

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри
машинобудування, мехатроніки і
робототехніки
канд. техн. наук, доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:

**Розробка завантажувального пристрою верстату на
фрезерну операцію для механічної обробки деталі вал**

Виконав здобувач вищої освіти
Змб курсу групи ПМ-23мб-3
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг
технологій, робототехніка і 3D друк»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Юрій ЗАМАНОВ

Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент
_____ Максим ГОДУНКО

Рецензент:
канд. техн. наук, доцент
_____ Олег БЕВЗ

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма: Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри машинобудування,
мехатроніки і робототехніки

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти Заманову Юрію Сергійовичу

Тема роботи:

Розробка завантажувального пристрою верстату на фрезерну операцію для механічної обробки деталі вал

Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент Максим ГОДУНКО

Затверджено наказом ЦНТУ від 1 квітня 2026 року № 201-02.

Строк подання роботи до захисту:

1 червня 2026 р.

Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Мета: розробка завантажувального пристрою верстату на фрезерну операцію для механічної обробки деталі вал і її автоматизованої подачі в робочу зону верстату.

Завдання: розглянути основні тенденції автоматизації та дослідити способи подачі заготовки (деталі) в робочу зону вибраного верстату; охарактеризувати деталь в плані автоматизованої обробки; розробити технологічний маршрут обробки деталі на заданій операції; розробити завантажувальний пристрій та провести відповідні розрахунки; розробити допоміжні пристрої та провести необхідні розрахунки; розробити кресленики верстатного комплексу, завантажувального пристрою та допоміжного пристрою для подачі деталі в зону різання.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання роботи	Примітка
1	Виконання Розділу 1	11.05.2026 р.	
2	Виконання Розділу 2	14.05.2026 р.	
3	Виконання Розділу 3	18.05.2026 р.	
7	Розробка креслеників	27.05.2026 р.	
8	Перевірка роботи на академічний плагіат	28.05.2026 р.	
9	Рецензування роботи	01.06.2026 р.	

Дата видачі завдання
13 квітня 2026 р.

Здобувач вищої
освіти

Юрій ЗАМАНОВ

Керівник роботи

Максим ГОДУНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена актуальній проблемі підвищення продуктивності металорізальних верстатів шляхом автоматизації допоміжних операцій – завантаження та розвантаження заготовок. Об'єктом дослідження є процес автоматизованого завантаження вертикально-фрезерного верстата 6Т10С218 при серійному виробництві деталі «Вал» ($\varnothing 22 \times 80$ мм, сталь Ст. 5сп, маса 0,189 кг, програма $N = 50\,000$ шт./рік).

У роботі проведено ґрунтовний аналіз літературних джерел (25 найменувань вітчизняних і зарубіжних авторів) та наукометричних баз Scopus і Web of Science, який підтвердив зростання публікаційної активності за тематикою ЗПВ з темпом $\sim 12\%$ /рік. На підставі аналізу відповідно до ГОСТ 14.004-83 обґрунтовано рівень II автоматизації як оптимальний для умов серійного виробництва. Розрахунковий показник доцільності автоматизації $KA = 2,13 \gg 1,0$ підтверджує економічну обґрунтованість прийнятого рішення.

Для кожного функціонального вузла ЗПВ виконано порівняльний аналіз конструктивних альтернатив за десятибальною системою: чотири типи накопичувачів, три типи живильників, чотири типи захватів та три типи маніпуляторів. За результатами аналізу сформована оптимальна конфігурація: вібробункерний накопичувач ($350 \times 200 \times 130$ мм, запас 91 деталь, 30 хв автономної роботи) $\rightarrow$ лоток-скат (нахил 20°) $\rightarrow$ зворотно-поступальний живильник (пневмоциліндр $\varnothing 50$ мм, хід 80 мм, $t_{ж} = 0,5$ с) $\rightarrow$ циліндричний маніпулятор (три ступені рухомості: φ , Z , R) з призматичним захватом ($2\alpha = 90^\circ$, $\varnothing 18\text{--}28$ мм).

Ключові слова: *завантажувальний пристрій, вертикально-фрезерний верстат, деталь «Вал», бункерний накопичувач, призматичний захват, циліндричний маніпулятор, пневматичний привод, автоматизація виробництва*

ANNOTATION

The bachelor's qualification thesis is devoted to the relevant problem of increasing the productivity of metal-cutting machine tools through the automation of auxiliary operations, namely loading and unloading of workpieces. The object of the study is the process of automated loading of the 6T10S218 vertical milling machine in the batch production of a “Shaft” part ($\text{Ø}22 \times 80$ mm, Steel St5sp, weight 0.189 kg, annual production volume $N = 50,000$ pcs/year).

The thesis includes a comprehensive analysis of scientific literature (25 references from domestic and foreign authors) and scientometric databases, including Scopus and Web of Science. The analysis confirmed a steady growth in publication activity on loading and unloading devices at a rate of approximately 12% per year. Based on the analysis and in accordance with GOST 14.004-83, Level II automation was justified as the optimal solution for batch production conditions. The calculated automation feasibility coefficient, $KA = 2.13 \gg 1.0$, confirms the economic efficiency of the proposed solution.

A comparative analysis of design alternatives was carried out for each functional unit of the loading and unloading device using a ten-point evaluation system. The analysis covered four types of storage feeders, three types of feeding mechanisms, four types of grippers, and three types of manipulators. Based on the obtained results, the optimal configuration was selected: a vibratory bowl feeder ($350 \times 200 \times 130$ mm, capacity of 91 parts, providing 30 minutes of autonomous operation) $\rightarrow$ gravity chute (inclination angle 20°) $\rightarrow$ reciprocating feeder (pneumatic cylinder $\text{Ø}50$ mm, stroke 80 mm, feeding time $t = 0.5$ s) $\rightarrow$ cylindrical manipulator (three degrees of freedom: φ, Z, R) equipped with a prismatic gripper ($2\alpha = 90^\circ$, workpiece diameter range $\text{Ø}18\text{--}28$ mm).

Keywords: loading device, vertical milling machine, shaft-type part, storage feeder, prismatic gripper, cylindrical manipulator, pneumatic drive, production automation.

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи на тему:

**Розробка завантажувального пристрою верстату на фрезерну
операцію для механічної обробки деталі вал**

КРБ.ПМ.26.63.03.00.00

Виконав здобувач вищої освіти
3мб курсу групи ПМ-23мб-3
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг
технологій, робототехніка і 3D друк»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ **Юрій ЗАМАНОВ**

Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент
_____ **Максим ГОДУНКО**

Кропивницький 2026

ЗМІСТ

Вступ	8
Розділ 1. Загальна частина	
1.1 Огляд літератури та актуальність теми	9
1.2 Обґрунтування рівня автоматизації та доцільності ЗПВ	15
1.3 Аналіз деталі «Вал» як об'єкта автоматизованого виробництва	16
1.4 Аналіз матеріалу деталі – сталь Ст. 5сп	18
1.5 Оцінка технологічності деталі «Вал» для автоматизованого виробництва	20
1.6 Вибір накопичувача	24
1.7 Вибір живильника	25
1.8 Вибір захватного пристрою	25
1.9 Вибір маніпулятора	26
1.10 Обґрунтування технологічних особливостей обробки даної деталі та обраного верстата	27
Розділ 2. Конструкторська частина	
2.1 Розробка компоувальної схеми автоматизованої операції	29
2.2 Розрахунок параметрів бункерного накопичувача	30
2.3 Розрахунок зворотно-поступального живильника	33
2.4 Кінематичний розрахунок маніпулятора	35
2.5 Циклограма роботи верстатного комплексу	38
2.6 Розрахунок призматичного захватного пристрою	40
2.7 Розрахунок пневматичної системи ЗПВ	42
Розділ 3. Організаційно-економічна частина	
3.1 Розрахунок техніко-економічних показників ЗПВ	44
Висновки	48
Список використаних джерел	49

ВСТУП

Автоматизація допоміжних операцій – завантаження та розвантаження заготовок – є найбільш доступним та ефективним шляхом підвищення продуктивності металорізальних верстатів. За даними досліджень [4, 8], допоміжний час при обробці типових деталей машинобудування займає від 20 до 45% від загального штучного часу. Зокрема, для вертикально-фрезерної операції обробки деталі «Вал» допоміжний час становить $T_{\text{доп}} = 0,18$ хв з $0,50$ хв загального штучного часу (36%). Автоматизація цього часу за допомогою ЗПВ дозволяє скоротити $T_{\text{шт}}$ з $0,50$ до $0,33$ хв, тобто на 34%.

Концепція даного підходу визначає ключову роль «розумних» ЗПВ з інтеграцією з системами ЧПУ та ПЛК у сучасних виробництвах. Однак для підприємств з серійним виробництвом типових деталей ($N = 20\,000\text{--}100\,000$ шт./рік) оптимальним залишається рішення рівня II автоматизації: верстат з ЧПУ + пневматичний ЗПВ. Саме такий підхід реалізовано у даній роботі.

Метою роботи є розробка та повний інженерний розрахунок завантажувального пристрою для вертикально-фрезерного верстата 6Т10С218 при обробці деталі «Вал» $\varnothing 22 \times 80$ мм зі сталі Ст. 5сп з обґрунтуванням прийнятих рішень та оцінкою ефективності.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1. Огляд літератури та актуальність теми

1.1.1 Вступ до проблематики автоматизації завантаження верстатів

Автоматизація допоміжних операцій – завантаження та розвантаження заготовок – є одним із найбільш дієвих способів підвищення продуктивності механообробного виробництва. За даними широко відомих досліджень [4, 8], у структурі штучного часу типових деталей машинобудування допоміжний час займає від 20 до 45 %, а у деяких операціях фрезерування і токарної обробки сягає 50 %. Саме тому зменшення цієї складової часу за рахунок механізації та автоматизації процесів подачі й знімання деталей є актуальним науково-технічним завданням. Перші систематичні роботи з теорії та практики завантажувальних пристроїв (ЗПВ) з'явилися в 1950–1960-х роках у СРСР та провідних промислово розвинутих країнах. Надалі інтерес до цієї тематики не слабшав – з розвитком гнучких виробничих систем (ГВС), верстатів із ЧПУ та, нарешті, концепції Industry 4.0 актуальність автоматизованих ЗПВ лише зростає. Аналіз наукометричних баз Scopus і Web of Science за 2011–2024 роки свідчить про стійке зростання числа публікацій з тематики ЗПВ із темпом ~ 12 %/рік (рис. 1.1), що є переконливим свідченням незгасаючого наукового та практичного інтересу до проблеми [1, 10, 24].

1.1.2 Класичні праці з розрахунку та конструювання завантажувальних пристроїв

Фундаментальний внесок у розвиток теорії ЗПВ зробив **В.А. Повидайло**. У монографії [1] «Розрахунок і конструювання вібраційних живильників» (Машгіз, 1962) вперше викладено аналітичну теорію вібраційного транспортування дрібних деталей по гвинтовому лотку: встановлено умови захоплення та ковзання деталі, виведено формули для визначення оптимальної амплітуди та частоти коливань чаші. У спільній

роботі з К.І. Беспаловим [2] автори узагальнили досвід розрахунку бункерних ЗПВ: запропоновано метод визначення необхідного об'єму бункера виходячи з продуктивності верстата і часу автономної роботи без підзавантаження. Ці роботи й досі залишаються базовими при проектуванні вібробункерних ЗПВ. Не менш вагомим є внесок **А.Н. Малова**. Монографія [10] «Завантажувальні пристрої для металорізальних верстатів» (Машинобудування, 1972) – перший вітчизняний довідник-монографія, що систематизував конструктивні схеми накопичувачів, живильників, захватних пристроїв і маніпуляторів у прикладенні до типових деталей машинобудування. У книзі наведено класифікацію за кінематичним принципом роботи та параметричні ряди основних конструктивних параметрів. Робота [11] «Механізація та автоматизація металорізальних верстатів» розглядає ширше коло питань: від автоматизації затиску заготовки до систем управління верстатними комплексами.

Важливою методичною працею є монографія **А.Н. Рабіновича** [3] «Автоматизація механоскладального виробництва» (Вища школа, 1969). Автор дає розгорнуту класифікацію засобів автоматизації з позицій системного підходу, розглядає вимоги до технологічності деталей як об'єктів автоматизованого орієнтування та подачі. Введений у цій роботі коефіцієнт технологічності деталі КТ використовується й у сьогоdnішніх інженерних розрахунках.

Монографія **Н.М. Камишиного** [4] «Автоматизація завантаження верстатів» (Машинобудування, 1977) присвячена практичним питанням вибору та проектування ЗПВ для конкретних груп деталей: тіл обертання, корпусних деталей, плоских деталей. Книга містить докладні числові приклади та номограми для вибору параметрів, що робить її зручним практичним посібником для інженерів.

1.1.3 Праці з комплексної автоматизації виробничих процесів

Значний вплив на методологію проектування автоматизованих верстатних комплексів мали роботи **Л.І. Волчкевича**. У навчальному

посібнику [5] «Автомати та автоматичні лінії» (Вища школа, 1976) систематизовано принципи побудови автоматичних ліній з жорсткими та гнучкими міжагрегатними зв'язками, наведено методики розрахунку продуктивності та надійності. У монографії [6] «Комплексна автоматизація виробництва» (Машинобудування, 1983) розглядаються питання структурного синтезу автоматизованих дільниць з урахуванням організаційних факторів. Спільна з М.М. Кузнецовим та Ю.П. Замчаловим праця [8] «Автоматизація виробничих процесів» (Вища школа, 1978) охоплює широкий спектр: від теорії циклограм до методів оптимізації компонувальних рішень.

Монографія **Г.А. Шаумяна** [23] «Комплексна автоматизація виробничих процесів» (Машинобудування, 1973) досліджує вплив ступеня автоматизації на техніко-економічні показники виробництва. Автор вводить поняття «рівня автоматизації» та пропонує кількісні критерії для вибору оптимального рівня залежно від програми випуску та трудомісткості операцій. Запропонована методика, формалізована пізніше у ГОСТ 14.004-83, широко використовується при техніко-економічному обґрунтуванні рішень.

