

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет конструювання та дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Конструювання машин і обладнання

(назва кафедри)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН

(ПІБ)

(підпис)

“ ____ ”

____ 2026 р.

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ БАКАЛАВРА)**

на тему: Розробка конструкції верстату з числовим програмним керуванням

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(код і назва)

Гарант освітньої програми

Доктор технічних наук, професор

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Булгаков В.М.

(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

(Керівник дипломного проєкту бакалавра)

Кандидат технічних наук, доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Крушельницький В.В.

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Топоринський В. І.

(ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Конструювання машин і обладнання

Д.Т.Н., професор Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“ ” 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Топоринського Віталія Ігоровича
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра) **РОЗРОБКА
КОНСТРУКЦІЙ ВЕРСТАТУ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “15” квітня 2026 р. №1044 «С»

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру _____
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра)

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз літератури
2. Запропонувати конструкцію верстату з числовим програмним керуванням
3. Виконати розрахунки механізмів верстату з числовим програмним керуванням
4. Виконати економічне обґрунтування
5. Розглянути питання охорони праці
6. Висновки

Перелік графічних документів (за потреби)

1. Загальний вигляд верстату з числовим програмним керуванням
2. Деталювання

Дата видачі завдання “20” квітня 2026 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи _____ Крушельницький В. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Топоринський В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1	6
1.1. Призначення та класифікація верстатів з ЧПК	6
1.2. Принцип роботи верстату з ЧПК	12
1.3. Теоретичний аналіз кінематичних схем та механізмів.....	17
1.4. Обґрунтування розробки верстату з ЧПК	21
РОЗДІЛ 2	24
РОЗРОБКА ЛАЗЕРНОГО ГРАВЕРА	24
2.1. Розрахунок параметрів для розробки лазерного гравера	24
2.1.1. Розрахунок геометричних параметрів та робочої зони	24
2.1.2. Кінематичний розрахунок приводів робочих органів	25
2.1.3. Розрахунок міцності конструкції	32
2.1.4. Розрахунок міцності деталей, виготовлених методом FDM.....	37
2.1.5. Розрахунок точності та експлуатаційних параметрів.....	38
2.2. Розробка конструкції лазерного верстата з ЧПК	40
РОЗДІЛ 3	47
ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	47
3.1. Розрахунок витрат на оплату праці розробника.....	47
3.2. Розрахунок витрат на матеріали та комплектуючі вироби	48
3.3. Розрахунок витрат на енергоспоживання та накладні витрати	50
РОЗДІЛ 4	53
ОХОРОНА ПРАЦІ	53
4.1 Основні положення.....	53
4.2 Види небезпеки	53
4.3 Нормативно-правова база	55
4.4. Заходи безпеки	55
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Топоринський В.І.						
Перевір.		Крушельницький В.В.						
Н. Контр.								
Затверд.								
					Літ.		Арк.	Аркушів
							3	62
					Зміст			
					НУБіП України			

РЕФЕРАТ

Мета бакалаврської роботи полягає у розробці конструкції малогабаритного лазерного верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК), що застосовується при створенні елементів безпілотних літальних апаратів. Дипломний проєкт включає 62 аркуші, пояснювальну записку та графічну частину.

Пояснювальна записка складається з чотирьох розділів:

У розділі «Огляд літератури» проведено аналіз технологій обробки матеріалів, розглянуто класифікацію, принцип дії та конструктивні особливості сучасних верстатів з ЧПК. Проаналізовано ринок елементів верстату, особливості та проблеми, пов'язані з розробкою, та запропоновано вирішення цих проблем.

У розділі «Розробка лазерного верстата з ЧПК» здійснено вибір і розрахунок основних компонентів верстата. З урахуванням розрахунків було підібрано стандартні компоненти та розроблено конструкцію верстату.

У розділі «Економічна частина» представлено розрахунок економічної доцільності розробки лазерного ЧПК-верстата. Визначено витрати на виготовлення, розраховано собівартість його експлуатації в умовах виробництва та проведено порівняльний техніко-економічний аналіз із промисловими аналогами.

Розділ «Охорона праці» описує основні вимоги безпеки під час використання лазерного верстата з ЧПК. Проаналізовано потенційні ризики розробленої архітектури, наведено чинні нормативно-правові документи та розглянуто комплекси безпеки.

Ключові слова: лазерний верстат, ЧПК, лазер, конструкція, верстат, розробка.

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			
Розроб.		Топоринський В.І.					
Перевір.		Крушельницький В.В.					
Н. Контр.							
Затверд.							
					РЕФЕРАТ		
					Літ.	Арк.	Аркушів
						4	62
					НУБіП України		

ВСТУП

Технологія автоматичного виробництва відіграє значну роль у сучасному світі, забезпечуючи не лише високу ефективність, а й точність та швидкість обробки матеріалів. Найпоширенішим рішенням у цій сфері є верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК). Завдяки комп'ютерному керуванню вони виконують складні технологічні операції без (або мінімального) втручання оператора та забезпечують стабільну якість виготовлення деталей.

ЧПК-верстати широко використовуються в машинобудуванні, електроніці, приладобудуванні, а також у сферах прототипування та навчальних проєктах. Тому вони потребують постійного вдосконалення з метою підвищення продуктивності та ефективності виробництва й підвищення якості продукції. Також увагу варто приділяти компактним настільним конструкціям верстатів, які здатні працювати в навчальних закладах, лабораторних умовах або невеликих виробництвах.

Головний принцип роботи таких верстатів полягає у переміщенні інструменту по всіх трьох осях координат (X, Y, Z) по напрямних. Каретка з інструментом переміщується по верстатному профілю завдяки роликам. Рух робочих органів верстата забезпечується двигунами, керування якими здійснюється електронним контролером відповідно до заданої програми.

Верстати з числовим програмним керуванням часто використовуються для серійного виробництва. Така конструкція поєднує жорсткість, точність та оптимальну вартість обладнання, а її простота забезпечує легкість експлуатації.

Мета даної роботи полягає у розробці конструкції верстату з числовим програмним керуванням.

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	ВСТУП					Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Топоринський В.І.										
Перевір.		Крушельницький В.В.									5	62
										НУБіП України		
Н. Контр.												
Затверд.												

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Призначення та класифікація верстатів з ЧПК

Сучасне машинобудування та прототипування неможливо уявити без систем числового програмного керування. Основне призначення верстатів з ЧПК полягає в автоматизації циклу обробки матеріалів з мінімальним втручанням оператора, що забезпечує високу повторюваність деталей і точність, недосяжну для ручних верстатів.

Верстат з числовим програмним керуванням - це автоматизований верстат, який може використовувати систему керування для автоматичної обробки деталей відповідно до керуючої програми. Такі верстати здатні виконувати обробні та виробничі завдання, наприклад, свердління, фрезерування та гравірування, які широко використовуються у виробничому секторі та мають такі якості, як висока автоматизація й точність.

Трансформація сучасного виробничого сектору в рамках концепції “Індустрії 4.0” зумовила стійкий попит на децентралізацію виробничих потужностей, головним наслідком цього процесу стала поява та стрімке розповсюдження малогабаритних систем із ЧПК, що орієнтуються на прототипуванні, серійному виробництві та освітніх цілях.

Класифікація сучасного обладнання з ЧПК є досить багатогранною. Якщо взяти за технологічним призначенням, то найпоширеніші верстати будуть: токарні (рис. 1.1), фрезерні, свердлильні, лазерні та плазмові [1].

Пристосування з ЧПК можна розділити на два типи відповідно до процедур обробки: звичайні називають «стандартним верстатом з ЧПК» та «обробним центром з ЧПК».

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Топоринський В.І.			РОЗДІЛ 1		
Перевір.		Крушельницький В.В.					
Н. Контр.							
Затверд.							
					Лім.	Арк.	Аркушів
						6	62
					НУБіП України		

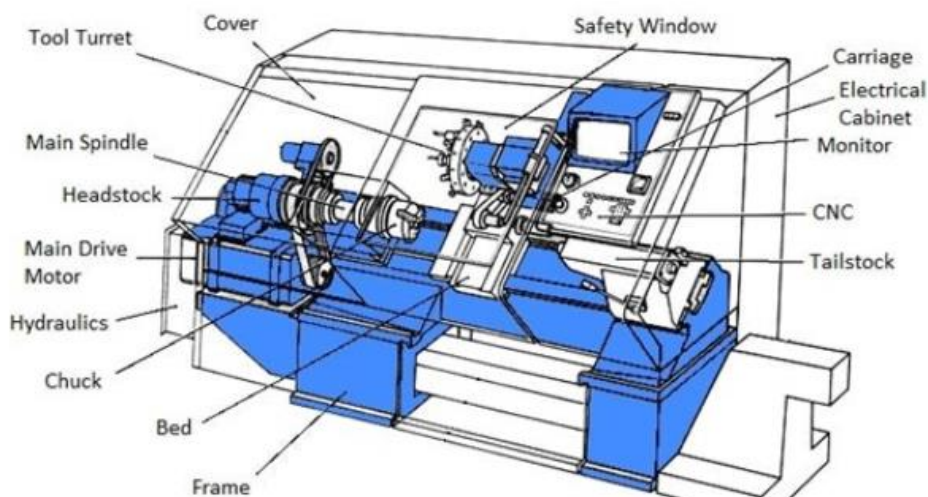


Рис. 1.1. Компоненти токарного ЧПК верстату [2].

Термін “стандартні верстати з ЧПК” відноситься до автоматизованих машин, таких як фрезерні верстати з ЧПК, токарні верстати з ЧПК, свердлильні верстати з ЧПК, шліфувальні верстати з ЧПК і зубчасті верстати з ЧПК, які досягають цифрового керування за один крок технологічної обробки але автоматизація стандартних верстатів з ЧПК все ще відсутня; затискання деталей і зміна інструменту все одно повинні виконуватися вручну на відміну від обробного центру.

Обробний центр (рис. 1.2) розроблений переважно на основі фрезерних машин з ЧПК і має можливість автоматичної заміни інструментів для обробки та об’єднує можливості як і свердлильних, так і розточувальних та фрезерних верстатів в одному блоці. Більшість поверхонь обробки деталей можна обробити після того, як їх один раз закріплять у верстаті [3].

Також верстати класифікують на 8 типів за кількістю осей руху:

- 2-осьовий верстат з ЧПК виконує лише двовимірну обробку площин, він переважно використовується для токарної та фрезерної обробки.
- 3-осьовий верстат з ЧПК може виконувати тривимірну обробку площин і користується більшою популярністю на відміну від 2-осьового верстату.

Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ

Арк.

7

- 4-осьовий верстат з ЧПК окрім функції обробки 3 осей, може також робити обертальний рух, наприклад, для п'ятиосьової тривимірної обробки.

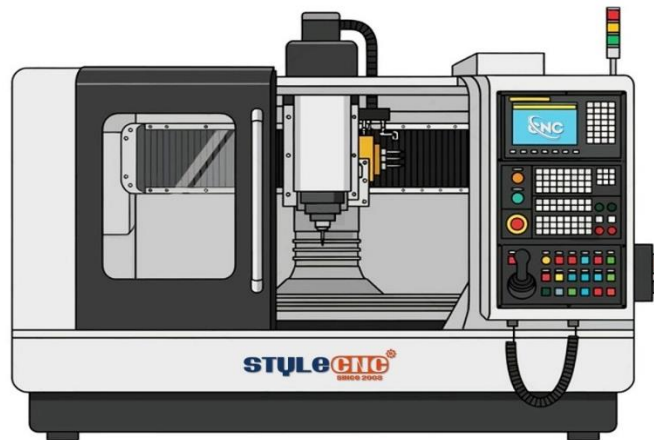


Рис. 1.2. Обробний центр з ЧПК [4].

