



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

Факультет інженерії машин, споруд та технологій (ФМТ)  
(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 бакалавра  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Слободяну Михайлу Івановичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Конструювання планетарного редуктора приводу подач прецизійного  
круглошліфувального верстата з вихідним максимальним крутним моментом 250 Нм

Керівник роботи Гагалюк Андрій Валерійович, к.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: креслення деталі та річна програма випуску, паспорт верстата

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ, 1. Аналітичний розділ: аналіз завдання, призначення деталі, характеристика матеріалу деталі та заготованки, визначення типу та організаційної форми виробництва характеристика типу виробництва.

2. Технологічний розділ: аналіз методу отримання заготовки, вибір базування, проектування маршруту оброблення, підбір верстатного обладнання та інструментального забезпечення, аналітичний розрахунок припусків і режимів різання для однієї технологічної операції (для решти ТО табличним методом)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів):  
Загальний вид – 1фА1;

Шліфувальна бабка круглошліфувального верстату

Кінематична та структурно-кінематична схеми верстата – 1фА1;

Складальний кресленик планетарного редуктора приводу подач – 2фА1;

Деталювання планетарного редуктора приводу подач – 1фА1



## АНОТАЦІЯ

Слободян М.І. «Конструювання планетарного редуктора приводу подач прецизійного круглошліфувального верстата з вихідним максимальним крутним моментом 250 Нм» : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавр : спец. 133 – галузеве машинобудування / кер. А. В. Гагалюк. Тернопіль : факультет інженерії машин, споруд та технологій, кафедра конструювання верстатів інструментів та машин, група МВ-41.: ТНТУ, 2026.

У роботі проведено аналіз конструкцій приводів круглошліфувальних верстатів. Обґрунтовано доцільність модернізації шляхом заміни гідравлічного приводу на електромеханічний з планетарним редуктором.

Виконано кінематичний розрахунок схеми планетарного редуктора 2К-Н: передавальне число  $i = 10$ , число зубів  $z_1=18$ ,  $z_2=72$ ,  $z_3=162$ , кількість сателітів  $k=3$ , ККД  $\eta = 0,987$ . Виконано силовий і геометричний розрахунок зубчастих коліс: модуль  $m = 1,5$  мм, ширина вінця  $b=20$  мм, матеріали Сталь 20ХН2М і Сталь 40ХН. Запас контактної міцності  $S_H = 4,41$ , згинальної  $S_F = 3,55$ . Виконано розрахунок валів, підшипників і шпонкових з'єднань. Ресурс підшипників сателітів становить 85 400 год. Розроблено конструкцію редуктора: зовнішній діаметр корпусу 270 мм, загальна довжина 165 мм, маса ~12 кг, кутовий люфт  $\leq 5$  кутових хвилин. Розроблено технологічний процес виготовлення осі сателіту, вала-шестерні та корпусу редуктора, технологічну карту складання. Проведено аналіз умов праці та розроблено заходи з охорони праці відповідно до вимог ДСТУ EN 352-1 :2018 , ДСТУ EN 166 :2017 та ДСН 3.3.6.037-99.

Результати роботи можуть бути використані при модернізації верстатів 3М151 та аналогічного обладнання на машинобудівних підприємствах України.

**Ключові слова:** ПЛАНЕТАРНИЙ РЕДУКТОР, ПРИВІД ПОДАЧІ, КРУГЛОШЛІФУВАЛЬНИЙ ВЕРСТАТ, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ПРИВІД, ЗУБЧАСТА ПЕРЕДАЧА, КІНЕМАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК.

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Слободян М.І.			<b>АНОТАЦІЯ</b>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		Гагалюк А.В.					4	2
<i>Рецензент</i>						ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВс-41		
<i>Н. контр.</i>		Кобельник В.Р.						
<i>Затверд.</i>		Крупа В.В.						

## Annotation

Slobodian M.I. “ Design of a planetary gearbox for the feed drive of a precision cylindrical grinding machine with a maximum output torque of 250 Nm.”: work for the qualification degree of bachelor: speciality 133 – branch mechanical engineering / ed. A. V. Gagalyuk. Ternopil: Faculty of Mechanical Engineering, Structures and Technologies, Department of Design of Machine Tools and Machines, Group MV-41.: TNTU, 2026.

The paper analyzes the existing designs of drives of these cylindrical grinding machines. The feasibility of modernization by replacing the hydraulic drive with an electromechanical one with a planetary gearbox is substantiated.

The kinematic calculation of the 2K-H planetary gearbox scheme is performed: gear ratio  $i=10$ , number of teeth  $z_1=18$ ,  $z_2=72$ ,  $z_3=162$ , number of satellites  $k=3$ , efficiency  $\eta = 0.987$ . The force and geometric calculation of the gears was performed: module  $m = 1.5$  mm, crown width  $b=20$  mm, materials Steel 20KhN2M and Steel 40KhN. Contact strength reserve  $S_H=4.41$ , bending strength  $S_F=3.55$ . The calculation of shafts, bearings and keyed joints was performed. The service life of the satellite bearings is 85,400 hours. The design of the gearbox was developed: outer diameter of the housing 270 mm, total length 165 mm, weight ~12 kg, angular backlash  $\leq 5$  arc minutes. The technological process for manufacturing the satellite axis, gear shaft and gearbox housing, and the assembly technological map were developed.

An analysis of working conditions was conducted and occupational safety measures were developed in accordance with the requirements of DSTU EN 352-1:2018, DSTU EN 166:2017 and DSN 3.3.6.037-99. The results of the work can be used in the modernization of 3M151 machines and similar equipment at machine-building enterprises of Ukraine.

Keywords: PLANETARY GEARBOX, FEED DRIVE, CYLINDRICAL GRINDING MACHINE, MODERNIZATION, ELECTROMECHANICAL DRIVE, GEAR TRANSMISSION, KINEMATIC CALCULATION..

					<i>KPB 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

## ЗМІСТ

ВСТУП 8

1	АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	11
1.1	Огляд прецизійних круглошліфувальних верстатів .....	11
1.2	Аналіз існуючих конструкцій приводів подач .....	12
1.3	Обґрунтування модернізації 3М151 .....	14
1.4	Аналіз конструкцій планетарних редукторів.....	14
2	ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	16
2.1	Технологічний процес виготовлення вала-шестерні.....	16
2.1.1	Аналіз технологічності конструкції .....	16
2.1.2	Вибір заготовки .....	16
2.1.3	Маршрут обробки вала-шестерні .....	17
2.1.4	Розрахунок режимів різання для токарної чистової операції 015 .....	18
2.2	Технологічний процес виготовлення осі сателіта Ø15 мм.....	19
2.2.1	Аналіз технологічності осі сателіта .....	19
2.2.2	Вибір заготовки осі сателіта .....	19
2.2.3	Маршрутна карта обробки осі сателіта.....	20
2.2.4	Розрахунок режимів різання для надтонкого шліфування (операція 055) .....	21
2.2.5	Вибір контрольно-вимірювального інструменту .....	23
2.3	Технологічний процес виготовлення корпусу редуктора.....	23
2.3.1	Аналіз технологічності корпусу .....	23
2.3.2	Операційний ескіз та допуски форми .....	24
2.4	Технологічний процес складання редуктора .....	24
2.4.1	Схема складання редуктора.....	24
2.4.2	Операційна карта складання.....	25
2.4.3	Нормування часу складання .....	27
2.5	Вибір обладнання та ріжучого інструменту .....	27

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Слободян М.І.</i>			<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>			6	2	
<i>Рецензент</i>					<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>					

**ЗМІСТ**

2.5.1	Обладнання для механічної обробки .....	27
2.5.2	Ріжучий інструмент.....	28
3	КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	29
3.1	Силовий та геометричний розрахунок зубчастих коліс.....	29
3.2	Проектний розрахунок модуля зачеплення .....	30
3.3	Геометричний розрахунок зубчастих коліс .....	30
3.4	Дизначення сил у зачепленні.....	32
3.5	Перевірочний розрахунок на контактну витривалість .....	32
3.6	Перевірочний розрахунок на згинальну витривалість .....	34
3.7	Розрахунок валів, підшипників та з'єднань .....	35
3.7.1	Проектний розрахунок вхідного валу .....	35
3.7.2	Проектний розрахунок вихідного валу (води́ла).....	35
3.7.3	Розрахунок осей сателітів .....	35
3.7.4	Перевірочний розрахунок вхідного валу .....	36
3.8	Перевірочний розрахунок вихідного валу .....	37
3.8.1	Підбір та розрахунок підшипників.....	37
3.8.2	Голчасті підшипники осей сателітів – НК 15/16 (×3) .....	38
3.8.3	Розрахунок шпонкових з'єднань.....	39
3.9	Конструювання та опис редуктора.....	40
3.10	Опис основних вузлів.....	41
3.11	Специфікація деталей .....	43
3.12	Всновки до розділу.....	44
4	БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОХОРОНА ПРАЦІ	45
4.1	Аналіз умов праці та шкідливих факторів .....	45
4.2	Виробнича санітарія.....	46
4.3	Пожежна безпека.....	47
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	48
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	50
	ДОДАТКИ	

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Стратегічний розвиток промислового потенціалу держави безпосередньо залежать від стану її машинобудівного комплексу. Саме машинобудування формує технологічний фундамент для модернізації і розвитку виробничих потужностей усіх секторів економіки. В умовах сучасних економічних викликів перед підприємствами гостро постає дилема: закупівля дорогого імпортного обладнання чи модернізація наявного верстатного парку. Попри солідний експлуатаційний вік, другий шлях є економічно вигіднішим, оскільки дозволяє з мінімальними витратами повернути техніці конкурентоспроможні експлуатаційні характеристики.

На багатьох українських заводах основу серійного виготовлення ступінчастих валів досі складають багатопозиційні напівавтомати попередніх поколінь, зокрема фрезерно-центрувальні автомати (ФЦА) однопозиційні та барабанні трипозиційні. Головними перевагами цих верстатів є поєднання технологічних операцій фрезерування торців і свердління центрів. Приводні частини таких верстатів за десятиліття експлуатації зазнали суттєвого морального та фізичного зносу. Використання застарілих двигунів з низьким ККД, класичних систем керування та інструментальних головок старого зразка призводить до значних енергетичних втрат, обмежує точність обробки та не дозволяє впроваджувати сучасний швидкісний інструмент. Попри використання їх у серійному і масовому виробництві, ми вбачаємо їх використання й у середньо і дрібносерійному. Переважна кількість підприємств машинобудування працюють з невеликими партіями деталей, для яких, використання круглого прокату у якості заготовок є найбільш раціональним вибором. Модернізація старих фрезерно-центрувальних автоматів дозволить скоротити основний час на такі операції як торцювання і центрування заготовок, навіть коли їх обробляють на сучасних верстатах з ЧПК.

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Слободян М.І.</i>			<b>ВСТУП</b>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>					8	6
<i>Рецензент</i>						<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

У зв'язку з цим, комплексний інженерний перерахунок механічних вузлів і впровадження енергоефективних приводів нового покоління та адаптація шпиндельного вузла під прогресивні торцеві фрези зі змінними твердосплавними пластинами є вкрай актуальним науково-практичним завданням. Така модернізація дозволить інтегрувати важкі фрезерно-центрувальні напівавтомати у сучасні автоматизовані гнучкі системи та мінімізує собівартість металообробки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Ця робота є частиною тематики кваліфікаційних студентських робіт кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин за напрямом удосконалення, відновлення та модернізації металорізального обладнання промислових підприємств.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення техніко-економічної ефективності та точності роботи фрезерно-центрувального напівавтомата барабанного типу шляхом модернізації його виконавчого механізму торцевого фрезерування.

Для реалізації цієї мети поставлено такі завдання:

1. Оцінити поточний технічний стан фрезерно-центрувального обладнання аналізованого класу та обґрунтувати доцільність інженерного відновлення його виконавчих органів.
2. Виконати силовий і кінематичний розрахунки приводу головного руху фрезерної головки верстата за сучасними режимами різання для оновлення виконавчого механізму.
3. Розробити параметричну 3D-модель оновленого редуктора та митрової конічної передачі виконавчого вузла у середовищі тривимірного моделювання.
4. Проектувати конструкцію адаптивного фланцевого з'єднання під сучасний енергоефективний двигун загальнопромислового типу для забезпечення надійної роботи модернізованого механізму фрезерування.
5. Проаналізувати техніко-економічні показники проекту модернізації та оцінити терміни окупності впроваджених рішень.

Об'єкт дослідження – автоматизований цикл суміщеної торцево-фрезерної та центрувальної обробки валів на багатопозиційному металорізальному обладнанні.

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						9
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Предмет дослідження – конструктивні, геометричні та силові параметри механізмів фрезерної головки напівавтомата.

Методи дослідження. Теоретичну базу роботи становлять методи проектування металорізальних верстатів, теорія різання металів, а також сучасні інструменти САПР для розробки тривимірних моделей та оформлення конструкторської документації.

Наукова новизна одержаних результатів. Полягає у вдосконаленні інженерного підходу до модернізації важких багатопозиційних напівавтоматів шляхом розрахункового обґрунтування геометрії перехідних адаптерів приводів, що дозволяє зберегти динамічну жорсткість шпиндельного вузла при оптимізації габаритів електродвигунів виконавчого механізму.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені графічні матеріали, геометричні розрахунки редуктора та конструкторська документація перехідного вузла фрезерної бабки мають високу ступінь готовності та можуть безпосередньо впроваджуватися на машинобудівних підприємствах під час проведення капітальних ремонтів та модернізацій верстатного парку.

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						<i>10</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Огляд прецизійних круглошліфувальних верстатів

Круглошліфувальні верстати призначені для чистової та оздоблювальної обробки зовнішніх і внутрішніх циліндричних, конічних та фасонних поверхонь тіл обертання. Прецизійні верстати забезпечують точність IT4–IT6 і шорсткість  $Ra = 0,025–0,63$  мкм. Основні об'єкти: вали, кільця підшипників, шийки колінчастих валів, плунжери. Їх умовно можна поділити з анаступними ознаками:

- за характером обробки: зовнішнє шліфування, внутрішнє шліфування, універсальні;
- за способом подачі: поздовжня подача (проходи), поперечна (врізна), комбінована
- за ступенем автоматизації: ручне керування, напіваавтоматичні, з ЧПК;
- за розміром: малі ( до  $\varnothing 200$  мм), середні (до  $\varnothing 400$  мм), великі ( $>\varnothing 400$  мм).

Провідні виробники: Studer (Швейцарія), Junker (Німеччина), Kellenberger (Швейцарія), Toyota (Японія). Вітчизняні: верстати ХВЗ (серія ЗМ, ЗЕ). Типові моделі: ЗМ151, ЗМ152, ЗЕ153; Studer S31, S33, S41.

