

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Модернізація вертикально-свердлильного верстату з метою покращення технології свердління отворів у тонкостінних деталях

Виконав: студенти 6 курсу, групи МВм-61
напряму підготовки (спеціальності)
133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

		Фецович М.Р.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Сеник А.А..
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Кобельник В.Р.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завід. кафедри		Крупа В.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

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

Факультет Інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра Конструювання верстатів, інструментів та машин

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Крупа В.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва спеціальності)

студенту Фецовичу Миколі Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модернізація вертикально-свердлильного верстату з метою покращення технології свердління отворів у тонкостінних деталях

Керівник роботи Сенік Андрій Антонович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «15» 08 2025 року № 4/7-756

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Технічна характеристика базового верстата, умови його експлуатації та вимоги до обробки деталей. Також параметри приводу головного руху, діапазон частот обертання шпинделя та враховуються вимоги до точності й продуктивності обробки.

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

Вступ. АНАЛІТИЧНО-ОГЛЯДОВИЙ. Аналіз завдання на проект. Огляд спеціальної літератури. Аналіз технологічності конструкції деталі. Вибір комплексу рухів по забезпеченню виробничого циклу на верстаті. Вибір та обґрунтування структурно - кінематичної схеми верстата. РОЗРОБКА КОМПОНУВАЛЬНОЇ СХЕМИ ВЕРСТАТА. Обґрунтування модулів верстата (МК, ТМ, КМ). Побудова загальної матриці компоновки верстата. Аналіз множин і визначення типів базових компоновок. Запис узагальнених структурних множин компоновок. КОНСТРУКТОРСЬКО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ. Розробка структурної формули приводу головного руху з урахуванням обробки тонкостінних деталей. Побудова структурної сітки та графіка частот обертання шпинделя з орієнтацією на тонкостінні деталі. Кінематичний розрахунок. Визначення потужності електродвигуна з урахуванням режимів свердління тонкостінних деталей. Опис принципу роботи модернізованих вузлів і механізмів, орієнтованих на обробку тонкостінних деталей.

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

Тема, мета роботи, завдання. (Слайди). Загальний вигляд. Кінематична схема. Свердлильна головка. Компоновки. Кондуктор.. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доц. каф. ВІ Сеник А.А.		
Безпека в надзв. ситуаціях	асист. каф. ОХ Теслюк В.М.		

7. Дата видачі завдання 15.08.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання на кваліфікаційну роботу	25.08.2025	
2	АНАЛІТИЧНО-ОГЛЯДОВИЙ.	21.11.2025	
3	РОЗРОБКА КОМПОНУВАЛЬНОЇ СХЕМИ ВЕРСТАТА	10.12.2025	
4	КОНСТРУКТОРСЬКО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	15.12.2025	
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕХПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	16.12.2025	
6	ОСНОВНІ ВИСНОВКИ	19.12.2025	
7	Графічна частина (Слайди)	19.12.2025	
8	Підготовка до захисту	до 23.12.2025	

Студент

Фецович М.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Сеник А.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Фецович Микола Романович. Кваліфікаційна робота на тему: «Модернізація вертикально-свердлильного верстату з метою покращення технології свердління отворів у тонкостінних деталях».

Роботу виконано на кафедрі конструювання верстатів, інструментів та машин (ВІ) Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Керівник роботи – к. т. н., доц. Сенік Андрій Антонович; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

У даній роботі розглянуто питання модернізації вертикально-свердлильного верстата з метою вдосконалення технології свердління отворів у тонкостінних деталях. Актуальність роботи зумовлена підвищеними вимогами до точності, якості та продуктивності обробки тонкостінних елементів, які характеризуються низькою жорсткістю та схильністю до деформацій під дією сил різання.

У роботі виконано аналіз технологічності конструкції деталі типу «маточина», досліджено особливості процесу свердління тонкостінних деталей та обґрунтовано доцільність модернізації базового вертикально-свердлильного верстата. Розроблено компоновальну та структурно-кінематичну схеми верстата, виконано побудову структурної сітки і графіка частот обертання шпинделя з урахуванням вимог до стабільності режимів різання.

Проведено кінематичні та силові розрахунки привода головного руху, визначено раціональні параметри передаточних відношень і потужності електродвигуна. Результати виконаної роботи підтверджують технічну доцільність і ефективність запропонованих конструкторських рішень.

Ключові слова: *вертикально-свердлильний верстат, модернізація, тонкостінні деталі, технологія свердління, шпиндельний привід, кінематичні та силові розрахунки, верстатобудування.*

ABSTRACT

Fetsovych Mykola Romanovych. Qualification thesis on the topic: “Modernization of a vertical drilling machine to improve the technology of drilling holes in thin-walled parts.”

The thesis was completed at the Department of Machine Tool, Tool and Machine Design (VI), Ivan Puluj Ternopil National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine.

Thesis supervisor – PhD in Engineering, Associate Professor Andrii Senyk, Ivan Puluj Ternopil National Technical University.

The qualification thesis addresses the modernization of a vertical drilling machine in order to improve the technology of drilling holes in thin-walled parts. The relevance of the research is determined by the increased requirements for accuracy, quality, and productivity of machining thin-walled components, which are characterized by reduced stiffness and an increased tendency to deform under the action of cutting forces.

The thesis presents an analysis of the manufacturability of a hub-type part design, investigates the specific features of drilling thin-walled parts, and substantiates the feasibility of modernizing the base vertical drilling machine model 2N135. The machine layout and structural-kinematic schemes have been developed, and a structural grid and a spindle speed chart have been constructed taking into account the requirements for stable cutting conditions.

Kinematic and force calculations of the main drive have been carried out, rational transmission ratios have been determined, and the selection of the electric motor power has been substantiated.

Keywords: *vertical drilling machine, modernization, thin-walled parts, drilling technology, spindle drive, kinematic and force calculations, machine tool design.*

ЗМІСТ

ВСТУП	
1 АНАЛІТИЧНО-ОГЛЯДОВИЙ	
1.1 Аналіз завдання на проект	
1.2 Огляд спеціальної літератури	
1.3 Аналіз технологічності конструкції деталі	
1.3.1 Службове призначення деталі	
1.3.2 Якісна оцінка технологічності	
1.3.3 Кількісна оцінка технологічності	
1.4 Вибір комплексу рухів по забезпеченню виробничого циклу на верстаті ..	
1.5 Вибір та обґрунтування структурно - кінематичної схеми верстата	
2 РОЗРОБКА КОМПОНУВАЛЬНОЇ СХЕМИ ВЕРСТАТА	
2.1 Обґрунтування модулів верстата (МК, ТМ, КМ)	
2.2 Побудова загальної матриці компоновки верстата	
2.3 Аналіз множин і визначення типів базових компоновок	
2.4 Запис узагальнених структурних множин компоновок	
2.4.1. Визначення структурних формул компоновок, які відповідають всім структурним ознакам з використанням математичного методу перетину множин	
2.5 Зображення конструктивних варіантів компоновок верстата за заданими структурними умовами відбору компоновок	
3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	
3.1 Розробка структурної формули приводу головного руху з урахуванням обробки тонкостінних деталей.....	
3.2 Побудова структурної сітки та графіка частот обертання шпинделя з орієнтацією на тонкостінні деталі.	
3.3 Кінематичний розрахунок	

3.4	Визначення потужності електродвигуна з урахуванням режимів свердління тонкостінних деталей.....
3.5	Опис принципу роботи модернізованих вузлів і механізмів, орієнтованих на обробку тонкостінних деталей.....
3.5.1	Опис конструкції та принципу роботи двошпиндельної свердлильної головки, встановленої на верстаті 2Н135
3.5.2	Силовий розрахунок свердлильної головки
3.5.3	Принцип роботи верстату після вдосконалення
4.1.	ОХОРОНА ПРАЦІ
4.1.1.	Типова інструкція для обслуговуючого персоналу на випадок виникнення аварії, пожежі
4.2.	БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ
4.2.1.	Оцінка стійкості роботи промислового підприємства до впливу вражаючих факторів
4.2.2.	Оцінка стійкості роботи об'єкта до впливу ударної хвилі
4.2.3.	Оцінка стійкості об'єкта до впливу вторинних вражаючих факторів .
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ
	Перелік посилань
	Додатки

ВСТУП

Машинобудування є однією з провідних галузей промисловості, що визначає рівень технічного розвитку економіки та забезпечує виготовлення сучасних машин, механізмів і технологічного обладнання. Важливу роль у машинобудівному виробництві відіграють металорізальні верстати, які забезпечують виконання широкого спектра операцій механічної обробки деталей із заданими показниками точності та якості поверхонь.

Серед операцій механічної обробки значну частку займають операції свердління, особливо у виробництві корпусних та тонкостінних деталей. Частка свердлильних операцій у загальній трудомісткості обробки деталей у серійному та масовому виробництві може досягати 10–20 %. При цьому обробка тонкостінних деталей характеризується низкою технологічних труднощів, зумовлених малою жорсткістю заготовок, підвищеною чутливістю до осьових сил різання, вібрацій та деформацій, що негативно впливає на точність і якість обробки отворів.

Вертикально-свердлильні верстати типу 2Н135 широко застосовуються у машинобудівному виробництві завдяки своїй універсальності, простоті конструкції та надійності в експлуатації. Однак їх базові конструктивні рішення не завжди забезпечують необхідні умови для високопродуктивного та стабільного свердління тонкостінних деталей. Це зумовлює доцільність їх модернізації шляхом удосконалення кінематичної структури привода головного руху, застосування багатошпиндельного інструментального оснащення та спеціальних свердлильних пристосувань.

Метою даної роботи є модернізація вертикально-свердлильного верстата з метою вдосконалення технології свердління отворів у тонкостінних деталях типу. Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено вирішення комплексу конструкторських і розрахункових завдань, спрямованих на підвищення продуктивності обробки, зменшення деформацій заготовки та забезпечення необхідної точності взаємного розташування отворів.

У процесі виконання роботи проведено аналіз технологічності конструкції оброблюваної деталі, обґрунтовано вибір структурно-кінематичної схеми верстата, розроблено компоувальну схему та структурну формулу привода головного руху. Виконано побудову структурної сітки і графіка частот обертання шпинделя, проведено кінематичні та силові розрахунки, а також розроблено і проаналізовано конструкцію двошпиндельної свердлильної головки та кондукторного пристосування, орієнтованих на обробку тонкостінних деталей.

Результати виконаної роботи можуть бути використані при модернізації універсальних вертикально-свердлильних верстатів у серійному виробництві та при проєктуванні спеціального технологічного оснащення для підвищення ефективності операцій свердління.

Основні результати кваліфікаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-практичних конференціях відповідного рівня (Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIV міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11-12 грудня 2025) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2025 – 593.).

1 АНАЛІТИЧНО-ОГЛЯДОВИЙ

1.1 Аналіз завдання на проект

Машинобудівна галузь є фундаментом науково-технічного розвитку різних сфер народного господарства. Постійне вдосконалення та еволюція машинобудування нерозривно пов'язані з розвитком верстатобудування, оскільки металорізальні верстати разом з іншими видами технологічного обладнання забезпечують виготовлення нових зразків машин і механізмів.

На сучасному етапі та в перспективі особливо актуальним є проєктування нових типів верстатів і автоматизованих виробничих систем. У зв'язку з цим майбутні фахівці у сфері верстатобудування повинні володіти базовими знаннями з конструювання верстатів та їх основних вузлів. Для ефективного використання засобів обчислювальної техніки в процесі проєктування необхідно глибоко розуміти сутність проєктних процедур для різних типів верстатного обладнання, а також володіти методами математичного моделювання й оптимізації.

У конструкціях сучасних верстатів застосовується значна кількість вимірювальних систем, у тому числі високоточних, зокрема лазерних інтерферометрів та інших прецизійних засобів контролю.

Сучасні металорізальні верстати забезпечують надзвичайно високу точність оброблення деталей, що дозволяє отримувати поверхні з жорстко регламентованими геометричними параметрами.

Метою даної роботи є модернізація вертикально-свердлильного верстата з метою вдосконалення технології свердління отворів у тонкостінній деталі типу «маточина КС6Б 75-506».

У процесі виконання проєкту виконано компоувальну схему верстата, розроблено його компоновку, кінематичну та структурно-кінематичну схеми, проведено кінематичний розрахунок, а також виконано конструювання й розрахунок окремих вузлів верстата.

1.2 Огляд спеціальної літератури

За оглянуту літературу взято авторські розробки та патенти працівників університету:

- Авторське свідоцтво (СРСР) № 1212708 « Пристрій для свердління наскрізних отворів» Автори: Нагорняк Степан Григорович, Кривий Петро Дмитрович, Кузьмін Микола Іванович;
- Авторське свідоцтво (СРСР) № 933292 «Механізм подачі шпинделя свердлильного верстата» Автори: Нагорняк Степан Григорович, Кривий Петро Дмитрович, Кузьмін Микола Іванович;
- Авторське свідоцтво (СРСР) № 1426707 «Механізм подачі шпинделя свердлильного верстата». Автори: Нагорняк Степан Григорович, Кривий Петро Дмитрович, Кузьмін Микола Іванович;
- Авторське свідоцтво (СРСР) № 1491624 «Пристрій для свердління наскрізних отворів». Автори: Нагорняк Степан Григорович, Кривий Петро Дмитрович, Кузьмін Микола Іванович;
- Патент на корисну модель (Україна) №33445 «Механізм подачі шпинделя свердлильного верстата» Автори: Кривий Петро Дмитрович, Кузьмін Микола Іванович, Кобельник Володимир Романович;

На підставі аналізу спеціалізованих літературних джерел було прийнято рішення використати як базове для модернізації верстата технічне рішення, захищене патентом № 33445.

У загальній трудомісткості механічної обробки операції свердління займають близько 6...7 % в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва, 10...12 % — у середньосерійному, а в масовому виробництві їх частка може досягати 20 %.

На сучасному етапі розвитку виробництва спостерігається тенденція перенесення значної кількості операцій, які раніше виконувалися на розточувальних верстатах, на більш прості та економічно доцільні вертикально-свердлильні верстати. Зокрема, на автотракторних підприємствах

кількість свердлильних верстатів у 6...10 разів перевищує кількість розточувальних.

Під час свердління наскрізних отворів у вузлах головного руху та механізмах подач виникають пружні деформації, що супроводжуються накопиченням потенціальної енергії. У момент виходу інструмента з матеріалу заготовки ця енергія реалізується у вигляді різкого зростання подачі (у 1,4...1,85 раза), що, у свою чергу, призводить до збільшення крутного моменту та є однією з основних причин руйнування свердел. З метою запобігання такому явищу при автоматичному свердлінні наскрізних отворів рекомендовано зменшувати подачу на 10...25 %, а в окремих випадках — у 1,35...1,6 і навіть у 2 рази порівняно з подачею, що застосовується під час обробки глухих отворів. Однак зниження подачі на всій глибині свердління призводить до істотного збільшення основного часу обробки t_{0t_0t0} і трудомісткості операції, подовження шляху різання, зменшення періоду стійкості інструмента та, як наслідок, до зниження загальної ефективності процесу. Для зменшення впливу зазначених негативних чинників застосовують спеціальні пристрої, які забезпечують зміну подачі свердла лише в момент його виходу з заготовки.