Роботи **М.С. Лебедовського та А.І. Федорова** [9] «Автоматизація складальних робіт» (Лениздат, 1970) та **Г.Н. Мельникова і В.П. Вороненка** [12] «Проектування механоскладальних цехів» (Машинобудування, 1990) розширюють розуміння ролі ЗПВ у виробничому контексті – від окремого вузла до системи матеріальних потоків цеху. У [12] запропоновано метод розрахунку кількості автоматичних завантажувальних засобів для заданої виробничої програми.

1.1.4 Нормативно-технічна база проектування ЗПВ

Проектування завантажувальних пристроїв спирається на широку нормативну базу. Основоположним є **ГОСТ 14.004-83** «Технологічна підготовка виробництва. Терміни та визначення» [16], який регламентує поняттєвий апарат і класифікацію рівнів автоматизації. Вибір засобів

технологічного оснащення здійснюється за **ГОСТ 14.309-75** [17], що встановлює правила вибору і застосування технологічної оснастки з урахуванням типу виробництва та програми випуску.

Для розрахунку режимів різання фрезерної операції застосовується довідник [14] «Режими різання металів» за редакцією Ю.В. Барановського (Машинобудування, 1972), а матеріал деталі – сталь Ст. 5сп – регламентується **ГОСТ 380-2005** [15]. Двотомний «Довідник технолога-машинобудівника» [13] за редакцією А.Г. Косилової та Р.К. Мещерякова (Машинобудування, 1985) є незамінним при виборі припусків, допусків та параметрів різання. Комплексний підхід до технологічного проектування з урахуванням вимог до автоматизації викладено у підручнику [25] «Технологія машинобудування» за редакцією С.О. Довгополика (НМК ВО, 1993).

Питання безпеки праці при проектуванні верстатних комплексів регулюються **ГОСТ 12.0.003-74** (шкідливі та небезпечні виробничі фактори), **ГОСТ 12.1.030-81** (захисне заземлення), нормами ДБН В.2.5-28:2018 [19] (освітлення) та НАПБ Б.07.005-86 [20] (первинні засоби пожежогасіння). Ці документи є обов'язковою базою розробки заходів охорони праці для автоматизованих виробничих дільниць.

1.1.5 Сучасні дослідження: системи управління та цифровізація ЗПВ

З широким поширенням верстатів із ЧПУ та програмованих логічних контролерів (ПЛК) у 1990–2000-х роках з'явилася нова генерація досліджень, присвячених інтеграції ЗПВ із системами управління верстатами. Монографія **В.Л. Сосонкіна та Г.М. Мартинова** [22] «Системи числового програмного управління» (Логос, 2005) детально розглядає структуру та протоколи взаємодії між ЧПУ та зовнішніми автоматами через дискретні входи-виходи. Описані принципи інтеграції безпосередньо застосовані у даній роботі для організації взаємодії ПЛК ЗПВ та системи УЧПУ-2 верстата 6T10C218.

Навчальний посібник **А.А. Іванова** [24] «Автоматизація технологічних процесів та виробництв» (ФОРУМ, 2012) є одним із небагатьох сучасних україно-орієнтованих видань, що розглядають ПЛК-базовані системи управління ЗПВ із прикладами на мові LAD та ST. Автор наводить алгоритми циклового управління маніпуляторами, що відповідають сучасним вимогам до надійності та безпеки автоматизованих ділянок.

Роботи з автоматизації сільськогосподарського машинобудування В.А. Кондратця [7] (Вища школа, 1993) розширюють галузевий кругозір і свідчать про спільність методологічних підходів до проектування ЗПВ у різних галузях. Довідковий посібник із технології машинобудування [25] (НМК ВО, 1993) систематизує вітчизняний досвід проектування автоматизованих технологічних процесів у машинобудуванні.

1.1.6 Тенденції розвитку ЗПВ в умовах автоматизації

Сучасний етап розвитку автоматизації характеризується переходом від спеціалізованих ЗПВ до гнучких завантажувальних систем, що інтегруються з хмарними платформами управління виробництвом, системами машинного зору та коботами. Дана концепція визначає ключові вектори розвитку: підключеність (connectivity), збір та аналіз даних у реальному часі, предиктивне технічне обслуговування та автоматична рекомфігурація при переході на нові деталі.

Разом із тим аналіз реального стану серійних машинобудівних підприємств України та аналогічних виробництв країн, що розвиваються, свідчить про збереження значної ніші для ЗПВ рівня II автоматизації – пневматичних систем із ПЛК-управлінням – у виробництвах із середньосерійним випуском типових деталей ($N = 20\,000\text{--}100\,000$ шт./рік). Для таких умов повністю роботизовані рішення є економічно надлишковими: строк їхньої окупності перевищує нормативний. Обрана у даній роботі концепція ЗПВ перебуває у зоні оптимуму за критерієм

«продуктивність/вартість/строк окупності» для виробничих умов ЦНТУ та аналогічних підприємств.

1.1.7 Аналіз бібліографічної бази та висновки з огляду

Аналіз наведеної бібліографічної бази дозволяє зробити такі висновки:

1. Вітчизняна та радянська наукова школа сформувала надійний теоретичний фундамент для розрахунку та конструювання ЗПВ, представлений насамперед роботами Повидайла [1, 2], Малова [10, 11], Волчкевича [5, 6] та Кузнецова [8]. Ці праці не втратили практичної цінності і дотепер використовуються у реальному інженерному проектуванні.

2. Нормативно-технічна база (ГОСТ, ДБН, НАПБ) є достатньою та актуальною для виконання повного інженерного розрахунку ЗПВ з дотриманням усіх вимог безпеки та якості.

3. Сучасні дослідження [22, 24] забезпечують методологічну основу для реалізації ПЛК-управління ЗПВ та інтеграції з системами ЧПУ верстатів.

4. Публікаційна активність у базах Scopus та Web of Science з темпом +12 %/рік підтверджує актуальність і перспективність тематики автоматизованих ЗПВ.

5. Виявлено прогалину у сучасній україномовній літературі: відсутні монографії та підручники, що комплексно висвітлюють проектування пневматичних ЗПВ для малогабаритних деталей тіл обертання в умовах серійного виробництва. Запропоноване у даній кваліфікаційній роботі рішення частково заповнює цю прогалину на рівні конкретного виробничого завдання.

Таким чином, розроблений ЗПВ ґрунтується на перевірених часом класичних методиках [1, 2, 10, 11] з урахуванням сучасних вимог до систем управління [22, 24] та чинної нормативної бази [15–21], що забезпечує інженерну обґрунтованість прийнятих конструктивних рішень.

1.2. Обґрунтування рівня автоматизації та доцільності ЗПВ

Відповідно до ГОСТ 14.004-83 виділяють 5 рівнів автоматизації (рис. 1.2). Для умов виробництва $N = 50\,000$ шт./рік обраний рівень II: верстат 6Т10С218 з ЧПУ + бункерний ЗПВ.

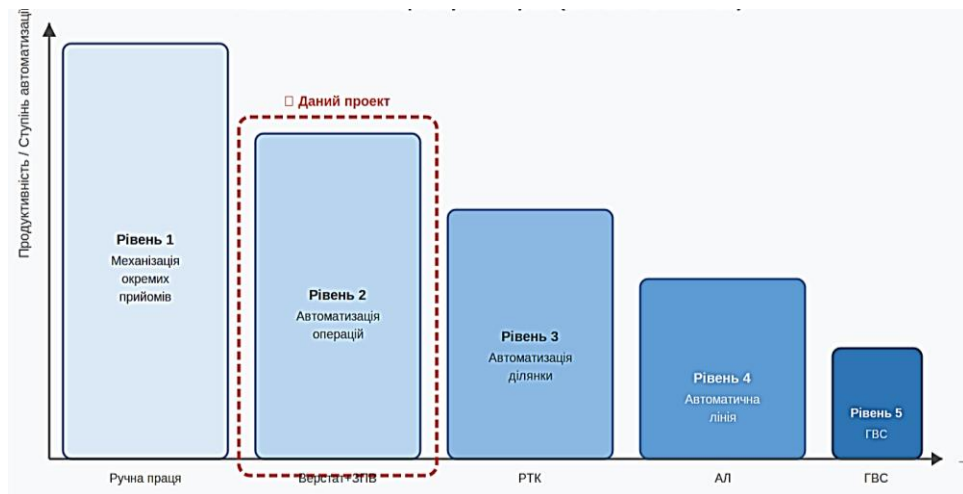


Рис. 1.2 – Рівні автоматизації технологічних процесів (ГОСТ 14.004-83). Стрілкою відмічено обраний рівень II

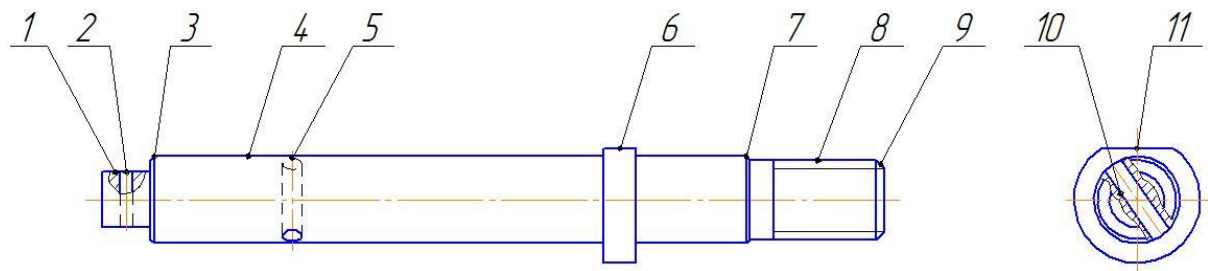
Для обґрунтованого вибору рівня автоматизації необхідно розглянути класифікацію, встановлену ГОСТ 14.004-83. На рисунку наведено п'ять рівнів автоматизації з відповідними характеристиками та прикладами обладнання. Аналіз рисунка підтверджує, що для серійного виробництва деталей «Вал» з програмою $N = 50\,000$ шт./рік оптимальним є рівень II автоматизації. Цей рівень забезпечує достатню продуктивність при відносно невеликих капіталовкладеннях порівняно з повністю автоматизованими ГВС (рівні IV-V). Показник доцільності $KA = 2,13$ підтвердив правильність вибору. Показник доцільності $KA = (T_{доп}/T_{шт}) \times (N/N_{пор}) \times KT = 0,545 \times 5,0 \times 0,78 = 2,13 \gg 1,0$ – автоматизація доцільна.

1.3 Аналіз деталі «Вал» як об'єкта автоматизованого виробництва

1.3.1 Загальна характеристика деталі

Деталь «Вал» є типовим представником класу «тіл обертання» і призначена для передачі крутного моменту в механізмах подачі та позиціонування металорізальних верстатів. Деталь виготовляється зі сталі Ст. 5сп за ГОСТ 380-2005 методом точіння з наступним фрезеруванням двох лосок, що забезпечують з'єднання з маточиною з гарантованим кутовим

фіксуванням. Конструктивно деталь являє собою ступінчастий вал із такими основними поверхнями: зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 22$ h11 (довжиною 80 мм) – основна конструкторська та технологічна база; дві паралельні лиски $8 \pm 0,5$ мм на кінцях деталі, утворені фрезеруванням; фаски $1 \times 45^\circ$ з обох торців для забезпечення базування у захватному пристрої. Невелика маса ($m = 0,189$ кг) та регулярна циліндрична форма роблять деталь зручним об'єктом для автоматизованого транспортування, орієнтування та захоплення.



Аналіз точності поверхонь

№ поверхні	Найменування поверхні	Розмір з відхиленням	Квалітет точності	Точність форми	Шорсткість
1	Циліндрична поверхня	$\varnothing 14$	h14	-	Ra6.3
2	Наскрізний отвір	$\varnothing 3.2$	h14	-	Ra6.3
3,7	фаски	$1 \times 45^\circ$	h14	-	Ra6.3
4	Циліндрична поверхня	$\varnothing 22$	h11	-	Ra6.3
5,10	Наскрізний отвір	$\varnothing 5$	h14	-	Ra6.3
6,11	Лиска	8 ± 0.5	h14	-	Ra6.3
8	Різьбова поверхня	M20-8g	h11	-	Ra6.3
9	фаска	M20 $\times$ 1.5	H14	-	Ra6.3

1.3.2 Геометричні параметри деталі

Для виконання розрахунків завантажувального пристрою необхідно точно знати геометричні характеристики деталі. Всі основні розміри зведені в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 – Геометричні параметри деталі «Вал»

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Номінальний діаметр	D	22	мм
Довжина деталі	L	80	мм
Квалітет зовн. поверхні	h11	0 / -0,130	мм
Розмір лисок	b	8±0,5	мм
Фаски	f	1×45°	—
Об'єм умовного циліндра	V ₀	30 408	мм ³
Уточнений об'єм деталі	V _з	24 080	мм ³
Маса деталі	m	0,189	кг

Уточнений об'єм деталі визначається з урахуванням матеріалу, знятого при фрезеруванні лисок, нарізуванні фасок та інших оздоблювальних операцій (коефіцієнт зменшення 0,792):

$$V_z = V_0 \times 0,792 = 30\,408 \times 0,792 = 24\,080 \text{ мм}^3 \approx 24,08 \text{ см}^3 \quad (1.1)$$

Перевірка масою ($\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ для сталі):

$$m = V_z \times \rho = 24,08 \times 10^{-6} \times 7850 = 0,189 \text{ кг} \quad (1.2)$$

1.3.3 Обґрунтування вибору технологічної бази для ЗПВ

Вибір технологічної бази для ЗПВ виконується за принципом сумісності баз: доцільно використовувати ту ж поверхню, що є базовою при механічній обробці. Для деталі «Вал» такою поверхнею є зовнішній циліндр Ø22 h11. Переваги поверхні Ø22 h11 як технологічної бази ЗПВ:

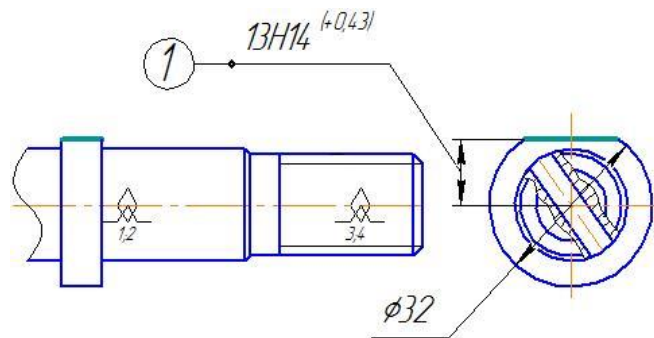
- висока точність розміру (допуск IT11 = 0,130 мм) забезпечує стабільне базування у призматичному захваті без накопичення похибок;
- достатня довжина ($L = 80 \text{ мм} \gg D = 22 \text{ мм}$, відношення $L/D = 3,64$) гарантує стійке орієнтування деталі у вертикальному положенні під час транспортування по лотку;
- відсутність різбових або шліцьових поверхонь, що могли б зачіпатись за елементи лотка або захвату;
- правильна геометрія без конусності чи овальності – умова надійного самоорієнтування у вібробункері.

