

УДК 661.1:631.8, 66.02, 66.03, 621.7:658.5, 621.9.02-229:[338.3+681.5], 621.91.01  
УКПП  
№ держреєстрації 0121U112684  
Інв. №

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет (СумДУ)  
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2; тел. (0542) 33 41 08



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи,  
д-р фіз.-мат. наук, проф.

А. М. Черноус

» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗВІТ**  
про виконання завдань Перспективного плану розвитку  
наукового напрямку «Технічні науки» Сумського державного університету  
(проміжний)

- 1 Підвищення агрохімічної та технологічної ефективності органо-мінеральних фосфоровмісних добрив за рахунок збільшення масової частки водорозчинного фосфору під час переробки сировини українських родовищ фосфоритів та сорбентів**
- 2 Підвищення продуктивності механічного оброблення матеріалів шляхом розроблення комплексного підходу до проектування систем захоплення деталей та способів зменшення вібрацій процесу різання**

Керівники НДР:

канд. тех. наук, доц. О. В. Івченко

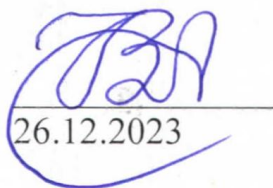
2023

Рукопис закінчено 26 грудня 2023 р.

Результати роботи розглянуто науковою радою СумДУ, протокол від 28 грудня 2023 р. № 11.

## СПИСОК АВТОРІВ

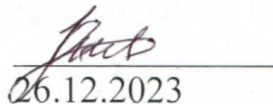
Керівники НДР:  
Пров. наук. співроб.,  
канд. тех. наук



26.12.2023

О. В. Івченко  
(вступ, висновки,  
рекомендації,  
розділи 1, 2)

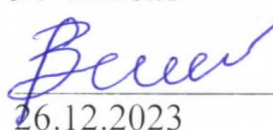
Відповідальні виконавці:  
Мол. наук. співроб.,  
канд.тех. наук



26.12.2023

М. П. Юхименко  
(розділ 1)

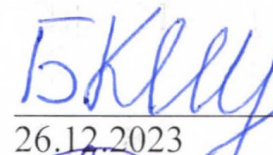
Пров. наук. співроб.,  
д-р тех. наук



26.12.2023

В. О. Іванов  
(розділ 2)

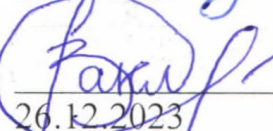
Виконавці:  
Мол. наук. співроб.,  
канд. тех. наук



26.12.2023

Х. В. Берладір  
(розділ 2)

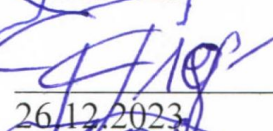
Ст. наук. співроб.,  
канд. тех. наук



26.12.2023

В. С. Вакал  
(розділ 1)

Мол. наук. співроб.,  
канд. тех. наук



26.12.2023

Т. П. Говорун  
(розділ 2)

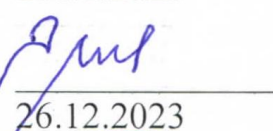
Мол. наук. співроб.,  
канд. тех. наук



26.12.2023

Ю. О. Денисенко  
(розділ 2)

Мол. наук. співроб.,  
канд. тех. наук



26.12.2023

А. В. Євтухов  
(розділ 2)

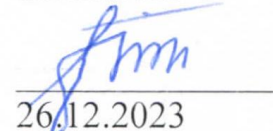
Мол. наук. співроб.,  
канд. тех. наук



26.12.2023

П. В. Кушніров  
(розділ 2)

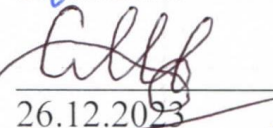
Головн. наук. співроб.,  
д-р тех. наук



26.12.2023

І. В. Павленко  
(розділи 1, 2)

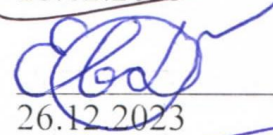
Мол. наук. співроб.,  
канд. тех. наук



26.12.2023

М. С. Скиданенко  
(розділ 1)

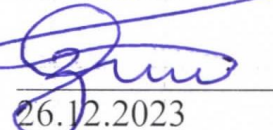
Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру



26.12.2023

О. Д. Євдокимов  
(розділ 2)

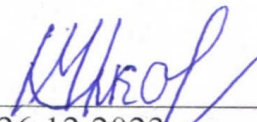
Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру



26.12.2023

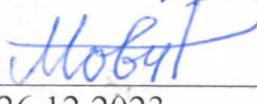
О. А. Заєць  
(розділ 2)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023


М. І. Ілюхін  
(розділ 2)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

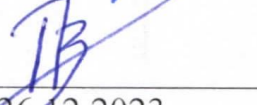
Р. В. Мовчан  
(розділ 2)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

Б. А. Остапенко  
(розділ 2)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

Д. Ю. Потомаха  
(розділ 2)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

Д. А. Соловійов  
(розділ 2)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023


Р. В. Тіцький  
(розділ 2)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

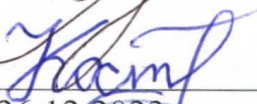
Д. К. Гринько  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

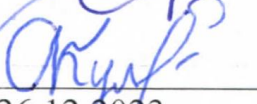
Д. С. Коваленко  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

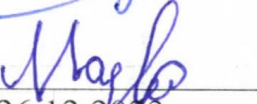
Н. В. Костюк  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

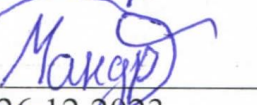
О. О. Кулак  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

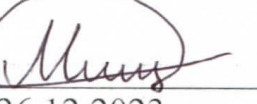
Р. Ю. Малиник  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023


О. О. Мандрика  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

Д. І. Мищенко  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023


О. М. Москальчук  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023


Д. В. Острога  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

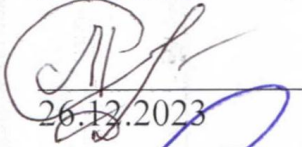
Р. О. Острога  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

Х. С. Пирогов  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

Л. В. Рудецька  
(розділ 1)

Виконавець за договором  
цивільно-правового характеру

  
26.12.2023

А. Р. Сергієнко  
(розділ 1)

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 204 с., 25 табл., 55 рис., 1 дод. на 3 арк., 291 джерел на 23 арк.

СКЛАД, ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНІ ДОБРИВА, ВІТЧИЗНЯНА МІНЕРАЛЬНА СИРОВИНА, ВОДОРОЗЧИННИЙ ФОСФОР, ТАРИЛЧАСТИЙ ГРАНУЛЯТОР, ІНЕРЦІЙНИЙ ФІЛЬТР, ФІЛЬТРУЮЧА ЦЕНТРИФУГА, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК МЕТАЛОРИЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТА, ІНДУСТРІЯ 4.0, ІНДУСТРІЯ 5.0, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК М'ЯКОГО РОБОТА З ПНЕВМАТИЧНИМ М'ЯЗОВИМ ПРИВОДОМ, КОНСТРУКЦІЇ, СИСТЕМИ ЗАХОПЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, РОБОТИЗОВАНА СИСТЕМА ЗАХОПЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ, СИСТЕМИ МАШИННОГО ЗОРУ, ВІБРАЦІЇ, СПЕЦІАЛЬНІ КОНСОЛЬНІ РОЗТОЧУВАЛЬНІ ОПРАВКИ

Метою роботи є виконання завдань відповідно до пріоритетних тематичних напрямів, зазначених на 2023 рік у розділі 2 Перспективного плану розвитку Сумського державного університету за науковим напрямом «Технічні науки» за період з 2021 по 2025 роки, зокрема:

1) підвищення агрохімічної та технологічної ефективності органо-мінеральних фосфоровмісних добрив за рахунок збільшення масової частки водорозчинного фосфору під час переробки сировини українських родовищ фосфоритів та сорбентів – прикладного дослідження, що виконується в рамках пріоритетного тематичного напрямку «Процеси двофазної газодинамічної, інерційно-фільтруючої, вібраційно-інерційної сепарації, з супутнім тепломасообміном (сепарація з конденсацією)», який зазначений у Перспективному плані розвитку Сумського державного університету за науковим напрямом «Технічні науки» за період з 2021 по 2025 роки;

2) підвищення продуктивності механічного оброблення матеріалів шляхом розроблення комплексного підходу до проектування систем захоплення деталей та способів зменшення вібрацій процесу різання – прикладного

дослідження, що виконується в рамках пріоритетного тематичного напрямку «Підвищення ефективності оброблення деталей на токарних верстатах шляхом керування динамікою процесу з високими частотами обертання шпинделя», який зазначений у Перспективному плані розвитку Сумського державного університету за науковим напрямом «Технічні науки» за період з 2021 по 2025 роки.

За результатами виконання науково-дослідної роботи одержані такі наукові та науково-технічні результати: 1) науко-обґрунтований та експериментально підтверджений склад органо-мінерального добрива на основі вітчизняної мінеральної сировини зі збільшеним умістом масової частки водорозчинного фосфору з вмістом поживних речовин: фосфору у перерахунку на  $P_2O_5$  – не менше 5 %; калію, у перерахунку на  $K_2O$  – не менше 5 %,  $P_2O_5$  водорозчинного – не менше 20 %; 2) отримав подальший розвиток спосіб застосування місцевої (північного регіону України) мінеральної сировини у виробництві добрив; 3) розроблено комплексний підхід щодо проектування систем захоплення як невід’ємного елемента системи «система захоплення – деталь – середовище – виробниче обладнання» для забезпечення подальшого раціонального вибору з урахуванням конкретних умов виробництва загального машинобудування; 4) створено науково-теоретичні основи щодо оцінювання конструкції систем захоплення деталей для виробництв загального машинобудування; 5) отримав подальший розвиток спосіб зниження вібрацій спеціальних консольних розточувальних оправок, встановлених у шпиндельних головках розточувальних верстатів.

Практична значущість одержаних результатів. Одержані у роботі результати можуть бути використані для покращення динамічних характеристик процесу механічного оброблення виробів та отримання органо-мінеральних добрив на основі вітчизняної мінеральної сировини. Зокрема: розроблено конструкцію, дослідний зразок та отримано результати випробувань інерційного фільтру для рідких компонентів органо-мінеральних добрив з низьким умістом домішок; розроблено структурну схему роботизованої системи захоплення деталей та вузлів для виробництв загального

машинобудування; розроблено класифікацію систем машинного зору з описом практичного їх застосування в процесах механічного оброблення деталей та складання вузлів на підприємствах загального машинобудування; розроблено схеми експериментальних стендів щодо зменшення коливань спеціальних консольних розточувальних оправок, встановлених у шпиндельних головках розточувальних верстатів; обґрунтовано параметри налаштування динамічного демпфера, логарифмічний декремент коливань, а також умови ефективного демпфування коливань при взаємодії двох їх зв'язаних форм під час використання спеціальних консольних розточувальних оправок, встановлених у шпиндельних головках розточувальних верстатів.

Умови одержання звіту: відкритий доступ через сайт Сумського державного університету розділ «Наука»– «Науково-дослідні розробки» за посиланням: <https://sumdu.edu.ua/uk/science/research-works.html>

## ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	11
1 Підвищення агрохімічної та технологічної ефективності органомінеральних фосфоровмісних добрив за рахунок збільшення масової частки водорозчинного фосфору під час переробки сировини українських родовищ фосфоритів та сорбентів .....	17
1.1 Розроблення складу органомінерального добрива на основі вітчизняної мінеральної сировини зі збільшеним вмістом масової частки водорозчинного фосфору з умістом поживних речовин.....	17
1.1.1 Обґрунтування вибору компонентів органомінерального добрива на основі вітчизняної мінеральної сировини.....	17
1.1.2 Визначення співвідношення поживних речовин .....	25
1.1.3 Способи отримання органомінерального добрива з вітчизняної мінеральної сировини .....	30
1.2 Конструкція інерційного фільтру для рідких компонентів органомінеральних добрив з низьким вмістом домішок .....	48
1.2.1 Сучасні конструкції інерційних фільтрів для рідких компонентів.....	48
1.2.2 Конструкція інерційного фільтру для рідких компонентів органомінеральних добрив з низьким вмістом домішок .....	62
1.3 Висновок .....	81
2 Підвищення продуктивності механічного оброблення матеріалів шляхом розроблення комплексного підходу до проектування систем захоплення деталей та способів зменшення вібрацій процесу різання .....	85
2.1 Комплексний підхід щодо проектування систем захоплення, як невід’ємного елемента системи «система захоплення – деталь – виробниче середовище – технологічне обладнання» для забезпечення подальшого раціонального вибору з урахуванням конкретних умов виробництва.....	85
2.1.1 Цифровий двійник металорізального верстата .....	85



2.1.2 Індустрія 5.0: аспекти технологій співпраці.....	86
2.1.2 Цифровий двійник м'якого робота з пневматичним м'язовим приводом .....	92
2.2 Підхід щодо оцінювання конструкції систем захоплення деталей для виробництв загального машинобудування.....	97
2.3 Системи захоплення деталей та вузлів для виробництв загального машинобудування.....	109
2.3.1 Автоматизований пристрій для оброблення деталей типу вилки.....	109
2.3.2 Автоматизований верстатний пристрій для оброблення деталей типу шатунів .....	118
2.4 Класифікація систем машинного зору з описом практичного їх застосування в процесах механічного оброблення деталей та складання вузлів на машинобудівних підприємствах .....	126
2.4.1 Загальний аналіз застосування колаборативних роботів.....	126
2.4.2 Параметри датчиків зображення .....	130
2.4.3 Параметри пристроїв обробки зору.....	133
2.5 Способи зниження вібрацій спеціальних консольних розточувальних оправок .....	139
2.6 Схеми експериментальних стендів щодо зменшення коливань спеціальних консольних розточувальних оправок .....	142
2.7 Опис параметрів налаштування динамічного демпфера, а також умови ефективного демпфування коливань .....	145
2.8 Експериментальні результати динамічних гасників коливань для розточування розривних поверхонь .....	147
2.8.1 Встановлення залежності амплітуди коливань від кількості елементів динамічного гасителя коливань .....	147
2.8.2 подача повітряного потоку в зону різання.....	149
2.8.3 Збудження коливань по дотичній до обробленої поверхні .....	152
2.9 Висновок .....	155
Висновки .....	158
Рекомендації .....	165

	10
Перелік джерел посилання .....	167
Додаток А Акт впровадження (використання) результатів науково-дослідної роботи у навчальний процес .....	201

## ВСТУП

### **Підстава для виконання роботи**

Відповідно до Законів України «Про наукову і науково-технічну діяльність», «Про Державний бюджет України на 2023 рік», Порядку використання коштів, передбачених у державному бюджеті для підтримки пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок у закладах вищої освіти, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 10 липня 2019 р. № 639, а також до наказу Міністерства освіти і науки України від 23.02.2023 № 195 «Про затвердження переліку закладів вищої освіти, яким надаватимуться бюджетні кошти для підтримки пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок за результатами проведеної державної атестації, з відповідними обсягами фінансування на 2023 рік» та Додаткової угоди № БФ/2-2023 від 10.05.2023 до Договору № БФ/26-2021 від 04.08.2021 на виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Сумського державного університету.

### **Проблеми, які вирішуються під час виконання роботи**

1. Національна промисловість України не виробляє в достатній кількості складні фосфоровмісні добрива, що ставить під загрозу забезпечення продовольчої безпеки держави та світу в цілому. Через відсутність вітчизняної традиційної сировини – апатитового концентрату, який не в повній мірі компенсується фосфоритами Близького Сходу та Північної Африки, вже зменшено номенклатуру добрив та зупинено ряд виробництв. Водночас Україна має значні поклади фосфоритів, що не можуть бути залучені в переробку сірчаноокислотним способом через низький вміст  $P_2O_5$  загального – менше 24 %, але мають перспективи залучення до виробництва складних фосфоровмісних добрив безкислотним способом у зв'язку з наявністю значної кількості фосфору засвоюваного – до 80 %.

Одержання стабільних врожаїв сільськогосподарських культур можливо тільки за відповідного агрохімічного забезпечення. Зміни клімату та

збільшення посушливих місяців в Україні потребують також зміни видів добрив і технологій їх застосування. Виробництво й застосування органо-мінеральних добрив на основі місцевої сировини, за результатами тестових агрохімічних досліджень, показує перспективність даного напрямку робіт і дозволить за їх широкого внесення повноцінно задовольнити потреби в удобренні за рахунок збільшення рухомості поживних речовин у ґрунті.

У теперішній час на ринку України вже з'явилися окремі види фосфоровмісних і органо-мінеральних добрив на основі імпортованих фосфоритів. До того ж введення фосфоритів у склад гранули дозволяє тільки збільшити вміст загального фосфору та не підвищує масову частку водорозчинного фосфору, що суттєво знижує ефективність такого виду добрив. Оскільки для розкладу наявних у сировині засвоєваних форм  $P_2O_5$  і переведення їх у водорозчинні органо-мінеральні комплекси потрібен певний час, то фосфорне живлення рослин буде відбуватися в основному тільки на наступний рік, але не впливає на щорічну врожайність сільськогосподарських культур.

Аналіз попередніх вегетаційних досліджень вказує, що одержання органо-мінеральних добрив на основі вітчизняної сировини з вмістом  $P_2O_5$  загального до 24 %, з модифікуванням гранули гуматами калію та природними сорбентами дозволяє виробляти добриво, яке за своїми споживчими характеристиками не поступається традиційним мінеральним добривам, а за вмістом органічних компонентів є більш ефективним. Залучення до виробництва добрив місцевої фосфатної сировини, торфу і леонардиту для одержання гумату, калію та сорбентів у вигляді деревного вугілля дозволяє дати поштовх розвитку національної сировинної бази. Виробництво добрив безкислотним способом з дрібнодисперсного фосфориту методом агломерації з елементами парової грануляції дає можливість знизити енерговитрати на сушку продукту більше ніж у 2 рази та підвищити врожайність сільськогосподарських культур в календарному році внесення добрив. Зокрема, застосування саме водорозчинних складових добрив є інструментом реалізації цього процесу.

В той же час, застосування сучасної сільськогосподарської техніки для розпилення рідких добрив з розміром отворів форсунок не більше 100 мкм

потребує відповідного подрібнення і фільтрації складових компонентів добрив, що вирішується шляхом застосування спеціальних конструкцій фільтрувального устаткування. Розроблення та випробування інерційно-фільтруючої конструкції для фільтрування рідких компонентів органо-мінеральних добрив з наступними характеристиками: потужність – не менше 100 л/година; рідина, що фільтрується – водний розчин баластного гумату лужних металів; рН рідини – не більше 11; густина – не більше 1,1 кг/м<sup>3</sup>; вміст твердих домішок у розчині – не більше 32 % дасть можливість їх виготовлення з місцевої фосфатної сировини, торфу і леонардиту. Розроблення фільтрувального вузла рідких сумішей дозволить відпрацьовувати не тільки технологічні особливості процесу виготовлення гуматів калію, але й підготовку бакових сумішей для безпосереднього внесення на полях.

2. Застосування досягнень штучного інтелекту з метою вдосконалення праці робітників на виробництві є однією з найбільш обговорюваних тем в рамках концепції Індустрії 4.0. Осередки спільного виробництва підвищили гнучкість і адаптивність до умов виробництва завдяки поєднанню переваг людини і робота та розширили перелік завдань, які можна автоматизувати. Однак широкому впровадженню колаборативних роботів у виробництво перешкоджають питання щодо безпеки працівників і простоти використання. Системи машинного зору дозволяють колаборативним роботам тісніше працювати з довкіллям і наділяють їх основними когнітивними функціями.

Аналіз використання систем машинного зору під час механічного оброблення деталей є актуальним науково-прикладним завданням. Опис практичних прикладів їх застосування та каталоги популярних виробників дозволять виділити основні сфери застосування систем машинного зору, розробити їх класифікацію та запропонувати рекомендації щодо вибору оптимальної системи машинного зору для заданих виробничих умов.

Розроблення комплексного підходу до проектування систем захоплення як невід'ємного елемента системи «система захоплення – деталь – виробниче середовище – технологічне обладнання» необхідно для забезпечення підвищення продуктивності механічного оброблення з урахуванням конкретних

умов виробництва. Для систематизації знань із проєктування систем захоплення необхідно розробити підхід до оцінювання конструкції систем захоплення, що використовуються у промислових і колаборативних роботах.

Розроблення принципової структурної схеми роботизованої системи захоплення; визначення послідовності етапів процесу вибору елементів системи захоплення; визначення комплексної системи «захватна система – деталь – виробниче середовище – технологічне обладнання» з урахуванням взаємного впливу елементів конструкції має стати підґрунтям для інженерів і дослідників під час проєктування нових систем захоплення. Удосконалення раціонального вибору елементної бази та структури системи захоплення шляхом систематизації досвіду проєктування системи захоплення може бути використано в системах автоматизованого проєктування технологічних процесів та автоматизованого проєктування систем захоплення. Це може допомогти реалізувати підхід «від геометрії деталі до проєктування систем захоплення» та забезпечити ефективність етапу планування виробництва за рахунок скорочення часу на проєктування роботизованих систем захоплення та підвищення безпеки, гнучкості, автономності та продуктивності виробництва.

Дослідження способів зменшення коливань будуть проведені на основі:

- використання динамічного демпфера з переривчастими ріжучими елементами;
- придушення нормальних коливань різця до поверхні заготовки за рахунок збудження коливань, спрямованих по дотичній до поверхні заготовки і які не викликають похибок оброблення;
- підвищення демпфування в зоні різання при зміні конструкції розточувальної оправки дозволить знизити вібрації спеціальних консольних розточувальних оправок, що встановлено у шпindelних головках розточувальних верстатів.

Це дозволить провадити механічне оброблення отворів у нестандартних умовах, наприклад, при розточуванні глибоких отворів з  $l/d > 3$  ( $l$  – довжина отвору,  $d$  – діаметр отвору) або переривчастих отворів.

## **Мета роботи**

Метою роботи є виконання завдань відповідно до пріоритетних тематичних напрямів, зазначених на 2023 рік у розділі 2 Перспективного плану розвитку Сумського державного університету за науковим напрямом «Технічні науки» за період з 2021 по 2025 роки, зокрема:

1) підвищення агрохімічної та технологічної ефективності органо-мінеральних фосфоровмісних добрив за рахунок збільшення масової частки водорозчинного фосфору під час переробки сировини українських родовищ фосфоритів та сорбентів – прикладного дослідження, що виконується в рамках пріоритетного тематичного напрямку «Процеси двофазної газодинамічної, інерційно-фільтруючої, вібраційно-інерційної сепарації, з супутнім тепломасообміном (сепарація з конденсацією)», який зазначений у Перспективному плані розвитку Сумського державного університету за науковим напрямом «Технічні науки» за період з 2021 по 2025 роки;

2) підвищення продуктивності механічного оброблення матеріалів шляхом розроблення комплексного підходу до проектування систем захоплення деталей та способів зменшення вібрацій процесу різання – прикладного дослідження, що виконується в рамках пріоритетного тематичного напрямку «Підвищення ефективності оброблення деталей на токарних верстатах шляхом керування динамікою процесу з високими частотами обертання шпинделя», який зазначений у Перспективному плані розвитку Сумського державного університету за науковим напрямом «Технічні науки» за період з 2021 по 2025 роки.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішенні наступні **завдання**:

1. Розробити склад органо-мінерального добрива на основі вітчизняної мінеральної сировини зі збільшеним вмістом масової частки водорозчинного фосфору з вмістом поживних речовин.

2. Обґрунтувати раціональний спосіб одержання органо-мінерального добрива з вітчизняної мінеральної сировини.

3. Спроекувати, виготовити та випробувати прототип інерційного фільтру для рідких компонентів органо-мінеральних добрив з низьким вмістом домішок.

4. Розробити комплексний підхід щодо проєктування систем захоплення як невід'ємного елемента системи «система захоплення – деталь – виробниче середовище – технологічне обладнання» для забезпечення подальшого раціонального вибору з урахуванням конкретних умов виробництва.

5. Розробити підхід щодо оцінювання конструкції систем захоплення деталей для виробництв загального машинобудування.

6. Розробити структурну схему роботизованої системи захоплення деталей та вузлів для виробництв загального машинобудування.

7. Запропонувати класифікацію систем машинного зору з описом практичного їх застосування в процесах механічного оброблення деталей та складання вузлів на машинобудівних підприємствах.

8. Запропонувати спосіб зниження вібрацій спеціальних консольних розточувальних оправок, зокрема:

8.1 Розробити схеми експериментальних стендів щодо зменшення коливань спеціальних консольних розточувальних оправок.

8.2 Зробити опис параметрів налаштування динамічного демпфера, а також умови ефективного демпфування коливань.

8.3 Отримати експериментальні результати динамічних гасників коливань для розточування розривних поверхонь.



# **1 ПІДВИЩЕННЯ АГРОХІМІЧНОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ФОСФОРОВМІСНИХ ДОБРІВ ЗА РАХУНОК ЗБІЛЬШЕННЯ МАСОВОЇ ЧАСТКИ ВОДОРОЗЧИННОГО ФОСФОРУ ПІД ЧАС ПЕРЕРОБКИ СИРОВИНИ УКРАЇНСЬКИХ РОДОВИЩ ФОСФОРИТІВ ТА СОРБЕНТІВ**

## **1.1 Розроблення складу органо-мінерального добрива на основі вітчизняної мінеральної сировини зі збільшеним вмістом масової частки водорозчинного фосфору з умістом поживних речовин**

### **1.1.1 Обґрунтування вибору компонентів органо-мінерального добрива на основі вітчизняної мінеральної сировини**

Важливе місце у глобальному виробництві продуктів харчування рослинного походження в теперішній час займають нові види добрив. Широке впровадження добрив із удосконаленими властивостями у сільське господарство передбачає збільшення виробництва та якості сільськогосподарської продукції, підвищення термінів зберігання продукції, збільшення ресурсу спеціальної техніки та одержання високоякісної харчової продукції та кормів. Застосування в рослинництві мікродобрив забезпечує збільшення їх стійкості до хвороб і засух та збільшення урожайності продовольчих і технічних культур більше ніж в 1,5 рази. Ефект при цьому досягається завдяки більш активному проникненню мікроелементів у рослину за рахунок частинок нанорозміру та їх нейтрального (в електрохімічному сенсі) статусу [1].

Виконання завдань програмних положень повинно забезпечити ведення стійкого й високопродуктивного землеробства, отримання високоякісної продукції та збереження родючості ґрунтів [1].

Одним із лімітуючих факторів родючості ґрунтів різних типів є дефіцит азоту, фосфору, калію та інших поживних макро- та мікроелементів. Висока ціна, що склалася в державі в останні роки на основні мінеральні добрива – амонійну селітру, суперфосфат, калійну сіль тощо, значно обмежує

сільгоспвиробників у придбанні їх в необхідній кількості. Актуальним питанням залишається екологічна безпека довкілля, що напряду пов'язане зі контролем внесення мінеральних добрив. До того ж, у зв'язку з воєнним станом у державі, цю проблему посилює скорочення сільськогосподарських площ через неможливість оброблення полів і збору урожаю внаслідок постійних обстрілів і масштабного мінування. Під час детонації ракет та артилерійських снарядів утворюється низка хімічних сполук: чадний і вуглекислий газ, азот та його оксиди, формальдегід ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), пари ціанистої кислоти ( $\text{HCN}$ ), велика кількість токсичної органіки, а також ряду важких металів ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mo}$ ), які потрапляють у повітря, воду й ґрунти [2, 3]. Тому посилена увага має бути також спрямована на відновлення та знезараження ґрунтів після забруднення внаслідок вибухів.

Розроблені останніми роками нові види добрив вже дозволяють зменшити кількість їх внесення для отримання того ж приросту урожаю сільськогосподарських культур.

Нітроген відіграє виключно важливу роль в обміні речовин. Він входить до складу ряду органічних речовин, таких як білки, нуклеїнові кислоти, нуклеопротейни, хлорофіл, алкалоїди, фосфатиди та ін. [4].

Під впливом азотних добрив посилюється мінералізація органічної речовини і зростає засвоєння рослинами ґрунтового азоту, вони збільшують зелену масу рослин, і, як наслідок – врожайність.

Але втрати від вимивання та газових викидів азоту становлять від 30 до 50 % внесених у ґрунт добрив. У нинішній економічній ситуації марні витрати є неприпустимі.

Втрати азоту добрив можуть бути знижені за рахунок посилення іммобілізації або гальмування мінералізації органічної речовини ґрунтів шляхом внесення органічних добрив, проведення агротехнічних ґрунтозахисних і природоохоронних заходів, вирощування пожнивних і проміжних культур, вирощування трав, використання зеленого добрива [5].

Внесення високих доз мінеральних добрив є одним чинників закислення ґрунтів. Ця проблема посилюється тим, що після вибухів вивільнені

хімічні сполуки окислюються на повітрі, сірка та оксид азоту викликають кислотні дощі, які змінюють рН склад ґрунтів. Механізм детоксикації полягає в зниженні кислотності ґрунтового розчину та, відповідно, рухомості ВМ.

Саме за наявності фосфору рослини набувають здатності зв'язувати надлишкову кількість ВМ у нерозчинні фосфорорганічні комплекси в корневих системах [6].

Фосфор є іншим важливим елементом живлення рослин. Рослини споживають його головним чином у вигляді аніонів  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ; (або  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) з солей ортофосфатної кислоти ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), (а також з солей поліфосфатних кислот після їх гідролізу). Фосфор, що надійшов у рослини, включається до складу різних органічних сполук. Фосфор міститься в нуклеїнових кислотах і нуклеопротейнах, які беруть участь у побудові цитоплазми та ядра клітин.

Під впливом фосфатів рослини швидше проходять біологічний цикл розвитку, а нестача фосфору в найбільшій мірі позначається, перш за все, на урожаї насіння. Умови фосфорного живлення мають велике значення для підвищення їх стійкості проти впливу засухи [7, 8, 9, 10].

Наразі можливості з імпорту фосфатної сировини для промислових підприємств вкрай обмежені. У зв'язку з цим, перед виробниками добрив постало першочергове завдання з підвищення ефективності використання відомих марок мінеральних добрив і розробки нових рецептур, які будуть орієнтуватися на місцеві родовища фосфатної сировини. В Україні існує власний «фосфорний потенціал» у вигляді покладів фосфоритної сировини на території 13 областей, а саме: в Північно-Західному краї, Середньому Придністров'ї, Причорномор'ї та Дніпровсько - Донецькому регіоні [11,12]. Загальна кількість родовищ фосфоритів, у тому числі малих, складає близько 360 [13]. Прогнозні ресурси родовищ, освоєння яких є доцільним, становлять 516 млн т  $\text{P}_2\text{O}_5$  [11, 13].

Вивчення фізико-хімічних показників окремих зразків фосфоритових родовищ (Ново-Амвросіївське, Ратнівське тощо) показало, що фосфатна сировина попри невисокий вміст  $\text{P}_2\text{O}_5$  заг, має високий вміст в ньому  $\text{P}_2\text{O}_5$  засв (не менше 80 %), що дозволяє застосувати їх для прямого внесення як

фосфоритового борошна. Для прикладу, фізико-хімічні показники фосфат-глауконітового концентрату Ново-Амвросіївського родовища наведено в табл. 1.1 [14].

Дисперсний склад фосфат-глауконітового концентрату Ново-Амвросіївського родовища наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.1 – Фізико-хімічні показники фосфат-глауконітового концентрату Ново-Амвросіївського родовища

Найменування показника і одиниця виміру	Результат аналізу
Масова частка загальних фосфатів у перерахунку на $P_2O_5$ заг, %	22,3
Масова частка засвоюваних фосфатів у перерахунку на $P_2O_5$ засв, %	21,9
Масова частка CaO, %	36,15
Масова частка F, %	2,18
Показник активності водневих іонів, рН (10 % розчину)	7,20
Масова частка $CO_2$ , %	5,50
Масова частка $Fe_2O_3$ , %	3,60
Масова частка $Al_2O_3$ , %	2,00
Масова частка води, %	2,02
Ефективна питома активність природних радіонуклідів, Бк/кг	366

Таблиця 1.2 – Дисперсний склад фосфат-глауконітового концентрату

Фракція часток розміром, мм	Масова частка, %
> 0,4	0,85
> 0,315	1,27
> 0,28	2,54
> 0,2	0,56
> 0,1	37,88
> 0,063	21,83
< 0,063	35,07

Подальші дослідження з розширення можливостей застосування фосфоритної сировини у виробництві добрив показали можливість включення їх як окремих компонентів складних добрив. Агрохімічна ефективність таких добрив була підтверджена під час агрохімічних випробувань[15].

Внесення до складу фосфатовмісного добрива біочару, який має 86 % вуглецю, дозволяє підвищити фотосинтез рослин за рахунок їх додаткового

вуглецевого живлення. Biochar (Біовугілля) – це приготовлене особливим чином деревне вугілля, яке додають у ґрунт для поліпшення родючості. Є гіпотеза, що біочар здатний значно підвищити врожайність ґрунту та одночасно знизити кількість вуглекислого газу в атмосфері планети. Його пори стають місцем існування для ґрунтової біоти. Вуглець у біочарі дуже стабільний і залишається в ґрунті на тисячі років, зв'язуючи та утримуючи мікроелементи та мінерали, поки не віддасть їх корінням рослин за допомогою симбіотичних бактерій, позитивно впливає на зв'язування рухомих форм ВМ. У місцях із дощами й зливами це є безцінною властивістю для добрива, поряд із перешкодою ерозії та забруднення підземних вод. Біочар, маючи мікропористу структуру, також дозволяє акумулювати в собі мікроелементи та вологу і, таким чином, підвищує дифузійні і пролонгуючі властивості такого органічно-мінерального добрива.

Дослідження кількісних і якісних характеристик мікропористої структури зразків біочару з твердих порід деревини проводили методом скануючої мікроскопії з елементним мікроаналізом за допомогою скануючого електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B в центрі колективного користування науковим обладнанням (ЦККНО) СумДУ. Результати дослідження біочару з твердих порід деревини наведено на рис.1.1.

Аналіз морфології показав, що:

- структура біовугілля нанопориста комірчаста;
- пори – це прямолінійні канали, довжина яких фактично відповідає вертикальному лінійному розміру матеріалу [16].

Для виявлення сили впливу (ролі) біочару на збільшення ваги проростків у ході проведених агрохімічних (вегетаційних) досліджень був використаний загальний масив отриманих даних. За результатами кореляційного аналізу встановлено, що коефіцієнт кореляції між внесеним біочаром і вагою проростків був статистично вірогідним і становив  $r=0,512$ .

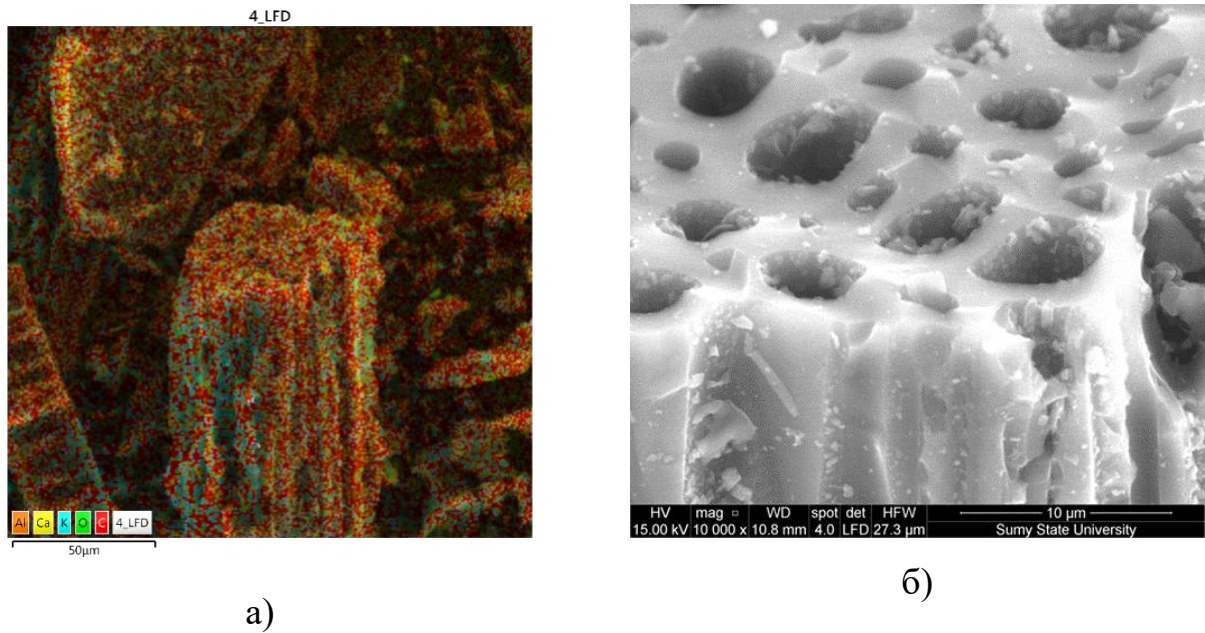


Рисунок 1.1 – Електронна фотографія мікроструктури біовугілля з дубу при збільшенні:  $\times 1600$  (а);  $\times 10000$  (б)

При цьому, коефіцієнт детермінації (сила впливу фактора) за результатами дослідження дорівнював  $r^2=0,262$ . Отже, лише на 26,2 % біочар мав вплив на отримання додаткового приросту біомаси проростків ярого ячменю. Приріст біомаси з вірогідністю на 73,8% залежала від інших факторів, а саме від внесених у ґрунт азоту, фосфору, калію та інших компонентів, на що вказують високі коефіцієнти кореляції між внесеними елементами живлення і вагою рослин. Обробка даних дисперсійним аналізом за схемою двофакторного дослідження допомогла обчислити силу впливу сорбенту на отримання приросту рослин за методами Плохінського і Синдекора. Сила впливу була дещо меншою, в порівнянні з кореляційним аналізом, становила відповідно 14,44 % і 19,89 %. Проте ці методи є досить точними. Отже, статистично доведено, що зростання ваги проростків відбувалося також і за рахунок біочару.

Важливість калію випливає з його численних ролей у житті рослин: він бере участь у активації більше шістдесяти ферментних систем у рослинній клітині та у синтезі білків, вітамінів, крохмалю та целюлози, що забезпечує нормальний метаболізм рослин, їх зростання та формування міцних тканин. Калій позитивно впливає на інтенсивність фотосинтезу, окисних процесів та утворення органічних кислот у рослинах, бере участь у вуглеводному та

азотному обміні. Виробництво крохмалю та цукру в бобових культурах, посилене калієм, приносить користь симбіотичним бактеріям, що живуть на корінні, і, таким чином, покращує фіксацію азоту.

Калій покращує поживну цінність зерна, бульб і плодів за рахунок збільшення вмісту білка та олії в насінні, крохмалю в бульбах і насінні, а також вітаміну С та цукру в плодах. Калій також покращує смак і колір плодів та збільшує розмір бульб та плодів. Крім того, він підвищує стійкість до різних пошкоджень при зберіганні та транспортуванні, тим самим продовжуючи термін зберігання.

Зважаючи на практичну відсутність діючих родовищ калію в Україні, пошук альтернативної калієвмісної сировини показав перспективність застосування золи від спалювання рослинних залишків сільськогосподарського виробництва. Як показали дослідження, основними елементами золи від спалювання соломи озимої пшениці є калій, фосфор, кальцій, магній та сірка у вигляді оксидів, карбонатів тощо. При цьому вміст калію в перерахунку на  $K_2O$  залежно від виду сировини і умов спалювання в золі може коливатися від 12 % до майже 43 %. А вміст фосфору в перерахунку на  $P_2O_5$  від 4–5 % до 16 %. У зв'язку з нагромадженням золи біля котельних підприємств, утилізація її проводиться переважно як добрива сільськогосподарських угідь. Через високий вміст у золі лужних структуроутворюючих елементів таких як кальцій і магній, внесення золи в ґрунт є ефективним заходом для відтворення його родючості, особливо для нейтралізації кислих ґрунтів [17, 18]. Також золу можна застосовувати як сировинний компонент складних добрив.

Проведені в лабораторії тестові вегетаційні дослідження з вирощування ярого ячменю з застосуванням добрива на основі альтернативних джерел фосфору і калію у вигляді золи показали, що зростання вегетативної маси рослин було статистично вірогідним. У варіантах із використанням зольних добрив більшим приріст біомаси виявили при внесенні в ґрунт гранул золи з біочаром та золи збагаченої ортофосфорною кислотою з інтегрованим у гранули біочаром, що дозволяє розглядати золу як перспективну калієвмісну сировину.