Аналіз конструктивних рішень і принципів дії відомих пристроїв для регулювання (зменшення) подачі під час виходу свердла з заготовки свідчить про наявність низки недоліків. З одного боку, такі пристрої обмежують технологічні можливості вертикально-свердлильних верстатів, зокрема шляхом зменшення їх робочої зони, а з іншого — створюють додаткові навантаження на елементи коробок швидкостей і подач. Це, своєю чергою, зумовлює необхідність застосування верстатів більших типорозмірів і підвищеної потужності, що не завжди є економічно обґрунтованим.

Відомі також технічні рішення, наприклад пристрої для свердління наскрізних отворів малого діаметра, які забезпечують зміну подачі на виході інструмента із заготовки шляхом її різкого збільшення. Такий підхід спричиняє значне зростання осьової сили P_0 . Зазначені пристрої можуть застосовуватися лише при свердлінні отворів малого діаметра ($D \leq 1...2,5$ мм

для конструкційних сталей), коли подача визначається не умовою міцності свердла на кручення:

$$M_{кр} \leq [\tau_{кр}] \cdot W_{св}$$

$[\tau_{кр}]$ — допустимі тангенціальні напруження кручення;

$W_{св}$ — полярний момент опору поперечного перерізу свердла;

А умовою стійкості свердла як прямолінійного стиснутого стержня постійного перерізу:

$$P_0 \leq \frac{\pi^2 EI}{(Ml)^2}$$

E — модуль пружності матеріалу;

I — момент інерції поперечного перерізу свердла;

M — коефіцієнт приведеної довжини, який визначається способом закріплення свердла та місцем прикладання навантаження;

l — довжина консолі свердла;

Таким чином, аналіз існуючих технічних рішень щодо регулювання подачі при свердлінні наскрізних отворів свідчить про те, що на сьогодні дана проблема залишається повністю невирішеною. У зв'язку з цим розроблення конструкторсько-технологічних заходів, спрямованих на підвищення економічної ефективності процесу свердління за рахунок зростання продуктивності різання (зменшення t_{0t_0}), підвищення стійкості інструмента (шляхом скорочення шляху тертя та зменшення зношування), забезпечення надійності процесу (усунення перевантажень і запобігання поломкам свердел), а також зниження енерговитрат і витрат на інструмент, є актуальним науково-технічним завданням.

1.3. Аналіз технологічності конструкції деталі.

Ціль аналізу – можливе зменшення трудомісткості, металомісткості, можливість обробки деталі високопродуктивними методами.

Аналіз виконуємо двома способами: якісним і кількісним.

1.3.1. Службове призначення деталі

Деталь «Маточина» КС6Б-75.605 є складовим елементом редуктора сільськогосподарської машини та конструктивно призначена для запобігання осьовому зміщенню вала із зубчастим колесом, а також для забезпечення їх радіального базування. Зазначені функції реалізуються за рахунок посадкового отвору $\varnothing 40H7$, зовнішньої циліндричної поверхні $\varnothing 60h11$ і торцевих поверхонь деталі.

Відповідно до класифікатора ЄСКД [2] дана деталь належить до 71 класу — тіл обертання, до якого входять кільця, диски, шків, блоки, стержні, втулки, стакани, колонки, вали, осі, штоки, шпинделі та інші аналогічні деталі. У межах цього класу машинобудівні деталі поділяються на групи за співвідношенням довжини деталі L до найбільшого зовнішнього діаметра d . Для розглядуваної деталі $L=34\text{мм}$, $d=100\text{мм}$, відповідно відношення $L/d=0,34 < 0,4$, що дозволяє віднести її до групи кришок і маточин.

Деталь «Маточина» КС6Б-75.605 виготовляється з легованої сталі марки 40Х-2 за ДСТУ 4543-01 відповідно до вимог робочого креслення.

У наведених нижче таблицях подано хімічний склад, механічні та технологічні властивості зазначеного матеріалу.

Таблиця 1 – Хімічний склад хромистої сталі 40Х-2 ДСТУ 4543-01, %

C	Si	Mn	Cr	P	S	Cu	Ni	As
				не більше				
0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,8	0,8-1,0	0,035	0,04	0,25	0,25	0,08

Таблиця 2 – Механічні властивості хромистої сталі 40Х-2 ДСТУ 4543-01

σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	ρ , г/см ³	a_n , Дж/см ²	НВ
не менше						штамповка
800	610	10	45	7,8	55	163-168

Технологічні властивості хромистої сталі 40Х-2 ДСТУ 4543-01

Температура кування, С: початку 1250, кінця 800.

Зварюваність –важкозварювана. Способи зварки: РДС і КТС.

Необхідний підігрів і наступна термообробка.

Оброблюваність різанням – $K_{V_{TB.СПЛ.}} = 0,2$, $K_{V_{ШВ.СТ.}} = 0,95$.

1.3.2 Якісна оцінка технологічності

Конструктивне виконання деталі «Маточина» КС6Б-75.605 є відносно простим і не потребує спрощення або конструктивних змін навіть у разі переходу до іншого типу виробництва.

Матеріалом деталі є легована сталь марки 40Х-2 за ДСТУ 4543-01, яка повністю відповідає технічним вимогам, що висувуються до даної деталі, а також умовам її експлуатації у складі відповідного вузла. Заготовка деталі отримується методом штампування, що є раціональним способом з урахуванням типу виробництва, марки матеріалу, експлуатаційних вимог, конструктивних особливостей деталі та економічної доцільності.

Конструкція деталі не потребує створення спеціальних штучних технологічних баз під час виконання механічної обробки. Як технологічні бази можуть ефективно використовуватися як зовнішні циліндричні та торцеві поверхні, так і внутрішні циліндричні поверхні деталі.

Призначення та геометрія деталі не передбачають наявності високоточних, важкодоступних або складних в обробці поверхонь, а отже, відсутні нетехнологічні елементи, що вимагали б застосування складних, дорогих або малопродуктивних методів оброблення.

Усі поверхні деталі є доступними та зручними для проведення вимірювального контролю. Конструкція маточини забезпечує достатню жорсткість, необхідну для нормальної роботи вузла, до складу якого входить дана деталь.

Під час виготовлення деталі можливе застосування високопродуктивного спеціалізованого та спеціального обладнання, а також відповідного технологічного оснащення.

На підставі наведеного аналізу можна зробити висновок, що деталь «Маточина» КС6Б-75.605 характеризується високим рівнем технологічності.

1.3.3. Кількісна оцінка технологічності

Відповідно до вимог ДСТУ 14.205-13 кількісна оцінка технологічності виробу може здійснюватися за такими показниками: трудомісткість виготовлення, технологічна собівартість, точність обробки, шорсткість поверхонь, коефіцієнт використання матеріалу та коефіцієнт уніфікації конструктивних елементів.

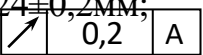
Порівняльна оцінка технологічності конструкції деталі за показниками трудомісткості та технологічної собівартості можлива лише після повної розробки та нормування технологічного процесу її виготовлення.

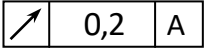
Остаточна оцінка технологічності за коефіцієнтом використання матеріалу виконується після вибору способу отримання заготовки та розрахунку припусків на механічну обробку. У зв'язку з цим на даному етапі проєктування технологічного процесу доцільно виконувати кількісну оцінку

технологічності за трьома показниками: коефіцієнтом точності, коефіцієнтом шорсткості та коефіцієнтом уніфікації конструктивних елементів.

Для розрахунку кількісних показників необхідно заповнити таблицю

Таблиця 3 – Кількісні показники технологічності

Назва поверхні. Позначення на кресленні	Кількість поверхон ь	Кількість уніфікованих поверхонь	Квалітет точності	Параметр шорсткості по ГОСТ 2789- 73	Клас шорсткості (чистоти поверхні)
1	2	3	4	5	6
Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 100h14 (-0,0870)$; $l = 34 \text{ мм}$	1	1	14	Rz 40	4
Торцева поверхня $34 \pm 0,2 \text{ мм}$	2	2	14	Ra 12,5	3
Внутрішня циліндрична поверхня A $\varnothing 40H7(+0,025)$;	1	1	7	Ra 1,6	6
Фаска внутрішня $1 \times 45^\circ$	2	2	14	Rz 40	4
Торцева поверхня $24 \pm 0,2 \text{ мм}$; 0,2 A	1	1	14	Ra 12,5	3

Зовнішня циліндрична поверхня;  Ø 60h11 (-0,190);	1	1	11	Ra 12,5	3
Фаска зовнішня 1×45°	1	1	14	Rz 40	4
Отвори Ø 14H14; Ø76	2	2	14	Ra 25	2
Разом	11	11			

Коефіцієнт точності обробки

$$K_{\text{т.ч.}} = 1 - \frac{1}{T_{\text{ср}}},$$

де $T_{\text{ср}}$ – середній квалітет точності.

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum T_i \cdot n_i}{\sum n_i} = \frac{14 \cdot 9 + 11 \cdot 1 + 7 \cdot 1}{11} = 13,09,$$

$$K_{\text{т.ч.}} = 1 - \frac{1}{13,09} = 0,92.$$

При $K_{\text{тч}} < 0,8$ деталь відноситься до особливо точних і відповідно до нетехнологічних.

При $K_{\text{тч}} = 0,92 > 0,8$ деталь середньої точності і, відповідно технологічна.

Відповідно, дана деталь “Маточина” є технологічною.

Коефіцієнт шорсткості.

$$K_{\text{ш}} = \frac{1}{B_{\text{ср}}},$$

де $B_{\text{ср}}$ – середній клас шорсткості.

$$B_{cp} = \frac{\sum B_i \cdot n_i}{\sum n_i} = \frac{6 \cdot 1 + 4 \cdot 4 + 3 \cdot 4 + 2 \cdot 2}{11} = 3,45,$$

де B_i – класи шорсткості (чистоти поверхні);

n_i – число поверхонь відповідного класу шорсткості.

$$K_{ш} = \frac{1}{3,45} = 0,29.$$

При $K_{ш} < 0,16$ деталь відноситься до важко оброблюваних і, відповідно до нетехнологічних.

При $K_{ш} > 0,29$ деталь не важко оброблювана.

Відповідно, дана деталь “Маточина” є технологічною.

Коефіцієнт уніфікації конструктивних елементів.

$$K_{y.e.} = \frac{N_{y.e.}}{N_e} = \frac{11}{11} = 1,0,$$

де N_{ye} – число уніфікованих типорозмірів і конструктивних елементів.

N_e – загальне число конструктивних елементів в деталі.

При $K_{ye} > 0,6$ деталь відноситься до технологічних.

При $K_{ye} < 0,6$ деталь нетехнологічна.

Відповідно, дана деталь “Маточина” є технологічною.

Висновок: На основі якісної і кількісної оцінки технологічності деталі приходимо до висновку, що вона є технологічною і заміну конструкції деталі проводити не доцільно.

1.4. Вибір комплексу рухів по забезпеченню виробничого циклу на верстаті.

Формоутворюючі рухи доцільно вибирати із уже існуючих стандартів. Тому із даного рисунка ми можемо вибрати необхідні рухи для обробки заготовки штамповки на виготовлення деталі «Маточина КС6Б – 75.605»

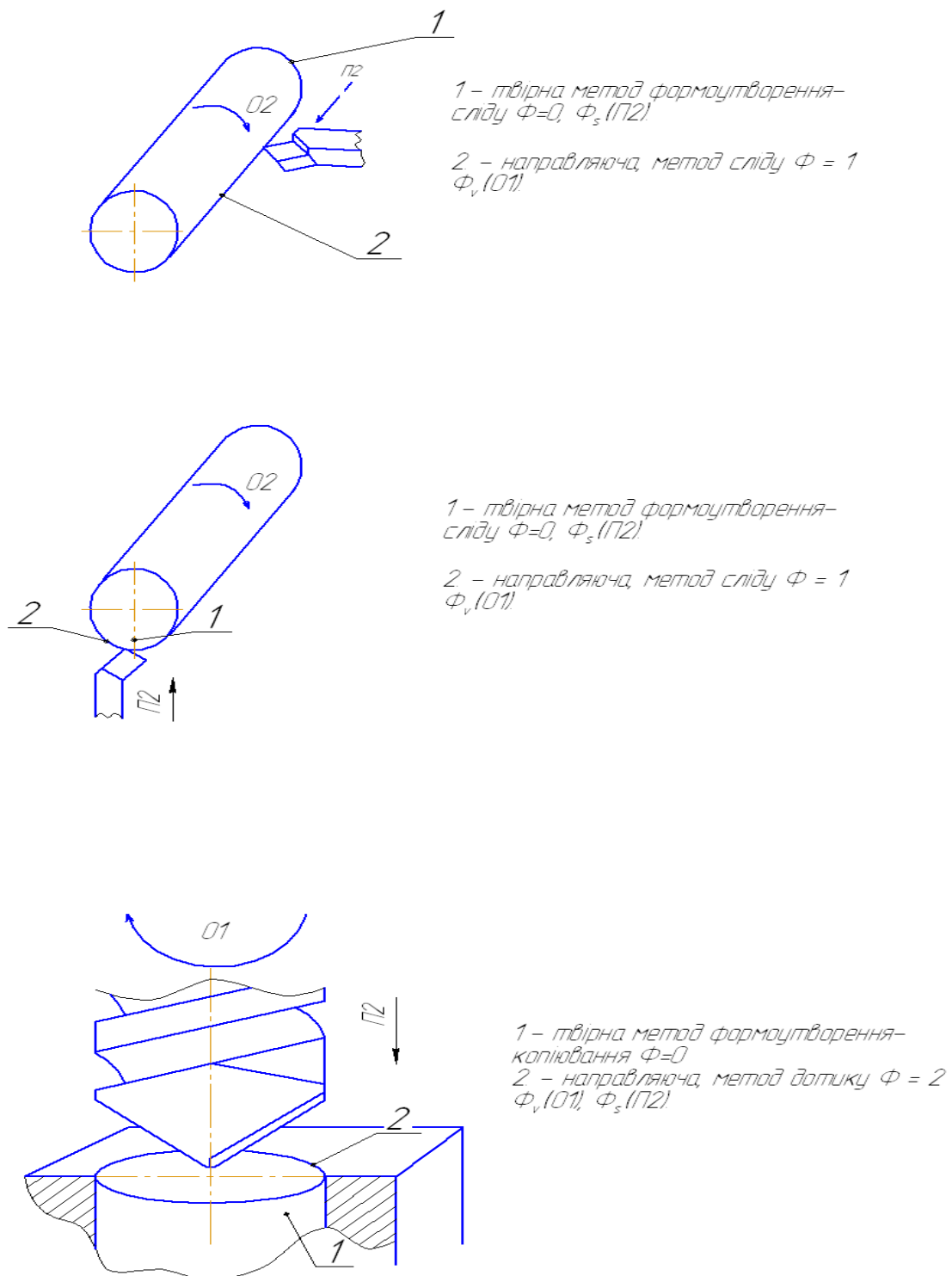


Рисунок 1.1. Основні методи формоутворення.