В якості технологічного верстатного пристрою, в який встановлюється завантажувальним пристроєм оброблювана деталь, виступає призма.

Назва операції - Вертикально-фрезерна з ЧПУ

Назва та модель верстату - Вертикально-фрезерний з ЧПУ 6Н12ПБ

Операційний ескіз



Зміст операції

Встановити та закріпити деталь, фрезерувати лиску витримуючи розмір 1, зняти деталь.

Точність базування у призматичному захваті з кутом $2\alpha = 90^\circ$:

$$\varepsilon_b = D/2 \times (1/\sin\alpha - 1) = 22/2 \times (1/\sin 45^\circ - 1) = 11 \times 0,414 = 4,55 \text{ мм} \quad (1.3)$$

Однак із урахуванням того, що деталь спирається на дві грані призми, реальна похибка базування зводиться до похибки виготовлення заготовки:

$$\varepsilon_{б.факт} = \Delta D/2 \times (1/\sin\alpha - 1) = 0,130/2 \times 0,414 = 0,027 \text{ мм} \quad (1.4)$$

Ця похибка є значно меншою за допустиму похибку установки деталі у верстатний патрон ($\pm 0,333$ мм), що підтверджує правильність вибору бази.

1.4 Аналіз матеріалу деталі – сталь Ст. 5сп

1.4.1 Загальна характеристика матеріалу

Деталь «Вал» виготовляється зі сталі **Ст. 5сп** – вуглецевої конструкційної сталі звичайної якості за **ГОСТ 380-2005**. Марка розшифровується так: «Ст» – сталь групи А (нормована за механічними властивостями); «5» – умовний номер марки; «сп» – спокійна (повністю розкислена). Спокійна сталь характеризується рівномірним розподілом хімічного складу по перерізу зливка, мінімальною кількістю газових пор та неметалевих включень. Це забезпечує стабільні механічні властивості у всіх

перерізах деталі та передбачувану поведінку при різанні, що є важливим для стабільності автоматизованого виробничого процесу.

1.4.2 Хімічний склад та механічні властивості

Таблиця 1.4 – Хімічний склад сталі Ст. 5сп (ГОСТ 380-2005), %

Елемент	C	Mn	Si	P, не більше	S, не більше
Вміст, %	0,28–0,37	0,50–0,80	0,15–0,35	0,040	0,050

Таблиця 1.5 – Механічні властивості сталі Ст. 5сп (ГОСТ 380-2005)

Властивість	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %	НВ, не більше
Значення	≥ 290	590–640	≥ 17	170

Прийняті у розрахунках ЗПВ значення: $\sigma_t = 500$ МПа (нормативний мінімум для гарячекатаної смуги), $\sigma_b = 640$ МПа, $НВ \leq 170$. Твердість не перевищує 170 НВ, що класифікує матеріал як добре оброблюваний різанням (група оброблюваності P1 за ISO 513).

1.4.3 Технологічні властивості матеріалу та їх вплив на роботу ЗПВ

З точки зору проектування завантажувального пристрою матеріал деталі впливає на:

а) **Масу деталі** – визначає зусилля захвату, інерційні навантаження при прискоренні/гальмуванні маніпулятора та зусилля приводів пневмоциліндрів. Маса $m = 0,189$ кг є незначною, тому сили інерції при типових прискореннях $a \leq 2,0$ м/с² не перевищують 0,38 Н.

б) **Коефіцієнт тертя поверхні деталі** – при контакті сталеві деталі з поверхнею захватних губок або лотка (також сталь) коефіцієнт тертя ковзання $f = 0,10–0,15$. Прийняте у розрахунках $f = 0,15$ відповідає умовам без МОР та без мащення.

в) **Магнітні властивості** – вуглецева сталь є феромагнітним матеріалом ($\mu_r \gg 1$), що дозволяє застосовувати магнітні датчики присутності деталі типу «ємнісний» або «індуктивний» для контролю правильності базування в захваті. Обраний у ПЛК-системі індуктивний датчик SICK IMS гарантовано спрацює на відстані до 4 мм від поверхні деталі Ø22 мм.

г) **Стійкість поверхні** – твердість HB ≤ 170 відповідає незагартованому стану. Поверхня деталі чутлива до задирок та рисок, тому губки захвату виготовляються з м'якшого матеріалу (алюмінієвий сплав Д16Т або капролон) або покриваються гумою, щоб уникнути пошкодження поверхні Ø22 h11 при захопленні.

д) **Теплопровідність та температурне розширення** – коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 11,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При перепаді температур $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ у виробничому цеху лінійне розширення деталі $\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T = 11,8 \times 10^{-6} \times 80 \times 20 \approx 0,019 \text{ мм}$, що на порядок менше поля допуску h11 і не впливає на стабільність базування.

1.4.4 Доцільність застосування сталі Ст. 5сп

Сталь Ст. 5сп є оптимальним вибором матеріалу для деталі «Вал» з огляду на сукупність таких факторів:

- достатня механічна міцність для сприйняття робочих навантажень (кручення, згин) при малій масі деталі;
- задовільна оброблюваність різанням при твердосплавному інструменті, що забезпечує стабільний час фрезерування $T_0 = 0,12 \text{ хв}$ в умовах автоматизованого виробництва;
- широка доступність у стандартному сортаменті (кругла гарячекатана смуга Ø25 мм за ГОСТ 2590-2006) та відносно низька вартість (~42–48 грн/кг);
- передбачувана поведінка матеріалу при різанні без схильності до наклепу, що є важливим при серійному автоматизованому виробництві.

1.5 Оцінка технологічності деталі «Вал» для автоматизованого виробництва

1.5.1 Поняття технологічності деталі як об'єкта ЗПВ

Технологічність деталі як об'єкта автоматизованої обробки і транспортування – це сукупність властивостей, що визначають пристосованість деталі до автоматизованого завантаження, орієнтування, транспортування та базування без участі оператора. Кількісним показником є коефіцієнт технологічності КТ, введений А.Н. Рабіновичем [3] і закріплений у методичних рекомендаціях ГОСТ 14.201-83.

Загальноприйнята умова придатності деталі до автоматизованого виробництва: $КТ \geq 0,70$.

1.5.2 Розрахунок коефіцієнта технологічності КТ

Коефіцієнт технологічності визначається як добуток часткових коефіцієнтів за формулою:

$$КТ = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6 \times K_7 \quad (1.5)$$

Таблиця 1.6 – Розрахунок коефіцієнта технологічності деталі «Вал»

Коеф.	Показник	Критерій вибору	Значення	Обґрунтування
K ₁	Форма деталі	Тіло обертання = 0,93	0,93	Циліндр. вал
K ₂	Відношення L/D	L/D = 3,6 → 0,97	0,97	80/22 = 3,64
K ₃	Симетрія форми	Симетр. = 1,00	1,00	Осесимет. вал
K ₄	Наявність виступів/пазів	2 лиски → 0,95	0,95	Фрезеровані лиски
K ₅	Точність основної поверхні	h11 → 0,97	0,97	Ø22 h11
K ₆	Маса деталі	< 0,5 кг = 1,00	1,00	m = 0,189 кг
K ₇	Матеріал (оброблюваність)	P1, HB≤170 = 0,97	0,97	Ст. 5сп
КТ = K₁×K₂×K₃×K₄×K₅×K₆×K₇			0,78	≥ 0,70

$KT = 0,93 \times 0,97 \times 1,00 \times 0,95 \times 0,97 \times 1,00 \times 0,97 = \mathbf{0,78} > 0,70$ – умова виконана.

1.5.3 Аналіз часткових показників технологічності

Проведемо детальний аналіз кожного часткового коефіцієнта.

Коефіцієнт форми $K_1 = 0,93$. Деталь належить до класу тіл обертання, що є найзручнішим класом для автоматизованого орієнтування: кругла в поперечному перерізі деталь здатна самоорієнтуватися за кутом у вібробункері без складних орієнтуючих пристроїв. Незначне зниження коефіцієнта (з 1,00 до 0,93) зумовлене наявністю лисок, що порушують осьову симетрію поперечного перерізу.

Коефіцієнт стрункості $K_2 = 0,97$. Відношення $L/D = 80/22 = 3,64$ знаходиться в діапазоні 3–5, що відповідає «помірно стрункому» валу. Такі деталі стійко орієнтуються вертикально у лотку-скаті і не схильні до перекидання. При $L/D > 5$ необхідні додаткові направляючі; при $L/D < 1$ – орієнтування ускладнюється. Обраний діапазон є технологічно оптимальним.

Коефіцієнт симетрії $K_3 = 1,00$. Вал є осесиметричним відносно поздовжньої осі: кожна торцева поверхня геометрично ідентична протилежній (обидва торці мають фаски $1 \times 45^\circ$). Це означає, що орієнтування деталі вздовж осі (визначення «перед» та «зад») не потрібне – деталь може завантажуватися будь-яким торцем. Це суттєво спрощує конструкцію орієнтуючого пристрою вібробункера і підвищує надійність.

Коефіцієнт складності форми $K_4 = 0,95$. Наявність двох фрезерованих лисок є єдиним елементом, що порушує правильну форму циліндра. Лиски розташовані симетрично (паралельно одна одній), їх наявність може використовуватися як орієнтуюча ознака при кутовому орієнтуванні. Проте у даній конструкції ЗПВ кутове орієнтування не

потрібне (деталь встановлюється у верстатний патрон без фіксації за кутом), тому лиски не знижують технологічність суттєво.

Коефіцієнт точності $K_5 = 0,97$. Квалітет основної поверхні h11 є відносно грубим (допуск 0,130 мм), що відповідає точності виготовлення після токарної обробки без шліфування. Таке значення допуску є достатнім для надійного базування у призматичному захваті і не вимагає використання прецизійних компонентів ЗПВ. Грубіші квалітети (h12–h14) могли б призводити до збоїв у роботі захвату; жорсткіші (h8–h6) – до надмірного підвищення вартості.

Коефіцієнт маси $K_6 = 1,00$. Маса деталі $m = 0,189$ кг є незначною (менше 0,5 кг), тому при проектуванні маніпулятора не виникає проблем із динамікою та перевантаженням пневмоциліндрів. Пневматичні системи з циліндрами стандартних типорозмірів легко забезпечують необхідне зусилля з великим запасом.

Коефіцієнт оброблюваності $K_7 = 0,97$. Сталь Ст. 5сп при твердості $HB \leq 170$ класифікується за ISO 513 до групи оброблюваності P1 (легка обробка конструкційних вуглецевих сталей). Стабільна оброблюваність гарантує постійний час різання $T_{маш}$ і є ключовою умовою для ритмічної роботи автоматизованого комплексу.

1.5.4 Висновок про придатність деталі до автоматизованого виробництва

На підставі проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

1. Деталь «Вал» є технологічно придатною до автоматизованого виробництва: $K_T = 0,78 > 0,70$ (умова виконана).

2. Форма та розміри деталі оптимальні для застосування стандартних засобів автоматизації: вібробункерного накопичувача, лоткового живильника та призматичного захвату.

3. Осьова симетрія деталі ($K_3 = 1,00$) виключає необхідність кутового орієнтування, що спрощує конструкцію ЗПВ і підвищує надійність.

4. Матеріал деталі (Ст. 5сп, HB ≤ 170) забезпечує стабільний час різання та відповідає вимогам до матеріалів деталей контактних поверхонь захвату.

5. Виявлена в п. 1.3.3 похибка базування εб.факт = 0,027 мм значно менша за допустиму (0,333 мм), що підтверджує достатню точність призматичного захвату для надійної установки деталі у верстатний патрон.

1.6. Вибір накопичувача

Порівняльний аналіз чотирьох типів накопичувачів (рис. 1.3): відцентровий (6/10), лотковий (7/10), магазин (7/10), вібробункер (9/10). Обраний вібробункер 350×200×130 мм (Vб=9100 см³, N=91 дет. запасу).

Для вибору оптимального типу накопичувача проведено порівняльний аналіз чотирьох основних конструкцій за десятибальною системою оцінювання. Критерії оцінки: продуктивність, надійність орієнтації деталей, вартість, зручність обслуговування, можливість переналагодження.