Оскільки в гранулах золи фосфор знаходиться у засвоюваній формі, а у початковий період вегетації рослин потрібен водорозчинний фосфор, у НДІ МІНДІП СумДУ були проведені попередні дослідження з уведення в склад гранули водорозчинного фосфору у вигляді фосфорної кислоти. Експерименти з різними концентраціями фосфорної кислоти показали можливість уведення фосфору у водорозчинній формі, та стабільно зафіксувати цю форму фосфору при виготовленні і сушінні гранули не вдалося. Прийняте рішення з уведення водорозчинного фосфору у вигляді порошкоподібного моноамонійфосфату дозволило не тільки зберегти в гранулі водорозчинний фосфор, а й збагатити добриво азотною складовою. Тестовий вегетаційний дослід з вирощування ярого ячменю з дослідженням дії на врожайність добрива, що виготовлене з золи з додаванням фосфорної кислоти показав достовірну прибавку врожаю на 3,1 %, що вказує на перспективність даного напрямку досліджень.

З метою підвищення споживчої цінності добрив НДІ МІНДІП СумДУ протягом останніх років проводилися технологічні й агрохімічні дослідження з одержання та застосування гуматів лужних металів. Одержані на основі торфу зразки мікродобрива «Гумат натрію» і «Гумат калію» пройшли вегетаційні, мікропольові дослідження і показали свою ефективність. Так, при вирощуванні цукрових буряків на дослідній ділянці с.м.т. Угроїди Краснопільського р-ну Сумської області на полі № 3 тільки при застосуванні гумату калію в залежності від дози внесення було отримано прибавку врожаю від 15 % до 30 %.

Відомо [19, 20, 21], що застосування гумінових добрив суттєво змінює умови ґрунтового живлення рослин, викликаючи активне посилення процесів мобілізації поживних речовин у формі, що засвоюються рослинами.

Ґрунти, де вносилися гумати, характеризуються найкращими умовами азотного та фосфатного режимів при накопиченні в них гумусових сполук за рахунок утворення гумінових кислот.

При цьому:

- посилюється рухливість фосфору ґрунту;



– посилюються процеси нітратоутворення в ґрунті, що сприяє значному збільшенню загального та білкового азоту та переважання вмісту нітратів над амонійним азотом на тлі зростання нітрифікаційної здатності та збільшення виділення вуглекислоти ґрунтом. Зростає також фотохімічна фіксація азоту та доступність рослинам органічного азоту ґрунту;

– прискорюється надходження амонійних та амідних форм азоту, фосфору в рослину, в результаті чого спостерігається збільшення вмісту азоту та фосфору в рослині та їх винесення з зеленою масою;

– збільшується концентрація заліза, кальцію, алюмінію у разі зниження кількості магнію, тобто гумати істотно впливають на вміст і динаміку ґрунтових катіонів, крім калію.

Ще однією особливістю цих добрив є зниження чи повне усунення негативного впливу несприятливих на розвиток рослин чинників. Так, при відхиленні умов живлення рослин від норми, добрива ефективніші в ранні періоди розвитку рослин при значній нестачі в ґрунті фосфору. Гумінові добрива ефективніші за несприятливих для розвитку рослин погодних умов, більший ефект добрив спостерігається при відхиленні хоча б одного з факторів росту та розвитку рослин від оптимального. Нарешті, є дані, що гумінові добрива виявляють захисні властивості: радіозахист, захист від фітотоксичної дії гербіцидів, адсорбційні властивості по відношенню до шкідливих домішок і пестицидів у ґрунті [22].

### 1.1.2 Визначення співвідношення поживних речовин

При розробці рецептури нового виду добрива необхідно спиратися на запити сільськогосподарського виробника. У теперішній час найбільш вживаним видом добрив є складні азотно-фосфорно-калійні (NPK) добрива з різним умістом поживних елементів. При цьому найбільший агрохімічний ефект складних добрив визначається при одночасному застосуванні мінеральних і органічних добрив [23, 24]. В окремих випадках застосування добрив, в яких калієвмісним компонентом є калій хлористий, не є доцільним

через токсичність хлору для деяких рослин. На основі перелічених вихідних даних в складі нового органо-мінерального добрива повинні бути:

- азот, як елемент, що потрібний у перший період розвитку рослин;
- фосфор у двох формах: водорозчинній і засвоюваній;
- калій, сполуки якого не містять хлор;
- органічна складова, яка буде стимулювати споживання рослиною основних поживних речовин;
- останнім часом, у зв'язку з поступовою зміною клімату в Україні, застосування добрива потребує модифікування гранул спеціальними антистресовими добавками;
- оскільки в початковий період вегетації рослинам потрібен водорозчинний азот і, частково, водорозчинний фосфор, то фосфор у добриві для повноцінного забезпечення рослин протягом всього вегетаційного періоду повинен бути у двох формах, при цьому водорозчинної форми необхідно бути не менше 20 % від загального вмісту фосфору в гранулі;
- застосування добрива не повинно підкислювати ґрунт.

Зважаючи на перелічені вимоги, техногенною калієвмісною сировиною може бути зола від спалювання рослинних залишків аграрного виробництва. Типовий склад золи для застосування у виробництві органо-мінеральних добрив безкислотним способом наведено у табл.1.3.

Таблиця 1.3 – Хімічний склад золи

П.п.	Найменування показника та одиниця вимірювання	Результат аналізу
1	Масова частка $P_2O_{5\text{заг.}}$ , %	18,2
2	Масова частка $P_2O_{5\text{засв.}}$ , %	17,2
3	Масова частка $P_2O_{5\text{в.р.}}$ , %	відс.
4	Масова частка $K_2O_{\text{заг.}}$ , %	28,5
5	Масова частка $K_2O_{\text{в.р.}}$ , %	18
6	pH	11,2
7	Масова частка води, %	0,77

Відсутність у золі  $P_2O_{5\text{в.р.}}$  потребувала внесення водорозчинного фосфору у вигляді фосфорної кислоти. Проведені тестові дослідження з унесення до складу золошихти фосфорної кислоти з розрахунку 20 %  $P_2O_{5\text{в.р.}}$  показали

можливість підвищення водорозчинного фосфору при приготуванні шихти на основі золи і фосфорної кислоти та, одночасно, суттєве його зниження під час гранулювання шихти та її сушіння. Результати аналітичних досліджень наведено в табл.1.4.

Таблиця 1.4 – Хімічний склад зразків напівпродукту досліді № 2 порівняно з товарною фракцією досліді № 2

П.п.	Показник	$P_2O_{5\text{заг.}}$ , %	$P_2O_{5\text{в.р.}}$ , %	$P_2O_{5\text{в.р.}}/P_2O_{5\text{заг.}}$ , %	$H_2O$ , %
1	Напівпродукт після змішувача	22,8	4,5	19,74	3,88
2	Напівпродукт після гранулятора	20,0	0,8	4,0	14,53
3	Напівпродукт після сушки	21,1	1,54	7,3	4,87
4	Напівпродукт після охолоджувача	21,4	1,55	7,24	4,93

Зважаючи на результати тестових дослідів, прийнято рішення щодо введення як водорозчинної складової моноамонійфосфату. В досліді застосовувалися гранули моноамонійфосфату фракції 1–2 мм.

Хімічний склад моноамонійфосфату наведено в табл.1.5.

Проведення досліді з одержання гранульованого продукту на основі порошкоподібних моноамонійфосфату і золи. На приготування суміші витратили 100 г моноамонійфосфату і 200 г золи.

Таблиця 1.5 – Хімічний склад гранульованого моноамонійфосфату

Показник	N, %	$P_2O_{5\text{заг.}}$ , %	$P_2O_{5\text{в.р.}}$ , %	pH	$H_2O$ , %
Моноамонійфосфат гранульований	12,1	51,9	48,7	5,12	2,51

Час ведення процесу агломерації складав 8 хв. Змочування суміші в тарілі гранулятора проводили за допомогою пневматичної форсунки. Виділення амоніаку не зафіксовано. Температура суміші на тарілі була 20,3 °C і в процесі агломерації не збільшувалася. Сушіння вологих гранул проводили в сушильній шафі за температури 70 °C протягом 4 годин. Результати досліді занесено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Експериментальні значення хімічного складу добрива

№	Вага зразка МАФ,г	Вага зразка золи, г	Вага води, л	Масова частка P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %			рН	Масова частка азоту, %	Масова частка калію, К <sub>2</sub> O, %	Н <sub>2</sub> O, %
				заг.	в.р.	заг./в.р.				
1	100	200	75	—	—	—	—	—	—	25,3
2	—	—	—	26,0	10,5	40,4	6,9	2,9	20,0	3,73

Як свідчать дані табл. 1.6, застосування моноамонійфосфату разом із золою у комплексному добриві дозволяє отримати складне NPK-добриво.

При розробленні рецептури ефективного органо-мінерального добрива доцільно до золи та моноамонійфосфату додати фосфорит українського родовища з метою збільшення вмісту загального фосфору. Результати тестової апробації під час вегетаційних досліджень різних за складом органо-мінеральних добрив показали, що з метою підвищення стресостійкості рослин від засухи та хворіб доцільно вводити як модифікатор біочар. Проведені вегетаційні дослід з різним умістом такого модифікатора показали можливість його залучення до складу добрива у кількості 1–3 %.

Гранулювання суміші порошкоподібних компонентів гранули (фосфориту, золи, моноамонійфосфату та біочару) методом агломерації на тарілчастому грануляторі проводили за допомогою пластифікатора. Як пластифікатор застосовували водний розчин гумату калію. Баластний гумат калію одержували на дослідно-промисловій установці інституту. Хімічний склад гумату калію наведено в табл.1.7.

Таблиця 1.7 – Хімічний склад баластного гумату калію

П.п.	Найменування показника та одиниця вимірювання	Норма для марки К	Результат випробування
1	Масова частка води, %, не більше	85	83,8
2	Масова частка гуматів в перерахунку на суху речовину, %, не менше	18	18,08
3	рН суспензії, не більше	11,7	9,63

Застосування гідродинамічного гомогенізатора для одержання гуматів лужних металів дозволяє отримувати баластний гумат калію, у водному розчині

якого залишаються в незначній кількості нерозчинені залишки торфу. З метою підвищення споживчої цінності продукту була запропонована фільтрація водного розчину гумату калію та розроблена конструкція фільтру. Проведені дослідні роботи з фільтрації попередньо розбавленого баластного гумату калію показали можливість підвищення вмісту гумінових кислот із 15,95 % до 18,73 % у перерахунку на суху речовину при збільшенні масової частки води з 89,2 % до 93,2 %. Зовнішній вигляд зразку гранульованого органо-мінерального добрива зображено на рис.1.2.



Рисунок 1.2 – Гранули розробленого зразка органо-мінерального добрива

Дані про склад органо-мінерального добрива на основі вітчизняної мінеральної сировини зі збільшеним вмістом масової частки водорозчинного фосфору з умістом поживних речовин: азоту не менше 3 %; фосфору у перерахунку на  $P_2O_5$  – не менше 5 %; калію у перерахунку на  $K_2O$  – не менше 5 %;  $P_2O_5$  водорозчинного – не менше 20 % наведено в табл.1.8.

Таблиця 1.8 – Хімічний склад складного органо-мінерального добрива

П.п.	Показник	Результат аналізу
1	Масова частка загального азоту, %	2,9
2	Масова частка загальних фосфатів у перерахунку на $P_2O_5$ , %	20,0
3	Масова частка водорозчинних фосфатів у перерахунку на $P_2O_5$ , %	4,0
4	Масова частка загального калію у перерахунку на $K_2O$ , %	20,5
5	Масова частка водорозчинного калію у перерахунку на $K_2O$ , %	17,7
6	Масова частка води, %	2,46
7	Показник активності водневих іонів, рН	6,9

1.1.3 Способи отримання органо-мінерального добрива з вітчизняної мінеральної сировини

#### 1.1.3.1 Аналіз основних способів гранулювання

За своєю суттю гранулювання – це сукупність фізико-хімічних та механічних процесів, які забезпечують формування частинок певних розмірів, форми, внутрішньої структури та певних фізико-хімічних властивостей [25]. Серед різноманітного асортименту гранульованих добрив найбільш поширеними є фосфоровмісні, такі як різних видів суперфосфати, амофос та інші комплексні мінеральні добрива [26, 27].

У виробництві гранульованих фосфоровмісних добрив є наступні основні технологічні стадії [28]:

- підготовка сировини (подрібнення та класифікація);
- приготування пульпи у реакторі;
- гранулювання;
- стабілізування структури гранули (сушіння);
- виділення товарної фракції (класифікація за розмірами, подрібнення крупних фракцій).

На сучасному етапі стали велику увагу приділяти мінеральним добривам, до базових компонентів яких додають неорганічні сполуки [29] чи компоненти органічного походження [30, 31, 32].

Процес гранулювання можливо здійснювати із рідинної чи твердої фази, або ж комбінацією даних способів. Із рідинної фази процес гранулювання здійснюється шляхом диспергування рідини на краплі із наступною

кристалізацією гранули при її зневодненні чи конвективному охолодженні повітрям. Із твердої фази процес гранулювання здійснюється шляхом пресування із послідуєчим подрібненням пресованих брикетів до гранул необхідного розміру. Із суміші рідинної та твердої фаз процес гранулювання здійснюється шляхом агломерації порошків при розпилюванні на дрібні частинки порошку суспензії із наступним обкатуванням отриманих агломератів та зміцненням зв'язку між частинками при видаленні рідинної фази при їх сушінні гарячим теплоагентом.

Оскільки в даній роботі маємо справу із активною речовиною гумату у рідинній фазі, то процес гранулювання із газоподібної фази шляхом конденсації з утворенням твердих гранул не досліджується.

Утворення твердих частинок необхідного розміру при гранулюванні проходить чи миттєво, чи поступово. Тому розрізняють процеси гранулювання, які здійснюються без зміни розмірів гранул з часом, із зміною розмірів частинок у часі чи змішаного типу. В залежності від вимог до гранулометричного складу продукту, дрібні фракції чи повністю повертають на стадію грануляції (ретурний процес), чи не повертають (безретурний процес). В останньому випадку у товарному продукті буде завищений вміст дрібних фракцій, в межах 15–40 %. При цьому вимоги споживача до цього показника є достатньо жорсткі: товарна фракція має бути в межах 85–90 %, крупна (розмір частинок більше 4 мм) та дрібна (розмір частинок менше 1 мм) фракції – не більше 5 %. Тому безретурний спосіб не має перспектив до подальшого використання та модернізації.

Для гранулювання матеріалів у вітчизняній та закордонній промисловості використовують такі методи гранулювання:

- обкочування, а саме формування гранул , яке досягається агрегуванням та нашаруванням частинок зі зміцненням структури;
- диспергування рідини у вільний об'єм апарата із наступним утворенням та затвердінням крапель рідини при охолодженні крапель із наступною кристалізацією у повітрі чи нейтральної рідини;

- розпилювання рідини на поверхню гранул у зваженому шарі, яке досягається шляхом кристалізації тонких плівок із наступним їх зневодненням за рахунок сушіння гарячим агентом чи охолодженням холодним повітрям;
- диспергування рідини у активне середовище, яке досягається шляхом формування та затвердіння гранул у результаті утворення нової речовини у вільному просторі апарата;
- чешуювання, яке досягається шляхом охолодження рідини на сторонній поверхні із послідуєчим порібненням отриманої плівки;
- пресування, яке досягається шляхом отримання плиток, брикетів, таблеток із сухих порошоків із послідуєчим подрібненням та розсівом пресату;
- формування чи екструзія, а саме формування частинок шляхом продавлювання пастоподібної маси через отвори фільтери;
- спікання, яке досягається шляхом нагріву із утворенням агломератів, їх охолодженням, подрібненням та розсівом.

Аналізуючи вищезазначені способи гранулювання слід зауважити, що фосфоровмісні добрива, включаючи і комбіновані, гранулюють наступними методами:

- диспергуванням плавівскладних азотно-фосфорно-калійних добрив та наступним охолодженням гранул у грануляційних баштах (приллювання);
- диспергуванням пульпи у псевдозріджений (чи взагалі зважений) шар;
- обкочуванням із одночасним диспергуванням пульпи на поверхню гранул.

Слід зауважити, що останній метод є найпоширенішим у виробництві саме фосфоровмісних гранульованих добрив, а перший – є найпоширенішим у виробництві азотних добрив. Таким чином, розглянемо послідовно дані три методи з точки зору їх особливостей та недоліків. Тому задачею даного аналізу буде вибір найбільш раціонального метода гранулювання фосфоровмісних органо-мінеральних добрив.



### 1.1.3.2 Аналіз процесу гранулювання у баштах методом прильовання

Для добрив, плав для виробництва яких має достатньо малу в'язкість та у гранулі чітко протікають стадії кристалізації, спосіб прильовання є найбільш експлуатаційно надійним та дешевим. Це підтверджується світовою практикою.

Схема отримання гранульованих добрив методом прильовання наведено на рис. 1.3[33, 34, 35].

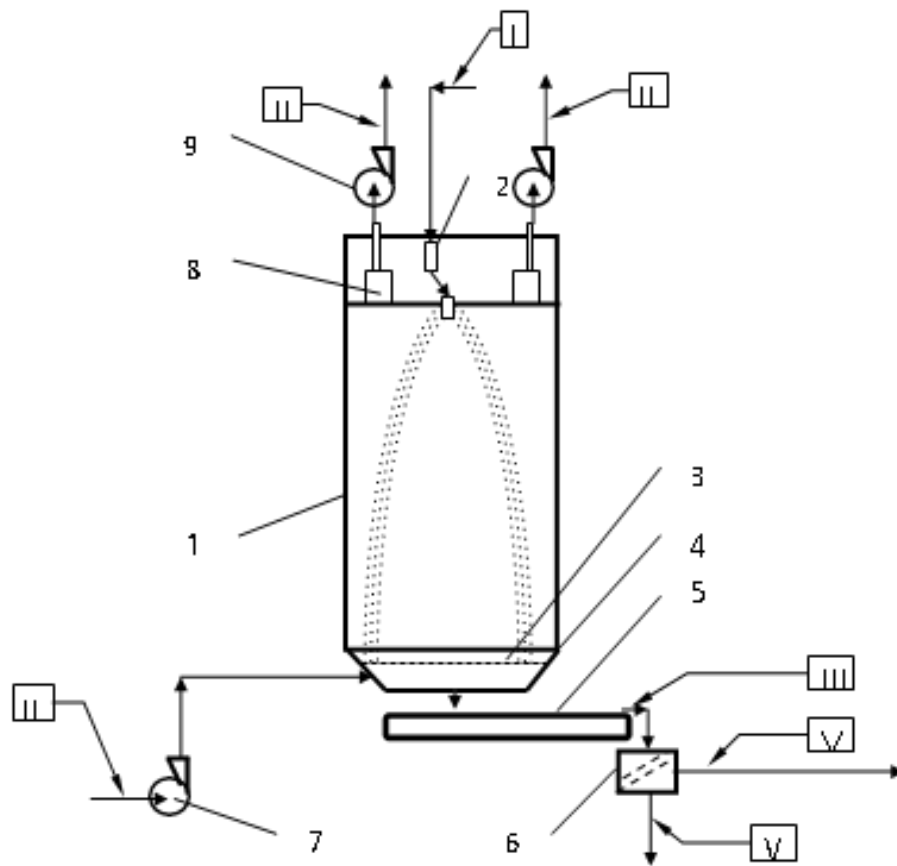


Рисунок 1.3 – Схема отримання гранульованих добрив методом прильовання [34]:

- 1–грануляційна башта; 2–відділення грануляції (напірний бак, фільтр плав, гранулятор); 3 –охолоджувач гранул типу «киплячого шару»; 4–конуси; 5–транспортер; 6–грохот; 7–напірний вентилятор; 8–очищувачі повітря; 9–витяжні вентилятори.

Потоки: I–плав азотного добрива; II – повітря; III – гранули з башти; IV– гранули товарної фракції; V–некондиційні гранули на переробку

В розвиток виробництва гранульованих мінеральних добрив методом прилювання внесли вклад наукові школи проф. О. О. Казакової [36] та проф. Б. Г. Холіна [37].

Слід зауважити, що метод прилювання становиться рентабельніше при достатньо високій продуктивності, а саме вище 200 т / добу [36]. У монографії [36] вказано, що найбільшою за продуктивністю була башта потужністю 2000 т / год. Тобто велика продуктивність баштового метода виробництва гранульованих добрив є достатньо доброю перевагою даної технології.

Іншою перевагою метода прилювання була така характеристика як середня щільність зрошення поперечного перерізу башти. Спочатку даний параметр знаходився в межах 100–200 кг/м<sup>2</sup>•год [36]. Із використанням у грануляційних баштах статичних та вібраційних розбризкувачів плаву [37] у сполученні з розташованим у нижній частині башти охолоджувача киплячого шару, виникла можливість підвищити щільність зрошення до 500–1000 кг/м<sup>2</sup>• год. А це дозволило збільшити продуктивність одиниці об'єму грануляційної башти у 4–5 разів.

Тому зважаючи на вищенаведені переваги метод прилювання у грануляційних баштах знайшов досить поширене використання при виробництві гранульованих азотних добрив, а саме карбаміду та амонійної селітри [36].

Але значні труднощі виникли в свій час при проведенні досліджень із отриманням подвійних (NP) та потрійних (NPK) добрив [36]. Окрім недоліків, які витікають із особливостей фізико-хімічних властивостей плаву, виникли труднощі розбризкування плаву на окремі краплі за допомогою як статичних, так і відцентрових диспергаторів [37]. Цей недолік обумовлений підвищеною в'язкістю розплаву та значному вмісту у ньому зважених твердих частинок, які не розчиняються у плаві. Це унеможливило використання у грануляційних баштах статичних грануляторів, які мають достатньо невеликі за діаметром отвори у корзині для витікання струменів плаву. У відцентрових грануляторах

отвори для витікання струменів плаву мають дещо збільшений діаметр, що полегшує витікання достатньо в'язкого плаву.

В цьому аспекті, для виробників мінеральних добрив, важливо, щоб струмені поділялись при витіканні із отворів на окремі краплі. Це пояснюється тим, що таким процесом можливо керувати з метою отримання структури потоку гранул, яка близька до монодисперсної. Особливим попитом у останній час користуються гранулятори у яких поділ струменів плаву на краплі здійснюється за допомогою механічного впливу вібрацій. Це дозволяє ще більше звужити діапазон розмірів гранул у факелі розпилу та ще більше наблизити його до монодисперсного [33].

У теперішній час також ведуться науково-дослідні роботи за збільшенням продуктивності грануляційних башт. Це обумовлює розроблення нових грануляційних башт з великим діаметром або домодернізацію старого баштового грануляційного обладнання зі збільшеним навантаженням за плавом [38]. У роботах [39, 40] надається теоретичний аналіз впливу таких параметрів процесу, як вміст вологи, температура та швидкість охолоджуючого повітря, на якість отриманих гранул. Теоретичні розрахунки кількох варіантів подачі повітря у грануляційну башту [39] та математична модель процесу грануляції плаву у башті для промислових умов, яка враховує температурний градієнт по радіусу краплі [40], надають дані для підбору раціонального технологічного режиму проведення процесу та збільшення продуктивності грануляційної башти.

У процесі прильовання є принаймні два суттєвих недоліки. Перший із них стосується значних габаритів башти – це поперечний переріз площею 100–500 м<sup>2</sup> та робочу висоту (висота падіння гранул) від 20 до 70 м [35]. А це значно підвищує капітальні витрати на виробництво продукту. Другий недолік стосується значних об'ємів запиленого (біля 0,1 г/м<sup>3</sup>) відпрацьованого повітря, яке викидається безпосередньо у атмосферу. Це обумовлює великий збиток, забруднюючи навколишнє середовище та водні басейни.

Таким чином, приведений аналіз вказує на те, що метод диспергування у вільний об'єм апарата із послідуочим охолодженням розплаву у порожніх

грануляційних баштах (метод прильовання) не може бути реалізований для отримання фосфоровмісних добрив із додаванням гумату калію. Дана рідка суспензія вміщує тверді нерозчинні домішки, що спричинить забивання отворів розпилювальних пристроїв та швидкий вихід їх із ладу.

Тим більше грануляційні башти є дуже габаритними, мають значну продуктивність, тому потребують подачі у башту великих об'ємів охолоджуючого повітря. В грануляційних баштах неможливо здійснити капсулювання гранул, що є достатньо розповсюдженим способом отримання органо-мінеральних добрив.

Таким чином, цей спосіб гранулювання методом прильовання у грануляційних баштах є дуже енергоємним та не раціональним для реалізації задач, поставлених у даній дослідницькій роботі.

#### 1.1.3.3 Аналіз процесу гранулювання диспергуванням пульпи у псевдозріджений шар у апаратах киплячого та завислого шарів

Псевдозріджений (киплячий) шар грає достатньо значущу роль для проведення ряду тепломасообмінних процесів у хімічній технології та інших галузях. Не є винятком і процес грануляції, який може здійснюватися як у киплячому шарі, так і у завислому (наприклад, фонтануючому, завихрювальному чи падаючому шарах) [41, 42, 43, 44].

У киплячому шарі одночасно протікає стадія гранулоутворення та кристалізація речовини. Речовина, яка є складовою суспензії, частково відкладається на поверхні частинок у шарі. Друга її частина утворює самостійні частинки, які слугують новими центрами гранулоутворення. Тобто процес гранулювання у киплячому шарі являє собою достатньо складний комплексний процес збільшення розміру існуючих у шарі гранул та утворення нових.

Зріст гранул по поверхні тим більше вірогідний, чим більше сили зціплення краплі рідини із твердими частинками. Адгезійна властивість краплі залежить як від шорсткості поверхні гранул, так і від такого параметру як співвідношення у краплі рідинної та твердої фаз. Остання величина залежить від температури, вологості та хімічного складу пульпи. Якщо гаряча пульпа

потрапляє на завислий шар з більш низькою температурою, то виникає швидке охолодження насиченого розчину із виділенням окремих кристаликів. Це буде знижувати адгезійні властивості пульпи.

Тобто важливим фактором є вплив температури киплячого шару та інтенсивності теплообміну на міжфазній границі «тверда частинка – газ» на кінетику гранулоутворення. Характер тепло переносу між газовим потоком та частинкою залежить від швидкості та температури газу, діаметру твердих частинок, фізико-хімічних властивостей частинок [45, 46]. У роботі [47] автори запропонували критеріальне рівняння, яке характеризує інтенсивність теплообміну під час випаровування суспензії органічного походження. За допомогою даного рівняння можливо розраховувати коефіцієнт теплообміну, при цьому враховувати швидкість газу, а це дає змогу визначити оптимальні витрати сушильного агента.

Присутній також вплив механічного та теплового походження щодо утворення нових гранул. Як відомо, у киплячому шарі є активна зона теплообміну висотою 20–30 мм над поверхнею газорозподільної решітки. Тобто у цій зоні буде більш підвищена температура, ніж у основному об'ємі псевдозрідженого шару. Тому частинки, які циркулюють між цими зонами будуть прогріватися нерівномірно, що призведе до утворення термічних напруг, а отже утворенню тріщин та розколу гранул.

Окрім утворення нових гранул у завислому шарі здійснюється ріст існуючих гранул, обумовлений відкладенням на поверхні гранул речовиною, яка виділяється із рідини при її випаровуванні. При цьому допускається, що розчин повністю охоплює гранулу. При такій особливості проведення процесу гранулювання, при даних режимних умовах випаровування плівки з розчину здійснюється за умови суміщеного підведення тепла: тепловою конвекцією від псевдозріджуючого агента до поверхні гранули і теплопровідністю всередині гранули [48, 49].

Інший шлях зросту гранул – це зростання їх між собою. Агрегування можливо при достатньо значних силах зціплення між частинками у момент їх зіткнення. Джерелом таких сил є рідка фаза. При достатній кількості рідини на

поверхні гранули сили поверхневого натягу виявляються більшими, ніж сили взаємного руху частинок, і виникає їх злипання. При подальшому випаровуванні рідини чи її охолодженні, утворюються кристалічні мостики, які міцно пов'язують частинки між собою.

Однією з перших спроб описати залежність розміру частинок від параметрів процесу гранулювання зроблено Гримметом, який запропонував прості і правомірні міркування [50]. У даній моделі запропоновано допущення, що гранули повинні рівномірно дозуватися в зону зрошення, режим повинен бути стаціонарним та поверхні кожної частинки повинні зрошуватися плавом однаково. Таким чином, вплив різноманітних режимних параметрів процесу на розміри частинок гранульованого продукту визначає регулювання кількості дрібної фракції, яка може утворюватися у киплячому шарі [51].

Для гранулювання у псевдозрідженому шарі використовуються апарати різних конструкцій. Використовуються два основних конструктивних типів грануляторів: псевдозрідженого і фонтануючого шарів [52, 53]. У грануляторах циліндричного типу (рис. 1.4) із постійним поперечним перерізом, здійснюються такі гідродинамічні режими: струменевий, бульбашковий та поршневий [52]. Всі ці режими характеризуються різною неоднорідністю шару та виникнення застійних зон. Апарати циліндричного типу доцільно застосовувати для гранулювання продуктів, частинки яких можуть злипатися. Газовий потік апарата має постійну швидкість у вільному перетині апарата, що сприяє активному перемішуванню гранул у шарі та запобігає їх злипанню.

Гідродинаміка у конічних (рис. 1.5) та конічно-циліндричних (рис. 1.6) грануляторах має певні характеристики. У таких грануляторах утворюється фонтануючий шар: газовий потік захоплює гранули і викидає по вертикальній траєкторії їх нагору до периферії, далі вони сповзають униз вздовж бокової поверхні конуса.

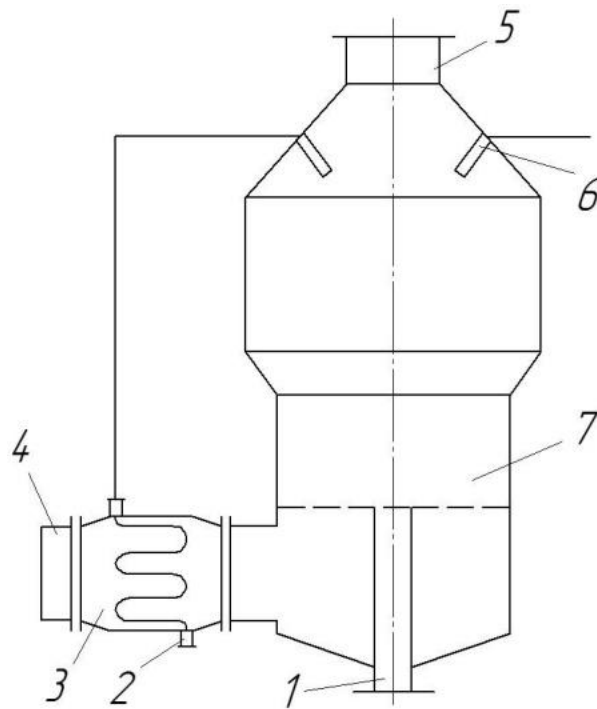


Рисунок 1.4 – Схема циліндричного апарата киплячого шару з центральним вивантаженням [53]:

1 – патрубок для вивантаження продукту; 2 – патрубок для введення рідини;  
3 – калорифер; 4 – патрубок для введення теплоносія; 5 – патрубок для виходу відпрацьованого теплоносія; 6 – форсунка для рідини; 7 – корпус апарата

Гранулятори із корпусом конічної форми чи конічно-циліндричної використовують для капсулювання гранул, які практично не злипаються між собою. Дана форма грануляторів забезпечує процес покриття гранул при оптимальних гідродинамічних умовах [52, 53].

Аналіз різних типів обладнання киплячого шару для гранулювання в хімічній [54], харчовій [55] та фармацевтичній [56] галузях промисловості показав гостру необхідність нової організації взаємного руху потоків, яка підвищить ступінь монодисперсності готового продукту.

Серед основних методів управління часом перебування полідисперсних частинок в апараті слід виділити наступні:

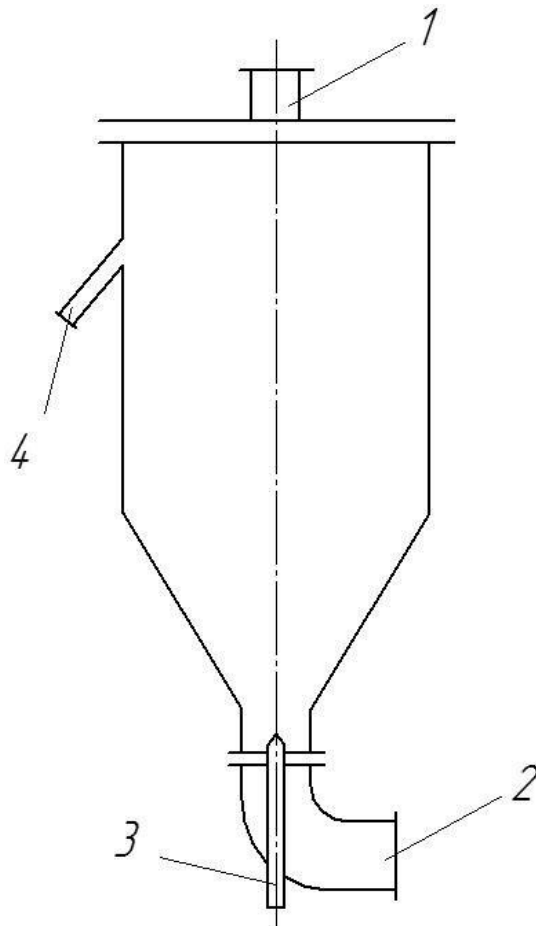


Рисунок 1.5 – Схема конічного апарата з фонтануючим шаром [53]:

1 – патрубок для виходу теплоносія; 2 – патрубок для введення теплоносія;  
3 – форсунка рідини; 4 – патрубок для виведення продукту

1. Створення спрямованого переміщення частинок за рахунок розгінних елементів (газорозподільників вихрового типу) [57]. Газорозподільники вихрового типу дозволяють проводити додаткову класифікацію та сепарацію гранул. Використання вихрових потоків також призводить до вирівнювання поля температур в апаратах та збільшення інтенсивності видалення вологи з частинок. Автори [58, 59] також відзначають високу стабільність обертового псевдозрідженого шару в широкому діапазоні навантажень по суцільній та дисперсній фаз. У роботі [60] відзначено можливість управління конфігурацією вихрового шару.

2. Конструювання апаратів зі змінною площею поперечного перерізу у застосуванні до процесів гранулювання[61].



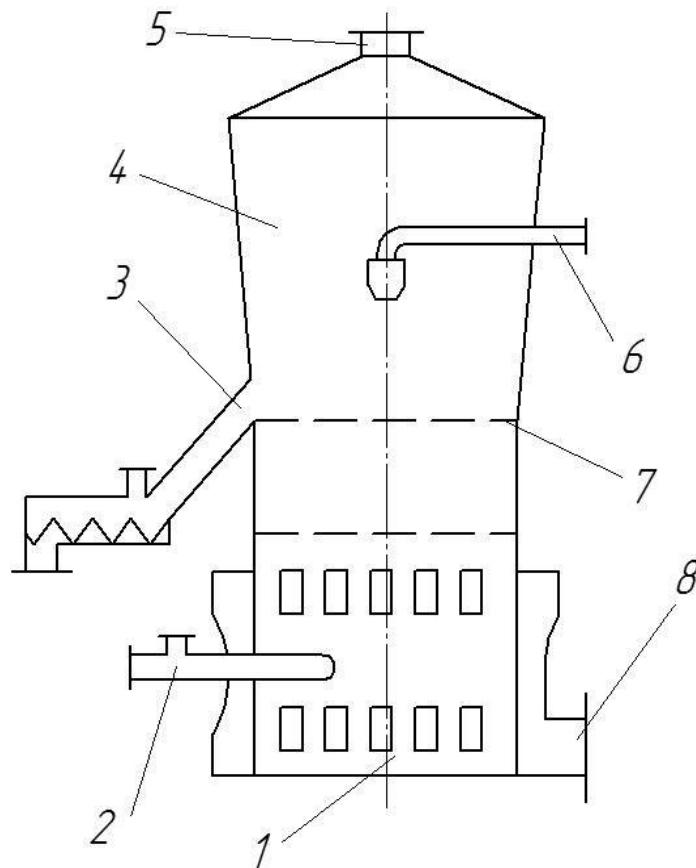


Рисунок 1.6 – Схема конічно-циліндричного апарата киплячого шару з вбудованою топкою і подачею рідини на шар [53]:

- 1 – вбудована топка; 2 – газова горілка; 3 – патрубок для вивантаження гранул;  
 4 – корпус апарата; 5 – патрубок для відводу відпрацьованого теплоносія;  
 6 – механічна форсунка; 7 – газорозподільна решітка;  
 8 – патрубок для введення теплоносія

3. Застосування секціонування (вертикального та горизонтального) для створення різних умов руху частинок за висотою (довжиною) пристрою. З метою зменшення матеріальних та енергетичних витрат при проведенні грануляційних процесів у зваженому шарі є використання багатоступінчастого протиточного контакту зріджувального агента та дисперсної фази. Тому для усунення зазначених вище недоліків процес покриття гранул органічною оболонкою пропонується проводити в багатоступінчастому поличковому апараті зваженого шару[43].

Гранулятори киплячого шару мають певні недоліки: рознесення у часі перебування гранул у зваженому шарі, необхідність очищення запиленого

газового потоку та винос матеріалу разом із крапельками суспензії. Також істотним недоліком є повернення дрібних фракцій у якості ретура в обмежену зону псевдозрідженого шару. В результаті різного часу перебування великих і дрібних частинок відбувається нерівномірне покриття поверхні суспензією. Продукт виходить неоднорідним за гранулометричним складом, що погіршує його якість.

Для апаратів киплячого шару, вихрового чи завислого є такий суттєвий недолік як утворення відпрацьованих газів, які являють собою суміш сушильного агенту та пилу. Для очищення даної суміші треба використовувати громіздкі багатоступеневі очисні споруди, що не є економічно рентабельно. Тому даний спосіб не можна рекомендувати для гранулювання для реалізації задач, поставлених у даній дослідницькій роботі.

1.1.3.4 Аналіз процесу гранулювання обкочуванням із одночасним диспергуванням пульпи на поверхню гранул.

Процес гранулювання методом обкочування складається із наступних технологічних стадій:

- 1) змішування початкового порошку із частинками ретура та в'язучою речовиною;
- 2) отримання гранул із дрібних частинок та подрібнення грудок;
- 3) обкочування та ущільнення гранул у результаті їх переміщення по поверхні апарата;
- 4) зміцнення зв'язку за результатами переходу рідинної фази у тверду, тобто стабілізація структури гранули.

На вказаних стадіях відбувається зміна гранулометричного складу шару частинок. Інтенсивність процесу гранулоутворення залежить як від режимних параметрів процесу, так і від апаратного його оформлення.

На стадії змішування та отримання гранул у якості в'язучої речовини можна використовувати різні речовини. Основною вимогою до в'язучого є його здатність до зчеплення частинок між собою. Частинки ретури та порошку

мають різну структуру, тому вони будуть по різному змочуватися в'язучою речовиною.

Процес утворення зародку та формування гранули при зрошенні шару рідкою суспензією проходить наступним чином. Крапля рідини, яка потрапила у шар матеріалу, під дією капілярних сил розповсюджується в різні боки шару, заповнюючи пори між окремими частинками. Максимальний розмір грудок, які утворюються при цьому, прямо пропорційний величині краплі та обернено пропорційний пористості шару матеріалу. Рідина перестає розповсюджуватися у шарі матеріалу тоді, коли грудки досягають максимальної величини капілярної вологоємності. Цей процес проходить достатньо швидко, в межах декількох секунд. Процес зволоження ретури проходить значно повільніше. Цей час для ретури на порядок вище, чим для порошку. Тобто час зволоження шару матеріалу буде визначатися часом зволоження ретури.

При зволоженні одночасно проходить і ущільнення порошку під дією капілярних сил. Чим дрібніші частинки та більше поверхневий натяг рідини, тим більш ущільнений агломерат отримуємо при змішуванні.