Верстати Studer S31 забезпечують похибку форми  $0,5–2$  мкм і повторюваність  $\pm 0,05$  мкм. Тому привід подач є найбільш відповідальним вузлом прецизійного верстата – він визначає якість поверхні, точність розмірів і продуктивність, а саме:

- точність позиціонування (похибка позиціонування  $\leq 0,5–2$  мкм при дискретності завдання  $0,1–0,5$  мкм. Зумовлює застосування редукторів з мінімальним кутовим люфтом або безлюфтових конструкцій;
- плавність руху (коефіцієнт нерівномірності  $\delta \leq 0,02–0,05$  у всьому діапазоні подач). Залежить від кінематичної точності редуктора (похибки кроку, биття, профілю зубів);

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Слободян М.І.</i>			<b>1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>					<i>11</i>	<i>31</i>
<i>Рецензент</i>						<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

- діапазон подач – чорнове шліфування: 1– 8 мм/хв; чистове: 0,1– 1 мм/хв; прецизійне: 0,001– 0,1 мм/хв; швидкий підвід: до 5000 мм/хв. Діапазон  $D = 1:1000$  і більше;
- жорсткість і момент (приведена жорсткість  $\geq 50 - 100$  Н/мкм. Для верстатів середнього типорозміру максимальний вихідний момент приводу подач 150 – 300 Нм – відповідає технічному завданню  $T_{вих} = 250$  Нм.

Таким чином можна сформулювати вимоги до приводу (табл.1.1)

Таблиця 1.1– Технічні вимоги до приводу подач

№ п/п	Параметр	Значення
1.	Максимальний вихідний момент	250 Нм
2.	Похибка позиціонування	$\leq 1$ мкм
3.	Діапазон регулювання	1:1000
4.	Коефіцієнт нерівномірності $\delta$	$\leq 0,05$
5.	Жорсткість привода	$\geq 50$ Н/мкм
6.	ККД редуктора	$\geq 0,92$
7.	Рівень шуму	$\leq 72$ дБ (А)
8.	Ресурс	$\geq 20\ 000$ год

## 1.2 Аналіз існуючих конструкцій приводів подач

Сучасні приводи подач мають наступні типи:

- гідравлічні;
- електромеханічні;

**Гідравлічний привід подач.** Гідравлічний привід традиційно застосовується на верстатах серії 3А151, 3Б151, 3М151. В основі лежить принцип перетворення енергії потоку мастила в механічне переміщення гідроциліндром. Система включає: насосну станцію з лопатевим насосом; гідропанель з дроселями; гідроциліндр швидкого підводу ( $v = 50 - 100$  мм/с); гідроциліндр врізання ( $v = 0,01 - 3$  мм/хв).

До переваг варто віднести висока питому силу (до 30 кН при тиску 2 МПа); простота конструкції; природне обмеження зусилля запобіжним клапаном.

Система має також і недоліки. Нагрів мастила  $\Delta T = 15-25^\circ\text{C} \rightarrow$  теплові деформації  $10-11 \text{ мкм}/^\circ\text{C}/\text{м}$  станини. При  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  деформація сягає  $150 \text{ мкм}/\text{м}$ , що неприпустимо при допуску  $1-3 \text{ мкм}$ . Спостерігається так званий ефект stick-slip (стрибка) при  $v < 0,1 \text{ мм}/\text{хв} \rightarrow$  неможливість досягнення  $Ra < 0,16 \text{ мкм}$  і потребує заміни мастила кожні  $2000-3000 \text{ год}$ . Ускладнена інтеграція з ЧПК.

**Електромеханічний привід подач.** В його структурі серводвигун (PMSM,  $0,5-7,5 \text{ кВт}$ , енкодер  $2500-131072 \text{ імп}/\text{об}$ )  $\rightarrow$  Планетарний редуктор з передавальними числами  $i = 3-20$ , люфт менше  $5'$ )  $\rightarrow$  ШВП (клас C3-C5, крок  $5-10 \text{ мм}$ , ШВП натягнута)  $\rightarrow$  Виконавчий орган.

Провідними виробниками є:

- Studer S31/S33/S41 (Швейцарія) – серводвигун + ШВП;
- Junker Jumat (Німеччина) – лінійний серводвигун, прискорення  $20 \text{ м}/\text{с}^2$ , точність  $\pm 0,1 \text{ мкм}$ ;
- Kellenberger Kel-Vera;
- Toyota GE4.
- Apex Dynamics

Переваги (точність  $\pm 0,1-1 \text{ мкм}$  при повторюваності  $\pm 0,05 \text{ мкм}$ . Діапазон  $1:10000$ . Відсутність гідравліки – нуль теплових деформацій від приводу. Легка інтеграція з ЧПК, що особливо актуально зараз.

Є також має і недоліки. Вартість у  $2-4$  рази вища за гідравлічний аналог. Потребує налагодження ПД-регулятора. Вле все дається у поірвнянні (табл.1.2)

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз приводів подач

№ п/п	Параметр	Гідравлічний	Електромеханічний
1.	Точність позиціонування	$\pm 5-20 \text{ мкм}$	$\pm 0,1-1 \text{ мкм}$
2.	Повторюваність	$\pm 3-10 \text{ мкм}$	$\pm 0,05-0,5 \text{ мкм}$
3.	Діапазон регулювання	$1:100$	$1:10000$
4.	Плавність (малі швидкості)	Незадовільна (stick-slip)	Відмінна
5.	Теплові деформації	$\Delta T = 15-25^\circ\text{C}$	$\Delta T < 1^\circ\text{C}$
6.	Досяжна шорсткість Ra	$0,16-0,32 \text{ мкм}$	$0,025-0,08 \text{ мкм}$
7.	Інтеграція з ЧПК	Ускладнена	Проста
8.	Екологічність	Ризик витоку мастила	Чиста система
9.	Початкова вартість	Нижча	Вища ( $\times 2-4$ )

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3 Обґрунтування модернізації 3М151

Верстат 3М151 є поширеним і добре відомим у машинобудівних підприємствах України. Його універсальність і надійність зробили його базовим обладнанням для круглого шліфування. Модернізація верстата 3М151 є доцільною, оскільки вона забезпечує перехід до сучасних технологій швидкісного шліфування, підвищує ефективність виробництва та дозволяє підприємствам залишатися конкурентоспроможними без значних інвестицій у нове обладнання. Базовий круглошліфувальний верстат 3М151 – клас точності II ( $\pm 10\text{--}20\text{ мкм}$ ), що не відповідає сучасним вимогам, зокрема: клас В (IT4–IT5,  $Ra \leq 0,08\text{ мкм}$ ). Таких показників на гідравліці досягнути неможливо.

Тому єдиним шляхом модернізації – це серводвигун + планетарний редуктор 250 Нм + ШВП), що зможе забезпечити точність  $\pm 0,5\text{ мкм}$  і діапазон 1:5000.

### 1.4 Аналіз конструкцій планетарних редукторів

Планетарний редуктор – система з рухомими осями коліс. На рис.1.1 зображено найпоширенішу одноступінчасту передачу із трьома основними ланками:  $a, b$  – центральні колеса,  $h$  – водило (основними називають ланки, які навантажені зовнішніми моментами) і  $g$  сателіти.

Схеми планетарних передач позначають за основними ланками:  $K$  – центральне колесо,  $h$  – водило, відповідно елементи схеми  $2K - h$ : сонячне колесо ( $z_1$ ), сателіти ( $z_2$ , кількість  $k$ ), коронне колесо ( $z_3$ , нерухоме), водило ( $H$ ).

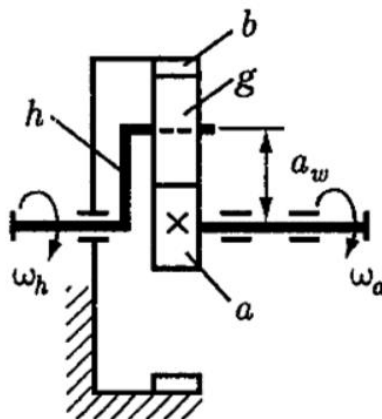


Рис. 1.1 – Кінемаїчна схема планетарного редуктора

					КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формула Вілліса при  $n_3 = 0$ :

$$i = 1 + z^3/z^1 \quad (1.1)$$

Їх переваги над іншими типами редукторів очевидні: ККД 0,95–0,98; співвісність валів; люфт 3–5'; питома потужність у 1,5–2,5 рази вища за циліндричний.

Схема 2К-Н – найпоширеніша,  $i = 3-9$ , ККД 0,95–0,98, обрана для цієї роботи. Схема 3К–  $i = 40-500$ , ККД 0,70–0,85. Багатоступінчасті –  $i = 25-200$ . За точністю: стандартні (люфт 5–10'), прецизійні (1–3'), безлюфтові (<0,5'). Якщо порівняти з іншими типами типів редукторів, то бачимо (табл.1.3)

Таблиця 1.3 – Порівняння типів редукторів для приводу подач

Параметр	Планетарний	Циліндричний	Черв'ячний	Хвильовий
Передавальне число (1 ст.)	3–12	3–6	8–80	50–320
ККД	0,95–0,98	0,96–0,98	0,70–0,85	0,80–0,90
Кутовий люфт	3–5'	10–30'	10–20'	< 1'
Співвісність	Так	Ні	Ні	Так
Теплові деформації	Мінімальні	Мінімальні	Значні	Мінімальні
Придатність для верстата	Відмінна	Задовільна	Незадовільна	Добра

Висновок: для проектного приводу обирається планетарний редуктор схеми 2К-Н,  $k = 3$  сателіти. Технічне завдання:  $T_{вих} = 250\text{Нм}$ ,  $i = 10$ , ККД  $\geq 0,95$ , люфт  $\leq 5'$ .

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Технологічний процес виготовлення вала-шестерні

#### 2.1.1 Аналіз технологічності конструкції

Вал-шестерня є поєднанням вхідного вала і сонячного колеса в єдиній деталі. Конструктивно це ступінчастий вал загальною довжиною 95 мм з зубчастим вінцем  $z_1 = 18$ ,  $m = 1,5$  мм в центральній частині. Матеріал – Сталь 20ХН2М ДСТУ 7806:2015 [3].

Аналіз технологічності показує: деталь відноситься до класу «вали» і добре обробляється на токарних і шліфувальних верстатах. Зубчастий вінець нарізається методом обкатки (фрезерування дисковою або черв'ячною фрезою), що є стандартним і добре освоєним технологічним процесом. Цементация і загартування виконуються на стандартному термічному обладнанні. Шліфування посадкових шийок після термообробки є обов'язковим для забезпечення точності посадок.

Коефіцієнт уніфікації конструктивних елементів: фаски  $1,6 \times 45^\circ$  – стандартні; різьба відсутня; канавки для виходу шліфувального круга – стандартні за ДСТУ ISO 509. Деталь є технологічною.

#### 2.1.2 Вибір заготовки

Для вала-шестерні з матеріалу Сталь 20ХН2М рекомендується заготовка у вигляді поковки, виготовленої методом гарячого штампування у закритих штампах. Штамповка забезпечує: волокнисту структуру вздовж осі вала (підвищує опір втомі на 15–25%); точність розмірів за класом точності Т4 (ДСТУ ISO 286); мінімальні припуски на обробку (1,5–3,0 мм на сторону).

Маса готової деталі орієнтовно:  $m_{\text{дет}} \approx 0,3$  кг. Маса заготовки-поковки з урахуванням припусків і технологічних напусків:  $m_{\text{заг}} \approx 0,55$  кг. Коефіцієнт використання матеріалу:

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Слободян М.І.</i>			<b>2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ</b>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>					16	31
<i>Рецензент</i>						<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВс-41</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

$$KBM = m_{дет}/m_{заг} = 0,30/0,55 = 0,545$$

При серійному виробництві (50–500 штук/рік) штамповка є економічно обґрунтованим вибором заготовки.

### 2.1.3 Маршрут обробки вала-шестерні

Таблиця 2.1– Маршрутна карта обробки вала-шестерні

№ оп.	Назва операції	Зміст операції	Обладнання	Інструмент
005	Заготівельна	Штампуння, нормалізація 880°C	Кривошипний прес КБ2534	–
010	Токарна чорнова	Підрізання торців, центрування, обточування зовн. поверхонь з припуском 1,5 мм	Токарний 16К20	Різець Т5К10, свердло центр.
015	Токарна чистова	Обточування посадкових шийок з припуском 0,4 мм	Токарний 16К20	Різець Т15К6
020	Фрезерна	Фрезерування шпонкового паза 6×6	Фрезерний 6Р13	Фреза шпонкова Ø6 Р6М5
025	Зубофрезерна	Нарізання зубів z=18, m=1,5 методом обкатки	Зубофрезерний 5К310	Фреза черв'ячна m=1,5 Р6М5
030	Слюсарна	Зачищення задирок, притуплення гострих кромок	Верстак	Напилек, шабер
035	Термічна	Цементация на глибину 0,8–1,2 мм; загартування 820°C (масло); відпуск 180°C	Піч СШЦ-60/900	Термопара, прилад контролю
040	Правка	Правка вала після термообробки	Прес гідравлічний П636	Призми, індикатор
045	Токарна (тверде точіння)	Чистова обробка цапф та буртів після цем.	Токарний з ЧПК 16А20Ф3	Різець СВН DNGA150412
050	Шліфувальна чорнова	Шліфування посадкових шийок з припуском 0,05–0,08 мм	Круглошліф. 3М151	Круг ПП 32А 25 СМ1 5 К
055	Шліфувальна чистова	Шліфування шийок до розміру Ra = 0,63 мкм	Круглошліф. 3М151	Круг ПП 24А 16 СМ2 6 К
060	Зубошліфувальна	Шліфування зубів z=18, m=1,5 Ra = 0,63 мкм	Зубошліф. 5В833	Круг ТС 35А профільний
065	Контрольна	Контроль розмірів, биття, шорсткості, параметрів зубів	Стіл ВТК	Мікрометр, нутромір, прилад для контр. зубів

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ

Арк.

17

### 2.1.4 Розрахунок режимів різання для токарної чистової операції 015

Обробка шийки Ø25 мм під підшипник. Матеріал: Сталь 20ХН2М, НВ 200 (до ТО). Інструмент: різець прохідний з пластиною Т15К6,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $r = 1,0$  мм.