- 5-осьові верстати з ЧПК виконують роботу з осями руху в напрямках X, Y, Z і A, B, вони використовуються переважно для обробки більш складної високоточної продукції.
- 6-осьові верстати з ЧПК можуть одночасно обертати робочий стіл і різальний інструмент, таким чином можна створювати надскладні форми та елементи з досить високою точністю та швидкістю, що позначається на вартості виготовленої продукції.
- 7-осьовий верстат з ЧПК має додаткову вісь, призначену для обертання важеля (вісь E), три традиційні осі для обертання заготовки та три осі для руху різального інструменту.
- 9-осьовий верстат з ЧПК об'єднує 5-осьовий фрезерний верстат і 4-осьовий токарний верстат в одну систему, фреза обробляє поверхню одночасно з токарним верстатом.
- 12-осьовий верстат з ЧПК оснащений двома різучими головками, такий верстат виконує операції швидко з високою точністю.

За траєкторіями руху верстати з ЧПК прийнято розділяти на 3 типи: верстат з ЧПК з точковим, лінійним та контурним керуванням. У точковому керуванні здійснюється контроль точного розташування рухомих частин верстату з точки на точку. Сама обробка здійснюється під час руху між точками. Попри це, траєкторія руху між точками не контролюється. Самі верстати включають свердлильні, фрезерні та штампові верстати. На відміну від точкового керування в лінійному (також називають верстати з паралельним керуванням), окрім контролю позиціонування між точками, також контролюється їх траєкторія, оскільки головна вимога це паралельність осі координат. Такі верстати переважно обробляють саме прямокутні та ступінчасті деталі, тому цю функцію беруть на себе токарні, фрезерні та шліфувальні верстати. Якщо брати верстат з контурним керуванням (також їх називають ЧПК безперервного керування), в них переміщення та швидкість двох або більше координат руху виконуються одночасно. Саме це висуває високі вимоги до системи з ЧПК, оскільки вона має не лише послідовно виготовляти деталь, а й обчислювати кожен рух осей координат та на їх основі виконувати поставлене завдання.

У бюджетних верстатах з числовим програмним керуванням рушійним елементом системи керування є переважно кроковий двигун (рис. 1.3) [5].



Рис. 1.3. Будова серводвигуна [5].

Керування з відкритим контуром має низьку вартість, а налагодження та обслуговування доволі зручні. Проте загальна точність контролю низька. Таке керування використовується переважно у верстатах, де немає потреби у високій точності. Інколи розглядають варіант удосконалення старих верстатів із числовим програмним керуванням. Якщо розглядати систему із замкнутим контуром, то, на відміну від розімкнутого, використовується пристрій визначення лінійного переміщення, встановлений на робочому столі верстата, для безпосереднього контролю фактичного значення переміщення робочого столу. Контроль із замкнутим контуром також передбачає контроль швидкості, що зменшує її коливання під час подачі заготовки. Замкнута система керування має досить високі технічні вимоги та витрати, на відміну від розімкнутої. Також ця система має досить складне обслуговування і налагодження. Зазвичай ця система використовується в верстатах із високими вимогами до точності, переважно в прецизійних розточувальних та фрезерних верстатах, токарних верстатах із високою точністю, а також у прецизійних обробних центрах. Якщо брати гібридну систему керування, то сам пристрій для визначення кутового переміщення встановлюють на кінці ходового гвинта або двигуна. Рухомі частини контролюються різницею, яка є результатом порівняння її зі значенням вхідної команди.

Якщо узагальнити то двигун і пристрій вимірювання кутового переміщення побудовані як одне ціле, що спрощує архітектуру системи та робить налагодження простими.

Для того, щоб задовольнити потреби виробництва та оптимізувати витрати й ефективність, вибір верстату з ЧПК вимагає врахування декількох параметрів, таких як складність заготовки, вимоги до обробки, точність і якість поверхні та тип матеріалу.

Лазерний верстат з числовим програмним керуванням (рис. 1.4) є конструкційно оптимізованим і модульним, на відміну від класичних промислових зразків, де домінує переважно жорсткість конструкції за рахунок її маси. Сучасні розробки базуються на принципах вагової

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		10

декомпозиції. Даний підхід забезпечує зручність конструкції, особливо до модернізації та масштабування робочого поля без докорінної зміни архітектури верстата.



Рис. 1.4. Лазерний верстат з ЧПК [1].

Значну роль відіграє інтеграція апаратних і програмних платформ. Суттєвий поштовх розвитку в цій галузі дали проекти з відкритим кодом, де використовуються мікроконтролери на базі архітектур AVR і ARM, що дозволяє значно знизити вартість розробки. Перехід від закритих застарілих систем до гнучких алгоритмів керування, найкращим прикладом є GRBL, який дозволяє реалізувати прецизійне керування кроковими двигунами в режимі реального часу, мінімізуючи при цьому витрати на апаратну частину верстатів [6].

Застосування крокових двигунів разом з пасовими передачами дозволяє досягати переміщення на рівні мікронних значень, що є цілком достатнім для задач лазерної обробки та фрезерування [7].

Варто зазначити, що незалежно від прогресу, проблема з забезпеченням вібростійкості легких конструкцій при збільшенні швидкостей залишається відкритою, що зумовлює необхідність проведення в подальшому розрахунків жорсткості та оптимізації кінематичних схем.

1.2. Принцип роботи верстату з ЧПК

До складу машини з числовим програмним керуванням входять механічна частина, кінцевим ланцюгом якого є робочий орган, привод, що включає силові перетворювачі й виконавчі двигуни, пристрій комп'ютерного керування верхнім рівнем для котрого є людина-оператор, або інша електронно обчислювальна машина, що входить у комп'ютерну мережу, сенсори, які призначені для передачі в пристрій керування інформації про фактичний стан блоків машини й рух мехатронної системи [8].

Після фіксації виробу та встановлення елементів механічної обробки, оператор на блоці керування задає параметри виробу, вибирає алгоритм обробки та відповідний режим роботи обладнання для досягнення бажаних результатів. Принцип роботи сучасного малогабаритного обладнання з числовим програмним керуванням базується на концепції багаторівневого перетворення цифрової інформації на механічну енергію цілеспрямованого переміщення. Розглядаючи об'єкт проектування як складну мехатронну систему, доцільно розділити опис принципу його роботи на чотири взаємопов'язані підсистеми: інформаційну, обчислювальну, енергетичну та кінематичну.

Функціонування верстата починається задовго до початку роботи приводів. Спочатку створюється математична модель об'єкта, який планується виготовити. Система оперує не пікселями, а координатами точок, радіусами дуг і векторами. Далі виконується технологічне планування САМ, система розраховує не лише траєкторію, а й швидкість подачі, глибину врізання та інтенсивність енергетичного впливу для лазера. Після цього виконується постпроцесування, на цьому етапі відбувається переклад

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		12

універсальної траєкторії на мову конкретного контролера найчастіше використовують ISO 6983 (хоча у Європі більш сучаснішим вважається ISO 14649) або G-код (рис. 1.5), але існує велика кількість стандартів. Унікальність кожної конструкції верстата вимагає адаптації команд під конкретні прискорення та обмеження робочого поля.



Рис. 1.5. Використання G-коду на ЧПК верстаті [9].

Серцем принципу роботи є процес лінійної та кругової інтерполяції. Оскільки кроковий двигун являє собою дискретний привід, то будь-яка похила лінія або коло є набором мікроскопічних сходинок.

Алгоритм Брезенхема (рис. 1.6) - це метод у комп'ютерній графіці, який визначає, які точки (пікселі) двовимірної сітки слід заповнити, щоб створити зображення, максимально наближене до прямої лінії між двома точками [10].

Контролер використовує алгоритми для визначення, на який двигун осі X чи Y подати керуючі сигнали, щоб відхилення від ідеальної прямої було мінімальним. Для запобігання пропуску кроків приводи не запускаються одразу на повну швидкість. Принцип роботи передбачає розрахунок трапецеїдального або S-подібного профілю швидкості, де на початку та наприкінці кожного відрізка закладаються фази розгону та гальмування [12].

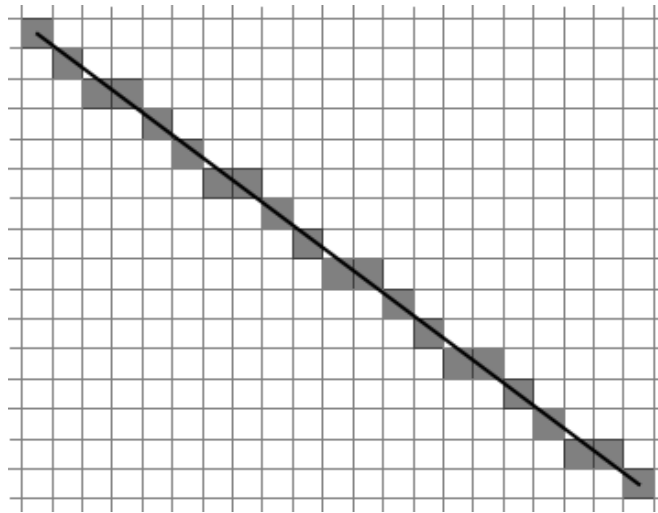


Рис. 1.6. Принцип роботи алгоритму Брезенхема [11].

Невід'ємною частиною принципу роботи також є те, як електрична частина перетворюється на механічний рух. В спроектованому верстаті реалізовано принцип PWM-регулювання [13]. Драйвер не просто подає напругу, а модулює її таким чином, щоб вектор магнітного поля статора зупинявся у проміжних положеннях між фізичними полюсами ротора. Саме це дозволяє ділити стандартний крок двигуна на мікрокроки. У результаті отримуємо підвищення плавності руху, зменшення резонансних явищ на низьких швидкостях та підвищення роздільної здатності позиціонування до значень, що вимірюються десятками мікрометрів.

Механічний принцип базується на перетворенні обертального руху вала двигуна на лінійне переміщення порталу та каретки. Для цього використовуються пасові передачі, що працюють за принципом гнучкого зв'язку, де зубчастий ремінь зачеплюється зі шківом. Відсутність люфтів забезпечується за рахунок натягу ременю. Верстатний профіль з V-Slot виконує роль напрямної призми, що автоматично центрує ролик і розподіляє навантаження, мінімізуючи тертя та знос.

Якщо розглядати специфіку лазерного верстата, у якому інструмент не торкається деталі, а принцип роботи полягає у фокусуванні високоенергетичного когерентного променя у точку, то у такому випадку

реалізовується фототермічний ефект, де енергія фотонів поглинається матеріалом, викликаючи його миттєве нагрівання, плавлення або сублімацію [14]. Цей принцип роботи вимагає, щоб потужність лазера змінювалася пропорційно швидкості. Якщо верстат сповільнюється під час повороту, система ЧПК автоматично знижує коефіцієнт заповнення ШІМ-сигналу, щоб запобігти надмірному обвуглюванню країв заготовки. Коли промінь фокусується на маленькій точці, енергія стає настільки сильною, що матеріал у цій точці, наприклад, дерево, миттєво обвуглюється, а пластик плавиться.

Коли верстат малює квадрат у кутах, він має призупинитись, щоб змінити напрямок, так, як лазер світить з однаковою силою і на прямій, особливо при високій швидкості, і в кутку, де швидкість мінімальна, кути завжди будуть перепаленими та чорними. Для того, щоб цього уникнути, в коді елементів вбудована функція динамічного керування потужністю. Принцип роботи передбачає, що якщо картка переміщається швидко, то лазер додає потужності, але якщо мотор починає сповільнюватися, то потужність лазера автоматично зменшується. Цей процес реалізується за допомогою сигналу ШІМ. Контролер перемикає лазер тисячі разів на секунду, змінюючи тривалість спалахів. Таким чином, регулюється яскравість променя, не даючи деталям підгоріти під час поворотів.

