначається з залежності:

$$j_a = 1.5 C \frac{1}{i_1^3} + i_2^2 \frac{C}{i_1^3},$$

де  $C$  – вантажопідйомність витка з тілами кочення:

$$C = 10^5 z \sin^{\frac{5}{2}} \alpha \sqrt{1.25 d_k},$$

де  $z$  – число тіл кочення в одному витку,

$\alpha$  – фактичний кут контакту у витку з тілами кочення, що змінюється під дією попереднього натягу,

$d_k$  – діаметр кульки, мм.

Для розрахунку кута контакту необхідно визначити кут прикладення рівнодіючої сили, що тисне на підшипник. Осьова складова відома, це  $F_{\text{дом}} = 468.75$  Н. Радіальних складових буде дві: одна – від радіальної сили у зубчастому зачепленні, інша – від радіальної сили у черв'ячному зачепленні. За найбільш негативного випадку ці сили додаються. Радіальна сила у зубчастому зачепленні становить:

$$F_{TZ} = \frac{2T}{d} = \frac{2 \times 990000}{688} = 2870 \text{ Н},$$

$$F_{RZ} = F_{TZ} \operatorname{tg} \alpha_w = 2870 \times \operatorname{tg} 20^\circ = 1050 \text{ Н}.$$

Радіальна сила у черв'ячному зачепленні становить:

$$F_{TC} = \frac{2T}{d} = \frac{2 \times 500}{32} = 468.75 \text{ Н},$$

$$F_{RC} = F_{TC} \operatorname{tg} \alpha_w = 468.75 \times \operatorname{tg} 20^\circ = 170 \text{ Н}.$$

Відповідно максимальна радіальна сила, що діє на підшипник:

$$F_R = F_{RZ} + F_{RC} = 1050 + 170 = 1220 \text{ Н.}$$

Таким чином, фактичний кут контакту у витку з тілами кочення:

$$\alpha = \arctg \frac{F_{a \max}}{F_R} = \arctg \frac{468.75}{1220} = 21^\circ.$$

З урахуванням виконаних розрахунків, осьова жорсткість умовної опори становитиме:

$$C = 10^5 z \sin^{\frac{5}{2}} \alpha \sqrt{1.25 d_k} = 10^5 \times 200 \times \sin^{\frac{5}{2}} 21^\circ \sqrt{1.25 \times 6} = 4.21 \times 10^6 \text{ Н,}$$

$$j_a = 1.5 C^{\frac{2}{3}} F_H^{\frac{1}{3}} \frac{\alpha^2}{\sin^3 \alpha} + i_2^{\frac{2}{3}} \frac{\ddot{\alpha}}{\ddot{\alpha}} = 1.5 \times (4.21 \times 10^6)^{\frac{2}{3}} \times 12.5^{\frac{1}{3}} \frac{\alpha^2}{\sin^3 \alpha} + 0^{\frac{2}{3}} \frac{\ddot{\alpha}}{\ddot{\alpha}} = 2.65 \times 10^5 \text{ Н/мм.}$$

Радіальна жорсткість умовної опори визначається за формулою:

$$j_r = \frac{k_4 i_{1(2)}^{\frac{2}{3}} j_a}{1.5 t g^2 \alpha \frac{\alpha^2}{\sin^3 \alpha} + i_2^{\frac{2}{3}} \frac{\ddot{\alpha}}{\ddot{\alpha}}},$$

де  $k_4$  – коефіцієнт, що характеризує розподіл навантаження між тілами кочення і залежить від співвідношення між силою натягу та

$$\text{радіальним навантаженням } \frac{F_H}{F_r t g \alpha} = \frac{312.5}{1220 t g 21^\circ} = 0.67, k_4 = 0.1.$$

Підставляючи у попередню формулу значення параметрів, отримуємо:

$$j_r = \frac{k_4 i_{1(2)}^{\frac{2}{3}} j_a}{1.5 \operatorname{tg}^2 \alpha_{\frac{2}{3}} i_1^{\frac{2}{3}} + i_2^{\frac{2}{3}}} = \frac{0.1 \times 10^3 \times 2.65 \times 10^5}{1.5 \operatorname{tg}^2 21^\circ i_1^{\frac{2}{3}} + i_2^{\frac{2}{3}}} = 1.2 \times 10^5 \text{ Н/мм.}$$

Проведені розрахунки свідчать про високу та достатню осьову і радіальну жорсткість підшипника обертання зубчастого колеса внутрішнього зачеплення.