Глибина різання для чистового проходу:

$$t = (D_{\text{заг}} - D_{\text{дет}})/2 = (26,8 - 25,4)/2 = 0,7 \text{ мм}$$

Подача (для  $Ra = 1,6$  мкм):

$$s = 0,08 - 0,12 \text{ мм/об} \rightarrow \text{приймаємо } s = 0,10 \text{ мм/об}$$

Швидкість різання (за нормативами) [12]:

$$v = C_v / (T^m \times t_v^x \times s_v^y) \times K_v$$

де  $C_v = 350$ ;  $T = 60 \text{ хв}$ ;  $m = 0,20$ ;  $x_v = 0,15$ ;  $y_v = 0,35$ ;  $K_v = 0,85$  (поправк. коеф.)

$$v = 350 / (2,267 \times 0,941 \times 0,447) \times 0,85 = 350 / 0,953 \times 0,85 = 312 \text{ м/хв}$$

Частота обертання:

$$n = 1000 \times v / (\pi \times D) = 1000 \times 312 / (\pi \times 25) = 3975 \text{ об/хв}$$

За паспортом верстата 16К20:  $n_\phi = 3150 \text{ об/хв}$ , тоді:

$$v_\phi = \pi \times D \times n_\phi / 1000 = \pi \times 25 \times 3150 / 1000 = 247 \text{ м/хв}$$

Сила різання:

$$P_z = 10 \times C_p \times t_p^x \times s_p^y \times v_p^n \times K_p = 3000 \times 0,70 \times 0,178 \times 0,562 = 211 \text{ Н}$$

Потужність різання:

$$N_{\text{різ}} = P_z \times v_\phi / (60 \times 1020) = 211 \times 247 / 61200 = 0,85 \text{ кВт}$$

$$N_{\text{верст}} = 10 \text{ кВт}, \eta = 0,80 \rightarrow N_{\text{д оп}} = 8,0 \text{ кВт} \gg 0,85 \text{ кВт}$$

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						18
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Основний час:

$$T_0 = l / (s \times n_{\phi}) = (95 + 2) / (0,10 \times 3150) = 97 / 315 = 0,31 \text{ хв}$$

Таблиця 2.2 - Режими різання для операції 015 (токарна чистова)

Параметр	Шийка Ø25 (підш.)	Шийка Ø20 (муфта)	Шийка Ø22 (вінець)
Глибина різання $t$ , мм	0,70	0,65	0,70
Подача $s$ , мм/об	0,10	0,10	0,12
Швидкість $v$ , м/хв	247	247	247
Частота $n$ , об/хв	3150	3940	3580
Сила $P_z$ , Н	211	195	253
Потужність $N$ , кВт	0,85	0,78	1,01
Основний час $T_0$ , хв	0,31	0,25	0,28

## 2.2 Технологічний процес виготовлення осі сателіта Ø15 мм

### 2.2.1 Аналіз технологічності осі сателіта

Вісь сателіта – гладкий циліндричний стержень Ø15×52 мм. Матеріал: Сталь 40Х ДСТУ 7806:2015. Вимоги до поверхонь: зовнішня циліндрична поверхня Ø15 мм – посадкова поверхня під голчастий підшипник NK 15/16 (HRC 62–65, Ra = 0,16 мкм); посадка в отвори водила Н7/р6; канавка для виходу шліфувального круга; фаски для полегшення складання; осьовий отвір Ø3 мм для подачі мастила до підшипника.

Деталь проста конструктивно: клас «осі», форма – тіло обертання. Обробляється на стандартному токарному і шліфувальному обладнанні. Основна складність – забезпечення твердості робочої поверхні HRC 62–65 (вища за твердість валів) і шорсткості Ra = 0,16 мкм (дзеркальне шліфування).

### 2.2.2 Вибір заготовки осі сателіта

Матеріал: Сталь 40Х. Тип заготовки – гарячекатаний сталевий прокат (кругляк) Ø18 мм за ДСТУ 7809. Обґрунтування: проста форма деталі (гладкий

					КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

циліндр) не вимагає штампування; прокат забезпечує мінімальні відходи матеріалу; невелика маса деталі ( $m_{дет} \approx 0,07$  кг) не виправдовує витрат на штамп.

$$m_3 = \pi/4 \times 0,018^2 \times 0,060 \times 7850 = 0,120 \text{ кг}$$

$$КВМ = 0,070 / 0,120 = 0,583$$

Відрізати заготовку довжиною 60 мм з прутка  $\varnothing 18$  мм – запас 8 мм на підрізку торців і закріплення в патрон.

### 2.2.3 Маршрутна карта обробки осі сателіта

Таблиця 2.3 – Маршрутна карта обробки осі сателіта  $\varnothing 15 \times 52$  мм

№	Операція	Зміст	Обладнання	Інструмент	Квалітет	Ra мкм
005	Заготівельна	Відрізання прутка $\varnothing 18 \times 60$ мм	Відрізний 8Г663	Пила Р6М5	–	–
010	Токарна чорнова	Підрізка торців, центрування, обточування $\varnothing 15,8$ мм по всій довжині (припуск 1,4 мм на $\varnothing$ )	16К20	Різець Т5К10, свердло центр. $\varnothing 2$	h12	6,3
015	Токарна напівчистова	Обточування $\varnothing 15,2$ мм (припуск 0,4 мм на $\varnothing$ ), підрізання в розмір $l=52$ мм	16К20	Різець Т15К6	h10	3,2
020	Свердлильна	Свердління осьового отвору $\varnothing 3$ мм наскрізь; свердління радіальних отворів $\varnothing 2$ мм (2 шт.)	Свердл. 2Н135	Свердло $\varnothing 3$ мм Р6М5; свердло $\varnothing 2$ мм	H12	6,3
025	Токарна (канавкова)	Прорізання канавок для виходу шліфувального круга $b=3$ , $R=0,5$ (2 шт.)	16К20	Різець канавковий Т15К6, $b=3$ мм	–	3,2
030	Слюсарна	Зняття задирок, притуплення кромки $0,3 \times 45^\circ$ , продувка отворів	Верстак	Напилок, шкурка Р400	–	–
035	Термічна ТВЧ	Загартування поверхні ТВЧ на глибину 1,5–2 мм, HRC 62–65; відпуск $150^\circ\text{C}$ , 1,5 год (збереження твердості)	Установка ТВЧ ВЧГ-60	Індуктор, піч для відпуску	–	–
040	Правка	Правка осі після ТВЧ (биття $\leq 0,02$ мм)	Прес ПГ-25	Призми, індикатор ІЧ-10	–	–

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ

Арк.

20

045	Шліфувальна чорнова	Шліфування зовн. поверхні Ø15,04 мм (припуск 0,06 мм на Ø)	Круглошліф. 3М151	Круг ПП 32А 40 СМ1 5 К	h6	0,63
050	Шліфувальна чистова	Шліфування Ø15,008 мм (припуск 0,016 мм)	Круглошліф. 3М151 (модерн.)	Круг ПП 24А 25 СМ2 5 К	h5	0,32
055	Шліфувальна надтонка	Шліфування в розмір Ø15,000 мм, Ra = 0,16 мкм – бігова доріжка голчастого підшипника	Круглошліф. 3М151 (модерн.)	Круг ПП 14А 16 ВТ 6 К з правкою алм.	h4	0,16
060	Торцешліфувальна	Шліфування торців в розмір 52±0,015 мм, Ra = 0,63 мкм	Плоскошліф. 3Б722	Круг ПП 24А 25 СМ2 К	h7	0,63
065	Контрольна	Повний контроль: Ø15 мм (мікрометр); довжина 52 мм; биття ≤ 0,005 мм; Ra = 0,16 мкм (профілограф); HRC ≥ 62 (твердомір)	Стіл ВТК	Мікрометр МК-25, індикатор, профілограф, твердомір ТК-2	–	–

#### 2.2.4 Розрахунок режимів різання для надтонкого шліфування (операція 055)

Операція 055 – надтонке шліфування посадкової поверхні Ø15 мм осі під голчастий підшипник НК 15/16. Це найвідповідальніша операція, що визначає якість підшипникового вузла. Потрібно забезпечити Ra = 0,16 мкм і розмір Ø15h4 (допуск –0,004 мм).

Вихідні дані:

Матеріал: Сталь 40Х, HRC 62–65 (після ТВЧ)

Розмір до операції: Ø15,008 мм (після чистового шліфування)

Потрібний розмір: Ø15,000 мм (h4, верхн. відх. 0, нижн. –0,004 мм)

Припуск на операцію:  $2 \times 0,004 = 0,008$  мм (на Ø)

Шліфувальний круг: ПП 150×20×32, 14А 16 ВТ 6 К (дрібнозернистий, м'який)

Швидкість шліфувального круга:

$$v_k = \pi \times D_k \times n_k / (1000 \times 60) = \pi \times 150 \times 2400 / 60000 = 18,85 \text{ м/с}$$

Частота обертання деталі:

$$v_d = 10\text{--}20 \text{ м/хв для } Ra = 0,16 \text{ мкм} \rightarrow \text{приймаємо } v_d = 12 \text{ м/хв}$$

					КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_d = 1000 \times v_d / (\pi \times d) = 1000 \times 12 / (\pi \times 15) = 255 \text{ об/хв}$$

За паспортом 3М151 (модерн.):  $n_d = 250 \text{ об/хв}$

Поперечна подача (врізання за прохід):

$$s_{\text{п оп}} = 0,003 - 0,005 \text{ мм/прохід} \rightarrow \text{приймаємо } s_{\text{п оп}} = 0,004 \text{ мм/прохід}$$

Кількість робочих проходів:

$$i = (D_d - D_{\text{п}}) / (2 \times s_{\text{п}}) = 0,008 / (2 \times 0,004) = 1 \text{ прохід врізання} + 2 \text{ виходжувальних проходи без поперечної подачі для зняття пружних деформацій}$$

Основний час:

$$T_0 = (i + i_{\text{вих}}) \times L / (s_{\text{поздовж}} \times n_{\text{дет}}) + t_{\text{виход}}$$

де  $L = 52 \text{ мм}$ ;  $s_{\text{поздовж}} = 0$  (врізне шліфування);  $t_{\text{виход}} = 0,15 \text{ хв}$  (виходжування)

$$T_0 \approx 3 \times (1/250) \times 60 + 0,15 \approx 0,72 + 0,15 = 0,87 \text{ хв}$$

Рясне охолодження: 5% емульсія на основі Аквол-2, витрата  $\geq 10 \text{ л/хв}$  – обов'язкове для запобігання прижогам на загартованій поверхні.

Таблиця 2.4 – Режими шліфування осі сателіта

Параметр	Чорнове (оп.045)	Чистове (оп.050)	Надтонке (оп.055)
Круг	32А 40 СМ1 5 К	24А 25 СМ2 5 К	14А 16 ВТ 6 К
$v_k$ , м/с	25	22	19
$v_{\text{дет}}$ , м/хв	25	18	12
$n_{\text{дет}}$ , об/хв	530	382	255
$s_{\text{п оп}}$ , мм/прохід	0,010	0,005	0,004
Припуск на $\emptyset$ , мм	0,16	0,04	0,008
Кількість проходів	8+2 вих	4+2 вих	1+2 вих
Основний час, хв	1,45	1,12	0,87
$R_a$ , мкм	0,63	0,32	0,16
Квалітет	h6	h5	h4

## 2.2.5 Вибір контрольно-вимірювального інструменту

Таблиця 2.5 – Засоби контролю осі сателіта

Параметр, що контролюється	Засіб вимірювання	Точність	Метод
Зовнішній діаметр Ø15h4	Мікрометр МК-25 ДСТУ 4034	0,001 мм	Прямий замір
Відхилення від круглості	Кругломір Talyrond 100	0,01 мкм	Профілограма
Шорсткість Ra = 0,16 мкм	Профілограф-профілометр Surftest SJ-210	0,001 мкм	Щупово
Биття відносно осі	Призми + індикатор ІЧ-10	0,001 мм	Обертання в призмах
Твердість HRC ≥ 62	Твердомір ТК-2М	±1 HRC	Вдавлення алмазного конуса
Довжина 52±0,015 мм	Штангенциркуль ШЦ-I	0,05 мм	Прямий замір
Діаметр отворів Ø3 і Ø2 мм	Нутромір НМ 3–18	0,001 мм	Прямий замір

## 2.3 Технологічний процес виготовлення корпусу редуктора

### 2.3.1 Аналіз технологічності корпусу

Корпус редуктора – циліндрична гільза Ø270×110 мм з двома торцевими фланцями. Матеріал: СЧ25 ДСТУ 8833:2019. Основні поверхні, що підлягають механічній обробці: центральна розточка Ø250H7 під коронне колесо; розточки Ø52H7 і Ø85H7 під підшипники; торцеві площини фланців (база для складання); отвори під болти М8 – 12 штук рівномірно; отвори під штифти Ø6 мм – 4 штуки; різьбові отвори М18×1,5 (зливна пробка) і М10 (маслопоказчик).

Корпус відноситься до класу «корпусні деталі». Заготовка – вилівок з чавуну СЧ25 в піщано-глиняні форми. Клас точності вилівка ІТ13–ІТ15 (ДСТУ ISO 8062). Після лиття – штучне старіння при 450–500°С для зняття залишкових напружень (запобігає деформаціям при обробці та в процесі експлуатації).

Таблиця 2.6 – Маршрутна карта обробки корпусу редуктора

№	Операція	Зміст	Обладнання	Квалітет
005	Ливарна	Відливання заготовки в піщано-глиняну форму	Ливарний цех	–
010	Термічна	Штучне старіння 500°С, витримка 4 год, охолодження з піччю до 200°С, далі на повітрі	Піч камерна	–

					КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

015	Токарно-карусельна	Чорнова обробка зовн. циліндра Ø270, підрізання торців, чорнова розточка центр. отвору Ø246	Карусельний 1512	ІТ14
020	Токарно-карусельна	Чистова розточка отворів: Ø250Н7 (корона); Ø52Н7 (підш.); Ø85Н7 (підш.); підрізання торців фланців в розмір	Карусельний 1512	ІТ7
025	Координатно-розточна	Розточка відп. під штифти 4×Ø6Н7 (рівномірно)	КР 2421	ІТ7
030	Радіально-свердлильна	Свердління отворів під болти 12×Ø9 мм; нарізання різьби М18×1,5 і М10; свердління отворів під штифти	Радіально-свердл. 2М55	–
035	Слюсарна	Зняття задирок, контроль, продувка	Верстак	–
040	Промивна	Промивка в уайт-спіриті, сушіння	Ванна промивна	–
045	Контрольна	Контроль розмірів, позиційних допусків отворів, шорсткості	Стіл ВТК	–

### 2.3.2 Операційний ескіз та допуски форми

Для центральної розточки Ø250Н7 (під коронне колесо) встановлено такі вимоги: відхилення від круглості  $\leq 0,015$  мм; відхилення від циліндричності  $\leq 0,020$  мм; шорсткість  $R_a \leq 1,6$  мкм. Ці параметри забезпечуються фінішною розточкою різцем з твердосплавною пластиною Т15К6 на карусельному верстаті за два проходи (чорновий + чистовий).