На багатьох верстатах такого типу використовується охолодження типу Air Assist (рис. 1.7). Така система обдування зони лазерного різання складається з компресора, трубки та сопла. Вона подає стиснене повітря безпосередньо на точку впливу лазера, видуваючи продукти горіння, запобігаючи обвуглюванню країв, захищаючи лінзу від диму та підвищуючи швидкість і якість різу [15]. Важливо контролювати чистоту лінзи, оскільки лазер палить дерево, тож летить багато диму й дьогтю. Якщо на склі лінзи відбудеться осідання, це може призвести до перегріву та пошкодження самого скла. Для уникнення таких негативних наслідків потік повітря відштовхує дим.

Лазерний діод видає потік світла, який без лінзи надто розсіяний, щоб якісно розрізати деталь. Тому в лазерному модулі використовується збиральна лінза, яка зводить усі промені в одну надтонку точку. Кожна лінза має фіксовану фокусну відстань. Саме ця дистанція від лінзи до поверхні матеріалу, на якій пляма лазера має мінімальний діаметр і щільність енергії тут є максимальною. Якщо підняти лазер вище або опустити нижче хоча б на 2–3 мм - стає неможливим коректно виконати роботи, оскільки енергія розсіюється на більшу площу, та замість того, щоб миттєво випаровувати матеріал, лазер просто починає його гріти, диміти і обвуглювати, але не різати.



Рис. 1.7. Охолоджуюча система Air Assist [16].

Використання порталної схеми на базі алюмінієвих профілів V-Slot, важливим є паралельність осей X та Y відносно поверхні столу, якщо рама зібрана з перекосом або профіль має вигин, виникають проблеми, в одній частині робочого поля відстань від лазера до фанери буде ідеальною, а в іншій через відстань збільшується або зменшується, внаслідок чого якість гравіювання впаде, лінії стануть товстими, нечіткими, прорізати матеріал наскрізь стане неможливо. Важливо передбачити механізм регулювання

висоти та вирівнювання рівня, оскільки робоча поверхня має бути суворо перпендикулярною до вектора лазерного променя.

1.3. Теоретичний аналіз кінематичних схем та механізмів

У сучасній науковій літературі, присвяченій верстатобудуванню, кінематика розглядається як фундаментальна складова, що визначає динамічну якість та геометричну точність майбутнього виробу і саме аналіз існуючих теоретичних напрацювань дозволяє ґрунтовно підійти до вибору структурної схеми верстата.

Еволюція та класифікація кінематичних структур у наукових працях, згідно з класифікаційними ознаками, що наводяться в роботах провідних фахівців, кінематичні схеми малогабаритних ЧПК-систем поділяються за принципом відносного руху інструменту та заготовки [17]. У літературних джерелах концепція рухомого порталу «4-Gantry» (рис. 1.8) описується як найбільш ефективний для обробки легких матеріалів.



Рис. 1.8. Портал типу «4-Gantry» [19].

Автори підкреслюють, що така схема дозволяє мінімізувати робочу площу приміщення, оскільки заготовка залишається статичною, а всі

переміщення здійснюються виконавчим механізмом [18]. Такий підхід частіше розглядається для важких лазерних операцій, оскільки забезпечує вищу жорсткість, проте суттєво обмежує динамічні характеристики через інерційність масивного столу з деталлю. Для даного верстату, найбільш обґрунтованою є саме портальна схема, яка забезпечує незалежність маси заготовки від динамічних параметрів приводів. При проєктуванні рухомих вузлів треба враховувати режими пуску та гальмування для мінімізації динамічних навантажень, що є особливо актуальним для портальних систем з числовим програмним керуванням [8].

Дискусії щодо вибору типу передавального механізму в системах з ЧПК тривають десятиліттями. В академічних виданнях детально розглядаються три ключові парадигми. Літературні джерела акцентують увагу на високій демпфуючій здатності зубчастих пасів [20], завдяки еластичності матеріалу таких як неопрен та поліуретан, дані передачі здатні поглинати мікрівібрації від крокових двигунів, що позитивно впливає на якість поверхні при лазерному гравіюванні, водночас, автори наукових статей застерігають про необхідність врахування “ефекту видовження” паса при великих знакозмінних навантаженнях, що потребує впровадження механізмів попереднього натягу.

У літературі з деталей машин характеризується максимальною механічною вигодою тип «Гвинтові пари» [21], це дає можливість створення великих зусиль, проте для лазерних систем, де зусилля різання відсутнє, використання гвинтів менш доцільним через високу інерційність та обмеження по максимальній лінійній швидкості, що викликане ризиком виникнення резонансних коливань вала.

Також слід згадати про зубчасту рейку, аналіз літератури вказує на те, що цей тип передачі є незамінним для верстатів великого формату, понад 2-3 метри, оскільки він не має обмежень по довжині ходу, проте для настільних систем рейка вважається надлишковою через складність забезпечення безлюфтового зачеплення без суттєвого збільшення вартості конструкції [22].

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		18

У контексті проектування верстатів на алюмінієвому профілі в літературі як об'єкт дослідження виділяють систему «V-подібний ролик» [23]. Дослідники відзначають, перевагу в тому, що контакт кочення, на відміну від контакту ковзання, дозволяє знизити пускові моменти та уникнути ефекту ривкоподібного руху на малих швидкостях.

Варто звернути увагу на те, що використання полімерних роликів POM або Delrin у парі з анодованим алюмінієм створює систему з високим ступенем самозмащування, що є потрібним для виробництв таких як деревообробка або лазерна порізка пластиків, де рідкі мастила можуть абсорбувати пил та перетворюватися на абразивну пасту.

Особливу увагу варто приділити джерелам виникнення геометричних і динамічних похибок. Геометричні похибки зумовлені непаралельністю напрямних або неперпендикулярністю осей. Для компенсації цих похибок на рівні програмного забезпечення контролера, якщо брати теплові похибки, хоча для лазерних граверів цей фактор менш критичний, ніж для металорізальних верстатів, також літературні джерела вказують на необхідність врахування термічного розширення алюмінієвої рами при тривалій роботі потужних випромінювачів, а динамічні похибки пов'язані з деформацією кінематичних ланцюгів під дією інерційних сил, теоретичні моделі переважно описують це як помилку слідування, для мінімізації якої автори рекомендують використовувати алгоритми випереджаючого планування Look-Ahead [24].

Звернувши увагу на наукові роботи, присвячені динаміці верстатів, підкреслюється, що основною проблемою алюмінієвих порталних систем є їхня схильність до низькочастотних вібрацій і резонансів [25]. Для вирішення цієї проблеми, першою з яких є геометричне демпфування, також варто зазначити важливість форми поперечного перерізу профілю. Використання профілів з внутрішніми перегородками, як у серії по типу 2020, 2040 або 4040 дозволяє змістити власні частоти конструкції за межі робочого діапазону обертання двигунів. Не менш важливим рішенням є композитне наповнення,

хоча це збільшує загальну вагу, варто відзначити зростання коефіцієнта демпфування у декілька разів, що інколи може бути критичним для легких лазерів. Використання віброгасильних опор рекомендоване для розв'язання між станиною верстата та робочою поверхнею за допомогою еластомірних демпферів, що запобігатиме передачі зовнішніх коливань на каретку лазера [26].

Для систем без значного опору різанню крокові двигуни серії NEMA 17 є оптимальними. Акцент стоїть на важливості індуктивності обмоток, чим вона нижча, тим більш стабільним є момент на високих швидкостях, а сервоприводи вважаються преміальним сегментом та розглядаються серводвигуни з енкодерами, вони вирішують проблему пропуску кроків, проте їх впровадження у малогабаритні системи часто вважається економічно недоцільним через високу складність налаштування ПД-регуляторів. Джерела вказують на зростання популярності гібридних двигунів, які поєднують простоту крокового двигуна з надійністю зворотного зв'язку, що дозволяє системі з числовим програмним керуванням сигналізувати про механічне заклинювання або перешкоду [27].

Для пасової передачі є два типи натягувачів, серед них гвинтові (пружинні) та фіксовані. Надмірний натяг призводить до передчасного зносу підшипників вала двигуна, а недостатній - до виникнення люфту, який проявляється як розмиття контурів при зміні напрямів руху [28]. При аналізі профілю зуба варто зауважити, що при виборі профілів зубів переважно порівнюються профілі T2.5, MXL та GT2, більшість обирають саме округлий профіль зуба GT2, який забезпечує найбільш плавне входження в зачеплення зі шківом, що мінімізує мікропоштовхи, які могли б бути помітними при гравіюванні на дзеркальних поверхнях.

Лазери створюють електромагнітні перешкоди, які можуть спричинити помилкові спрацьовування кінцевих вимикачів, що призводить до аварійної зупинки верстата або псування заготовки [29]. Для уникнення цього рекомендується використовувати екрановані кабелі та встановлювати

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

феритові фільтри. В цих випадках найбільш велику роль грає контроль температури драйверів, оскільки перегрів драйверів, наприклад, A4988 або TMC2209 призводить до спрацювання теплового захисту, зумовлюючи аварійні зупинки верстату [30]. Для цього пропонується активне охолодження з використанням радіаторів збільшеної площі та спрямованого повітряного потоку [31].

Проблема перегріву драйверів зумовлена специфікою напівпровідникової структури мікросхем. При збільшенні електричного опору при нагріванні починається ініціювання ланцюгової реакції виділення надлишкової теплової енергії, що за умови підвищення термічного ліміту — спрацьовує апаратне відсікання живлення. Це спричиняє раптову десинхронізацію між програмними командами контролера та фізичним положенням виконавчого органу, що призводить до дефекту виробу. Для вирішення цієї проблеми доцільно впровадити систему інтенсифікованого теплообміну. Такий підхід передбачає використання радіаторних елементів з оптимізованою конфігурацією ребер, що дозволяє розширювати зону розсіювання теплової енергії.

1.4. Обґрунтування розробки верстату з ЧПК

Сучасне машинобудування характеризується стрімким розвитком автоматизованих технологій обробки матеріалів, де верстати з числовим програмним керуванням відіграють ключову роль у підвищенні продуктивності, точності та гнучкості виробництва. Попри широке поширення промислових верстатів з ЧПК на великих підприємствах, їх використання в умовах малого бізнесу, навчальних закладів, майстерень та індивідуального виробництва часто обмежене через високу вартість обладнання, складність обслуговування та недостатню адаптацію до специфічних завдань.

Актуальність розробки власного верстату з ЧПК зумовлена кількома ключовими факторами, серед яких зростання попиту на персоналізовану

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		21

продукцію, від декоративних елементів інтер'єру та меблів до прототипів деталей для дрібносерійного виробництва з дерева, пластику, композиту та м'яких металів [1]. Верстати з ЧПК дозволяють автоматизувати процес, мінімізуючи вплив людського фактора та скорочуючи час на переналагодження. Промислові верстати з ЧПК коштують від кількох десятків тисяч до сотень тисяч доларів США, що робить їх недоступними для малого та середнього бізнесу, студентських лабораторій чи хобі-майстерень. Водночас розробка модульного верстату на базі доступних компонентів дозволяє суттєво знизити витрати порівняно з готовим обладнанням. Такий підхід відкриває можливості для локального виробництва в умовах обмеженого бюджету.

Промислові моделі часто надто універсальні, що призводить до завищених габаритів і потужності, непотрібних для обробки неметалевих матеріалів, крім того, вони вимагають спеціалізованого програмного забезпечення та кваліфікованого персоналу для налагодження, з іншого боку, прості DIY-верстати, побудовані на базі 3D-принтерів або відкритих платформ таких як OpenBuilds чи MPCNC мають недостатню жорсткість конструкції, низьку точність позиціонування та обмежену робочу зону.