## ВИСНОВКИ

У даній випускній кваліфікаційній роботі освітнього ступеня «бакалавр» розв'язане важливе проєктно-конструкторське завдання розробки пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей шляхом забезпечення подачі різця по точній коловій траєкторії зі сталою його орієнтацією відносно дотичної в кожній точці зазначеної траєкторії з можливістю зміни її радіуса.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- огляд верстатів для здійснення токарної обробки та способів отримання сферичних поверхонь за такої обробки;
- огляд технічних рішень, що забезпечують рух інструменту при токарній обробці по коловій і прямій траєкторіях;
- розробка пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей на заміну поперечного супорта;
- виконання необхідних проєктних та перевірочних розрахунків конструктивних елементів пристосування.

У проведеному огляді показано, що обробка сферичних поверхонь на токарних верстатах має ряд складнощів, які знижують точність обробки. Для їх усунення необхідно використовувати або спеціальний інструмент, що знижує універсальність способу, або застосовувати додаткові пристосування, що унеможлиблює використання систем ЧПУ.

Спробою розв'язати виявлені проблеми стала розробка пристосування для точної токарної обробки сферичних поверхонь деталей на основі патенту України на корисну модель № 3998. Використання даного пристосування дозволяє здійснювати рух інструменту в двох режимах. За першого режиму положення різця залишатиметься аналогічним як у звичайного токарного верстата. У другому режимі роботи пристосування положення різця буде стали по відношенню до дотичної, проведених у кожній точці колової траєкторії руху інструмента. В такому режимі забезпечується незмінність

кінематичної геометрії різця, що дозволяє точно обробляти сферичні поверхні. При цьому радіус обробки можна змінювати по команді від системи ЧПУ безпосередньо під час процесу різання, що дозволяє отримувати ще більш складну траєкторію, аніж точний рух по колу. Поєднання руху по колу різця та повздовжньої подачі супорта верстата дозволяє обробляти параболічні поверхні. Також в роботі проведені необхідні проєктні та перевірочні розрахунки основних елементів пристосування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Кузнецов Ю.М. Верстати з ЧПУ та верстатні комплекси : підручник / Ю.М. Кузнецов. Підручник. – К. : Гнозис, 2001. – 298 с.
- 2) Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х частинах. Під заг. ред. Ю.М. Кузнецова. Навч. посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2003. – 507 с.
- 3) Кіпчарський В. П. Металорізальні верстати : навч. посіб. [для студентів ВНЗ] / Кіпчарський В. П. ; Держ. ВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т". — Маріуполь (Донец. обл.) : ПДТУ, 2018. — 143 с.
- 4) Металорізальні верстати. Кінематичний аналіз. Практикум до виконання практичних та лабораторних робіт [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка» та 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Металорізальні верстати та системи» / О. В. Шевченко, А. Ю. Беляєва ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,06 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 91 с.
- 5) Довідник технолога-машинобудівника : у 2 т. Т. 1 : Проектування технологічних процесів, припуски, бази та точність обробки / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко та ін. ; за ред. М. П. Мазура. – Львів : Новий Світ-2000, 2021. – 560 с.
- 6) Довідник технолога-машинобудівника : у 2 т. Т. 2 : Режими різання, інструмент, верстати та нормування операцій / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко та ін. ; за ред. М. П. Мазура. – Львів : Новий Світ-2000, 2021. – 512 с.
- 7) Бочков В.М., Сілін Р.І., Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: Підручник / За ред. Сіліна Р.І. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2008. – 448 с.
- 8) Базь О.С., Захаренко Г.С. Токарна справа. Частина 1: навчальний посібник. Чернівці: Букрек, 2020. – 232 с., іл.

9) Пат. на кор. модель 3998 Україна, МПК В23Q37/00. Силовий стіл / Крижанівський В.А., Пестунов В.М., Гречка А.І., Єрьоміна І.М.; заявник і патентовласник Центральнуукраїнський національний технічний університет. – № u20040503414; заявл. 06.05.2004; опубл. 15.12.2004, Бюл. № 12.

10) Пат. на кор. модель 112829 Україна, МПК (2016.01) В23В21/00. Поперечний супорт токарного верстата з числовим програмним керуванням / Лисенко О.В., Гречка А.І., Іщенко Л.В.; заявник і патентовласник Центральнуукраїнський національний технічний університет. – № u201607857; заявл. 15.07.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24.

11) Технологічні машини. Розрахунок і конструювання: Навчальний посібник / Ю.В. Кодра, З.А. Стоцько; За ред. З.А. Стоцька. – Львів: Бескид БІТ, 2004. – 466 с.

12) Струтинський В.Б., Мельничук П.П. Математичне моделювання металорізальних верстатів. – Житомир, ЖІТІ, 2002. – 570 с.

13) В.М. Бочков, Р.І. Сілін, О. В. Гаврильченко / За ред. Р. І. Сіліна. Металорізальні верстати. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. 268 с.

14) Гевко Б. М., Матвійчик А. Б. Технологія обробки на верстатах з ЧПК. Навчальний посібник. – Тернопіль, ТДТУ. 2004р. 131с.