На стадії обкочування ущільнення частинок досягається при ударі об нерухомий шар матеріалу чи об стінку гранулятора. В цей час більша частина кінетичної енергії, яку отримує грудка при скочуванні вниз, витрачається на переміщення частинок та ущільнення утвореної гранули. Величина кінетичної енергії визначається насамперед швидкістю скочування та масою грудки. Тому існує мінімальний розмір вологої грудки, при якому ця грудка набуває достатньої кінетичної енергії в час її скочування вниз. Грудки у результаті багатократних скочувань та ударів ущільнюються, а окремі частинки при цьому укладаються більш щільно. При цьому надлишкова волога вичавлюється на поверхню грудки, у результаті чого стає можливим подальше приєднання до такої грудки сухих дрібних частинок. По мірі приближення частинок одна до одної на поверхні грудки, товщина плівки рідини стає все менше і міцність зчеплення збільшується. Таким чином формується гранула. Далі проходить процес ущільнення структури гранули під дією великої кількості ударів у різних напрямках.

Стадія стабілізації структури гранули характеризується тим, що зв'язки між частинками обумовлені силами поверхневого натягу і вони забезпечують достатню пластичність матеріалу та дозволяють формувати гранулу без її руйнування. Для отримання якісної гранули треба зміцнити зв'язки, що досягається видаленням рідкої фази сушінням, тобто перетворенням її у тверду фазу. При видаленні вологи у процесі сушіння одночасно проходить кристалізація твердої фази. Таким чином, завершальна стадія гранулоутворення при обкочуванні супроводжується тепло- і масообмінними процесами, які і приводять до стабілізації структури гранул.

Гранулятори, у яких здійснюється обкочування частинок матеріалу, за типом руху матеріального потоку поділяються на барабанні, тарілчасті, стрічкові, лопатні, відцентрові та вібраційні. Найбільш поширеними у промисловості є барабанні та тарілчасті. В даних апаратах гранулювання обкочуванням здійснюється за рахунок контакту із рідкою складовою, яка вноситься чи разом із твердими частинками чи подається окремо у вигляді розчинів або плавів [62, 63, 64, 65].

Барабанний гранулятор (рис. 1.7) представляє собою горизонтальний чи нахилений під кутом 1–3 градуси у напрямку вивантаження барабан із закріпленими на ньому бандажами та вінцевою шестерною, через яку передається обертаючий момент від приводу.

Для того, щоб матеріал піднімався на певну висоту та для кращого контакту гранул із газовим потоком, застосовують спеціальні пристрої – насадки. Вони представляють собою шнекові лопаті чи різноманітні полиці, які прикріплюються до внутрішньої поверхні барабану та унеможливають скочування частинок по внутрішній поверхні барабану. Використовування таких пристроїв не впливає на інтенсифікацію теплообмінних процесів у апараті.

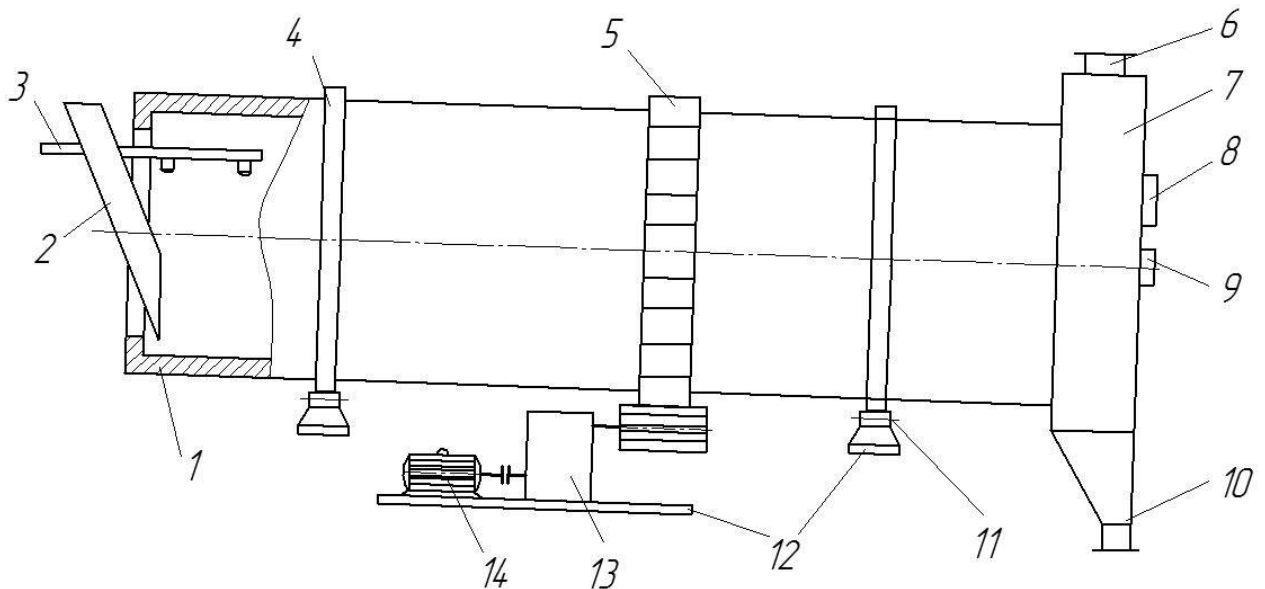


Рисунок 1.7 – Схема барабанного гранулятора [53]:

- 1 – обичайка; 2 – патрубок для завантаження порошку;  
 3 – розподільник зв'язуючого; 4 – бандаж; 5 – вінцева шестерня;  
 6 – патрубок для відсмоктування парів; 7 – камера для вивантаження;  
 8 – вікно для підсвічування; 9 – оглядове вікно;  
 10 – патрубок для вивантаження гранул; 11 – опорний ролик;  
 12 – бетонні основи; 13 – редуктор; 14 – електромотор

Барабанні гранулятори експлуатаційно надійні у роботі. Але треба приділяти увагу ступенні зволоження частинок матеріалу: у незначно зволоженої рідинною фазою суміші не будуть створюватися умови для отримання гранул, а якщо навпаки – утворюються агломерати, внаслідок чого зменшується ефект перемішування, що зменшує ефективність процесу та продуктивність гранулятора.

Барабанні гранулятори мають такі недоліки, як нерегульованість процесу, а це визиває труднощі візуального контролю за ходом гранулювання. Також для барабанних грануляторів характерна неможливість автоматизованого контролю параметрів і управління процесом, при цьому треба враховувати технологічні, конструктивні та режимні умови. При збільшенні питомого навантаження зменшується ефективність роботи гранулятора, за рахунок зменшення вільного перетину апарату. Також у барабанному грануляторі

отримуємо достатньо полідисперсний склад готової суміші гранул, що потребує додаткової технологічної обробки. Також барабанний гранулятор має значну металоємність.

Для здійснення метода обкочування використовують тарілчасті гранулятори (ще їх називають чашковими чи дисковими). Основною частиною даного гранулятора (рис. 1.8) є обертаючий диск із бортом, що забезпечує необхідне заповнення тарілки шаром матеріалу. Для подачі в'язучого над тарілкою встановлюється форсунка.

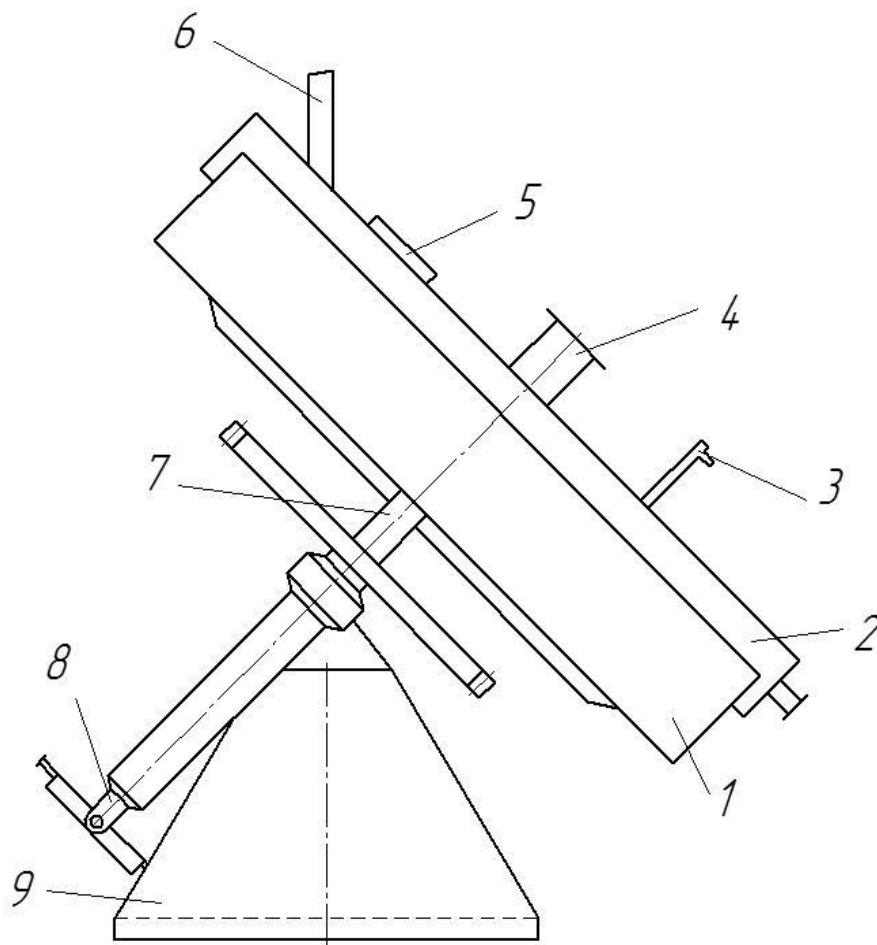


Рисунок 1.8 – Схема тарілчастого гранулятора [53]:

- 1 – обертова тарілка; 2 – герметизуючий кожух; 3 – форсунка для подачі рідини; 4 – патрубок для відсмоктування парів; 5 – оглядове вікно; 6 – патрубок для подачі порошку; 7 – вал; 8 – механізм для зміни кута нахилу тарілки; 9 – рама

Тарілчастий гранулятор має той же принцип роботи, що і барабанний. Тарілчастий гранулятор забезпечує достатню продуктивність, коли частинки піднімаються до верхньої точки траєкторії. При цьому максимально повно використовується поверхня тарілки. На продуктивність тарілчастого гранулятора впливають такі режимні та конструктивні параметри: питома навантаження по ре туру, питома навантаження по суспензії, діаметр тарілки, кутова швидкість обертання тарілки, кут нахилу тарілки відносно горизонту, висота борту тарілки. Кут нахилу тарілки і її кутова швидкість забезпечують оптимальні умови роботи гранулятора. При порушенні цих умов не будуть забезпечені максимальна продуктивність тарілчастого гранулятора [66, 67, 68].

Тарілчасті гранулятори є такими ж продуктивними апаратами, як і барабанні. Але тарілчасті гранулятори мають і певні переваги, що дозволяє їм скласти певну конкуренцію барабанним. Тарілчасті гранулятори є більш економічні, мають набагато менші габаритні розміри, вимагають менших капітальних вкладень та експлуатаційних витрат. Гранули отримані у тарілчастих грануляторах є більш монодисперсними по своєму складу, щільність та міцність таких гранул більша в 1,5 рази, порівняно з гранулами, які отримані у барабанних грануляторах [31].

Недоліками тарілчастих грануляторів є достатньо вузькі межі робочих режимів, оскільки на процес гранулювання у таких апаратів впливає вміст рідини в матеріалі і невеликий час перебування частинок матеріалу в робочому об'ємі апарата [28, 29].

У тарілчастому грануляторі можна отримати гранулидостатньої міцності, значення якої відповідає технологічним нормам використання [69]. Тарілчасті гранулятори звичайно простіша конструкцією та економічніші, ніж барабанні гранулятори. Для тарілчастих грануляторів характерною особливістю є найкращий ефект класифікації, тобто сепарація гранул за розміром [70].

Таким чином, тарілчастий гранулятор є найбільш раціональною конструкцією для отримання гранул органо-мінеральних добрив.

## **1.2 Конструкція інерційного фільтру для рідких компонентів органічно-мінеральних добрив з низьким вмістом домішок**

### **1.2.1 Сучасні конструкції інерційних фільтрів для рідких компонентів**

Інерційні фільтри використовують різні методи для створення інерційних сил, які можуть відокремлювати та очищати речовину від домішок. Це може бути досягнуто за допомогою різних варіацій їх конструкції, наприклад, наявності обертових дисків, відцентрових сил, використання гравітації тощо.

Для фільтрації речовин автори [71] пропонують конструкцію гідродинамічного фільтра (рис. 1.9), що складається з циліндричного корпусу з патрубками для входу та виходу рідини, порожнини очищеної рідини, які з'єднані з патрубками виходу рідини. Також передбачено бункер для збирання забруднень, зливний патрубок, фільтруючі елементи. Використовуваний привідний двигун відрізняється тим, що має внутрішній порожнистий циліндр, закріплений на валу привідного двигуна, а фільтруючі елементи виконані у вигляді циліндричних сегментів із пористого пластинчатого матеріалу, який розділяє порожнини забрудненої та очищеної рідини. Циліндричні сегменти ексцентрично зміщені відносно внутрішнього порожнистого циліндра, що забезпечує надходження рідини у фільтр без його безпосереднього занурення в рідину.

Основним недоліком даного гідродинамічного фільтра є складність конструкції – внутрішній циліндр і циліндричні сегменти з пористого пластинчатого матеріалу створюють складну конструкцію фільтра, що вимагає додаткового обслуговування та регулярного очищення. Це може призвести до збільшення витрат на обслуговування та зменшення ефективності самої фільтрації. Також гідродинамічний фільтр використовує знижений тиск у вхідній порожнині для надходження рідини, що спричиняє значних втрат тиску. Внаслідок ексцентричного розміщення циліндричних сегментів та їх контакту з рідиною, може виникати зношення та втрати міцності матеріалу внаслідок обтікання рідиною.



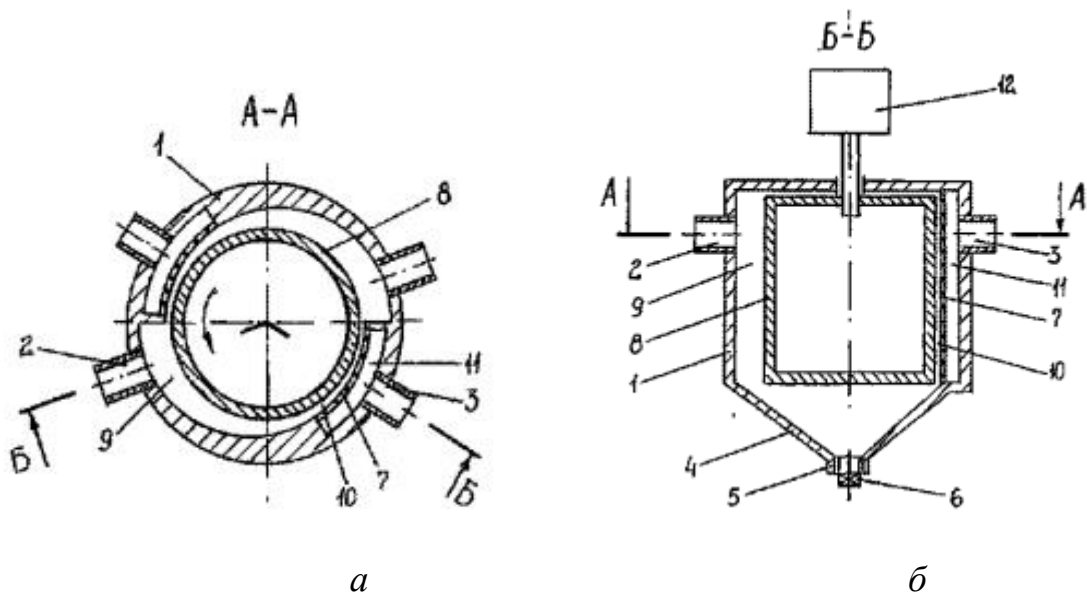


Рисунок 1.9 – Поперечний (а) та поздовжній (б) перерізи  
гідродинамічного фільтру

Існує рідинний фільтр [72], який очищається протитоком відфільтрованої рідини, що містить пакет розділених на сектори дискових фільтруючих елементів із загальним центральним колодязем і радіальними каналами, які поєднані в порожнини секторів. У колодязі розташовано поворотний розподільник з принаймні одним зовнішнім поздовжнім пазом, який взаємодіє із зазначеними радіальними каналами і внутрішнім каналом, що закінчується на вихідному торці розподільника і сполучений із зовнішнім поздовжнім пазом, розташованим вздовж нього 10 отворами. Недоліками відомого фільтра для рідини, що очищається протитоком відфільтрованої рідини, є складність конструкції, потреба в обслуговуючому персоналі та великі експлуатаційні витрати.

Фільтр для очищення рідини (рис. 1.10), що містить корпус 1, в якому встановлено пакет фільтруючих елементів 2, що розділені на сектори і мають центральний отвір 3. Корпус 1 містить вхідну трубу 6, відхідну трубу 7, зливну трубу 8 і з'єднаний із системою контролю тиску 9 та відвідником повітря 21. У центральному отворі 3 пакета фільтруючих елементів 2 розташовано порожнистий вал 4 з дренажними отворами 5 з'єднаними з пакетом фільтруючих елементів 2, порожнистий вал 4 з дренажними отворами 5 з'єднано

з відхідною трубою 7. Вхідний трубопровід 10 з'єднаний з вхідною трубою 6. Відхідний трубопровід 11 з'єднаний з відхідною трубою 7. Трубопровід подачі наливної суспензії 12 з'єднаний з корпусом 1.

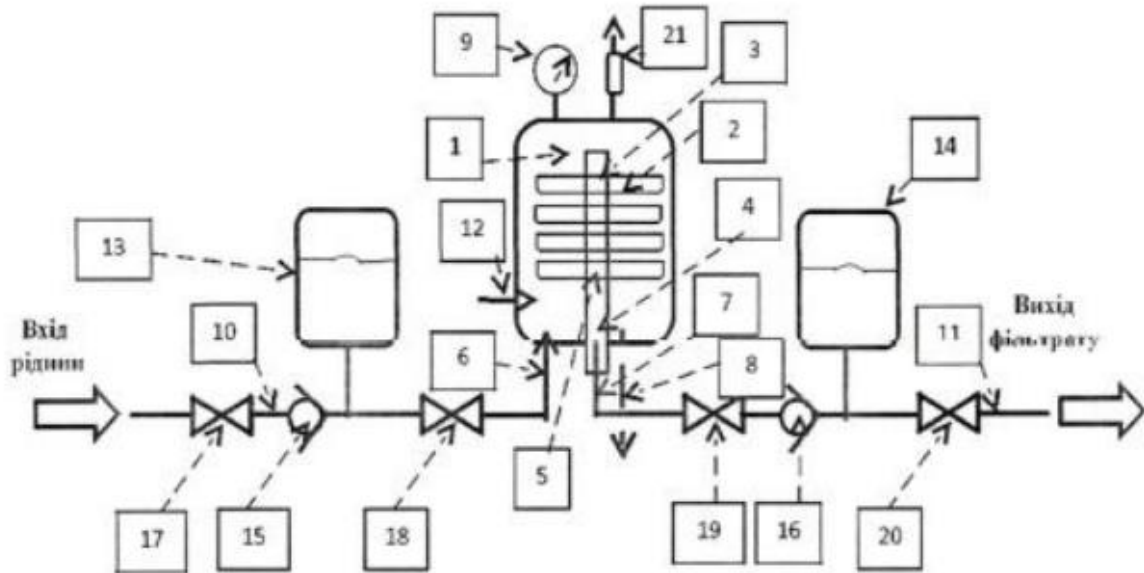


Рисунок 1.10 – Переріз фільтра для очищення рідини (виконання 1)

У вхідному трубопроводі 10 та відхідному трубопроводі 11, розташовані гідроаккумулятори 13, 14, зворотні клапани 15, 16, крани 17, 18, 19, 20. Зливна труба 8, вхідний трубопровід 10, відхідний трубопровід 11.

Принцип роботи такого фільтра полягає у наступному. Вода, яка містить наливну суспензію, поступає в корпус 1 через трубопровід подачі наливної суспензії 12, утворюючи наливний шар на пакеті фільтруючих елементів 2. Фільтруючі елементи розділені на сектори з центральним отвором 3. Починається робочий цикл фільтра для очищення рідини, яка надходить через вхідний трубопровід 10 при відкритих кранах 17, 18, зворотному клапані 15 і наповнює гідроаккумулятор 13 через кран 18 та вхідну трубу 6. Вода також надходить у корпус 1 через порожнистий вал 4 з дренажними отворами 5. Відхідна труба 7 та гідроаккумулятор 14 наповнюються через відкритий кран 19 та зворотний клапан 16.

Під час наповнення корпусу 1 водою повітря виводиться через відвідник повітря 21, а тиск у корпусі 1 контролюється системою контролю тиску 9. Після



відвідником повітря 19. У центральному отворі 3 пакета фільтруючих елементів 2 розташований порожнистий вал 4 із дренажними отворами 5, які з'єднані з пакетом фільтруючих елементів 2. Порожнистий вал 4 із дренажними отворами 5 також з'єднаний із відхідною трубою 7. Вхідний трубопровід 10 з'єднаний із вхідною трубою 6, а відхідний трубопровід 11 – із відхідною трубою 7. Трубопровід подачі наливної суспензії 12 з'єднаний із корпусом 1. У вхідному трубопроводі 10 та відхідному трубопроводі 11 розташовані гідроакумулятори 13, 14, зворотні клапани 15, 16, та крани 17, 18. Зливна труба 8, вхідний трубопровід 10, та відхідний трубопровід 11 можуть бути з'єднані з відповідним обладнанням, таким як насоси 22 чи наливні ємності 23, які можуть бути використані як знімне обладнання.

Недоліками конструкцій, представлених на рис. 1.10 та 1.11, передусім є складність (велика кількість компонентів) та габаритність, що, у свою чергу, може додати проблеми з монтажем, ремонтом та обслуговуванням фільтру.

Фільтр для очищення рідкого середовища [73] має підтримуючий каркас із фільтраційним матеріалом, утворюючи твердий фільтруючий елемент, який встановлюють у корпус фільтру. У цьому фільтрі вдало вирішено проблему точного позиціонування фільтруючого матеріалу у фільтровому корпусі, незалежно від обраного типу фільтруючого матеріалу (наприклад, папір, сітка та інше). Однак виявлено, що цей фільтр не може досягти високої якості очищення рідини від механічних домішок різного розміру, оскільки він не забезпечує можливості промивки фільтруючого елемента і, таким чином, не уникне забивання фільтраційного матеріалу, що вимагає його регулярної (частої) заміни.

Фільтр для очищення рідини або газу [74] складається з корпусу із дном, штуцера для введення робочого середовища, герметичної кришки, вихідного штуцера та коаксіальних фільтруючих елементів, розташованих у корпусі з певним зазором між ними та циліндричною стінкою корпусу (рис. 1.12). Вихідний штуцер розташований на кришці та має спільну вісь із фільтруючими елементами, які забезпечені фланцевими ділянками лише зверху. Фланцеві ділянки фільтруючих елементів можуть бути встановлені між кришкою та



На дні або на нижній циліндричній частині корпусу розташований дренажний штуцер. Недоліки даної розробки включають складність конструкції, великі габарити, високі витрати на обслуговування та споживану потужність.

Фільтр для очищення рідини [75] включає корпус, в якому встановлено пакет дискових фільтруючих елементів, розділених на сектори і з центральним отвором (рис. 1.13). До корпусу також додано наливну ємність, вхідну трубу, відхідну трубу, зливну трубу, порожнистий вал із дренажними отворами, принаймні два дозатори абсорбційних матеріалів, принаймні два датчики тиску з аналогово-цифровим сигналом, принаймні два датчики рівня рідини, принаймні вісім елементів електро привідної запірної арматури, принаймні один насос, принаймні одну шафу автоматичного керування режимами роботи та контролю технологічного процесу фільтрації, і принаймні одну систему контролю тиску. У конструкції також враховано присутність принаймні п'ятьох перехідних труб.

Зазначений фільтр відзначається широким спектром компонентів і функціональності, які включають елементи для наливання, дозатори матеріалів, різноманітні датчики, електро привідну запірну арматуру, насос, шафу автоматичного керування і систему контролю тиску. До недоліків традиційно слід віднести складність конструкції, високі витрати та складнощі обслуговування. Також до недоліків відноситься збільшена кількість датчиків та елементів керування, що може робити фільтр більш вразливим на різні види збоїв і вимагати постійного моніторингу та обслуговування.

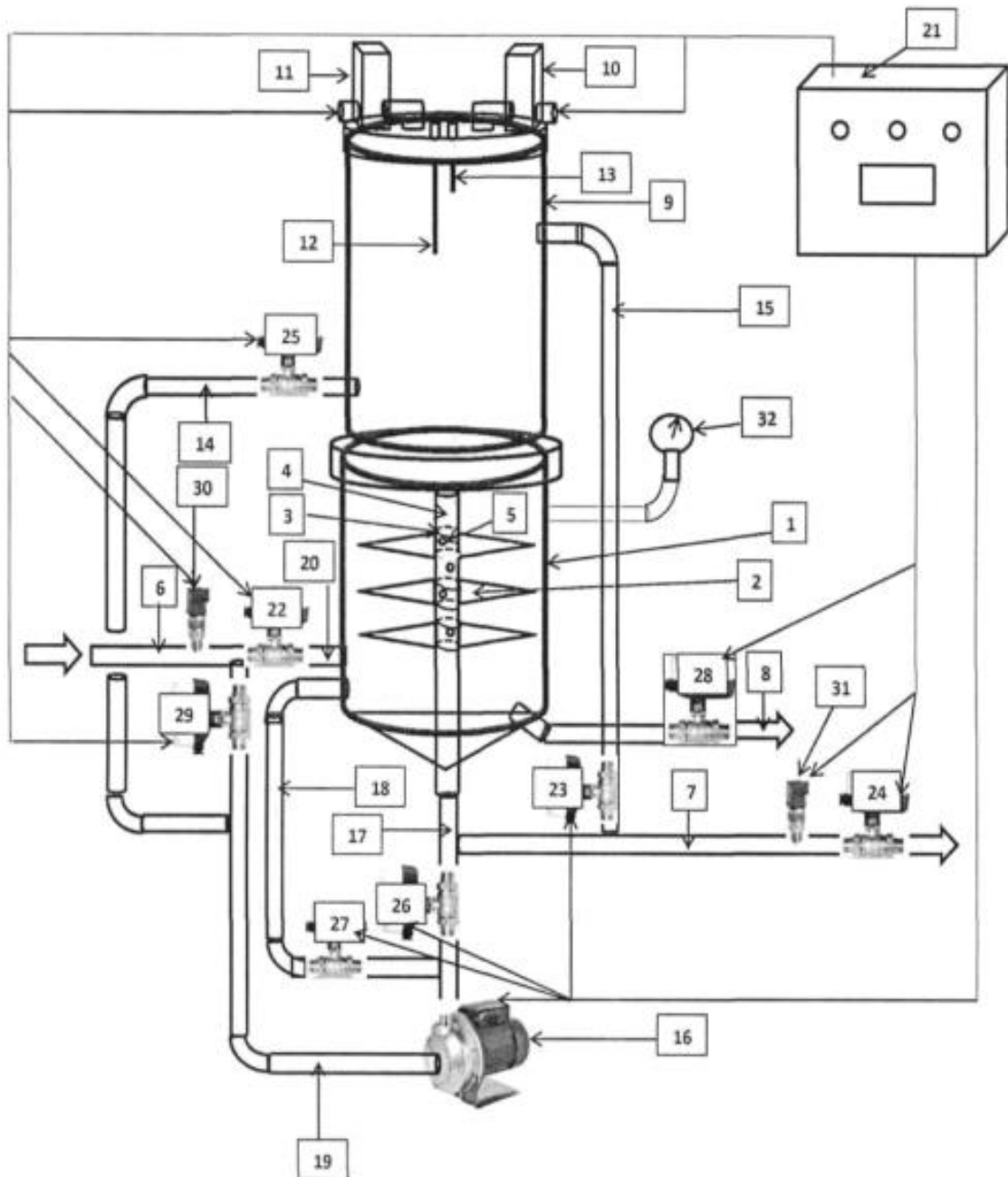


Рисунок 1.13 – Фільтр для очищення рідини

Дисковий фільтр для наливної фільтрації суспензій [76], в контейнері якого розміщені пластинчасті фільтроелементи, вертикально зібрані в фільтропакет, при цьому кожен фільтроелемент має втулку, орієнтовану за допомогою валу, що проходить всередині фільтропакета, в кожній втулці виконано паралельно осі втулки підвідний канал для підведення неочищеної рідини і кілька впускних каналів з переважно радіальною орієнтацією, рівномірно розподілених по колу втулки і спрямованих до периферії, причому

впускні канали беруть неочищену рідину з підвідного каналу і виводять її в розподільну кільцеву порожнину, з якої неочищена рідина проходить в приблизно радіальному напрямку через вихідну щілину, розташовану вище рівня впускних каналів в порожнину між суміжними фільтроелементами. Недоліками відомого дискового фільтра для наливної фільтрації суспензій є потреба в обслуговуючому персоналі та великі експлуатаційні витрати.

Відомий фільтр для очищення рідини [77] містить у корпусі фільтруючий елемент, який складений із декількох гофрованих секцій, які, у свою чергу, з'єднані у центрі центральною вставкою зі смоли, а по периметру – опорною частиною зі смоли. Усі з'єднувальні елементи (вставки та опорні частини) об'єднані в одне ціле. Недоліком відомого фільтра є часта засміченість фільтруючого елемента, що потребує заміну гофрованих секцій та ремонт вставок зі смоли.

Відомий також пристрій для очищення рідини [78], що включає циліндричний корпус, днище і кришку, трубку дошку, на якій вертикально розташовані фільтрувальні елементи у вигляді перфорованих трубок, трубопровід для подачі забрудненої води (вхідний патрубок), трубопровід для відводу очищеної води (вихідний патрубок). У корпусі розміщений фільтруючий матеріал у вигляді суцільного об'єму фільтруючого завантаження мікропорошку, в який вертикально встановлені фільтрувальні елементи у вигляді перфорованих трубок з покриттям у вигляді полімерної сітки. Фільтрувальні елементи і вертикальні перфоровані відвідні трубки попарно суміжні між собою і рівномірно розміщені на відстані фільтруючого шару. Над верхнім шаром мікропорошку встановлений патрубок для подачі суміші води та повітря для розмиву мікропорошку в режимі регенерації (патрубок для промивання). У верхній частині корпусу встановлена кільцева камера з патрубком для видалення зважених домішок, яка сполучається з внутрішнім об'ємом циліндричного корпусу через вікна, які затягнуті полімерною сіткою.

Недолік цього винаходу полягає в тому, що використовується мікропорошок, який засмічує пристрій при регенерації, при цьому до кінця промити його всередині пристрою неможливо, а полімерна сітка буде постійно



забиватися, що обмежує періодичність роботи пристрою. Крім цього, пристрій має високу питому металоємність та низьку пропускну здатність, а використання способу не може забезпечити гарантоване очищення від дрібнодисперсних фракцій від 1,0 до 10 мкм. Виходячи з вищесказаного, винахід є витратним, ненадійним і має маленький термін експлуатації.

Пристрій для здійснення способу очищення рідин від механічних домішок складається з верхньої і нижньої частин (рис. 1.14).

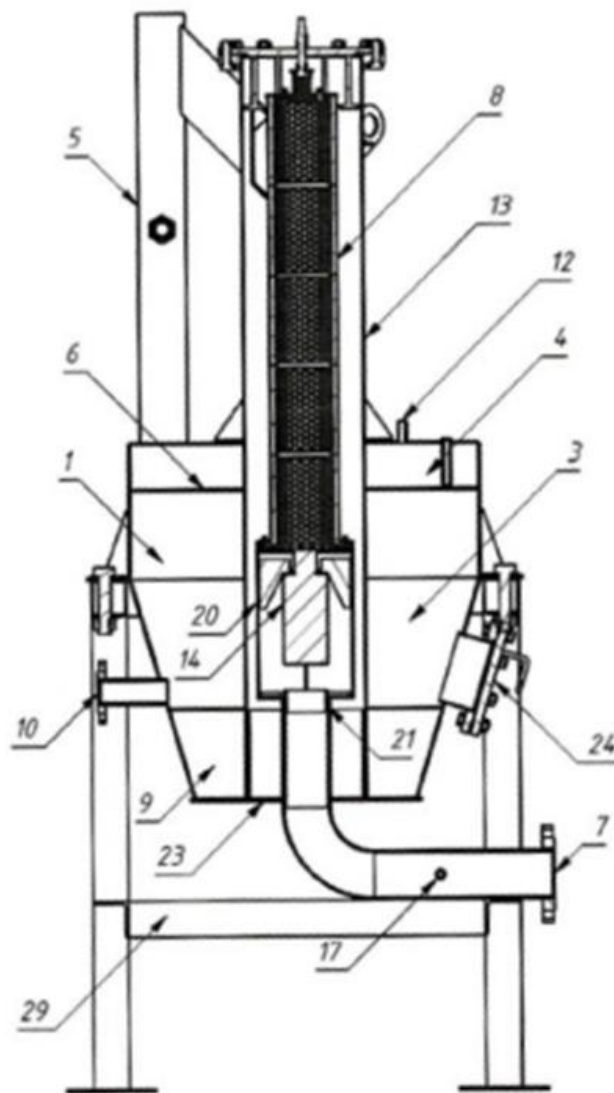


Рисунок 1.14 – Загальний вигляд пристрою для очищення рідин від механічних домішок

Нижня частина корпусу має циліндричну порожнину з тангенціальним вхідним патрубком для вводу рідини і конічну порожнину. Верхня частина цієї

порожнини з'єднана з подавальною трубою, через яку рідина потрапляє в перфоровану перегородку для подальшої обробки. Очищена рідина виходить через вихідний патрубок.

У верхній частині корпусу, яка має циліндричну форму, розташований фільтропакет, який містить в собі вібратор для підтримання порової структури фільтру. Патрубок для промивання використовується для подачі регенераційної пари для періодичного промивання фільтруючих елементів. Пристрій також включає оглядові вікна для контролю руху рідини, а також штуцер для промивання порової структури фільтроелементів.

Фільтропакет складається з фільтруючих елементів, зібраних на перфорованому каркасі. Нижня частина фільтропакета пов'язана з розширювальною камерою, де жорстко закріплений вібратор. Ця камера забезпечує також видалення вловлених домішок, а патрубок для промивання використовується для подачі пари регенерації для промивки порової структури фільтроелементів. Верхня частина корпусу впирається в конічну порожнину нижньої частини корпусу, де розташовані прорізи для виходу вловлених дрібнодисперсних часток. Крім того, у конструкції передбачено регулювання перерізу вхідного патрубка, а також можливість візуального спостереження через оглядові вікна та промивання фільтроелементів.

Система складається з багатьох деталей, таких як фільтропакет, ультразвукові випромінювачі, перфорована перегородка, патрубки та ін. Це ускладнює процес виготовлення, обслуговування та ремонт пристрою.

Ефективність системи є залежною від правильного функціонування ультразвукових випромінювачів, вони, у свою чергу, вимагають додаткового обслуговування та підтримки. Також розроблена система очищення від механічних домішок не ефективно працює з хімічними забрудненнями та бактеріями.

Відомий самоочисний фільтр для відділення рідин від зависей[9], який містить кожух, в середині якого розташовані дві фільтруючі перегородки, утворюючі взаємно паралельні секції для забрудненої рідини, і одна секція профільованого продукту. Недоліком винаходу є те що конструкція

фільтруючих перегородок має малу фільтруючу поверхню по відношенню до об'єму, в якому вони розташовані, у це не дозволяє забезпечити достатню продуктивність фільтра.

Відомий фільтр зіворотньою промивкою [79], який містить зовнішній кожух, який охоплює робочий барабан. У цьому фільтрі досягнуто збільшення фільтруючої поверхні, але в незначній мірі, оскільки циліндрична поверхня не є найбільш розвиненню фільтруючою поверхнею відносно зайнятого нею об'єму, що не дозволяє досягнути значної продуктивності фільтра.

Фільтр зіворотньою промивкою також може мати ще одне виконання. Корпус розділений сіткою на дві камери (забруднену та чисту). В чистій камері розташовані по колу фільтруючі сегменти, які з'єднані крізь торцові входні отвори у розподілюючих стінках із забрудненою камерою та пристроєм зворотньої промивки. Недолік фільтра у тому, що загальна сегментна поверхня фільтруючих елементів хоча і більша за попередній, але не достатня для досягнення максимально можливої продуктивності фільтра. Окрім цього, наявність такої поверхні знижує загальну продуктивність фільтра, і пояснюється це тим, що коефіцієнт використання збільшеної фільтруючої поверхні є недостатнім. Також виконання сегментної фільтруючої поверхні достатньо трудомістке.

Самоочисний фільтр [80], який містить циліндричний вертикальний корпус з донною та верхньою кришками, як мінімум однією перегородкою, утворюючи камери забрудненої рідини та фільтрату (рис. 1.15). Також у конструкцію включені патрубки для підведення забрудненої рідини, відведення фільтрату, зливу забруднень та оглядовий люк. Установлений у корпусі фільтруючий елемент і пристрій зворотньої промивки, вихід з якого через запірний орган сполучений з атмосферою. Фільтруючий елемент виконаний у вигляді двох концентрично установлених циліндрів, утворюючих разом з двома торцевими стінками кільцеву порожнину, по висоті якої радіально та по колу розташовані непарні та парні плоскі перегородки, які утворюють по колу додаткові камери забрудненої рідини і фільтрату.

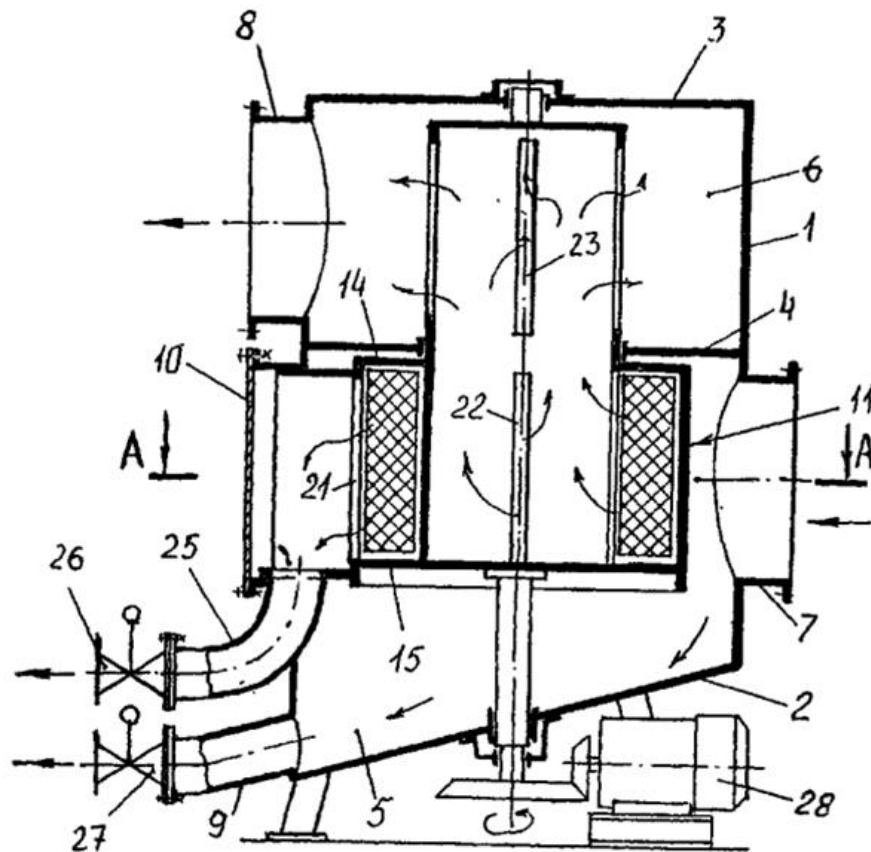


Рисунок 1.15 – Вертикальний розріз самоочисного фільтра

Недоліки цієї розробки включають складність конструкції, високу вартість, залежність від запірного органу, обмеженість щодо видів забруднень, потребу в постійному джерелі живлення та специфічність застосування. Перед використанням такого пристрою варто ретельно розглянути його придатність до конкретних потреб та умов.

Відомий фільтр[81], що містить корпус з патрубком для підведення суспензії, кришку зі штуцером для підведення стиснутого повітря та перепускним клапаном, фільтрувальну перегородку з дренажною решіткою, віджимну діафрагму, що закріплена між фільтрувальною перегородкою та кришкою, пружину і основу з патрубком для відведення освітленої рідини (рис. 1.16). Фільтрувальна перегородка з дренажною решіткою з'єднана з корпусом за допомогою основи і розташована під кутом, більшим, ніж кут тертя суспензії об фільтрувальну перегородку, над якою встановлено поршень.