Обґрунтування вибору саме порталної конструкції пов'язане з такими перевагами, як висока жорсткість, простота збірки, можливість обробки великих заготовок у площині XY та відносно низька вага рухомих частин. Тому така схема добре поєднується з принципом роботи, де керування здійснюється саме через G-код, генерований у програмах типу ArtCAM, Fusion 360 або безкоштовних аналогах Estlcam або Candle. Це забезпечує універсальність без потреби в дорогих САПР-системах промислового рівня.

При виготовленні декоративних панелей, меблевих фасадів, прототипів або рекламної продукції верстат може працювати в напівавтоматичному режимі, звільняючи оператора для інших завдань, крім того, розробка сприяє розвитку навичок мехатроніки, програмування та конструювання у студентів і молодих спеціалістів, що відповідає сучасним вимогам до інженерної освіти.

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Порівняно з існуючими відкритими проектами наприклад, на базі OpenBuilds або PrintNC, запропонована розробка акцентує увагу на підвищеній жорсткості рами а саме використання посилених з'єднань, оптимальне співвідношенні робочої зони до габаритів верстату та інтеграції простого інтерфейсу керування, що усуває типові проблеми.

Запропонована конструкція не лише задовольняє потреби конкретних завдань, а й може бути використана як база для подальших досліджень у сфері автоматизації виробництва та адаптації до інших видів обробки.

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ЛАЗЕРНОГО ГРАВЕРА

2.1. Розрахунок параметрів для розробки лазерного гравера

2.1.1. Розрахунок геометричних параметрів та робочої зони

Для розробки механічної частини верстату було обрано алюмінієвий профіль серії 2020 у поєднанні з деталями, виготовленими методом адитивного виробництва (FDM) з ABS-пластику. Цей вибір обумовлений необхідністю досягнення жорсткості конструкції за мінімальної маси рухомих частин.

Конструкція верстату базується на порталній схемі, де рухомий портал (вісь Y) і каретка з робочим органом (вісь X) визначають межі обробки матеріалу. Корисна робоча зона розраховується як різниця між загальною довжиною напрямних і фізичними габаритами рухомих вузлів.

Для розрахунків використані наступні розміри:

- Довжина профілю осі X: $L_x = 526\text{мм}$.
- Довжина профілю осі Y: $L_y = 480\text{мм}$.
- Ширина каретки лазера: $B_{\text{кар}} = 76\text{мм}$.
- Ширина вузлів portalу: $B_{\text{порт}} = 80\text{мм}$.
- Технічний запас безпеки: $S_{\text{зап}} = 20\text{мм}$.

Конструкція верстату передбачає рухомий портал вздовж осі Y та каретку з робочим органом вздовж осі X. Робоча зона визначається як різниця між загальною довжиною профілю та фізичними габаритами рухомих вузлів.

Довжина ходу розраховується за формулою:

$$L_{\text{роб}} = L_{\text{заг}} - B_{\text{кар}}, \quad (2.1)$$

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата										
Розроб.		Топоринський В.І.			РОЗДІЛ 2					Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Крушельницький В.В.										24	62	
Н. Контр.														
Затверд.														

де: $L_{\text{заг}}$ – довжина напрямних профілів основи (526 мм);

$B_{\text{кар}}$ – ширина вузла порталу, що обмежує хід (80 мм).

Для осі X:

$$L_x = 526 - 76 = 450 \text{ мм.}$$

Для осі Y:

$$L_y = 480 - 80 = 400 \text{ мм.}$$

Таким чином, корисна площа обробки становить 450×400 мм. На основі отриманих значень робочих ходів по осях X та Y визначається загальна площа робочої зони верстата. Цей параметр є визначальним для оцінки технологічних можливостей обладнання та максимальних габаритів заготовок.

Розрахунок площі проводиться за формулою:

$$S_{\text{роб}} = L_x \cdot L_y, \quad (2.2)$$

де: L_x – робочий хід каретки по осі X, мм;

L_y – робочий хід порталу по осі Y, мм.

Підставимо розраховані раніше значення:

$$S_{\text{роб}} = 450 \cdot 400 = 180000 \text{ мм}^2 = 0,18 \text{ м}^2.$$

2.1.2. Кінематичний розрахунок приводів робочих органів

Для забезпечення точного позиціонування та високої швидкості відгуку системи у конструкції використано ремінну передачу з маркуванням GT2. Цей вибір зумовлений спеціальним профілем зуба, який мінімізує ефект

люфту під час реверсивного руху. Для приводу використовуються крокові двигуни серії NEMA 17, які мають оптимальне співвідношення крутного моменту до інерції ротора.

Крокова дискретність є параметром, що визначає «апаратну» роздільну здатність верстату та показує лінійну відстань, на яку переміститься каретка або портал під час здійснення двигуном одного повного кроку без урахування електронного дроблення кроку. Тому цей показник залежить від геометрії ведучого шківа та кроку зубів ременя. Розрахунок лінійного переміщення за один повний крок двигуна проводиться за формулою:

$$S_{\text{крок}} = \frac{P \cdot Z}{N}, \quad (2.3)$$

де: P – крок зубів ременя GT2 (згідно з ТТХ - 2 мм);

Z – кількість зубів ведучого шківа на валу двигуна (16 зубів);

N – кількість повних кроків на один оберт валу двигуна.

Підставимо розраховані раніше значення для двигуна з кутом кроку $1,8^\circ$ ($N=200$), в результаті отримаємо:

$$S_{\text{крок}} = \frac{2 \cdot 16}{200} = 0,16 \text{ мм/крок.}$$

Для підвищення плавності ходу та зменшення резонансних явищ на низьких швидкостях, драйвери двигунів типу TMC2209 налаштовуються на режим мікрокроку. Це дозволяє програмно розділяти один фізичний крок на декілька частин, що підвищує точність позиціонування.

Розрахунок мінімального переміщення виконується за формулою:

$$x = \frac{S_{\text{крок}}}{k_{\text{мікро}}}, \quad (2.4)$$

де: $S_{\text{крок}}$ – розрахована крокова дискретність;

$k_{\text{мікро}}$ – коефіцієнт дроблення кроку.

При стандартному налаштуванні драйвера на мікрокрок 1/16 $k_{\text{мікро}} = 16$, тоді розрахуємо:

$$x = \frac{0.16}{16} = 0,01 \text{ мм.}$$

Отримане значення 10 мкм є високим показником, що дозволяє досягти високої якості гравіювання та чіткості ліній.

Ефективний діаметр шківа - це розмір умовної окружності, по якій проходить середня лінія натягнутого зубчастого паса. Цей параметр впливає на передавальне відношення. Також значення ефективного діаметра трохи відрізняється від зовнішнього діаметра шківа через товщину корду ремня.

Розрахунок проводиться за формулою:

$$D_{\text{еф}} = \frac{P \cdot Z}{\pi}, \quad (2.5)$$

де: P – крок зубів ремня GT2, мм;

Z – кількість зубів обраного шківа.

Підставимо значення для обраних комплектуючих:

$$D_{\text{еф}} = \frac{2 \cdot 16}{3,14159} = 10,186 \text{ мм.}$$

Отримане значення ефективного діаметра дає змогу в подальшому точно розрахувати лінійну швидкість переміщення каретки залежно від кутової швидкості обертання валу крокового двигуна. Такий малий діаметр дозволяє отримати високе тягове зусилля за умови використання стандартних двигунів серії NEMA 17.

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Маса компонентів безпосередньо впливає на інерційні навантаження, що виникають під час пуску та гальмування приводів. Для осі Y розрахунковою величиною є сумарна маса всього порталу, яка включає лазерний модуль, двигун осі X, алюмінієвий профіль і каретку з роликами. Визначення маси є важливим показником, оскільки потрібно правильно підібрати режими прискорення у вбудованій програмі верстата та уникнути пропусків кроків двигуном.

Розрахунок маси порталу проводиться за формулою:

$$M_{\text{порт}} = m_{\text{лаз}} + m_{\text{карет}} + m_{\text{проф}} + m_{\text{двиг}}, \quad (2.6)$$

де: $m_{\text{лаз}}$ – маса лазерного модуля в зборі, кг;

$m_{\text{карет}}$ – маса вузла каретки з роликами та кріпленнями, кг;

$m_{\text{проф}}$ – маса алюмінієвого профілю порталу осі X, кг;

$m_{\text{двиг}}$ – маса крокового двигуна осі X, кг.

На основі аналізу специфікацій комплектуючих та зважування друкованих деталей, приймаємо наступні значення:

$$M_{\text{порт}} = 0,13 + 0,35 + 0,25 + 0,28 = 1,01 \text{ кг.}$$

Для врахування маси металевих метизів (гвинти, гайки), дротів та кабель-каналів, врахуємо коефіцієнт запасу $k = 1,15$:

$$M_{\text{порт}} = 1,01 \cdot 1,15 = 1,24 \approx 1,2 \text{ кг}$$

Така маса є характерною для граверів цього класу і дозволяє використовувати високі швидкості переміщення без ризику значних деформацій рами.

Для здійснення руху порталу приводи повинні подолати силу тертя кочення, що виникає в парі «ролик – алюмінієвий профіль». У конструкції пропонується використовувати ролики «Solid V Wheel» з матеріалу «Delrin», які переміщуються в пазах V-Slot-профілю. Завдяки високій якості обробки поверхонь та використанню прецизійних підшипників, коефіцієнт тертя в такій системі є мінімальним. Проте його обов'язково слід враховувати для коректного визначення потужності двигунів.

Розрахунок сили опору переміщення проводиться за формулою:

$$F_{\text{терт}} = f \cdot M_{\text{порт}} \cdot g, \quad (2.7)$$

де: f – приведений коефіцієнт тертя кочення (для пари Delrin та анодованого алюмінію буде $f = 0,01$);

$M_{\text{порт}}$ – розрахована маса порталу, кг;

g – прискорення вільного падіння, 9.81 м/с^2 .

Підставимо отримані раніше дані:

$$F_{\text{терт}} = 0,01 \cdot 1,2 \cdot 9,81 \approx 0,118 \text{ Н.}$$

Отримане значення показує, що опір руху є незначним порівняно з динамічними навантаженнями. Основний запас моменту двигуна буде витрачатися на корисну роботу та динамічне прискорення, а не на подолання внутрішнього опору механіки.

Оскільки робота гравера супроводжується постійними циклами розгону та гальмування при зміні напрямку руху, то для забезпечення високої продуктивності та чіткості кутів без закруглень, система повинна підтримувати стабільне прискорення. Завелике прискорення може призвести до пропуску кроків, а замале - до збільшення часу обробки та перегріву або підгорювання матеріалу в точках зупинки.

Розрахуємо зусилля на переміщення порталу:

$$F_{\text{порт}} = M_{\text{порт}} \cdot a, \quad (2.8)$$

де: $M_{\text{порт}}$ – розрахована маса порталу, кг;

a – задане прискорення робочого органу, м/с².

Для забезпечення роботи гравера приймаємо значення прискорення $a = 1500 \text{ мм/с}^2$, що дорівнює $1,5 \text{ м/с}^2$. Підставимо значення:

$$F_{\text{порт}} = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8 \text{ Н.}$$

Згідно з розрахунком, сила 1,8 Н значно перевищує силу тертя, яка становить 0,118 Н.

При розрахунку враховується не лише сума сил тертя та прискорення, а й плече їх прикладання (радіус шківів) і коефіцієнт запасу. Наявність запасу моменту є обов'язковою умовою для ЧПК-систем без зворотного зв'язку, щоб унеможливити пропуск кроків у разі випадкових коливань навантаження.