15) Гречка, А. ., & Пузирьов, О. . (2026). Інноваційні підходи до підвищення ефективності процесів механічної обробки деталей. Технічні науки та технології, (4 (42), 55–62. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-55-62](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-55-62)

16) Боровик О. В., Малашин М. О. Довідник з креслення. Стандарти ISO : навчально-методичний посібник. Хмельницький: Видавництво НАДПСУ. 2014. 104 с.

17) ДСТУ ISO 128-1:2005 Технічні Кресленики. Загальні принципи оформлення. [Чинний від 2019–01–01]. Київ, 2018.

| Поз.                                                           | Познака | Найменування                 | Кіл.                  | Посилання                       | Матеріал          |
|----------------------------------------------------------------|---------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------|
|                                                                |         |                              |                       |                                 |                   |
|                                                                |         | <u>Документація загальна</u> |                       |                                 |                   |
|                                                                |         |                              |                       |                                 |                   |
|                                                                |         | Розроблена вперше            |                       |                                 |                   |
|                                                                |         |                              |                       |                                 |                   |
|                                                                |         | Складальне креслення         |                       | *2 арк. ф. А2х3<br>1 арк. ф. А0 |                   |
|                                                                |         |                              |                       |                                 |                   |
|                                                                |         |                              |                       |                                 |                   |
|                                                                |         | <u>Деталі</u>                |                       |                                 |                   |
|                                                                |         |                              |                       |                                 |                   |
| 1                                                              |         | Корпус                       | 1                     |                                 |                   |
| 2                                                              |         | Планшайба зовнішня           | 1                     |                                 |                   |
| 3                                                              |         | Планшайба внутрішня          | 1                     |                                 |                   |
| 4                                                              |         | Платформа                    | 1                     |                                 |                   |
| 5                                                              |         | Вал платформи                | 1                     |                                 |                   |
| 6                                                              |         | Колесо зубчасте              | 2                     |                                 |                   |
| 7                                                              |         | Колесо зубчасте проміжне     | 1                     |                                 |                   |
| 8                                                              |         | Обойма муфти                 | 1                     |                                 |                   |
| 9                                                              |         | Планка стопорна              | 1                     |                                 |                   |
| 10                                                             |         | Кільце розмірне              | 1                     |                                 |                   |
| 11                                                             |         | Вал гальма                   | 1                     |                                 |                   |
| 12                                                             |         | Кільце розмірне              | 1                     |                                 |                   |
| 13                                                             |         | Прокладка гумова             | 1                     |                                 |                   |
| 14                                                             |         | Кришка гальма                | 1                     |                                 |                   |
| 15                                                             |         | Кришка підшипникового        |                       |                                 |                   |
|                                                                |         | вузла                        | 1                     |                                 |                   |
| 16                                                             |         | Кільце притискне             | 1                     |                                 |                   |
| 17                                                             |         | Колесо зубчасте              | 1                     |                                 |                   |
| 18                                                             |         | Кільце-обойма                | 1                     |                                 |                   |
|                                                                |         |                              |                       |                                 |                   |
| Кафедра ММР                                                    |         | Андрій ГРЕЧКА                | Ярослава МИХАЙЛЕВСЬКА | Андрій ГРЕЧКА                   | 1:1               |
| Центральноукраїнський<br>національний технічний<br>університет |         | Специфікація                 |                       | Навчальний                      |                   |
|                                                                |         | Пристосування                |                       | КРБ.ГМ.26.65.13.00.00           |                   |
|                                                                |         |                              |                       | А                               | 2026-01-06 uk 1/4 |