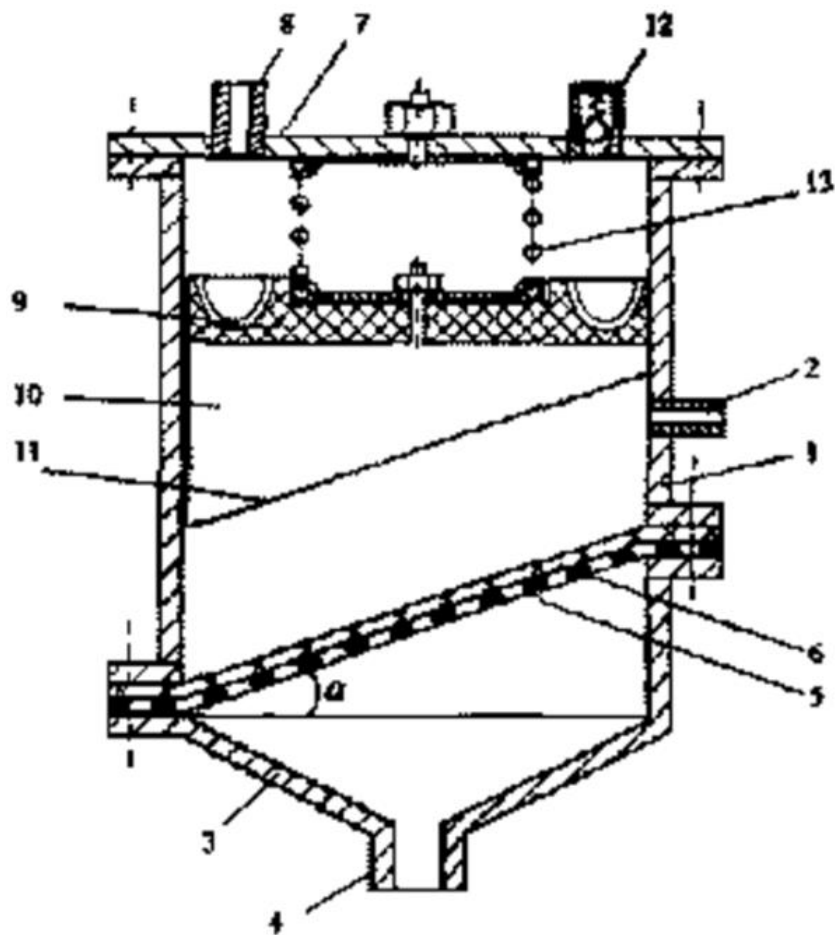


Рисунок 1.16 – Вертикальний розріз фільтра

Розроблена система має складну конструкцію з багатьма деталями, включаючи фільтрувальну перегородку, віджимну діафрагму, поршень та пружину. Оскільки фільтрувальна перегородка розташована під кутом до напрямку руху суспензії, це може створити проблеми зі стабільністю та працездатністю системи. Існує ризик затору або блокування фільтрувальної перегородки. Робота пристрою значною мірою залежить від пружини, яка може вимагати постійного обслуговування та регулювання, щоб забезпечити працездатність. Також слід зазначити, що система для свого функціонування потребує стиснутого повітря, що може бути незручним у випадку відсутності доступу до джерела стиснутого повітря.

Фільтр [82], що містить корпус з патрубком для підводу суспензії, кришку, зі штуцером для підводу стиснутого повітря та перепускним клапаном, фільтрувальну перегородку з дренажною решіткою, віджимну діафрагму, що

закріплена поміж фільтрувальною перегородкою та кришкою, пружину і основу з патрубком для відводу освітленої рідини (рис. 1.17)

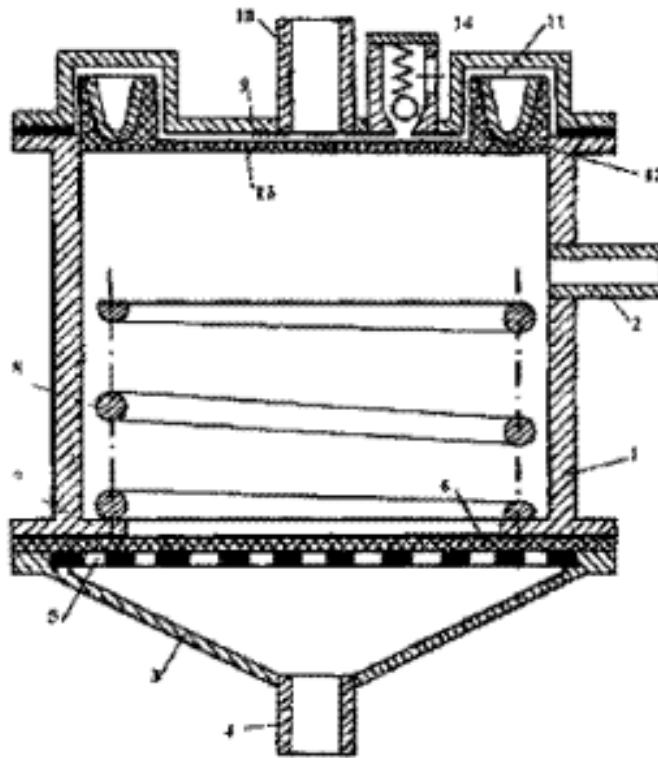


Рисунок 1.17 – Фільтр для фільтрування водних суспензій

Недоліком розробки є низька швидкість фільтрування через можливість закупорювання пор фільтрувальної перегородки твердими частинками суспензій, особливо при великому їх вмісті та підвищеному шару осаду.

1.2.2 Конструкція інерційного фільтру для рідких компонентів органо-мінеральних добрив з низьким вмістом домішок

1.2.2.1 Аналіз конструкцій інерційних фільтрів (центрифуг)

Підвісні центрифуги набули популярності завдяки своїй високій динамічній стабільності, що призвело до розширення сфери застосування центрифугування. Для зменшення висоти центрифуги при збереженні стабільності були розроблені моделі, підвішені на трьох (рідше чотирьох) опорах.

Серед різних типів центрифуг, що використовувалися протягом останнього століття, особливого поширення набули підвісні і триколонкові центрифуги. Обидва типи центрифуг нечутливі до нерівномірного розподілу матеріалу в роторі. Підвісні центрифуги зручні для нижнього розвантаження в таких галузях промисловості, як хімічна і цукрова. Триколонковим центрифугам спочатку надавали перевагу для верхнього розвантаження, яке найчастіше використовується при центрифугуванні твердих матеріалів[83].

Ручні розвантажувальні центрифуги бувають з перфорованими і суцільними роторами. Перфоровані ротори використовуються для відділення рідкої фази від кускових, волокнистих і різних за розміром матеріалів. Вони також використовуються для промивання осаду, коли потрібен осад з мінімальним вмістом рідкої фази. При відділенні рідини від грубозернистих матеріалів зазвичай досягається кінцевий вміст вологи менше 1%. Для середньозернистих матеріалів це значення зазвичай становить 1–5%, а для дрібнозернистих – 5–40% [84].

Центрифуги з перфорованими роторами і ручним вивантаженням ефективні для вилучення олії з маслянистої вугільної тріски. Щоб зробити тріску водостійкою, буровугільні брикети просочують нафтою. Процес займає 7–10 хв. і знижує вміст нафти у вугіллі до 7–12%.

Центрифуги з твердими роторами використовуються для видалення з осаду суспензій, які важко фільтруються, але в осаді може залишатися до 70% або більше рідкої фази. [85] Це машини періодичної дії, які потребують ручного вивантаження. Процес центрифугування зазвичай включає наступні етапи: спочатку ротор центрифуги заповнюється матеріалом, що підлягає обробці, до або під час обертання на частковій або повній швидкості.

Якщо ротор навантажується, коли він нерухомий або обертається з низькою швидкістю, швидкість ротора поступово збільшується до максимального значення в кінці навантаження. Під час процесу центрифугування відцентрові сили змушують тверді частинки осідати, в той час як рідка фаза відокремлюється і виводиться через отвори в роторі.

Після завершення процесу центрифугування ротор зупиняється і осад вивантажується вручну. Тверда фаза залишається з мінімальною кількістю рідини, відокремленої в перфорованих роторах. Рідина, що залишилася, утримується на поверхні частинок твердої фази і в місцях їх взаємодії. Якщо залишкову рідину необхідно видалити, осад промивають іншою рідиною, іноді декількома. Промивна рідина видаляється під дією відцентрових сил, залишаючи мінімальний вміст [86].

Центрифуга з ручним вивантаженням розділяє рідку і тверду фази суміші. Після завершення центрифугування продукт знімається з ротора вручну або за допомогою механічного скребка.

Якщо центрифугування відбувається в суцільному роторі, суспензія вводиться в нижню частину ротора в центрифугу з повним ходом. Рідина тече вгору вздовж стінок ротора і переливається через край, в той час як осад осідає на стінках. Як тільки об'єм ротора майже повністю заповнюється осадом, подачу суспензії в центрифугу припиняють. Якщо необхідне подальше згущення осаду, ротор продовжує обертатися протягом певного періоду, проштовхуючи рідку фазу всередину ротора. Потім рідина видаляється через розвантажувальну трубку.

Після видалення рідини шлам вивантажується з ротора. Це можна зробити двома способами. Центрифуга може вивантажувати осад вручну або за допомогою механічного скребка, який рухається вздовж стінок ротора при його повільному обертанні. Продуктивність центрифуги з ручним розвантаженням залежить від потужності ротора і загальної тривалості циклу. Цикл роботи центрифуги включає непродуктивні операції гальмування і запуску, які витрачають енергію. У деяких випадках осад після центрифугування можна промити для видалення маточного розчину або розчинити і відновити частину осаду, що складається з декількох компонентів.

Ротор центрифуги з ручним розвантажувальним фільтром має циліндричну форму і складається з перфорованої оболонки, днища і верхнього бічного кільця. Днище зазвичай складається з двох частин: литої втулки для кріплення ротора на валу і самого днища, яке може мати розвантажувальні



вікна або спиці. Сучасні ротори центрифуг, як правило, виготовляються з листової сталі, включаючи верхню і нижню частини. Окремі елементи ротора з'єднані між собою електрозварюванням. Таке рішення гарантує міцність і надійність конструкції, а також знижує трудомісткість виготовлення ротора [87].

Ротори центрифуг, включаючи кришку і основу, виготовлені з листової сталі, а елементи ротора з'єднані між собою електрозварюванням для забезпечення міцності, надійності і зниження трудомісткості.

На ефективність роботи пристрою сильно впливає розташування отворів в роторі центрифуги. Найефективнішим розташуванням отворів для ротора є шаховий, оскільки воно забезпечує найбільшу загальну площу поперечного перерізу отворів, мінімізуючи при цьому ослаблення стінки ротора.

Центрифуги, призначені для обробки волокнистих матеріалів і тканин, часто мають щілинні отвори ротора. Така форма зменшує ослаблення стінок ротора і зводить до мінімуму ймовірність пошкодження тканини.

Центрифуги, що використовуються для обробки волокнистих матеріалів, часто мають щілинні отвори, щоб зменшити ослаблення стінок і ризик пошкодження тканин.

При обробці гранульованих матеріалів ротор центрифуги футерують металевим ситом або фільтрувальною тканиною, щоб запобігти втраті осаду через отвори в стінці ротора. Для поліпшення відділення рідини від центрифугованого матеріалу між фільтрувальним ситом або тканиною і стінкою ротора розміщують дренажний шар, що складається з одного або декількох футерувальних сит. Фільтрувальні сита зазвичай виготовляються з технічних волокон, червоної міді, латуні, нікелевого дроту або дроту з нержавіючої сталі, або штампуються з тонких листів (товщиною 0,3–0,7 мм) з тих же металів, з круглими або щілинними отворами.

При переробці гранульованого матеріалу ротор футерується ситом або тканиною, щоб запобігти втраті осаду. Дренажний шар, що складається з одного або декількох футерованих сит, використовується для поліпшення

відділення рідини. Сита для фільтрів виготовляються з різних матеріалів, включаючи тканину, дріт і метал.

Характеристики фільтрувальних сіток підбираються залежно від типу матеріалу, що переробляється. Використовувані фільтрувальні тканини мають ті ж марки, що і фільтри. Керамічні плитки використовуються в особливих випадках, наприклад, при центрифугуванні сульфіду нікелю.

Вибір характеристик фільтрувальної сітки повинен залежати від матеріалу, що обробляється. Використовувані фільтрувальні тканини повинні бути такими ж, як і ті, що застосовуються для фільтрів. У певних ситуаціях, наприклад, при центрифугуванні сульфіду нікелю, можна використовувати керамічну плитку.

З літературного огляду можна зробити висновок, що для поставленої задачі оптимальною конструкцією є вертикальна фільтруюча центрифуга періодичної дії.

#### 1.2.2.2 Розрахунок періодичної фільтруючої центрифуги

Вихідні дані

Динамічна в'язкість води  $\mu_v = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$

Масова частка торфу – 0,15

Густина торфу  $\rho_T = 1100 \text{ кг/м}^3$

Густина води  $\rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3$

Частота обертів 1000 об/хв

Діаметр твердих частинок  $d = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

Масова частка вологи до центрифугування  $u_1 = 85 \%$

Густина суспензії

$$\rho_{\text{сус}} = \frac{1}{\frac{x_p}{\rho_p} + \frac{x_T}{\rho_T}}$$

$$\rho_{\text{сус}} = \frac{1}{\frac{0,85}{998} + \frac{0,15}{1100}} = 1012 \left( \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right).$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості суспензії

$$\mu_{\text{сус}} = 0,59 \cdot \frac{\mu_{\text{в}}}{(0,77 - \varphi)^2},$$

де  $\varphi$ —об'ємна частка твердої фази в суспензії.

$$\varphi = x_{\text{т}} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{т}}}.$$

$$\varphi = 0,15 \cdot \frac{998}{1100} = 0,136.$$

Тоді

$$\mu_{\text{сус}} = 0,59 \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{-3}}{(0,77 - 0,136)^2} = 0,0015 \text{ (Па} \cdot \text{с)}.$$

Приймаємо внутрішній діаметр барабана  $D_{\text{вн}}=260\text{мм}=0,26\text{м}$

Згідно рекомендацій [88] довжина внутрішньої частини барабана центрифуги повинна бути в діапазоні  $0,5 \div 0,7$ . Приймаємо 0,66.

$$L_{\text{вн}} = 0,6 \cdot D_{\text{вн}}.$$

$$L_{\text{вн}} = 0,66 \cdot 0,26 = 0,158(\text{м}).$$

Приймаємо довжина внутрішньої частини барабана центрифуги  $L_{\text{вн}} = 0,16\text{м}$ .

Повний об'єм барабана центрифуги

$$V_6 = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{вн}}}{2}\right)^2 \cdot L_{\text{вн}}.$$

$$V_6 = 3,14 \cdot \left(\frac{0,26}{2}\right)^2 \cdot 0,16 = 0,0085 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Внутрішній радіус шару матеріалу в роторі (барабані центрифуги)

$$r_1 = \sqrt{\frac{V_6 - \theta \cdot V_6}{\pi \cdot L_{\text{BH}}}}$$

Згідно рекомендацій [89] приймаємо завантаження барана на 50%,  $\theta=0,5$ .

Тоді

$$r_1 = \sqrt{\frac{0,0085 - 0,5 \cdot 0,0085}{3,14 \cdot 0,16}} = 0,092 \text{ (м)}.$$

Об'єм шару матеріалу в роторі при 50%-му завантаженні

$$V_c = \pi \cdot \left( \left( \frac{D_{\text{BH}}}{2} \right)^2 - r_1^2 \right) L_{\text{BH}}$$

$$V_c = 3,14 \cdot \left( \left( \frac{0,26}{2} \right)^2 - 0,092^2 \right) \cdot 0,16 = 0,0042 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Середній радіус шар суспензії в роторі

$$r_{\text{сер}} = \frac{R_{\text{BH}} + r_1}{2},$$

де  $R_{\text{BH}}$ —внутрішній радіус барабана центрифуги,

$$R_{\text{BH}} = \frac{D_{\text{BH}}}{2}.$$

$$R_{\text{BH}} = \frac{0,26}{2} = 0,13 \text{ (м)}.$$

Тоді

$$r_{\text{сер}} = \frac{0,13 + 0,092}{2} = 0,1110 \text{ (м)}.$$

Кутова швидкість обертань барабана складає

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

$$\omega = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ (рад/с)}.$$

Визначаємо середній чинник розділу центрифуги

$$\Phi = \frac{\omega^2 \cdot r_{\text{сер}}}{g}$$

$$\Phi = \frac{104,7^2 \cdot 0,1110}{9,81} = 608.$$

Колова лінійна швидкість обертання ротора центрифуги

$$\varpi = \omega \cdot r_{\text{сер}}$$

$$\varpi = 104,7 \cdot 0,1110 = 11,61 \text{ (м/с)}.$$

Відцентрова сила, що діє на тверді частинки

$$C = \frac{\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_T \cdot \varpi^2}{r_{\text{сер}}}$$

$$C = \frac{\frac{3,14 \cdot (50 \cdot 10^{-6})^3}{6} \cdot 1100 \cdot 11,61^2}{0,1110} = 8,744 \cdot 10^{-8} \left( \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{С}^2} \right).$$

Критерій Архімеда, що враховує відцентрову силу

$$Ar_B = \frac{d^3 \cdot (\rho_T - \rho_p)}{\left( \frac{\mu_p}{\rho_p} \right)^2 \cdot \rho_p} \cdot \frac{\varpi^2}{r_{\text{сер}}}$$

де  $\rho_p$  – густина води, при  $t=20$  °C;  $\rho_p = 998 \text{ кг/м}^3$ ;

$\mu_p$  – динамічна в'язкість води, при  $t=20$  °C;  $\mu_p = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

$$Ar_B = \frac{(50 \cdot 10^{-6})^3 \cdot (1100 - 998)}{\left(\frac{1,0 \cdot 10^{-3}}{998}\right)^2 \cdot 998} \cdot \frac{11,61}{0,1110} = 1,33.$$

При  $Ar_B < 36$  означає, що режим руху ламінарний, тоді  
Критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{Ar_B}{18}.$$

$$Re = \frac{1,33}{18} = 0,074.$$

Швидкість осадження в центрифугі

$$\omega_{oc} = \frac{Re \cdot \mu_p}{d \cdot \rho_p}.$$

$$\omega_{oc} = \frac{0,074 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6} \cdot 998} = 0,002 \left(\frac{M}{c}\right).$$

Колова швидкість обертання барабана

$$\vartheta = \frac{2\pi n R_{BH}}{60}.$$

$$\vartheta = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 0,13}{60} = 13,61 \left(\frac{M}{c}\right).$$

Перепад тиску (рушійна сила)

$$\Delta P = \frac{\rho_p \cdot \vartheta}{2} \cdot (R_{BH}^2 - r_1^2).$$

$$\Delta P = \frac{998 \cdot 13,61}{2} \cdot (0,13^2 - 0,092^2) = 573,7 \text{ (Па)}.$$

Середнє значення площі поверхні фільтрації центрифуги

$$F = 2\pi L_{\text{BH}} \frac{R_{\text{BH}} r_1}{2}.$$

$$F = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,16 \cdot \frac{0,13 \cdot 0,092}{2} = 0,046 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Індекс продуктивності

$$\Sigma = \frac{V_c \cdot n^2}{900 \cdot \ln \frac{R_{\text{BH}}}{r_1}}.$$

$$\Sigma = \frac{0,0042 \cdot 1000^2}{900 \cdot \ln \frac{0,13}{0,092}} = 13,61 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Час фільтрації

$$\tau_{\phi} = \frac{\mu_{\text{сус}} \psi \theta V_6 \alpha_{\text{ср}} (1 - x)}{x F \rho_{\text{сус}} \omega^2 R_{\text{BH}}},$$

де  $x$  – відношення об'єму фільтрату до об'єму осаду;

$\alpha_{\text{ср}}$  – середній питомий об'ємний опір осадку,  $\alpha_{\text{ср}} = 2,35 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ .

$$x = \frac{\varphi}{1 - \varphi}.$$

$$x = \frac{0,136}{1 - 0,136} = 0,16.$$

Тоді

$$\tau_{\phi} = \frac{0,0015 \cdot 0,5 \cdot 0,0085 \cdot 2,35 \cdot 10^9 \cdot (1 - 0,16)}{0,16 \cdot 0,046 \cdot 1012 \cdot 104,7^2 \cdot 0,13} = 118,6 \text{ (с)}.$$

Загальний час циклу центрифугування

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\phi} + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{г}} + \tau_{\text{р}}.$$

де  $\tau_{\Pi}$ —час пуску,  $\tau_{\Pi} = 90$  с;

$\tau_{\Gamma}$ —час гальмування,  $\tau_{\Gamma} = 60$  с;

$\tau_{\rho}$ —час розвантаження  $\tau_{\rho} = 30$  с.

Тоді

$$\tau_{\Sigma} = 118,6 + 90 + 60 + 30 = 298,6 \text{ (с)}.$$

Продуктивність центрифуги

$$Q_T = \frac{3600V_c}{\tau_{\Sigma}}.$$

$$Q_T = \frac{3600 \cdot 0,0042}{298,6} = 0,5 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \right).$$

Масова витрата

$$G = Q_T \cdot \rho_{\text{сус}}.$$

$$G = 0,5 \cdot 1012 = 506 \text{ (кг}^3\text{/год)}.$$

Маса ненавантаженого барабана фільтраційної центрифуги

$$G_6 = \rho_{\text{н.с.}} \varphi_6 \left[ \frac{\pi}{4} (D_{\text{вн}} + 2S)^2 (L_{\text{вн}} + 2S) - V_6 \right].$$

де  $\rho_{\text{н.с.}}$ —густина матеріалу (12X18Н10Т) барабана фільтраційного центрифуги

$$\rho_{\text{н.с.}} = 7920 \text{ кг/м}^3;$$

$\varphi_6$ —коефіцієнт перфорації барабана  $\varphi_6 = 0,5$

$S$ — товщина стінки барабана фільтраційного центрифуги,  $S=0,003$  м.

$$G_6 = 7920 \cdot 0,5 \cdot \left[ \frac{3,14}{4} \cdot (0,26 + 2 \cdot 0,003)^2 \cdot (0,158 + 2 \cdot 0,003) - 0,0085 \right] =$$

$$= 2,412 \text{ (кг)}.$$

Потужність на подолання інерції маси барабана

$$N_1 = \frac{G_6 \omega^2}{2 \cdot \tau_{\Pi}}.$$



$$N_1 = \frac{2,412 \cdot 104,7^2}{2 \cdot 90} = 146 \text{ (Вт)}.$$

Потужність, що витрачається на подолання сил інерції маси матеріалу

$$N_2 = \frac{V_c \rho_{\text{сус}} \omega^2}{4 \cdot \tau_{\text{п}}}$$

$$N_2 = \frac{0,0042 \cdot 1012 \cdot 104,7^2}{4 \cdot 90} = 129,43 \text{ (Вт)}.$$

Колова швидкість обертання цапфи валу

$$\omega_{\text{в}} = \pi d_{\text{в}} \frac{n}{60},$$

де  $d_{\text{в}}$  – діаметр валу, приймаємо  $d_{\text{в}} = 60 \cdot 10^{-3}$  м

$$\omega_{\text{в}} = 3,14 \cdot 60 \cdot 10^{-3} \frac{1000}{60} = 3,14 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Потужність, що витрачається на подолання тертя валу у підшипниках

$$N_3 = f \cdot g \cdot (G_{\text{б}} + V_c \cdot \rho_{\text{сус}}) \cdot \omega_{\text{в}},$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя вала ротора у підшипниках[90],  $f=0,1$

$$N_3 = 0,1 \cdot 9,81 \cdot (2,412 + 0,0042 \cdot 1012) \cdot 3,14 = 21 \text{ (Вт)}.$$

Потужність, що витрачається на тертя барабана з повітрям

$$N_4 = 10^{-8} \cdot R_{\text{вн}}^5 \cdot n^3.$$

$$N_4 = 10^{-8} \cdot 0,13^5 \cdot 1000^3 = 0,0004 \text{ (Вт)}.$$

Потужність електродвигуна в пусковий період

$$N_{\Pi} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4.$$

$$N_{\Pi} = 146 + 129,43 + 21 + 0,0004 = 296,43 \text{ (Вт)}.$$

Потужність електродвигуна центрифуги

$$N_{\text{дц}} = \frac{N_{\Pi}}{0,9}.$$

$$N_{\text{дц}} = \frac{296,43}{0,9} = 329 \text{ (Вт)}.$$

1.2.2.3 Розрахунки на міцність барабана центрифуги

#### Визначення допоміжних величин

Ступінь перфорації при умові, що розташування отворів по вершинам квадрата та в шаховому порядку

$$C = 0,785 \cdot \left(\frac{d}{t}\right)^2,$$

де  $t$  – крок отворів перфорованої обичайки,  $t = 0,005$  м;

$d$  – діаметр отворів перфорованої обичайки (з урахуванням розсвердлювання)  $d = 0,003$  м

$$C = 0,785 \cdot \left(\frac{0,003}{0,005}\right)^2 = 0,2826.$$

Наведена густина матеріалу ротору

$$\rho_{\text{H}} = \rho_{\text{H.c.}} (1 - C).$$

$$\rho_{\text{H}} = 7920 \cdot (1 - 0,2826) = 5682 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right).$$

Коефіцієнт ослаблення

$$\varphi_c = 1 - \frac{d}{t}$$

$$\varphi_c = 1 - \frac{0,003}{0,005} = 0,4.$$

Коефіцієнт заповнення барабану

$$\phi = 1 - \frac{r_1^2}{R_{BH}^2}$$

$$\phi = 1 - \frac{0,092^2}{0,13^2} = 0,5.$$

Коефіцієнт зменшення допустимої напруги

$$K = \varphi_c \text{ при } \varphi_c < \varphi_{ш};$$

$$K = \varphi_{ш} \text{ при } \varphi_c > \varphi_c,$$

де  $\varphi_{ш}$  – коефіцієнт міцності зварного шва для ручної дугової електросварки,  
 $\varphi_{ш} = 0,95$ .

Тоді

$$0,4 = \varphi_c < \varphi_{ш} = 0,95.$$

Значить

$$K = \varphi_c = 0,4.$$

Напруження в обичайці в результаті дії відцентрових сил інерції власної ваги

$$\sigma_0 = 39,44 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \cdot \rho_{н.с.} \cdot R_{BH}^2$$

$$\sigma_0 = 39,44 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1000}{60}\right)^2 \cdot 7920 \cdot 0,13^2 = 1,47 \text{ (МПа)}.$$

Кільцеве напруження в обичайки ротора

$$\sigma_t = \sigma_0 \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{II} \cdot \phi \cdot R_{BH}}{2 \cdot S}\right),$$

де

$$\lambda_{\Pi} = \frac{\rho_{\text{сус}}}{\rho_{\text{H}}}$$

$$\lambda_{\Pi} = \frac{1012}{5682} = 0,18.$$

Тоді

$$\sigma_t = 1,47 \cdot \left( 1 + \frac{0,18 \cdot 0,5 \cdot 0,13}{2 \cdot 0,003} \right) = 4,34 \text{ (МПа)}.$$

### **Визначення коефіцієнтів запасу міцності**

Коефіцієнт запасу міцності по відношенню до межі текучості матеріалу обичайки

$$n_{\text{T}} = K \cdot \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_t}$$

де  $\sigma_{0,2}$  – межа текучості матеріалу барабана в робочих умовах,  $\sigma_{0,2} = 240$  МПа [91]

$$n_{\text{T}} = 0,4 \cdot \frac{240}{4,34} = 22,12 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу міцності по відношенню до межі міцності матеріалу обичайки

$$n_{\text{B}} = K \cdot \frac{\sigma_{\text{B}}}{\sigma_t}$$

де  $\sigma_{\text{B}}$  – межа міцності матеріалу барабана в робочих умовах,  $\sigma_{\text{B}} = 540$  МПа [92]

$$n_{\text{B}} = 0,4 \cdot \frac{540}{4,34} = 49,77.$$

Отримані розрахунком коефіцієнти запасу міцності  $n_{\text{T}}$  та  $n_{\text{B}}$  не повинні бути менше нормативних, тобто

$$n_{\text{T}} = 22,12 \geq [n_{\text{T}}] = 2,0; n_{\text{B}} = 49,77 \geq [n_{\text{B}}] = 3,0.$$

На основі отриманих результатів розрахунків на міцність можна зробити висновок, що умова виконана і спроектована конструкція барабана надійна.

#### 1.2.2.4 Монтажна схема електричних з'єднань фільтруючої центрифуги

Прототип розробленої фільтруючої центрифуги працює від АС 220V. Так як зараз не стабільне навантаження на енергосистему України, то для захисту пристрою від перевантажень та короткого замикання встановлюється автомат захисту типу автомата ЕТМАТ Р10В6 з захистом 6А. Монтажна схема електричних з'єднань фільтруючої центрифуги представлена на рис. 1.18.

Контролер US-52 призначений для керування швидкості асинхронного двигуна змінного струму з тахогенератором потужністю 600Вт. Модуль забезпечує плавне регулювання швидкості двигуна та підтримує необхідну потужність.

Напрямок обертання перфорованої обичайки центрифуги регулюється режимом підключення клеми COM-CW-CCW, яка розміщується між контролером та електродвигуном.

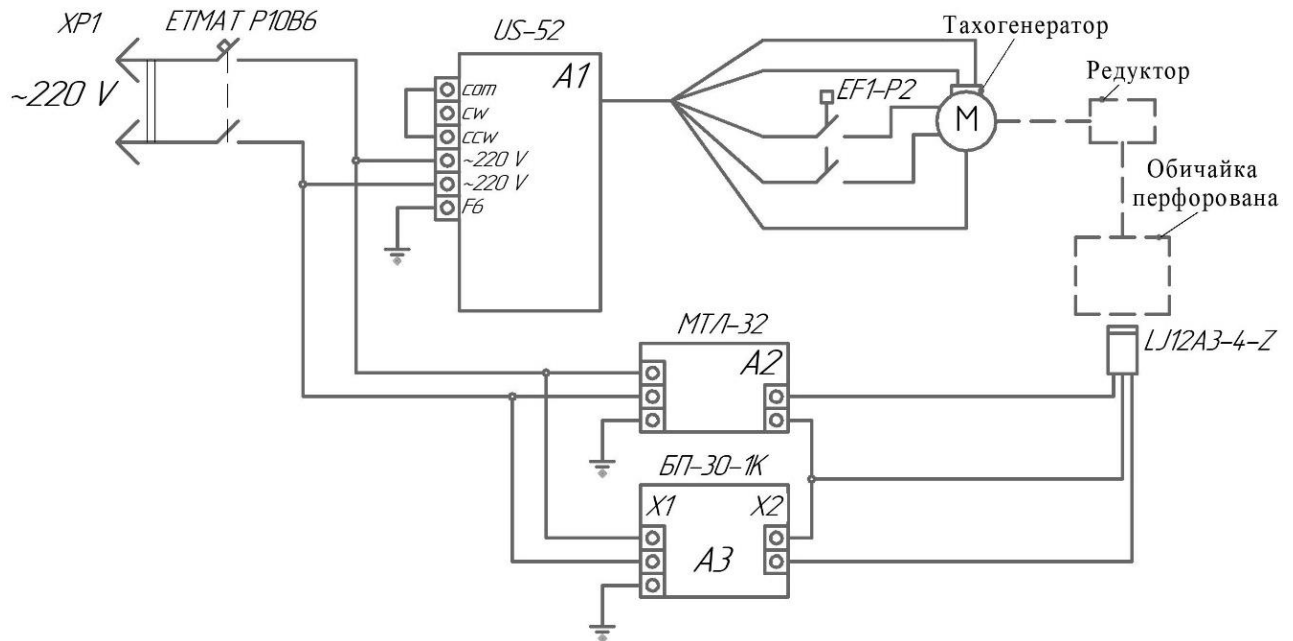


Рисунок 1.18– Монтажна схема електричних з'єднань фільтруючої центрифуги

Для захисту від загорання, відповідно до DIN VDE 0100-482 та IEC 60364-4-482, всі кабелі та провідники в мережах TNi TT повинні бути захищені за

допомогою диференційних захисних пристроїв зі значенням диференційного струму  $I_{\Delta n} \leq 300$  мА. Для захисту від непрямого торкання струмових частин, або прямого дотику до струменевих частин (пошкодження дротів) рекомендується використовувати диференціальні пристрої захисту (реле) зі значенням диференційного струму  $I_{\Delta n} \leq 30$  мА. Було обрано диференціальне реле моделі EFI-P2 типу АС 16/0,03.

Двигун установки типу МСА 45/64-148/WNE4 з тахогенератором та наступними характеристиками: споживання струму з мережі при номінальному навантаженні 1,6 А, механічна потужність електродвигуна на валу, що розвивається становить 350 Вт, напруга мережі живлення 220-240 В з частотою 50 Гц.

Для вимірювання швидкості обертання корзини застосовується індукційний датчик LJ12A3-4-Z. Для живлення датчика стабілізованою напругою постійного струму використовується блок живлення БП-30-1к.

Відображення інформації про оберти перфорованої обичайки відбувається на багатофункціональному мікропроцесорному пристрої МТЛ-32 в режимі тахометр. Який дозволяє проводити вимірювання за період заданого програмно часу, та керувати вихідними пристроями лічильника, залежно від умов досягнення поточним значенням кількості обертів перфорованої обичайки мінімум і максимум. Автоматично встановлює нормальну роботу після усунення перевантаження та короткого замикання.

#### 1.2.2.5 Опис роботи апарату

Спроектований апарат, фільтруюча центрифуга періодичної дії призначена для розділення суспензії та відділення твердих часток до 50мкм. Використавши розроблений апарат для фільтрації гумату калію, отримаємо органічні добрива які можна буде вносити на лист, що дозволить рослині отримувати швидше корисні речовини, тим самим підвищити урожайність. На рис. 1.19 представлено схему та трьох вимірну модель розробленої вертикальної фільтруючої центрифуги періодичної дії.

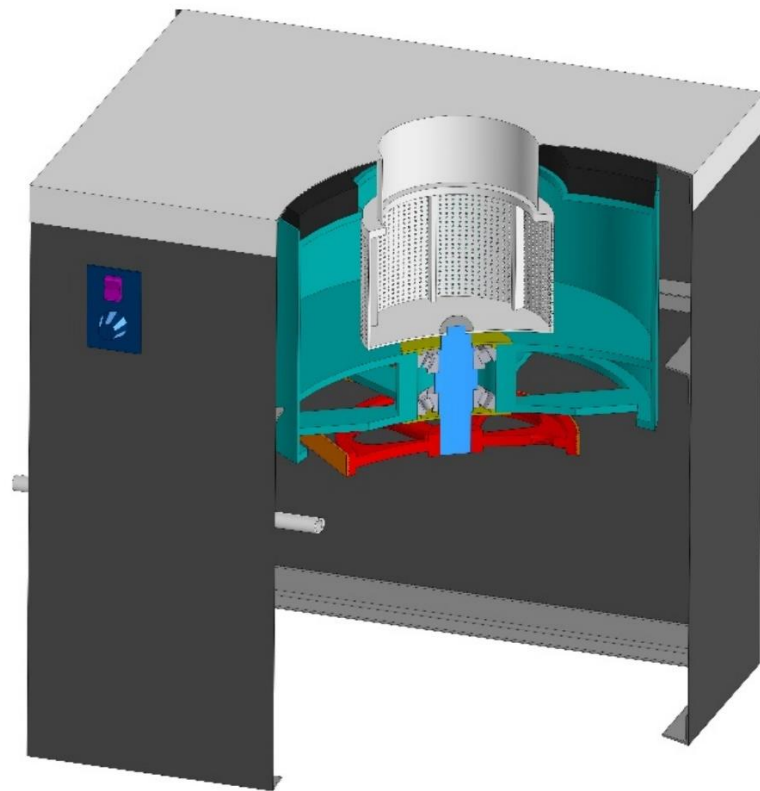
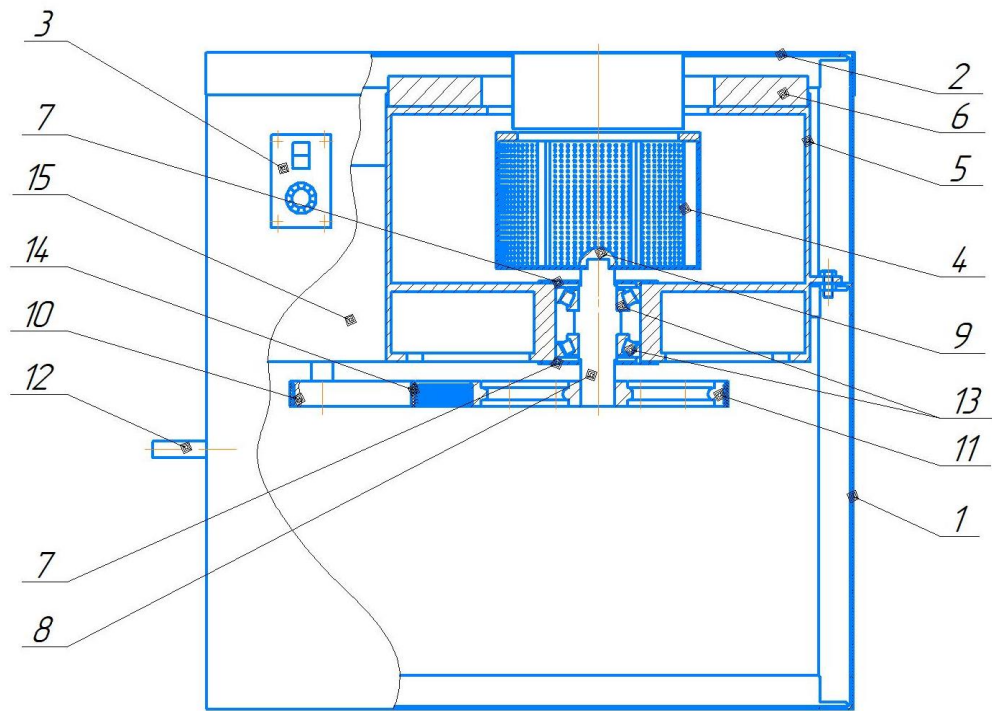


Рисунок 1.19– Вертикальна фільтруюча центрифуга періодичної дії:  
 а) схема центрифуги; б) трьох вимірна модель: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – блок керування; 4 – барабан; 5 – приймач ; 6 – вантаж; 7 – кришка підшипника; 8 – вал; 9 – гайка; 10 – шків ведений; 11 шків ведучий; 12 – трубка відвідна; 13 – підшипник; 14 – ремінь полікліновий; 15 – електродвигун

Корпус 1 складається з рами виготовленої з металевого кутника 45 x 45 та бокових панелей з шумоізоляцією. В кришці 2 знаходиться штуцер, через який подається суспензія в перфорований барабан 4 центрифуги, в якому встановлена фільтруюча сітка з нержавіючої сталі П 200. Запуск апарату відбувається з блоку управління 3, на якому також розміщено регулятор швидкості та екран для відображення реальної частоти обертання ротора центрифуги. Після запуску електродвигуна суспензія до барабана подається через 90 с, для виходу на робочу та стабільну швидкість обертання барабану 4. Барабан 4 (ротор) центрифуги обертається від електродвигуна 15 через ведений шків 10, поліклиновий ремінь 14, ведучий шків 11 та вал 8. Барабан 4 спеціальною гайкою 9 закріплений у верхній частині валу, що обертається в підшипниках 7. Суспензія яка потрапила до барабану 4 під дією відцентрових сил заповнює робочий простір барабану 4, проходячи через фільтруючу сітку та отвори в барабані розділяється на осад, що залишається на сітці, та фугат (очищену рідину), який збирається в приймачі фугату 5, який потім по відвідній трубці 12 направляється до накопичувальної ємності.

Час фільтрації складає 118 с, після чого центрифугу зупиняють та вручну вивантажують осад. Для стабільного обертання барабана 4 та зменшення вібрації на приймач 5 зверху встановлюють вантаж. У відповідності до виконаних розрахунків було виконано креслення загального виду з специфікацією, що наведено у додатках, по яким було виготовлено прототип рис. 1.20.