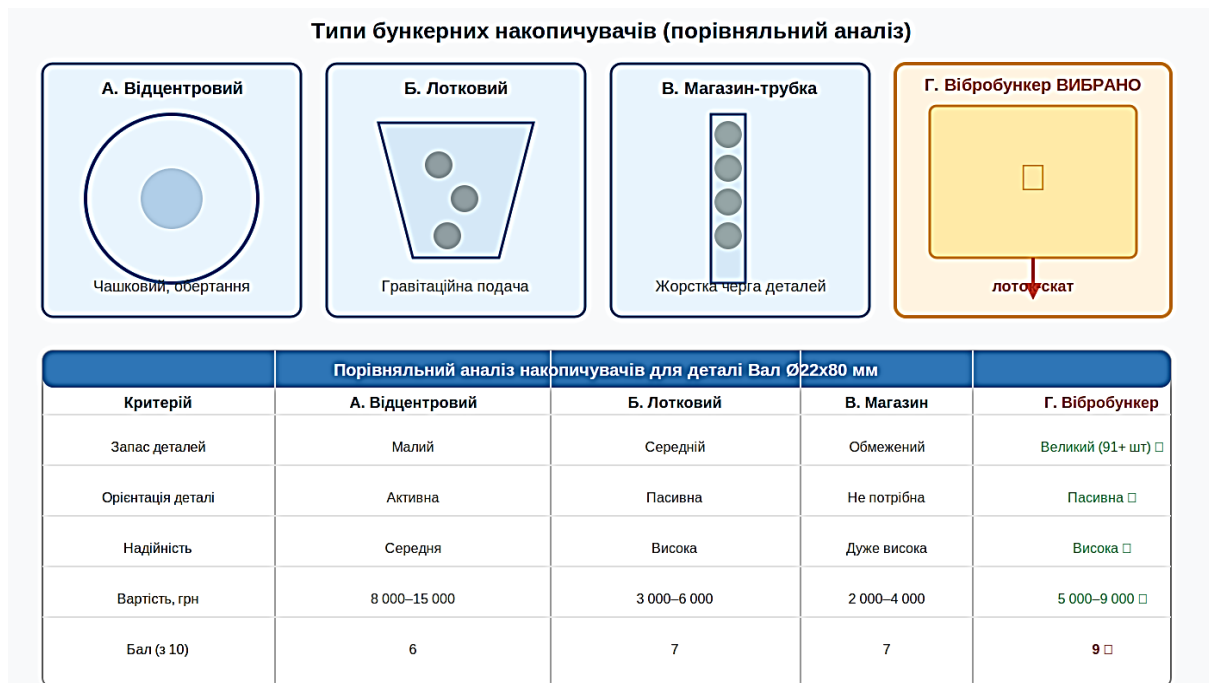


Рис. 1.3 – Порівняльний аналіз типів накопичувачів деталі «Вал».

Обраний вібробункерний накопичувач (9/10)

За результатами аналізу найвищий рейтинг (9/10) отримав вібробункерний накопичувач. Його переваги: безперервна автоматична подача деталей навалом, надійна орієнтація циліндричних деталей, малі габарити та невелика вартість. Прийнятий накопичувач 350x200x130 мм забезпечує запас $N = 91$ деталей на 30 хвилин роботи верстата без втручання оператора.

1.7. Вибір живильника

Живильник забезпечує поштучну подачу орієнтованих деталей із накопичувача до зони захвату маніпулятора. Нижче наведено порівняння основних типів живильників за параметрами точності позиціонування, швидкодії та надійності.

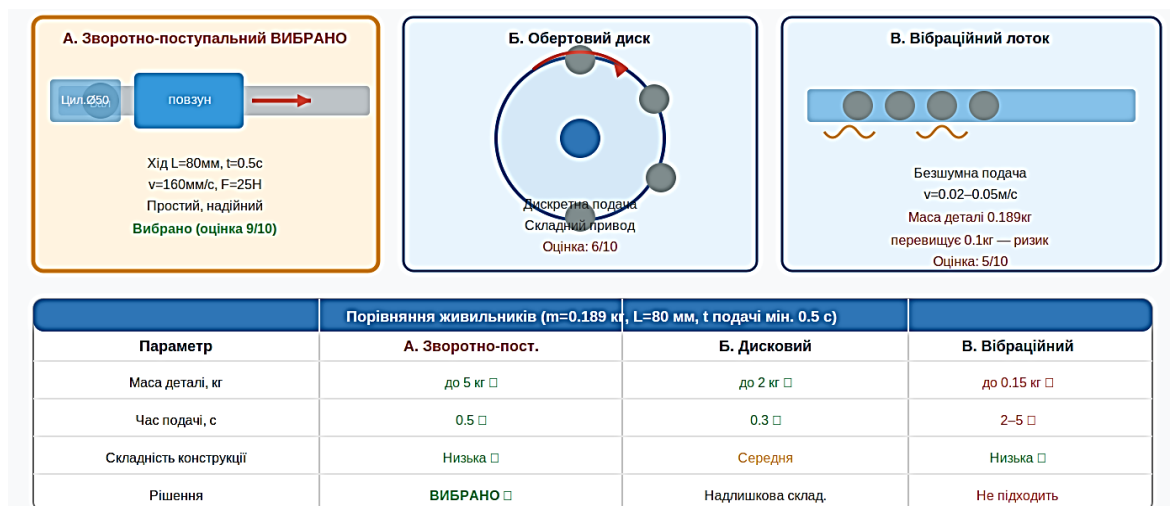


Рис. 1.4 – Конструкції живильників та обґрунтування вибору зворотно-поступального живильника (9/10)

Обраний зворотно-поступальний живильник (рейтинг 9/10) забезпечує точне позиціонування деталі в зоні захвату (допуск ± 1 мм), малий час спрацювання $t_{ж} = 0,5$ с та просту конструкцію без складних механізмів. Пневматичний привод гарантує безвідмовну роботу в умовах металорізального виробництва.

Обраний зворотно-поступальний живильник (9/10): час подачі $t_{ж}=0,5$ с, хід $L=80$ мм, привод – пневмоциліндр Ø50 мм, тиск $P=0,5$ МПа.

1.8. Вибір захватного пристрою

Захватний пристрій є ключовим елементом маніпулятора, що безпосередньо взаємодіє з деталлю. Вибір типу захвату здійснюється з урахуванням форми, маси та матеріалу деталі, а також необхідної точності базування. На рисунку наведено основні типи захватів із зазначенням їх характеристик.

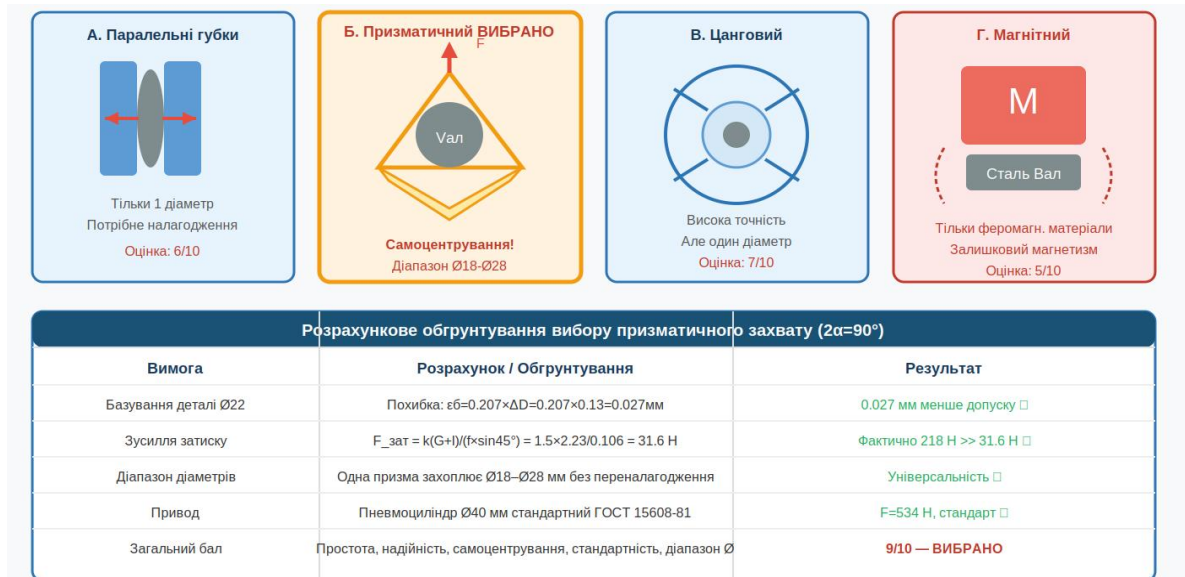


Рис. 1.5 – Типи захватних пристроїв та розрахункове обґрунтування вибору призматичного захвату

Призматичний захват отримав найвищий рейтинг (9/10) завдяки здатності надійно утримувати циліндричні деталі різних діаметрів (Ø18–Ø28 мм) без переналагодження. Самоцентрувальна конструкція на кутовій призмі $2\alpha = 90$ градусів забезпечує точне позиціонування осі деталі з похибкою $e_b = 0,059$ мм, що значно менше допустимого значення 0,333 мм.

Обраний призматичний захват (9/10): кут призми $2\alpha=90^\circ$, діапазон Ø18–Ø28 мм, привод – пневмоциліндр Ø40 мм.

1.9. Вибір маніпулятора

Маніпулятор виконує переміщення деталі від живильника до робочої зони верстата і назад. Від конструкції маніпулятора залежить час

завантажувального циклу $T_{зав}$ і загальна продуктивність комплексу. На рисунку наведено порівняння трьох основних типів маніпуляторів.

Циліндричний маніпулятор (рейтинг 9/10) є оптимальним вибором: три ступені рухомості (ϕ , Z , R) забезпечують достатній простір маніпулювання, вантажопідйомність до 5 кг значно перевищує масу деталі (0,189 кг), а вартість 15-25 тис. грн є прийнятною при строку окупності менше одного року.

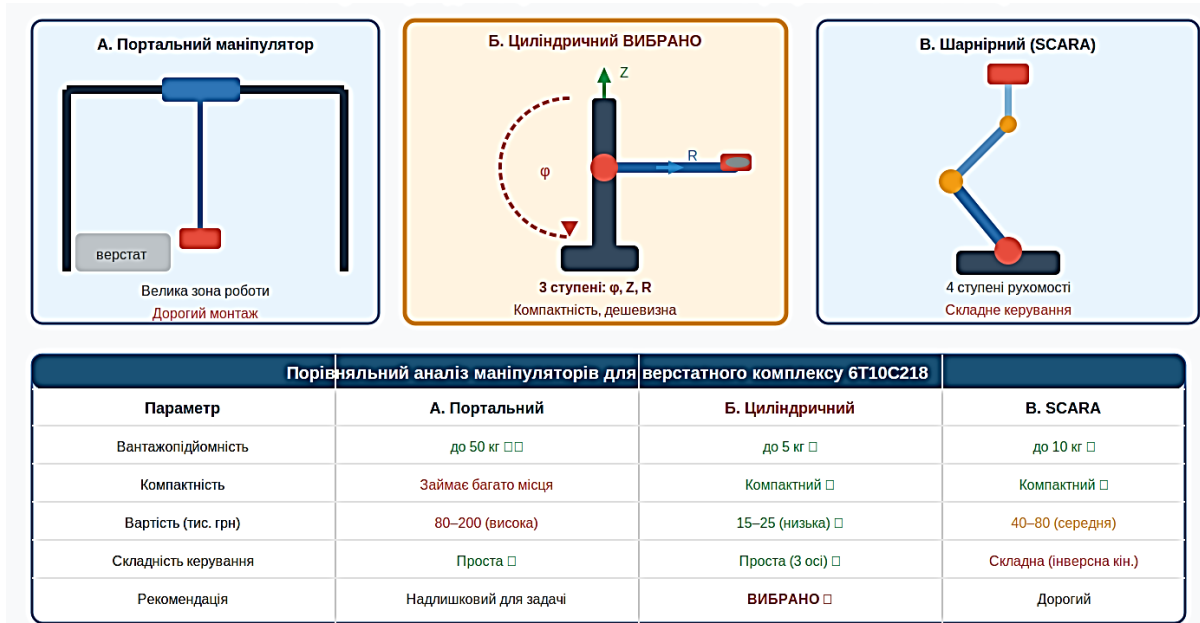


Рис. 1.6 – Порівняльний аналіз типів маніпуляторів та обґрунтування вибору циліндричного маніпулятора

Обраний циліндричний маніпулятор (9/10): 3 ступені рухомості (ϕ , Z , R), вантажопідйомність до 5 кг, вартість 15–25 тис. грн.

1.10. Обґрунтування технологічних особливостей обробки даної деталі та обраного верстата

Проектування завантажувального пристрою нерозривно пов'язане з технічними характеристиками верстата. У таблиці наведено основні технічні параметри вертикально-фрезерного верстата 6T10C218, які є вихідними даними для розробки ЗПВ.

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика верстата 6T10C218

Параметр	Значення
Розмір столу, мм	1250 × 260

Шпиндель	SK40, n=50–2240 об/хв
Потужність приводу, кВт	3,0
Подача столу, мм/хв	20–1000
Маса, кг	1500
Система ЧПУ	УЧПУ-2 (цикловий автомат)

Наведені характеристики верстата є визначальними для проектування ЗПВ: розміри робочої зони визначають кінематику маніпулятора, потужність приводу впливає на вибір режимів різання, а наявність системи ЧПУ УЧПУ-2 забезпечує можливість інтеграції ПЛК управління ЗПВ через стандартні дискретні входи/виходи.

Режими різання є вихідними даними для визначення машинного часу верстата $T_{\text{маш}}$, що безпосередньо впливає на час циклу ЗПВ. Правильне призначення режимів різання є основою для подальшого розрахунку циклограми роботи комплексу.