| Поз.                                                           | Познака | Найменування             | Кіл.                  | Посилання             | Матеріал          |
|----------------------------------------------------------------|---------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
|                                                                |         |                          |                       |                       |                   |
| 19                                                             |         | Кільце-обойма            | 1                     |                       |                   |
| 20                                                             |         | Колесо зубчасте          | 1                     |                       |                   |
| 21                                                             |         | Кільце проміжне          | 1                     |                       |                   |
| 22                                                             |         | Колесо черв'ячне         | 1                     |                       |                   |
| 23                                                             |         | Колесо черв'ячне         | 1                     |                       |                   |
| 24                                                             |         | Кільце притискне         | 1                     |                       |                   |
| 25                                                             |         | Вал-черв'як              | 2                     |                       |                   |
| 26                                                             |         | Труба розмірна           | 2                     |                       |                   |
| 27                                                             |         | Труба розмірна           | 2                     |                       |                   |
| 28                                                             |         | Труба упорна             | 2                     |                       |                   |
| 29                                                             |         | Муфта                    | 2                     |                       |                   |
| 30                                                             |         | Кришка підшипникового    |                       |                       |                   |
|                                                                |         | вузла                    | 2                     |                       |                   |
| 31                                                             |         | Вал муфти                | 1                     |                       |                   |
|                                                                |         |                          |                       |                       |                   |
|                                                                |         |                          |                       |                       |                   |
|                                                                |         | <u>Стандартні вироби</u> |                       |                       |                   |
|                                                                |         |                          |                       |                       |                   |
| 41                                                             |         | Гвинт М6х10              |                       |                       |                   |
|                                                                |         | ГОСТ 8878-84             | 2                     |                       |                   |
|                                                                |         | Гвинти ГОСТ 11738-84     |                       |                       |                   |
| 43                                                             |         | Гвинт М5х20              | 4                     |                       |                   |
| 44                                                             |         | Гвинт М6х12              | 8                     |                       |                   |
| 45                                                             |         | Гвинт М6х20              | 8                     |                       |                   |
| 46                                                             |         | Гвинт М8х12              | 4                     |                       |                   |
| 47                                                             |         | Гвинт М8х14              | 6                     |                       |                   |
| 48                                                             |         | Гвинт М8х20              | 12                    |                       |                   |
| 49                                                             |         | Гвинт М8х40              | 48                    |                       |                   |
|                                                                |         |                          |                       |                       |                   |
| Кафедра ММР                                                    |         | Андрій ГРЕЧКА            | Ярослава МИХАЙЛЕВСЬКА | Андрій ГРЕЧКА         | 1:1               |
| Центральноукраїнський<br>національний технічний<br>університет |         | Специфікація             |                       | Навчальний            |                   |
|                                                                |         | Пристосування            |                       | КРБ.ГМ.26.65.13.00.00 |                   |
|                                                                |         |                          |                       | А                     | 2026-01-06 uk 2/4 |

| Поз.                                                           | Познака | Найменування            | Кіл.                  | Посилання             | Матеріал          |
|----------------------------------------------------------------|---------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
|                                                                |         |                         |                       |                       |                   |
| 50                                                             |         | Гвинт М10х16            | 4                     |                       |                   |
| 51                                                             |         | Гвинт М10х25            | 1                     |                       |                   |
| 52                                                             |         | Гвинт М10х30            | 4                     |                       |                   |
| 53                                                             |         | Гвинт М12х30            | 8                     |                       |                   |
| 55                                                             |         | Гвинт М6х14             |                       |                       |                   |
|                                                                |         | ГОСТ 17475-80           | 8                     |                       |                   |
|                                                                |         | Кільця ГОСТ 13940-86    |                       |                       |                   |
| 57                                                             |         | Кільце А17              | 1                     |                       |                   |
| 58                                                             |         | Кільце А25              | 1                     |                       |                   |
|                                                                |         | Кулька 6                |                       |                       |                   |
| 60                                                             |         | ГОСТ 3722-81            | 200                   |                       |                   |
| 62                                                             |         | Підшипник 46104         |                       |                       |                   |
|                                                                |         | ГОСТ 931-75             | 4                     |                       |                   |
|                                                                |         | Підшипники ГОСТ 8338-75 |                       |                       |                   |
| 64                                                             |         | Підшипник 103           | 2                     |                       |                   |
| 65                                                             |         | Підшипник 105           | 2                     |                       |                   |
| 67                                                             |         | Шайба 10 65Г            |                       |                       |                   |
|                                                                |         | ГОСТ 6402-70            | 1                     |                       |                   |
|                                                                |         | Шпонки ГОСТ 23360-78    |                       |                       |                   |
| 69                                                             |         | Шпонка 5х5х40           | 1                     |                       |                   |
| 70                                                             |         | Шпонка 8х7х32           | 2                     |                       |                   |
|                                                                |         | Штифти ГОСТ 9464-79     |                       |                       |                   |
| 72                                                             |         | Штифт 6х25              | 4                     |                       |                   |
| 73                                                             |         | Штифт 8х20              | 2                     |                       |                   |
| 74                                                             |         | Штифт 8х36              | 2                     |                       |                   |
| 75                                                             |         | Штифт 10х50             | 2                     |                       |                   |
|                                                                |         |                         |                       |                       |                   |
|                                                                |         |                         |                       |                       |                   |
|                                                                |         |                         |                       |                       |                   |
| Кафедра ММР                                                    |         | Андрій ГРЕЧКА           | Ярослава МИХАЙЛЕВСЬКА | Андрій ГРЕЧКА         | 1:1               |
| Центральноукраїнський<br>національний технічний<br>університет |         | Специфікація            |                       | Навчальний            |                   |
|                                                                |         | Пристосування           |                       | КРБ.ПМ.26.65.13.00.00 |                   |
|                                                                |         |                         |                       | А                     | 2026-01-06 uk 3/4 |

[illegible]