Для розточок Ø52Н7 і Ø85Н7 (під підшипники): співвісність відносно осі центральної розточки  $\leq 0,020$  мм (забезпечується обробкою за одне устанавлення на карусельному верстаті); шорсткість  $R_a \leq 1,25$  мкм.

## 2.4 Технологічний процес складання редуктора

### 2.4.1 Схема складання редуктора

Складання редуктора виконується вузловим методом – спочатку збираються окремі вузли (вузол сателіта, вузол водила), а потім виконується загальне складання. Це скорочує час складання і полегшує контроль якості на кожному етапі.

Послідовність складальних вузлів:

Вузол А – вісь сателіта з підшипником;

Вузол Б – сателіт на осі;

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вузол В – водило з трьома вузлами Б;

Вузол Г – вхідний вал з підшипником 36205;

Вузол Д – коронне колесо в корпусі;

Вузол Е – загальне складання.

## 2.4.2 Операційна карта складання

Таблиця 2.7 – Технологічна карта складання редуктора

№ оп.	Зміст операції	Інструмент / обладнання	$T_{\text{норм}}$ , хв	Контроль
SA-01	Промивка всіх деталей в уайт-спіриті, просушування стисненим повітрям, перевірка відповідності розмірів кресленню	Ванна, пістолет повітряний	15	Візуальний + вимірювання
SA-02 (вузол А)	Нанести мастило ЛІТОЛ-24 на поверхню осі під підшипник. Встановити голчастий підшипник НК 15/16 на вісь без внутрішнього кільця (вісь – бігова доріжка). Перевірити плавність обертання від руки	Щіточка для мастила	5	Плавність обертання руками
SA-03 (вузол Б)	Встановити торцеву бронзову шайбу Ø23/15×1,5. Встановити сателіт з підшипником на вісь. Встановити другу шайбу. Осьовий зазор між шайбами і сателітом 0,05–0,15 мм	Щупи плоскі	8	Щуп, обертання
SA-04 (вузол В)	Запресувати 3 осі у передній диск водила (натяг Н7/р6). Зусилля запресування $F = 8\text{--}12$ кН. Встановити 3 вузли Б на осі. Встановити задній диск водила, запресувати осі. Застопорити 6 штифтами Ø4×16	Прес гідравлічний 25 кН; молоток, дорн	35	Момент обертання сателітів $\leq 0,5$ Н·м
SA-05 (вузол Д)	Нагріти корпус до 80–100°C (термошафа). Запресувати коронне колесо в корпус до упору (натяг Н7/с6). Встановити 4 стопорних штифти Ø6×20	Термошафа, прес, молоток	20	Зазор між торцем і корпусом $\leq 0,05$ мм
SA-06 (вузол Г)	Напресувати підшипник 36205 на вхідний вал (натяг на внутрішньому кільці к6). $T_{\text{напрес}} = 80^\circ\text{C}$ (масляна ванна для підшипника). Встановити вхідний вал у передній фланець корпусу	Ванна масляна, оправка	10	Биття вінця сонячного $\leq 0,015$ мм

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ

Арк.

25

SA-07	Ввести водило (вузол В) у корпус, забезпечивши зачеплення 3 сателітів з коронним колесом одночасно. Обертанням перевірити: усі зуби зайшли в зачеплення, обертання плавне без заїдань	Відвертка, пластиковий молоток	15	Момент обертання $\leq 1,5$ Н·м без навантаж.
SA-08	Ввести сонячне колесо вхідного вала в зачеплення з 3 сателітами. Встановити передній фланець. Перевірити плавність обертання вхідного вала від руки	–	10	Момент обертання $\leq 0,5$ Н·м
SA-09	Встановити 2 підшипники 36209 на шийку водила $\varnothing 45$ мм ( $T_{нагр} = 80^{\circ}\text{C}$ ). Встановити регулювальні прокладки. Загвинтити регулювальну гайку $M45 \times 1,5$ . Відрегулювати попередній натяг $0,02-0,03$ мм (момент $x_x = 0,5-1,0$ Н·м)	Ключ 46 мм, динамометричний ключ	20	Динамом. ключ, індикатор
SA-10	Встановити манжету $20 \times 40 \times 10$ FKM на вхідному валу. Встановити манжету $45 \times 65 \times 12$ FKM на вихідному валу. Нанести Loctite 574 на поверхні стику фланців	Оправка для манжет	10	Відсутність перекосу манжети
SA-11	Затягнути болти $M8 \times 25$ (12 шт.) хрест-навхрест у 3 проходи: 1-й – 8 Н·м; 2-й – 15 Н·м; 3-й – 25 Н·м. Витримати 30 хв до полімеризації Loctite 574	Динамометричний ключ	15	Момент затягування 25 Н·м
SA-12	Залити мастило I-G-A-46 через заливний отвір $M18 \times 1,5$ до середньої позначки маслопоказчика (2,5 л). Загвинтити пробку. Перевірити герметичність ущільнень візуально	Лійка, ємність 3 л	10	Відсутність підтікань 5 хв
SA-13	Обкатка без навантаження: 30 хв при $n = 1500$ об/хв; 30 хв при $n = 3000$ об/хв. Контроль: $T_{корпусу} \leq 70^{\circ}\text{C}$ ; рівень шуму $\leq 72$ дБ(А); відсутність підтікань мастила	Стенд обкатний, термометр, шумомір	65	$T \leq 70^{\circ}\text{C}$ , шум $\leq 72$ дБ(А)
SA-14	Злити перше мастило (містить продукти припрацювання). Промити корпус. Залити свіже мастило 2,5 л. Нанести маркування: тип редуктора, передавальне число, рік виготовлення, заводський №	Ємність, лійка, фарба	15	Відповідність маркування
SA-15	Остаточний контроль: перевірка люфту на вихідному валу ( $\leq 5$ кутових	Кутомір, динамом. ключ	15	Протокол контролю

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ

Арк.

26



Плоскошліфувальни й	ЗБ722	060 (вісь – торці)	Стіл 400×125 мм; точність IT5
Установка ТВЧ	ВЧГ-60	035 (вісь – загартування)	Потужність 60 кВт; f = 66 кГц

## 2.5.2 Ріжучий інструмент

Таблиця 2.10 – Ріжучий інструмент для виготовлення осі сателіта

Операція	Інструмент	Матеріал	Стійкість T, хв	Режим різання
Токарна чорнова 010	Різець прохідний $\varphi=75^\circ$ , r=0,8	T5K10 (VK8)	30–40	v=80 м/хв, s=0,25 мм/об, t=0,7 мм
Токарна н/чистова 015	Різець прохідний $\varphi=45^\circ$ , r=0,4	T15K6 (P25)	45–60	v=120 м/хв, s=0,12 мм/об, t=0,3 мм
Свердлильна 020	Свердло спіральне Ø3 мм	P6M5	15–20	v=20 м/хв, s=0,05 мм/об
Свердлильна 020	Свердло спіральне Ø2 мм	P6M5	10	v=15 м/хв, s=0,03 мм/об
Шліфув. чорнова 045	Круг ПП 150×20×32, 32А 40 СМ1	Електрокорунд	Правка через 15–20 дет.	v <sub>к</sub> =25 м/с, v <sub>д</sub> =25 м/хв
Шліфув. чистова 050	Круг ПП 150×20×32, 24А 25 СМ2	Електрокорунд	Правка через 10–12 дет.	v <sub>к</sub> =22 м/с, v <sub>д</sub> =18 м/хв
Шліфув. надтонка 055	Круг ПП 150×20×32, 14А 16 ВТ	Білий електрокор.	Правка через 5–8 дет. (алм. олівець)	v <sub>к</sub> =19 м/с, v <sub>д</sub> =12 м/хв

### Висновки до розділу.

Розроблено технологічні процеси виготовлення трьох основних деталей редуктора: вала-шестерні (12 операцій, заготовка – поковка, КВМ = 0,545), осі сателіта (13 операцій включно з ТВЧ-загартуванням і надтонким шліфуванням Ra = 0,16 мкм до h4, КВМ = 0,583), корпусу редуктора (9 операцій, заготовка – виливок СЧ25 зі старінням). Розроблено технологічну карту складання (15 операцій, T<sub>шт-к</sub> = 353 хв). Підібрано обладнання (9 одиниць) і ріжучий інструмент. Найвідповідальніша операція – надтонке шліфування посадкової поверхні осі сателіта Ø15h4, Ra = 0,16 мкм, HRC ≥ 62, що забезпечує ресурс голчастого підшипника NK 15/16 не менше 85 400 годин.

					КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

### 3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Силовий та геометричний розрахунок зубчастих коліс

Вихідні дані:

$T_1 = 25,33$  Нм – вхідний момент на двигуні;

$T_{\text{вих}} = 250$  Нм - вихідний момент на двигуні;

$n_1 = 3000$  об/хв – частота обертання вхідного вала сервопривода;

$z_1 = 18$  – кількість зубів сонячного колеса,

$z_2 = 72$  - кількість зубів сателітів  $k = 3$

$z_3 = 162$  - кількість зубів коронного колеса;  $\alpha = 20^\circ$ ;  $x = 0$ .

Вибираємо матеріали та обчислюємо допустимі напруження

Для сонячного колеса ( $z_1 = 18$ ) та сателітва ( $z_2 = 72$ ) обираємо Сталь 20ХН2М ДСТУ 7806:2015. Термообробка: цементация 0,8–1,2 мм + загартування HRC 58–62 (поверхня), HB 300–350 (серцевина).

$$[\sigma_H]^1 = \sigma_{H_l} i m / S_H = 1650 / 1,1 = 1500 \text{ МПа (сонячне колесо)}$$

$$[\sigma_F]^1 = \sigma_{F_l} i m / S_F = 850 / 1,55 \approx 550 \text{ МПа (сонячне, однобічне)}$$

$$[\sigma_F]^2 = \sigma_{F_l} i m \times K_F C / S_F = 850 \times 0,72 / 1,55 \approx 400 \text{ МПа (сателіти, знакозмінне)}$$

Коронне колесо ( $z_3 = 162$ )

Матеріал: Сталь 40ХН ДСТУ 7806:2015. Термообробка: загартування + відпуск HB 280–320.

$$[\sigma_H]^3 = 2 \times HB_{cp} + 70 = 2 \times 300 + 70 = 670 \text{ МПа} \rightarrow \text{нормована } 900 \text{ МПа}$$

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<b>3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ</b>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Слободян М.І.</i>						
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>					29	31
<i>Рецензент</i>						<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, зр.МВс-41</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

$$[\sigma_F]_3 = 1,8 \times \text{HB}_{\text{cp}} = 1,8 \times 300 = 540 \text{ МПа} \rightarrow \text{приймаємо } 350 \text{ МПа}$$

Таблиця 3.1 – Матеріали та допустимі напруження зубчастих коліс

Колесо	Матеріал	Термообробка	Твердість	$[\sigma_H]$ МПа	$[\sigma_F]$ МПа
Сонячне $z_1=18$	Ст. 20ХН2М	Цем.+загарт.	HRC 58–62	1500	550
Сателіт $z_2=72$	Ст. 20ХН2М	Цем.+загарт.	HRC 58–62	1500	400
Коронне $z_3=162$	Ст. 40ХН	Загарт.+відп.	HB 280–320	900	350

### 3.2 Проектний розрахунок модуля зачеплення

Мінімальний модуль з умови контактної витривалості ( $K_m = 1650$ ;  $\psi_b d = 0,6$ ;  $[\sigma_H] = 900 \text{ МПа}$  за слабшим матеріалом – коронним колесом):

$$\begin{aligned}
 m &\geq K_m \times \sqrt[3]{(T^1 / (k \times \psi_b d \times z^{12} \times [\sigma_H]^2))} \\
 &= 1650 \times \sqrt[3]{(25330 / (3 \times 0,6 \times 18^2 \times 900^2))} \geq 1650 \times 0,03767 \\
 &= 0,622 \text{ мм}
 \end{aligned}$$

$$m_{\min} = 0,622 \text{ мм}$$

За стандартним рядом ДСТУ ISO 54:2001: ..., 0,8; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0; ...  
 Приймаємо  $m = 1,5 \text{ мм}$  (перевищення у  $1,5/0,622 = 2,41$  рази)

### 3.3 Геометричний розрахунок зубчастих коліс

Ділильні діаметри

$$d^1 = m \times z^1 = 1,5 \times 18 = 27,0 \text{ мм}$$

$$d^2 = m \times z^2 = 1,5 \times 72 = 108,0 \text{ мм}$$

$$d^3 = m \times z^3 = 1,5 \times 162 = 243,0 \text{ мм}$$

Діаметри вершин зубів

$$d_{a1} = m \times (z^1 + 2) = 1,5 \times 20 = 30,0 \text{ мм}$$

$$d_{a2} = m \times (z^2 + 2) = 1,5 \times 74 = 111,0 \text{ мм}$$

$$d_{a3} = m \times (z^3 - 2) = 1,5 \times 160 = 240,0 \text{ мм (внутрішнє зачеплення)}$$

Діаметри западин зубів

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d_{f1} = m \times (z_1 - 2,5) = 1,5 \times 15,5 = 23,25 \text{ мм}$$

$$d_{f2} = m \times (z_2 - 2,5) = 1,5 \times 69,5 = 104,25 \text{ мм}$$

$$d_{f3} = m \times (z_3 + 2,5) = 1,5 \times 164,5 = 246,75 \text{ мм (внутрішнє)}$$

Міжосьова відстань (сонячне – сателіт)

$$a_{12} = m \times (z_1 + z_2) / 2 = 1,5 \times (18 + 72) / 2 = 1,5 \times 45 = 67,5 \text{ мм}$$

Примітка.  $r_H = a_{12} = 67,5 \text{ мм}$  – радіус кола центрів сателітів.