1.5 Вибір та обґрунтування структурно-кінематичної схеми верстата

Структурно-кінематичну схему верстата обирають на підставі вихідних даних про деталь і формоутворювальні рухи, необхідні для забезпечення процесу її виготовлення.

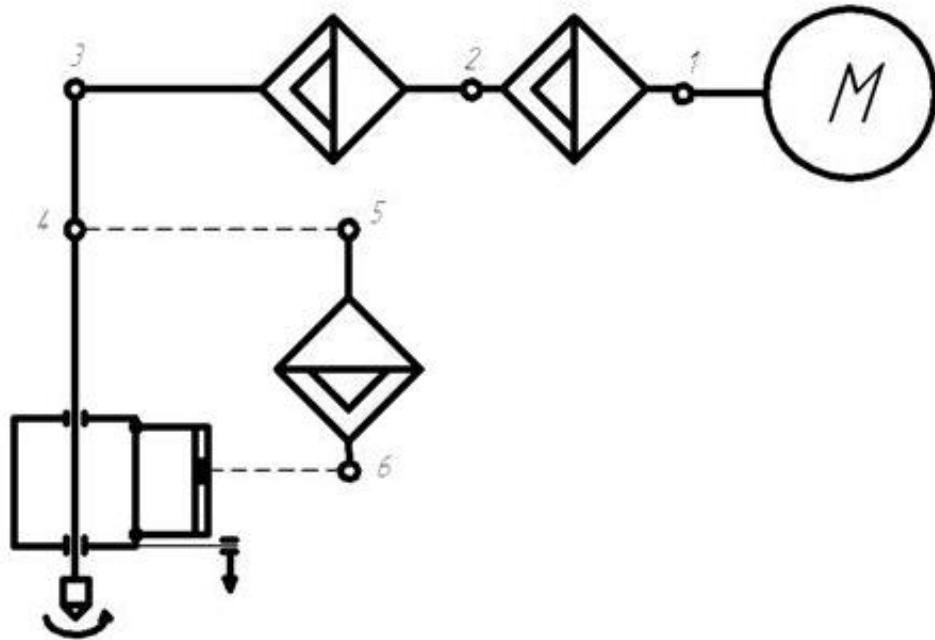


Рисунок 1.2. Структурно - кінематичної схеми верстата 2Н135

2. РОЗРОБКА КОМПОНУВАЛЬНОЇ СХЕМИ ВЕРСТАТА

2.1. Обґрунтування модулів верстата (МК, ТМ, КМ)

Кількісний аналіз структури компоновки базується на визначенні кількості блоків і елементарних рухів, що входять до її складу, та спрямований на оцінювання структурної універсальності і ступеня можливого використання даної компоновки. Отримані оцінки мають важливе значення для інтенсифікації структури універсальних металорізальних верстатів.

Формула компоновки дає змогу визначити загальну кількість рухів d , загальну кількість блоків U , а також число рухомих блоків $U_d = U - 1$. У ряді випадків можливе виконання умови $U_d < d$, що пояснюється поєднанням у межах одного блока двох різних рухів, наприклад обертального і поступального. Виключивши з величини d дублюючі рухи, можна визначити кількість відносних координатних переміщень, тобто число ступенів свободи K_d інструмента і оброблюваної заготовки.

Про рівень універсальності структури компоновки можна побічно судити за величинами d , U_d і K_d . Проте більш об'єктивна оцінка потребує аналізу можливих поєднань рухів у процесі обробки різних деталей. Для цього вводиться поняття технологічного модуля.

Технологічний модуль — це мінімальний набір блоків компоновки, необхідний для виконання операції формоутворення. Якщо вузол верстата розглядати як складальну одиницю, блок — як координатну одиницю, а конструктивний модуль — як елемент уніфікації, то технологічний модуль є технологічною структурною одиницею компоновки.

Технологічний модуль обов'язково повинен містити щонайменше два блоки — стаціонарний і рухомий, оскільки лише за цієї умови можливе здійснення відносного руху між інструментом і заготовкою. У більшості

випадків технологічний модуль складається зі стаціонарного блока та двох або трьох рухомих блоків, до яких входять лише ті блоки, що виконують формоутворювальні рухи.

Технологічні модулі відрізняються схемами рухів у процесі різання, напрямками координатних переміщень і режимами руху. Для їх визначення та позначення доцільно використовувати кінематичні схеми процесу різання. Технологічний модуль позначається символом ТМ з відповідним порядковим номером.

Модульний комплект (МК) — це мінімальний склад блоків, необхідний для виконання операції обробки на універсальному верстаті. Він включає блоки формоутворювальних рухів і додаткові настановні блоки, що забезпечують переміщення за іншими координатами.

2.2 Побудова загальної матриці компоновки верстата.

Побудова матриць $|V|$ і $|H|$ можливих компоновок фрезерних верстатів із вертикальним і горизонтальним розташуванням шпинделя ґрунтується на використанні модульного комплекту, тобто мінімального набору блоків, необхідних для здійснення операції обробки. До складу такого комплекту входить стаціонарний блок і декілька рухомих блоків, які забезпечують формоутворювальні та допоміжні виконавчі рухи.

Для операцій фрезерування модульний комплект має вигляд:

$$МК = [ОСХYZ],$$

де О - стаціонарний блок,

С - блок інструментального шпинделя,

Х, Y, Z. - блоки координатних переміщень.

З урахуванням того, що блок інструментального шпинделя займає крайній правий розряд у структурній формулі (тобто шпиндельний блок

повинен бути кінцевим з боку гілки інструмента), загальна матриця компоновок фрезерних верстатів може бути представлена у вигляді $\{OXYZ\}$.

Кількість можливих варіантів компоновок фрезерних верстатів дорівнює числу перестановок чотирьох блоків O,X,Y,Z у чотирьох розрядах, тобто: $N = 4! = 24$.

Оскільки шпиндель може мати вертикальне або горизонтальне розташування, загальна кількість можливих варіантів компоновок зростає до 48. Двовимірною матрицею можливих варіантів компоновок фрезерних верстатів при позначенні вертикально-рухомого блока символом **1**, а горизонтально-рухомого — символом **¬1** (тобто «не вертикально-рухомий»), має відповідний вигляд.

$$|A| = \begin{bmatrix} \overline{1}\overline{1}\overline{0} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & 1\overline{0}\overline{1} & 0\overline{1}\overline{1} \\ \overline{1}\overline{1}\overline{0} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & 1\overline{0}\overline{1} & 0\overline{1}\overline{1} \\ \overline{1}\overline{1}\overline{0} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & 0\overline{1}\overline{1} \\ \overline{1}\overline{1}\overline{0} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & 0\overline{1}\overline{1} \\ \overline{1}\overline{1}\overline{0} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & 0\overline{1}\overline{1} \\ \overline{1}\overline{1}\overline{0} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & 0\overline{1}\overline{1} \\ \overline{1}\overline{1}\overline{0} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & 0\overline{1}\overline{1} \\ \overline{1}\overline{1}\overline{0} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & \overline{1}\overline{0}\overline{1} & 0\overline{1}\overline{1} \end{bmatrix}$$

Матриці вертикальних $|V|$ і горизонтальних $|H|$ компоновок формуються на основі вихідної матриці шляхом заміни числових ідентифікаторів блоків на літерні позначення X, Y, Z, з урахуванням специфіки прийнятої системи координат.

При цьому така заміна відображає:

- орієнтацію та спрямування головних формоутворювальних переміщень робочих органів верстата;
- просторове положення координатних осей відносно інструмента та оброблюваної заготовки;
- конфігурацію та взаємне розташування вузлів і кінематичних ланцюгів у горизонтальній і вертикальній площинах;
- вид і характер рухів інструмента та деталі, зокрема поступальні та обертальні переміщення;

- вплив компоновки на жорсткісні характеристики й точність обробки;
- відповідність просторової структури верстата його технологічному призначенню та типу деталей, що обробляються.

У результаті трансформації числової матриці в матриці $|V|$ та $|H|$ забезпечується формалізований опис просторової структури верстата, що дає змогу оцінити її ефективність з позицій технологічних і експлуатаційних вимог.

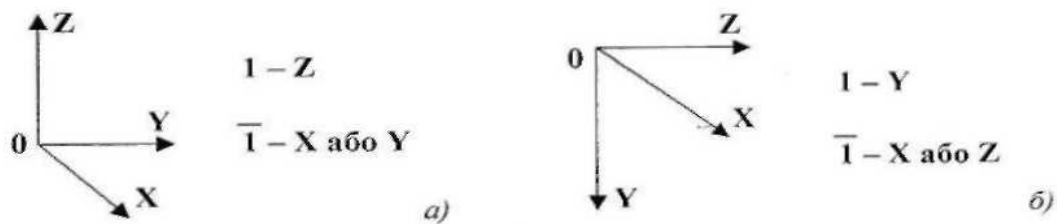


Рис.2.1. Системи координат, що використовуються при побудові компоновок фрезерних верстатів із вертикальним (а) та горизонтальним (б) шпинделем.

Матриці $|V|$ і $|H|$ мають вигляд:

$$|V| = \begin{bmatrix} ZX Y 0 & ZX 0 Y & Z 0 X Y & 0 Z X Y \\ ZY X 0 & ZY 0 X & Z 0 Y X & 0 Z Y X \\ YZ X 0 & YZ 0 X & Y 0 Z X & 0 Y Z X \\ XZY 0 & XZ 0 Y & X 0 Z Y & 0 X Z Y \\ XYZ 0 & XY 0 Z & X 0 Y Z & 0 X Y Z \\ YXZ 0 & YX 0 Z & Y 0 X Z & 0 Y X Z \end{bmatrix}$$

$$|H| = \begin{bmatrix} YXZ 0 & YX 0 Z & Y 0 X Z & 0 Y X Z \\ YZX 0 & YZ 0 X & Y 0 Z X & 0 Y Z X \\ ZYX 0 & ZY 0 X & Z 0 Y X & 0 Z Y X \\ XYZ 0 & XY 0 Z & X 0 Y Z & 0 X Y Z \\ XZY 0 & XZ 0 Y & X 0 Z Y & 0 X Z Y \\ ZXY 0 & ZX 0 Y & Z 0 X Y & 0 Z X Y \end{bmatrix}$$

2.3 Аналіз множин і визначення типів базових компонок

Завданням другого етапу аналізу множини можливих варіантів компонок, який відповідає другому рівню деталізації структурних формул, є дослідження підходу, що дає змогу ідентифікувати типи базових компонок не за їх зовнішніми формами, а за внутрішньою побудовою та ключовими конструктивними характеристиками.

Метою не є створення абсолютно повної та замкненої класифікації типів компонок. Навпаки, запропонований метод відкриває можливість появи, виявлення та осмислення нових типів і підтипів компонок. Водночас він забезпечує математичну формалізацію кожного структурного типу шляхом використання узагальнених структурних формул.

Класифікація компонок за типами здійснюється на основі сукупності ознак, які поділяються на структурні та конструкційні. Структурні ознаки застосовуються для виділення основних типів компонок, тоді як конструкційні — для формування додаткових різновидів. Вагомий вплив на формування типів компонок мають габаритні розміри верстатів. Для багатоопераційних верстатів на етапі попереднього аналізу доцільно умовно виокремлювати дві групи — верстати малих та великих розмірів.

Розміри верстата безпосередньо пов'язані з конструктивним виконанням стаціонарного блока та наявністю в компоновці колони (стійки). У верстатах малих габаритів напрямні для всіх координат, як правило, можуть бути реалізовані на моноблочній (однокорпусній) станині. Для верстатів великих розмірів, особливо у випадку вертикальних напрямних, необхідним є застосування стаціонарної стійки або рухомої колони.

На рис. 2.2, а наведено процес формування можливих типів малих верстатів, відповідні їм узагальнені структурні формули, а також характерні приклади компонок. Матриця компонок у цьому випадку поділяється на чотири підмножини відповідно до прийнятих структурних ознак.

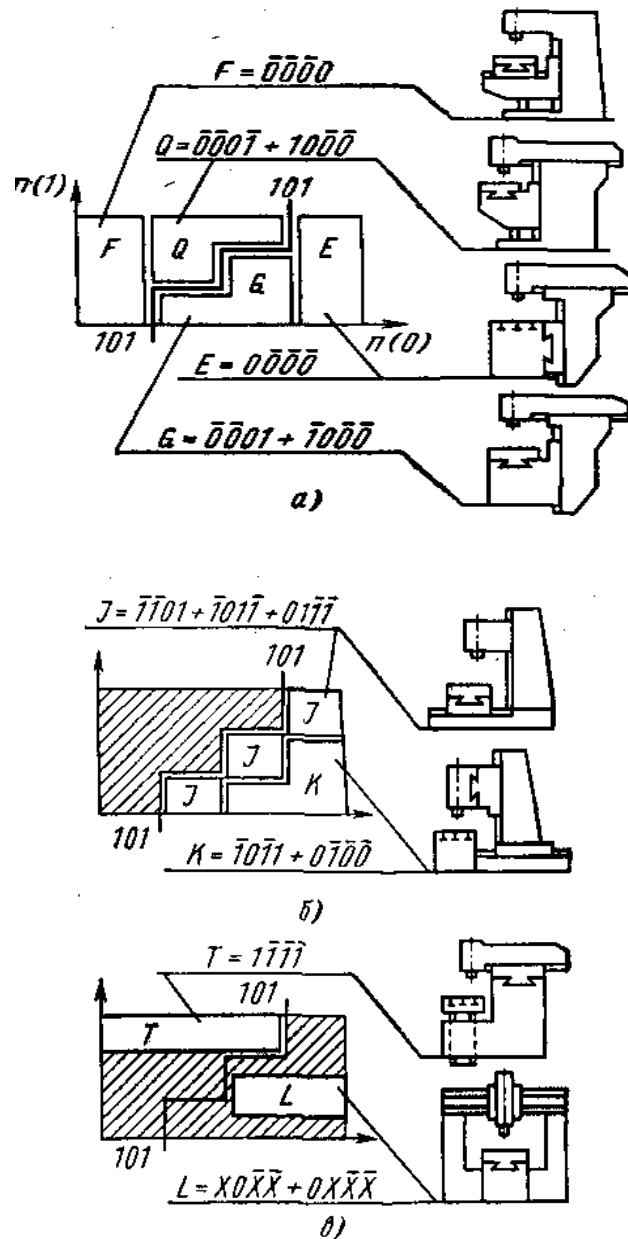


Рис 2.2. Утворення типів компоновки діленням матриць на підмножинний

Межами відповідних підмножин слугують стовпці матриці та ступінчаста лінія 101 , яка розмежовує компоновки з вертикальним переміщенням заготовки і варіанти, у яких вертикальний рух здійснює інструмент.