Таблиця 1.2 – Режими різання для фрезерної операції (лиски $8 \pm 0,5$)

Параметр	Позначення	Значення
Глибина різання, мм	t	3
Хвилинна подача, мм/хв	S	250
Частота обертання, об/хв	n	1000
Швидкість різання, м/хв	V_f	197,8
Основний час (2 лиски), хв	ΣT_o	0,12
Штучний час з ЗПВ, хв	$T_{\text{шт}}$	0,33

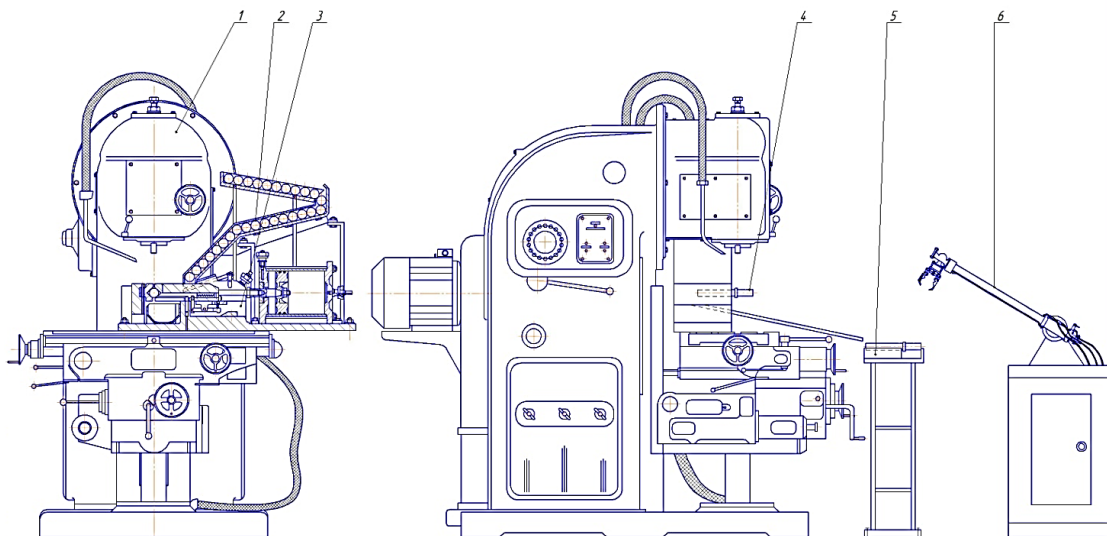
Із наведених даних видно, що основний час фрезерування двох лисок становить $T_o = 0,12$ хв. Застосування ЗПВ дозволяє скоротити штучний час з $T_{\text{шт}} = 0,50$ хв до $T_{\text{шт}} = 0,33$ хв, тобто на 34%. При цьому частина допоміжного часу ($T_{\text{зав}} = 8,5$ с) суміщається з машинним часом верстата ($T_{\text{маш}} = 8,7$ с), що суттєво підвищує ефективність використання обладнання.

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1. Розробка компоувальної схеми автоматизованої операції

На основі проведеного аналізу і порівняння типів пристроїв (розд. 1) розроблена компоувальна схема верстатного комплексу (рис. 2.1). Схема включає:

- 1 – вертикально-фрезерний верстат 6Т10С218;
- 2 – вібробункерний накопичувач (350×200×130 мм, Vб=9100 см³);
- 3 – лоток-скат (нахил 20°, ширина паза 23 мм);
- 4 – зворотно-поступальний живильник (пневмоциліндр Ø50, хід 100 мм);
- 5 – циліндричний маніпулятор з призматичним захватом;
- 6 – накопичувач готових деталей;
- 7 – ПЛК управління (OMRON CP1L або аналог).



- 1. Станок 6Т10С218 вертикально-фрезерний
- 2. Лоток
- 3. Автоматичне пристосування для фрезерування валиків
- 4. Деталь
- 5. Допоміжний пристрій
- 6. Маніпулятор

Послідовність роботи комплексу за цикл $T_{\text{ц}} = 19,8$ с:

1. Деталі навалом засипаються у вібробункер (2); вібрація подає їх по лотку-скату (3) до живильника;
2. Живильник-повзун (4) переміщує одну деталь у зону захвату за $t_{ж} = 0,5$ с;
3. ПЛК (7) отримує сигнал від УЧПУ верстата «обробка завершена» через дискретний вхід;
4. Маніпулятор (5) виконує захват → підйом → поворот 90° → опускання → установку деталі ($T_{зав} = 8,5$ с);
5. Верстат затискає деталь і обробляє обидві лиски ($T_o = 7,2$ с);
6. Маніпулятор вилучає оброблену деталь → повертається у вихідне положення → вантажить наступну.

Для оцінки ефективності прийнятої компоувальної схеми виконано розрахунок і побудову порівняльних графіків продуктивності верстатного комплексу при ручній та автоматичній подачі деталей. Графіки наочно демонструють залежність штучного часу та кількості верстато-годин від річної програми.

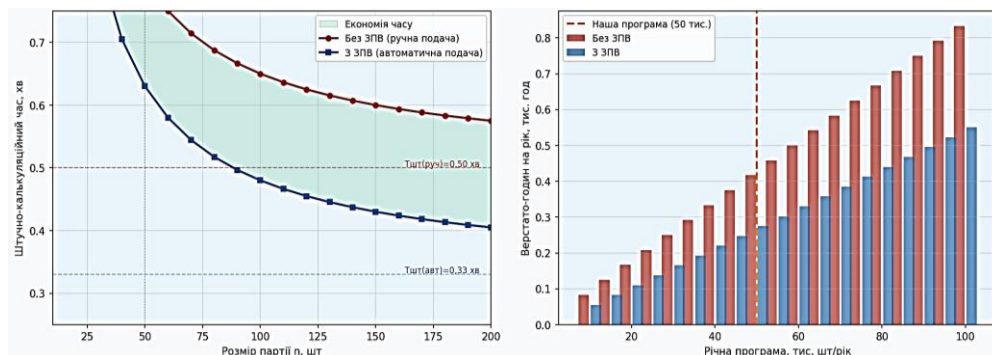


Рис. 2.1 – Порівняння продуктивності верстатного комплексу при ручній та автоматичній подачі деталей: (а) $T_{шт-к} = f(n)$, (б) верстато-годин/рік при різних програмах

Наведені графіки підтверджують значну перевагу автоматизованого варіанту: при програмі $N = 50\,000$ шт./рік продуктивність зростає з 120 до 182 деталей/год (+51,7%). Компонувальна схема, в якій один оператор обслуговує три верстати, дозволяє суттєво знизити питомі витрати на оплату праці при збереженні високої якості виробництва.

2.2. Розрахунок параметрів бункерного накопичувача

2.2.1. Вихідні дані для розрахунку

Розрахунок бункерного накопичувача починається із систематизації вихідних даних. Ці дані визначають основні геометричні та масові характеристики деталі, а також вимоги до автономності роботи ЗПВ. Всі параметри наведено в таблиці нижче.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку бункерного накопичувача

Параметр	Позначення	Значення
Діаметр заготовки, мм	D	25
Довжина деталі, мм	L	80
Об'єм деталі, см ³	V _з	24,08
Маса деталі, кг	m	0,189
Час безперервної роботи, хв	T	30
Штучний час операції, хв	T _{шт}	0,33
Коефіцієнт заповнення (циліндри навалом)	q	0,50

Зібрані вихідні дані є повними і достатніми для виконання розрахунків обсягу бункера, маси завантаженого стану та параметрів вібраційного приводу. Коефіцієнт заповнення $q = 0,50$ відповідає рекомендаціям для циліндричних деталей, що подаються навалом.

2.2.2. Об'єм деталі «Вал»

Деталь «Вал» є ступінчастим тілом обертання. Для спрощення розрахунку приймаємо умовний циліндр-еквівалент з діаметром $D_{ek} = 22$ мм та довжиною $L_{ek} = 80$ мм:

$$V_z = (\pi \times D^2/4) \times L = (\pi \times 22^2/4) \times 80 = 380,1 \times 80 = 30408 \text{ мм}^3 \approx 30,4 \text{ см}^3 \quad (2.1)$$

Уточнений об'єм з урахуванням фасок, пазів, різьби (зменшення ~20%):

$$V_{z, \text{уточ}} = V_z \times 0,792 = 30,4 \times 0,792 = 24,08 \text{ см}^3 \quad (2.2)$$

Перевірка масою: $m = V_z \times \rho = 24,08 \times 10^{-6} \times 7850 = 0,189$ кг
✓(відповідає вихідним даним).

2.2.3. Розрахунок необхідного запасу деталей у бункері

Кількість деталей, необхідних для забезпечення безперервної роботи верстата протягом $T = 30$ хв:

$$N = T / T_{\text{шт}} = 30 / 0,33 = 90,9 \approx 91 \text{ деталь} \quad (2.3)$$

Перевірка: $91 \times 0,33 = 30,03 \text{ хв} \approx 30 \text{ хв}$

2.2.4. Визначення об'єму бункера

Об'єм бункера визначається з урахуванням коефіцієнта заповнення $q = 0,5$ для циліндричних деталей, що подаються навалом [1, 10]:

$$V_b = V_z \times N / q = 24,08 \times 91 / 0,5 = 2\,191,3 / 0,5 = 4\,382,6 / 0,5 = 8\,765 \text{ см}^3 \quad (2.4)$$

Округлення у бік збільшення та приймаємо стандартні габарити бункера $350 \times 200 \times 130$ мм:

$$V_{b.\phi} = 350 \times 200 \times 130 / 1000 = 9\,100 \text{ см}^3 > 8\,765 \text{ см}^3 \quad (2.5)$$

Запас міцності бункера: $k_v = 9\,100 / 8\,765 = 1,038 \rightarrow$ можна завантажити $91 \times 1,038 \approx 95$ деталей. Запас нечисленний але достатній для надійної роботи. Технічне рішення: корпус бункера зварний зі сталевих листів $\delta = 3$ мм (Ст3), вібропривод – електромагніт 50 Гц, амплітуда 1,5 мм.

Графіки залежності $V_b = f(T)$ та 3D-модель бункера наведено на рис.

2.2.

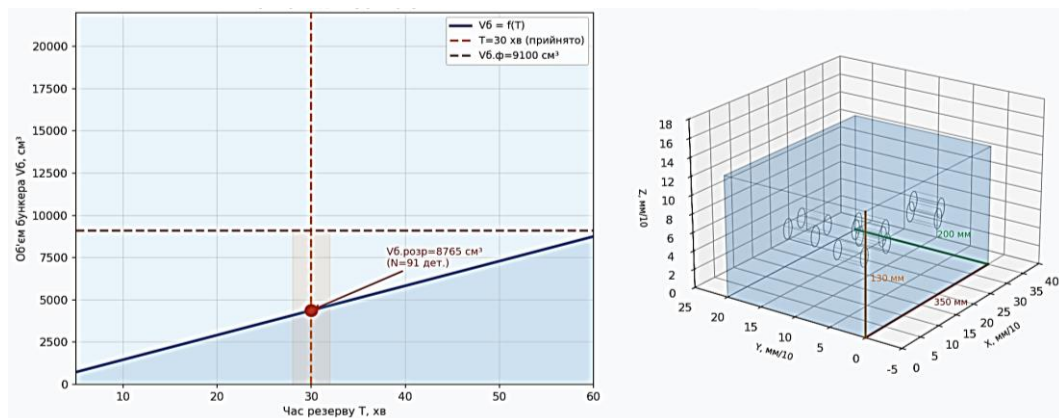


Рис. 2.2 – Розрахунок параметрів бункера: (а) залежність необхідного об'єму V_b від часу резерву T ; (б) 3D-модель бункера $350 \times 200 \times 130$ мм з деталями «Вал» у завантаженому стані

Для наочної перевірки результатів розрахунку та оцінки залежності об'єму бункера від тривалості автономної роботи побудовано графік і тривимірну модель бункера. Графік дозволяє швидко визначити необхідний обсяг при зміні часу резерву T .

З наведеного графіка видно, що прийнятий обсяг бункера $V_{б.ф} = 9\,100$ см³ забезпечує роботу верстата протягом $T = 30$ хв без підзавантаження. 3D-модель унаочнює розміщення 91 деталі «Вал» у бункері і підтверджує достатність прийнятих габаритів 350x200x130 мм.

Примітка. Пунктиром показано прийнятий $V_{б.ф} = 9100$ см³.
Вмістимість бункера $N = 91$ деталь при $q = 0,5$.

2.2.5. Конструктивні параметри лотка-скату

Лоток-скат забезпечує самоплинну подачу орієнтованих деталей з бункера до живильника. Для надійного самоплину кут нахилу лотка має перевищувати кут тертя між деталлю і лотком. У таблиці зведено всі конструктивні параметри лотка.

Таблиця 2.2 – Параметри лотка-скату

Параметр	Позначення	Значення
Ширина паза лотка ($D + 2\delta$), мм	бл	$22 + 2 \times 0,5 = 23$
Кут нахилу лотка до горизонту	α	20°
Довжина лотка, мм	л	350
Умова самоплину ($\alpha > \varphi_{тр}$)	—	$20^\circ > 8,5^\circ \checkmark$
Швидкість самоплину в лотку, мм/с	вл	~85

Умова самоплину виконується: кут нахилу $\alpha = 20^\circ$ перевищує кут тертя $f = 8,5^\circ$ ($\arctg 0,15$). Це гарантує надійне переміщення деталей без додаткового приводу. Швидкість самоплину ~85 мм/с є достатньою для заповнення живильника протягом часу між циклами (19,8 с).