Ширина зубчастого вінця

$$b = \psi_{bd} \times d_1 = 0,6 \times 27,0 = 16,2 \text{ мм} \rightarrow \text{приймаємо } b = 20 \text{ мм}$$

Висота зуба та крок зачеплення

$$h = 2,25 \times m = 2,25 \times 1,5 = 3,375 \text{ мм}$$

$$p_t = \pi \times m = \pi \times 1,5 = 4,712 \text{ мм}$$

Коефіцієнт перекриття (зачеплення  $z_1-z_2$ )

$$\begin{aligned} \text{Кути профілю на вершинах: } \alpha_{a1} &= \arccos(d_1 \cos \alpha / d_{a1}) = \arccos(27 \times 0,9397 / 30) \\ &= \arccos(0,8457) = 32,17^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{a2} &= \arccos(d_2 \cos \alpha / d_{a2}) = \arccos(108 \times 0,9397 / 111) = \arccos(0,9142) \\ &= 23,93^\circ \end{aligned}$$

$$\varepsilon_\alpha = [z_1^2 (\operatorname{tg} \alpha_{a1} - \operatorname{tg} \alpha) + z_2^2 (\operatorname{tg} \alpha_{a2} - \operatorname{tg} \alpha)] / (2\pi)$$

$$\varepsilon_\alpha = [18 \times (0,6283 - 0,3640) + 72 \times (0,4432 - 0,3640)] / (2\pi)$$

$$\varepsilon_{\alpha} = [18 \times 0,2643 + 72 \times 0,0792] / 6,283 = 10,459 / 6,283 = 1,665$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 1,67 \text{ (коефіцієнт перекриття)}$$

$\varepsilon_{\alpha} = 1,67 > 1,2$  – гарантується плавність зачеплення

Таблиця 3.2 – Геометричні параметри зубчастих коліс

Параметр	Сонячне $z_1=18$	Сателіт $z_2=72$	Коронне $z_3=162$
Модуль $m$ , мм	1,5	1,5	1,5
Кут зачеплення $\alpha$	20°	20°	20°

Ділильний діаметр d, мм	27,0	108,0	243,0
Діаметр вершин d <sub>a</sub> , мм	30,0	111,0	240,0
Діаметр западин d <sub>f</sub> , мм	23,25	104,25	246,75
Ширина вінця b, мм	20	20	20
Висота зуба h, мм	3,375	3,375	3,375
Ступінь точності ISO 1328	6-B	6-B	7-B
Матеріал	Ст. 20ХН2М	Ст. 20ХН2М	Ст. 40ХН

### 3.4 Визначення сил у зачепленні

Зачеплення сонячне колесо – сателіт

$$F_t12 = 2 \times T^1 / (k \times d^1) = 2 \times 25330 / (3 \times 27,0) = 50660 / 81,0 = 625,4 \text{ Н}$$

$$F_r12 = F_t12 \times \text{tg}(\alpha) = 625,4 \times \text{tg}(20^\circ) = 625,4 \times 0,3640 = 227,6 \text{ Н}$$

$$F_n12 = F_t12 / \cos(\alpha) = 625,4 / 0,9397 = 665,5 \text{ Н}$$

Зачеплення сателіт – коронне колесо

Від вихідного моменту  $T_H = 250 \text{ Нм}$  і радіуса водила  $r_H = 67,5 \text{ мм}$ :

$$F_t23 = T_H / (k \times r_H) = 250000 / (3 \times 67,5) = 250000 / 202,5 = 1234,6 \text{ Н}$$

$$F_r23 = F_t23 \times \text{tg}(20^\circ) = 1234,6 \times 0,3640 = 449,4 \text{ Н}$$

$$F_n23 = F_t23 / \cos(20^\circ) = 1234,6 / 0,9397 = 1313,4 \text{ Н}$$

Таблиця 3.3 – Сили в зачепленні планетарного редуктора

Зачеплення	Колова $F_t$ , Н	Радіальна $F_r$ , Н	Нормальна $F_n$ , Н
Сонячне – сателіт (зовн.)	625,4	227,6	665,5
Сателіт – коронне (внутр.)	1234,6	449,4	1313,4

### 3.5 Перевірочний розрахунок на контактну витривалість

Розрахунок для зачеплення сателіт–коронне (найбільш навантажене).

Формула Герца:

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_H = Z_E \times Z_H \times Z_\varepsilon \times \sqrt{(F_t 23 \times K_H / (b \times d^2 \times u^{23}))}$$

Коефіцієнти:  $Z_E = 190$  МПа (сталева пара);  $Z_H = 2,5$  ( $\alpha = 20^\circ, x = 0$ );

$$Z_\varepsilon = (1/\varepsilon_\alpha) = (1/1,67) = 0,774; u^{23} = z^3/z^2 = 162/72 = 2,250.$$

Сумарний коефіцієнт навантаження:  $K_H\alpha = 1,1$ ;  $K_H\beta = 1,05$ ;  $K_HV = 1,05$ :

$$K_H = K_H\alpha \times K_H\beta \times K_HV = 1,1 \times 1,05 \times 1,05 = 1,213$$

Підстановка:

$$\text{Чисельник: } F_t 23 \times K_H = 1234,6 \times 1,213 = 1497,6$$

$$\text{Знаменник: } b \times d^2 \times u^{23} = 20 \times 108 \times 2,250 = 4860$$

$$\text{Дріб: } 1497,6 / 4860 = 0,3081$$

$$\text{Корінь: } \sqrt{0,3081} = 0,5551$$

$$\text{Добуток констант: } 190 \times 2,5 \times 0,774 = 367,7$$

$$\sigma_H = 367,7 \times 0,5551 = 204,0 \text{ МПа}$$

$\sigma_H = 204,0 \text{ МПа} < [\sigma_H] = 900 \text{ МПа}$  – умова контактної міцності виконана

$$\text{Запас: } S_H = [\sigma_H] / \sigma_H = 900 / 204,0 = 4,41$$

Перевірка зачеплення сонячне–сателіт

$$u^{12} = z^2/z^1 = 4,0, [\sigma_H] = 1500 \text{ МПа}$$

$$\sigma_H = 367,7 \times \sqrt{(625,4 \times 1,213 / (20 \times 27 \times 4,0))} = 217,8 \text{ МПа}$$

$$\sigma_H = 217,8 \text{ МПа} < [\sigma_H] = 1500 \text{ МПа.}$$

$$\text{Запас } S_H = 6,89$$

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		33

### 3.6 Перевірочний розрахунок на згинальну витривалість

Розрахунок для зубів сателіта (знакозмінне навантаження,  $[\sigma_F] = 400 \text{ МПа}$ ):

$$\sigma_F = F_t 23 \times K_F \times Y_F \times Y_\varepsilon / (b \times m)$$

Коефіцієнти:  $Y_F = 3,60$  (форма зуба,  $z^2 = 72$ , ISO 6336);

$$Y_\varepsilon = 1/\varepsilon_\alpha = 1/1,67 = 0,599; K_F = 1,1 \times 1,05 \times 1,10 = 1,270.$$

Чисельник:  $1234,6 \times 1,270 \times 3,60 \times 0,599 = 3381,0$

Знаменник:  $20 \times 1,5 = 30$

$$\sigma_F = 3381,0/30 = 112,7 \text{ МПа}$$

$\sigma_F = 112,7 \text{ МПа} < [\sigma_F] = 400 \text{ МПа}$  умова згинальної міцності виконана

Запас:  $S_F = [\sigma_F]/\sigma_F = 400/112,7 = 3,55$

Перевірка сонячного колеса ( $Y_F = 4,25$  для  $z^1 = 18$ ,  $[\sigma_F] = 550 \text{ МПа}$ ):

$$\sigma_F = 625,4 \times 1,270 \times 4,25 \times 0,599 / (20 \times 1,5) = 67,2 \text{ МПа}$$

$$\sigma_F = 67,2 \text{ МПа} < [\sigma_F] = 550 \text{ МПа}. \text{ Запас } S_F = 8,19$$

Таблиця 3.4 – Зведені результати силового розрахунку

Параметр	Значення
Модуль $m$	1,5 мм (прийнято, мін. = 0,622 мм)
Ширина вінця $b$	20 мм
Ділильні діаметри $d_1/d_2/d_3$	27,0 / 108,0 / 243,0 мм
Міжосьова відстань $a_{12}$	67,5 мм
Коефіцієнт перекриття $\varepsilon_\alpha$	1,67
Колові сили $F_{t12} / F_{t23}$	625,4 / 1234,6 Н
Контактні напруження $\sigma_H$ (сат.–корона)	204,0 МПа
Допустиме $[\sigma_H]$	900 МПа
Запас контактної міцності $S_H$	4,41
Згинальні напруження $\sigma_F$ (сателіт)	112,7 МПа
Допустиме $[\sigma_F]$	400 МПа

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ

Арк.

34

### 3.7 Розрахунок валів, підшипників та з'єднань

#### 3.7.1 Проектний розрахунок вхідного валу

Матеріал: Сталь 40Х ДСТУ 7806:2015, покращення.  $\sigma_B = 900\text{МПа}$ ,  $\sigma^{-1} = 410\text{МПа}$ . Допустиме:  $[\tau_k] = 25\text{МПа}$ .

$$d_{\text{вх}} \geq \sqrt[3]{(16 \times T^1 / (\pi \times [\tau_k]))} = \sqrt[3]{405280 / 78,54} = \sqrt[3]{5160} = 17,3 \text{ мм}$$

Прийняті діаметри вхідного валу:

$d_1 = 20 \text{ мм}$  (кінець під муфту, шпонковий паз 6×6)

$d_2 = 25 \text{ мм}$  (під підшипник 36205)

$d_3 = 22 \text{ мм}$  (під зубчастий вінець сонячного колеса)

$d_4 = 18 \text{ мм}$  (центруюча цапфа у водилі)

#### 3.7.2 Проектний розрахунок вихідного валу (води́ла)

$$d_{\text{вих}} \geq \sqrt[3]{(16 \times T_{\text{вих}} / (\pi \times [\tau_k]))} = \sqrt[3]{(16 \times 250000 / (\pi \times 25))} = 37,1 \text{ мм}$$

Прийняті діаметри вихідного валу:

$d_1 = 40 \text{ мм}$  (кінець під ШВП, шпонковий паз 12×8)

$d_2 = 45 \text{ мм}$  (під підшипники 36209)

$D_{\text{фл}} = 120 \text{ мм}$  (діаметр фланця води́ла)

#### 3.7.3 Розрахунок осей сателітів

Осі – нерухомі стержні (Сталь 40Х, НРС 52–56), закріплені у фланцях води́ла.

Результуюча сила:

$$F_{\text{рез}} = F_{n23} - F_{n12} = 1313,4 - 665,5 = 647,9\text{Н}$$

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема: балка на 2 опорах, навантаження посередині. Відстань між опорами ( $L = b + 2 \times b_{\text{підш}}$ ):

$$L = 20 + 2 \times 16 = 52 \text{ мм}$$

$$R_A = R_B = F_p e_3 / 2 = 647,9 / 2 = 323,9 \text{ Н}$$

$$M_{3\Gamma_{\text{max}}} = F_{\text{рез}} \times L / 4 = 647,9 \times 52 / 4 = 8423 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Діаметр осі ( $[\sigma_{3\Gamma}] = 80 \text{ МПа}$ ):

$$d_{\text{ос}} \geq \sqrt[3]{(32 \times M_{3\Gamma_{\text{max}}} / (\pi \times [\sigma_{3\Gamma}]))} = \sqrt[3]{(32 \times 8423 / (\pi \times 80))} = 10,23 \text{ мм}$$

Приймаємо  $d_{\text{ос}} = 15 \text{ мм}$  (під голчастий підшипник НК 15/16)

Перевірка:

$$\sigma_{3\Gamma} = 32 \times M_{3\Gamma_{\text{max}}} / (\pi \times d_{\text{ос}}^3) = 32 \times 8423 / (\pi \times 15^3) = 25,4 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{3\Gamma} = 25,4 \text{ МПа} < [\sigma_{3\Gamma}] = 80 \text{ МПа.}$$

### 3.7.4 Перевірочний розрахунок вхідного валу

Залишкова радіальна сила (10% через похибки розподілу):

$$F_{\text{зал}} = 0,10 \times k \times F_t 12 = 0,10 \times 3 \times 625,4 = 187,6 \text{ Н}$$

$$M_{3\Gamma} = F_{\text{зал}} \times a = 187,6 \times 30 = 5628 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

виліт  $a=30 \text{ мм}$

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{(M_{3\Gamma}^2 + 0,75 \times T^{12})} = \sqrt{(5628^2 + 0,75 \times 25330^2)} = 22648 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

$$\sigma_{\text{екв}} = 32 \times M_{\text{екв}} / (\pi \times d^3) = 32 \times 22648 / (\pi \times 25^3) = 14,77 \text{ МПа}$$

$$\sigma_a = K_\sigma \times \sigma_{\text{екв}} / \varepsilon_\sigma = 1,8 \times 14,77 / 0,88 = 30,21 \text{ МПа}$$

$$(K_\sigma = 1,8; \varepsilon_\sigma = 0,88)$$

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						36
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

$$S = \sigma_{-1} / \sigma_a = 410 / 30,21 = 13,57$$

$S = 13,6 \gg [S] = 2,5$  – достатній запас втомної міцності

### 3.8 Перевірочний розрахунок вихідного валу

$$F_{\text{залвих}} = 0,10 \times 3 \times F_t 23 = 0,10 \times 3 \times 1234,6 = 370,4 \text{ Н}$$

$$M_{\text{зг}} = 370,4 \times 40 = 14816 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

виліт 40мм

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{(14816^2 + 0,75 \times 250000^2)} = 217014 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

$$\sigma_{\text{екв}} = 32 \times 217014 / (\pi \times 45^3) = 6944448 / 286279 = 24,26 \text{ МПа}$$

$$\sigma_a = 1,8 \times 24,26 / 0,85 = 51,38 \text{ МПа} (\varepsilon_\sigma = 0,85 \text{ для } d = 45 \text{ мм})$$

$$S = 410 / 51,38 = 7,98$$

$S = 7,98 \gg [S] = 2,5$  – достатній запас

#### 3.8.1 Підбір та розрахунок підшипників

Підшипник вхідного валу – 36205

$d = 25 \text{ мм}$ ,  $D = 52 \text{ мм}$ ,  $B = 15 \text{ мм}$ ,  $C = 14,0 \text{ кН}$ ,  $C_0 = 7,8 \text{ кН}$  (ДСТУ 9078:2021).

$$P^1 = F_{\text{зал}} = 187,6 \text{ Н} = 0,1876 \text{ кН}$$

$$L^{10} = (C/P^1)^3 = (14,0/0,1876)^3 = 74,63^3 = 415560 \text{ млн. об}$$

$$L_{h1} = 415560 \times 10^6 / (60 \times 3000) = 2,31 \times 10^9 \text{ год}$$

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		37

$$L_{h1} \gg 20000 \text{ год (нормативний мінімум)}$$

Підшипники вихідного валу – 36209×2

$$d = 45 \text{ мм}, D = 85 \text{ мм}, B = 19 \text{ мм}, C = 33,2 \text{ кН}, C_0 = 21,2 \text{ кН.}$$

Попередній натяг 0,02–0,05 мм.