Були проведені маркетингові дослідження щодо просування отриманої наукової продукції фільтруючої центрифуги періодичної дії, та запропоновано подальші маркетингові дії. Так як фільтр був розроблений для роботи з рідкими стимуляторами росту (гумат калію), то запропоновано надати йому назву «Фільтр тонкої очистки рідких стимуляторів росту» ФТО-001. Також була розроблена рекламна брошура з основними характеристиками апарату і можливі сфери застосування, танаправлена аграрним підприємствам – партнерам та розміщено на сайті Сумського державного університету.





Рисунок 1.20– Фільтруюча центрифуга періодичної дії ФТО-001

На рис. 1.21 представлено рекламний проспекти фільтруючої центрифуги періодичної дії ФТО-001.

### 1.3 Висновок

За результатами дослідження наукових праць встановлено, що застосування гумінових добрив суттєво змінює умови ґрунтового живлення рослин, викликаючи активне посилення процесів мобілізації поживних речовин у формі, що засвоюються рослинами.

За результатами лабораторних досліджень – тестові вегетаційні дослідження з вирощування ярого ячменю з застосуванням добрива на основі альтернативних джерел фосфору і калію у вигляді золи показали, що зростання вегетативної маси рослин було статистично вірогідним.

У варіантах із використанням зольних добрив більшим приріст біомаси виявили під час внесення в ґрунт гранул золи з біочаром та золи збагаченої ортофосфорною кислотою з інтегрованим у гранули біочаром. Це дозволяє зробити висновок, що зола може бути застосована в якості калієвмісної сировини.



## Фільтр тонкої очистки рідких стимуляторів росту ФТО-001

### СТАН ГОТОВНОСТІ РОЗРОБКИ

Застосовується у технологічній лінії з виробництва гуматів калію на дослідному виробництві НДІ МІНДІП СумДУ потужністю 150 л/год

### СТАН ОХОРОНИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ

Подано заявку на отримання охоронного документа

### ЗАТРЕБУВАНІСТЬ НА РИНКУ

Виробники мінеральних добрив, сільгосппідприємства, фермерські господарства

### ПРИЗНАЧЕННЯ ТА СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Фільтр ФТО-001 призначений для роботи з рідкими стимуляторами росту - баластними гуматами лужних металів (натрію, калію, кальцію). Рушійною силою процесу фільтрації є відцентрові сили. Конструкція фільтру передбачає можливість керування процесом фільтрації в залежності від в'язкості робочого середовища.

Фільтр забезпечує відокремлення нерозкладених твердих часток гумінових речовин. За рахунок вилучення твердих домішок шляхом фільтрації, у готовому продукті збільшується вміст гумінових речовин на 15 %, що дозволяє вносити стимулятор росту за допомогою розбризкувачів усіх типів. Виготовлений на власному дослідному виробництві кафедри Хімічної інженерії Сумського державного університету.

### ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СУТЬ РОЗРОБКИ

- розмір вловлюваних часток більше ніж 100 мкм;
- фільтрація водних розчинів, які містять нерозкладені тверді частки торфу та леонардиту;
- частота обертів 0-1000 об/хв.;
- внутрішній об'єм фільтру 45л.

### ОСНОВНІ ПЕРЕВАГИ РОЗРОБКИ

- висока надійність в експлуатації;
- можливість вловлювання часток різного розміру при заміні фільтруючих елементів;
- доступність в обслуговуванні;
- мобільність в пересуванні та використанні в маленьких фермерських господарствах.



Фільтр тонкої очистки рідких стимуляторів росту ФТО-001



Комплексне добриво "Гумат Калію" до фільтрації



Комплексне добриво "Гумат Калію" після фільтрації (сито 0125)

Науково-дослідна частина, Центр науково-технічної і економічної інформації

вул. Р.-Корсакова, 2, Суми, 40007, Україна

тел. +38(0542) 687-402, +38(0542) 687-869

e-mail: info@sci.sumdu.edu.ua, info@cni.sumdu.edu.ua

Рисунок 1.21 – Рекламний проспект фільтруючої центрифуги періодичної дії ФТО-001

Оскільки в гранулах золи фосфор знаходиться у засвоюваній формі, а у початковий період вегетації рослин потрібен водорозчинний фосфор, у НДІ МІНДП СумДУ були проведені попередні дослідження з уведення в склад гранули водорозчинного фосфору у вигляді фосфорної кислоти.

Експерименти з різними концентраціями фосфорної кислоти показали можливість уведення фосфору у водорозчинній формі, та стабільно зафіксувати цю форму фосфору при виготовленні і сушінні гранули не вдалося.

Запропоновано вводити водорозчинний фосфор під час отримання гранульованого добрива у вигляді порошкоподібного моноамонійфосфату. Це дозволило не тільки зберегти в гранулі водорозчинний фосфор, а й збагатити добриво азотною складовою.

В роботі запропоновано раціональний склад складу органо-мінерального добрива на основі вітчизняної мінеральної сировини зі збільшеним вмістом масової частки водорозчинного фосфору з умістом поживних речовин: азоту не менше 3 %; фосфору у перерахунку на  $P_2O_5$  – не менше 5 %; калію у перерахунку на  $K_2O$  – не менше 5 %;  $P_2O_5$  водорозчинного – не менше 20 % див. табл. 1.8.

Визначено, що із існуючих способів гранулювання, можна виділити наступні методи:

- диспергування плавів із послідовним охолодженням гранул у грануляційних баштах (приллювання);
- диспергування пульпи у псевдозріджений (чи зважений) шар;
- обкочування із одночасним диспергуванням пульпи на поверхню гранул.

Показано, що метод приллювання у грануляційних баштах є дуже енергоємним та не раціональним. При отриманні фосфоровмісних добрив використовується суспензія із додаванням гумату калію. Дана рідка суспензія вміщує тверді нерозчинні домішки, що спричинить забивання отворів розпилювальних пристроїв та швидкий вихід їх із ладу.

За результатами дослідження встановлено, що для апаратів киплячого, вихрового чи завислого шарів є такий суттєвий недолік як утворення відпрацьованих газів, які представляють собою суміш сушильного агенту та пилу. Для очищення даної суміші треба використовувати громіздкі багатоступеневі очисні споруди, що не є економічно рентабельно. Тому спосіб диспергування пульпи у псевдозріджений (чи зважений) шар не можна рекомендувати для отримання фосфоровмісних добрив з використанням суспензії із додаванням гумату калію.

Доведено, що тарілчастий гранулятор є найбільш раціональною конструкцією для отримання гранул органо-мінеральних добрив. Дана конструкція дозволяє отримати гранули достатньої міцності, більш рівномірно здійснювати ріст гранул за рахунок ефекту класифікації їх на тарілці, є прості за конструкцією та найбільш економічні.

Спроектовано, виготовлено та випробувано робочий прототип апарату, фільтруюча центрифуга періодичної дії призначена для розділення суспензії та відділення твердих часток до 50 мкм.

## **2 ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ РОЗРОБЛЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПІДХОДУ ДО ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ЗАХОПЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА СПОСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ ВІБРАЦІЙ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ**

**2.1 Комплексний підхід щодо проєктування систем захоплення як невід’ємного елемента системи «система захоплення – деталь – виробниче середовище – технологічне обладнання» для забезпечення подальшого раціонального вибору з урахуванням конкретних умов виробництва**

### **2.1.1 Цифровий двійник металорізального верстата**

В останні роки зростає інтерес до використання цифрових двійників для оптимізації процесів обробки та підвищення продуктивності металорізальних верстатів [93]. Цифрові двійники стають все більш важливою технологією в обробній промисловості, особливо для металообробного обладнання.

Цифровий двійник різальної машини є віртуальною копією фізичної машини [94], створена за допомогою імітаційного моделювання. Він представляє геометричні та кінематичні властивості фізичної машини та калібрується за допомогою даних машини в реальному часі. Після перевірки цю модель можна використовувати для моделювання різних виробничих процесів і оптимізації параметрів різання, таких як швидкість різання, швидкість подачі та глибина різання, для досягнення максимальної ефективності.

Використання цифрових двійників у металообробному обладнанні має ряд переваг [95].

По-перше, це може оптимізувати параметри різання, зменшуючи час виробництва та підвищуючи ефективність машини. По-друге, це може допомогти у виборі оптимальних ріжучих інструментів і матеріалів для конкретних виробничих процесів. По-третє, він має потенціал для прогнозування та запобігання можливим несправностям машин, тим самим зменшуючи витрати на обслуговування та мінімізуючи час простою.

Оптимізація параметрів різання може призвести до значної економії матеріалів і робочої сили. Крім того, цифровий двійник різальних верстатів може підвищити якість готової продукції шляхом вибору оптимальних ріжучих інструментів і матеріалів.

Підсумовуючи, цифровий двійник різальної машини є перспективною технологією зі значним застосуванням у обробній промисловості. Це може допомогти оптимізувати виробничі процеси, зменшити кількість помилок і підвищити ефективність, підвищивши продуктивність і заощадивши кошти.

## 2.1.2 Індустрія 5.0: аспекти технологій співпраці

### 2.1.2.1 Загальна опис поняття «Індустрія 4.0»

Автоматизація виробничих процесів дозволяє виготовляти продукцію кращої якості за менший час і з меншими витратами. Три промислові революції сформували сучасний стан виробництва. Вважається, що «Індустрія 4.0» розпочалася в 2011 році за ініціативи уряду Німеччини. Досягнення Індустрії 4.0 [96] дозволили автоматизувати основні технологічні процеси та зробити їх більш продуктивними за рахунок використання технологій штучного інтелекту та трансформації технологічних систем у кіберфізичні системи [97]. Хоча Індустрія 4.0 знаходиться на ранніх стадіях, вже говорять про Індустрію 5.0, де ключовою ідеєю є спільна робота людини та робота [98].

Індустрія 4.0 – це інтелектуальна мережа машин і процесів, зосереджена на загальній продуктивності, адаптивності та гнучкості.

У той час як «Індустрія 4.0» – це стійке, стійке та орієнтоване на людину виробництво, де соціальні цінності поміщені в центр виробничого процесу з акцентом на майбутнє [99]. Індустрія 5.0 має на меті подолати проблему взаємодії людини та машини, зосередившись на покращенні зручності використання та доступності машини, враховуючи людські потреби та ергономіку, а також гарантуючи, що співпраця людини та машини приносить взаємну вигоду [100]. Особливо цікавим у цьому контексті є взаємодія між людьми та роботами, керованими технологіями на основі штучного інтелекту [101].

До проблем у взаємодії людей і роботів відносяться:

1. Питання безпеки. Це питання є першочерговим, оскільки є життєво важливим для забезпечення безпеки людини в процесі взаємодії та відповідає першому закону робототехніки. Однак на практиці дотримуватись вимог безпеки досить складно, особливо якщо конструкція робота не враховує всіх ризиків і загроз, які може становити технологія.

Роботи можуть ненавмисно стати джерелом небезпеки, якщо вони не розроблені з належними засобами безпеки або якщо вони несправні. Щоб запобігти згаданому вище, робот повинен мати можливість виявляти присутність людини та аналізувати можливу загрозу, щоб вчасно припинити її загрозливі дії, які створюють джерело небезпеки. Іншими словами, робот повинен «бачити» людину, яка входить в його робочу зону, і відповідно реагувати [102].

2. Відсутність емпатії. Роботам бракує емоційного інтелекту. Вони не здатні зрозуміти емоційну поведінку людини та реагувати на неї. Тому виникає проблема з відповідною поведінкою робота у випадках, коли людина поводить емоційно не так, як традиційна послідовність дій [103].

3. Обмежена здатність до адаптації. Роботам важко пристосуватися до змін ситуації чи середовища, що робить їх менш гнучкими, ніж люди. Допомога людини, яка полягає в навчанні робота, може підвищити адаптаційні можливості робота [104].

4. Комунікаційні бар'єри. Роботам і людям може бути складно спілкуватися, оскільки люди можуть одночасно використовувати різні канали зв'язку, такі як вербальні та невербальні, а також підказки чи аналогії, які роботі важко зрозуміти [105].

5. Відсутність довіри. Ця проблема пов'язана з обмеженим уявленням людей про технології [106].

Відсутність довіри також включає занепокоєння щодо безпеки особистої інформації та довіри до того, як робот виконуватиме завдання.

– Етичні питання. Робот не в змозі враховувати гуманітарні аспекти при прийнятті рішень [107].

– Перерозподіл робочих місць. Використання роботів у деяких галузях може призвести до передачі повторюваних або низькокваліфікованих робіт від людей до роботів. З одного боку, це звільняє людей від рутинної праці, а з іншого – вимагає переходу на більш високий рівень виробничої ієрархії. У таких умовах людина перестає бути основною виробничою силою і стає відповідальним за прийняття рішень або наставником для робота.

Вирішення цих проблем вимагає ретельного аналізу технологій спільної роботи з точки зору їх можливостей або обмежень. Важливо розглядати взаємодію в контексті передачі даних від людини до робота, від робота до людини та взаємного обміну інформацією. Проблеми взаємодії, визначені в цьому розділі, є основними аспектами аналізу технологій співпраці.

Це дослідження є актуальним, оскільки воно має на меті проаналізувати поточні тенденції розвитку спільних технологій, які можуть подолати розрив у розумінні між людьми та роботами.

Взаємодія між людиною та роботами розглядається з різних ракурсів, що дозволяє визначити основні аспекти такої взаємодії, проблеми та можливі переваги.

#### 2.1.2.2 Назустріч технологіям співпраці

##### Від людини до робота

Щоб забезпечити взаємодію людини і робота в спільному робочому просторі, необхідно відстежувати положення тіла і дії людини. Безпечне середовище можна гарантувати, лише знаючи поточне положення тіла людини. Можна визначити кілька рівнів взаємодії людини і робота, а отже, і кілька рівнів ризику в таких взаємодіях. Система повинна обробляти та реагувати відповідним чином, щоб запобігти травмуванню людини [108].

Вже проводилися дослідження щодо розпізнавання та класифікації рухів людини за допомогою різних технологій. До них відносяться розпізнавання дій людини на основі відео [109], датчик Kinect [110], карти глибини [111] і



комбіновані датчики положення, прикріплені до частин тіла людини [112]. Вони в основному використовують алгоритми машинного навчання [113] і різні методи класифікації поз людини [114]. Система самоорганізації карт [115, 116], модель Bag-of-Visual-Words [117] та інші описані алгоритми працюють за подібним принципом. Усі вони виділяють із потоку положення людини, а потім класифікують дію відповідно до послідовності положень людського скелета. Такий підхід дозволяє відстежувати людину в спільному робочому просторі з роботом.

Знання положення людини в просторі недостатньо для повноцінної співпраці людини і робота. Між людиною і роботом потрібен спеціальний засіб зв'язку, за допомогою якого людина могла б передавати команди керування роботою.

Стандартні засоби введення команд через стаціонарний пульт або через переносні контролери з кнопками залишаються актуальними. Однак цей метод введення команд унеможливорює повну взаємодію з роботом в одному робочому просторі, як це передбачає Індустрія 5.0. Одним із доступних способів введення команд є аналіз положення та рухів рук із накладної камери [118]. Іншим надійним і зручним методом введення даних для забезпечення взаємодії людина-робот із вільними руками є засоби розпізнавання мови [119] або інтерфейс мозок-комп'ютер із шоломом для зчитування мозкових хвиль і передачі їх на пристрій обробки даних [120].

### 2.1.2.3 Від робота до людини

Ще одним надзвичайно важливим процесом є передача інформації від робота до людини.

Недорогі камери з високоякісними зображеннями та технологіями віртуальної реальності/доповненої реальності (VR/AR) дозволяють передавати візуальну інформацію від робота до людини. Технологія AR може додавати візуальні підказки людям у робочому просторі, орієнтованому на співпрацю, підвищуючи загальну продуктивність системи та безпеку робочого процесу [121].

Що стосується дистанційного керування роботом, візуальна передача інформації є критичною, тому що перше, що нам потрібно для навігації в просторі, це зображення навколишніх предметів. Управління роботом дуже схоже на процес гри за допомогою технології віртуальної реальності, яка допомагає занурюватися в навколишнє середовище [122]. Тому технології VR/AR є чудовим способом передачі візуальної інформації від робота до людини.

Допоміжною технологією при передачі даних від робота до людини може бути передача тактильних відчуттів. Бачити та відчувати силу, яку ви тиснете на предмети за допомогою маніпулятора, має вирішальне значення. Це дозволить вам виконувати точні дії або маніпулювати крихкими предметами та розкривати властивості предметів, прихованих для зорового сприйняття, а також читати контактує з навколишнім середовищем по всій поверхні робота [123]. Вже розроблено декілька зразків штучної шкіри. Наприклад, вчені використовують провідну тканину та алгоритми глибокого навчання для аналізу дотику та тиску на поверхню тканини [124]. А також багатоконтактна технологія, гаптичний пристрій великої поверхні з кількох розріджених датчиків деформації [125].

Також ведуться дослідження та розробки датчиків дотику для захоплення предметів.

Існують досить грубі прототипи пристроїв, які використовуються для контролю сили захоплення предметів [126, 127], але такі пристрої не дозволяють точно маніпулювати захопленими предметами. Водночас існують також прототипи приладів, які зчитують силу натискання на предмети пальцями [128]. Такий підхід дозволяє створювати пристрої для більш точного маніпулювання предметами і дбайливого захоплення їх.

#### 2.1.2.4 Технології співпраці

Щоб створити загальний робочий простір і забезпечити умови для взаємодії людини і робота, потрібна технологія відстеження фактичного стану обладнання та несправностей, а також взаємне розташування всіх об'єктів у

робочому просторі. DigitalTwin– це цифровий аналог реального фізичного об'єкта. Між фізичним і цифровим близнюками встановлюється двонаправлене з'єднання в реальному часі. Концепція DigitalTwin є масштабованою, тобто цифрові близнюки можуть бути для однієї машини, виробничого процесу або навіть групи заводів [129].

Щоб цифрова модель була перетворена в DigitalTwin, необхідно використовувати допоміжні технології для забезпечення зв'язку та аналізу даних у реальному часі. У цьому випадку Інтернет речей (IoT) забезпечує двонаправлений зв'язок між DigitalTwin і PhysicalTwin. Штучний інтелект (AI) є чудовим адаптивним інструментом для аналізу даних Cyber-PhysicalSystems (CPS) [130].

DigitalTwin має широкий спектр застосувань, наприклад, виробництво, авіація, охорона здоров'я тощо [131]. Крім того, впровадження цієї технології приносить переваги протягом усього виробничого процесу, від проектування до моніторингу стану обладнання та обслуговування продукції [132]. Існує ряд наукових робіт, що описують методологію створення цифрових двійників для послідовних і паралельних маніпуляторів [133] і навіть систем з двох маніпуляторів, що працюють в одному робочому просторі [134].

Технологія DigitalTwin у поєднанні з допоміжними технологіями може запобігти ризикам операторів [135]. Ця технологія дозволяє створити цифровий простір як відображення фізичного простору. Одночасне відстеження стану обладнання, дій людини та розміщення інших об'єктів у робочому просторі значно підвищить безпеку взаємодії людини і робота. DigitalTwin– це «клей», який об'єднує технології, необхідні для реалізації парадигми Індустрії 5.0.

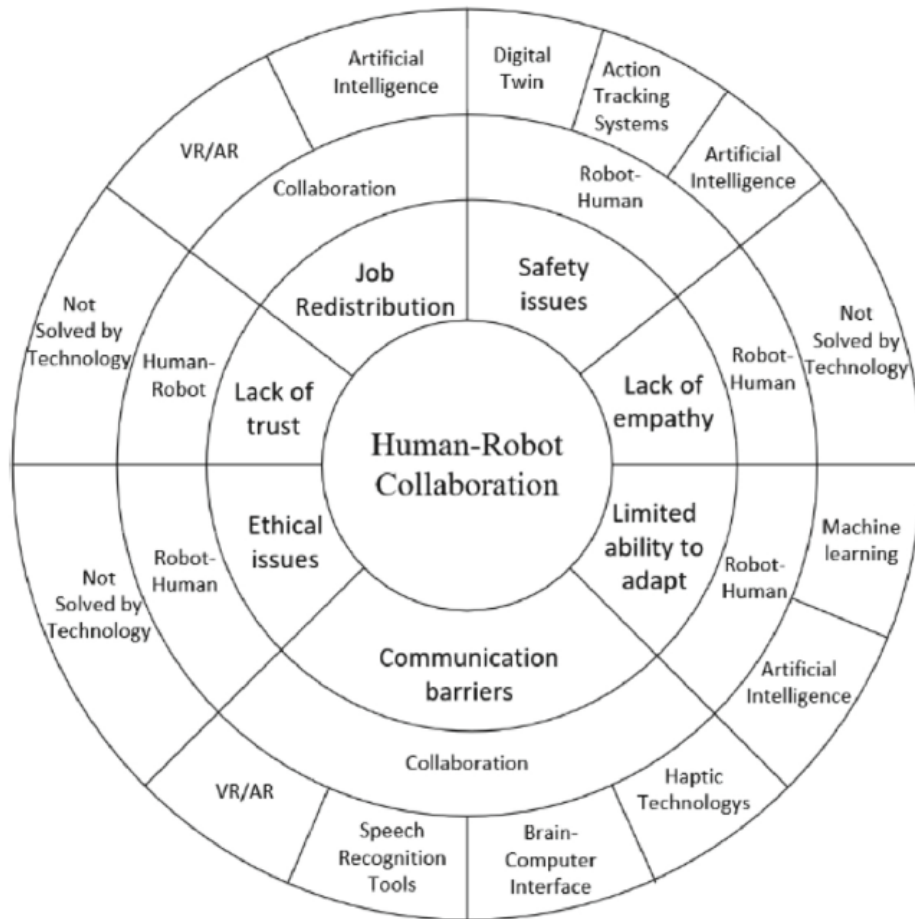


Рисунок 2.1 – Зв’язок аспектів взаємодії людини і робота з сучасними технологіями[136]

### 2.1.2 Цифровий двійник м’якого робота з пневматичним м’язовим приводом

Сучасне промислове виробництво рухається через технології, оцифрування та цифровізацію [137,138]. Одним із перспективних трендів у цьому напрямку, що сприяють підвищенню конкурентоспроможності продуктів і послуг, є цифрові близнюки. Цей термін вперше використав Майкл Грівз у 2002 році [139]. У 2017 році цифрові близнюки увійшли до 10 найважливіших стратегічних трендів 2018 року за версією дослідницької консалтингової компанії GartnerInc [140].

Згідно з опитуванням, проведеним компанією GartnerInc. у 2019 році щодо застосування IoT (Інтернет речей), організації, які впроваджують IoT, уже

використовують цифрові двійники (13%) або планують використовувати їх протягом року (62%) [141].

Цифровий двійник перевершує традиційні системи автоматизованого проектування, моделювання та сенсорні рішення IoT, оскільки вони враховують взаємодію між різними компонентами та процесами життєвого циклу [142, 143].

Основна ідея використання цифрового двійника для вивчення фізичного об'єкта належить NASA, яке вперше застосувало технологію цифрового близнюка під час своїх місій дослідження космосу в 1960-х роках. Кожен космічний корабель, який літав у космос, був точно відтворений у наземній версії, яка використовувалася персоналом NASA для вивчення та моделювання можливих подій у космосі [144].

Останнім часом немає єдності щодо визначення поняття «цифровий двійник». Проте кожне визначення цифрового близнюка не є вичерпним. Вони доповнюють один одного, враховуючи специфіку сфери використання, складність та інтеграцію технологій. У цій роботі пропонується використовувати наступне визначення: «Цифровий двійник – це тривимірна модель, яка описує властивості об'єкта та його стан».

Виходячи з наданого твердження, дослідження має дві чіткі цілі. Перша мета – розробити цифровий двійник для виробництва клітин, а друга – вдосконалити технологію цифрового близнюка для м'якого робота.

Цифровий двійник дозволяє моделювати та аналізувати різні сценарії, не вимагаючи прямої фізичної взаємодії. У виробництві клітин цифровий двійник можна використовувати для моделювання та оптимізації виробничого процесу, допомагаючи виявити потенційні проблеми або неефективність до їх виникнення.

У контексті м'якої робототехніки цифровий двійник можна використовувати для моделювання та імітації поведінки м'яких роботів, дозволяючи оптимізувати та покращувати дизайн без необхідності фізичного прототипування.

Процес створення «цифрового двійника» проходить такі основні етапи [145]:

1. Дослідження фізичного об'єкта або системи, що моделюється.
2. Інтеграція датчиків у фізичні об'єкти, файли відстеження, журнали та інші джерела для збору даних.
3. Інтеграція зібраної інформації у віртуальну модель за допомогою алгоритмів ШІ.
4. Застосування аналітики в цих моделях та обробка отриманих результатів.

Згідно з дослідженням [146], моделювання та плавна передача даних від однієї фази життєвого циклу до наступної фази є центральними для концепції цифрового близнюка.

Дослідження спрямоване на розробку моделі м'якого робота, який використовується в цифровому близнюку. Для досягнення зазначеної мети було сформульовано чотири цілі дослідження. Спочатку будуть проаналізовані процеси, що відбуваються всередині м'якого робота, що містить пневматичні м'язи. По-друге, буде розроблено імітаційну модель для дослідження поведінки м'якого робота. По-третє, буде створено тривимірну (3D) модель м'якого робота. Нарешті, буде згенерований цифровий двійник м'якого робота з пневматичними м'язами.

Цифрові близнюки все частіше використовуються в передових галузях для досягнення різних цілей. Наприклад, у промисловості [147], авіації [148] та автомобільній [149] промисловості.

Цифрові двійники можна використовувати для дублювання багатьох систем за допомогою багатьох різних методів для підтримки ряду рішень.

В основному сучасні розробки технології виробництва можна розділити на три тематичні напрями [150]. Перший напрямок досліджень – розробка цифрових дублікатів для конкретного продукту або компонентів у виробничому середовищі для отримання прогнозу поведінки або детального опису властивостей продукту [151]. Цей конкретний продукт можна

реалістично представити шляхом інтеграції математичних моделей і інформації датчиків із фактичної програми.

Іншим напрямком досліджень є розробка цифрового двійника повної виробничої системи або повної виробничої установки [152]. Метою є створення повного віртуального образу реального виробництва для отримання інформації про весь процес розробки продукту та можливості виявлення виробничих помилок на ранній стадії [153]. Крім того, повинна існувати двостороння система контролю між виробничими потужностями та продуктом, який буде виготовлено, щоб підтримувати процес прийняття рішень для найвищої ефективності виробництва в режимі реального часу.

Третім напрямком досліджень є розробка цифрового двійника конкретного виробничого процесу, наприклад, для процесів механічної обробки [154]. Мета полягає в тому, щоб відобразити процес обробки якомога реалістичніше та відобразити відповідні характеристики процесу в локальній роздільній здатності для опису фізичних і технологічних явищ протягом усього процесу [155]. Усі джерела даних, які мають відношення до процесу, мають бути пов'язані. Накопичені дані повинні бути структуровані та атрибутовані за допомогою інформаційної моделі [156].

Згідно з дослідженнями Deloitte, технологія «цифрових близнюків» швидко поширюється в таких галузях, як аерокосмічна промисловість, роздрібна торгівля, охорона здоров'я тощо [157].

У промисловості цифрові двійники використовуються для оптимізації роботи та обслуговування фізичних систем і виробничих процесів. Цифрові двійники розуміються як цифрові копії фізичних моделей, поведінку яких (цифрову та фізичну) можна спостерігати одночасно в режимі реального часу. Розроблені цифрові двійники дозволяють візуалізувати об'єкти або можуть бути використані для оцінки технологічних рішень. Цифрове представлення об'єктів забезпечує як розвиток окремих елементів, так і динаміку функціонування їх фізичного аналога. Занадто багато цифрових двійників обладнання, систем, окремих машин або навіть цілих підприємств

розробляється до початку великомасштабного та високошвидкісного виробництва [158]. Тобто цифрові двійники можуть імітувати будь-який аспект фізичного об'єкта чи процесу. Згідно зі звітом Deloitte, до 2023 року світовий ринок цифрових подвійних технологій досягне \$16 млрд [159].

Технологія цифрового близнюка змінює виробництво, змінюючи дизайн продукту, виробництво та обслуговування [160].

У 2021 році в аерокосмічній промисловості технології цифрових подвійників використовувалися для тестування та оцінювання, щоб перевірити цілісність функцій літака та їхню роботу в реальному середовищі. Прикладом застосування є оцінка характеристик лопатей аеродинамічного профілю в реактивних двигунах, які вони створюють у реальних умовах. Очікується, що на рівні підприємства аерокосмічна та оборонна промисловість покладатиметься на технологію цифрового близнюка для планування виробничих потужностей, віддаленого моніторингу в реальному часі та оптимізації процесів [161].

Використання технологій цифрових близнюків у будівництві допомагає виявити фактори ризику та забезпечує безпечне управління всіма етапами виробництва. Отримавши відповідну інформацію за допомогою технологій VR і AR, робітники можуть виконати попереднє моделювання процесу управління будівництвом і покращити порядок і безпеку [162].

Цифрові близнюки незамінні в авіаційній промисловості [163], особливо при вимірюванні швидкості літаків [164], експлуатації аеропортів [165], вимірюванні в аеродинамічній трубі [166], бойовій підготовці літаків [167, 168], навчанні технічного обслуговування літаків [169], збільшення пропускної спроможності аеропорту [170, 171] тощо.

За словами європейських експертів у транспортному секторі, цифрові близнюки можна використовувати для збору даних про продукт і упаковку та використання цієї інформації для виявлення потенційних недоліків і повторюваних тенденцій для покращення майбутньої діяльності.



Склади та компанії також можуть використовувати цю технологію для створення точних 3D-моделей своїх центрів і експериментувати зі змінами планування або впровадженням нового обладнання, щоб побачити їх вплив. Крім того, логістичні центри можуть створювати цифрових двійників і використовувати їх для тестування різних сценаріїв і підвищення ефективності. Мережі доставки можуть використовувати цю технологію для надання інформації в реальному часі, щоб скоротити час доставки та додатково допомогти автономним транспортним засобам на їхніх маршрутах [172].

## **2.2 Підхід щодо оцінювання конструкції систем захоплення деталей для виробництв загального машинобудування**

Штучний м'яз МакКіббена був першим пневматичним м'язом, розробленим у 1960-х роках у Японії. Ці переваги полягають у високій потужності, малій вазі, м'якості та податливості з точки зору матеріалу та руху. Пневматичний штучний м'яз McKibben – це пристрій, який складається з рукавної нитки з хімічного волокна та гумової трубки. Коли повітря вводиться в м'яз, гумова трубка радіально розширюється, а аксіально скорочується. Цей процес деформації припиняється, коли кут обплетення досягає свого граничного значення. На практиці штучний м'яз закріплюється на одному кінці вузлом, а інший підключається до подачі повітря та фіксується за допомогою великого з'єднувача та клею. Регулюючи внутрішній тиск повітря, привід стискається і створює силу скорочення, яка використовується для руху маніпулятора [173]. Ця стаття також містить дослідження щодо покращення механічних властивостей маніпулятора на основі м'язів МакКіббена та підвищення його зносостійкості та міцності. Це дослідження базується на подібності пневматичних штучних і природних м'язів [174]. Це послужило подальшим розвитком, розширивши сферу застосування маніпулятора для промислового застосування.

Поле роботів-маніпуляторів континууму має історію з 1960-х років, але більш офіційні дослідження щодо їх проектування та керування почалися в

1990-х роках. Ці роботи представляють собою зміну конструкції маніпулятора від окремих жорстких ланок до механізмів з пружними структурами, які можуть безперервно згинатися по всій своїй довжині. Ці пружні структури, або елементи «континууму», забезпечують широкий діапазон рухів і зручність, що робить їх придатними для завдань, що вимагають високої спритності та можливості доступу до обмеженого простору. [175]

Тривають дослідження щодо вдосконалення та модифікації пневматичних м'язів за допомогою повітря під тиском для створення руху.

У роботі [176] представлений м'який робот-амфібія з трьома приводними ланками в ногах і чотирма приводами в корпусі (рис. 2). Робот використовує тонкі, м'які приводи McKibben для досягнення двох типів згинання: у ногах для руху та в тілі для додаткової мобільності. Властивості корпусу на згинання досягаються за рахунок деформації пластикової пластини, яка допомагає роботу імітувати пересування саламандри під час ходьби. Автори також досліджують вплив зміни певних параметрів, таких як частота та вхідний тиск, на швидкість і стабільність руху при ходьбі. Дослідження [177] пояснило кінематику обертання та особливості згинання запропонованої руки робота та проілюструвало напрямки можливих рухів. Прототипом схеми для конструювання м'язового пневматичного приводу з подвійним вигином став рух змійки у двох напрямках [178].

Це дозволить у майбутньому розробляти більших роботів для підводного плавання.

Автори роботи [179] виявили наступні переваги пневматичних м'язових актуаторів (ПМА): низька вартість, яка становить близько 10 дол., простота у виготовленні, широкі габаритні можливості захоплення, безпечність для об'єктів малої жорсткості та мала маса (0,18 кг). Його інерція також низька, що потенційно робить його безпечнішим для роботи поблизу людей. Як правило, РМА складається з внутрішньої гумової трубки, покритої плетеною втулкою з двома клемами з міцного матеріалу, які міцно закріплені, щоб уникнути витoku

повітря. Одна з клем має невеликий отвір для входу та виходу активованого повітря [180].

У роботі [181] двосегментна м'яка рука робота сконструйована з використанням простих ретракторів і приводів розгиначів. Це дозволяє йому розширюватися, стискатися та згинатися в кількох напрямках. Автори роботи [182] створили робота під назвою «Октарм». Їх прообразом є щупальця восьминога. Пневматичні м'язи-розгиначі працюють на роботах «OctarmContinuum».

Роботи Octarm мають три незалежно керовані секції на 9 DOF. Кожна секція живиться трьома незалежно контрольованими пневматичними тисками, що подаються на м'язи-розгиначі. Таким чином, робот без тиску має мінімальну довжину і продовжується до своєї максимальної довжини в залежності від приведення в дію.

Дослідження [183, 184, 185, 186, 187] виявили обмеження, пов'язані з традиційним м'яким приводом.

Ці обмеження:

- пневматичний штучний м'яз створює силу скорочення лише при натисканні;
- привід висунення генерує силу розтягування лише при застосуванні тиску;
- кожен тип м'якого приводу має постійну жорсткість на певній довжині.

Тому в дослідженні [188] конструкція м'якого актуатора базується на морській зірці. Морська зірка складається з таких елементів, як сполучна тканина, кальцитова кістка та міжкістковий м'яз, що дозволяє їй активно регулювати структурну жорсткість свого тіла [189]. Оскільки переміщення пружного тіла приводу залежить від деформації тканини, особливо від характеристик матеріалу, який використовується в його конструкції, цей етап компенсує дві анізотропні тканини (ткану тканину та еластичну тканину) та еластомер (силікагель) для розвинути підрядник і розгинач відповідно.

Нарешті, вони об'єднані в структуру внутрішньої та зовнішньої камер і починаються як антагоністичний актуатор на основі тканини розгиначів і скоротників (ЕСФА). Якщо в обох камерах регулюється тиск, можна досягти зміни жорсткості приводу.

Відповідно до методології, першим етапом розробки цифрового двійника є аналіз фізичного об'єкта та даних, які надходять від датчиків. Об'єктом було обрано робота з пневматичними приводами. Такі роботи є найпопулярнішими в усьому світі, але їх найбільша проблема – погана керованість, тому їм потрібно розробити цифрового двійника.

Система керування роботом (рис. 2.2) складається з датчиків тиску (1), пневматичних приводів (2), насоса-компресора (3), датчика положення (4) та комп'ютера керування налаштуваннями (5).

Завдяки роботі компресора (3) можна регулювати тиск у 6 пневматичних м'язах (2). Цей тиск можна виміряти датчиками тиску (1). Для відстеження руху використовується датчик положення (4). Для дослідження такої системи пропонується використовувати комп'ютер, який використовується для моніторингу та керування.

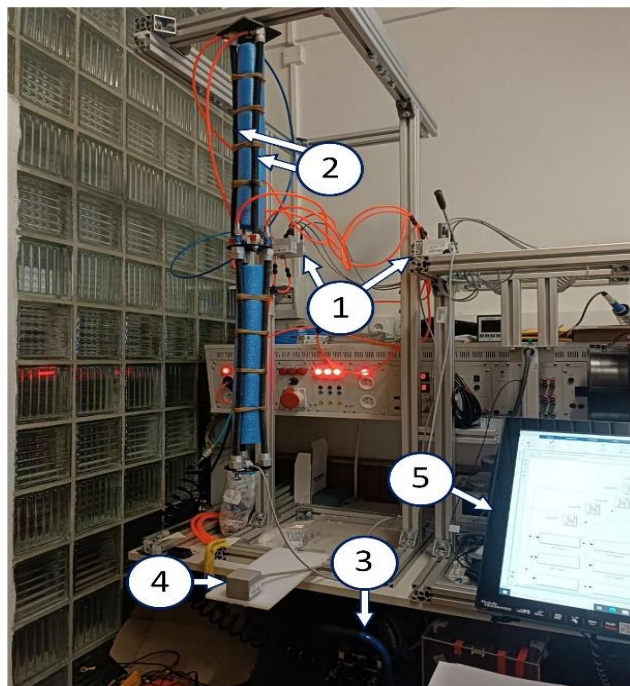


Рисунок 2.2 – Робот з пневматичним м'язом [190]

Процес роботи в трубках пропонуваної системи можна розділити на чотири стадії: надування, стиснення, розслаблення і здування. Під час надування стиснене повітря або газ вводиться в еластомерну трубку м'яза через вхідний отвір, спричиняючи подовження та збільшення діаметра м'яза. Етап скорочення включає закриття входу та відкриття вихідного отвору, що дозволяє повітрю або газу виходити з трубки, що спричиняє зменшення діаметра м'яза та скорочення довжини.

Стадія релаксації слідує за стадією скорочення, під час якої вхідний і вихідний отвір відкриваються, щоб повітря або газ могли вільно протікати через трубку. Коли повітря або газ проходять через трубку, м'яз розслабляється і повертається до початкової довжини та діаметра. Останнім етапом є здування, яке передбачає вивільнення всього повітря або газу з м'яза, щоб підготувати його до наступного циклу надування та скорочення.

#### Моніторинг параметрів

Створення цифрового близнюка для робота, оснащеного пневматичними м'язами, включає в себе кілька критичних кроків, включаючи збір даних датчиків. Параметри, що цікавили в цьому дослідженні, включали координати осей X, Y і Z, а також кути повороту (крен, тангаж і поворот). Система моніторингу була розроблена, щоб полегшити збір цих даних за допомогою середовища MatlabSimulink, як показано на рис. 2.3.

Система моніторингу включала шість блоків налаштування тиску (P1-P6), які регулювали рівні тиску від 0 до 5 бар. Потім задані значення, згенеровані цими блоками, передавалися на комп'ютер через зовнішню карту захоплення humusoft mf634. Значення тиску реєстрували з частотою 120 Гц для пневматичних м'язів Muscles 1-6.

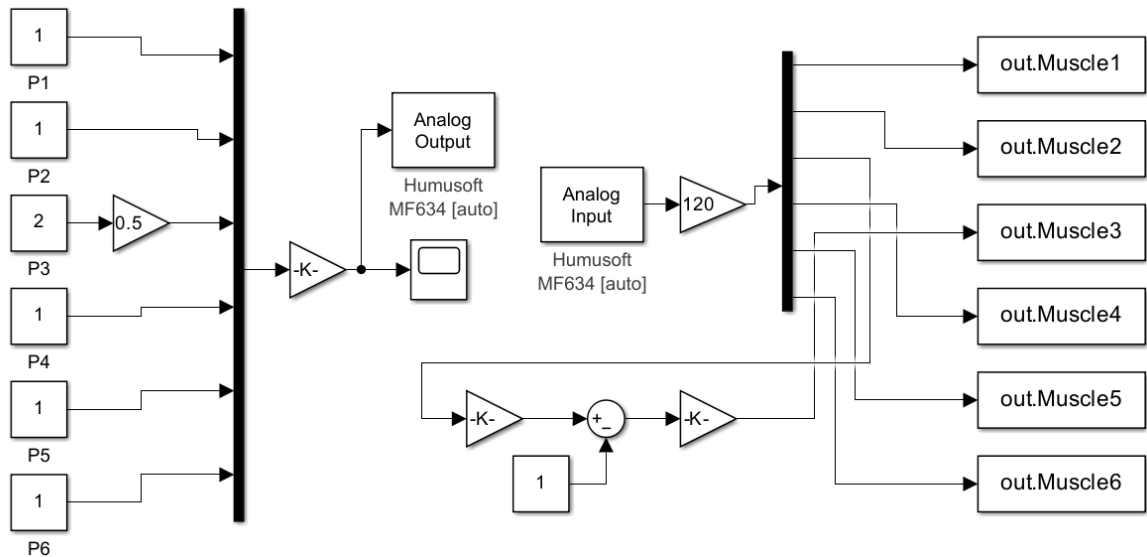


Рисунок 2.3 – Пропонована система моніторингу [190]

Запропонована схема моніторингу забезпечує системний підхід до збору даних про відповідні параметри, необхідні для створення точного цифрового двійника пневматичного м'язового робота. Використовуючи MatlabSimulink, можна було точно отримувати дані в реальному часі, необхідні для розробки ефективного цифрового двійника.