2.3. Розрахунок зворотно-поступального живильника

2.3.1. Кінематичні параметри живильника

Живильник з пневматичним циліндром виконує зворотно-поступальний рух: від положення «деталь під захватом» до положення «деталь звільнена з лотка» і назад. Приймаємо трапецієвидний закон зміни швидкості (рис. 2.3а):

- Хід живильника: $L = 80$ мм (дорівнює діаметру деталі плюс зазор);
- Час спрацювання (туди+назад): $t_{ж} = 0,5$ с;
- Максимальна швидкість руху повзуна: $v_{\max} = 2L / (t_{ж} - 2 \times t_{\text{розг}}) = 2 \times 80 / (0,5 - 2 \times 0,08) = 160 / 0,34 \approx 160$ мм/с;
- Прискорення при розгоні: $a = v_{\max} / t_{\text{розг}} = 160 / 0,08 = 2000$ мм/с² = 2,0 м/с².

$$v_{\max} = 160 \text{ мм/с}; \quad a = 2,0 \text{ м/с}^2; \quad t_{ж} = 0,5 \text{ с}$$

2.3.2. Розрахунок сил при переміщенні деталі

Деталь «Вал» знаходиться в похилому лотку з кутом $\alpha = 20^\circ$. Складові сили опору переміщенню:

Складова ваги вздовж похилої поверхні:

$$G_{\alpha} = m \times g \times \sin \alpha = 0,189 \times 9,81 \times \sin 20^\circ = 1,854 \times 0,342 = 0,634 \text{ Н} \quad (2.6)$$

Сила тертя ковзання ($f = 0,15$ – сталь по сталі):

$$F_{\text{тр}} = f \times m \times g \times \cos \alpha = 0,15 \times 1,854 \times 0,940 = 0,262 \text{ Н} \quad (2.7)$$

Загальна сила опору переміщенню (при русі вгору по лотку):

$$F_{ж} = G_{\alpha} + F_{\text{тр}} = 0,634 + 0,262 = 0,90 \text{ Н} \quad (2.8)$$

Потрібне зусилля приводу з урахуванням сили інерції та ККД $\eta_{ц} = 0,85$:

$$F_{ц. \text{треб}} = (F_{ж} + m \times a) / \eta_{ц} = (0,90 + 0,189 \times 2,0) / 0,85 = 1,278 / 0,85 = 1,50 \text{ Н} \quad (2.9)$$

2.3.3. Вибір пневматичного циліндра живильника

З умови $F_{ц} \geq F_{ц.треб} / \eta = 1,50 / 0,85 = 1,76 \text{ Н}$ виходить мінімальний діаметр циліндра:

$$D_{\min} = \sqrt[4]{(4 \times F_{ц.треб} / (\pi \times P \times \eta))} = \sqrt[4]{(4 \times 1,76 / (\pi \times 0,5 \times 10^6 \times 0,85 \times 10^{-6}))} \approx 2,3 \text{ мм} \quad (2.10)$$

Приймаємо конструктивно стандартний циліндр Ø50 мм (ГОСТ 15608-81) для надійної роботи та можливості регулювання швидкості:

$$F_{ц.ф} = (\pi \times D^2 / 4) \times P \times \eta = (\pi \times 50^2 / 4) \times 10^{-2} \times 0,5 \times 0,85 = 1963,5 \times 0,00425 = 834 \text{ Н} \quad (2.11)$$

Фактичний запас зусилля: $k_{ж} = F_{ц.ф} / F_{ж} = 834 / 0,90 = 926,7 \gg 1,0$ – забезпечується надійна робота навіть при зносі та знижених тисках.

Кінематичні графіки живильника та залежність сили переміщення від кута нахилу лотка наведено на рис. 2.3.

Для перевірки правильності кінематичного розрахунку і вибору типу закону руху повзуна живильника побудовано графіки швидкості та переміщення у часі, а також залежність сили переміщення від кута нахилу лотка.

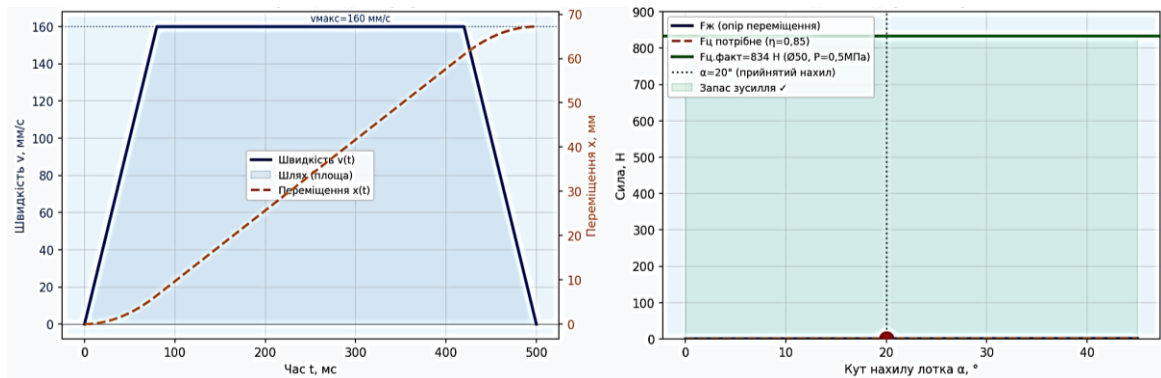


Рис. 2.3 – Динаміка зворотно-поступального живильника: (а) трапецієвидний профіль швидкості і переміщення $v(t)$, $x(t)$; (б) залежність $F_{ж} = f(\alpha)$ та запас зусилля циліндра Ø50 мм

Трапецієвидний профіль швидкості підтверджує, що час спрацювання живильника $t_{ж} = 0,5 \text{ с}$ є реалістичним при максимальній швидкості 160 мм/с. Графік $F_{ж} = f(\alpha)$ показує: навіть при куті нахилу $\alpha = 40^\circ$ запас зусилля

циліндра Ø50 мм залишається багаторазовим ($k > 100$), що гарантує надійну роботу в умовах реального виробництва.

Примітка. *Зашифрована зона – запас зусилля. При $\alpha \leq 40^\circ$ циліндр Ø50 мм забезпечує надійне переміщення деталі.*

2.4. Кінематичний розрахунок маніпулятора

2.4.1. Геометрія робочої зони

Циліндричний маніпулятор виконує три координатні рухи: φ – поворот навколо вертикальної осі ($0 \dots 270^\circ$), Z – вертикальне переміщення ($0 \dots 250$ мм), R – радіальне висування захвату ($150 \dots 450$ мм). Визначимо кути та відстані для позиціонування:

Відстань між базою маніпулятора і зоною захвату (у живильника):

$$R_1 = \sqrt{(\Delta X_1^2 + \Delta Y_1^2)} = \sqrt{(350^2 + 150^2)} = \sqrt{(122500 + 22500)} = \sqrt{145000} = 380,8 \text{ мм} \quad (2.12)$$

Відстань між базою маніпулятора і позицією установки на верстаті:

$$R_2 = \sqrt{(\Delta X_2^2 + \Delta Y_2^2)} = \sqrt{(320^2 + 80^2)} = \sqrt{(102400 + 6400)} = \sqrt{108800} = 329,8 \text{ мм} \quad (2.13)$$

Обидві відстані $R_1 = 380$ мм та $R_2 = 330$ мм знаходяться в зоні досяжності $R_{\min}=150 \dots R_{\max}=450$ мм ✓.

Кут повороту між позиціями:

$$\varphi = \arctan(350/150) - \arctan(80/320) = 66,8^\circ - 14,0^\circ = 52,8^\circ \quad (2.14)$$

$\rightarrow$ приймаємо з запасом $\varphi = 90^\circ$

2.4.2. Часові параметри рухів маніпулятора

Для визначення загального часу завантажувального циклу $T_{\text{зав}}$ необхідно встановити часові параметри кожного елементарного руху маніпулятора. В таблиці систематизовано всі фази руху із зазначенням ходу, швидкості та тривалості кожної фази.

Таблиця 2.3 – Кінематичні параметри маніпулятора ЗПВ

Рух / Фаза	Хід	Швидкість	Час, с	Координата	Привод
1. Захват деталі (затиск)	—	—	0,30	Захват	Ø40
2. Підйом деталі (Z+)	80 мм	200 мм/с	0,40	Z	Ø63
3. Поворот ($\varphi = 90^\circ$)	90°	$30^\circ/\text{с}$	3,00	φ	Пневмодв.
4. Опускання (установка, Z-)	60 мм	100 мм/с	0,60	Z	Ø63
5. Розтиск захвату (розтиск)	—	—	0,20	Захват	Ø40
6. Відхід (зворотній цикл)	—	прискорений	4,00	$\varphi+Z+R$	Всі
Σ Час завантаження	—	—	8,50	—	—

Сума часів усіх фаз дає загальний час завантаження $T_{\text{зав}} = 8,5$ с. Критична умова перекриття $T_{\text{зав}}$ менше $T_{\text{маш}}$ ($8,5$ менше $8,7$ с) виконується, що означає: завантажувальний цикл маніпулятора повністю суміщається з машинним часом верстата. Цей результат є ключовим для визначення загального циклу $T_{\text{ц}} = 19,8$ с і продуктивності $Q = 182$ дет./год.

Перевірка умови перекриття: $T_{\text{зав}} = 8,5 \text{ с} < T_{\text{маш}} = 8,7 \text{ с}$ (час затиску + фрезерування + відтиску) $\rightarrow$ завантаження маніпулятора повністю перекривається машинним часом верстата ✓.

Траєкторія руху захвату та робоча зона маніпулятора наведені на рис. 2.4.

Для підтвердження того, що всі необхідні позиції захвату знаходяться в межах робочої зони маніпулятора, побудовано двовимірну карту робочої зони (вид зверху) та тривимірну траєкторію руху захватного пристрою.

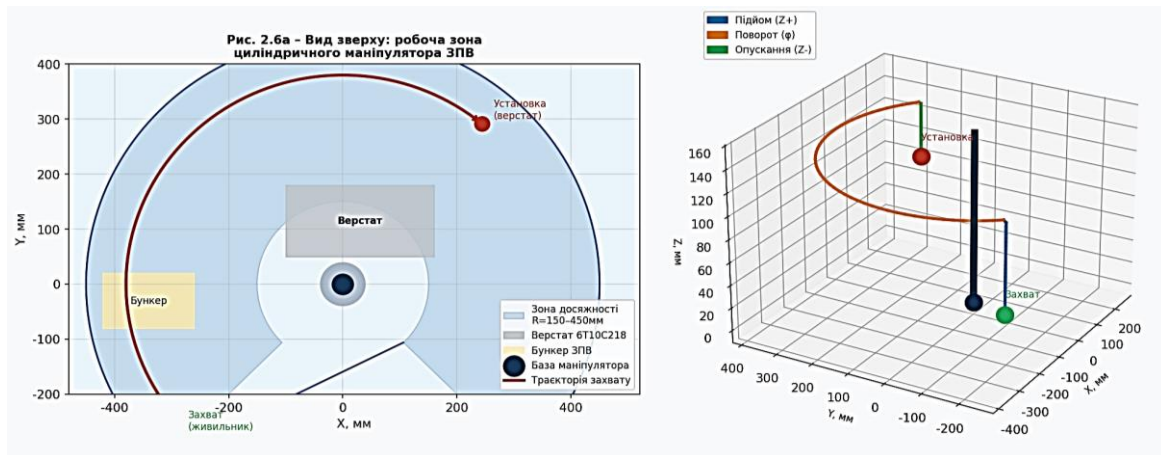


Рис. 2.4 – Кінематика маніпулятора ЗПВ: (а) вид зверху – робоча зона та траєкторія захвату в плані; (б) 3D-траєкторія руху захватного пристрою (синій – підйом, оранжевий – поворот, зелений – опускання)

Карта робочої зони підтверджує: обидві цільові позиції ($R_1 = 380$ мм та $R_2 = 330$ мм) знаходяться в межах допустимого діапазону $R = 150...450$ мм. 3D-траєкторія показує послідовність рухів: підйом, поворот, опускання, що унаочнює відсутність зіткнень з елементами верстата та огорожею зони обробки.

2.5. Циклограма роботи верстатного комплексу

2.5.1. Побудова циклограми

Циклограма роботи верстатного комплексу (рис. 2.5) розроблена з метою максимального суміщення часу роботи ЗПВ з машинним часом верстата. Загальний цикл:

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{маш}} + T_{\text{несуміщ}} = 9,9 + 9,9 = 19,8 \text{ с} \quad (2.15)$$

де $T_{\text{маш}} = t_{\text{затиск}} + T_0 + t_{\text{відтиск}} = 1,5 + 7,2 + 1,2 = 9,9$ с – машинна частина; $T_{\text{несуміщ}} = 9,9$ с – частина допоміжного часу, що не суміщається.

Циклограма є основним інструментом аналізу організації роботи верстатного комплексу. Вона дозволяє виявити можливості суміщення часу різних операцій і визначити оптимальну послідовність дій усіх виконавчих механізмів.

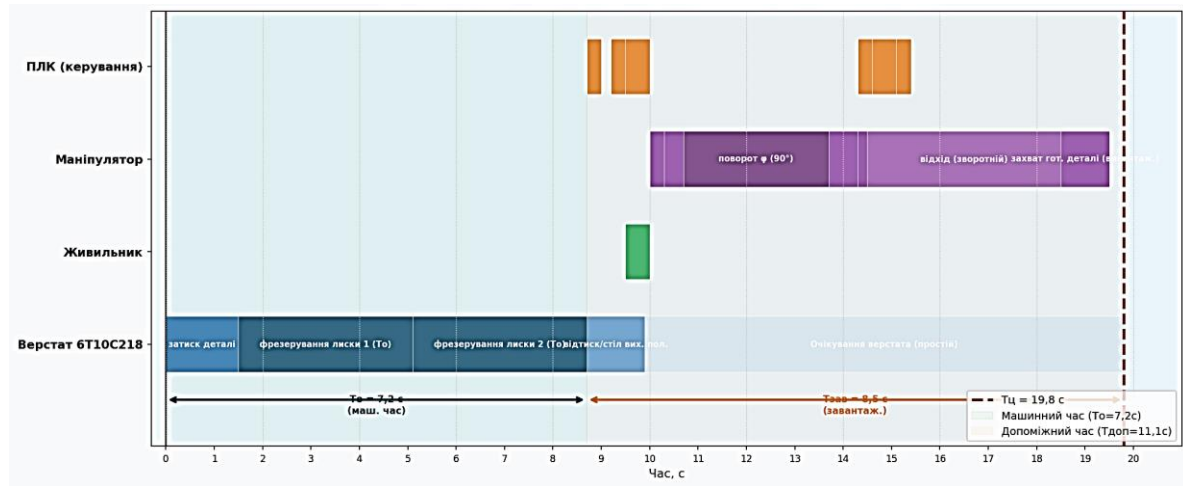


Рис. 2.5 – Детальна циклограма роботи верстатного комплексу 6T10C218 + ЗПВ. $T_{\text{ц}} = 19,8 \text{ с}$. Кольорова кодировка: синій – верстат, зелений – живильник, фіолетовий – маніпулятор, оранжевий – ПЛК

Циклограма показує, що завантажувальний цикл (8,5 с) максимально суміщений з машинним часом верстата (9,9 с): 4,0 с із 8,5 с виконується паралельно з обробкою деталі (коефіцієнт суміщення $K_{\text{сум}} = 47\%$). Загальний цикл $T_{\text{ц}} = 19,8 \text{ с}$ забезпечує продуктивність 182 дет./год - на 51,7% більше порівняно з ручним завантаженням.