Необхідний крутний момент двигуна визначається за формулою:

$$T_{\text{необ}} = (F_{\text{порт}} + F_{\text{терт}}) \cdot \frac{D_{\text{еф}}}{2 \cdot 1000} \cdot k_{\text{зап}}, \quad (2.9)$$

де: $F_{\text{порт}}$ – розрахована динамічна сила прискорення, Н;

$F_{\text{терт}}$ – розрахована сила тертя, Н;

$D_{\text{еф}}$ – ефективний діаметр шківів, мм;

$k_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу (для ЧПК рекомендується $k_{\text{зап}} = 2$).

Ділення на 1000 є переведенням $D_{\text{еф}}$ з мм у метри для отримання результату в Н·м

$$T = (1.8 + 0.118) \cdot \left(\frac{10.186}{2000} \right) \cdot 2 = 1.918 \cdot 0.005093 \cdot 2 \approx 0.01954 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для порівняння з технічними характеристиками двигунів переведемо значення у кг·см:

$$T_{\text{необ}} \approx 0,2 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

Стандартний двигун NEMA 17, моделі 42BYGH зазвичай має момент утримання від 2,5 до 4,8 кг·см. Отримане розрахункове значення 0,2 кг·см свідчить про значний запас потужності, більше ніж у 10 разів, що гарантує стабільну роботу верстату навіть на високих швидкостях без ризику збоїв кінематики.

Кінетична енергія визначає запас механічної енергії, що накопичується в рухомому вузлі під час роботи на максимальних швидкостях. Цей показник є ключовим для оцінки безпеки експлуатації верстата та розрахунку демпфуючих елементів (відбійників). Знання кінетичної енергії дозволяє спрогнозувати силу можливого удару порталу об кінцеві обмежувачі у разі збою програмного забезпечення або виходу з ладу кінцевих вимикачів.

Розрахунок кінетичної енергії порталу проводиться за формулою:

$$E_{\text{кін}} = \frac{M_{\text{порт}} \cdot V^2}{2}, \quad (2.10)$$

де: $M_{\text{порт}}$ - розрахована сумарна маса порталу, кг;

V - максимальна робоча швидкість переміщення, м/с.

Для розрахунку приймемо максимальну швидкість холостого переміщення $V = 0,2$ м/с (що відповідає 12000 мм/хв):

$$E_{\text{кін}} = \frac{1,2 \cdot 0,2^2}{2} = 0,024 \text{ Дж}.$$

Отримане значення кінетичної енергії є незначним, що свідчить про низьке ударне навантаження на конструкції у разі аварійної зупинки. Проте навіть така енергія під час різкого гальмування передається на ремінну передачу, підшипникові вузли та кріпильні елементи. Тому під час проєктування деталей із ABS-пластику необхідно враховувати дію інерційних навантажень для забезпечення достатньої міцності зон кріплення двигунів, роликів та напрямних.

2.1.3. Розрахунок міцності конструкції

Для забезпечення безперебійної роботи верстата необхідно провести розрахунок витратних матеріалів (ременів) та перевірити несучі елементи на деформацію під навантаженням. Це дозволить гарантувати, що вибраний профіль і ремені відповідають заявленим характеристикам точності.

Під час закупівлі комплектуючих важливо точно розрахувати довжину приводних пасів для кожної осі. Довжина паса складається з подвоєної робочої довжини профілю, довжини охоплення шківів та необхідного запасу для встановлення натягувачів і фіксації кінців у затискачах каретки.

Розрахунок загальної довжини ($L_{\text{пас}}$) проводиться за формулою:

$$L_{\text{пас}} = 2L_{\text{пр}} \cdot C_{\text{шк}} + L_{\text{зап}}, \quad (2.11)$$

де: $L_{\text{пр}}$ - фізична довжина алюмінієвого профілю відповідної осі, мм;

$C_{\text{шк}}$ - довжина кола шківа, мм;

$L_{\text{зап}}$ - технологічний запас на кріплення та вузли натягу (приймається близько 50-70 мм).

Проведемо розрахунок для обох осей:

Для осі X $L_{\text{пр}} = 526$ мм:

$$L_{x_пас} = 2 \cdot 526 + 16 + 50 = 1118 \text{ мм.}$$

Для осі Y (дві паралельні сторони по 480 мм кожна):

$$L_{y_пас} = 2 \cdot (2 \cdot 480 + 16 + 50) = 2052 \text{ мм.}$$

Загальна необхідна довжина ремня становить 3170 мм. З урахуванням монтажних похибок рекомендується придбати стандартний відрізок довжиною 4 метри.

Розрахунок зусилля рухомої каретки виконується за формулою:

$$F = m \cdot g, \quad (2.13)$$

де: m - маса каретки з лазерним модулем, кг;

g — прискорення вільного падіння, $9,81 \text{ м/с}^2$

Додаючи вагу лазера і каретки ($0.13 + 0.35$) отримуємо 0,48 кг,

Підставивши значення отримуємо:

$$F = 0.48 \cdot 9.81 = 4.71 \text{ Н} \approx 4.7 \text{ Н}$$

Балка порталу (вісь X) є найбільш навантаженим елементом рами, оскільки вона піддається дії зосередженої сили ваги каретки з лазером. Для забезпечення точності фокусування лазера, що зазвичай складає 0,1 мм необхідно, щоб прогин профілю 2020 не перевищував допустимих меж.

Розрахунок максимального прогину (δ) проводиться за формулою:

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}, \quad (2.14)$$

де: L - довжина профілю порталу, 520 мм;
 E - модуль пружності алюмінію, 70 000 МПа;
 I - момент інерції профілю 2020, 7000 мм⁴.

Підставимо значення:

$$\delta = \frac{4,7 \cdot 520^3}{48 \cdot 70000 \cdot 7000} \approx 0,028 \text{ мм} = 28 \text{ мкм}$$

Отримане значення 28 мкм є допустимим і не впливає на якість гравіювання.

Ролики з матеріалу Delrin контактують з алюмінієвим профілем у вузькій зоні. Для запобігання передчасному зносу та деформації, яких ще прийнято називати «лиски», необхідно перевірити контактні напруження за методом Герца.

Розрахунок проводиться за формулою:

$$\sigma_H = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F_{\text{пр}} \cdot E_{\text{мод}}}{R}}, \quad (2.15)$$

де: $F_{\text{пр}}$ - сила притиску роликів, 20 Н;
 $E_{\text{мод}}$ - приведений модуль пружності пари пластик-метал, 3000 МПа;
 R - радіус ролика, в нашому випадку 12 мм.

Розрахунок:

$$\sigma_H = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{20 \cdot 3000}{12}} \approx 29,56 \text{ МПа}$$

Значення 29,56 МПа не перевищує межу текучості Delrin (60-70 МПа), що гарантує відсутність пластичної деформації роликів.

Натяг зубчастого паса, необхідний для виключення люфтів та проковзування, створює постійне радіальне зусилля на вихідний вал крокового двигуна. Це навантаження сприймається переднім підшипником мотора. Для забезпечення тривалого ресурсу роботи (MTBF) необхідно перевірити, щоб сумарна сила натягу не перевищувала максимально допустимих значень, вказаних виробником двигунів серії NEMA 17.

Розрахунок проводиться за формулою:

$$F_{\text{вал}} = 2 \cdot F_{\text{натягу}} \cdot \cos\left(\frac{a}{2}\right), \quad (2.16)$$

де: $F_{\text{вал}}$ - сумарна радіальна сила, що діє на вал двигуна, Н;

$F_{\text{натягу}}$ - сила робочого натягу паса, для стабільної роботи систем GT2 приймаємо $F_{\text{натягу}} = 2,7$ Н;

a - кут між ділянками паса, що відходять від шківа, оскільки в даній конструкції паси йдуть паралельно, кут охоплення близький до 180° , а кут між ділянками $a = 0^\circ$.

Оскільки $\cos(0) = 1$, формула спрощується:

$$F_{\text{вал}} = 2 \cdot 2,7 \cdot 1 = 5,4 \text{ Н.}$$

Згідно з технічною документацією двигунів серії NEMA 17, максимально допустиме радіальне навантаження на вал становить 20 Н. Отримане значення 5,4 Н складає лише 27% від критичного, що забезпечує тривалий ресурс підшипникових вузлів та виключає появу люфту через деформацію валу.

У конструкціях на базі V-Slot ролики кріпляться за допомогою ексцентрикових гайок, які дозволяють регулювати зазор між роликом та напрямною. Правильний преднатяг забезпечує стабільність геометричних розмірів при гравіюванні та виключає виникнення вібрацій. Розрахункове

мінімальне зусилля притиску має бути достатнім, щоб подолати сили інерції та не допустити відриву ролика від профілю під час різких змін напрямку руху.

Розрахунок мінімального зусилля притиску (F_p) для одного ролика проводиться за формулою:

$$F_p = \frac{M_{\text{карет}} \cdot a}{\mu \cdot n}, \quad (2.17)$$

де: F_p - необхідна сила притиску одного ролика, Н;

$M_{\text{карет}}$ - маса рухомого вузла (для каретки осі Х заокруглимо до 0,5 кг);

a - робоче прискорення (1,5 м/с²);

μ - коефіцієнт зчеплення (для пари Delrin-Алюміній приймаємо $\approx 0,2$);

n - кількість роликів, що сприймають основне навантаження (для каретки $n=3$).

Підставимо значення для нашої системи:

$$F_p = \frac{0,5 \cdot 1,5}{0,2 \cdot 3} = 1,25 \text{ Н.}$$

На практиці, для компенсації можливих нерівностей профілю та забезпечення "монолітності" конструкції, за допомогою ексцентриків створюється натяг у межах 5–10 Н на кожен ролик. Сумарна сила притиску в системі складе:

$$F_{\text{сумарна}} = 10 \cdot 3 = 30 \text{ Н.}$$

Таке значення гарантує відсутність люфтів та «деренчання» при роботі, при цьому створюваний момент опору залишається в межах норми, що було підтверджено розрахунком крутного моменту раніше.

2.1.4. Розрахунок міцності деталей, виготовлених методом FDM

Використання ABS-пластику для корпусних вузлів та кріплень двигунів потребує перевірки на міцність, оскільки деталі, надруковані на 3D-принтері, мають анізотропну структуру, їхня міцність залежить від напрямку друку шарів). Найбільш критичним вузлом є кріплення двигуна, яке піддається постійному навантаженню від натягу паса.

Для перевірки надійності пластикової деталі розрахуємо напруження, що виникає в місці фіксації валу двигуна під дією сили натягу паса. Це дозволить визначити коефіцієнт запасу міцності та підтвердити, що обрана товщина стінки деталі є достатньою.

Розрахунок проводиться за формулою:

$$\sigma = \frac{F_{\text{вал}}}{S}, \quad (2.18)$$

де: σ - нормальне напруження в перерізі деталі, МПа;

$F_{\text{вал}}$ - сумарна радіальна сила натягу паса, Н;

S - площа небезпечного перерізу пластикової деталі (при товщині пластини 8 мм та робочій ширині 20 мм).

Підставимо значення:

1. Розрахуємо площу перерізу: $S = 8 \cdot 20 = 160 \text{ мм}^2$

2. Розрахуємо напруження $\sigma = \frac{5,4}{160} \approx 0,034 \text{ МПа}$

Згідно з технічними характеристиками ABS-пластику, границя міцності на розрив становить близько 35 - 42 МПа. Отримане значення 0,034 МПа є мізерним порівняно з міцністю матеріалу, що дає коефіцієнт запасу міцності $K > 1000$. Це свідчить про те, що пластикові вузли мають надлишковий запас міцності та легко витримують експлуатаційні навантаження.