#### Імітаційна модель

Створення цифрового двійника м'якого робота неможливо без імітаційного моделювання. Для імітаційного моделювання пропонується використовувати програмний пакет Simscape та середовище MATLAB Simulink.

Схема для дослідження запропонована на рис. 2.4. Цей малюнок містить різні компоненти, включаючи блок аналогового введення, який полегшує встановлення координат  $X$ ,  $Y$  та  $Z$ . Потім ці координати передаються до пневматичних м'язів через зовнішню карту захоплення, яка регулює тиск, що прикладається до м'язів. У свою чергу, тиск на м'язи приводить робота в рух.

На додаток до блоку аналогового введення та зовнішньої плати захоплення, схема містить додаткові компоненти, необхідні для цілей моделювання. Ці компоненти включають блок конфігурації механізму, який дозволяє користувачеві встановлювати силу тяжіння, яка діє на робота. Блок світової рамки також важливий, оскільки він закріплює робота в системі

координат. Нарешті, блок конфігурації розв'язувача необхідний для встановлення параметрів моделювання, таких як розмір кроку в часі та тривалість моделювання, серед інших. Разом ці блоки дозволяють симулювати рух робота за різних умов.

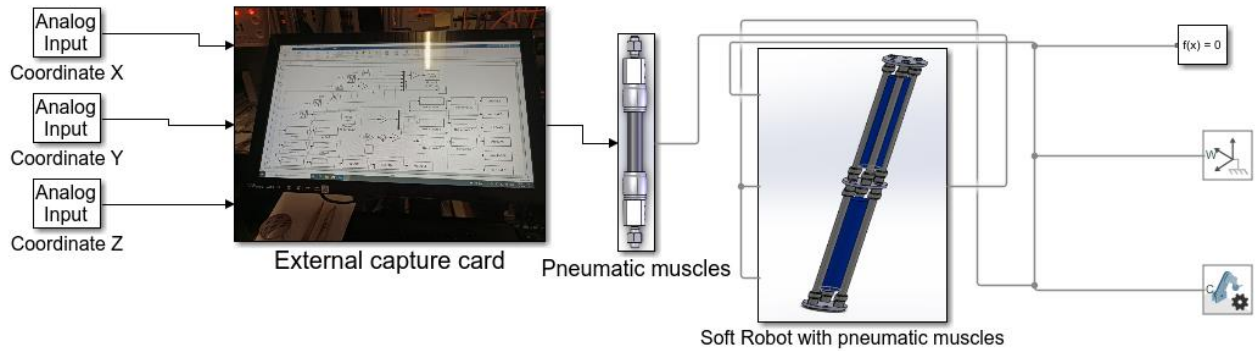


Рисунок 2.4 – Схема для моделювання [136]

Результати дослідження координат і кутів, отримані з вимірювань тиску, представлені в табл.2.1–2.6 [136]. Дані показують пропорційну залежність між тиском і спостережуваними значеннями при тиску в діапазоні від 1 до 4 бар. Однак, коли тиск наближається до 5 бар, залежність стає нелінійною. Це явище пояснюється змінами в поведінці пневматичного м'яза через підвищення тиску. Зокрема, м'яз стає більш жорстким через розширення його стінки під зовнішнім тиском, що призводить до більшого опору зовнішній силі.

Таблиця 2.1 – Координата X, см

Порядковий номер пневматичного м'яза	Тиск, бар				
	1	2	3	4	5
P1	3,703	8,48	14,446	18,287	16,739
P2	0,637	4,705	10,557	17,669	23,488
P3	-6,297	-15,831	-30,511	-48,409	-66,526
P4	0,205	-1,2	-3,221	-6,795	-9,231
P5	-0,041	-2,864	-7,345	-13,401	-17,933
P6	4,42	8,314	14,13	19,707	20,434

Таблиця 2.2 – Координата Y, см

Порядковий номер пневматичного м'яза	Тиск, бар				
	1	2	3	4	5
P1	2,388	9,225	19,183	31,159	40,045
P2	-6,776	-13,055	-23,041	-32,954	-41,52
P3	-1,204	-1,227	-1,52	-2,508	-3,368
P4	-3,38	-6,73	-11,694	-17,806	-21,188
P5	1,316	4,098	7,894	12,261	14,219
P6	-0,633	-0,121	1,01	1,745	1,56

Таблиця 2.3 – Координата Z, см

Порядковий номер пневматичного м'яза	Тиск, бар				
	1	2	3	4	5
P1	-31,351	-31,797	-33,411	-38,878	-48,517
P2	-31,393	-31,918	-33,451	-37,852	-48,672
P3	-31,085	-30,658	-29,371	-26,704	-19,046
P4	-31,366	-31,746	-32,736	-35,261	-38,964
P5	-31,318	-31,594	-32,342	-34,471	-38,582
P6	-31,47	-31,919	-33,125	-36,535	-42,757

Таблиця 2.4 – Кут нахилу, град

Порядковий номер пневматичного м'яза	Тиск, бар				
	1	2	3	4	5
P1	118,004	117,766	118,084	122,194	131,853
P2	118,633	119,966	122,603	125,037	124,737
P3	117,171	116,825	116,971	118,695	118,327
P4	117,397	117,341	117,38	118,357	124,622
P5	117,529	118,225	120,73	127,116	136,161
P6	118,113	118,57	119,062	117,349	110,636

Крім того, розмір пневматичного м'яза збільшується у відповідь на підвищений тиск, що призводить до збільшення вихідної сили, оскільки доступна площа поверхні для штовхання зовнішнього об'єкта збільшується. Тим не менш, слід бути обережним, застосовуючи тиск, що перевищує критичний поріг у 8 бар, оскільки це може пошкодити або розірвати м'яз.



Таблиця 2.5 – Кут нахилу, град

Порядковий номер пневматичного м'яза	Тиск, бар				
	1	2	3	4	5
P1	0,86	2,558	5,622	12,506	20,293
P2	-0,77	-2,227	-6,623	-17,509	-40,002
P3	-1,617	-2,705	-4,485	-7,28	-15,776
P4	-2,894	-6,752	-13,831	-27,166	-41,248
P5	0,7	5,258	13,087	28,502	50,801
P6	-0,104	-0,806	-2,83	-8,189	-14,77

Таблиця 2.6 – Кут повороту, град

Порядковий номер пневматичного м'яза	Тиск, бар				
	1	2	3	4	5
P1	-1,166	-0,319	4,205	16,181	33,058
P2	-0,604	-1,716	-2,476	1,956	3,427
P3	0,804	4,129	8,796	15,893	32,698
P4	-3,434	-6,267	-11,621	-22,871	-39,771
P5	-2,475	-1,886	-1,051	-0,199	0,959
P6	-0,525	3,234	12,239	32,208	63,192

Заява описує порівняння фізичного об'єкта та його цифрового двійника. Порівняння ґрунтувалося на суперпозиції тиску в різних м'язах, що призвело до розподілу координат у часі. На рис. 2.5–2.7 [136] порівнюються координати X, Y і Z фізичного об'єкта та його цифрового двійника.

У результаті проведення 1442 експериментів була визначена максимальна відносна похибка між фізичним роботом і його цифровим близнюком, яка досягала майже 10%, що можна пояснити наявністю гістерезису і процесів деформації м'язів у фізичному роботі при одночасному зміні тиск у м'язах вище 4 бар і може бути знижений за рахунок технічних удосконалень робота та оптимізації системи управління.

Це дослідження базується на попередніх дослідженнях у галузі робототехніки. Як зазначає [191], у попередній роботі досліджувалося використання цифрових двійників для промислових роботів. Ця робота особливо актуальна для нашого дослідження, яке також використовує технологію цифрових близнюків для покращення продуктивності роботизованої системи.

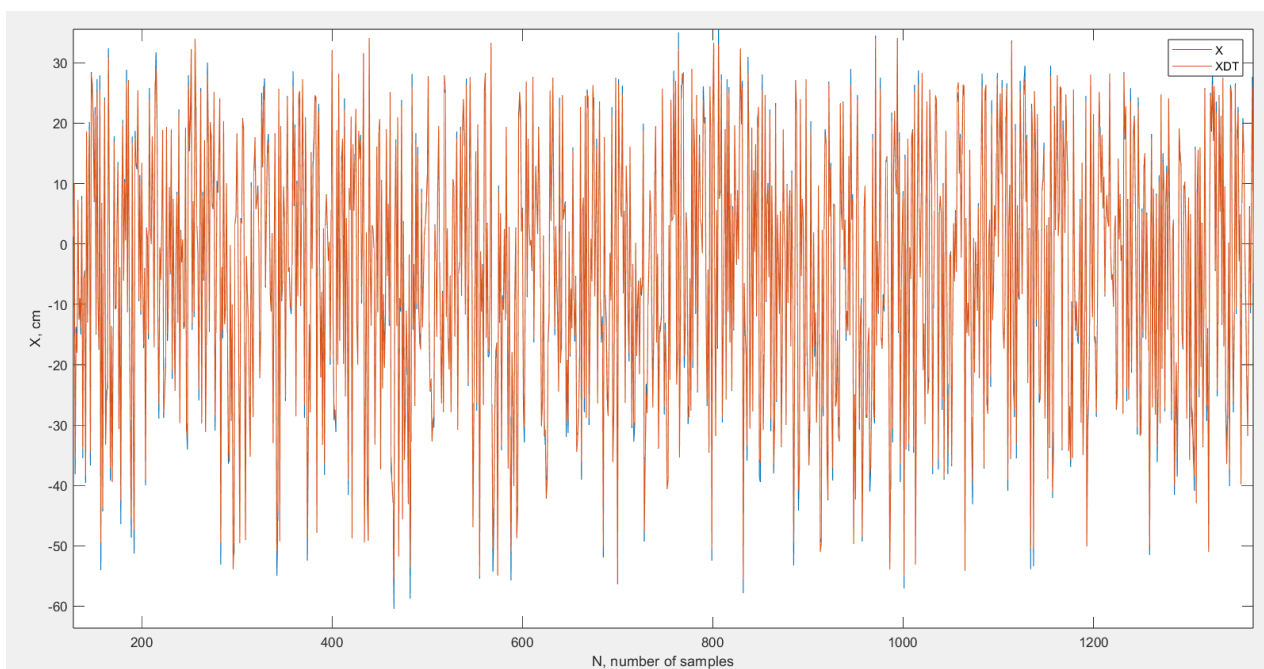


Рисунок 2.5 – Порівняльна координата  $X$  для фізичного об'єкта та XDT для цифрового двійника [136]

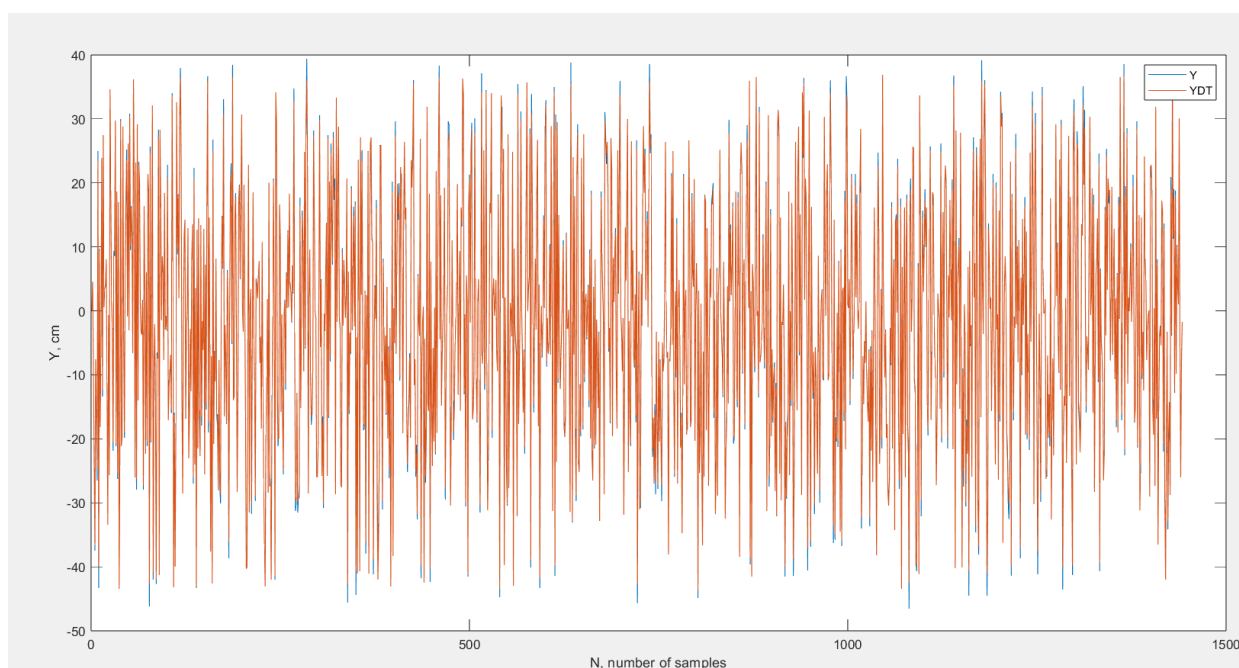


Рисунок 2.6 – Порівняльна координата  $Y$  для фізичного об'єкта та YDT для цифрового двійника [136]

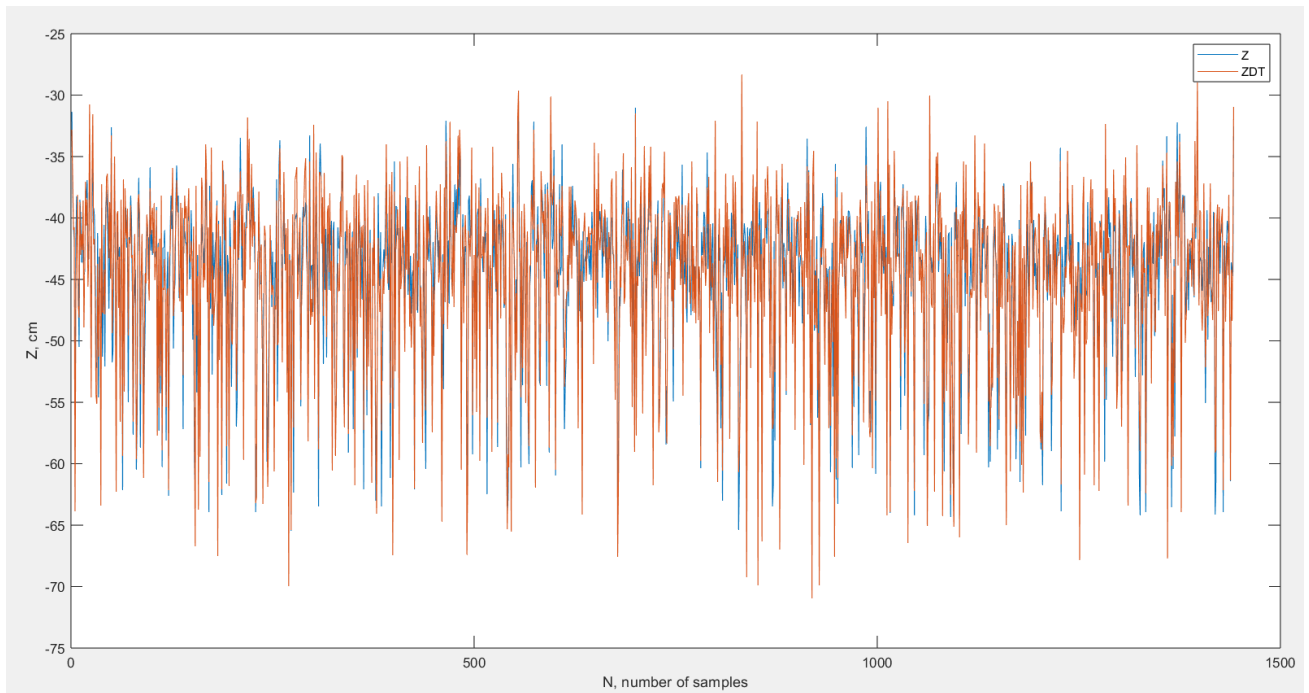


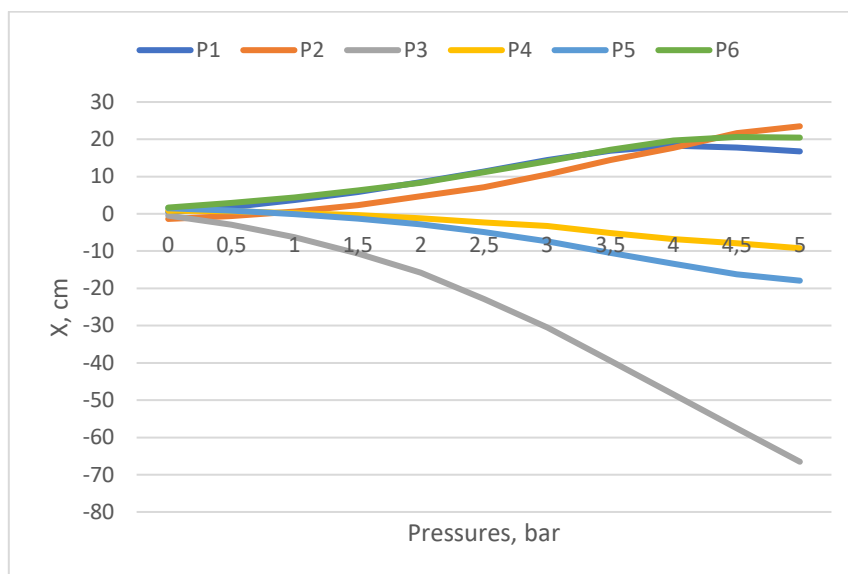
Рисунок 2.7 – Порівняльна координата  $X$  для фізичного об'єкта та ZDT для цифрового двійника [136]

Крім того, хоча автори [192] розробили модель роботизованої системи, вони не створили цифрового двійника. Тим не менш, їхня робота дає цінну інформацію про поведінку та можливості робота, яка може стати основою для розробки та впровадження технології цифрових близнюків у майбутніх дослідженнях.

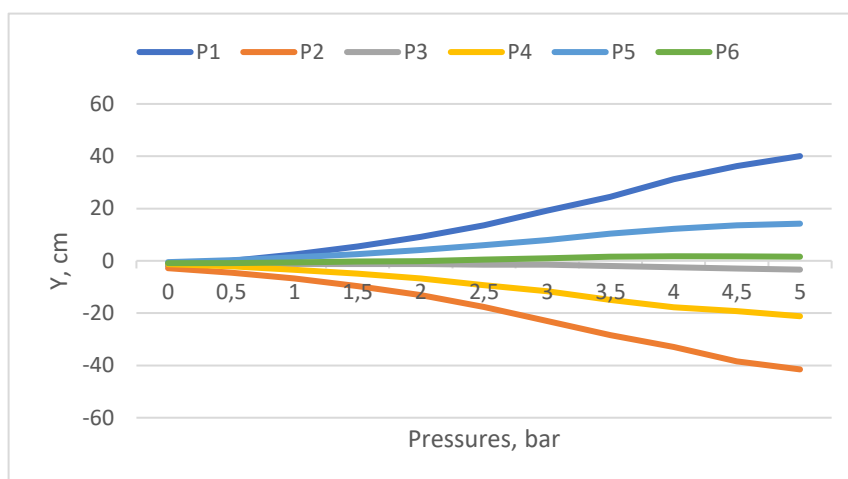
Таким чином, наше дослідження спирається на попередні дослідження, використовуючи технологію цифрових близнюків для покращення продуктивності роботизованої системи.

В результаті експерименту отримано залежності, що описують кінематику м'якого руху робота. На рис. 2.8 [190] показано лінійну залежність до значення тиску 4 бар.

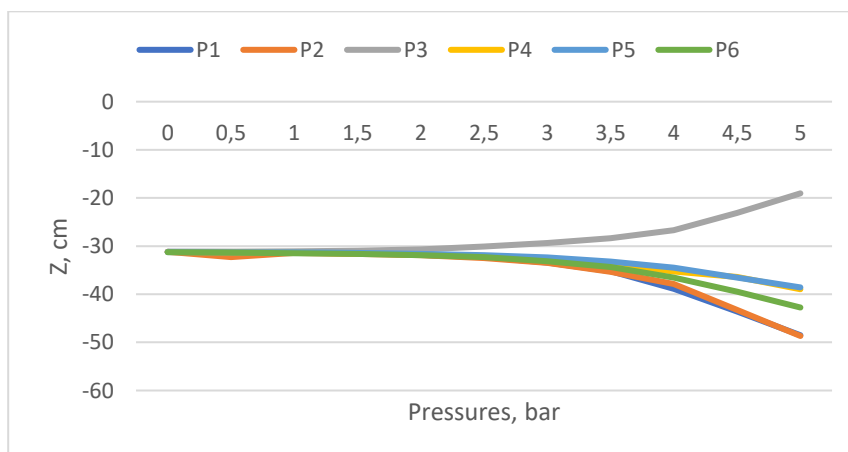
Після 4 бар спостерігається нелінійна залежність. Цей зв'язок між переміщенням м'якого робота та тиском зумовлений властивостями матеріалу, який використовується для виготовлення пневматичних м'язів м'якого робота.



а)



б)



в)

Рисунок 2.8 – Залежності координат X (а), Y (б) і Z (в) від тиску[190]

Ці залежності можуть бути використані для опису моделі руху пневматичного м'яза в тривимірному просторі.

Ці залежності можна використовувати для опису моделі руху пневматичного м'яза в тривимірному просторі, як показано на рис. 2.9.

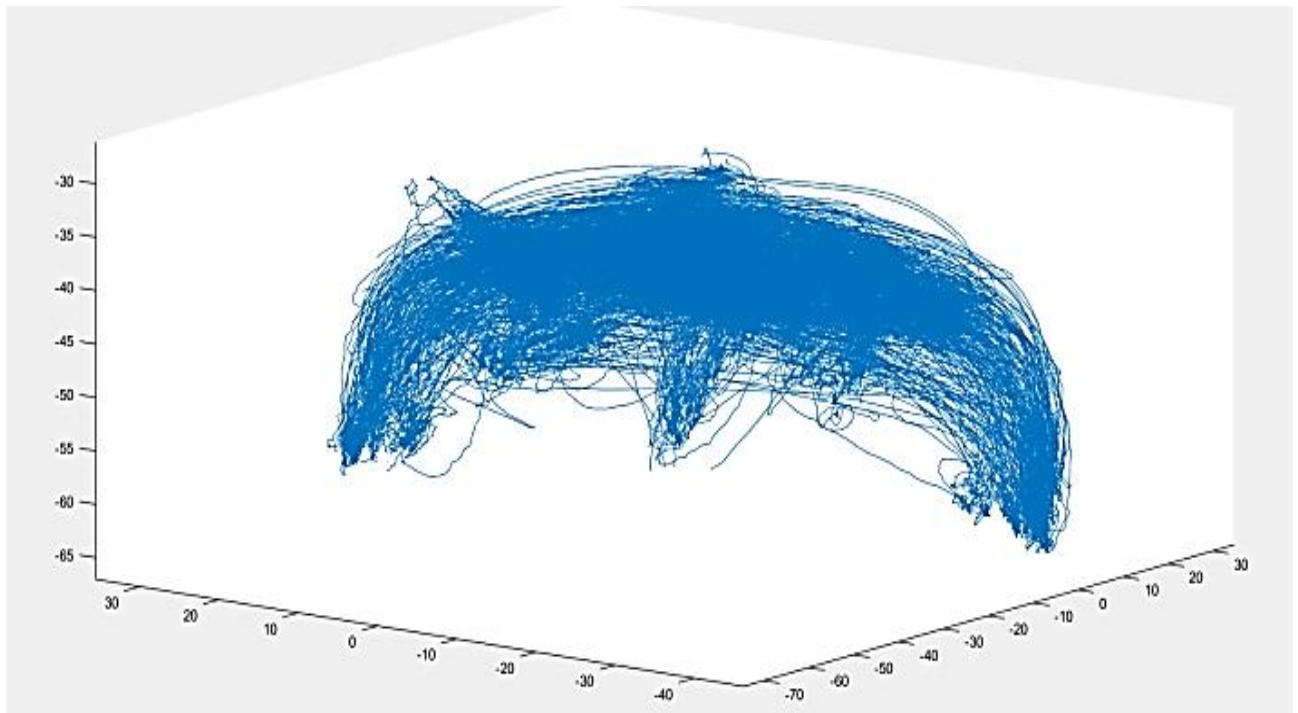


Рисунок 2.9 – Імітаційна модель руху пневматичного робота[190]

Однією з найбільших проблем пневматичних м'яких роботів є пошук методів і моделей, які б найбільш точно описували експериментальні значення. Наведені графіки (рис. 2.8, 2.9) дозволяють визначити динамічні рухи м'якої робототехніки та знайти її положення в будь-який момент часу.

Ці основні операції відкривають двері для програм, де роботи тісно співпрацюють з людьми. Тому в останні десятиліття зростає інтерес до розробки нових типів пневматичних м'яких роботів.

## **2.3 Системи захоплення деталей та вузлів для виробництв загального машинобудування**

### **2.3.1 Автоматизований пристрій для оброблення деталей типу вилки**

Для оброблення деталей типу вилок найчастіше використовують універсально-складальні пристосування [193, 194, 195], 196, 197, 198, 199]. Основними недоліками даної конструкції є відсутність інструментальної

доступності до оброблюваних поверхонь, що призводить до збільшення допоміжного часу через необхідність оброблення за декілька установів та призводить до зростання похибок розташування поверхонь, наявність великої кількості деталей, що знижує точність та жорсткість. Також універсально-складальні пристосування недоцільно використовувати на роботизованих ділянках через складність автоматизації затискання та розтискання.

Найбільш близькими за технічною суттю до корисної моделі, вибрані як найближчий аналог, є гвинтові лещата зі спеціальними накладками [200, с. 170, фіг. 118], що складаються із силового, базуючого та затискного механізмів. Як силовий механізм виступає ходова різь, як механізм базування – призма та плита, як затискний механізм – захват. Так як закріплення заготовки відбувається вручну за допомогою рухомої губки, дане рішення не підходить для роботизованих ділянок. Також до недоліків можна віднести необхідність обробки за два установи, що призведе до збільшення допоміжного часу.

В основу роботи поставлена задача спроектувати верстатний пристрій для обробки деталей типу вилок з циліндричною бобишкою з повною інструментальною доступністю, що дозволить скоротити непродуктивні витрати часу, та з можливістю застосування його в роботизованих ділянках із забезпеченням їх гнучкості. Також пристрій повинен швидко та надійно фіксувати заготовку та мати просту модульну конструкцію для можливості модернізації при необхідності.

Поставлена задача вирішується тим, що у автоматизованому верстатному пристрої для деталей типу вилки, який містить силовий та затискний механізми, згідно з корисною моделлю, силовий механізм складається з пневматичного циліндра з інтегрованою клинковою передачею, а затискний механізм у вигляді призм кріпиться до рухомих елементів клинкової передачі, причому силовий механізм кріпиться до базової плити, на яку встановлені шпонки для базування на столі фрезерного верстата.

Також у автоматизованому верстатному пристрої для деталей типу вилки на базову плиту встановлюється базова деталь для базування верстатного пристрою у токарному патроні при необхідності.

У конструкції автоматизованого верстатного пристрою для можливості застосування його в роботизованих ділянках силовий механізм складається з пневматичного циліндра з інтегрованою клинвою передачею. Повна інструментальна доступність забезпечується затискним механізмом у вигляді призму, який кріпиться до рухомих елементів клинвої передачі.

Так як силовий механізм кріпиться до базової плити, на якій встановлені шпонки для базування на столі фрезерного верстата, а також на базову плиту встановлюється базова деталь для базування верстатного пристрою у токарному патроні, при необхідності забезпечується гнучкість виробничої ділянки.

Суть розробки пояснюється кресленнями, де:

- на рис. 2.10 зображено тривимірну модель верстатного пристрою;
- на рис. 2.11 зображені конструктивні елементи верстатного пристрою;
- на рис. 2.12 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо затискати даним верстатним пристроєм, для оброблення деталей типу вилок мінімальних розмірів;
- на рис. 2.13 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо затискати даним верстатним пристроєм, для оброблення деталей типу вилок мінімальних розмірів, розріз А-А;
- на рис. 2.14 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо затискати даним верстатним пристроєм, для оброблення деталей типу вилок максимальних розмірів.
- на рис. 2.15 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо затискати даним верстатним пристроєм, для оброблення деталей типу вилок максимальних розмірів, розріз.

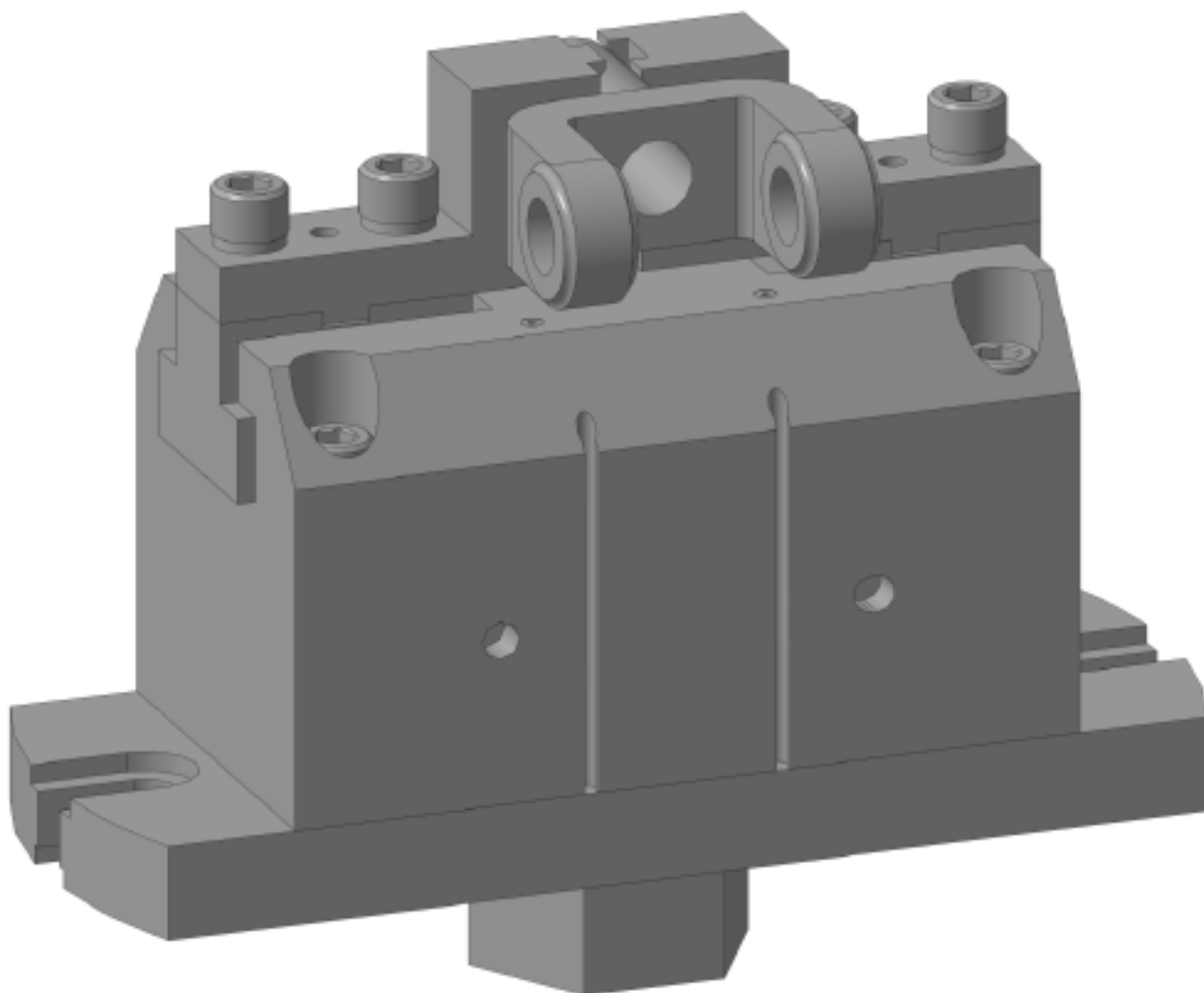


Рисунок 2.10 – Тривимірна модель верстатного пристрою[201]

Конструкція автоматизованого верстатного пристрою для оброблення деталей типу вилки складається з базової плити 1 (рис. 2.2), на якій установлений пневматичний циліндр 2 з інтегрованим клиновим механізмом. Затискний механізм у вигляді призм 3, 4 кріпиться до рухомих елементів 5, 6 клинної передачі за допомогою гвинтів 7 з пружинними шайбами 8 та базуються за допомогою штифтів 9.



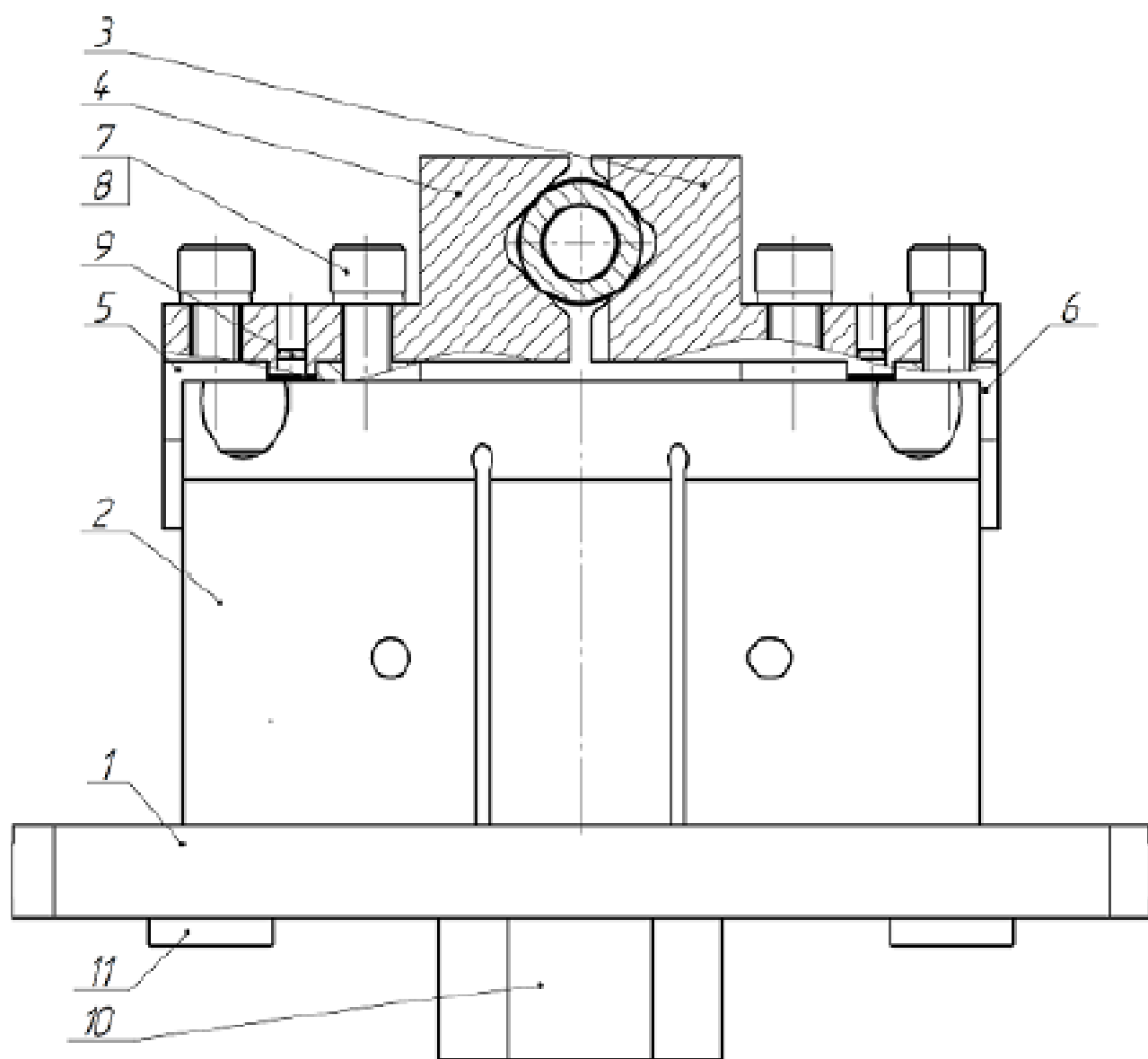


Рисунок 2.11 – Конструктивні елементи верстатного пристрою [201]

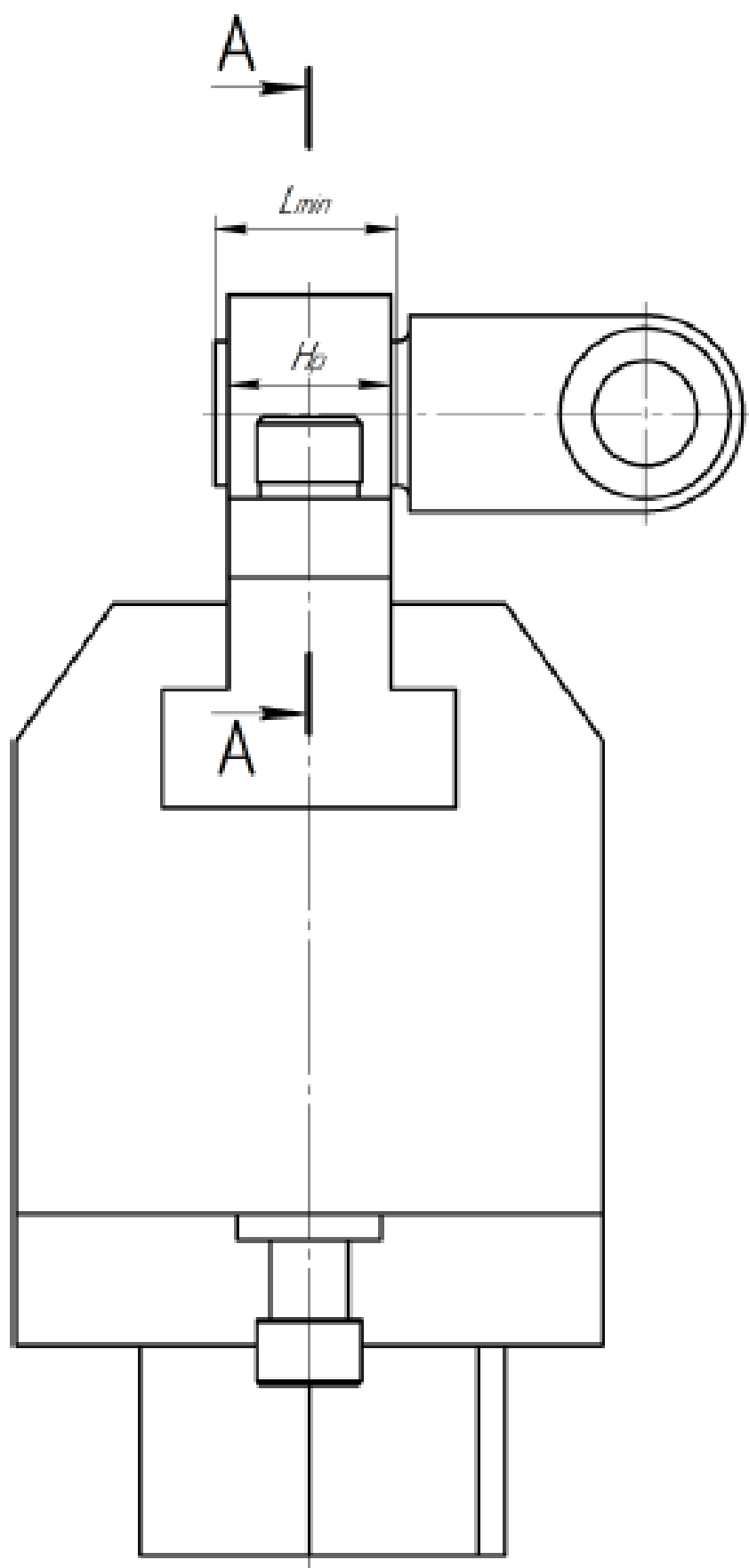


Рисунок 2.12 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо затискати даним верстатним пристроєм, для оброблення деталей типу вилок мінімальних розмірів [201]