До типу Е належать односторонні компоновки, для яких характерно виконання всіх формоутворювальних рухів інструментом, тоді як стіл залишається нерухомим. Тип F об'єднує компоновки, у яких усі формоутворювальні переміщення, за винятком обертання інструмента, реалізуються заготовкою. До цієї групи, зокрема, відносять консольно-фрезерні верстати.

У компоновках типів G і Q стаціонарний блок займає проміжне положення в узагальнених структурних формулах, а формоутворювальні рухи розподіляються між інструментом і заготовкою. Для типу G характерне вертикальне переміщення інструмента, тоді як тип Q передбачає вертикальний рух заготовки, аналогічно до поперечно-стругальних верстатів. У компоновках типів Е та G робочий простір розміщується над станиною, тоді як у компоновках F і Q він розташований збоку від основної частини станини.

Додаткові різновиди компоновок малих верстатів можуть формуватися на основі конструктивних або конструктивно-структурних ознак. Так, компоновки типу Т (рис. 2.2, в) об'єднані спільною ознакою — наявністю вертикально-рухомого столу Т-подібної конструкції, що зумовлює специфічні розрядні положення вертикально-рухомих блоків. Для цього типу характерна узагальнена структурна формула $T = 1111$, яка відповідає невизначеному різновиду стаціонарного блока.

Для компоновок великих верстатів типовою є наявність рухомої стійки або рухомої колони як елементів несної системи, що забезпечують значні вертикальні переміщення блоків по власних напрямних. Стійки та колони завжди розташовують у гілці переміщення інструмента, оскільки підймання масивної заготовки є значно складнішим, ніж переміщення інструмента. Крім того, у разі вертикального переміщення заготовки відносно інструмента зона обробки завжди опиняється на максимальній висоті від основи верстата, яка дорівнює сумі висот столу та найвищої заготовки, що для великогабаритних верстатів є неприйнятним.

Таким чином, для великих верстатів можуть бути використані не всі компоновки, зафіксовані в матрицях, а лише ті, у яких вертикальний рух здійснює різальний інструмент. У матричному представленні ці варіанти розміщені праворуч від ступінчастої лінії 101 та становлять приблизно половину всієї множини можливих компоновок (рис. 2.2, б).

За ознакою рухомості стійки компоновки великих верстатів доцільно поділяти на два типи: тип І — компоновки з нерухомою стійкою, та тип К — компоновки з рухомою колоною.

Наявність нерухомої стійки, яка входить до складу стаціонарного блока, зумовлює те, що вертикально-рухомий блок займає розрядне положення, суміжне зі стаціонарним блоком з боку інструмента. Цьому відповідає узагальнена структурна формула компоновок типу І.

$$I = \bar{1}\bar{1}01 + \bar{1}01\bar{1} + 01\bar{1}\bar{1}.$$

У компоновках з рухливою колоною, навпаки, блоки, сусідні із стаціонарним, мають бути лише горизонтально-рухливими. Відповідна узагальнена структурна формула компоновок типа К

$$K = \bar{1}0\bar{1}1 + 0\bar{1}\bar{0}\bar{0}.$$

Додатковий тип L подовжніх компоновок виокремлюють на підставі конструктивно-структурної ознаки, якою є наявність стаціонарного або рухомого порталу, а також можливість практично необмеженого збільшення подовжнього переміщення без внесення змін у вузли, що відповідають за інші координатні рухи. Реалізація другої умови зумовлює певні структурні обмеження: блок X у структурній схемі повинен безпосередньо прилягати до стаціонарного блока. Для таких подовжньо-портальних верстатів застосовується узагальнена структурна формула $L = XOX\ X + 0XXX$.

Тип L характерний виключно для вертикальних компоновок, тоді як для горизонтальних схем він за своїми ознаками фактично збігається з типами K та I. Водночас система класифікації не є замкненою: за необхідності можуть бути сформовані й інші додаткові типи компоновок на основі різноманітних ознак.

Так, наприклад, може бути виділений тип R, який охоплює радіальні компоновки верстатів, призначених для виконання обробки в полярній системі координат і оснащених круглим столом. Такий підхід підтверджує гнучкість методу та можливість його подальшого розвитку залежно від конструктивних і технологічних потреб.

$$L = X O X X + 0 X X X.$$

Тип L застосовується виключно до вертикальних компоновок, тоді як у випадку горизонтальних схем за своїми характеристиками він фактично відповідає типам K та I. Система класифікації при цьому залишається відкритою, оскільки за потреби можуть бути сформовані й інші додаткові типи компоновок на основі різноманітних ознак.

Так, зокрема, може бути виокремлений тип R, що охоплює радіальні компоновки верстатів, призначених для виконання операцій у полярній системі координат і оснащених круглим столом замість блока подовжнього лінійного переміщення. У структурних формулах компоновок цього типу позначення X, яке відповідає столу з обмеженим лінійним ходом, замінюється символом D, що характеризує блок кругового руху. Відносно цього блока інші елементи здійснюють радіальні та осьові переміщення.

Зазначене перетворення можливе лише в тих компоновках, де блок X займає старший розряд у структурних формулах, що, у свою чергу, визначає межі відповідних підмножин. Узагальнена структурна формула компоновок типу R має вигляд:

$$R = D \bar{X} \bar{X} \bar{X} = D \bar{X} \bar{X} 0 + D \bar{X} 0 \bar{X} + D 0 \bar{X} \bar{X}.$$

До цього різновиду компонок, зокрема, належать карусельно-фрезерні верстати, для яких характерна структурна формула $DyOwC_2$.

Окрім узагальнених структурних формул як способу подання підмножин типів компонок, можуть також застосовуватися інші формалізовані засоби опису, а саме: математичні вирази розрядних меж, матриці відповідних підмножин, а також таблиці ескізних зображень компонок.

У таблиці 3 наведено стислий виклад структурних і конструкційних ознак разом із відповідними розрядними обмеженнями у зіставленні з узагальненими структурними формулами. Аналіз матриць вертикальних і горизонтальних компонок показує, що області підмножин одного й того самого типу повністю співпадають. Кількість компонок у кожній підмножині основних типів дорівнює шести. Зазначені закономірності є прямим наслідком застосування структурного підходу до формування типів компонок.

Кожна узагальнена структурна формула відповідного типу може бути розгорнута в перелік конкретних компонок за методикою, наведеною раніше. При такому розгортанні, з метою повноти запису конкретних структурних формул, необхідно додатково справа вказувати символ C , що відповідає блоку інструментального шпинделя, наявність якого, як було зазначено, передбачається у скороченому записі компонок.

Якщо при підрахунку обмежитися лише основними типами E , F , G , I , K та Q , то загальна кількість базових компонок на другому етапі аналізу становитиме

$N_2 = N(K_2) = 72$. Це значення у 1,5 раза перевищує кількість компонок першого етапу (N_1), що пояснюється тим, що половина всіх координатних компонок, представлених у матрицях $|H|$ та $|V|$, використовується як базові як для малих, так і для великих верстатів.

Належність конкретної компоновки до того чи іншого типу на другому рівні уточнення структурних формул позначають індексом типу, який розміщують у нижньому індексі символу стаціонарного блока.

Наведені вище визначення та позначення типів компоновок мають ілюстративний характер. Їх основним призначенням є демонстрація самого підходу до встановлення типів компоновок за структурними ознаками, а також показ можливості побудови для них узагальнених структурних формул.

2.4 Запис узагальнених структурних множин компоновок

Критеріями попереднього відбору компоновок можуть слугувати технологічні та конструктивні міркування, що ґрунтуються на умовах експлуатації обладнання та загальних вимогах до підвищення якості роботи верстатів. Ознаки такого попереднього відбору доцільно подавати у вигляді узагальнених структурних формул, кожна з яких описує певну множину компоновок, що відповідає заданій умові відбору.

Для свердлильних верстатів усі ознаки систематизовано та об'єднано в такі групи:

- M1 (M1.1; M1.2; M1.3; M1.4) — умови, спрямовані на усунення або мінімізацію впливу маси заготовки та вузлів верстата;
- M2 (M2.1; M2.2; M2.3; M2.4; M2.5) — умови, орієнтовані на підвищення точності роботи верстата;
- M3 (M3.1; M3.2; M3.3; M3.4; M3.5; M3.6) — умови, що визначають динамічні властивості компоновки;
- M4 (M4.1; M4.2; M4.3; M4.4) — умови, пов'язані з процесами завантаження та заміни заготовок;
- M5 (M5.1; M5.2; M5.3; M5.4; M5.5) — умови, що стосуються уніфікації варіантів конструктивного виконання компоновок.

У таблиці 2 наведено повний перелік умов відбору для всіх зазначених груп, подано стислий опис відповідних структурних ознак, а також наведено узагальнені структурні формули, що їм відповідають.

При виконанні проектування із табл.1 необхідно виписати умови відбору. Якщо умова відбору записана у вигляді узагальненої формули, то її розгортають у чотири структурні формули з врахуванням положення стаціонарного блоку, яке він може займати.

Наприклад: $\overline{ZZZZ} = \emptyset + \overline{ZZ}0Z + \overline{Z}0\overline{ZZ} + 0\overline{ZZZ}$, де $\emptyset$ - знак нуль-множини.

Таблиця 2. Структурні умови відбору компонок

Умови відбору компонок	Формулювання структурних ознак	Позначення і формула множини
1	2	3
1. Умови, виключаючи вплив маси заготовки і вузлів верстату		
Виключення впливу маси заготовки при підніманні і опусканні	Заготовка не має вертикального переміщення	M1.1=1101+1000+0000
Виключення впливу маси заготовки при горизонтальних переміщеннях вузлів	Стіл нерухомий або рухомий тільки в одному горизонтальному напрямку	M1.2=1000+0000
Відсутність впливу маси вузлів верстата при поздовжньому переміщенні	Поздовжньо-рухомий блок прилягає до стаціонарного	M1.3=XXX0+X000+000X+0XXX
Відсутність впливу маси вузлів верстата при горизонтальних переміщеннях	Горизонтально-рухомі блоки прилягають до стаціонарного	M1.4=1101+1011
2. Умови, направлені на підвищення точності верстату		

Можливість збільшення холостою аксіального ходу для автоматичної зміни інструментів без збільшення вильоту напрямних	Аксіально-рухомий блок прилягає до стаціонарного у гілці інструменту	M2.1=ZZ0Z+Z0ZZ+0ZZZ
Скорочення розмірного ланцюга, що забезпечує паралельність осі шпинделя з аксіальними переміщеннями	Аксіально-рухомим блоком є шпиндельний блок	M2.1=ZZ0Z+Z0ZZ+0ZZZ
Підвищення жорсткості за рахунок рамних і гвинтових підтримок	Вертикально-рухомий блок прилягає до стаціонарного	M2.3=1110+1000+0001+0111
Підвищення симетричності напрямних відносно силової зони	Розташування поздовжньо-рухомого блоку по можливості далі від інструментального блоку	M2.4=XXXX+0XXX
Зменшення впливу температурних деформацій шпиндельного блоку	Шпиндельний (інструментальний) блок є аксіально-рухомим	M2.5=ZZZZ
3. Умови, пов'язані із динамічними властивостями компоновки		
Зменшення вертикально-переміщуваних консольних мас та	Вертикально рухомий блок є кінцевим блоком	M3.1=1111+1111
Зменшення переважно-рухомих мас	Переважно-рухомий блок (блок 2.) є кінцевим блоком компоновки	M3.2=ZZZZ+ZZZZ

Рухомі маси розподілені між двома гілками компоновки	Рухомі блоки розташовані по обидві сторони від стаціонарного блоку	$M3.3=0000+0000$
Підвищення стійкості мас по їх розташуванню в компоновці (в зв'язку з величинами координатних переміщень)	Чим більший хід має блок, тим ближче він повинен бути розташований до стаціонарного блоку 1) при $X>Y>2$ 2) при $X>2>Y$ 3) при $2>X>Y$	Л* ; $M3.4=ZYX0+ZZ0Z+Z0ZZ+0XYZ$ $M3.5=YZX0+Y0YY+Y0YY+0XZY$ $M3.6=YXZ0+YY0Y+Y0YY+0ZXY$
4. Умови, пов'язані із завантаженням та заміною заготовок		
Можливість встановлення та обробки довгих деталей	Поздовжньо-рухомий стіл (на нерухомій основі) або сусідній блок, а стіл нерухомий	$M4.1=X0XX+0XXXX$
Можливість потокового завантаження і розвантаження	Стіл має тільки одне поздовжнє переміщення	$M4.2=X0XX$
Заміна заготовок шляхом застосування двох поворотних столів	Стіл (із вмонтованими поворотними столами) нерухомий	$M4.3=0000$
Можливість монтування верстату в автоматичну лінію	Стіл нерухомий або рухомий тільки в одному горизонтальному напрямку	$M4.4=1000+0000$
5. Умови, пов'язані із уніфікацією варіантів виконання компоновки		

Можливість виготовлення верстатів із збільшеним поздовжнім переміщенням	Стіл нерухомий, а сусідній блок рухомий у напрямку змінюваного переміщення, або стіл рухомий тільки у цьому напрямку	M5.1=X0XX+0XXX
Можливість виготовлення верстатів із збільшеним поперечним переміщенням	Стіл нерухомий, а сусідній блок рухомий у напрямку змінюваного переміщення, або стіл рухомий тільки у цьому напрямку (тільки для горизонтальних компонок)	M5.2=Z0ZZ+0ZZZ
Можливість виготовлення верстатів із збільшеним вертикальним переміщенням	Стіл нерухомий, а сусідній блок (за стаціонарним) рухомий у напрямку змінюваного переміщення	M5.3=0111
Можливість виготовлення спеціалізованого верстата для полярної системи координат.	Поздовжньо-рухомий стіл замінюється круговим столом	M5.4=XXXX
Можливість виготовлення верстатів із столами, які можна нахилити	Стіл (основа) нерухома	M5.5=0000

2.4.1 Визначення структурних формул компонок, які відповідають всім структурним ознакам з використанням математичного методу перетину множин.

Відбір компонок, які відповідають заданим вимогам, сформульованим у вигляді узагальнених структурних формул ознак відбору, доцільно здійснювати з використанням математичного апарату перетину множин. Операції перетину множин відповідає логічна кон'юнкція (операція «I»), яка виконується по розрядах структурних формул із обов'язковим дотриманням принципу достатності та відсутності надлишкових блоків у компоновці. У разі порушення цього принципу результат операції замінюється символом нуль-множини O , що означає відсутність спільних елементів, тобто неможливість утворення компонок, які задовольняють усі задані умови.