2.1.5. Розрахунок точності та експлуатаційних параметрів

Під час роботи ЧПК-станка зубчастий пас приводу зазнає пружної деформації під дією тягового зусилля. Незважаючи на наявність армувального корду, пас має скінченну жорсткість, тому при зміні швидкості та напрямку руху виникає його незначне подовження, що впливає на точність позиціонування.

Оцінка пружної деформації виконується за законом Гука:

$$\Delta L = \frac{F \cdot L_{\text{роб}}}{E_{\text{пас}} \cdot S_{\text{пас}}}, \quad (2.19)$$

де: F - динамічна сила прискорення;

$L_{\text{роб}}$ - робоча довжина паса, мм;;

$E_{\text{пас}} \cdot S_{\text{пас}}$ – Повздовжня жорсткість паса.

Для паса GT2 шириною 6 мм при робочій довжині 450 мм та розрахунковому навантаженні 1,8 Н отримаємо:

$$\Delta L = \frac{1,8 \cdot 450}{12500} = 0,0648 \text{ мм.}$$

Пружна деформація складає близько 0,06 мм. Це означає, що при різких розгонах похибка може сягати половини діаметра лазерної плями. Для підвищення точності в налаштуваннях прошивки варто використовувати алгоритм плавного прискорення (S-Curve), що мінімізує цей ефект.

Системи ЧПК розбивають складні криві (кола, дуги) на велику кількість коротких лінійних відрізків. Максимальне відхилення такої ламаної лінії від ідеального кола називається похибкою апроксимації.

Розрахунок проводиться за формулою:

$$\delta = R(1 - \cos(\frac{180^\circ}{n})), \quad (2.20)$$

де: δ - максимальна похибка апроксимації кола ламаною лінією, мм

R - радіус дуги, мм;

n - кількість сегментів на повне коло (стандартно для GRBL при довжині сегмента 0,1 мм).

Для кола радіусом $R = 10$ мм:

$$n = 2\pi \cdot \frac{R}{l_{\text{сег}}} \approx 628, \text{ кут} = \frac{180^\circ}{628} = 0.287^\circ,$$

$$\delta = 10 \cdot (1 - \cos(0.287^\circ)) \approx 0.000125 \text{ мм} \approx 0.13 \text{ мкм}$$

Похибка 0.13 мкм є значно меншою за крок двигуна, що підтверджує високу якість програмної обробки траєкторій.

У разі спрацювання аварійної зупинки, каретка не зупиняється миттєво через інерцію. Важливо знати цей шлях, щоб виставити кінцевики на безпечній відстані від рами.

Розрахунок проводиться за формулою:

$$S_{\text{гальм}} = \frac{V_{\text{max}}^2}{2 \cdot a_{\text{max}}}, \quad (2.21)$$

де: V_{max} - максимальна швидкість переміщення каретки, м/с;

a_{max} - максимально можливе прискорення гальмування (прийmemo 3,0 м/с², що обмежено моментом двигуна).

Розрахунок:

$$S_{\text{гальм}} = \frac{0,2^2}{2 \cdot 3,0} = \frac{0,04}{6} \approx 0,0067 \text{ м} \approx 6,7 \text{ мм.}$$

Для запобігання механічним ударам каретки об раму, «м'які» ліміти або фізичні кінцевики повинні спрацьовувати мінімум за 7 мм до жорсткого упору.

2.2. Розробка конструкції лазерного верстата з ЧПК

Розробка конструкції лазерного верстата з ЧПК (рис 2.1) є комплексним, оскільки поєднує в собі розробку несучої механічної системи, вибір приводів та забезпечення високої точності позиціонування виконавчого органу. Основною метою розробки є створення стабільної, вібростійкої та водночас легкої конструкції, здатної забезпечувати високу швидкість переміщення лазерного модуля без втрати точності.



Рис. 2.1. Загальний вигляд

На етапі ескізного проєктування було проведено аналіз наявних кінематичних схем ЧПК-систем. Для лазерної обробки, де відсутні значні механічні зусилля на інструменті, було обрано порталну схему з двома приводами по осі Y. Таке рішення дає змогу досягти таких переваг, як, наприклад, максимізація робочої зони. Це дає змогу обробляти матеріали великого формату за відносно компактних зовнішніх габаритів. Динамічна

стабільність дозволяє розподілити масу порталу на дві паралельні напрямні, що знижує ризик виникнення перекосів під час швидких реверсивних рухів. Не мало важливим є доступність робочого столу, оскільки відкрита конструкція полегшує завантаження матеріалу та встановлення додаткового обладнання (наприклад, стільникового столу або системи димовидалення).

Основою розробленої конструкції є система алюмінієвих конструкційних профілів серії V-Slot. Вибір даного матеріалу зумовлений його багатофункціональністю, оскільки профіль виступає одночасно і силовим каркасом, і напрямною для роликів переміщення.

Рама виконана в комбінації двох типів профілів 20x40 та 20x20 мм. Профіль 20x40 використано для виготовлення бічних поздовжніх балок та основної поперечної балки порталу, а 20x20 - для передньої та задньої частини рами, що замикають контур (рис 2.2).



Рис 2.2 Візуалізація з'єднання профілей

З'єднання профілів між собою реалізовано за допомогою стандартних кутників-з'єднувачів з використанням гвинтів DIN 912 M5 з напівкруглою головкою та спеціальних Т-гайкових вставок (рис 2.2). Це забезпечує можливість регулювання перпендикулярності осей під час складання, що є

запорукою відсутності геометричних спотворень (паралелограма) при друці або різанні.



Рис. 2.2. Візуалізація з'єднання профілів

Для реалізації лінійного переміщення рухомих вузлів порталу та центральної каретки по осях X та Y у проєкті розроблено кінематичну систему на базі роликів «Solid V Wheel» із поліоксиметилену POM-H (рис. 2.3), що взаємодіють із пазами алюмінієвого профілю V-Slot.



Рис. 2.3. Ролик «Solid V Wheel» [32].

Використання готових роликів збірок дозволило значно підвищити надійність механічної підсистеми верстата. Кожен рухомий вузол містить у собі заводські ролики у зборі, всередині яких затиснуті два кулькових підшипники типу 625ZZ. Між внутрішніми кільцями цих підшипників

виробником встановлено дистанційну шайбу товщиною 1 мм, що повністю виключає заклинювання підшипників під час фіксації болтом.

З метою забезпечення безлюфтового ходу, плавного налаштування зазорів та жорсткої фіксації, в конструкції кожної трьохроlikової каретки реалізовано повну систему базування осей, що має повністю регульовані частини.

Кожна опора складається з трьох роликів, під кожним із яких встановлено шестигранний ексцентрикований спейсер (Hex Eccentric Spacer) під гайковий ключ.

Оскільки внутрішній наскрізний отвір під гвинт M5 виконаний у кожному спейсері зі зсувом, обертання шестигранного корпусу ключем дозволяє плавно та незалежно регулювати положення кожної з трьох осей відносно пазів конструкційного профілю.

При первинному налаштуванні верстата два верхні ролики регулюються для формування чіткої горизонтальної базової лінії переміщення порталу, тоді як один нижній ролик виступає в ролі замикаючого притискного елемента. Така триточкова конфігурація забезпечує жорстке охоплення напрямного профілю V-Slot, повністю усуває будь-який люфт і виключає будь-яку невизначеність у роботі системи, гарантуючи плавність ходу без ризику заклинювання під час будь-яких швидкісних змін.

Таке конструктивне рішення є кращим за класичні схеми з циліндричними валами, оскільки конічний профіль ролика контактує з гранями пазу профілю V-Slot у точках. Це гарантує рівномірний розподіл векторів сил, мінімізує точковий знос матеріалів і забезпечує високу плавність реверсивних рухів порталу.

Для перетворення обертальної енергії крокових двигунів у швидке лінійне переміщення елементів порталу, в проєкті розроблено гнучку приводну передачу типу «зубчастий шків - ремінь». Вибір даного типу механізму зумовлений вимогами до динаміки лазерного верстата, де

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		43

безконтактний метод обробки дозволяє уникнути сили опору різанню, проте вимагає досягнення високих швидкостей холостих та робочих переміщень за умови низької інерційності рухомих мас.

У структурі верстата застосовано крокові двигуни стандарту Nema 17 зі стандартним кутом кроку $1,8^\circ$, що забезпечує 200 дискретних кроків на один повний оберт вала. Тому два двигуни встановлені на бічних каретках для забезпечення синхронізованого переміщення та виключення перекосів осі Y, а один двигун інтегрований безпосередньо в центральну каретку для переміщення вздовж осі X. На вали крокових двигунів встановлено алюмінієві зубчасті шків для ременю GT2 на 16 зубів, які взаємодіють з ременем. З метою стабілізації натягу гнучких зв'язків та компенсації їх можливого послаблення в процесі тривалої експлуатації, в торцевих частинах алюмінієвих профілів рами розроблено та змонтовано гвинтові механізми натягу ременів, які дозволяють повністю ліквідувати будь-які проблеми, пов'язані з натягом.

Особливу увагу в проєкті приділено детальному проєктуванню каретки, яка є найбільш навантаженим рухомим вузлом верстату. Напівпровідниковий лазерний модуль потужністю 10 Вт закріплений на каретці через проміжну радіаторну пластину з вертикальними пазами, що дозволяє здійснювати ручне регулювання його положення по висоті відносно поверхні обробки за допомогою гвинтових затискачів для точного фокусування променя на матеріалах різної товщини (рис 2.4).

Для запобігання зносу різьби на корпусі лазера рекомендовано розмістити його на сталевих шпильках. Оскільки корпус лазера є алюмінієвим, пропонується розмістити його на шпильках з фіксацією гайками; клас міцності шпильок має бути не менше 10.9.

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		44



Рис. 2.4. Каретка з лазером закріплена на порталі

Наступним етапом стала розробка оригінальних бічних опор та центральних пластин, де проводився точний розрахунок розміщення отворів під кріплення та посадки хвостовиків ексцентриків (рис 2.5).



Рис. 2.5. Бічна пластина опори

Далі створені моделі були інтегровані в загальну тривимірну збірку точних цифрових моделей крокових двигунів, готових роликів, лазерного

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

модуля та стандартних кріпильних елементів для повної симуляції робочого ходу по осях та перевірки на відсутність зіткнень вузлів.

Фінальним етапом є встановлення допоміжних елементів підсистеми таких як опорні ніжки, встановлення кабель-каналу та автономний контролер керування ЧПК, сенсорний дисплей та кабельну систему (рис 2.6)



Рис. 2.6. 32-бітний автономний контролер керування ЧПК Makerbase MKS DLC32 v2.1 з Wi-Fi та сенсорним дисплеєм TS35-R [34].

В результаті виконання зазначених етапів розробки отримано жорстку, динамічно збалансовану конструкцію лазерного верстата з ЧПК. Спроектвана механічна система характеризується високим ступенем уніфікації компонентів, високою ремонтпридатністю та низькою собівартістю впровадження розробленого проєкту (що буде доведено в наступному розділі).

РОЗДІЛ 3

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок витрат на оплату праці розробника

Для розрахунку витрат на оплату праці інженера-конструктора використовуються статистичні дані ринку праці України станом на травень 2026 року. Середня місячна заробітна плата кваліфікованого інженера-конструктора у сфері машинобудування та розробки ЧПК-систем становить 50000 грн.

Визначимо погодинну ставку ($S_{\text{год}}$), виходячи з 22 робочих днів на місяць та 8 робочих годин на день:

$$S_{\text{год}} = \frac{Z_{\text{м}}}{Q_{\text{м}} \cdot Q_{\text{г}}}, \quad (3.1)$$

де: $Z_{\text{м}}$ - місячна заробітна плата;

$Q_{\text{м}}$ - кількість робочих днів на місяць;

$Q_{\text{г}}$ - кількість робочих годин на день.