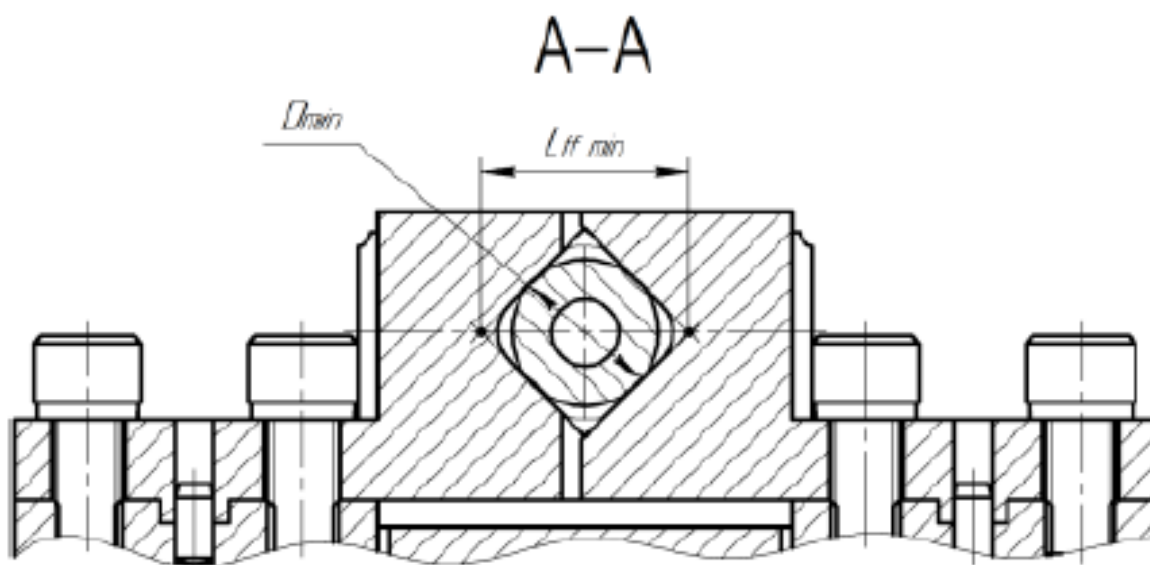


Рисунок 2.13 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо затискати даним верстатним пристроєм, для оброблення деталей типу вилок мінімальних розмірів, розріз А-А [201]

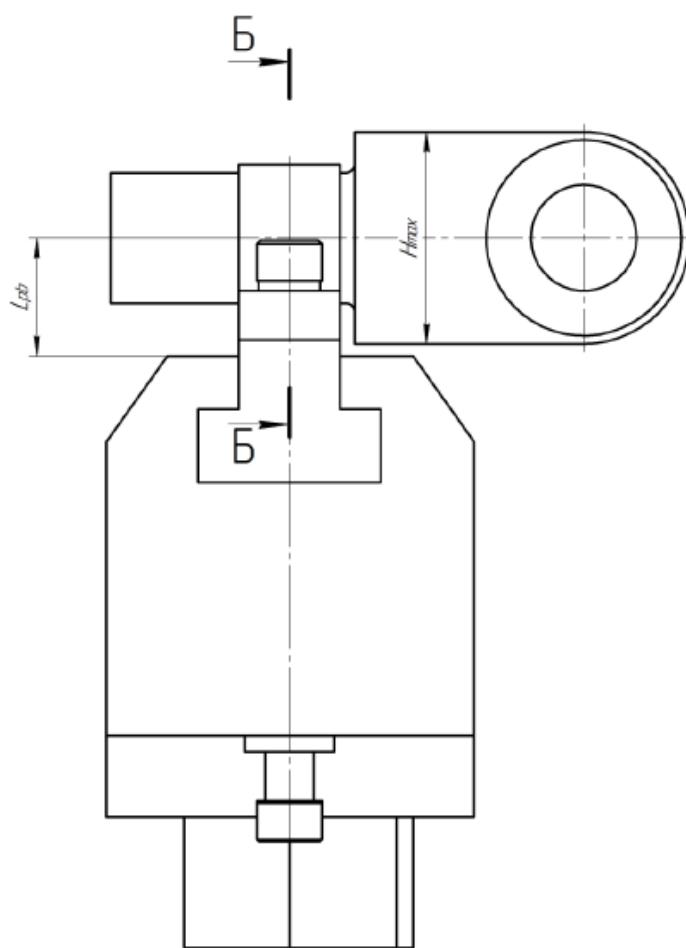


Рисунок 2.14 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо затискати даним верстатним пристроєм, для оброблення деталей типу вилок максимальних розмірів [201]

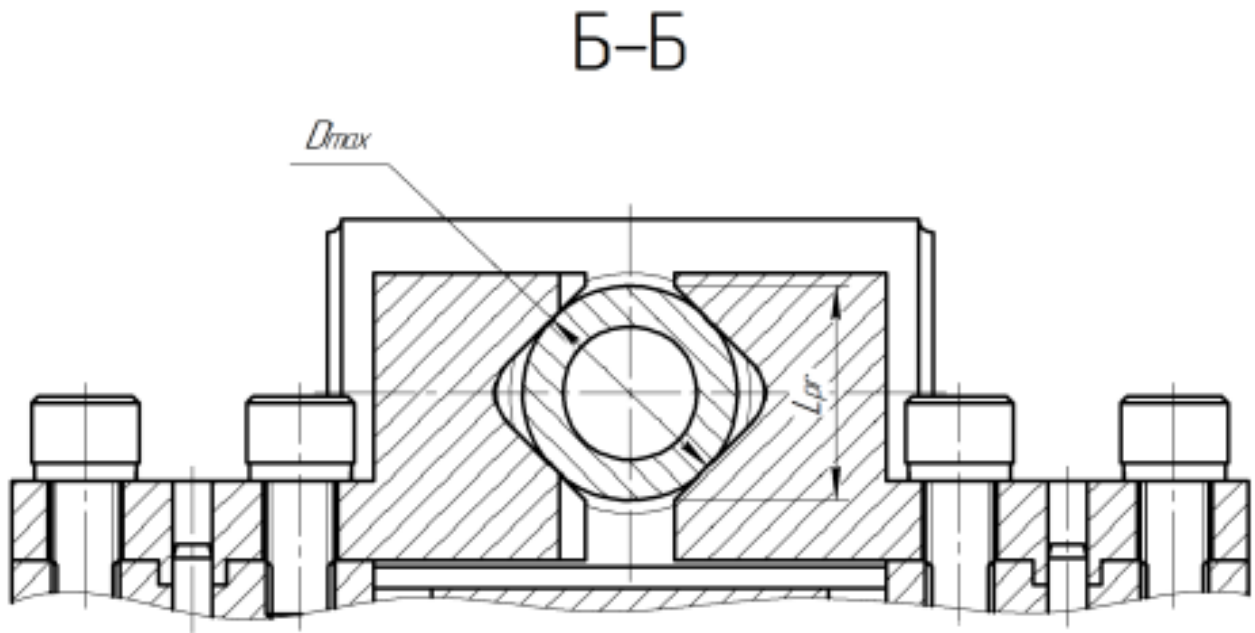


Рисунок 2.15 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо затискати даним верстатним пристроєм, для оброблення деталей типу вилок максимальних розмірів, розріз Б-Б [201]

Для можливості закріплення верстатного пристрою на столі верстата на базову плиту 1 встановлені шпонки 11. При необхідності закріплення верстатного пристрою в токарному патроні на базову плиту встановлюється базова деталь 10.

Мінімальний діаметр бобишки при захопленні деталі за циліндричну поверхню  $D_{\min}$ , мм, становить:

$$D_{\min} = 0,7 \cdot L_{ff\min} + 2 \cdot L_{sft},$$

де  $L_{ff\min}$  – відстань між точками, що утворені перетином площин, які утворюють робочу поверхню призм при мінімальній відстані між рухомими елементами клинового механізму, мм;

$L_{sft}$  – додаткова відстань, що гарантує затискання деталі, мм.

Мінімальна довжина бобишки при захопленні деталі за циліндричну поверхню  $L_{\min}$ , мм, становить:

$$L_{\min} = H_p + 2 \cdot L_{\text{sft}},$$

де  $H_p$  – ширина призми, мм;

Максимальний діаметр бобишки при захопленні деталі за циліндричну поверхню  $D_{\max}$ , мм, становить:

$$D_{\max} = 2 \cdot (0,7 \cdot L_{\text{pr}} - L_{\text{sft}}),$$

де  $L_{\text{pr}}$  – довжина призматичної поверхні, мм.

Максимальна висота деталі  $H_{\max}$ , мм, становить:

$$H_{\max} = 2 \cdot (L_{\text{pb}} - L_{\text{sft}}),$$

де  $L_{\text{pb}}$  – відстань від центру перетину площин, які утворюють призматичну поверхню призм до корпусу пневматичного циліндра, мм;

Точність розміщення заготовки відносно цього пристрою, при застосуванні в ділянці з роботами, забезпечується промисловим роботом, при обслуговуванні верстата людиною можна використовувати вимірювальний шуп чи упор, який буде закріплений в шпинделі верстата для збереження інструментальної доступності.

Опис алгоритму роботи ділянки з роботизованим пристроєм: промисловий робот захоплює деталь з лотка, базуючи її за циліндричні поверхні вух та забезпечуючи паралельність осі бобишки відносно захоплювального пристрою робота. Далі робот фіксує вже деталь, яку було оброблено на верстаті, а заготовка встановлюється в розроблений пристрій, забезпечуючи конструктивні вимоги, зокрема, перпендикулярність торцевих поверхонь вух відносно захоплювального пристрою. Потім заготовка затискається. Далі отриманий виріб подається в тару для готових деталей.

### 2.3.2 Автоматизований верстатний пристрій для оброблення деталей типу шатунів

Для оброблення шатунів широко використовується проста та гнучка конструкція універсально-збірною пристрою [202, с. 136, фіг. 85]. Шатун встановлюють обробленим отвором на палець до упора в торець. Заготовка закріплюється кулачками з губками, що самоцентрують деталь. Сила закріплення передається на губки через ходовий гвинт з правим і лівим різьбленням. Штифт можна пересувати по Т-подібним направляючим, корпус гвинтових лещат жорстко закріплений на основі пристрою. До недоліків даної конструкції можна віднести необхідність попереднього оброблення отвору однієї з бобишок та неможливість виконати оброблення за одне установлення. Також дану конструкцію недоцільно використовувати в роботизованих ділянках та автоматичних лініях через відсутність автоматизації закріплення.

Найбільш близьким аналогом корисної моделі за технічною суттю є універсально-збірний пристрій [203, с. 136, фіг. 84], що складається з силового, затискного та базуючого механізмів. Як силовий механізм використовуються гвинти з трапецієдалною різью, як затискний механізм – рухома призма та прихват, як базуючий механізм – опори та призма. До недоліків можна віднести низьку жорсткість через велику кількість з'єднань із зазорами, громіздкість, недостатню інструментальну доступність для можливості оброблення за одне установлення та неможливість автоматизації закріплення.

В основу роботи поставлена задача спроектувати автоматизований верстатний пристрій, що забезпечить скорочення витрат допоміжного часу на встановлення, закріплення та зняття заготовки завдяки забезпеченню повної інструментальної доступності, з можливістю застосування в роботизованих виробничих ділянках, та який матиме просту модульну конструкцію для забезпечення можливості модернізації та мінімізації рухомих з'єднань.

Поставлена задача вирішується тим, що в автоматизованому верстатному пристрої для оброблення деталей типу шатунів, що містить силовий механізм, затискний механізм у вигляді прихвату та базуючий механізм у вигляді опор,

згідно з корисною моделлю, як силовий механізм встановлений пневматичний циліндр, який з'єднаний з нижньою та верхньою кришками, при цьому на верхню кришку встановлений базуючий механізм, а саме бокова та нижня опори, та направляючі для затискного механізму як прихвату, який приєднаний до пневматичного циліндра через штангу.

У запропонованій конструкції автоматизованого верстатного пристрою для оброблення деталей типу шатунів для автоматизації верстатного пристрою силовий механізм складається з пневматичного циліндра, який з'єднаний з нижньою та верхньою кришками. Для забезпечення повної інструментальної доступності на верхню кришку встановлений базуючий механізм, а саме бокова та нижня опори, та направляючі для затискного механізму як прихвату, який приєднаний до пневматичного циліндра через штангу. Так як конструкція верстатного пристрою передбачає заміну базуючого і затискного механізмів, забезпечується модульність конструкції та можливість модернізації.

Суть розробки пояснюється кресленнями, де:

- на рис. 2.16 зображено тривимірну модель автоматизованого верстатного пристрою;
- на рис. 2.17 зображені конструктивні елементи автоматизованого верстатного пристрою, вигляд спереду;
- на рис. 2.18 зображені конструктивні елементи автоматизованого верстатного пристрою, вигляд зліва;
- на рис. 2.19 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо встановити в даний верстатний пристрій з мінімальними розмірами;
- на рис. 2.20 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо встановити в даний верстатний пристрій з мінімальними розмірами, розріз по а-а;
- на рис. 2.21 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо встановити в даний верстатний пристрій з максимальними розмірами.

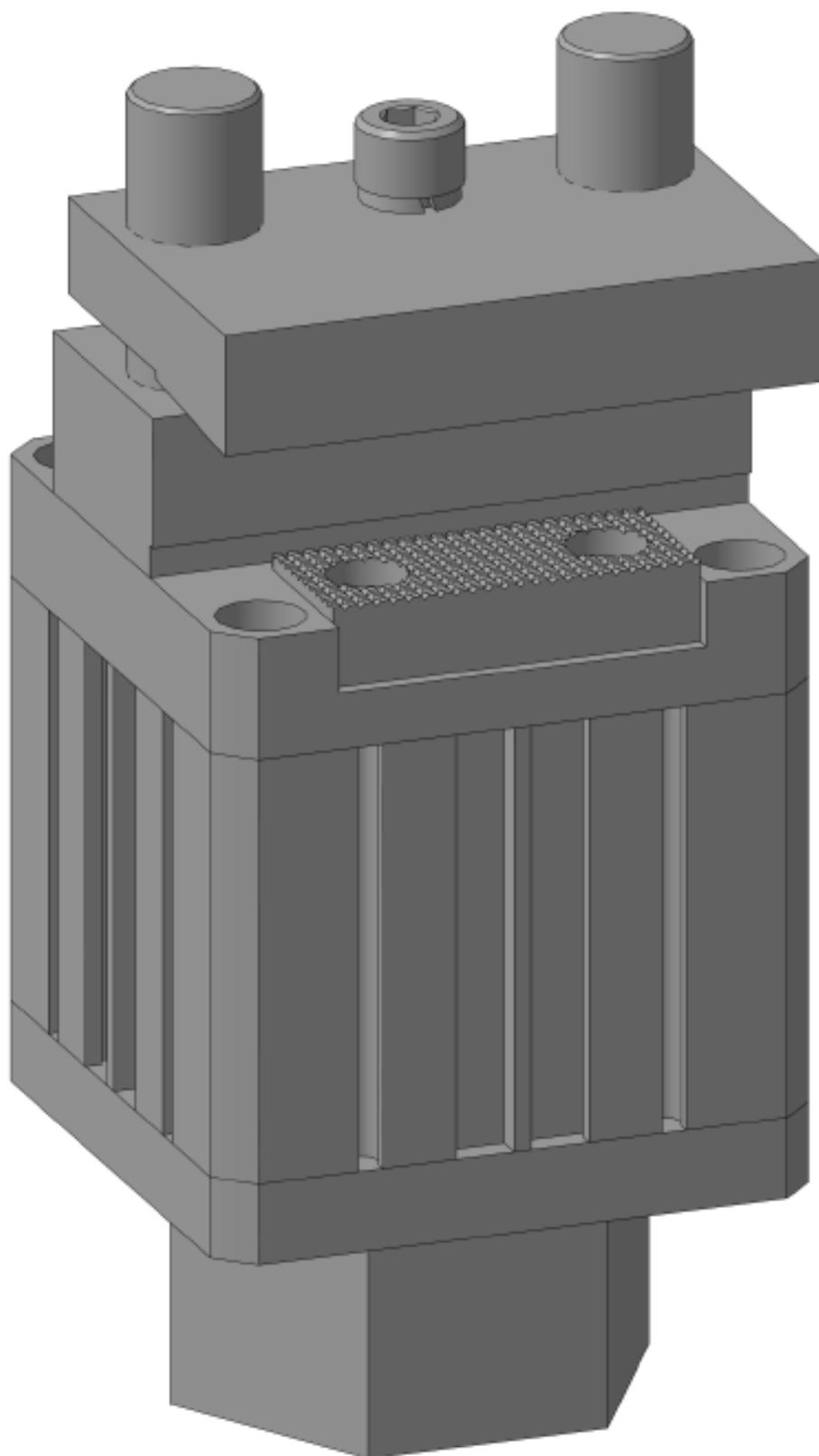


Рисунок 2.16 – Тривимірна модель автоматизованого  
верстатного пристрою [204]



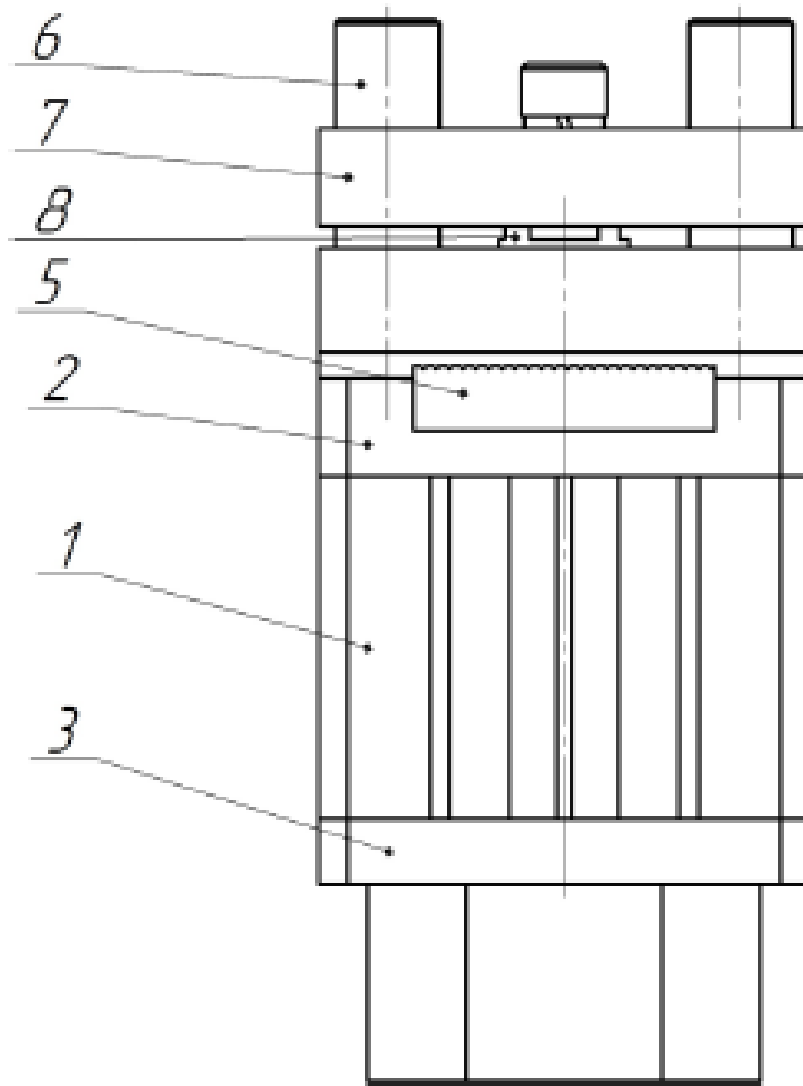


Рисунок 2.17 – Конструктивні елементи автоматизованого верстатного пристрою, вигляд спереду [204]

Конструкція верстатного пристрою для оброблення деталей типу шатунів складається з пневматичного циліндра 1, на якому закріплені верхня кришка 2 та нижня кришка 3. На верхню кришку 2 кріпляться бокова опора 4, нижня опора 5 та направляючі 6. Крім цього, направляючі 6 базуються в боковій опорі 4 для підвищення їх жорсткості та запобігання заїданню затискного механізму. Затискним механізмом є захват 7, який приєднаний до пневматичного циліндра через штангу 8.

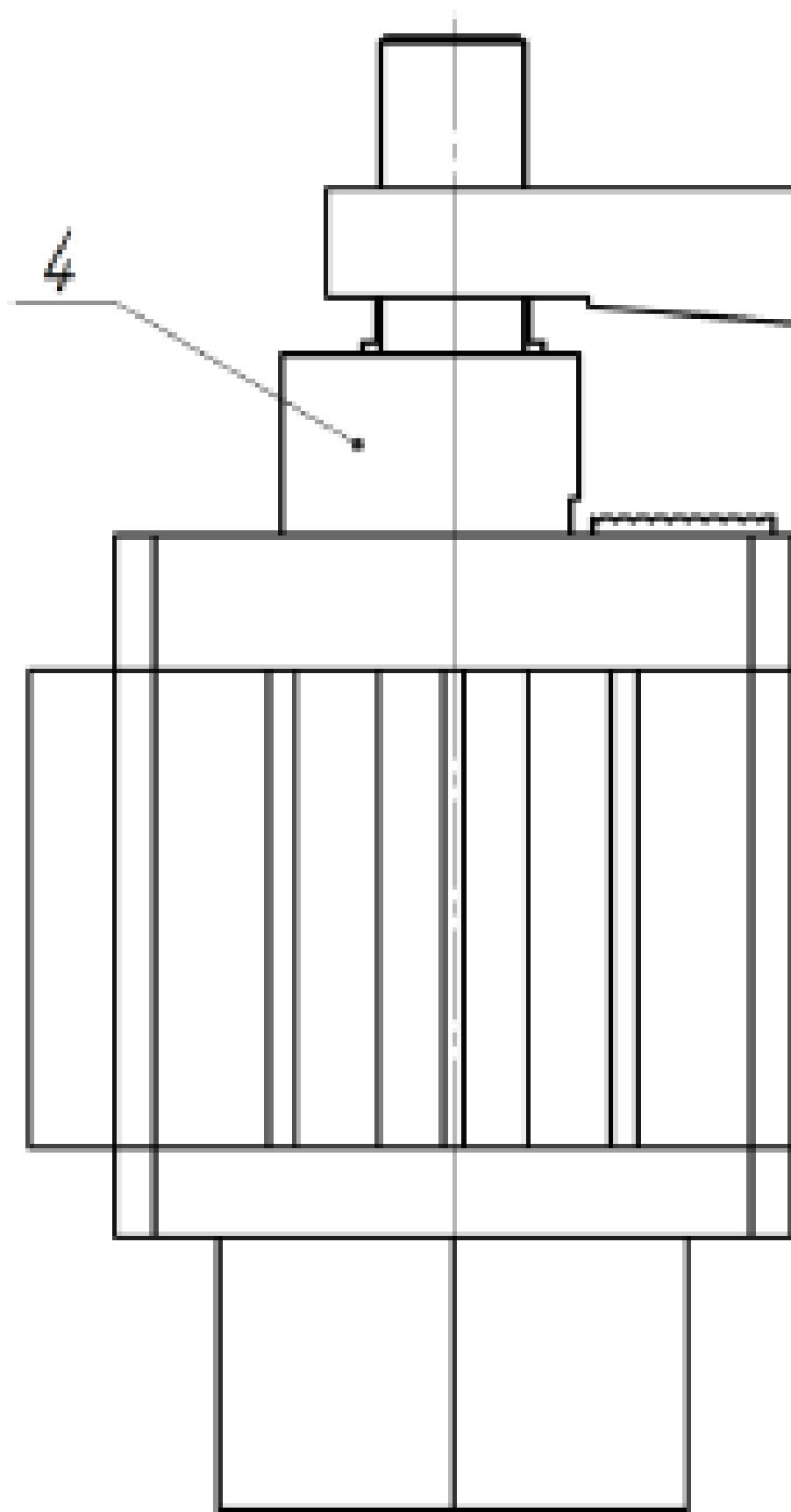


Рисунок 2.18 – Конструктивні елементи автоматизованого верстатного пристрою, вигляд зліва [204]

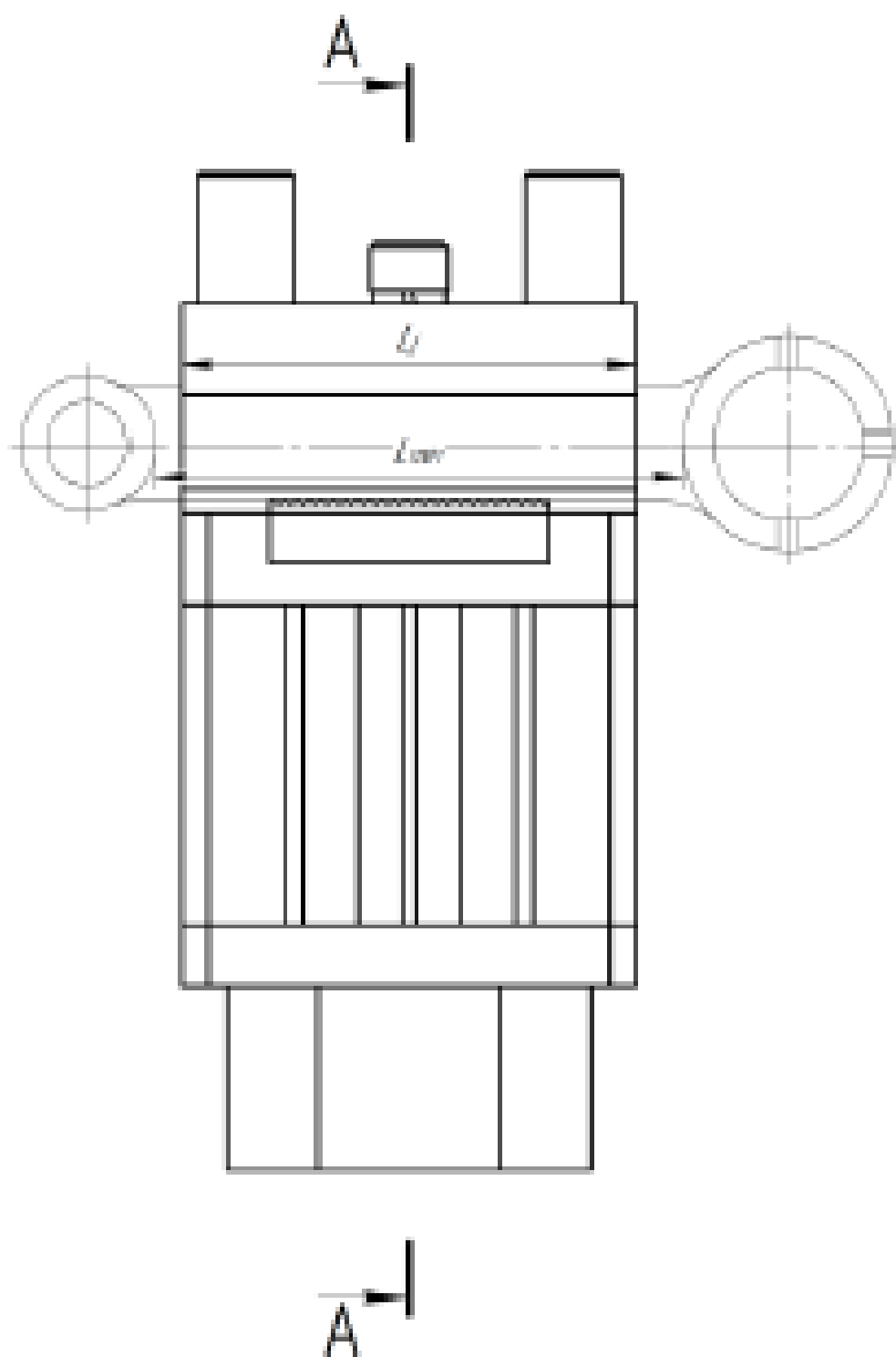


Рисунок 2.19 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо встановити в даний верстатний пристрій з мінімальними розмірами [204]

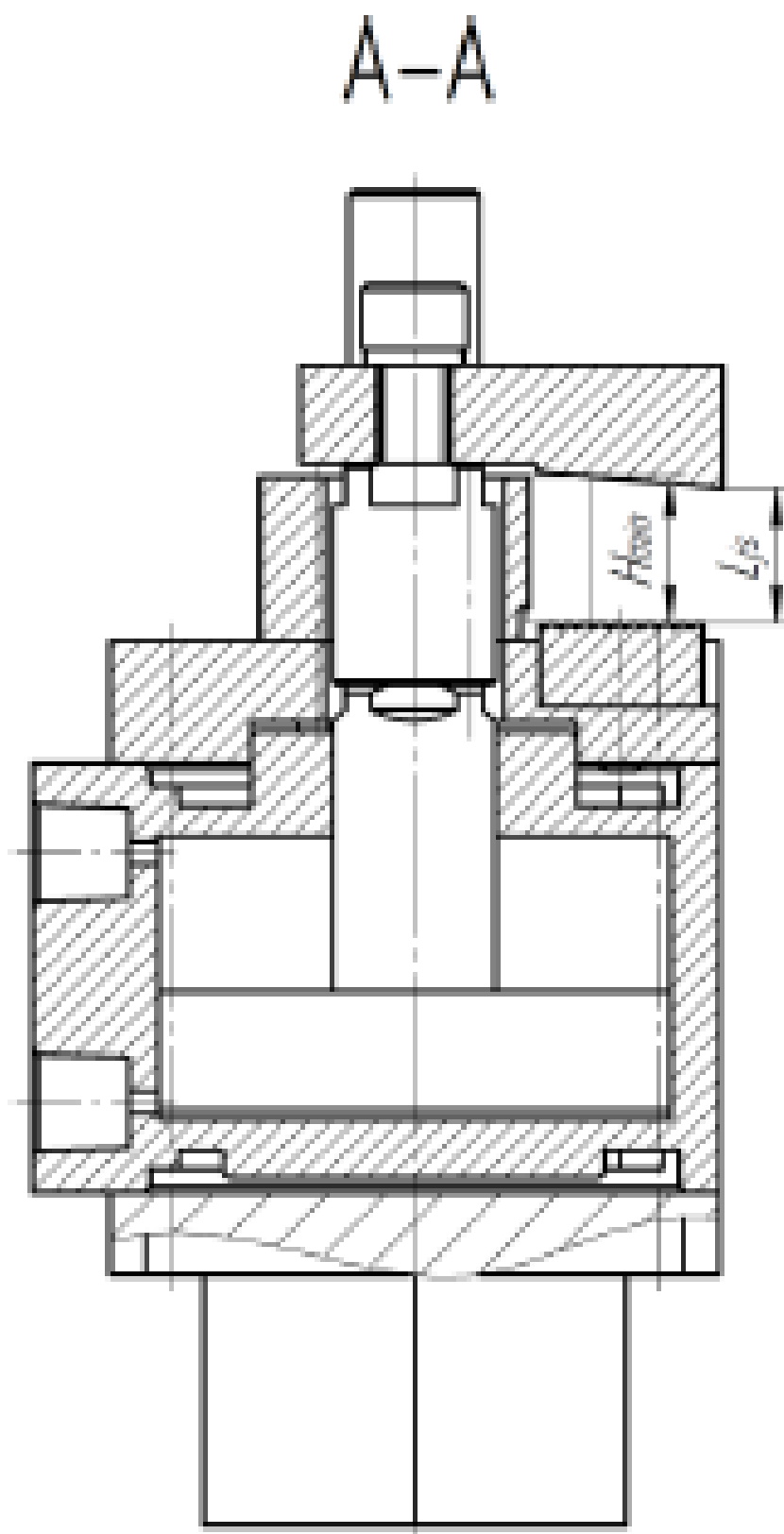


Рисунок – 2.20 зображені граничні габаритні розміри деталей, які можливо встановити в даний верстатний пристрій з мінімальними розмірами, розріз по А-А [204]

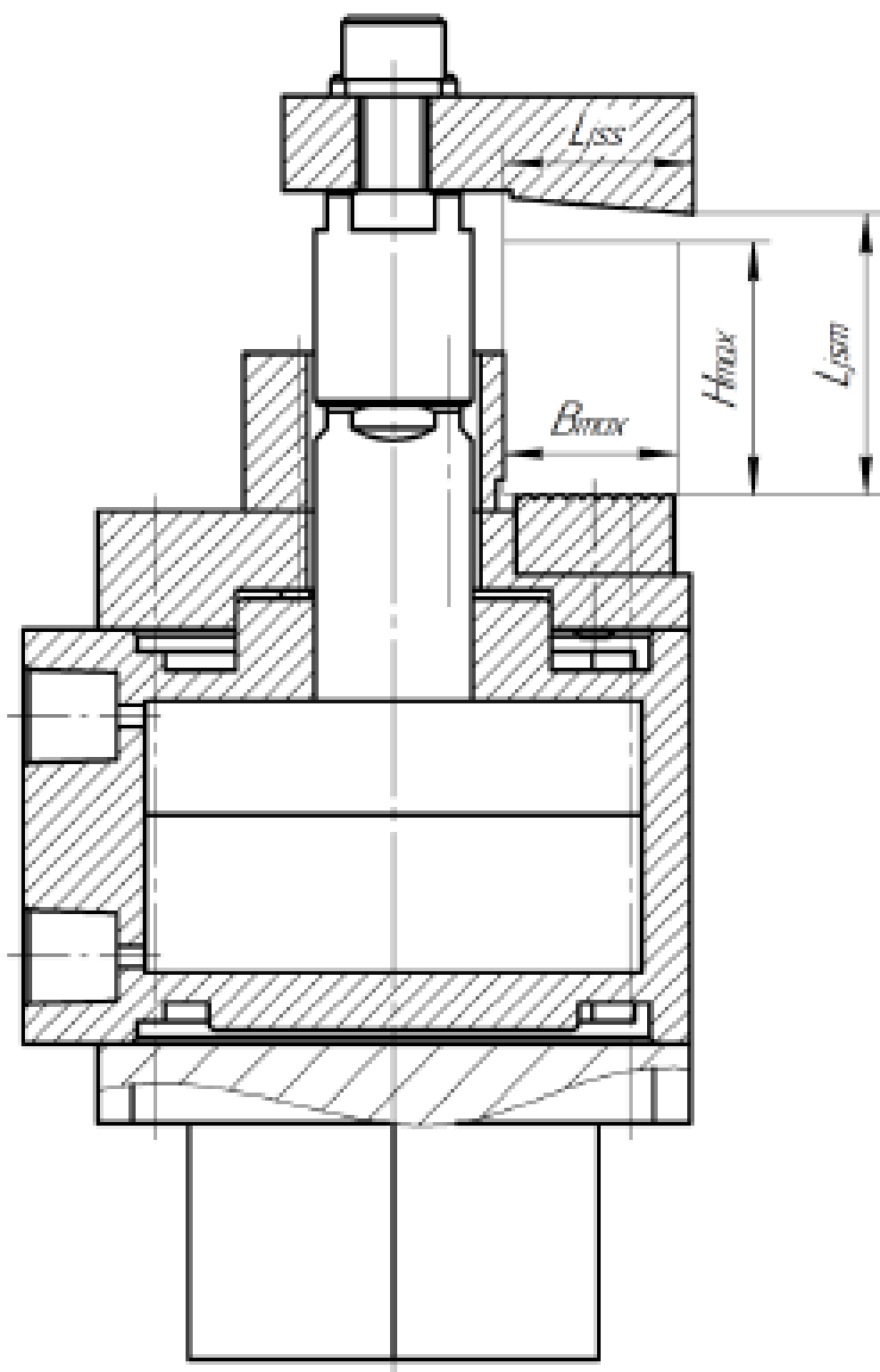


Рисунок 2.21 – Граничні габаритні розміри деталей, які можливо встановити в даний верстатний пристрій з максимальними розмірами [204]

## **2.4 Класифікація систем машинного зору з описом практичного їх застосування в процесах механічного оброблення деталей та складання вузлів на машинобудівних підприємствах**

### 2.4.1 Загальний аналіз застосування колаборативних роботів

Роботи для співпраці та їх впровадження у виробництво є невід’ємною частиною концепції Industry 4.0 [205]. Роботи для спільної роботи пропонують підвищену гнучкість і мобільність, ніж класичні промислові роботи [206], а також можуть спростити або підвищити продуктивність програм, де раніше використовувалися класичні промислові роботи. Згідно зі статистикою IFR [207], станом на 2021 рік було встановлено 39 тис. колаборативних роботів. У порівнянні з 2020 роком продажі зросли в півтора рази; порівняно з 2017 роком, більш як у три з половиною рази. При цьому відсоток колаборативних роботів у порівнянні із загальною кількістю промислових роботів, проданих у 2017 році, становить 2,75%, а на 2021 рік – 7,54%.

Незважаючи на зростання популярності колаборативних роботів у виробництві, відносна частка інсталяцій колаборативних роботів наразі низька. Автори відзначають, що однією з причин повільного впровадження колаборативних роботів є необхідність забезпечення високого рівня безпеки працівників [208]. Окрім фізичної безпеки, необхідно також забезпечити психічну безпеку працівника, щоб зменшити тривогу та стрес під час взаємодії людини та машини, зробивши взаємодію більш доступною та інтуїтивно зрозумілою [209]. Крім того, необхідно спростити роботу з сучасними технологіями через брак кваліфікованих працівників. За даними опитування, як підприємства, які впровадили технології Індустрії 4.0, так і підприємства, які тільки планують модернізувати виробництво, відчувають брак кваліфікованих працівників [210], що негативно впливає на швидкість поширення концепції Індустрії 4.0. Через наявність відкритих питань у сфері колаборативної робототехніки ця сфера все ще відкрита для нових досліджень, розробки методології та визначення основних вимог.

В якості сфери дослідження автори обрали системи машинного зору. Системи машинного зору стали однією з фундаментальних технологій робототехніки на етапі адаптації технологій збору інформації (Robotics 2.0) і технологій сприйняття середовища (Robotics 3.0). Використання датчиків (включаючи камери) і правильний аналіз їх показань підвищують адаптивність і автономність промислових роботів. Крім того, без інформації від датчиків неможливо повноцінно реалізувати концепцію Індустрії 4.0 [211].

Ця робота присвячена вивченню систем машинного зору, які можуть вирішувати проблеми безпеки та спрощувати роботу з колаборативними роботами, наділяючи їх основними когнітивними функціями, такими як розпізнавання частин. Теоретична частина статті буде присвячена короткому огляду систем машинного зору, їх ролі в сучасних колаборативних осередках, а також розглянуті практичні приклади їх застосування. У якості практичної частини буде розглянуто кейс з використання системи машинного зору в комірці спільної роботи для підвищення її гнучкості.