Під час визначення перетину кількох множин зручно реалізовувати операцію у вигляді табличного запису з чотирма стовпцями, що відповідають чотирьом розрядам стаціонарного блока структурної формули. Підсумковий результат перетину записують у нижньому рядку. При цьому в тих стовпцях, де вже наявний символ O , він безпосередньо переноситься до результату, оскільки перетин із нуль-множиною не може породжувати допустимих компонок.

У стовпцях, де символ O відсутній, здійснюється поразрядне виконання операції «I» шляхом зіставлення дійсних символів та відповідних їм заперечень. Якщо між дійсними позначеннями та запереченнями не виникає суперечностей, ці символи переносять до результуючої структурної формули. При цьому отримана формула обов'язково перевіряється на відповідність правилу достатності та ненадлишковості блоків. У випадку, якщо зазначене правило не виконується, результат перетину вважається некоректним і замінюється символом O .

Нижче наведено приклад визначення перетину множин, які задаються узагальненими структурними формулами ознак попереднього відбору компоновок М4.4 та М5.1.

$$\begin{array}{r}
 \emptyset + \emptyset + \emptyset + \overline{0000} \\
 \emptyset + \emptyset + \overline{XOX\overline{X}} + \overline{OX\overline{X\overline{X}}} \\
 \hline
 \emptyset + \emptyset + \emptyset + \overline{OX\overline{X\overline{X}}}
 \end{array}$$

У наведеному прикладі в останньому стовпці виконано поразрядну логічну операцію «І». За її результатами отримано узагальнену структурну формулу $\overline{OX\overline{X\overline{X}}}$, яка одночасно відповідає обом заданим умовам відбору. Зазначена формула може бути розгорнута у конкретні структурні формули $\overline{OXYZ}$ та $\overline{OXZY}$.

У загальному випадку виконання операції перетину множин може приводити до різних результатів:

- до отримання конкретних структурних формул координатних компоновок;
- до формування узагальнених структурних формул, які в подальшому можуть бути розгорнуті у сукупність конкретних варіантів;
- або до появи символів **О** у всіх стовпцях, що свідчить про відсутність компоновок, які одночасно задовольняють усі задані умови відбору.

2.5 Зображення конструктивних варіантів компоновок верстата за заданими структурними умовами відбору компоновок

1. Формування узагальнених структурних формул множин компоновок, які відповідають прийнятим умовам відбору (згідно з табл. 2).

Умова М1.1. Усунення впливу маси заготовки під час її піднімання та опускання.

Структурна ознака: заготовка не здійснює вертикальних переміщень.
Формула множини: $M1.1$.

Умова M2.5. Зменшення негативного впливу температурних деформацій шпиндельного блока.

Структурна ознака: шпиндельний блок має можливість осьового переміщення. Формула множини: $M2.5$.

Умова M3.3. Раціональний розподіл рухомих мас між двома гілками компоновки.

Структурна ознака: рухомі блоки розміщені по обидва боки від стаціонарного блока. Формула множини: $M3.3$.

Умова M4.1. Забезпечення можливості встановлення та обробки заготовок значної довжини.

Структурна ознака: наявність поздовжньо-рухомого стола на нерухомій основі або сусіднього рухомого блока за умови нерухомості стола.

Формула множини: $M4.1$.

На основі вибраних узагальнених структурних формул виконують побудову конструктивних варіантів компоновок верстатів шляхом приєднання блока, що несе інструмент, що наочно ілюструється на рис. 2.

2. Вибір компоновок шляхом перетину множин

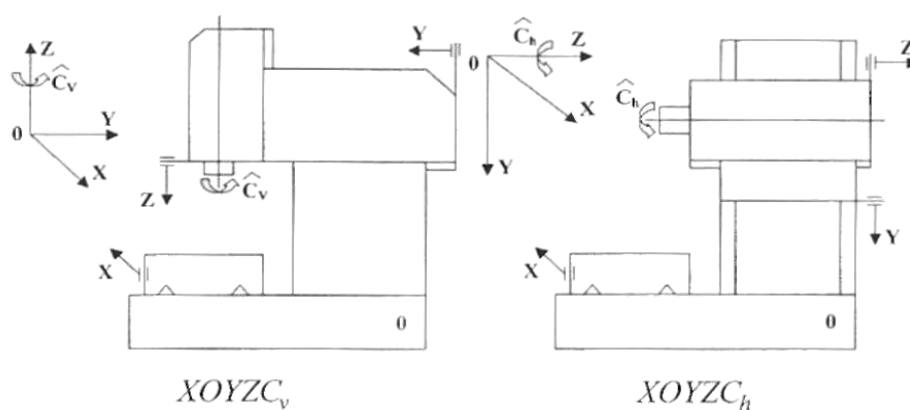


Рис. 2.3. Вибрані компоновки свердлильних верстатів за заданими структурними ознаками.

3 . КОНСТРУКТОРСЬКО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

При послідовному ввімкненні ланки передач передаточне відношення привода рівне числу передаточних відношень окремих передач ланок. Застосування цього твердження для найбільшого $i_{\max}$. та найменшого $i_{\min}$. передаточних відношень привода, отримаємо:

$$i_{\max} = i_{a \max} \cdot i_{b \max} \cdot i_{c \max} \dots \cdot i_{r \max}$$

$$i_{\min} = i_{a \min} \cdot i_{b \min} \cdot i_{c \min} \dots \cdot i_{r \min}$$

де індекси а і b замінені P_a , P_b - відповідно і т.д.

Звідси діапазон регулювання привода:

$$Dn = \frac{N_{\max}}{N_{\min}} = \frac{i_{\max}}{i_{\min}} = \frac{1400}{31.5} = 44.$$

3.1 Розробка структурної формули приводу головного руху з урахуванням обробки тонкостінних деталей

Для використання рівняння настройки приводу головного руху необхідно попередньо визначити кінематичні характеристики всіх груп передач, а саме: кількість ступенів у кожній групі, їх передавальні відношення та місце кожної групи в кінематичному порядку розподілення. При цьому важливим є врахування числа передач у групах, які кінематично передують даній групі, оскільки саме вони визначають загальний характер формування ряду частот обертання шпинделя.

З цією метою у формулі для визначення загального числа ступенів швидкості z вводиться індекс r , що відповідає номеру групи в кінематичному порядку розподілення. Порядок розташування груп у рівнянні настройки

приймається відповідно до їх конструктивного розміщення вздовж кінематичного ланцюга передач — від електродвигуна до шпинделя. Такий підхід дозволяє коректно врахувати вплив кожної групи на формування частот обертання та забезпечити узгодженість між конструктивною схемою приводу і його кінематичними характеристиками.

При модернізації вертикально-свердлильного верстату структурна формула приводу головного руху формується з урахуванням необхідності зменшення динамічних навантажень, що виникають у процесі свердління тонкостінних деталей. Основна увага при цьому приділяється забезпеченню стабільності обертання шпинделя при малих осьових зусиллях подачі та в широкому діапазоні частот обертання. Саме правильний вибір кількості груп, їх кінематичного порядку та чисел передач у кожній групі дає змогу реалізувати раціональну структуру приводу.

Застосування багатоступеневого регулювання швидкості, відображеного у відповідному рівнянні настройки, забезпечує плавний перехід між режимами різання, зменшення крутильних коливань у кінематичному ланцюгу та покращення умов формування отворів. Це особливо важливо при обробці тонкостінних деталей, для яких надмірні коливання або різкі зміни режимів призводять до деформацій, зниження точності та появи задирок на кромках отворів.

Прив'язка кінематичного розрахунку до вертикально-свердлильного верстата 2Н135.

Вихідні дані базового верстата 2Н135

- Тип верстата: вертикально-свердлильний
- Привід головного руху: механічний, багатоступеневий
- Номінальна частота обертання електродвигуна:

$$n_{\text{дв}}=1500 \text{ об/хв}$$

- Діапазон частот обертання шпинделя (типовий):

$$n_{\min}^{[f_0]} \approx 45 \text{ об/хв}, \quad n_{\max}^{[f_0]} \approx 2000 \text{ об/хв}$$

Для модернізації з метою обробки тонкостінних деталей верхню межу доцільно зберегти або підвищити, а крок між ступенями — ущільнити.

Вибір структури приводу

Приймаємо 3-груповий привід, що відповідає класичній схемі 2Н135:

№ групи (р)	Назва групи	Розміщення
р = 1	Швидкісна	біля електродвигуна
р = 2	Проміжна	у коробці швидкостей
р = 3	Редукторна	біля шпинделя

Рівняння настройки для верстата 2Н135

Загальне число ступенів: $z = z_1 \cdot z_2 \cdot z_3$

Частота обертання шпинделя: $n_{ijk} = n_{дв} \cdot i_{1i} \cdot i_{2j} \cdot i_{3j}$

де індекс $p=1,2,3$ — номер групи в кінематичному порядку розподілення відповідно до конструктивного розміщення від електродвигуна до шпинделя.

Прийняті параметри груп (раціональні для тонкостінних деталей)

Група	Кількість передач
1z	2
2z	3
3z	4

$z = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$ ступені

24 ступені забезпечують щільний ряд швидкостей, що критично важливо для свердління тонкостінних деталей при малих подачах.

Перевірка діапазону частот обертання

Сумарне передавальне відношення:

$$i\Sigma = \frac{n_{ДВ}}{n_{ШП}}$$

Для мінімальної частоти:

$$i\Sigma_{\max} = \frac{1500}{45} \approx 33$$

Для максимальної:

$$i\Sigma_{\min} = \frac{1500}{2000} = 0,75$$

Обраний 3-груповий привід реально перекриває робочий діапазон 2Н135.

Застосування тригрупової структури приводу головного руху, характерної для вертикально-свердлильного верстата 2Н135, дозволяє сформувати розширений і ущільнений ряд частот обертання шпинделя. Це забезпечує можливість точного підбору режимів різання при свердлінні тонкостінних деталей, зменшує осьові зусилля, знижує вібрації та підвищує якість обробки отворів.

3.2 Побудова структурної сітки та графіка частот обертання шпинделя з орієнтацією на тонкостінні деталі.

Побудова структурної сітки

Структурна сітка служить графічним відображенням структурної формули приводу головного руху та дозволяє наочно представити формування ряду частот обертання шпинделя залежно від кількості груп передач і їх характеристик. Для її побудови на площині проводять систему паралельних горизонтальних прямих з однаковим інтервалом Δ , кількість яких дорівнює загальному числу ступенів швидкості z . Крім того, проводять

декілька вертикальних прямих, розміщених на приблизно однаковій відстані одна від одної.

Кожній групі передач відводиться поле між двома сусідніми вертикалями відповідно до конструктивного розміщення цієї групи вздовж кінематичного ланцюга від електродвигуна до шпинделя. Над полем кожної групи записують її характеристику, яка визначається за структурною формулою приводу та відображає кількість передач у даній групі й крок між ними, виражений у долях інтервалу Δ .

На лівій вертикалі поля першої (за конструктивним порядком) групи наносять початкову відмітку, яку розміщують симетрично відносно горизонтальних ліній. На правій вертикалі цього ж поля симетрично розташовують стільки відміток, скільки передач має група, з відстанями між ними, що відповідають характеристиці групи, вираженій у частках інтервалу Δ . Отримані відмітки з'єднують з початковою точкою прямими променями.

У полі кожної наступної групи з кожної відмітки на лівій вертикалі аналогічно проводять промені до відповідної кількості відміток на правій вертикалі, зберігаючи симетрію та задані інтервали. У результаті формується повна структурна сітка, яка відображає всі можливі комбінації передач і, відповідно, всі ступені частот обертання шпинделя.

При модернізації верстата для обробки тонкостінних деталей структурна сітка формується з ущільненням у зоні середніх і високих частот обертання, що забезпечує більш точний підбір режимів різання та зменшує ймовірність виникнення вібрацій і деформацій заготовки.

Побудова графіка чисел обертання

Конкретні значення передаточних відношень усіх передач приводу та чисел обертання валів визначають шляхом побудови графіка чисел обертання, який складається відповідно до кінематичної схеми приводу головного руху. Кожному валу приводу на графіку відповідає окрема вертикальна пряма.

На вертикалях валів наносять відмітки чисел обертання у межах від мінімального до максимального значення, при цьому горизонтальні прямі проводять з однаковими інтервалами між ними. Наявність увімкненої передачі при певних числах обертання ведучого і веденого валів відображається на графіку прямою лінією, що з'єднує відповідні відмітки на вертикалях цих валів.

Передаточне відношення передачі визначається за кількістю інтервалів між горизонтальними лініями, перекритих відповідним променем, і може бути виражене залежністю:

$$i = \varphi^m,$$

де m — число інтервалів, перекритих променем.

Якщо числа обертання на графіку відкладаються в порядку зростання знизу вгору, то для прискорювальної (підвищувальної) передачі $i > 1$, $m > 0$ промінь спрямований вгору (від ведучого до веденого вала). Для уповільнювальної (понижувальної) передачі $i < 1$, $m < 0$ промінь спрямований зверху вниз. У випадку передачі з передаточним відношенням $i = 1$, $m = 0$ промінь має горизонтальне положення.

Побудований графік чисел обертання дозволяє перевірити правильність вибору передаточних відношень, рівномірність розподілу ступенів швидкості та відповідність кінематичної схеми вимогам до обробки тонкостінних деталей, для яких необхідна стабільність обертання шпинделя та мінімальні стрибки між суміжними ступенями.

3.3 Кінематичний розрахунок

Рух різання.

$$N_{\max} = 1440 \frac{140}{178} \cdot 0.985 \cdot \frac{34 \cdot 34 \cdot 65}{48 \cdot 48 \cdot 34} = 1070 \text{ об / хв.}$$

Рух подачі.

$$S_{\text{max}} = 1 \cdot \frac{27 \cdot 27 \cdot 30 \cdot 60 \cdot 1}{50 \cdot 50 \cdot 51 \cdot 21 \cdot 47} \cdot 3.14 \cdot 3.5 \cdot 14 = 1.6 \text{ мм / об.}$$

Допоміжний рух. Переміщення шпиндельної бабки виконується від рукоятки Р1 через черв'ячну передачу та рейкову шестерню, що зчіплюється з рейкою $m=2$ мм, закріпленою на верстаті.

Вертикальне переміщення стола виконується поворотом рукоятки через вал XI, конічні шестерні і ходовий гвинт XII.