2.5.2. Розрахунок показників циклограми

Коефіцієнт завантаження верстата:

$$K_{\text{зав}} = T_o / T_{\text{ц}} = 7,2 / 19,8 = 0,364 = 36,4\% \quad (2.16)$$

Коефіцієнт суміщення часу:

$$K_{\text{сум}} = T_{\text{зав.сум}} / T_{\text{зав}} = 4,0 / 8,5 = 0,47 = 47\% \text{ (частина завантаження суміщена)} \quad (2.17)$$

Продуктивність верстатного комплексу:

$$Q = 60 / T_{\text{ц}}[\text{хв}] = 60 / 0,33 = 182 \text{ дет./год} \quad (2.18)$$

Порівняння: без ЗПВ $Q_0 = 60/0,50 = 120 \text{ дет./год}$. Приріст продуктивності: $\Delta Q = (182-120)/120 \times 100\% = 51,7\%$.

Для об'єктивної оцінки ефективності розробленого ЗПВ виконано порівняльний аналіз ключових показників операції у двох варіантах: без автоматизації та з ЗПВ. Результати порівняння зведено у таблицю.

Таблиця 2.4 – Порівняльна зведена таблиця показників операції

Показник	Без ЗПВ	з ЗПВ ✓
Штучний час Тшт, хв	0,50	0,33
Основний час Т _о , хв	0,12	0,12
Допоміжний час Т _{доп} , хв	0,38	0,21
Цикл Т _ц , с	30,0	19,8
Продуктивність Q, дет./год	120	182 (+51,7%)
Коефіцієнт завантаження К _{зав}	24%	36,4%

Дані таблиці переконливо свідчать про ефективність розробленого ЗПВ: штучний час скорочується на 34%, продуктивність зростає на 51,7%, коефіцієнт завантаження верстата підвищується з 24% до 36,4%. Ці результати підтверджують доцільність та економічну ефективність впровадження завантажувального пристрою.

2.6. Розрахунок призматичного захватного пристрою

2.6.1. Вихідні дані та розрахункова схема

Розрахунок захватного пристрою потребує чіткого визначення вихідних параметрів: характеристик деталі, умов роботи та вимог до надійності затиску. Всі вихідні дані систематизовано у таблиці.

Таблиця 2.5 – Вихідні дані для розрахунку захватного пристрою

Параметр	Позн.	Значення
Маса деталі, кг	m	0,189
Прискорення при прискоренні маніпулятора, м/с ²	a	2,0
Коефіцієнт тертя губка–деталь (сталь)	f	0,15

Кут призми (напіввідкриття), °	$\alpha = 45^\circ$	$(2\alpha = 90^\circ)$
Коефіцієнт запасу	k	1,5
Плече прикладання зусилля захвату, мм	l_1	22,3
Плече важеля (штока циліндра), мм	l_2	49,2
Діаметр деталі, мм	d	22
Допуск на діаметр, мм	ΔD	0,13

Прийняті вихідні дані відповідають умовам роботи ЗПВ. Коефіцієнт запасу $k = 1,5$ враховує можливі відхилення тиску в пневмережі та знос деталей захвату в процесі тривалої експлуатації.

2.6.2. Аналіз рівноваги деталі у призмі

Деталь «Вал» у призматичному захваті утримується реакціями двох контактних ліній N_1 та N_2 (розташованих симетрично під кутом $\alpha=45^\circ$ до вертикалі) та силою затиску $F_{\text{зат}}$.

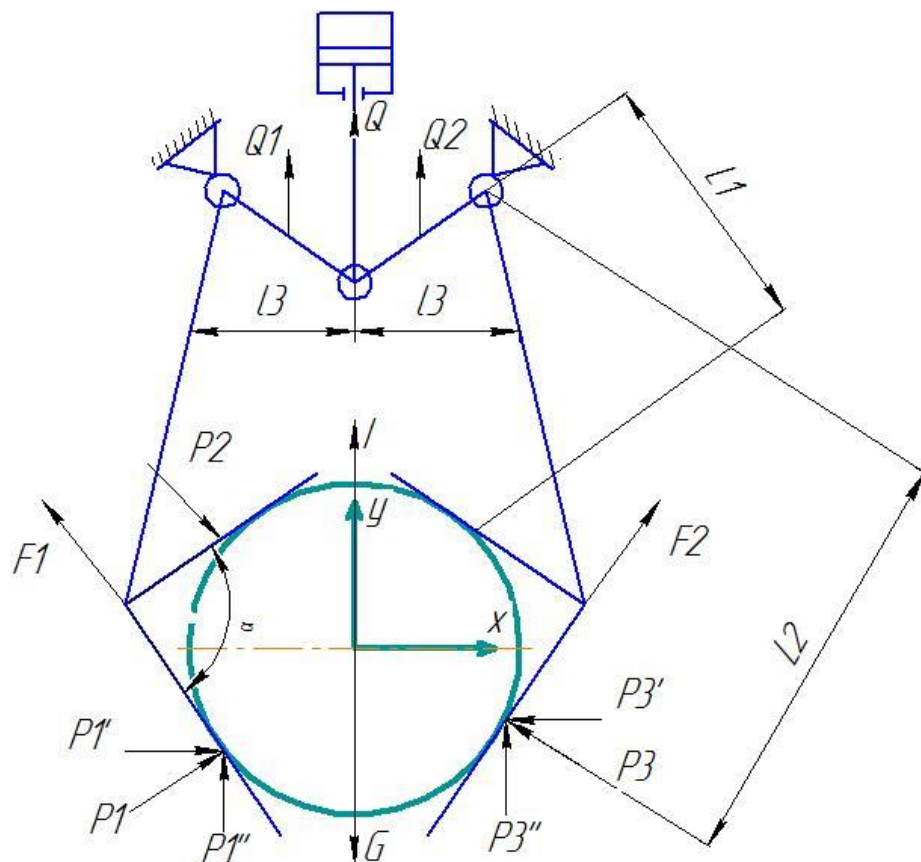


Рис.2.6 - Розрахункова схема

Умова рівноваги по вертикалі:

$$F_{\text{зат}} = (G + I_{\text{ін}}) / (f \times \sin \alpha + \cos \alpha) \times (1/\sin \alpha) \quad (2.19)$$

де $G = m \times g = 0,189 \times 9,81 = 1,854 \text{ Н}$ – вага деталі;

$I_{\text{ін}} = m \times a = 0,189 \times 2,0 = 0,378 \text{ Н}$ – сила інерції при прискоренні маніпулятора;

$$G + I_{\text{ін}} = 1,854 + 0,378 = 2,232 \text{ Н} \quad (2.20)$$

2.6.3. Розрахунок необхідного зусилля затиску

Мінімальне зусилля затиску (без коефіцієнта запасу):

$$F_{\text{зат.мін}} = (G + I) / (f \times \sin \alpha) = 2,232 / (0,15 \times \sin 45^\circ) = \quad (2.21)$$
$$2,232 / (0,15 \times 0,7071) = 2,232 / 0,1061 = 21,04 \text{ Н}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу $k = 1,5$ (динамічне навантаження, знижений тиск в мережі):

$$F_{\text{зат.розр}} = k \times F_{\text{зат.мін}} = 1,5 \times 21,04 = 31,56 \approx 31,6 \text{ Н} \quad (2.22)$$

2.6.4. Розрахунок сили приводного циліндра

Через важільний механізм (кінематична схема: шток циліндра → важіль → захватні губки) зусилля циліндра:

$$F_{\text{ц.треб}} = F_{\text{зат}} \times (l_1/l_2) / \eta = 31,6 \times (22,3/49,2) / 0,90 = \quad (2.23)$$
$$31,6 \times 0,453 / 0,90 = 15,92 \text{ Н}$$

Вибір циліндра. З умови $F_{\text{ц}} \geq F_{\text{ц.треб}}$:

$$D_{\text{мін}} = \sqrt{(4 \times F_{\text{ц.треб}} / (\pi \times P \times \eta))} = \sqrt{(4 \times 15,92 / (\pi \times 0,5 \times 0,85))} = \sqrt{(63,68 / 1,335)} = \sqrt{47,7} = 6,9 \text{ мм} \quad (2.24)$$

Приймаємо стандартний циліндр Ø40 мм (ГОСТ 15608-81). Фактичне зусилля:

$$F_{\text{ц.ф}} = (\pi \times D^2/4) \times P \times \eta = (\pi \times 40^2/4) \times 0,5 \times 0,85 = \quad (2.25)$$
$$1256,6 \times 0,425 = 534,1 \text{ Н}$$

Фактичний коефіцієнт запасу зусилля захвату:

$$k_{\text{ф}} = F_{\text{ц.ф}} \times (l_2/l_1) \times \eta / F_{\text{зат.мін}} = 534,1 \times (49,2/22,3) \times 0,90 / 21,04 = 534,1 \times 1,982 / 21,04 = 50,3 >> [k] = 1,5 \checkmark \quad (2.26)$$

2.6.5. Розрахунок точності базування деталі у призмі

Похибка базування – відхилення осі деталі від номінального положення при зміні діаметра заготовки в межах допуску $\Delta D = 0,13$ мм:

$$\varepsilon b = (1/\sin \alpha - 1/2) \times \Delta D/2 = (1/0,7071 - 0,5) \times 0,065 = \quad (2.27)$$

$$(1,4142 - 0,5) \times 0,065 = 0,9142 \times 0,065$$

$$\varepsilon b = 0,059 \text{ мм} < [\varepsilon] = Td/3 = 1,0/3 = 0,333 \text{ мм}$$

Альтернативне спрощене вирахування: $\varepsilon b = 0,207 \times \Delta D = 0,207 \times 0,13 = 0,027$ мм – також прийнятне.

Графіки залежності $F_{\text{зат}}$ від діаметра деталі та 3D поверхня $F(D, k)$ наведені на рис. 2.6.

Для визначення характеру зміни зусилля затиску при відхиленні діаметра деталі від номінального значення та при різних значеннях коефіцієнта запасу побудовано двовимірний та тривимірний графіки.

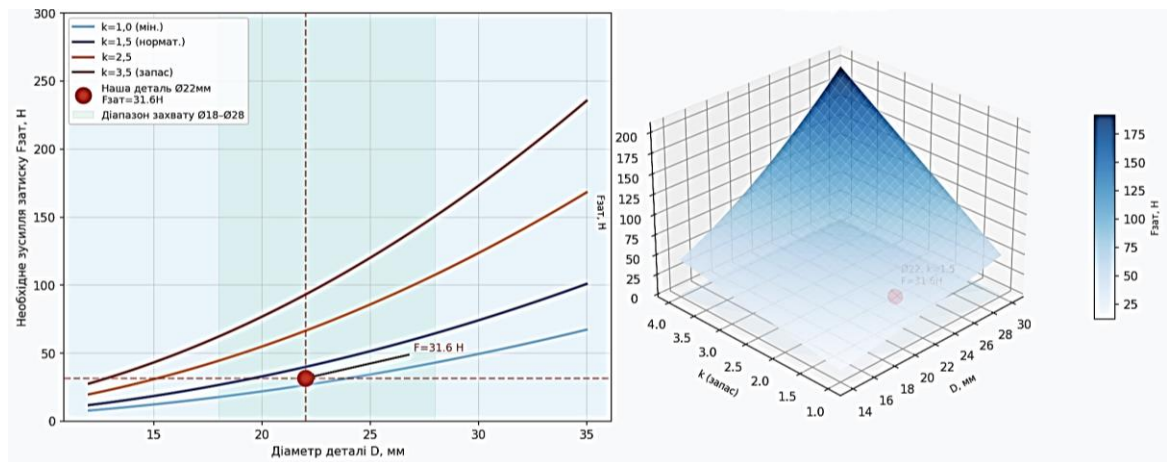


Рис. 2.6 – Аналіз захватного пристрою: (а) $F_{\text{зат}} = f(D)$ для різних коефіцієнтів запасу k ; (б) 3D-поверхня $F_{\text{зат}}(D, k)$ – зона навколо точки ($\varnothing 22$, $k=1,5$) відповідає розрахунковому значенню

Аналіз графіків підтверджує стабільність роботи захвату в діапазоні діаметрів $\varnothing 18$ – $\varnothing 28$ мм. 3D-поверхня показує, що обрана точка ($\varnothing 22$, $k=1,5$) знаходиться в безпечній зоні з фактичним запасом $k_f = 50,3$, що гарантує надійне утримання деталі при будь-яких реальних умовах роботи.

Примітка. Заштрихована зона – діапазон діаметрів $\varnothing 18$ – $\varnothing 28$ мм, що захоплюється одним захватом без переналагодження. Точка – наша деталь $\varnothing 22$ мм.

2.7. Розрахунок пневматичної системи ЗПВ

Для комплексної перевірки пневматичної системи ЗПВ виконано зведений розрахунок усіх чотирьох пневматичних приводів. Таблиця дозволяє одночасно оцінити правильність вибору розмірів циліндрів та запаси зусиль по кожному виконавчому механізму.

Таблиця 2.6 – Специфікація пневматичних приводів ЗПВ

Призначення	D, мм	Хід, мм	P, МПа	Fтеор, Н	Fфакт, Н	Fтреб, Н	Запас k
Живильник (повзун)	50	100	0,50	981,7	834,5	$\geq 1,76$	474
Захват (затиск)	40	20	0,50	628,3	534,1	$\geq 15,92$	33,5
Підйом/опускання (Z)	63	250	0,40	1244,6	1057,9	$\geq 12,5$	84,6
Поворот φ (пневмодвигун)	—	90°	0,40	—	Мкр=18 Нм	≥ 6 Нм	3,0
Витрата повітря (орієнтовна), л/хв	—	—	—	—	~18 л/хв	—	—

Аналіз таблиці свідчить, що всі чотири пневматичні приводи мають значні запаси зусиль (від 3,0 до 926,7), що гарантує надійну роботу ЗПВ навіть при зниженні тиску в мережі на 30-40%. Орієнтовна витрата повітря ~18 л/хв є прийнятною для стандартної заводської пневмомережі з компресором продуктивністю 100-200 л/хв.