Розрахунок погодинної ставки:

$$S_{\text{год}} = \frac{50000}{22 \cdot 8} = 284,09 \text{ грн/год.}$$

Витрати на працю $S_{\text{пр}}$ для даного інженерного проєкту розраховуються, припускаючи 24 робочих годин (3 повних робочих дні), витраченого на проєктування та розробку конструкції:

$$S_{\text{пр}} = T_{\text{год}} \cdot S_{\text{год}}, \quad (3.2)$$

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			
Розроб.		Топоринський В.І.			РОЗДІЛ 3		
Перевір.		Крушельницький В.В.					
Н. Контр.							
Затверд.							
					Літ.	Арк.	Аркушів
						47	62
					НУБіП України		

де: $T_{\text{год}}$ - кількість годин, витрачених на проєкт (5 год).

Розрахунок фактичних витрат на працю:

$$S_{\text{пр}} = 24 \text{ год} \cdot 284,09 \text{ грн/год} = 6818,16 \text{ грн.}$$

Отже, витрати на працю становлять 6818,16 грн. Ставка за місяць становить:

3.2. Розрахунок витрат на матеріали та комплектуючі вироби

Для створення механічної частини та системи керування лазеру використовується комплекс покупних модулів, елементів кінематики та конструкційних матеріалів. Конструкція рами базується на алюмінієвих профілях, а переміщення осей реалізовано за допомогою пластикових роликів та зубчастого ремня. З'єднувальні каретки та елементи кабель-менеджменту виготовлені методом адитивного виробництва.

Витрати на придбання матеріалів та покупних комплектуючих виробів $S_{\text{мат}}$ розраховуються на основі діючих ринкових цін за формулою:

$$S_{\text{мат}} = \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot P_i) \cdot K_{\text{гр}}, \quad (3.3)$$

де: Q_i - кількість матеріалів або комплектуючих виробу i -го виду;

P_i - оптова або роздрібна ціна одиниці матеріалу чи вузла i -го виду, грн;

n - загальна кількість найменувань матеріалів та деталей у кошторисі;

$K_{\text{гр}}$ - коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати, логістику та доставку компонентів від постачальників (приймається $K_{\text{гр}} = 1.03$).

Таблиця 3.1

Повний перелік та собівартість деталей верстата

№ з/п	Найменування комплектуючого елемента	К-сть	Ціна за од., грн	Загальна сума, грн
1	Плата керування ЧПК Makerbase MKS DLC32	1 шт.	1530	1530
2	Лазерний діодний модуль (оптична потужність 10 Вт)	1 шт.	1310	1310
3	Кроковий двигун 17HS4401	3 шт.	350	1050
4	Драйвер двигуна A4988	3 шт.	60	180
5	Блок живлення	1 шт.	500	500
6	Конструкційний алюмінієвий профіль V-Slot 2040	3,5 м	240	840
7	Конструкційний алюмінієвий профіль V-Slot 2020	1,5 м	160	240
8	Ролики пластикові Delrin Solid V-Wheel з підшипниками	9 шт.	50	450
9	Ексцентрикові втулки та дистанційні шайби для роликів	9 шт.	16,67	150
10	Зубчастий ремінь GT2 (3200 мм) та шків	1	-	312
11	Пластик для 3D-друку деталей та кареток (матеріал ABS)	0,35 кг	428,5	150

Продовження таблиці 3.1

12	Набір метизів (гвинти DIN 912 під шестигранник, гайки)	1	250	250
13	Елементи кабель-менеджменту (кабель-канал, дроти)	1	200	200
Вартість разом:				7 362,00

Враховуючи коефіцієнт транспортно-заготівельних та поштових витрат ($K_{гр} = 1.03$), проведемо розрахунок остаточної вартості матеріально-технічного забезпечення проєкту:

$$S_{\text{мат}} = 7362 \cdot 1,03 = 7582,86 \text{ грн.}$$

Таким чином, сумарні витрати на придбання запчастин до верстату з ЧПК становлять 7582,86 грн.

3.3. Розрахунок витрат на енергоспоживання та накладні витрати

Витрати на спожиту електричну енергію ($S_{\text{ел}}$) визначаються за формулою:

$$S_{\text{ел}} = P \cdot T \cdot C, \quad (3.4)$$

де: P - споживана потужність обладнання, кВт;

T - тривалість роботи, год;

C - вартість електроенергії станом на 2026 рік (4,32 грн/кВт · год).

1. ПК розробника (3D-моделювання, програмування):

$$S_{\text{ел.пк}} = 0,25 \text{ кВт} \cdot 120 \text{ год} \cdot 4,32 \text{ кВт/год} = 129,60 \text{ грн.}$$

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2. ЧПК-верстат (тестові пуски, калібрування):

$$S_{\text{ел.верст}} = 0,08 \text{ кВт} \cdot 24 \text{ год} \cdot 4,32 \text{ кВт/год} = 8,30 \text{ грн.}$$

Загальні витрати на електроенергію:

$$S_{\text{ел}} = 129,60 + 8,30 = 137,90 \text{ грн.}$$

Накладні витрати враховують дрібні матеріали (мастило, припой, ізоляційна стрічка) та амортизацію слюсарного інструменту. Приймаються у фіксованому розмірі:

$$S_{\text{накл}} = 300 \text{ грн.}$$

Повна собівартість модернізації та технічного забезпечення верстата визначається як сума всіх калькуляційних статей:

$$C_{\text{повн}} = S_{\text{пр}} + S_{\text{мат}} + S_{\text{ел}} + S_{\text{накл}}, \quad (3.5)$$

$$C_{\text{повн}} = 1420,45 + 7582,86 + 137,90 + 300 = 9441,21 \text{ грн.}$$

Структура загальних витрат на реалізацію інженерного проєкту

Стаття калькуляційних витрат	Витрати, грн.
Витрати на оплату праці інженера	6818,16
Витрати на комплектуючі та матеріали з доставкою	7 582,86
Енергетичні витрати (електроенергія	137,9
Загальновиробничі та накладні витрати	300
Загальна сума витрат	9 441,21

Порівняльний аналіз із заводськими аналогами (середня вартість ~19500 грн) показує економічний ефект від самостійної розробки:

$$E_{\text{еф}} = 19500,00 - 9441,21 = 14838,92 \text{ грн.}$$

Вартість матеріалів та комплектуючих має значну фінансову перевагу, оскільки на собівартість пристрою становить лише 7582,86 грн. Повна собівартість з урахуванням розрахунку реального часу кваліфікованої праці інженера-конструктора та енерговитрат становить 14838,92 грн. Загальний економічний ефект, незалежно від одноразових витрат на проектування та енергоспоживання ПК, низьких цін закупівлі комплектуючих робить загальну вартість створення верстата суттєво нижчим за фабричні пропозиції. Порівняно з ринковими серійними аналогами потужністю 10 Вт середня вартість, якого становить ~19500 грн. В результаті 4661,08 грн на користь розробленого прототипу.

Отже, самостійна модернізація та збирання лазерного ЧПК-верстата є економічно вигіднішими, фінансово обґрунтованими та забезпечують швидкий термін окупності матеріальної бази при комерційній експлуатації.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Основні положення

Розробка та експлуатація верстата з числовим програмним керуванням в умовах лабораторії вимагає суворого дотримання комплексних вимог безпеки праці. Метою даного розділу є аналіз потенційних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які виникають під час роботи даного верстата, та обґрунтування інженерно-технічних і організаційних заходів для забезпечення нешкідливих і безпечних умов праці персоналу.

Лазерний верстат з числовим програмним керуванням, призначений для виготовлення різних видів гравіювання та експлуатується в приміщенні, яке відноситься до категорії без підвищеної небезпеки за рівнем ураження електричним струмом (за відсутності агресивного середовища та високої вологості), проте, інтеграція лазерного випромінювача та систем автоматичного ЧПК-керування створює специфічний комплекс факторів, що потребують контролю.

Організація робочого місця ЧПК-верстата здійснюється відповідно до Закону України «Про охорону праці». Відповідальність за стан охорони праці в приміщенні покладається на завідувача даного приміщення та безпосередньо керівника, які зобов'язані проводити регулярні інструктажі (первинні, повторні, цільові) з персоналом перед початком проведення будь-яких робіт.

4.2 Види небезпеки

Під час роботи розробленого лазерного верстата з ЧПК на оператора та персонал можуть діяти небезпечні та шкідливі виробничі фактори (визначені відповідно до Закону України «Про охорону праці» та Гігієнічної класифікації праці № 248).

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4		
Розроб.		Топоринський В.І.					
Перевір.		Крушельницький В.В.					
Н. Контр.							
Затверд.					НУБіП України		
					Літ.	Арк.	Аркушів
						53	62

Робочий орган верстата обладнаний твердотільним напівпровідниковим лазерним модулем із довжиною хвилі $\lambda = 405$ нм, має синьо-фіолетовий спектр та оптичну потужність до 500 мВт. Його споживана потужність модуля до 10 Вт. За ступенем небезпеки таке випромінювання належить до класу 3В або 4. Пряме, дзеркальне або дифузне відбите лазерне випромінювання становить критичну небезпеку для органів зору та може спричинити незворотні опіки сітківки, помутніння кришталіка та шкірних покривів.

Компоненти верстата живляться від постійної напруги 12 В, проте первинна мережа живлення блоків має небезпечну для життя напругу змінного струму 220 В з частотою 50 Гц. Небезпека ураження виникає у разі пошкодження ізоляції дротів, відсутності заземлення рами верстата або випадкового дотику до струмоведучих частин блоку живлення.

Під час термічного руйнування матеріалів лазерним променем у повітрі робочої зони виділяються шкідливі аерозолі, дрібнодисперсний пил (сажа), чадний газ, а також токсичні продукти розпаду пластиків, наприклад, формальдегіди, феноли, стироли. Перевищення гранично допустимих концентрацій цих речовин може призвести до отруєння або хронічних захворювань дихальних шляхів.

Висока концентрація теплової енергії в точці фокусування лазерного променя створює джерело запалювання. У разі зупинки руху порталу ЧПК через програмний збій або неправильний підбір параметрів швидкості чи потужності оброблюваний матеріал може легко спалахнути.

Механічні небезпеки: кінематична схема верстата побудована на базі конструкційних алюмінієвих профілів, по яких каретки осей X та Y переміщуються за допомогою ремінних передач від крокових двигунів. Існує ризик защемлення пальців або одягу оператора рухомими елементами порталу під час швидкого позиціонування верстата.

4.3 Нормативно-правова база

Проектування, виготовлення та експлуатація лазерного ЧПК-верстата регламентуються чинними нормативно-правовими актами України з охорони праці (НПАОП), будівельними нормами (ДБН), а також міжнародними та європейськими стандартами (ISO, IEC, EN), що гармонізовані з національною системою стандартизації:

- Закон України «Про охорону праці»
- ДСТУ EN 60825-1:2016 (IEC 60825-1) «Безпека лазерних виробів.
- ISO 11553-1:2020 «Safety of machinery
- IEC 62471:2006 «Photobiological safety of lamps and lamp systems»
- ДСТУ EN 60204-1:2019 (IEC 60204-1) «Безпека машин.
- СанПіН 5804-91 «Санітарні норми і правила устрою та експлуатації лазерів»

4.4. Заходи безпеки

Для нейтралізації дії виявлених небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час експлуатації лазерного верстата з ЧПК в умовах навчального приміщення впроваджується комплекс взаємопов'язаних технічних, технологічних та організаційних інженерних рішень. Оскільки механічне виконання верстата має відкриту архітектуру, забезпечення безпеки оператора та навколишнього персоналу досягається шляхом суворого регламентування умов роботи, підготовки приміщення та застосування засобів індивідуального захисту.