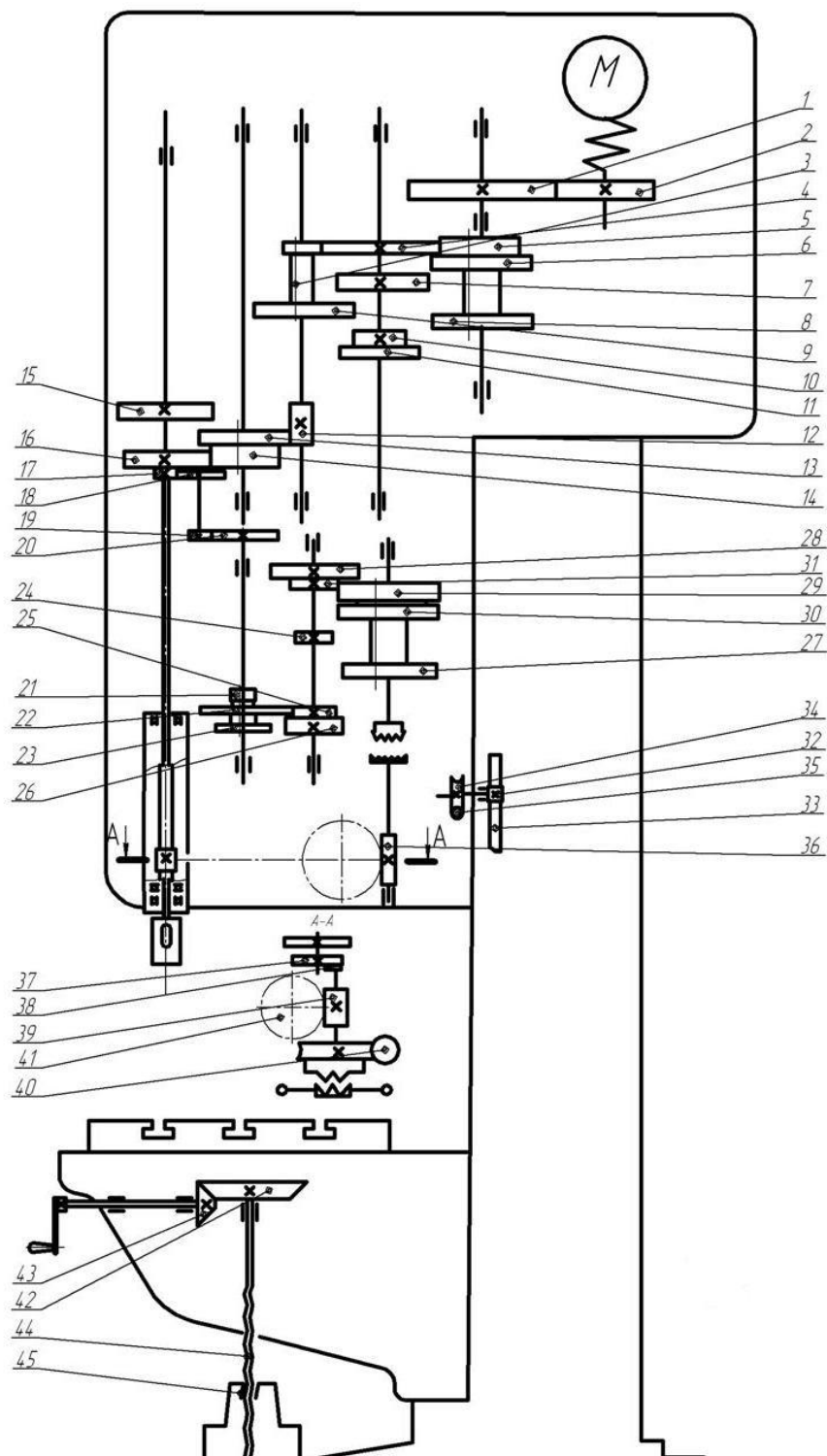


Рис.3.1 Кінематична схема верстата 2Н135

3.4. Визначення потужності електродвигуна з урахуванням режимів свердління тонкостінних деталей.

Визначаємо момент різання при зенкеруванні з врахуванням самого важкого режиму роботи:

$$M_{KP} = 10C_M D^q t^x s^y K_P;$$

де $C_M = 0,196$; $q = 0,85$; $x = 0,8$; $y = 0,7$;

$K_P = 1$;

$$M_{KP} = 10 \cdot 0,196 \cdot 50^{0,85} \cdot 1,7^{0,8} \cdot 0,5^{0,7} \cdot 1 = 51,3 \text{ Нм.}$$

Визначаємо активну потужності:

$$N_{\text{різ}} = \frac{M_{KP} \cdot n}{9750} = 3,7 \text{ кВт.}$$

Визначаємо необхідну потужність електродвигуна:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{різ}}}{\eta}$$

де $N_{\text{різ}}$ – максимальна потужність різання;

$\eta = 0,833$ – загальний ККД приводу.

Необхідна потужність двигуна згідно:

$$N_{\text{ел}} = \frac{3,7}{0,833} = 4,5 \text{ кВт.}$$

Приймаємо згідно ДСТУ 19523-94 трифазний асинхронний коротко замкнутий електродвигун серії А0Л2-32-4-СІ з синхронною частотою обертання 1500 об/хв. і потужністю 4,5 кВт.

- асинхронна частота обертання $n_{ac}=1440$ об/хв.;
- напруга $U=220$ В.

3.5 Опис принципу роботи модернізованих вузлів і механізмів, орієнтованих на обробку тонкостінних деталей.

3.5.1 Опис конструкції та принципу роботи двошпиндельної свердлильної головки, встановленої на верстаті 2Н135.

Для підвищення продуктивності та зменшення деформацій при обробці тонкостінних деталей на вертикально-свердлильному верстаті 2Н135 у проєкті передбачено використання накладної двошпиндельної свердлильної головки з шестерним приводом.

Верстат 2Н135 має такі основні технічні характеристики, що забезпечують ефективну роботу багатошпиндельного оснащення:

- найбільший діаметр свердління в сталі — 35 мм;
- діапазон частот обертання шпинделя — 31,5...1400 хв⁻¹;
- кількість ступенів частот обертання — 12;
- потужність головного електродвигуна — 4,0 кВт;
- конус шпинделя — Морзе 4;
- максимальна осьова сила подачі — до 12 кН.

Застосування двошпиндельної головки дозволяє виконувати одночасне свердління двох отворів **або** комбіновану обробку (наприклад, свердління та зенкерування) за один робочий хід, що особливо важливо при обробці тонкостінних корпусних деталей, схильних до прогинів і вібрацій.

Конструкція двошпиндельної головки

Двошпиндельна свердлильна головка виконана у вигляді накладного вузла, що кріпиться до пінолі основного шпинделя верстата 2Н135 через перехідний фланець з конусом Морзе 4. Основними елементами головки є:

- корпус головки з литого чавуну;
- ведучий вал, що отримує обертання від шпинделя верстата;
- пара циліндричних прямозубих шестерень;
- два робочі шпинделі з індивідуальними підшипниковими опорами;
- регульований механізм установки міжосьової відстані шпинделів.

Передача обертання від шпинделя верстата до робочих шпинделів здійснюється через шестерний двогруповий привід. Передаточне число головки прийняте $i = 1$, що забезпечує однакову частоту обертання інструментів відносно основного шпинделя верстата.

Міжосьова відстань між шпинделями регулюється в межах 40...100 мм, що дозволяє адаптувати головку до різного розташування отворів у тонкостінних деталях типу корпусів, кришок та фланців.

Принцип роботи

Під час роботи обертання від електродвигуна верстата 2Н135 через коробку швидкостей передається на основний шпиндель. Далі обертальний рух передається на ведучий вал двошпиндельної головки, з якого через систему шестерень — на два робочі шпинделі.

Осьова подача здійснюється стандартним механізмом подачі верстата 2Н135 і передається одночасно на обидва шпинделі головки. Значення подачі вибирається в межах 0,1...0,3 мм/об, що є оптимальним для обробки тонкостінних деталей та зменшує ризик їх деформації.

Завдяки одночасній роботі двох інструментів:

- зменшується час обробки деталі майже в 1,8–2 рази;
- знижується нерівномірність навантаження на заготовку;
- підвищується точність взаємного розташування отворів;

- зменшуються вібрації, характерні для тонкостінних елементів.

Обґрунтування застосування для тонкостінних деталей

Для тонкостінних деталей характерна мала жорсткість, тому при звичайному послідовному свердлінні можливе викривлення геометрії або утворення овальності отворів. Використання двошпindelної головки на верстаті 2Н135 дозволяє:

- зменшити кількість установів деталі;
- знизити осьове навантаження на кожний отвір;
- забезпечити симетричний розподіл сил різання.

Таким чином, модернізація верстата 2Н135 шляхом оснащення його двошпindelною свердлильною головкою є технічно доцільною та ефективною для серійної обробки тонкостінних корпусних деталей.

3.5.2 Силевий розрахунок свердлильної головки

Матеріал оброблюваної деталі – легована сталь 40Х-2 з межею міцності $\sigma_d = 610 \text{ МПа}$ та $\text{HB} = 163\text{-}168$. Діаметр отвору 14 мм, глибина свердління – 10мм. Свердла – із швидкорізальної сталі Р6. Приймаємо стійкість свердла $T = 100$ хв. машинного часу. Головка проектується на верстат моделі 2Н135.

Паспортні дані верстата.

- Вибираємо режим свердління. Вибираємо режими різання із нормативних таблиць згідно стійкості свердла:

$$14 \text{ мм } S = 0,8 \text{ мм/об, } V = 17 \text{ м/хв}$$

Відповідно число обертів буде рівно.

$$N_{14} = \frac{1000 \cdot 17}{3,14 \cdot 14} = 386 \text{ об / хв.}$$

При цьому подача інструменту буде:

$$S_{14} = 0,96 \text{ мм / об.}$$

- Визначаємо Р, М та N. Для свердла 14 мм по нормативам знаходимо осьову силу різання, $P_{14} = 320$ кгс,

крутний момент, $M_{14} = 1200$ кгс мм,

необхідна потужність, $N_{14} = 1.6$ л. с.

Тоді для одночасної роботи двох свердел необхідно:

$$P = 2 \cdot P_{14} = 2 \cdot 320 = 640 \text{ кгс};$$

$$N = 2 \cdot N_{14} = 2 \cdot 1.6 = 3.2 \text{ л.с.}$$

При к. к. д. верстата разом із головкою $\eta = 0.7$ необхідна потужність двигуна буде:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N}{\eta} \cdot \frac{3.2}{0.7} = 4.57 \text{ л.с.}$$

- Вибір кінематичної схеми головки. На основі даного матеріалу по оброблюваній деталі і верстату прийнята наступна кінематична схема:

- обертання всіх шпинделів вправо;
- відстань осями шпинделів дозволяє розмістити шестерні в одній площині;
- кожне зубчасте колесо закріплюється утримуючою гайкою.

- Визначення розмірів валів, шпинделів та зубчастих коліс. Найбільшу навантаження нестиме центральний вал, що сполучений із шпинделем верстата. Тому модуль зачеплення всіх зубчастих коліс головки береться навантаження, що буде спричинена на зуб шестерні, який встановлена на цьому валу.

Діаметр ведучого вала знаходимо по величині крутного моменту, що передається в процесі свердління:

$$d_1 = \sqrt{\frac{16 \cdot M_{\text{кр}}}{\pi \cdot [\tau]}}$$

де d_1 - діаметр центрального шпинделя в см;

$[\tau]$ - допустимі напруження кручення в кгс/см²;

$M_{\text{кр}}$ – крутний момент в кгс см

$$M_{kp} = \frac{71620 \cdot N}{n} = \frac{71620 \cdot 4,57}{380} = 861_{кгс \cdot с}.$$

При матеріалі сталь 45 $[\tau] = 1500 \text{ кгс/см}^2$.

Тоді:

$$d_1 = \sqrt{\frac{16 \cdot 861}{3,14 \cdot 1500}} = 30 \text{ мм.}$$

У разі з'єднання зубчастого колеса з ведучим шпинделем за допомогою двох сегментних шпонок, розрахунковий діаметр потрібно збільшувати на подвоєну глибину шпонкового паза. Тоді:

$$d_2 = d_1 + 2e = 30 + 2 \cdot 5 = 40 \text{ мм,}$$

де e – глибина шпоночного пазу в мм.

В конструкції головки приймаємо $d_2 = 17 \text{ мм}$.

Діаметр D направляючої (хвостової) частини робочих шпинделів визначаємо в залежності від діаметра свердла d або по упорному підшипнику на шпинделі. Тому приймаємо рівним $D = 16,8 \text{ мм}$.

Модуль ведучої шестерні робочого шпинделя рекомендується брати в залежності від діаметра свердла. Тому $m = 2 \text{ мм}$.

Діаметр ділильного кола робочого шпинделя розраховуємо за формулою

$$D_0 = D + 2 \cdot e + 6,8 \cdot m = 17 + 2 \cdot 5 + 6,8 \cdot 2 = 46 \text{ мм}$$

де e - глибина шпоночного пазу в мм (5 мм);

m - модуль зачеплення в мм (2 мм).

Ширина зубчатих коліс береться рівною 10 модулям.

Підбір підшипників. Підбір підшипників відбувається за валами на яких вони сидітимуть і після цього перевіряються по коефіцієнту роботостійкості C та заданому строку служби. Для багатошпиндельних головок довговічність приймається 2 – 3 тисячі годин машинного часу. При такій довговічності вони повинні замінюватися через 1 – 1,5 року.

Компоновка головки. Виконується на основі її кінематичної схеми та знайдених розмірів основних деталей. Всі інші розміри беруть конструктивно але дотримуючись стандартів.

Перевірочний розрахунок.

а) виходячи із втомності поверхневого шару металу зубів

$$m_{\text{вд}} = \sqrt[3]{\frac{i+1}{i \cdot \psi} \cdot \left(\frac{180000}{Z \cdot [\sigma]_k} \right)^2 \cdot \frac{N}{n} \cdot \frac{K}{K_v}};$$

б) виходячи із міцності зуба на згин

$$m_{\text{зг}} = 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{455}{Z \cdot \psi \cdot y \cdot [\sigma]_{\text{зг}}} \cdot \frac{N}{n} \cdot \frac{K_{\text{зг}}}{K_v}}.$$

де z - число зубів колеса;

i - передаточне відношення;

ψ - відношення ширини колеса до модуля ;

$[\sigma]_e$ - допустимі навантаження на зминання в кгс/мм²;

K та K_u - коефіцієнти довговічності по контактним напруженням та напруженням згину;

y - коефіцієнт форми зуба;

$[\sigma]_{\text{зг}}$ - допустиме напруження на згин в кгс/мм²;

K_v - коефіцієнт швидкості:

$$K_v = \frac{6}{v + 6} = \frac{6}{406 + 6} = 0.95$$

де v – колова швидкість на колесі в м/с.