$$P^2 = F_{3ал_{вих}} = 370,4 \text{ Н} = 0,3704 \text{ кН}$$

$$L^{10} = (33,2/0,3704)^3 = 89,63^3 = 719884 \text{ млн. об}$$

$$L_{h2} = 719884 \times 10^6 / (60 \times 300) = 3,999 \times 10^{10} \text{ год}$$

$$L_{h2} \gg 20000 \text{ год}$$

### 3.8.2 Голчасті підшипники осей сателітів – НК 15/16 (×3)

$$d = 15 \text{ мм}, D = 23 \text{ мм}, B = 16 \text{ мм}, C = 9,8 \text{ кН.}$$

Вісь – безпосередня бігова доріжка, HRC 62–65, Ra = 0,16 мкм.

$$P_{сат} = F_{рез} = 647,9 \text{ Н} = 0,6479 \text{ кН}$$

$$L^{10} = (C/P_{сат})^3 = (9,8/0,6479)^3 = 15,127^3 = 3460 \text{ млн. об}$$

$$n_2 = 675 \text{ об/хв (сателіт навколо власної осі)}$$

$$L_{h_{сат}} = 3460 \times 10^6 / (60 \times 675) = 85432 \text{ год} \approx 85400 \text{ год}$$

$L_h = 85400 \text{ год} > [L_h]_{min} = 20\,000 \text{ год}$  – підшипник сателіта відповідає

Таблица 4.1 – Підшипники планетарного редуктора

Позиція	Тип	Позначення	d, мм	D, мм	C, кН	P, кН	$L_h$ , год
Вхідний вал	Рад.-упорний куль.	36205	25	52	14,0	0,188	$2,31 \times 10^9$
Вихідний вал (×2)	Рад.-упорний куль.	36209	45	85	33,2	0,370	$4,0 \times 10^{10}$

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Вісь сателіта (×3)	Голчастий	NK 15/16	15	23	9,8	0,648	85 400
-----------------------	-----------	----------	----	----	-----	-------	--------

### 3.8.3 Розрахунок шпонкових з'єднань

Шпонка вхідного валу ( $d = 20$  мм,  $T_1 = 25\,330$  Н·мм)

Шпонка  $6 \times 6$  ( $b=6$ ,  $h=6$ ,  $t_1=3,5$ ,

$h_p = h - t^1 = 2,5$  мм).  $[\sigma_{3M}] = 100$  МПа.

$$l_{ш} \geq 2 \times T^1 / (d \times h_p \times [\sigma_{3M}]) = 2 \times 25330 / (20 \times 2,5 \times 100) = 10,1 \text{ мм}$$

Приймаємо  $l_{ш} = 20$  мм ( $l_{\text{ефект}} = 20 - 6 = 14$  мм для круглих торців)

$$\sigma_{3M} = 2 \times 25330 / (20 \times 2,5 \times 14) = 50660 / 700 = 72,4 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{3M} = 72,4 \text{ МПа} < [\sigma_{3M}] = 100 \text{ МПа. Запас } 1,38$$

Шпонка вихідного валу ( $d = 40$  мм,  $T_{\text{вих}} = 250\,000$  Н·мм)

Шпонка  $12 \times 8$  ( $b=12$ ,  $h=8$ ,  $t_1=5$ ,  $h_p = 3,0$  мм).  $[\sigma_{3M}] = 100$  МПа.

$$l_{ш} \geq 2 \times 250000 / (40 \times 3,0 \times 100) = 500000 / 12000 = 41,7 \text{ мм}$$

Приймаємо  $l_{ш} = 50$  мм ( $l_{\text{ефект}} = 50 - 12 = 38$  мм)

$$\sigma_{3M} = 2 \times 250000 / (40 \times 3,0 \times 38) = 500000 / 4560 = 109,6 \text{ МПа}$$

Дещо перевищує  $[\sigma_{3M}] = 100$  МПа. Збільшуємо до  $l_{ш} = 60$  мм:

$$l_{\text{ефект}} = 60 - 12 = 48 \text{ мм}$$

$$\sigma_{3M} = 500000 / (40 \times 3,0 \times 48) = 500000 / 5760 = 86,8 \text{ МПа}$$

$\sigma_{3M} = 86,8$  МПа  $< [\sigma_{3M}] = 100$  МПа з  $l_{ш} = 60$  мм. Запас 1,15

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 – Шпонкові з'єднання

З'єднання	d, мм	Шпонка b×h×l	l <sub>е</sub> фект, мм	σ <sub>зм</sub> , МПа	[σ <sub>зм</sub> ]	Запас
Вхідний вал – муфта	20	6×6×20	14	72,4	100	1,38
Вихідний вал – ШВП	40	12×8×60	48	86,8	100	1,15

Таблиця 4.3 – Зведені результати розрахунку валів

Параметр	Вхідний вал	Вихідний вал	Вісь сателіта
Матеріал	Ст. 40X HB270	Ст. 40X HB270	Ст. 40X HRC52
Мін розрахунковий d, мм	17,3	37,1	10,23
Прийнятий d (під підш.), мм	25	45	15
Крутний момент, Н·мм	25 330	250 000	–
Згинальний момент M <sub>зг</sub> , Н·мм	5 628	14 816	8 423
Еквівалентний момент, Н·мм	22 648	217 014	–
σ <sub>екв</sub> , МПа	14,77	24,26	25,4
Запас міцності S	13,6	7,98	3,15

### 3.9 Конструювання та опис редуктора

Загальна концепція конструкції

Конструкція розроблена з вимогами: мінімальні габарити при  $T_{\text{вих}} = 250$  Нм; кутовий люфт  $\leq 5'$ ; ресурс  $\geq 85\ 000$  год; стикування з серводвигуном (IEC B5) і ШВП; технологічність виготовлення.

Схема: співвісна 2К-Н, одноступінчаста. Вхідний і вихідний вали на одній осі. Корпус – циліндрична гільза.

Габаритні розміри:

$$D_{\text{корп}} = d^3 + 2\delta = 243 + 2 \times 12 = 267 \rightarrow 270\text{мм};$$

$$L_{\text{корп}} = b + 2 \times B_{\text{підш}} + 2 \times \delta_{\text{торц}} + \text{зазори} = 20 + 2 \times 19 + 2 \times 15 + 20 = 108 \rightarrow 110\text{ мм};$$

загальна довжина L = 165 мм; маса ~12 кг.

					КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.10 Опис основних вузлів

Матеріал: СЧ25 ДСТУ 8833:2019 – демпфування вібрацій, технологічність лиття. Циліндрична гільза  $\text{Ø}270 \times 110$  мм з передніми і заднім фланцями. Коронне колесо запресовано Н7/с6 і додатково зафіксовано 4 штифтами  $\text{Ø}6$  мм. Передній фланець – посадковий діаметр під серводвигун ІЕС В5. Задній – під ШВП або кронштейн. Пробка зливна М18 $\times$ 1,5 з магнітом (нижня частина). Маслопоказчик М10 (верхня частина).

Вал-шестерня (єдина деталь): Сталь 20ХН2М, цементация 0,8–1,2 мм + загартування HRC 58–62. Ra посадок = 0,63 мкм. Ділянки:  $\text{Ø}20$  (шпонка 6 $\times$ 6)  $\rightarrow$   $\text{Ø}25$  (підшипник 36205)  $\rightarrow$  зубчастий вінець  $z_1=18$ ,  $b=20$  мм  $\rightarrow$   $\text{Ø}18$  (центруюча цапфа через бронзову втулку БрАЖ9-4).

Єдина деталь (фланцевий диск + вихідний вал): Сталь 40Х, HB 270–320. Два диски з'єднані валом. В кожному диску – 3 отвори для осей на  $\text{Ø}135$  мм, крок 120°. Допуск міжосьової відстані  $\pm 0,010$  мм, кутове розташування  $\pm 30''$ . Отвори обробляються в зборі. Два підшипники 36209 з натягом 0,02–0,05 мм (регулювальна гайка М45 $\times$ 1,5 + прокладки).

Три сателіти  $z_2=72$ ,  $m=1,5$ ,  $b=20$  мм. Сталь 20ХН2М, HRC 58–62, ступінь точності 6 (ДСТУ ISO 1328-1). Осі  $\text{Ø}15$  мм, Сталь 40Х, HRC 62–65, Ra = 0,16 мкм – запресовані Н7/р6, застопорені штифтами  $\text{Ø}4$  мм. Голчасті підшипники НК 15/16 без внутрішніх кілець. Торцеві бронзові шайби  $\text{Ø}23/15 \times 1,5$  мм (БрАЖ9-4).

Кільце з внутрішнім вінцем  $z_3=162$ ,  $m=1,5$ ,  $b=20$  мм. Сталь 40ХН, HB 280–320. Зовн.  $\text{Ø}250 \times 28$  мм. Нарізання – довбання + шліфування, ступінь точності 7. Запресовано Н7/с6.

Колова швидкість сонячного:  $v_1 = \pi \times 27 \times 3000 / 60000 = 4,24$  м/с  $< 12$  м/с  $\rightarrow$  картерне мащення зануренням.

Мастило: І-Г-А-46 (ДСТУ 4017:2011), в'язкість 46 сСт/40°C,  $T_{\text{спалах}} = 186^\circ\text{C}$ . Об'єм 2,5 л. Рівень – нижній сателіт занурений на 1–2 модулі (1,5–3 мм). Перша заміна через 500 год, далі кожні 3000 год. Підшипники – розбризкуванням. Голчасті підшипники – через осьовий канал  $\text{Ø}3$  мм в осі.

					КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вхідний вал: манжета ДСТУ ISO 16589-1:2006, тип 1, 20×40×10 мм, матеріал FKM (-40...+200°C). Вихідний вал: манжета 45×65×12 мм FKM. Стики фланців: герметик Loctite 574 (анаеробний). Момент затягування болтів M8 = 25 Н·м.

1. Підготовка – промити всі деталі, перевірити розміри, підшипники промити у бензині.

2. Вузол сателіта – вісь → шайба → НК 15/16 → сателіт → шайба. Перевірити обертання від руки.

3. Складання водила – запресувати осі в передній диск, встановити сателіти, задній диск, застопорити штифтами. Перевірити рівномірність обертання трьох сателітів.

4. Коронне колесо в корпус – нагріти до 80–100°C, запресувати, встановити штифти.

5. Вхідний вал – напресувати підшипник 36205, встановити у передній фланець.

6. Введення водила – ввести водило з сателітами в корпус, забезпечити зачеплення, ввести сонячне колесо. Перевірити плавність від руки – без заїдань і ривків.

7. Підшипники вихідного валу – встановити 36209 з прокладками, затягнути гайку M45×1,5 до натягу 0,02–0,03 мм (момент хх = 0,5–1,0 Н·м).

8. Ущільнення – встановити манжети, нанести Loctite 574, затягнути болти 25 Н·м.

9. Мастило – залити 2,5 л І-Г-А-46, перевірити герметичність.

10. Обкатка – 30 хв при  $n = 1500$  об/хв + 30 хв при  $n = 3000$  об/хв.  $T_{\text{корп}} \leq 70^\circ\text{C}$ , шум  $\leq 72$  дБ(А). Злити перше мастило, залити свіже.

Точність зубчастих коліс: ступінь 6-В (сонячне і сателіти), 7-В (коронне) за ДСТУ ISO 1328-1:2006. Співвісність посадкових поверхонь валів: 0,010 мм. Паралельність осей сателітів: 0,010 мм/100 мм. Биття вінця сонячного: 0,015 мм. Биття фланця водила: 0,010 мм. Шорсткість зубів:  $R_a = 0,63$  мкм; під підшипники:  $R_a = 0,63$  мкм; під манжети:  $R_a = 0,32$  мкм. Кутовий люфт  $\leq 5'$ . Момент хх  $\leq 0,8$  Н·м.  $T_{\text{корп}} \leq 70^\circ\text{C}$ . Шум  $\leq 72$  дБ(А).

					КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.11 Специфікація деталей

Таблиця 5.1 – Специфікація деталей редуктора

№	Найменування	К-ть	Матеріал	Примітка
1	Корпус	1	СЧ25	Лиття + мех. обробка
2	Фланець передній	1	СЧ25	Лиття + мех. обробка
3	Фланець задній	1	СЧ25	Лиття + мех. обробка
4	Вал вхідний (вал-шестерня $z_1=18$ )	1	Ст. 20ХН2М	HRC 58–62
5	Водило з вихідним валом	1	Ст. 40Х	HВ 270–320
6	Сателіт $z_2=72$	3	Ст. 20ХН2М	HRC 58–62, Ra 0,63
7	Колесо коронне $z_3=162$	1	Ст. 40ХН	HВ 280–320
8	Вісь сателіта $\varnothing 15 \times 52$	3	Ст. 40Х	HRC 62–65, Ra 0,16
9	Підшипник 36205	1	–	ДСТУ 9078:2021
10	Підшипник 36209	2	–	ДСТУ 9078:2021
11	Підшипник НК 15/16	3	–	Голчастий без кільця
12	Манжета $20 \times 40 \times 10$ FKM	1	FKM	ДСТУ ISO 16589-1:2006
13	Манжета $45 \times 65 \times 12$ FKM	1	FKM	ДСТУ ISO 16589-1:2006
14	Шпонка $6 \times 6 \times 20$	1	Ст. 45	ДСТУ ISO 286
15	Шпонка $12 \times 8 \times 60$	1	Ст. 45	ДСТУ ISO 286
16	Шайба бронзова $\varnothing 23/15 \times 1,5$	6	БрАЖ9-4	Торцева шайба
17	Штифт $\varnothing 6 \times 20$ (корона)	4	Ст. 45	ГОСТ 3128
18	Штифт $\varnothing 4 \times 16$ (осі)	6	Ст. 45	ГОСТ 3128
19	Пробка зливна M18 $\times$ 1,5	1	Ст. 35	З магнітом
20	Маслопокажчик M10	1	–	Рівень мастила
21	Болт M8 $\times$ 25 кл. 8.8	12	–	Кріплення фланців
22	Гайка рег. M45 $\times$ 1,5	1	Ст. 45	Натяг підшипників

Таблиця 5.2 – Основні характеристики редуктора

Параметр	Значення
Схема	2К-Н, одноступінчаста
Передавальне число $i$	10,0 (точно)
$z_1 / z_2 / z_3$	18 / 72 / 162
Модуль $m$	1,5 мм
Ширина вінця $b$	20 мм
$T_{вих}$	250 Нм
ККД $\eta$	0,987
$S_H$ (контактна)	4,41
$S_F$ (згинальна)	3,55
Зовнішній діаметр корпусу	$\varnothing 270$ мм
Загальна довжина	165 мм
Маса	~12 кг
Кутовий люфт	$\leq 5'$
Ресурс (підшипники сателітів)	85 400 год
Мастило	I-Г-А-46, 2,5 л

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ

Арк.