Основним технічним та організаційним заходом захисту в умовах відкритої оптичної системи є організація лазерно-небезпечної зони в межах усього приміщення лабораторії відповідно до СанПіН 5804-91. На входних дверях кімнати або цеху обов'язково встановлюють знак про лазерну небезпеку. Оскільки пряме або відбите синьо-фіолетове випромінювання лазерного модуля ($\lambda = 405 \text{ нм}$) є небезпечним для сітківки ока, перебування в приміщенні під час роботи верстата без засобів індивідуального захисту

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		55

органів зору суворо заборонено. Оператор та всі присутні особи зобов'язані безперервно використовувати сертифіковані захисні окуляри з оптичною щільністю не менше $OD4+$ у діапазоні 400–450 нм. Навколо самої рами верстата на робочому столі рекомендовано встановити локальні непрозорі захисні ширми з матовим покриттям, що унеможливить поширення випадково відбитих лазерних променів у напрямку інших робочих місць в приміщенні.

Видалення шкідливих аерозолів, чадного газу та дрібнодисперсного пилу (сажі), що утворюються в процесі термічного розпаду та випалювання лазером, здійснюється за допомогою локальної витяжної системи. Безпосередньо на каретці поруч із лазерним модулем монтується компактний витяжний розтруб - уловлювач, з'єднаний гнучким та легким повітропроводом із витяжним вентилятором продуктивністю не менше $150/\text{м}^3\text{год}$.

Електробезпека лазерного ЧПК-верстата забезпечується шляхом надійного захисного заземлення. Усі металеві елементи конструкції з'єднуються між собою контуром вирівнювання потенціалів та підключаються до захисного заземлювального пристрою в приміщенні з опором розтікання струму не більше 4 Ом. Електронні блоки живлення постійного струму 12 В, плата керування ЧПК та драйвери приводів розміщуються в окремому вентилятованому та заземленому захисному пластиковому боксі. Це повністю виключає можливість випадкового дотику людини до елементів первинної мережі змінного струму 220 В. Для оперативного реагування на позаштатні ситуації на лицьову панель блока керування винесено червону кнопку аварійної зупинки типу E-Stop з фіксацією, яка при натисканні миттєво знеструмлює силові блоки живлення лазера та приводів осей.

Пожежна безпека під час роботи з відкритим лазерним випромінювачем є невід'ємним фактором, оскільки висока концентрація енергії в точці фокусування променя здатна спричинити швидке займання оброблюваної

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		56

умовно деревини або пластику. Для запобігання пожежі в програмному забезпеченні контролера ЧПК активується функція автоматичного блокування випромінювача. У разі зупинки руху по осях X або Y через програмний збій або зависання ПК ШІМ-сигнал керування потужністю лазера автоматично скидається до нуля, вимикаючи діод. Робоче місце обов'язково комплектується первинними засобами пожежогасіння - вуглекислотним вогнегасником типу ОУ-2 або ОУ-3. Використання порошкових вогнегасників категорично заборонено через ризик безповоротного пошкодження прецизійної оптичної лінзи лазерної головки та відкритої мікроелектроніки верстата.

Механічна безпека рухомих частин відкритого порталу забезпечується правильним компонуванням кінематичних вузлів. Усі сигнальні шлейфи лазерного модуля, дроти живлення та кабелі крокових двигунів прокладаються всередині гнучких захисних кабель-каналів. Це повністю виключає ризик потрапляння дротів під рухомі ролики та ремені осей X/Y, запобігає їх механічному перетиранню чи зачепленню за елементи рами з профілю, а також мінімізує ризик травмування, зокрема защемлення пальців оператора під час швидкого автоматичного позиціонування верстата.

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі здійснено аналіз технологій лазерної обробки матеріалів, з особливим акцентом на застосування напівпровідникових випромінювачів у ЧПК-системах. Було ретельно вивчено особливості взаємодії лазерного променя з різними конструкційними матеріалами та обґрунтовано доцільність створення малогабаритного верстата.

Під час роботи було виконано математичні розрахунки параметрів верстату. На їх основі було розроблено конструкцію лазерного верстата з числовим програмним керуванням і підібрано відповіді деталі.

Отже, запропонована конструкція верстата демонструє високу точність обробки, надійність і економічну доцільність умов використання в малогабаритних приміщеннях. Результати дослідження відкривають перспективи для оперативного виробництва деталей авіамоделювання, маркування полімерів та подальшого вдосконалення алгоритмів керування ЧПК-системами. Подальший розвиток даної тематики може охоплювати поглиблене вивчення конструктивних рішень, інтеграцію новітніх матеріалів та вдосконалення систем керування з метою досягнення вищої якості, швидкості й доступності виробництва.

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			
Розроб.		Топоринський В.І.			ВИСНОВКИ		
Перевір.		Крушельницький В.В.					
Н. Контр.							
Затверд.							
					Літ.	Арк.	Аркушів
						58	62
					НУБіП України		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Принцип роботи верстатів з ЧПК: розповідаємо як працюють ЧПК верстати.* URL: <https://abplanalp.ua/princip-raboty-stanka-s-chpu> (дата звернення: 13.04.2026).
2. *What is CNC Turning: Basics, Processes, Machines, and Uses.* URL: <https://proleanmfg.com/blog/what-is-cnc-turning/> (дата звернення: 09.05.2026).
3. *14 типів верстатів з ЧПУ та їх категорій.* URL: <http://ua.hlc-metalparts.com/news/cnc-machines-79317314.html> (дата звернення: 20.04.2026).
4. *Як створити верстат з ЧПК з нуля? - Посібник DIY.* URL: <https://uk.stylecnc.com/blog/how-to-build-cnc-machine.html> (дата звернення: 07.05.2026).
5. *Stepper Motor - 68 oz.in (400 steps/rev, 300mm Wire).* URL: https://fdb-maschinen.com.ua/index.php?route=octemplates/blog/oct_blogarticle&blog_path=1&blogarticle_id=52 (дата звернення: 21.05.2026).
6. *GRBL Setup for Arduino CNC Control.* URL: https://ru.scribd.com/document/577688777/GRBL-SETUP#google_vignette (дата звернення: 21.04.2026).
7. *Linear Stepper Motor, One Micron Resolution.* URL: <https://www.todaysmedicaldevelopments.com/article/linear-stepper-motor--one-micron-resolution/#::~:~:text=A%20low%20cost%2C%20high%20performance,leads%20or%20%22D%22%20connectors.>
8. Ловеїкін В.С., Ромасевич Ю.О., Човнюк Ю.В. Мехатроніка. Навчальний посібник.. Київ : НУБіП України, 2012. 7 –30 с.

					01.09-БКР-1044 «С» 15.04.2026 034 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ			
Розроб.		Топоринський В.І.						
Перевір.		Крушельницький В.В.						
Н. Контр.								
Затверд.								
					Літ.	Арк.	Аркушів	
							59	62
					НУБіП України			

9. *G-Code in CNC Machine Tools Complete Guide for Beginners*. URL: <https://www.techpro-cnc.com/blog/gcode-in-cnc-machine-tools.html> (дата звернення: 09.05.2026).
10. Терейковський І., Терейковська Л. Цифрова обробка сигналів та зображень: розпізнавання фонем в голосовому сигналі за допомогою нейронних мереж. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 30–60 с.
11. *Bresenham's line algorithm*. URL: <https://mathematica.stackexchange.com/questions/45753/bresenham-s-line-algorithm> (дата звернення: 09.05.2026).
12. *Motion Profile Comparison*. URL: <https://xenovacivus.github.io/s-vs-t-curve/s-vs-t-curve.html>.
13. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. Херсон : 7-ма Міжнародна наукова-практична конференція, 2016. 30–60 с.
14. Находкін М, та інші автори. Функціональна електроніка. Київ : КНУ імені Тараса Шевченка, 2005. 20–30 с.
15. *Air Assist. Air Assist*. URL: <https://diode-laser-wiki.com/documentation/extras/air-assist/> (дата звернення: 23.05.2026).
16. *Air Assist for Laser Cutter and Engraver, Air Assist Pump Kit with Adjustable 30L/Min, Suitable for D1 Pro and D1 - Removes Smoke and Dust, Protects Laser Lens, Provides Clean Cutting Edge*. URL: <https://www.amazon.com/Assist-Cutter-Engraver-Adjustable-Suitable/dp/B0C1SHVC7Q> (дата звернення: 09.05.2026).
17. *Description of the Classification of Cnc Milling Machines*. URL: <https://www.lzcnemachine.com/news/the-classification-of-cnc-milling-machines-60.html> (дата звернення: 02.05.2026).
18. *What is a synchronous belt? Introduction to the characteristics of three methods of synchronous belt tensioning*. URL: <https://en.eeworld.com.cn/news/qrs/eic674316.html> (дата звернення: 02.05.2026).

- 19.4-Gantry systems. URL: <https://oh-au2mate.de/en/shop/gantry-systems/>
(дата звернення: 09.05.2026).
20. Сучасні технології у промисловому виробництві / ред. Х Всеукраїнська наукова-технічна конференція. Суми : Сумський державний університет, 2023. 70–85 с.
21. *Mechanical Advantage: Complete Guide to Levers, Pulleys, Gears, Hydraulics, and Actuators. Screws.* URL: <https://www.firgelliauto.com/blogs/news/mastering-mechanical-advantage-mechanisms-a-comprehensive-guide-to-levers-pulleys-gears-hydraulics-and-more> (дата звернення: 02.05.2026).
22. *Ball Screws vs. Helical Rack and Pinion.* URL: <https://www.technocnc.com/ball-screws-vs-rack-n-pinion/> (дата звернення: 03.05.2026).
23. *V-Slot Profiles.* URL: <https://makersupplies.dk/machine-components/v-slot-linear-guides/v-slot-profiles> (дата звернення: 03.05.2026).
24. *Aluminum extrusion thermal expansion rate?. What is the average thermal expansion rate of extrusions?.* URL: <https://sinoextrud.com/aluminum-extrusion-thermal-expansion-rate/> (дата звернення: 03.05.2026).
25. *How to avoid vibration problems on CNC milling machines?. 1. Causes of vibration of CNC milling machines.* URL: <https://www.bofengmachinery.com/How-to-avoid-vibration-problems-on-CNC-milling-machines.html> (дата звернення: 05.05.2026).
26. *Industrial/OEM Applications.* URL: <https://vibrasystems.com/industrial-oem-applications.html> (дата звернення: 05.05.2026).
27. *Closed Loop Stepper Motor: Features and Benefits.* URL: https://www.festo.com/gb/en/e/blog/in-practice/closed-loop-stepper-motor-features-and-benefits-id_3998016/ (дата звернення: 05.05.2026).
28. Baldwin J . *Advanced in Mechanical Engineering.* 2019. С. 1–19.

29. *End Stop / Limit Switch Problems.* URL: <https://www.instructables.com/End-Stop-Limit-Switch-Problems/> (дата звернення: 07.05.2026).
30. *MGSL. Description.* URL: <https://mgsl.in/products/pololu-1183?srltid=AfmBOopWix6BxxhhK9aZ9RlR3rdkJOTGqLdDjeJo5WuCqW22KhiczGM1> (дата звернення: 07.05.2026).
31. Wayne L. S., Brisson J. *Active heat transfer enhancement in air cooled heat sinks using integrated centrifugal fans.* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931014009752> (дата звернення: 07.05.2026).
32. *123-3B. Creality 3D V-slot wiel (2 stuks).* URL: <https://www.123-3d.nl/Creality3D-Creality-3D-V-slot-wiel-2-stuks-200103001-i2600.html> (дата звернення: 10.05.2026).