При $i = 56/20 = 2,8$; $\psi = 10$; $z = 20$; $N = 0,22$ л.с.; $n = 400$ об/хв.; $K_v = 0,85$;

$K = 1$; $y = 0,102$; $[\sigma]_e = 85$ кгс/мм²; $[\sigma]_{\text{зг}} = 18$ кгс/мм², ми отримаємо:

$$m_{\text{нов}} = \sqrt[3]{\frac{2,8+1}{2,8 \cdot 10} \cdot \left(\frac{180000}{20 \cdot 85} \right)^2 \cdot \frac{0,22}{400} \cdot \frac{1}{0,95}} = 0,94;$$

$$m_{нов} = 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{455}{20 \cdot 10 \cdot 0,102 \cdot 18} \cdot \frac{0,22}{400} \cdot \frac{1}{0,95}} = 0,9;$$

Таким чином, вибраний модуль $m = 1,5$ задовольняє нашу умову по контактній та по напрузі на згин.

Перевірка підшипників кочення виконується по формулі:

$$C = Q \cdot (n \cdot h)^{0.3},$$

Q – умовне навантаження в кгс;

$$Q_{14} = P_{14} \cdot K_{\text{під}}$$

n – число обертів вала в хвилину;

h – довговічність підшипника в годинах;

C – коефіцієнт роботостійкості підшипника;

$$K_{\text{під}} = 1,2.$$

$$Q = 320 \cdot 1,2 = 384$$

Два вихідних шпинделя, що мають $n = 380$ об/хв., мають радіальні підшипники № 104 (6874 - 54) з коефіцієнтом стійкості $C = 20000$; $Q = 384$ кгс., та $h = 1400$ год.

Робочі шпинделі виконуємо із сталі марок 45 і 40Х.

Для зубчастих коліс використовують із сталі 20Х, 12ХН3А, 40Х і сталі 45 при реривестій роботі головки.

Корпуса виливають із сірих чавунів СЧ12 – 28 або СЧ15 – 32, а також в легкі алюмінієві сплави марки АЛ9.

3.5.3. Принцип роботи верстату після вдосконалення.

Механізм подачі шпинделя свердлильного верстата (рис. 3.2) містить шпиндель 9, з'єднаний своїм верхнім кінцем за допомогою коробки швидкостей 15 з електродвигуном 16.

В конічному отворі нижнього кінця шпинделя встановлений конічний хвостовик 8 чашкоподібного циліндричного корпуса свердлильного пристрою. В центральному циліндричному отворі корпуса осерухомого встановлена оправка 4, а між дном корпуса 8 і оправкою змонтована пружина стиску 5. Для обмеження осьового переміщення оправки відносно корпуса використовуються кульки 7, які виступають в середину корпуса і розміщені у фасонних канавках 29, виконані на зовнішній циліндричній частині оправки 4. Для виключення радіального зміщення підшипників 7 передбачена втулка 6. З нижнім конічним кінцем оправки 4 з'єднаний свердлильний патрон 3, в якому закріплене свердло 2, для свердління отвору в оброблюваній деталі 1. На верхній частині шпинделя 9 встановлена осей рухома шестерня 14, яка кінематично зв'язана з шестернями 18 і 19 через зубчасті передачі коробки подач 21 з черв'яком 25. Шестерня 19 з'єднана зі своїм вхідним в коробку подач валом 17 за допомогою електромагнітної муфти 20, кінці котушки якої електрично з'єднані за допомогою проводів 22 і 24 з управляючим і регулюючим по висоті кінцевим вимикачем 28. Рухомий штирь 27 вимикача розміщений під торцем пінолі 12 верстата. Шестерня 19 знаходиться у постійному кінематичному зачепленні з шестернею 18. Черв'як 25 жорстко спряжений з вихідним коробки подач валом 13 і знаходиться в постійному кінематичному зачепленні з черв'ячним колесом 26, яке вільно спряжене з валом 10 рейкової шестерні 11, яка знаходиться в зачепленні з зубами рейки пінолі 12. Черв'ячне колесо з'єднується з валом 10 за допомогою електромагнітної муфти 23. У середині пінолі 12 проходить шпиндель 9. Піноль 12 має можливість синхронного осьового переміщення разом з шпинделем. Для забезпечення високої працездатності приводу подач необхідно правильно вибрати відстань від штиря 27 до торця пінолі 12.

Ця відстань вибирається таким чином, що при подальшому встановленому процесі обробки відстань h від штиря 27 до торця пінолі 12 повинна бути рівна відстані від вершини свердла 2 до початку передвихідної

зони, розміщеної від нижнього торця деталі 1 на відстані $\Delta = (0,2...0,5)D$, де D – діаметр свердла.

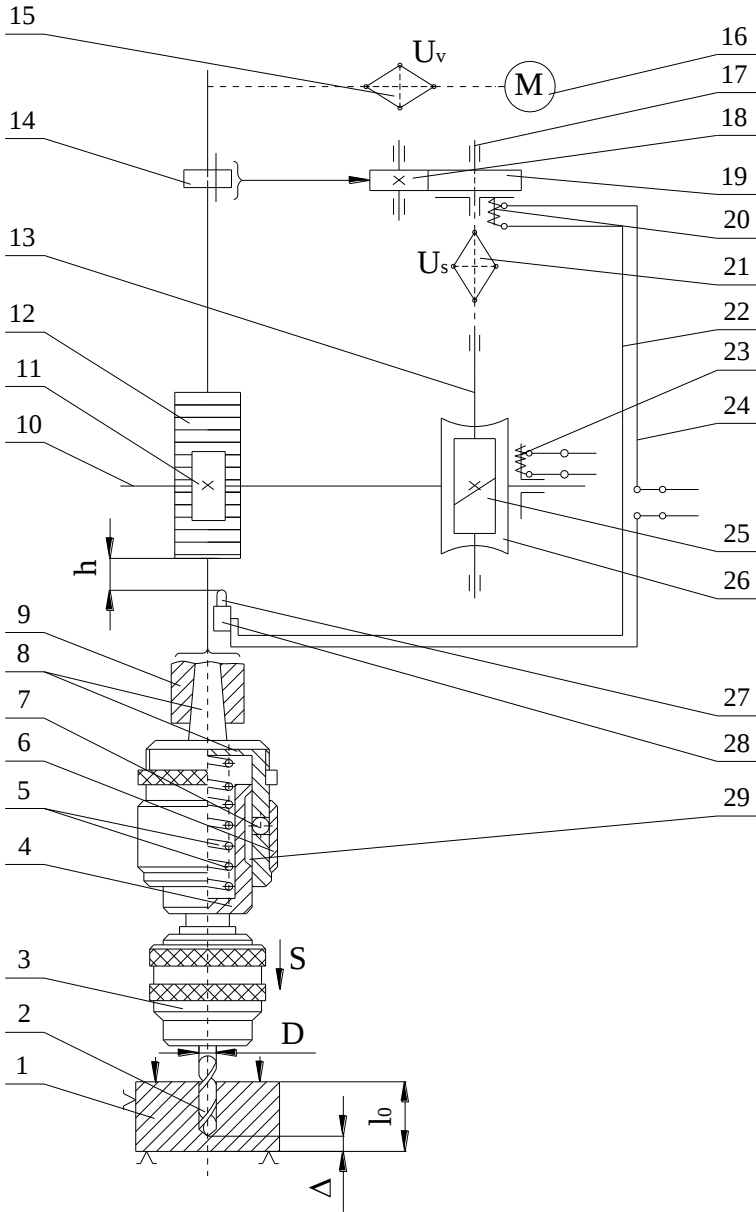


Рисунок 3.2 – Конструктивна схема удосконаленого механізму подач вертикально-свердильного верстата

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1.1. Типова інструкція для обслуговуючого персоналу на випадок виникнення аварії, пожежі

1. При роботі на деревообробних верстатах ситуації, які можуть привести до аварії і нещасних випадків, являються наслідком: ураження електричним струмом, вильоту заготовок та їх осколків, вильоту інструменту, відсутності захисних огорожень.

2. У разі виникнення аварійної ситуації треба негайно відключити верстат від електромережі, загородити небезпечну зону, не допускати в неї сторонніх осіб.

3. Повідомити про те, що сталося, керівника робіт.

4. Якщо є потерпілі, необхідно надавати їм першу медичну допомогу; при необхідності, викликати швидку медичну допомогу.

5. Надання першої медичної допомоги:

5.1. Надання першої медичної допомоги при ураженні електричним струмом:

У разі ураження електричним струмом необхідно негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму, відключивши електроустановку від джерела живлення, а при неможливості відключення – відтягнути його від струмоведучих частин за одяг або застосувавши підручний ізоляційний матеріал. У разі відсутності у потерпілого дихання і пульсу необхідно робити йому штучне дихання і непрямий (зовнішній) масаж серця, звернувши увагу на зіниці. Розширені зіниці свідчать про різке погіршення кровообігу мозку. При такому стані необхідно негайно приступити до оживлення потерпілого і викликати швидку медичну допомогу.

5.2. Перша допомога при пораненні:

Для надання першої допомоги при пораненні необхідно розкрити індивідуальний пакет, накласти стерильний перев'язочний матеріал, що міститься у ньому, на рану і зав'язати її бинтом. Якщо індивідуального пакету якимсь чином не буде, то для перев'язки необхідно використати чисту носову хустинку, чисту полотняну ганчірку і т. ін. На те місце ганчірки, що приходить безпосередньо на рану, бажано накапати декілька крапель настойки йоду, щоб одержати пляму розміром більше рани, а після нього накласти ганчірку на рану. Особливо важливо застосовувати настойку йоду зазначеним чином при забруднених ранах.

5.3. Перша допомога при переломах, вивихах, ударах:

При переломах і вивихах кінцівок необхідно пошкоджену кінцівку укріпити шиною, фанерною пластикою, палицею, картоном або іншим подібним предметом.

Пошкоджену руку можна також підвісити за допомогою перев'язки або хустки до шиї і прибинтувати до тулуба. При переломі черепа (несвідомий стан після удару голови, кровотеча з вух або роту) необхідно прикласти до голови холодний предмет (грілку з льодом або снігом, чи холодною водою) або зробити холодну примочку.

При підозрінні перелому хребта необхідно потерпілого покласти на дошку, не підіймаючи його, чи повернути потерпілого на живіт обличчям униз, наглядаючи при цьому, щоб тулуб не перегинався, з метою уникнення ушкодження спинного мозку.

При переломі ребер, ознакою якого є біль при диханні, кашлю, чханні, рухах, необхідно туго забинтувати груди чи стягнути їх рушником під час видиху.

5.4. Надання першої допомоги при теплових опіках:

При опіках вогнем, парою, гарячими предметами ні в якому разі не можна відкривати пухирі, які утворюються, та обв'язувати опіки бинтом.

При опіках першого ступеня (почервоніння) обпечене місце обробляють ватою, змоченою етиловим спиртом.

При опіках другого ступеня (пухирі) обпечене місце обробляють спиртом, 3%-ним марганцевим розчином або 5%-ним розчином таніну.

При опіках третього ступеня (зруйнування шкіряної тканини) накривають рану стерильною пов'язкою та викликають лікаря.

5.5. Перша допомога при кровотечі:

Для того, щоб зупинити кровотечу, необхідно:

- підняти поранену кінцівку вгору;
- кровоточиву рану закрити перев'язочним матеріалом (із пакета), складеним у клубочок, придавити 2 зверху, не торкаючись самої рани, потримати на протязі 4-5 хвилин; якщо кровотеча зупинилася, то не знімаючи накладеного матеріалу, поверх нього покласти ще одну подушечку з іншого пакета чи кусок вати і забинтувати поранене місце (з деяким натиском);
- при сильній кровотечі, яку не можна зупинити пов'язкою, застосовується здавлювання кровоносних судин, які живлять поранену область, за допомогою згинання кінцівок в суглобах, а також пальцями, джгутом або закруткою; при великій кровотечі необхідно терміново викликати лікаря.

6. У разі виникнення пожежі викликати пожежну частину та приступити до гасіння її наявними засобами пожежогасіння.

7. Виконувати всі вказівки керівника робіт по ліквідації небезпеки.

4.2. БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.2.1. Оцінка стійкості роботи промислового підприємства до впливу вражаючих факторів

Стійкість роботи об'єкта - це здатність в умовах військового часу виготовляти продукцію в запланованому об'ємі і номенклатурі, а при одержанні слабких і частково середніх руйнувань відновлювати своє виробництво в мінімальні терміни. Ціль оцінки стійкості об'єкта полягає у виявленні слабких

його елементів, щоб у подальшому провести інженерно-технічні заходи, спрямовані на підвищення стійкості об'єкта в цілому [25].

Оцінка стійкості роботи об'єкта - це всебічне вивчення підприємства з погляду спроможності його протистояти впливу вражаючих факторів ядерного вибуху, продовжувати роботу і відновлювати виробництво при одержанні слабких руйнувань.

Промислові підприємства відрізняються одне від одного як по конструктивному рішенню, так і по технологічному процесі. Відмінності об'єктів полягають в будинках і спорудах, устаткуванні і технології виробництва, комунально-енергетичних мережах і території, на якій розташований об'єкт. Тому в усіх випадках оцінка стійкості кожного об'єкта має свої особливості і вимагає конкретного підходу до рішення цього питання. У даному випадку розглянемо загальні для всіх об'єктів питання оцінки їх стійкості до впливу вражаючих факторів зброї масового знищення.

Оцінка стійкості роботи об'єкта починається з вивчення району розташування. Об'єкт може знаходитися в місті, за межею його проектної забудови і на деякій віддалі від міста. Досліджується територія району, його структура, щільність і тип забудови, сусідні об'єкти і можливість виникнення на них вторинних чинників поразки. На об'єкті визначаються щільність забудови, розміщення основних будинків і споруджень, що впливають на характер руйнування, можливе утворення завалів і виникнення пожеж. Особлива увага приділяється ділянкам, де можливе виникнення небезпечних вторинних чинників ушкоджень. Беруться на облік усі будинки і споруди, робиться оцінка їх статичної стійкості. Вивчають кожен цех і його окремі елементи як по конструктивному рішенню, так і за матеріалами, що були використані в будівництві.

Розглядаються умови розміщення внутрішнього технологічного устаткування і визначаються види руйнувань і ушкоджень, що можуть мати місце при ядерному вибуху і заваленні огорожувальних конструкцій цехів. Особливо важливо визначити захист цінного й унікального устаткування, насиченість

виробництва автоматикою і можливість продовження виробництва у випадку виходу з ладу контрольно-вимірювальної апаратури. Обстежуються комунально-енергетичні системи об'єкта і робиться оцінка стійкості споруджень і ліній, тобто визначаються параметри вражаючих факторів, при яких комунально-енергетичні мережі одержать ті або інші руйнування.