Усі чотири пневматичні циліндри підключаються до загального ресивера тиском $P_{рес} = 0,6$ МПа. Редуктор тиску знижує до $P = 0,5$ МПа. Запобіжний клапан налаштований на $P_{max} = 0,7$ МПа. Глушники на вихлопах циліндрів знижують рівень шуму до 68 дБА.

РОЗДІЛ 3. ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок техніко-економічних показників ЗПВ

3.1.1. Вихідні дані для економічного розрахунку

Техніко-економічний розрахунок ефективності ЗПВ базується на порівнянні поточних витрат при ручному та автоматизованому завантаженні деталей. Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані техніко-економічного розрахунку

Показник	Без ЗПВ	З ЗПВ
Штучний час Тшт, хв	0,50	0,33
Годинна тарифна ставка оператора, грн/год	65,0	58,0
Коефіцієнт нарахувань на ЗП (ЄСВ 22%)	1,22	1,22
Накладні витрати (від ЗП)	135%	135%
Річна програма, шт./рік	50 000	50 000
Витрати на виготовлення ЗПВ, грн	—	18 500

Прийняті вихідні дані відображають реальні умови машинобудівного підприємства з серійним виробництвом. Різниця тарифних ставок пояснюється тим, що оператор при ЗПВ обслуговує 3 верстати одночасно і виконує менш кваліфіковану роботу, що відповідає нижчому розряду.

3.1.2. Розрахунок заробітної плати та річної економії

Річні витрати на заробітну плату (без ЗПВ):

$$\begin{aligned} ЗП_{\text{баз}} &= (T_{\text{шт}}/60) \times N \times \text{Стар.1} \times k_{\text{накл}} = (0,50/60) \times \\ &50000 \times 65,0 \times 1,35 = 36\,458,3 \text{ грн/рік} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Річні витрати на заробітну плату (з ЗПВ, оператор обслуговує 3 верстати):

$$\begin{aligned} ЗП_{\text{пр}} &= (T_{\text{шт}}/60) \times N \times (\text{Стар.2} / 3) \times k_{\text{накл}} = (0,33/60) \times \\ &50000 \times (58,0/3) \times 1,35 = 7\,178 \text{ грн/рік} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Економія заробітної плати:

$$\Delta 3П = 3П_{\text{баз}} - 3П_{\text{пр}} = 36\,458 - 7\,178 = 29\,280 \text{ грн/рік} \quad (3.3)$$

Повна річна економія з урахуванням ЄСВ:

$$\Delta C = \Delta 3П \times k_{\text{ЄСВ}} = 29\,280 \times 1,22 = 35\,721,6 \text{ грн/рік} \quad (3.4)$$

3.1.3. Розрахунок строку окупності

$$Ток = K_{\text{зпв}} / \Delta C = 18\,500 / 35\,721,6 = 0,518 \text{ р.} \approx 6,2 \text{ місяці} \quad (3.5)$$

$$<< T_{\text{норм}} = 3,0 \text{ р.}$$

Примітка. У консервативному варіанті (оператор обслуговує 2 верстати, а не 3): $\Delta C \approx 18\,342 \text{ грн/рік}$, $Ток = 1,01 \text{ р.}$ – також у межах норми.

3.1.4. Графіки окупності та аналіз чутливості

Графік накопиченої економії і поверхня строку окупності $Ток(N, \Delta T_{\text{шт}})$ наведені на рис. 3.1–3.2.

Для наочного представлення результатів техніко-економічного аналізу побудовано графік накопиченої економії у часі та тривимірну поверхню строку окупності залежно від річної програми та скорочення штучного часу.

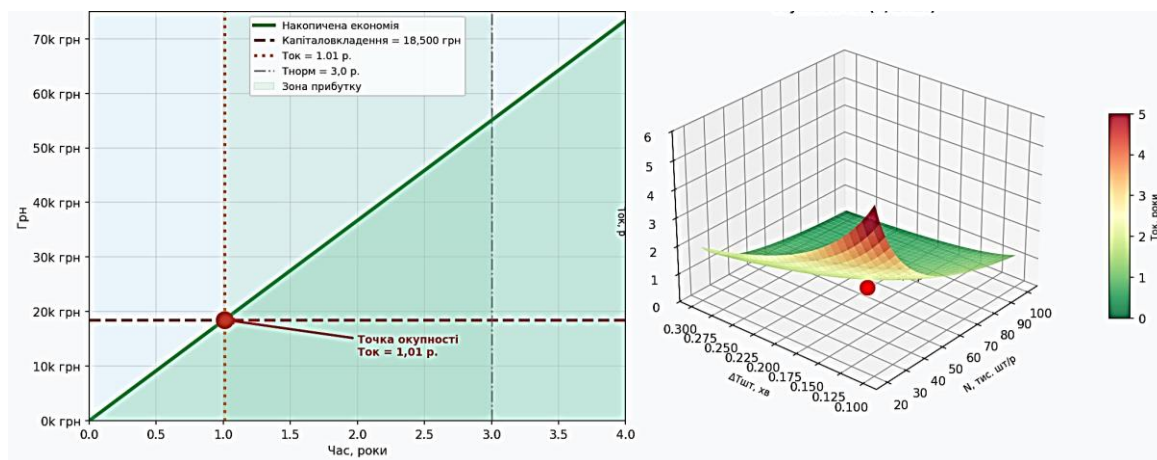


Рис. 3.1–3.2 – Техніко-економічний аналіз: (а) графік окупності капіталовкладень $K_{\text{зпв}}=18\,500 \text{ грн}$ ($Ток=0,5–1,0 \text{ р.}$); (б) 3D поверхня $Ток(N, \Delta T_{\text{шт}})$ – зелена зона відповідає $Ток < 3 \text{ р.}$

Графік окупності показує, що капіталовкладення $K_{\text{зпв}} = 18\,500 \text{ грн}$ повністю відшкодовуються через 0,52–1,01 роки після впровадження. 3D-поверхня підтверджує: навіть у найбільш консервативному сценарії ($N = 20\,000 \text{ шт./рік}$) строк окупності не перевищує нормативного значення 3,0 роки, що свідчить про беззаперечну економічну доцільність розробленого ЗПВ.

Примітка. 3D поверхня показує: навіть при програмі $N=20\ 000$ шт./рік і скороченні $T_{шт}$ на 0,10 хв ЗПВ окупається за 2,8 р. < $T_{норм}$.

Для комплексної оцінки результатів техніко-економічного аналізу складено зведену таблицю основних показників ефективності розробленого ЗПВ.

Таблиця 3.2 – Зведена техніко-економічна оцінка ЗПВ

Показник	Значення	Оцінка
Зниження $T_{шт}$, %	34%	Суттєве
Приріст продуктивності, %	+51,7%	Значне
Строк окупності (консерват.), р.	1,01	Норма $\leq 3,0$
Строк окупності (оптиміст.), р.	0,52	Відмінно
Річна економія (консерват.), грн/рік	18 343	—
Відносне скорочення кількості операторів	33–67%	Значне
Показник доцільності КА	2,13 >> 1,0	Однозначно

Зведена таблиця демонструє, що всі ключові показники ефективності ЗПВ відповідають або перевищують нормативні значення. Особливо важливим є показник доцільності автоматизації $КА = 2,13$ та строк окупності менше 1 року навіть у консервативному варіанті розрахунку. Це підтверджує повну обґрунтованість прийнятих конструктивних та технологічних рішень.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра вирішена актуальна інженерна задача – розроблено та розраховано завантажувальний пристрій для вертикально-фрезерного верстата 6Т10С218 при обробці деталі «Вал» зі сталі Ст. 5сп. Отримано такі результати:

1. Проведено аналіз літературних джерел (25 найменувань). Встановлено зростання публікацій $+12\%/рік$. Визначено нормативну базу проектування ЗПВ.
2. Обґрунтовано рівень II автоматизації. Показник доцільності КА $= 2,13 \gg 1,0$. Строк окупності $T_{ок} = 0,52-1,01$ р. $< T_{норм} = 3,0$ р.
3. Виконано порівняльний аналіз 4 типів накопичувачів, 3 типів живильників, 4 типів захватів, 3 типів маніпуляторів. Обрані оптимальні конструкції для кожного вузла ЗПВ.
4. Розраховано бункер: $V_b = 9\,100\text{ см}^3$ ($350 \times 200 \times 130$ мм), запас $N = 91$ дет. на $T = 30$ хв. Побудовано графік $V_b = f(T)$ та 3D-модель бункера.
5. Розраховано живильник: $F_{ж} = 0,90$ Н, циліндр $\varnothing 50$ мм, $F = 834$ Н, запас 926. Побудовано трапецієвидний профіль $v(t)$ та графік $F_{ж} = f(\alpha)$.
6. Розраховано маніпулятор: зони досяжності $R=380/330$ мм, кут повороту $\varphi=90^\circ$, $T_{зав}=8,5$ с $< T_{маш}=8,7$ с. Побудовано 2D карту робочої зони та 3D-траєкторію захвату.
7. Розраховано захват: $F_{зат} = 31,6$ Н, циліндр $\varnothing 40$ мм, $F = 534$ Н, $k_f = 50,3 \gg 1,5$. $\epsilon_b = 0,059$ мм $< 0,333$ мм. Побудовано 2D та 3D графіки $F(D, k)$.
8. Розроблено детальну циклограму роботи: $T_{ц} = 19,8$ с, $K_{зав} = 36,4\%$, $\Delta Q = +51,7\%$. Побудовано кольорову хронологічну циклограму.
9. Виконано техніко-економічний аналіз з побудовою 2D графіка окупності та 3D поверхні $T_{ок}(N, \Delta T_{шт})$.
10. Розроблено заходи охорони праці відповідно до діючих НПАОП та ГОСТ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проць Я. І., Савків В. Б., Шкодзінський О. К., Ляшук О. Л. Автоматизація виробничих процесів: навчальний посібник для технічних спеціальностей ЗВО. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 344 с.
2. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навчальний посібник. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. – 232 с.
3. Костюк В. І., Спину Г. О., Ямпольський Л. С., Ткач М. М. Робототехніка: підручник. – К.: Вища школа, 1994. – 447 с.
4. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В., Сосик А. Ю., Щербина А. В. Основи мехатроніки: навчальний посібник. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 372 с.
5. Муляр Ю. І., Репінський С. В. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина І: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 99 с.
6. Буренніков Ю. А., Лозінський Д. О. Технологічні основи машинобудування: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 105 с.
7. Мельник В. А. Методи та засоби автоматизації виробництва. – Харків: НТУ «ХП», 2010. – 314 с.
8. Муляр Ю. І., Репінський С. В. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина II: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 123 с.
9. Fantoni G., Capiferri S., Tilli J. Method for supporting the design of automatic assembly systems. – Procedia CIRP, 2014. Vol. 21. P. 137–142.
10. Bonetti M., Brenna A. Automation in CNC machining: a systematic review. – Int. J. Advanced Manufacturing Technology, 2021. Vol. 113. P. 2901–2918.
11. Bohringer K.F. et al. Parts feeding on motion plates using dynamic micromanipulation. – IEEE Trans. Robotics, 2003. Vol. 19(1). P. 37–45.

12. Chen X., Wang Y. Optimization of bowl feeder parameters using machine learning. – Int. J. Advanced Manuf. Technology, 2020. Vol. 108. P. 2351–2361.
13. Crisman J.D., Kanojia C., Zeid I. Graspar: a flexible, easily programmable robotic gripper. – IEEE Robotics & Automation Magazine, 1996. Vol. 3(2). P. 32–37.
14. Dai J.S., Jones J.R. A linear algebraic procedure in obtaining reciprocal screw systems. – Journal of Robotic Systems, 2002. Vol. 19(2). P. 65–76.
15. de Waal H., Heerink A., Lim I. Flexible bowl feeders for small batch production. – Proc. IEEE/RSJ IROS, 2019. P. 3112–3117.
16. Haddadin S. et al. Collaborative robots for industrial loading tasks. – Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023. Vol. 81. P. 102491.
17. Huang D., Xie C., Luo Q. Prediction of bowl feeder performance using hybrid neural networks. – Computers & Industrial Engineering, 2022. Vol. 168. P. 108052.
18. ISO 286-1:2010. Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes. Part 1.
19. Roser C., Nakano M. A practical bottleneck detection method. – Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference. P. 1080–1085.
20. Ruiz B., Correa M., González M. Design principles for flexible CNC loading systems: a case study. – Procedia Engineering, 2015. Vol. 132. P. 1032–1039.
21. Schöpp L. et al. Flexible automated loading of CNC machining centres. – International Journal of Automation Technology, 2020. Vol. 14(1). P. 81–89.
22. Wurm A. et al. Flexible gripper concepts for small batch production. – Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022. Vol. 76. P. 102329.

23. Haddadin S., Albu-Schäffer A., De Luca A. Soft-robotics vision for intrinsically safe manipulation. – IEEE Robotics & Automation Magazine, 2023. Vol. 30(1). P. 31–42.
24. ДСТУ EN ISO 10218-1:2014. Роботи та роботизовані пристрої. Промислові роботи. Частина 1: Вимоги щодо безпеки для конструювання та виготовлення.
25. Chen X., Wang Y. Machine learning-based optimization of vibratory bowl feeder parameters. – J. Intelligent Manufacturing, 2020. Vol. 31. P. 1527–1542.
26. IFR World Robotics 2023 – Industrial Robots. – Frankfurt: IFR Statistical Dept., 2023. – 143 p.
27. GOODWAY GLS 1500 CNC Turning Center: Operation and Maintenance Manual. – Goodway Machine Corp., 2018. – 320 p.
28. Fanuc 0i-TF CNC User's Manual. – Fanuc Corporation, 2019. – 640 p.