43

### 3.12 Висновки до розділу

1.  $m = 1,5$  мм за ДСТУ ISO 54:2001,  $b = 20$  мм. Геометрично розраховано всі параметри. Коефіцієнт перекриття  $\varepsilon_\alpha = 1,67$ . Запас контактної міцності  $S_H = 4,41$ , згинальної  $S_F = 3,55$  – значно перевищують нормативні  $[S_H] = 1,15$ ,  $[S_F] = 1,7$ .
2. Діаметри: вхідний  $d = 25$  мм, вихідний  $d = 45$  мм, вісь сателіта 15 мм. Запаси  $S = 7,98-13,6$ . Підшипники 36205, 36209 (ресурс  $\gg 10^9$  год), НК 15/16 (85 400 год  $>$  20 000 год). Шпонки  $6 \times 6 \times 20$  і  $12 \times 8 \times 60$  – запаси 1,38 і  $1,15 > 1,1$ .
3. Розроблено конструкцію редуктора 2К-Н:  $T = 250$  Нм,  $i = 10$ ,  $k=3$ ,  $m=1,5$ ,  $\varnothing 270 \times 165$  мм, 12 кг. Корпус СЧ25, вал-шестерня і сателіти Ст.20ХН2М НРС 58–62, водило Ст.40Х, корона Ст.40ХН. Мащення І-Г-А-46, 2,5 л. Кутовий люфт  $\leq 5'$ . Ресурс 85 400 год.

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						44
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз умов праці та шкідливих факторів

При шліфуванні рівень шуму 82–95 дБ(А) перевищує норму ДСН 3.3.6.037-99 (80 дБ(А) для точних робіт). Джерела: шліфувальний круг 75–85 дБ(А); процес різання до 95 дБ(А); привід 60–72 дБ(А). Хронічний вплив > 85 дБ(А) спричиняє тугоухість, гіпертонію, зниження концентрації. Модернізований електромеханічний привід: шум від приводу знижується з 68–72 до 60–65 дБ(А) (економія 7 дБ(А)).

Джерела вібрації: дисбаланс круга; биття шпинделя; пульсація сил різання. Норми: ДСН 3.3.6.039-99, рівень 112 дБ для локальної вібрації. Перевищення → вібраційна хвороба. Планетарний редуктор з  $k=3$  симетричними сателітами: радіальні сили взаємно компенсуються → мінімальна динамічна сила небалансу.

60–70% частинок < 5 мкм (респірабельна фракція). ГДК:  $\text{SiO}_2 > 70\%$  – 1 мг/м<sup>3</sup>; сталь – 4 мг/м<sup>3</sup> (ГОСТ 12.1.005). При сухому шліфуванні концентрація 10–20 мг/м<sup>3</sup> – у 5–10 разів вище ГДК. Наслідок: силікоз (незворотне фіброзне ураження легень). При мокрому шліфуванні з МОТЗ концентрація знижується до 1–3 мг/м<sup>3</sup>.

Температура на робочому місці: 17–23°C, вологість 40–60%, швидкість повітря 0,2–0,5 м/с (ДСН 3.3.6.042-99). Тепловиділення від приводу: гідравлічний (3 кВт насос) →  $\Delta Q \approx 0,9$  кВт; електромеханічний →  $\Delta Q \approx 0,24\text{--}0,63$  кВт (у 1,5–4 рази менше).

Для зорових робіт найвищої точності (розряд I): загальне  $\geq 500$  лк, комбіноване  $\geq 5000$  лк (ДБН В.2.5-28:2018). Місцеве освітлення: вбудований світильник 24 В, освітленість у зоні обробки  $\geq 2000$  лк.

Кінетична енергія уламка 0,1 кг при  $v = 35$  м/с:  $E = mv^2/2 = 61$  Дж – достатньо для важкого травмування. Причини руйнування: перевищення швидкості; дефекти круга; неправильне балансування. Захист: кожух зі сталі 6 мм  $\geq 270^\circ$  охоплення.

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<b>4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОХОРОНА ПРАЦІ</b>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Слободян М.І.</i>						
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>					45	31
<i>Рецензент</i>						<i>ТНГУ ім.І.Пулюя, гр.МВс-41</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

Привід: серводвигун 380 В, драйвер Siemens SINAMICS S120 380 В, ЧПК 220 В. Особливість: конденсатори DC-шини зберігають 560–700 В протягом 5 хв після відключення. Обслуговування – тільки після розряду і перевірки вольтметром.

Кожух шліфувального круга: сталь 6 мм,  $\geq 270^\circ$  охоплення, ширина більше круга на 25 мм з кожного боку (ДСТУ 12.3.028). Перевірка круга перед встановленням: огляд + перевірка звуком + динамічне балансування G6,3 (ДСТУ ISO 1940). Прозорий щит: полікарбонат 8 мм (ударна в'язкість 600 Дж/м<sup>2</sup>). Кожухи всіх муфт – суцільні, знімаються тільки при зупиненому верстаті.

Заземлення всіх металевих частин: провідник ПЗМ  $\geq 10$  мм<sup>2</sup> (жовто-зелений), опір  $\leq 4$  Ом (ПУЕ-2017, перевірка щоквартально). Електрошафа: ступінь захисту IP54 (ДСТУ ІЕС 60529). Серводвигун: IP65. Після вимкнення – витримка  $\geq 5$  хв. Автоматичний вимикач 16 А (тепловий + електромагнітний розчеплювач).

При ТО верстат зупинений, головний вимикач відключений із замком. Перевірка рівня мастила – щомісячно. Заміна мастила при  $T < 40^\circ\text{C}$ . Відпрацьоване мастило – в спеціальну тару для утилізації (не в каналізацію).

## 4.2 Виробнича санітарія

Місцева витяжна вентиляція: відсмоктувач у зоні різання (відстань  $\leq 150$  мм), продуктивність  $\geq 1500$  м<sup>3</sup>/год, швидкість всмоктування  $\geq 1,0$  м/с. Система: гнучкий рукав → циклон (ефективність  $\geq 85\%$ ) → рукавний фільтр клас М/Н (ефективність  $\geq 99,9\%$ ) → вентилятор. Загальнообмінна: кратність 4–6 об/год, подача зверху – витяжка знизу.

Таблиця 4.1– Засоби індивідуального захисту оператора

ЗІЗ	Стандарт	Характеристики	Заміна
Захисні окуляри	ДСТУ EN 166:2017	Загартоване скло, ударост. 45 м/с	За потреб.
Навушники	ДСТУ EN 352-1:2018	SNR $\geq 26$ дБ, зниж. $\geq 20$ дБ(А)	Щорічно
Респіратор FFP2	ДСТУ EN 149:2003	Ефективність $\geq 92\%$	Щоденно
Комбінезон	ДСТУ EN 340:2004	Брезент або Тефлон, клас 1	1/6 міс.
Черевики	ДСТУ EN ISO 20345	Сталевий підносок 200 Дж	Щорічно
Рукавички	ДСТУ EN 388:2017	Мех. стійкість рівень 3	Щотижня

### 4.3 Пожежна безпека

Категорія цеху: В (горючі рідини  $T_{\text{спалах}} > 61^{\circ}\text{C}$  – мастило І-Г-А-46 з  $T_{\text{спалах}} = 186^{\circ}\text{C}$ ) за НАПБ Б.03.002-2007. На ділянці зберігати мастило  $\leq 5$  л у металевій тарі. Вогнегасники ВП-9 або ВВК-5 (2 шт.) – не гасити водою! Ящик піску  $0,5 \text{ м}^3$ . Авт. пожежна сигналізація: теплові та димові датчики ДСТУ EN 54-5. Евакуаційні шляхи: ширина  $\geq 1,0$  м, люмінесцентні знаки ДСТУ EN ISO 7010.

Таблиця 6.2 – Порівняння умов праці до і після модернізації

Фактор	До (гідравліка)	Після (ел.-мех.)	Ефект
Шум від приводу подач	68–72 дБ(А)	60–65 дБ(А)	–7 дБ(А)
Витік гідравлічного мастила	До 0,1 л/год	Відсутній	Ліквідовано
Нагрів від приводу	$\Delta T = 15\text{--}25^{\circ}\text{C}$	$\Delta T < 2^{\circ}\text{C}$	$-13\text{...}23^{\circ}\text{C}$
Туман мастила в повітрі	$0,5\text{--}2 \text{ мг/м}^3$	0	Ліквідовано
Трудомісткість ТО	5–8 год/квартал	1–2 год/рік	–75% часу
Ризик займання мастила	Є (гідравліка 3 л)	Менший (2,5 л)	Знижено

Основні шкідливі фактори: шум  $82\text{--}95 \text{ дБ(А)} > 80 \text{ дБ(А)}$  норми; пил до  $20 \text{ мг/м}^3 > \text{ГДК}$ ; електробезпека 380 В; ризик руйнування круга. Розроблено заходи: захисні кожухи і щити; заземлення; вентиляція  $1500 \text{ м}^3/\text{год}$ ; ЗІЗ (ДСТУ EN 352, EN 166, EN 149). Модернізація:  $-7 \text{ дБ(А)}$  шуму від приводу, ліквідація витіку мастила, зниження нагріву з  $\Delta T=25^{\circ}\text{C}$  до  $\Delta T<2^{\circ}\text{C}$ .

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання конструювання одноступінчастого планетарного редуктора схеми 2К-Н для приводу поперечної подачі прецизійного верстата 3М151 з  $T_{вих} = 250$  Нм. Отримано такі результати.

- Встановлено, що гідравлічний привід верстата 3М151 забезпечує точність  $\pm 10\text{--}20$  мкм і не відповідає вимогам класу В через: нагрів мастила  $\Delta T = 15\text{--}25^\circ\text{C}$  (деформації 5–15 мкм); стрибкоподібний ефект «stick-slip» при  $v < 0,1$  мм/хв ( $Ra \geq 0,16$  мкм); діапазон регулювання лише 1:100. Провідні виробники (Studer, Junker, Kellenberger) перейшли на електромеханічні приводи, що забезпечують точність  $\pm 0,1\text{--}1$  мкм при діапазоні 1:10000. Обґрунтовано доцільність модернізації: заміна гідравліки на серводвигун + планетарний редуктор + ШВП.
- Порівняльний аналіз типів редукторів підтвердив оптимальність планетарного редуктора 2К-Н: ККД 0,95–0,98 (черв'ячний 0,70–0,85); люфт 3–5' (циліндричний 10–30'); співвісність (циліндричний – без); питома потужність у 1,5–2,5 рази вища. Обрано  $k = 3$  сателіти: оптимальний баланс між рівномірністю навантаження та умовою сусідства.
- Кінематичний розрахунок:  $i = 10$ ;  $z_1 = 18, z_2 = 72, z_3 = 162, k = 3$ . Перевірені три умови: збирання  $(18+162)/3=60$  – ціле; співвісності  $(18+2 \times 72=162)$ ; сусідства  $(111,0 < 116,9$  мм, запас 5,1%). Дискретність  $\delta=0,05$  мкм  $\ll 1,0$  мкм (запас 20×). ККД  $\eta=0,987 > 0,92$ . Серводвигун Siemens 1FK7100 (5,0 кВт,  $T_{max} = 96$  Нм  $> 63,3$  Нм).
- Силовий і геометричний розрахунок:  $m_{min} = 0,622$  мм  $\rightarrow m = 1,5$  мм (ДСТУ ISO 54:2001, перевищення у 2,41 рази для підвищення плавності і ресурсу). Геометрія:  $d_1=27, d_2=108, d_3=243$  мм;  $b=20$  мм;  $\varepsilon_\alpha=1,67$  (плавність гарантована).

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розроб.	Слободян М.І.				Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Гагалюк А.В.				48	8	
Н. контр.	Кобельник В.Р.				ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВс-41		
Затверд.	Крупа В.В.				<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>		

Сили:  $F_{t12}=625,4$  Н,  $F_{t23}=1234,6$  Н. Матеріали: Ст.20ХН2М НРС 58–62 (сонячне і сателіти), Ст.40ХН НВ 280–320 (коронне). Контактна міцність:  $\sigma_H = 204,0$  МПа  $\ll [\sigma_H] = 900$  МПа,  $S_H = 4,41$ . Згинальна міцність:  $\sigma_F = 112,7$  МПа  $\ll [\sigma_F] = 400$  МПа,  $S_F = 3,55$ .

5. Розрахунок валів і підшипників: діаметри вхідного валу 20–25 мм, вихідного 40–45 мм, осей сателітів 15 мм. Запаси міцності  $S = 7,98-13,6 \gg [S] = 2,5$ . Підшипники 36205 (ресурс  $2,31 \times 10^9$  год), 36209 ( $4,0 \times 10^{10}$  год), НК 15/16 (85 400 год > 20 000 год). Шпонки  $6 \times 6 \times 20$  ( $\sigma_{зм}=72,4$  МПа) і  $12 \times 8 \times 60$  ( $\sigma_{зм}=86,8$  МПа)  $< [\sigma_{зм}]=100$  МПа.
6. Розроблено повну конструкцію редуктора:  $\varnothing 270 \times 165$  мм, маса  $\sim 12$  кг, 22 позиції специфікації. Корпус СЧ25. Система мащення картерна (І-Г-А-46, 2,5 л). Ущільнення – манжети ФКМ. Кутовий люфт  $\leq 5$  кутових хвилин. Описано послідовність складання (10 етапів) і технічні вимоги.
7. Аналіз охорони праці: шум 82–95 дБ(А) > норми 80 дБ(А); пил до  $20$  мг/м<sup>3</sup> > ГДК. Модернізація покращує умови:  $-7$  дБ(А) шуму від приводу; ліквідується витік мастила (до 0,1 л/год); нагрів від приводу знижується з  $\Delta T=25^\circ\text{C}$  до  $\Delta T < 2^\circ\text{C}$ ; трудомісткість ТО зменшується на 75%. Розроблено комплекс заходів за ДСТУ EN 352-1:2018, EN 166:2017, ДСН 3.3.6.037-99, НАПБ Б.03.002-2007.
8. Спроектований редуктор повністю відповідає технічному завданню ( $T_{в их} = 250$  Нм,  $i = 10$ ,  $\eta = 0,987$ , люфт  $\leq 5'$ , ресурс 85400 год) і забезпечить підвищення класу точності верстата 3М151 з П до В після модернізації приводу подач.