Визначається забезпеченість працюючих захисними спорудженнями: встановлюється кількість сховищ, укриттів і оцінюються їхні захисні властивості. Вивчається система керування, зв'язку й оповіщення на основі вивчення стану захищених пунктів керування, вузлів і ліній зв'язку. Аналізується система матеріально-технічного постачання і виробничих зв'язків. Встановлюється об'єм запасів і можливих термінів продовження роботи без постачань; визначається відповідність їхньої кількості і номенклатури вимогам, запропонованим до виробництва у військовий час. Оцінюється стійкість складів сировини, комплектуючих виробів, готової продукції й інших матеріалів, а також сховища паливних матеріалів. Досліджується підготовка об'єкту до відновлення виробництва у випадку одержання слабких або середніх руйнувань. Аналіз виробничої діяльності об'єкта дозволяє виявити слабкі елементи, ділянки і підготувати план підвищення стійкості їх роботи і план відновлювальних робіт, забезпечити їх будівельно-монтажною і проектною документацією.

4.2.2. Оцінка стійкості роботи об'єкта до впливу ударної хвилі

Критерієм для визначення стійкості промислового підприємства до впливу ударної хвилі ядерного вибуху є розмір надлишкового тиску, при якому будинки і спорудження об'єкта зберуться або одержать слабкі і середні руйнування.

При оцінці стійкості об'єкта необхідно виявити найбільш уразливі елементи і ділянки, від яких залежить робота всього підприємства. Після оцінки окремих споруджень оцінюється об'єкт у цілому. При цьому стійкість об'єкта визначається по тій будівлі або спорудженню, що руйнується при найменшому надлишковому тиску. Після оцінки стійкості об'єкта намічаються заходи, що необхідно провести для підвищення стійкості об'єкта до впливу ударної хвилі

ядерного вибуху. Для цього визначають доцільні межі підвищення стійкості кожної споруди [25] режимами роботи об'єкта в різних умовах радіоактивного зараження.

4.2.3. Оцінка стійкості об'єкта до впливу вторинних вражаючих факторів

До вторинних вражаючих факторів відносяться аварії, пожежі, вибухи, затоплення, зараження атмосфери і місцевості, а також завалення ушкоджених конструкцій. Масштаби вражаючої дії від вторинних вражаючих факторів в окремих випадках можуть перевершувати безпосередню вражаючу дію ядерного вибуху. Причинами виникнення вторинних вражаючих факторів є руйнування, викликані ядерним вибухом на об'єкті або на сусідніх із ним об'єктах, що виявилися в зоні безпосередньої дії ядерного вибуху, тобто внутрішні і зовнішні джерела.

При оцінці стійкості об'єкта до впливу вторинних вражаючих факторів ядерного вибуху визначаються різні джерела їхнього виникнення. У першу чергу виявляються внутрішні джерела, наявні на самому підприємстві. Це можуть бути резервуари і ємкості з легкозаймистою рідиною і газами, склади вибухових речовин, вибухонебезпечні технологічні установки і комунікації, руйнування яких викликає пожежі, вибухи або загазованість, легкозаймисті будівлі і спорудження. Зовнішніми джерелами вторинних вражаючих факторів можуть бути близько розташовані хімічні і нафтопереробні заводи, нафтові і газові промисли, холодильники, гідровузли, склади нафтопродуктів і інших пальних рідин й інші об'єкти. Одночасно з врахуванням усіх можливих джерел вторинних вражаючих факторів визначається характер їхнього впливу на даний об'єкт і встановлюється, який вид ушкоджень і руйнувань очікується, а також час і тривалість їхньої дії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У роботі виконано аналіз сучасного стану та проблем свердління отворів у тонкостінних деталях, встановлено, що основними чинниками, які обмежують точність і продуктивність обробки, є низька жорсткість заготовок, значні осьові сили різання, вібрації та нестабільність режимів різання. Обґрунтовано доцільність модернізації універсального вертикально-свердлильного верстата 2Н135 з урахуванням специфіки обробки деталей типу «маточина».

2. Проведено аналіз технологічності конструкції деталі «Маточина» КС6Б–75.605, який показав, що її геометрія, матеріал і система базування є придатними для обробки на модернізованому свердлильному верстаті з використанням спеціального технологічного оснащення. Встановлено, що конструкція деталі характеризується достатнім рівнем технологічності та не потребує внесення змін для реалізації запропонованих технічних рішень.

3. На основі структурного підходу виконано розробку та аналіз компоновальної схеми верстата, обґрунтовано вибір структурно-кінематичної схеми привода головного руху. Показано, що застосування тригрупового привода дозволяє сформувати розширений і ущільнений ряд частот обертання шпинделя, необхідний для стабільного свердління тонкостінних деталей при малих подачах.

4. Побудовано структурну сітку та графік частот обертання шпинделя для верстата 2Н135 з урахуванням вимог до обробки тонкостінних деталей. Доведено, що запропонований ряд частот обертання забезпечує можливість точного підбору режимів різання, зменшує стрибки між суміжними ступенями швидкості та сприяє зниженню вібрацій у процесі свердління.

5. Виконано кінематичні та силові розрахунки привода головного руху, які підтвердили достатність обраної потужності електродвигуна та раціональність прийнятих передаточних відношень. Показано, що для

свердління тонкостінних деталей визначальним є не збільшення потужності привода, а забезпечення стабільності обертання шпинделя при малих осьових навантаженнях.

6. Розроблено та проаналізовано конструкцію двошпиндельної свердлильної головки, призначеної для встановлення на верстат 2Н135. Застосування багатошпиндельного інструментального оснащення дозволяє виконувати одночасне свердління двох отворів, зменшити кількість установів деталі, підвищити продуктивність обробки та забезпечити точність взаємного розташування отворів.

7. Запропоновано спеціальне кондукторне пристосування для свердління отворів $\varnothing 14 \pm 0,035$ у тонкостінній деталі типу «маточина», яке забезпечує точне базування деталі, надійне притискання під час обробки та зменшення деформацій під дією осьових сил різання. Конструкція пристосування забезпечує усунення шести ступенів вільності деталі та стабільність процесу свердління.

8. Особливу увагу приділено розгляду питань охорони праці та безпеки життєдіяльності. У ході роботи розроблено заходи щодо підвищення безпеки експлуатації обладнання, зниження рівня виробничих ризиків та створення комфортних умов праці для операторів верстатів.

9. У цілому результати виконаної роботи підтверджують технічну доцільність і ефективність модернізації вертикально-свердлильного верстата 2Н135 шляхом удосконалення його кінематичної структури та застосування спеціального інструментального оснащення і пристосувань. Запропоновані рішення забезпечують підвищення продуктивності, точності та надійності процесу свердління тонкостінних деталей і можуть бути рекомендовані для впровадження в умовах серійного машинобудівного виробництва.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Analysis of the accuracy, stiffness, and stability of antennas using simulation modeling / Taras Dubynyak, Volodymyr Nevozhai, Andrii Remez, Valerriy Bukhovets, Andrii Senyk // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2024. — Vol 115. — No 3. — P. 30–43.
2. Harmonic-dispersion analysis of the shape accuracy of the rolling bushings of drive roller and bushing chains / Senyk A., Kovalov V., Klymenko G., Vasylichenko Y., Shapovalov M., Kobelnyk O. // 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. 502-507.
3. The influence of titanium as a desferoidizing element on the stability of production of magnesium cast irons with compacted graphite / A. Senuk, L. Slobodyan, V. Aulina, V. Kropivnya, O. Kuzyka, O. Lyashuk, M. Bosyia, Y. Vovk, A. Kropivna, M. Sokolc // Tribology in Industry. - Kragujevac : University of Kragujevac, 2021. - Vol. 43. - № 4. - P. 654-666.
4. 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.
5. P. Kryvyy, P. Kryvinsky, V. Bodnar, I. Sotnyk, A. Senuk. "Theoretical and Experimental Substantiation of Angle Orientation of Rolling Bushings of Roller and Bushing Chains". Paper no. MSEC 2007-31211 International Manufacturing Science and Engineering conference. October 15-18, 2007, Atlanta, Georgia, USA, pp. 623-627.
6. V. Krupa et al. Improved Method for Determining the Feed Influence on the Tangential Cutting Force During Re-drilling, Countersinking and Boring Based on the

Small Sample Theory. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2024.
URL: <https://doi.org/10.3311/ppme.29952> (date of access: 22.05.2024).

7. Modeling of a lathe bed using the method of topological optimization / Andriy Nahalyuk, Volodymyr Krupa // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2023. — Vol 111. — No 3. — P. 67–75.

8. Кривий П. Д. Дослідження макрогеометрії поперечних перерізів циліндричних поверхонь на прикладі шкворневих втулок / П. Д. Кривий, А. А. Сеник, В. О. Дзюра, В. Р. Кобельник // Збірник тез доповідей 7-мої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»: 22–23 вересня 2016 р.: тези доп. – Херсонська державна морська академія, 2016. – С. 188 – 189.

9. Кривий П. Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищеної якості згортих втулок : монографія / Кривий П. Д., Сеник А. А. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 232 с.

10. КРУПА, В. В.; ГАГАЛЮК, А. В.; СЕНИК, А. А. ВПРОВАДЖЕННЯ ІНСТРУМЕНТАРІЮ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ В СИСТЕМІ AUTOCAD ПРИ НАВЧАННІ ІНЖЕНЕРІВ. *Сучасні проблеми моделювання*, 2025, 27: 96-108.

11. Боженко Л.І. Технологія машинобудування. Проектування та виробництво заготовок.: Львів: Світ, 1996. 368 с.

12. Бочков В. М., Сілін Р. І., Гаврильченко О. В. Металорізальні верстати : навч. посіб.: Львів Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. 268 с.

13. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції 28 – 31 травня 2025 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ-Тернопіль-Свалява: ДДМА, 2025. — 264 с

14. Вікіпедія. Економічний ефект. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Економічний_ефект (дата звернення: 16.12.2025).

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

16. Гейчук В.М. Функціональне проектування верстатів, роботів та машин в Autodesk Inventor (Частина I): навч. посіб. Навчальне мережне електронне видання. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 394 с.

17. Голінько В. І. Охорона праці : підручник. Київ : Алерта, 2014. 264 с.

18. Данильченко Ю.М., Шевченко О.В., Ковальов В.А., Волошин В.Н. Металообробне обладнання. Кінематичний аналіз металорізальних верстатів: навч. посіб.: К.: НТУУ «КПІ», 2007. 60 с.

19. Жидацький В.Ц., Джигирей В.С., Мельников О.В. Основи охорони праці: навчальний посібник.: Львів: Афіша, 2000. 350 с.

20. Залога В. О. Розрахунок режимів різання при точінні, свердлінні, фрезеруванні : навчальний посібник. Київ : ІСІ, 1994. 176 с.

21. Запорожець О. І., Протоєрейський О. С., Франчук Г. М., Боровик І. М. Основи охорони праці : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2009. 264 с.

22. Кваліфікаційна робота магістра: структура, вимоги до виконання та захист. Методичні рекомендації для здобувачів другого (магістерського) 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.: В. Р. Кобельник, В. В. Крупа, Р. Я. Лещук, А. А. Сенник, Р. А. Складаров, В. В. Шанайда, А. В. Гагалюк, В. М. Буховець. – Тернопіль : ТНТУ, 2023. 66 с.

23. Кобельник В. Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. Тернопіль : [б. в.], 2013. 21 с.

24. Кривий П. Д., Кобельник В. Р., Кузьмін М.І. Про характер зміни подачі при виході інструменту із тіла заготовки в процесі свердління наскрізних отворів. *Вісник ТНТУ : Науковий журнал.*: Тернопіль : ТНТУ, 2012. № 4 (68). С. 114–127.

25. Кривий П.Д., Кобельник В.Р. Конструкторсько-технологічне забезпечення процесу свердління наскрізних отворів. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. праць. : Краматорськ, 2011. Вип. № 28. С. 77–85.

26. Крупа В.В. Теорія технічних систем: особливості побудови, створення та розвитку : навч. посіб. Тернопіль : ФОП Осадця, 2023. 308 с.

27. Крупа В.В., Кобельник В.Р. Призначення режимів різання при точінні табличним методом : Навчальний посібник - практикум. Тернопіль : ФОП ПАЛЯНИЦЯ, 2025. 144 с

28. Паливода Ю.С., Дячун А.С., Лещук Р.Я. Інструментальні матеріали, режими різання і технічне нормування механічної обробки: навчальний посібник.: Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.

29. Пат. 33445 Україна, МПК В 23 В 47/00. Механізм подач свердлильного верстату / Кривий П. Д., Кобельник В. Р., Кузьмін М. І.; заявник та патентовласник Терн. нац. техн. універ. ім. І. Пулюя. – № 200801364; заявл. 04.02.2008; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 8.

30. Пат. 77698 Україна, МПК (2013.01) В 23 В 47/00. Пристрій для свердління наскрізних отворів / Кривий П. Д., Кобельник В. Р., Кузьмін М. І.; заявники і патентовласники Кривий П. Д., Кобельник В. Р., Кузьмін М. І. № u201209347; заявл. 30.07.2012; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4.

31. Польщин К.С. Оптимізація компоувальної схеми проектованого верстата / Польщин К.С., Фецович М.Р. // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIV міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11-12 грудня 2025) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2025 – 593.

32. Сенік А.А. Визначення найімовірнішої довжини заготовки для згортної втулки / Оліховський В. // Міжнародна студентська науково- технічна конференція „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 27-28 квітня 2023. — Т.: ТНТУ, 2023. — С. 248–249. —(Механічна інженерія).

33. Сенік А. А. Вплив орієнтації згортних втулок на підвищення точності

контактних кроків привідних роликів втулкових ланцюгів / А. А. Сеник, В. Б. Котильницький // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 6-7 грудня 2023 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2023. — С. 117. — (Сучасні технології в будівництві, машино- та приладобудуванні).

34. Сеник А. Експериментальне дослідження впливу радіуса транспортного каналу і способу базування на відхилення від круглості згортних втулок / Атаманчук О., Дмитраш О. // Міжнародна студентська науково-технічна конференція „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 27-28 квітня 2023. — Т.: ТНТУ, 2023. — С. 208–209. — (Механічна інженерія).

35. Сеник А.А. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищення точності форми згортних втулок / Сеник А.А. // Збірник наукових праць «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем» ДДМА. — Краматорськ, 2017. — Вип. № 41, — С. 46 – 55.

36. Сеник А.А. Експериментальне дослідження ступеня зміцнення внутрішньої циліндричної поверхні згортних втулок сформованих поверхнево-пластичним деформуванням / А. А. Сеник, І. В. Коваль // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої пам'яті професора Гевка Богдана Матвійовича „Проблеми теорії проектування та виготовлення транспортно-технологічних машин“, 23-24 вересня 2021. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2021. — С. 40–41.

37. Сеник А.А. Технологічне забезпечення виготовлення згортних втулок підвищеної точності форми і якості: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / А.А. Сеник. — Тернопіль, 2018. — 21 с.

38. Сеник А.А. Динамічні характеристики шпиндельного вузла з керованим натягом токарного верстата з ЧПК / А.А. Сеник, І.Т. Ярема, В.В. Крищишин // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (11-12 грудня 2024 р.). — Тернопіль: ТНТУ, 2024. — С. 197.