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кваліфікаційна робота бакалавра: структура, вимоги до виконання та захист. Методичні рекомендації для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Галузеве машинобудування» зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування галузі знань 13 Механічна інженерія для здобувачів всіх форм здобуття освіти / уклад.: Р. А. Склярів, В. Р. Кобельник, В. В. Крупа, Р. Я. Лещук, А. А. Сенік, В. В. Шанайда, А. В. Гагалюк, В. М. Буховець. – Тернопіль : ТНТУ, 2025. 78 с.
2. ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови. Чинний від 2016-04-01. 24 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=64320](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=64320)
3. ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови. Чинний від 2016-04-01. 49 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=64466](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=64466)
4. ДСТУ EN 10085:2014 Азотовані сталі. Технічні умови постачання (EN 10085:2001, IDT). Чинний від 2016-01-01. 28 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=93282](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=93282)
5. ДСТУ EN ISO 683-1:2022 Сталі, що піддають термічному обробленню, леговані сталі та сталі вільного різання. Частина 1. Нелеговані сталі для загартування та відпуски (EN ISO 683-1:2018, IDT; ISO 683-1:2016, IDT). Чинний від 2023-12-31. 46 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=106016](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=106016)
6. Гевко Б. М., Матвійчук А. В., Артюхов А. М., Пік А. І., Гагалюк А. В., Лотоцький Р. І. Технологія обробки на верстатах з ЧПК. - Тернопіль: Крок, 2014. – 131 с.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>				
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>					
<i>Розробив</i>		<i>Слободян М.І.</i>							
		<i>Гагалюк А.В.</i>							
<i>Рецензент</i>					<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b>				
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>							
<i>Зав.каф.</i>		<i>Крупа В.В.</i>			<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр. МВс-41</i>				

7. Analysis of the stress-strain state of the vehicle frame by finite element method // Mykola Stashkiv, Ivan Pidgurskyi, Oleh Pidluzhnyi, Mykola Pidgurskyi, Mykhaylo Levkovych, Ruslan Skliarov, Andriy Mushak // Scientific Journal of TNTU. – Tern.: TNTU, 2022. – Vol 108. – No 4. – P. 89–102.
8. Hahalyuk A., Krupa V. Modeling of a lathe bed using the method of topological optimization. Scientific journal of the Ternopil national technical university. 2023. Vol. 111, no. 3. P. 67–75. URL: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2023.03.067](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.067)
9. Improved Method for Determining the Feed Influence on the Tangential Cutting Force During Re-drilling, Countersinking and Boring Based on the Small Sample Theory / V. Krupa et al. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2024. URL: <https://doi.org/10.3311/ppme.29952> (date of access: 22.05.2025).
10. Mathematical models for the analysis of the parameters of channels in the planning of mechanical processing and welding operations. Theoretical and applied problems, november 22–24, 2023, : Proceedings ITTAP'2023: 3rd International Workshop on Information Technologies, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, 22–24 November 2023. 2023. P. 165–182.
11. Гагалюк А.В., Паливода Ю.Є. Процеси виготовлення машин. Частина 1: технологічні основи машинобудування : навчальний посібник Тернопіль: Осадца Ю. В., 2025. – 308 с.
12. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.
13. TaeguTec. Сплав ТТ9080. URL: <https://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Grade.aspx?grade=ТТ9080&item=4207959&fnum=1506&map=DR&app=77>
14. Sandvik Coromant. Технологія обробки металів різанням. URL: [https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2022/02/C-2920-40\\_compressed.pdf](https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2022/02/C-2920-40_compressed.pdf)
15. Sandvik Coromant. Фрезерування. Посібник. [https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2021/12/MTG\\_D-ФРЕЗЕРОВАНИЕ.pdf](https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2021/12/MTG_D-ФРЕЗЕРОВАНИЕ.pdf)

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						<i>51</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

16. New technology for the manufacturing and use of rolling kingpin bushings in the undercarriage of certain vehicles. Senyk A., Kobelnyk V., Gagaliuk A., Plavutska I., Matviyishyn A., Larochkin A., Dubyniak T. *Procedia Structural Integrity*. 7th International Conference on In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction, DMDP 2023 Ternopil 18 October 2023 до 20 October 2023. 2024. Vol. 59, P. 508-515. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85195796663&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&nlo=&nlr=&nls=&sid=a84d4364e9e8a8c805127dd9219dd36e&sot=aff&sdt=a&sl=67&s=AF-ID%28%22Ternopil+Ivan+Puluj+National+Technical+University%22+60013556%29&relpos=21&citeCnt=0&searchTerm=>
17. Probability-statistical estimation method of feed influence on the tangential cutting force under turning / V. Krupa et al. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. 2022. Vol. 114, no. 1. P. 22–31. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1480>
18. Technological Heredity and Accuracy of the Cross-Section Shapes of the Hydro-Cylinder Cylindrical Surfaces / P. D. Kryvyi et al. *ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference, Detroit, Michigan, USA, 9–13 June 2014*. 2014. URL: <https://doi.org/10.1115/msec2014-3946> (date of access: 22.05.2025).
19. V. Krupa, N. Tymoshenko, V. Kobelnyk, I. Petrechko, Probability-statistical estimation method of feed influence on the tangential cutting force under turning, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 114/1 (2022) 22-31.
20. Volodymyr Shanaida, Ruslan Skliarov, Valeriy Lazaryuk. Mathematical models for the analysis of the parameters of channels in the planning of mechanical processing and welding operations/ *Proceedings ITTAP'2023: 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, November 22–24,*

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						52
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2023, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. 2023, 3628, pp. 43-54. (Scopus)  
<https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper12.pdf>

21. Бабій А.В., Довбуш Т.А., Бабій М.В., Ткаченко О.І., Сташків М.Я. Динаміка машин. Навчальний посібник для студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування» та 208 «Агроінженерія» для здобуття освітнього ступеня «Магістр». Тернопіль : ТНТУ 2023. 246 с.
22. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці: Навчально-методичний комплекс для підготовки спеціалістів ступеня «бакалавр» III-IV рівнів акредитації для всіх напрямків підготовки / М.М.Сақун, І.В.Москалюк, В.Ф.Нагорнюк; за редакцією Сақуна М.М. – Одеса: Видавництво, 2017. – 400 с.
23. Використання методу ітерацій для дослідження точності подач металорізальних верстатів / Кобельник В.Р, Крупа В.В., Тимошенко Н.М. Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези допов. – Краматорськ: ДДМА, 2018. С. 78-80.
24. Вплив випадковості подачі на висоту мікронерівностей поверхні при її точінні або розточуванні / П. Кривий, Н. Тимошенко, М. Шарик, В. Крупа Львів : Машинознавство. 2013. №9-10 (195-196). С. 76-83.
25. В'юк Д. В., Крупа В. В. Ймовірно статистична модель оцінювання ефективності застосування твердосплавних пластинок в умовах дрібносерійного виробництва. Актуальні задачі сучасних технологій : Матеріали XII Міжнар. науково-практ. конф. молодих уч. та студентів, м. Тернопіль, 6–7 груд. 2023 р. Тернопіль, 2023. С. 87–88.
26. Гагалюк А. В., Склярів Р. А. Генетичні алгоритми в генеративному дизайні. Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175- річчя з дня народження Івана Пулюя, (Тернопіль, 14–15 травня 2020 року), – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2020. – 288 с. - С. 56-57

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		53

27. Довбуш Т.А. Опір матеріалів: навч. посіб. до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи / Довбуш Т.А., Хомик Н.І., Бабій А.В., Цьонь Г.Б., Довбуш А.Д. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.
28. Дослідження розсіювання величин подач токарних верстатів в імовірнісному аспекті / В. В. Крупа та ін. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. № 4(83). С. 16–28. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.2>
29. Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Сторожук В.М. Практикум із охорони праці: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 352 с.
30. Кобельник В.Р. Ефективність керованого процесу свердління наскрізних отворів шляхом забезпечення зміни подачі / В.Р. Кобельник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2012. – Вип. № 31. – С. 47–56.
31. Кобельник В.Р. Жорсткість вертикально-свердлильних верстатів / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – Вип. № 1 (40). С. 34–40.
32. Кобельник В.Р. Методика дослідження кінематичної точності механізму подач вертикально-свердлильних верстатів на прикладі верстата моделі 2Н118 / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – Вип. 8. – С. 99–108.
33. Кобельник В.Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: дис. канд. техн. наук: 05.03.01: / Кобельник Володимир Романович; Терноп. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. - Т., 2013. - 21 с.
34. Ковбашин В. І., Пік А. І. Інженерна графіка : навч. посіб. м. Тернопіль : Підруч. і посіб., 2023. 240 с.
35. Кривий П. Д. , Крупа В. В. Конструкторсько-технологічні параметри багаторіцевих розточних головок з радіусними вершинами різців. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2011. Вип. 33 С. 92-99.

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 36.Кривий П. Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищеної якості згортних втулок : монографія / Кривий П. Д., Сенік А. А. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 232 с. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/27951>
- 37.Кривий П. Д., Крупа В. В. Геометричні та математичні моделі формування шорсткості циліндричних поверхонь при точінні та розточуванні. Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки". 2011. Т. 1, № 2(53). С. 44–55. URL: <http://vtn.ztu.edu.ua/article/view/70846>.
- 38.Кривий П. Д., Крупа В. В. Інструментальне забезпечення процесу комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. 2012. № 2. С. 23–34.
- 39.Кривий П., Крупа В., Продан В. Конструкторсько-технологічні передумови підвищення якості оброблення глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ТДТУ. 2010. Т. 15, № 1. С. 147–156. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/486>.
- 40.Кривий П.Д. Вплив головного заднього кута спірального свердла на осьове зусилля і крутний момент при свердлінні // П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник / Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ – Київ, 2006. – Вип. № 19. – С. 58–64.
- 41.Кривий П.Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення зменшення задирок при наскрізному свердлінні / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник // Всеукраїнська молодіжна конференція «Машинобудування України очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво, 22 – 25 жовтня 2012 р. : тези допов. – К. : КПІ, 2012. – Том 1. – С. 71–73.
- 42.Кривий П.Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення процесу свердління наскрізних отворів / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2011. – Вип. № 28. – С. 77–85.
- 43.Крупа В. В. Визначення конструкторсько-технологічних параметрів багаторіцевих розточних головок з поділом припуску та подачі. Вісник

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		55

ТДТУ. 2011. Т. 16, № 1. С. 105–117. URL:  
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/959>.

44. Крупа В. В. Металорізальні інструменти з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів: дис. канд. техн. наук : 05.03.01. Тернопіль, 2015. 168 с. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/5656>
45. Крупа В., Кобельник В., Гагалюк А. Обґрунтування параметрів спеціального трикулачкового патрона для затиску тонкостінних циліндричних заготовок. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. 2023. № 4. С. 128–137. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.4.16>
46. Кузнецов Ю. М., Скляр Р. А. Прогнозування розвитку технічних систем: навч. посібник / Ю. М. Кузнецов, Р. А. Скляр; під ред. Ю. М. Кузнецова. – Київ : ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗІС», 2004. – 323 с.
47. Кузнецов Ю. М., Скляр Р. А. Формалізований опис шпindelного вузла як основної компоненти багатошпindelного токарного автомата. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. - Краматорськ : ДДМА, 2009. - Вип. 25. – С. 139-146
48. Кухарський О.М., Кузьмін М.І. Визначення припусків табличним методом. Тернопіль: Видавництво ТДТУ, 2004. 135 с.
49. Метод оцінювання статичної точності кінематичних ланцюгів подач консольних фрезерних верстатів / П. Д. Кривий та ін. Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць : Матеріали Міжнар. науково-техн. конф., м. Львів. Львів, 2020. С. 103–105.
50. Методичний посібник до курсового проекту по курсу “Технологія машинобудування” / О.М.Кухарський, І.В. Куцак. Тернопіль, 2001. 65 с.
51. Оправка фланцева кулачкова : пат. 56794 Україна : F16C 15/00. № u201008774 ; заявл. 14.07.2010 ; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2. 1 с.
52. Орищук Р. М., Чернявський І. В., Шанайда В. В. Дослідження точності позиціонування деталей різної геометричної форми у верстатних механізмах кріплення і силової фіксації. Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї–наука–виробництво : матеріали ХІХ Міжнар. науково-практ. конф., м. Суми, 25–26 листоп. 2020 р. Суми, 2020. С. 63–66.

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						56
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

53. Підвищення продуктивності процесу і якості плоскої поверхні сформованої комбінаційним торцевим фрезеруванням / П. Д. Кривий та ін. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. 2020. № 3 (47). С. 199-206.
54. Розточувальні інструменти з попарно-асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких циліндричних отворів П. Д. Кривий, В. Р. Кобельник, В. В. Крупа, В. Г. Яковлев. Технічні науки та технології. 2016. № 2 (4). С. 28-35.
55. Скляр Р. А. Вибір бази порівняння при прогнозуванні стратегії підвищення якості технологічного обладнання. Матеріали наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя механіко-технологічного факультету «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті. (м. Тернопіль, 16 травня 2011 р.), 2011.- С. 111-112
56. Скляр Р. А., Гагалюк А. В. Використання методу нейронних мереж для прогнозування металорізальних верстатів. Матеріали XXI наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 16-17 травня 2019 року. – Т. : ТНТУ, 2019. – 212 с. (Машинознавство та машинобудування). - С. 34
57. Скляр Р. А., Гуцалюк І. В. Вимоги до технологічного оснащення яке використовується для затиску призматичних заготовок. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 27–28 листоп. 2019.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – Т. 2. – 143 с. - С. 26
58. Скляр Р. А., Приходай Д. А. Шляхи підвищення точності обробки на металорізальних верстатах. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, 2021.- С. 55-56
59. Скляр Р. А., Четвержук Т. І., Полінкевич Р. М., Редько Р. Г., Залета О. М. Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів. Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		57

галуззями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки», Випуск 71, Луцьк, 2021, № 71. – 363 с. – С. 322-329.

60.Скляр Р. А., Шанайда В. В., Савчук М. А. Дослідження перехідних процесів електропривода металорізального верстата з використанням інформаційних технологій / Р. Скляр, В. Шанайда, М. Савчук // Вісник ТНТУ. – 2011. – Том 16. – № 1. – С.117-125.

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

62.Шанайда В. В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках. Тернопіль : Вид-во ТДТУ, 2001. 163 с.

63.ДСП 173-96 Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Зі змінами. Чинний з 07.03.2019. 61 с.

64.ДСТУ EN 482:2022 Повітря робочої зони. Загальні вимоги до характеристик методик вимірювання вмісту хімічних речовин (EN 482:2021, IDT). Чинний з 31.12.2023. 23 с. URL:

[https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=112734](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=112734)

					<i>КРБ 23-365.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						58
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# ДОДАТКИ