Системи машинного зору в колаборативних програмах виконують багато завдань, таких як виявлення об'єктів, сортування, керування роботами, візуальний огляд, ідентифікація штрих-кодів, контроль руху співробітників, нагляд за виявленням дефектів, відстеження та звітування тощо [212]. Говорячи про використання систем машинного зору для підвищення гнучкості виробничих осередків, автори [213] запропонували алгоритм глибокого підкріплення навчання для захоплення за допомогою машинного зору. Перспектива досліджень у цій галузі полягає в тому, що такі алгоритми дозволять з високою ефективністю та мінімальною участю людини фіксувати різноманітні об'єкти, у тому числі й об'єкти, які не брали участі у навчанні нейронної мережі. Крім того, наукові розробки в області обміну даними між роботами дозволять обмінюватися досвідом у захопленні різних предметів. У майбутньому роботи в цій галузі можуть значно підвищити гнучкість і продуктивність робототехнічних систем [214]. Автори [215] запропонували та перевірили комплекс для захоплення об'єктів у захищеному середовищі, який

складається з нового захоплення з контрольованою жорсткістю, камери глибини та комп'ютера, який може визначити відповідне положення для правильного захоплення. Крім того, великі компанії зацікавлені в проведенні наукових досліджень захоплення об'єктів з невизначеною формою або розташуванням. Так, наприклад, AmazonPickingChallenge присвячений захопленню предметів з невідомим місцем розташування за обмежений час. Досвід учасників, які виграли цей виклик, описано в [11216]. Автори [217] запропонували використовувати кілька 3D-камер для виявлення положення випадково розміщених об'єктів у кошику. Використання кількох камер допоможе отримати кращий огляд навколишнього середовища, усунути фоновий шум і уникнути оклюзій, що особливо важливо для невеликих об'єктів. Автори [218] також відзначили, що наявність оклюзій є проблемою для систем машинного зору. У статті запропоновано підхід, заснований на згортковій нейронній мережі, яка може виявляти об'єкти з частковою оклюзією. Також складність програмування перешкоджає широкому поширенню робототехніки, особливо для малих і середніх підприємств. Автори [219] в рамках участі в конкурсі KUKA InnovationAward 2016 розробили просту, гнучку, потужну та надійну систему розробки планів завдань роботів. Дослідження було перевірено за допомогою камери RGB-D і спільних роботів UniversalRobotic UR5 і KUKA LBR iiwa 14 R820. Крім того, системи машинного зору можуть допомогти виконувати складні технічні завдання. Автори [220] запропонували рішення для відстеження та захоплення предметів, що падають. Рішення використовує систему стереозору для отримання зображення та високошвидкісний дворезимний алгоритм візуального відстеження, який може працювати з частково спостережуваною траєкторією та дозволяє визначити точку захоплення.

Використання систем машинного зору для візуального контролю було добре вивчено, і багато застосувань уже впроваджено у виробництво. Проте попит на наукові дослідження у сфері візуального контролю залишається через зростання вимог до гнучкості та адаптивності виробництва. Автори [221]



запропонували використовувати систему машинного бачення та метод неконтрольованого машинного навчання для вивчення морфології басейнів розплаву в процесі плавлення шару лазерного порошку. Запропоноване рішення підтвердить наявність або відсутність дефектів у басейні розплаву, таких як утворення кульок, недоплавлення та пористість із замковою щілиною. Автори [222] розробили метод виявлення ослаблених болтів у вузлі на основі систем машинного зору та машинного навчання, які можуть працювати в режимі реального часу. Крім того, запропонований метод не вимагає значних обчислювальних потужностей. Автори [223] розробили алгоритм обробки зображень із використанням глибокого навчання для перевірки винних пляшок у режимі реального часу. Автори використовують фільтр Гауса для обмеження випадкового шуму та видалення непов'язаного фону для досягнення продуктивності в реальному часі.

Крім того, системи машинного зору є важливим елементом спільних клітин. Системи машинного зору в колаборативних осередках можна використовувати для навчання робота шляхом демонстрації, спілкування з оператором за допомогою жестів і забезпечення безпеки [224]. Крім того, системи машинного зору дозволяють виконувати ці завдання за допомогою одного пристрою, що є перевагою. Таким чином, автори [225] запропонували модуль виявлення жестів з бібліотекою фізичної взаємодії людини і робота для забезпечення безпеки та інтуїтивно зрозумілої взаємодії з роботом. Що стосується досліджень безпеки, то автори [226] запропонували та випробували на практиці алгоритм керування роботом на основі оптимізації для уникнення перешкод без уповільнення. Особливості цієї роботи полягають у тому, що алгоритм розглядає все тіло людини і всю поверхню робота, включаючи кінцевий ефектор. Цей алгоритм може підвищити ефективність, якщо є достатньо місця для маневру. Подальша робота буде зосереджена на прогнозуванні поведінки людини, щоб можна було отримати більш плавну траєкторію робота. Авторами [227] запропоновано систему виявлення зіткнень, серед переваг якої – масштабованість та врахування кінцевого ефектора робота.

Також система може враховувати потенційні зміни в робочому просторі, такі як рух інших людей і машин, якщо є дані для навчання нейронної мережі. В якості майбутньої роботи автори розглядають алгоритм, який підходить для роботи кількох людей з роботом і людини з кількома роботами.

У результаті наукові дослідження систем машинного зору спрямовані на вдосконалення існуючих алгоритмів обробки зображень, розробку нових для оптимізації виконання завдань або розширення технологічних можливостей систем машинного зору.

Оптимальний вибір системи машинного зору базується на комплексному аналізі застосування, після якого можна буде отримати перелік вимог до системи машинного зору. Під час аналізу застосування необхідно визначити тип застосування (забезпечення безпеки, підвищення гнучкості або забезпечення контролю якості), розмір контрольованого простору, умови виробництва (освітлення, забруднення повітря та поверхні, оптичні параметри навколишнього середовища). параметри контрольованого об'єкта (оптичні властивості, стан поверхні, геометричні параметри, швидкість його переміщення відносно системи машинного зору та ін.). Після цього необхідно скоротити список доступних рішень, залишивши лише відповідні рішення для ефективного виконання програми. Для виконання цього завдання необхідно проаналізувати властивості та особливості систем машинного зору та виявити їх співвідношення з вимогами, отриманими раніше під час аналізу додатків. Останнім кроком є вибір системи машинного зору на основі набутих властивостей системи машинного зору, її місцевої ціни та доступності.

#### 2.4.2 Параметри датчиків зображення

На ринку доступні системи машинного зору 1D, 2D і 3D. Системи 1D машинного зору аналізують лінійну область замість аналізу площі, оскільки ці системи мають один ряд фотодіодів. За своїми властивостями вони найчастіше використовуються для виявлення об'єктів і постійного керування ними (наприклад, під час руху по конвеєру). Алгоритми обробки інформації (що забезпечують кадрування, деспотворення та з'єднання зображень у

правильному порядку) дозволяють формувати двовимірне зображення, при цьому ширина зображення може бути необмеженою. Крім того, забезпечення достатнього і більш рівномірного освітлення буде необхідним через необхідність скорочення часу експозиції при зйомці в динамічних умовах, що набагато простіше при використанні 1D систем машинного зору [228]. Також 1D системи машинного зору використовуються при проведенні візуального контролю високої роздільної здатності. Ці системи можуть сканувати рухомі об'єкти на високій частоті, при цьому вагова роздільна здатність одновимірних систем машинного зору може становити від 512 до 12888 пікселів [229]. Серед промислових застосувань цих систем – безперервний контроль і аналіз листових матеріалів на конвеєрі, таких як папір, пластик і сталеві листи.

Системи двовимірного машинного зору є найпоширенішими через свою універсальність. Вони мають світлочутливу матрицю, що складається з багатьох рядів фотодіодів. Тому вони оптимальні для роботи зі статичними об'єктами і без необхідності роботи з інформацією про висоту. Крім того, вони найпростіші у використанні. Серед обмежень – чутливість до інтенсивності світла та погана контрастність, яка, у свою чергу, вирішується встановленням додаткових фільтрів або використанням алгоритмів обробки зображень, а також наявність паралакса. Типовими прикладами використання систем двовимірного машинного зору є визначення координат об'єктів для їх подальшого захоплення промисловим роботом, контроль якості та розміру, зчитування символів з упаковок, моніторинг, забезпечення безпеки працівників тощо [230].

Матриці двовимірних систем машинного зору можуть бути розроблені для отримання монохромних і кольорових зображень. Основна відмінність між монохромними і кольоровими матрицями полягає в тому, що монохромна матриця захоплює весь промінь світла, що падає на кожен фотодіод, незалежно від довжини хвилі. Навпаки, у кольорових матрицях світло вловлюється групами пікселів із додатковими кольоровими фільтрами, які пропускають лише певний колір (зелений, синій або червоний). Потім відсутні компоненти кольору обчислюються за допомогою алгоритмів інтерполяції на основі даних з

оточуючих фотодіодів [231]. Виходячи з цього, монохромні матриці працюють швидше, мають більшу роздільну здатність, більший рівень деталізації та краще працюють в умовах поганого освітлення [232]. У результаті монохромні камери залишаються кращим вибором, тоді як кольорові камери рекомендуються, коли потрібна інформація про колір об'єкта.

Крім того, матриці систем машинного зору 2D можуть бути з глобальними або рошетними жалюзі. У матриці рошетних затворів окремі фотодіоди або групи фотодіодів починають і закінчують поглинання світлового променя. Навпаки, у матриці глобального затвора всі фотодіоди починають отримувати світло одночасно, але завершують роботу послідовно. Датчики рошеттавень дешевші, але погано працюють у динамічних середовищах, спотворюючи зображення рухомих об'єктів. У зв'язку з цим рекомендуються глобальні затворні системи, особливо в динамічних сценах [233].

Системи 3D-машинного бачення забезпечують 3D-цифрову модель області або об'єкта, що сканується, і за бажанням можуть накладати 2D-кольорове зображення для повного представлення об'єкта. Крім того, цей тип камер зазвичай менш чутливий до умов навколишнього середовища. Але через складність конструкції і високу вартість комплектуючих це найдорожчий вид системи машинного зору.

Типові практичні застосування систем машинного бачення 3D включають контроль розміру об'єкта з висотою включно, сканування об'єкта та оцифрування (зворотне проектування), виявлення дефектів і контроль безпеки спільних комірок.

Необхідно відзначити важливість вибору відповідної роздільної здатності системи машинного зору. Дослідження [234] під час практичної перевірки запропонованого рішення з безпеки виявило зв'язок між якістю виконання програми та роздільною здатністю камери. Але камери з вищою роздільною здатністю коштують дорожче. У результаті, звертаючи увагу на відповідальність застосування, рекомендується різниця між мінімальним і максимальним контрольованим елементом, який необхідно контролювати

одночасно, і бюджетом. Виходячи з цього, виберіть систему машинного зору. Також, як згадувалося вище, максимальна роздільна здатність датчика камери залежить від його типу. Таким чином, у деяких випадках буде необхідно замінити систему машинного зору на інший тип камери або використовувати кілька систем машинного зору для контролю різних параметрів.

### 2.4.3 Параметри пристроїв обробки зору

Пристрій обробки машинного зору відповідає за попередню обробку та постобробку. Наявність засобів обробки зображень відрізняє датчики зору від систем машинного зору [235]. Попередня обробка необхідна для оптимальної підготовки вхідних зображень, тоді як постобробка використовується для уточнення та покращення вихідних результатів. З цього виходить, що чим більше інструментів попередньої та постобробки може виконувати контролер, тим більшою гнучкістю є система машинного зору. З іншого боку, зростають вимоги до продуктивності контролера, що впливає на його ціну. Тому для оптимального вибору системи машинного зору необхідно підібрати набір необхідних інструментів для успішного виконання завдання з урахуванням ціни. Оскільки 2D і 3D камери використовують різні набори інструментів попередньої та постобробки, вони будуть розглянуті окремо.

Серед поширених і широко використовуваних інструментів попередньої обробки для 2D-камер є інструмент двійкової обробки, інструмент виявлення країв, інструмент корекції пікселів і інструмент розтягування. Інструменти для постобробки за визначеними параметрами поділяються на інструменти для визначення положення об'єкта, порівняння властивостей об'єкта, вимірювання геометрії об'єкта, підрахунку кількості об'єктів та ідентифікації об'єктів. Інструменти для визначення положення об'єкта можуть базуватися на виявленні контуру, країв, циліндричної поверхні та тексту. Інструменти визначення положення об'єкта можна використовувати для визначення положення локальної системи координат об'єкта відносно глобальної системи координат системи машинного зору. Як інструменти для порівняння властивостей об'єктів можуть використовуватися порівняння яскравості,

контрастності, кольору, контуру і малюнка, а також визначення площі і підрахунок пікселів за кольором. Ці інструменти допомагають визначити наявність або відсутність об'єкта та перевірити його властивості, наприклад, перевірити правильність упаковки та маркування або наявність пошкоджень). Інструменти для вимірювання геометрії об'єкта можуть визначати лінійні, кутові та діаметральні розміри, визначати кількість граней та їхні властивості та призначені для перевірки правильних розмірів, орієнтації та поточного стану деталі чи вузла. Інструменти підрахунку об'єктів працюють над розпізнаванням країв і допомагають визначити кількість входжень певного об'єкта на зображення. Засоби ідентифікації об'єктів працюють на основі штрих-кодів, матричних кодів і розпізнавання тексту.

Як попередню обробку для 3D-камер можна використовувати інструмент розтягування або інструмент видалення спотворень [236]. Для 3D-камер із визначеними параметрами доступне визначення положення об'єкта, порівняння властивостей об'єкта, вимірювання геометрії об'єкта та підрахунок об'єкта. Інструменти для виявлення положення об'єкта, порівняння властивостей об'єкта та підрахунку кількості об'єктів можуть базуватися на виявленні визначеної 3D-моделі або 3D-моделі з простими геометричними фігурами (куб, циліндр тощо). Інструменти для вимірювання геометрії об'єкта можуть визначати лінійні, кутові та діаметральні розміри, а також розміри між площинами та 3D-моделями по трьох осях, що недоступно для 2D-камер.

Крім того, пристрій обробки зору відповідає за автоматичне налаштування параметрів зйомки, таких як автофокус, автоматичний баланс білого, автоматичне регулювання посилення, автоматичне налаштування кольору, автоматична експозиція тощо. Ці інструменти особливо корисні у разі частих змін (у випадку одночасткового потоку) або у випадку динамічно мінливого середовища, в якому події неможливо передбачити заздалегідь (наприклад, для забезпечення безпеки спільної комірки).

Також на ринку машинного бачення є рішення з модулями NVIDIA Jetson або подібними платформами, які дозволяють запускати програми з

використанням штучного інтелекту та нейронних мереж (рішення AlliedVision, рішення Basler, серія Baumer AX). Прикладами використання цих рішень є забезпечення безпеки оператора при спільній збірці, візуальний контроль якості, який базується на суб'єктивній оцінці оператора, і розпізнавання об'єктів.

В якості практичної перевірки отриманої методики буде розглянуто приклад вибору систем машинного зору для лабораторії SmartTechLab. Лабораторія SmartTechLab розташована на факультеті виробничих технологій зі штаб-квартирою в Пряшові Технічного університету Кошице, Словацька Республіка. Більш детальний опис лабораторії доступний у попередній роботі [237].

Лабораторія присвячена навчання студентів ключовим технологіям концепції Індустрії 4.0, науково-дослідній та дослідницькій роботі. Основним обладнанням лабораторії є конвеєр спільного складання (рис. 2.22). У даному прикладі планується налаштувати лінію для складання вимикачів (рис. 2.23, а). Оскільки вимикач складається з великої кількості деталей (рис. 2.23, б), виникають проблеми з доступністю інструменту, малими розмірами деталей і складними етапами складання (наприклад, встановлення пружини). Спільне складання краще, ніж повна автоматизація.

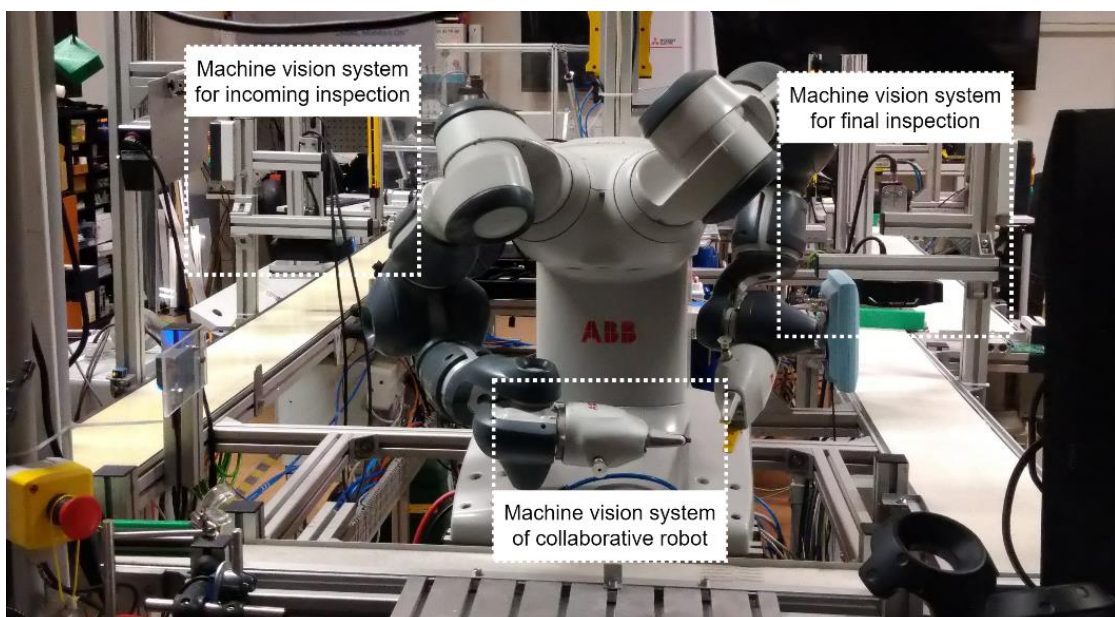
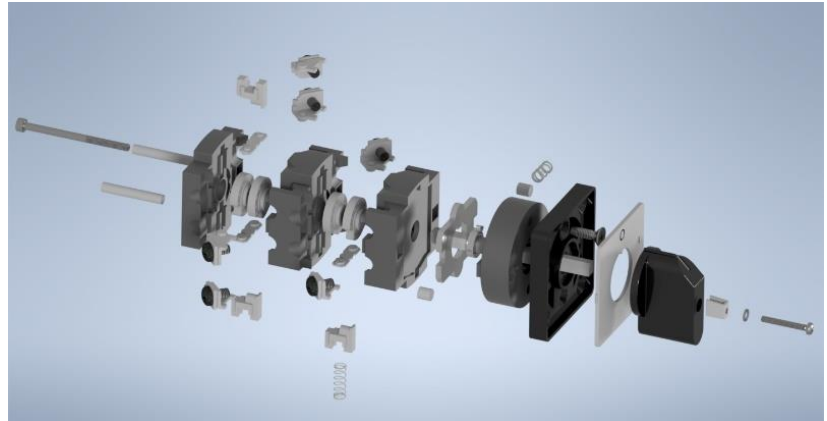


Рисунок 2.22 – Спільна складальна лінія [238]



а)



б)

Рисунок 2.23 – Перемикач: а) в складанні; б) у розгорнутому вигляді [238]

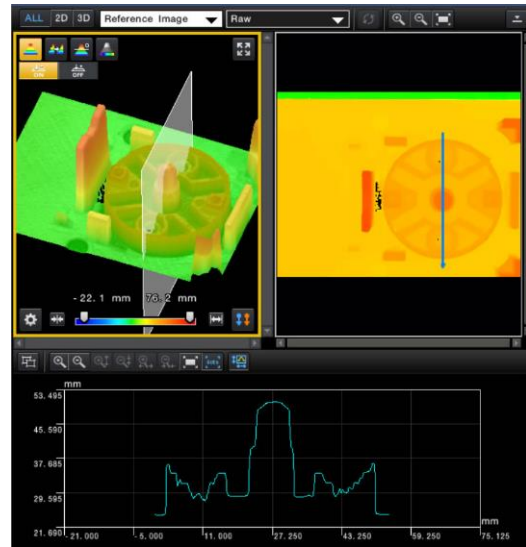
Збірка комутатора складається з наступних етапів: вхідна перевірка, складання та кінцева перевірка. Під час вхідного огляду необхідно переконатися, що базова частина комутатора правильно встановлена на тримачі та відсутність зовнішніх дефектів. Тримач потрапляє в поле зору камери на конвеєрі на малій швидкості. Крім того, допускається зупинка конвеєра для виконання операції перевірки, оскільки вузьким місцем системи є операція складання. Виходячи з цього, систему можна вважати статичною. Крім того, вибираючи обладнання для лабораторії, увага повинна бути зосереджена більше на гнучкості та універсальності, ніж на продуктивності. Той факт, що базова частина однотонна і з ямками, ускладнює процес перевірки. Система машинного зору 3D є оптимальним вибором для цих умов виробництва. Оскільки система статична, системи 1D машинного зору не є оптимальним вибором. Крім того, для 3D системи машинного бачення монотонність деталі не буде проблемою, на відміну від 2D систем машинного бачення. Крім того, інформація про висоту деталі допоможе визначити правильну установку деталі на тримачі. Було обрано систему машинного зору зі структурованим датчиком світла, оскільки вона може створювати модель з високою роздільною здатністю, добре працює з дрібними деталями, є відносно дешевою та добре працює з монотонними деталями. На основі аналізу наявних рішень було вирішено обрати систему машинного зору Keyence CA-H048CX (рис. 2.18, а).



Для перевірки геометричних параметрів і правильності висоти профілю використовували інструмент порівняння 3D моделі та інструмент вимірювання профілю (рис. 2.24, б).



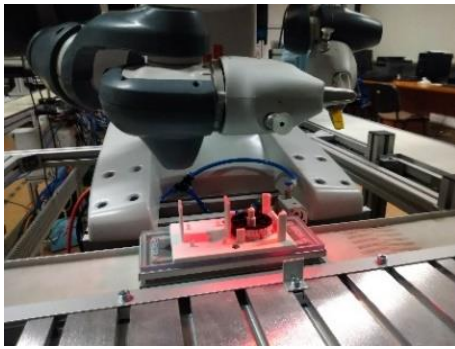
а)



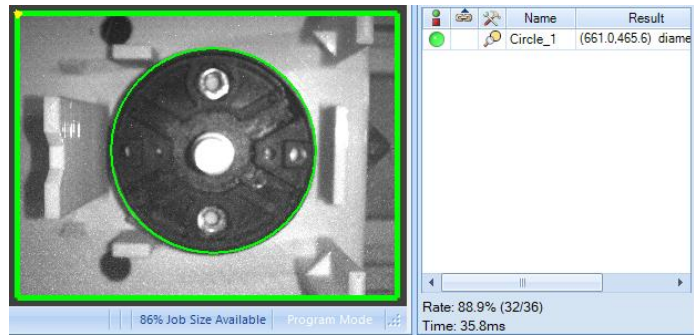
б)

Рисунок 2.24 – Вхідний огляд: а) система камерного огляду; б) додаток [238]

Під час спільного складання робот повинен мати можливість визначати точні координати деталей і попередніх вузлів, оскільки людина може випадково або навмисно змінити своє положення. Оскільки в збірці беруть участь невеликі деталі, їх захоплення може бути критичним. Оскільки система статична і немає необхідності визначати кольори заготовок, оптимальним вибором є монохромна 2D система машинного зору. Оскільки АББ YuMi використовується як колаборативний робот, АББ пропонує колаборативний захват із силовим керуванням і вбудованою системою машинного зору Cognex AE3. Порівняно з установкою на фіксованому місці, система машинного зору, вбудована в захват, має більшу гнучкість, оскільки можна вільно змінювати місце огляду, і немає проблем із мертвими зонами. Процес контролю положення базової частини зображено на рис. 2.25, а. Як інструмент для контролера використовується колошукач (рис. 2.25, б).



а)



б)

Рисунок 2.25 – Система машинного зору колаборативного робота:

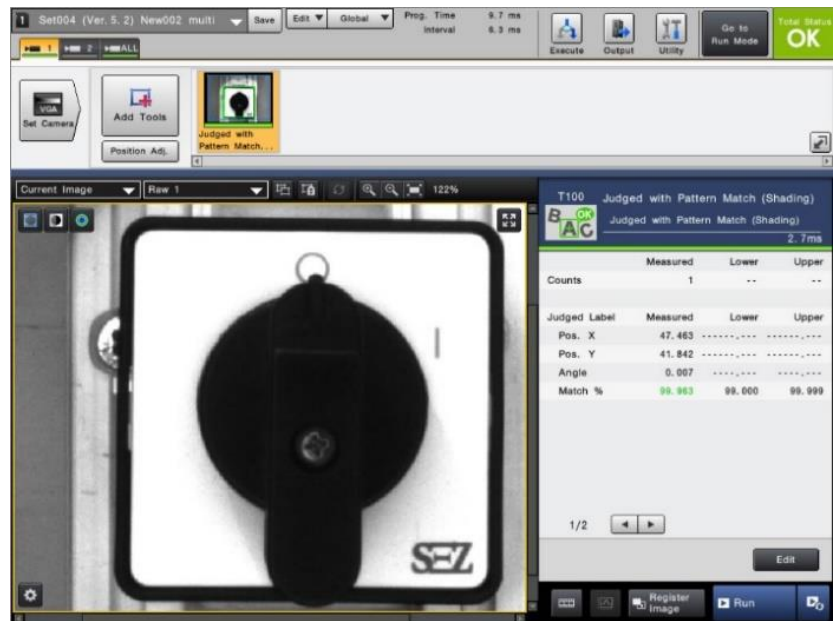
а) загальний вигляд; б) додаток [238]

Після складання необхідно провести візуальний огляд кінцевого виробу. Усі зауваження щодо статички системи під час вхідної перевірки застосовні до остаточного інспекційного контролю. Однак, на відміну від вхідного контролю, зовнішній вигляд вузла буде перевірятися, тому немає необхідності проводити вимірювання в тривимірній площині. Крім того, оскільки елементи збірки лише чорно-білі, висока контрастність буде навіть для монохромних камер. Виходячи з опису умов перевірки, оптимальним є використання монохромної 2D системи машинного зору. Для проведення остаточної перевірки було обрано Keyence SA-H048MX (рис. 2.26, а). Процес виконання остаточної перевірки складання показано на рис. 2.26, б, де порівнюється вихідний шаблон з поточним.

Що стосується досліджень у цьому напрямку, автори [239] представили огляд застосування систем машинного зору на розумних фабриках, включаючи розгляд спільних програм, але не розглядають вибір апаратного забезпечення. Автори [240] надали інформацію про особливості вибору систем машинного зору для сільського господарства. Таким чином, дане дослідження має наукову новизну та описує особливості вибору систем машинного зору для розумних фабрик із колаборативними виробничими осередками.



a)



b)

Рисунок 2.26 – Остаточна перевірка: а) система огляду камери; б) додаток [238]

## 2.5 Способи зниження вібрацій спеціальних консольних розточувальних оправок

Для динамічного гасіння коливань використовуються вбудовані в бурильну штангу додаткові пристрої з масою, жорсткістю і демпфуванням. Встановлено, що ефективність гасіння коливань значно зростає зі збільшенням кількості його елементів. Збільшення кількості приєднаних мас призводить до антирезонансів і підвищення якості розточування.

Підвищена податливість консольних розточувальних штанг призводить до необхідності конструктивного підвищення їх жорсткості при виготовленні твердосплавного корпусу і демпферних стрижнів. Це забезпечує можливість буріння глибоких отворів [241]. Однак виготовлення розточувальної штанги з твердого сплаву значно збільшує її вартість. На практиці використовуються одноелементні та багатоелементні демпфери [242]. У гасителях коливань часто використовується в'язке або сухе тертя та їх комбінації [243]. Багато вібропоглиначів успішно використовують демпфери частинок, які ефективно гасять вібрації під час ударів [242].

Для досягнення зміни коефіцієнтів демпфування за допомогою сухого тертя були розроблені оправки [244]. У роботі [245] досліджено вплив різних внутрішніх сердечників на динаміку бурильних установок. Показано використання внутрішніх сердечників з армованого вуглеводневого волокна (вуглецеве волокно), вбудоване в бурові агрегати з великим співвідношенням довжини до діаметра, ефективно знижує рівень вібрації. Свердлильні штанги мають внутрішню серцевину, яка складається з 31% вуглецевого волокна за об'ємом. На відміну від внутрішнього ядра CFRP\_1, внутрішнє ядро CFRP\_2 складається з двох різних матеріалів з вуглецевого волокна. Полімер, який використовується у вуглецевому волокні, – це епоксидна смола та композитний матеріал із вуглецевого волокна (CFRP\_1: Tenax HT 5631; CFRP\_2: HS carbon 50K). Встановлення внутрішніх сердечників призводить до зниження податливості на вигин [246]. CFRP характеризується високою жорсткістю та міцністю в поєднанні з низькою щільністю [247, 248].

Зменшення амплітуд вимушених коливань досліджено експериментально та теоретично на основі комбінованого підходу: кінцево-елементного аналізу, аналізу експериментальної моделі та випробувань обробки [249, 250].

Демпфери часто використовують для придушення коливань різної просторової форми, наприклад, поздовжньої або поперечної, які негативно впливають на похибки форми поперечних перерізів [251, 252]. Вивчалися проблеми вібраційного різання для придушення вібрацій, перпендикулярних до обробленої поверхні, при накладенні вібрацій, дотичних до обробленої поверхні [253].

Слід зазначити, що при конструюванні консольно-розточувальних оправок часто використовують внутрішні канали для подачі повітря в зону різання, наприклад, для видалення стружки тощо [254]. У цій роботі центральні осьові та радіальні отвори праворуч і ліворуч від фрези забезпечують подачу повітря в зону різання для збільшення амортизації та гасіння коливань. Динамічні амортизатори оснащений ефективним амортизуючим матеріалом всередині корпусу [255] для зменшення зносу фрези, розроблено та

впроваджено. Для гасіння ударів запропоновано демпфер, встановлений на хвостовику з фосфористої бронзи [256].

Кількість елементів, що складають масу гасителя коливань, визначає їх як одноелементні або багатоелементні (багатомасові). У металообробці використовують як одноелементні, так і багатоелементні демпфери. Вони призначені для придушення коливань різних часових форм: детермінованих (гармонійних, періодично-імпульсних, полігармонічних) і випадкових [257].

У роботі [258] досліджено гасителі коливань ударів з гістерезисним демпфуванням для різних ударів, що виникають від гасителя коливань. Оптимальна конструкція демпфера для фрикційного нелінійного генератора та її ефекти описані в статті [259]. Також наведено конструкцію віброгасителя, який використовувався для гасіння вібрацій [260].

Численні дослідження динаміки машин дають обґрунтовані рекомендації щодо конструкції їх компонентів, інструментів, вибору умов різання та спеціальних пристроїв, що забезпечують низький рівень вібрації.

Слід зазначити, що оптимальні налаштування динамічних гасителів коливань забезпечують надійне, стабільне різання при розточуванні твердих поверхонь. Однак при розточуванні переривчастих поверхонь умови роботи гасителів коливань змінюються навіть при збереженні місця установки гасителя коливань. Змінюються також умови роботи динамічного гасителя, встановленого в обертовій або нерухомій бурильній штанзі, а також умови роботи віброгасителів, встановлених на пристосуванні [261].

Друга група завдань пов'язана з конструктивними рішеннями елементів розточувальних штанг, що забезпечують зниження вібрацій. При цьому виділяються пристрої і способи, що змінюють параметри пружної системи (елементи конструкції з підвищеним демпфуванням, зміненою масою або жорсткістю). Реалізація конструктивних особливостей таких бурових оправ забезпечує підвищене демпфування пружної системи при надходженні робочого середовища в зону різання. При цьому реалізується стабільний процес

буріння глибоких шпурів з коефіцієнтом  $l/d$  до 12. У цьому випадку використання звичайних бурових оправ неможливе через втрату вібростійкості.

Третє завдання полягає в дослідженні можливостей віброгасіння розточувальних штанг і методу віброрізання. Досліджено умови придушення коливань, перпендикулярних поверхні, що обробляється, за допомогою збуджених вимушених коливань, спрямованих по дотичній до цієї поверхні. Слід зазначити, що результати дослідження зв'язку режимів коливань, які виникають під час розточування та фрезерування, дають можливість контролювати коливання різної просторової форми. Слід зазначити, що в технічній літературі не описана можливість гасіння згинальних коливань примусовими осьовими вібраціями під час чистового розточування.

## **2.6 Схеми експериментальних стендів щодо зменшення коливань спеціальних консольних розточувальних оправок**

Досліди проводили на стендах, зібраних на базі чистово-розточувального верстата. Використовували розточувальні фрези з твердосплавними пластинами з геометрією: для розточування сталі основний передній кут  $j = 60^\circ$ , допоміжний передній кут  $j_1 = 15^\circ$ ; для розточування чавуну  $j = j_1 = 45^\circ$  [262].

В експериментах використовували набори з 5 ріжучих пластин однакової геометрії. Умови різання: швидкість різання 100–200 м/хв, глибина 0,05–0,10 мм, подача 0,02–0,04 мм/об [263].

Для вимірювання вібрацій використовувалися п'єзоелектричні датчики, тензодатчики та індуктивні датчики, підключені через пристрій визначення вібрацій (VDD) до комп'ютера, а також до віброметра. Зразки розточували зі сталі С45 та сірого чавуну СЧ 18.

Коливання двомасової системи, що включає об'єкт зі змінною жорсткістю  $C(1 + 2\epsilon \cos 2\omega t)$  і динамічний гаситель коливань, можна розглянути згідно з розрахунковою схемою, представленою на рис. 2.27.

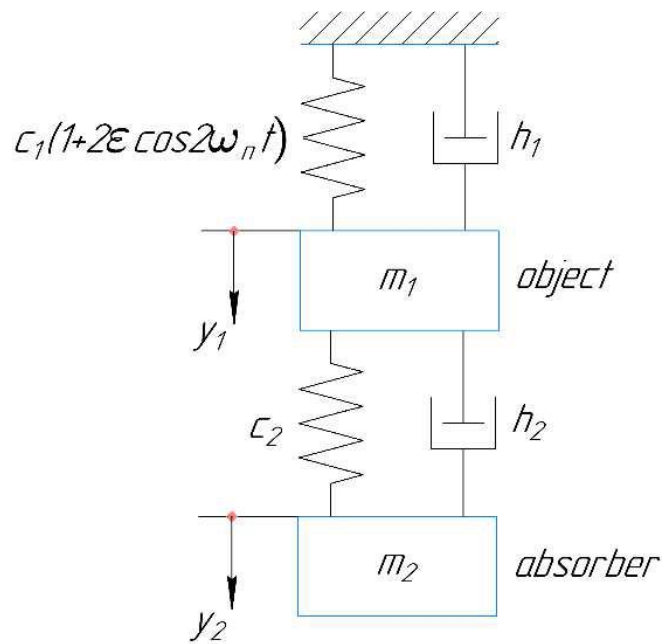


Рисунок 2.27 – Розрахункова схема двомасової системи з об'єктом змінної жорсткості та динамічним гасником коливань [264]

Рівняння коливань мають вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 + 2h_1\dot{y}_1 + \omega_1^2(1 + 2\varepsilon \cos 2\omega_n t)y_1 + 2\mu h_2(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + \mu\omega_2^2(y_1 - y_2) = 0; \\ \ddot{y}_2 + 2h_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + \omega_2^2(y_2 - y_1) = 0, \end{cases} \quad 2.1$$

де  $y_{1,2}$ ,  $\dot{y}_{1,2}$ ,  $\ddot{y}_{1,2}$  – вібраційні переміщення, швидкості та прискорення об'єкту і динамічного гасителя коливань відповідно;

$m_1$ ,  $h_1$ ,  $C_1$  – приведені значення маси, амортизації та жорсткості об'єкта;

$m_2$  – маса поглиначка;

$C_2$ ,  $h_2$  – жорсткість і демпфірування зв'язку абсорбер–об'єкт;

$\omega_1^2 = C_1/m_1$ ,  $\omega_2^2 = C_2/m_2$  – квадрати парціальних частот;

$\mu = m_2/m_1$  дорівнює відношенню мас;

$\varepsilon_{cr}$  – коефіцієнт збудження;

$\omega_n$  – частота параметричного збудження;

$t$  – час.

Підставляючи в рівняння (2.1) розв'язок у вигляді

$$\begin{cases} y_1 = a_1 \cos \omega_n t + b_1 \sin \omega_n t; \\ y_2 = a_2 \cos \omega_n t + b_2 \sin \omega_n t, \end{cases} \quad 2.2$$

де  $a_1, b_1, a_2, b_2$  – коефіцієнти відповідних функцій.

Після підстановки виразу (2.2) у рівняння (2.1) звернення до нуля визначника цієї системи є умовою існування періодичного розв'язку рівняння (2.1).

Після введення безрозмірних множників  $\nu = \omega_n / \omega_1$ ,  $\varkappa_1 = 2h_1 / \omega_1$ ,  $\varkappa_2 = 2h_2 / \omega_2$ ,  $\Omega = \omega_1 / \omega_2$ , а спрощуючи рівноправні перетворення, отримуємо:

$$\begin{vmatrix} 1 + \varepsilon & \nu \varkappa_1 & \nu^2 - (1 + \mu)\Omega^2 & -(1 + \mu)\Omega \nu \varkappa_2 \\ \nu \varkappa_1 & 1 - \varepsilon & (1 + \mu)\Omega \nu \varkappa_2 & \nu^2 - (1 + \mu)\Omega^2 \\ -\nu^2 & 0 & \Omega^2 - \nu^2 & \Omega \nu \varkappa_2 \\ 0 & -\nu^2 & -\Omega \nu \varkappa_2 & \Omega^2 - \nu^2 \end{vmatrix} = 0. \quad 2.3$$

Цей вираз дозволяє знайти коефіцієнт збудження на межі області стабільності:

$$\varepsilon_{cr}^2 = \frac{\left\{ \left[ (1 - \nu^2)(\Omega^2 - \nu^2) - \mu \Omega^2 \nu^2 \right]^2 + (\Omega^2 - \nu^2) \nu^2 \varkappa_1^2 + [(1 + \mu)\nu^2 - 1]^2 \Omega^2 \nu^2 \varkappa_2^2 - 2\mu \Omega \nu^6 \varkappa_1 \varkappa_2 + \Omega^2 \nu^4 \varkappa_1^2 \varkappa_2^2 \right\}}{\left[ (\Omega^2 - \nu^2) + \Omega^2 \nu^2 \varkappa_2^2 \right]}. \quad 2.4$$

Необмежене зростання  $\#cr$  відбувається при  $\Omega \rightarrow \nu$  and  $\varkappa_2 \rightarrow 0$ . Ці умови визначають значення параметрів динамічного гасителя коливань, за яких неможливе виникнення параметричного резонансу, а саме: часткова власна частота гасителя коливань повинна дорівнювати частоті параметричного збурення, а непружний опір з'єднання демпфера з об'єктом повинен бути якомога меншим.



## 2.7 Опис параметрів налаштування динамічного демпфера, а також умови ефективного демпфування коливань

Для визначення напрямку дії ударних імпульсів, що передаються демпферними елементами на бурильну штангу, досліджено конструкцію демпферів (рис. 2.28) з кільцевими виступами на дисках.

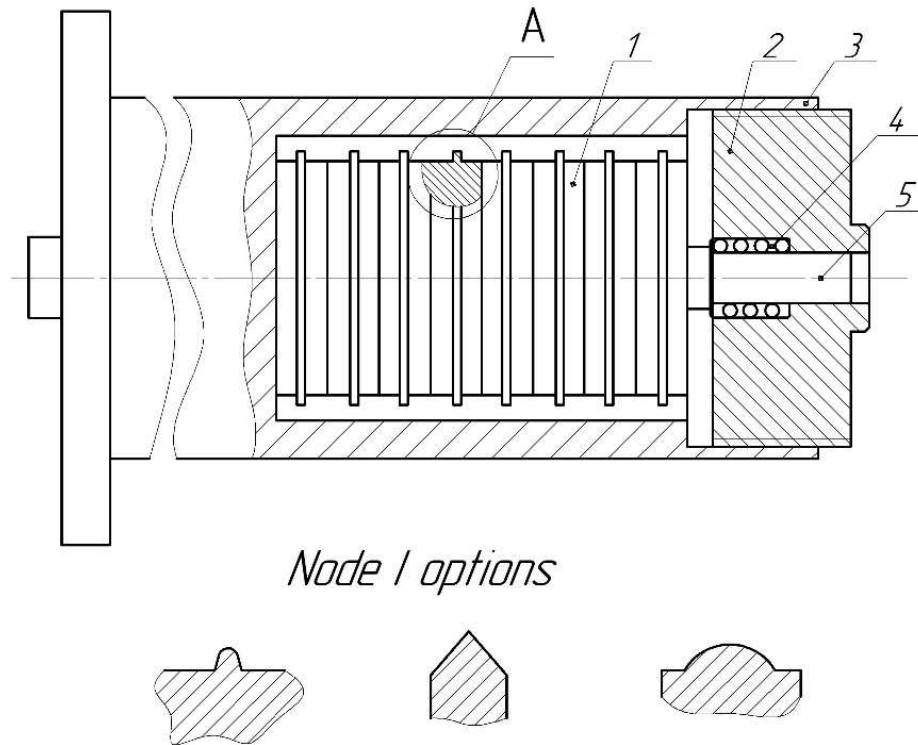


Рисунок 2.28 – Амортизатор з виступами на дисках [264]

Гаситель коливань з кільцевими виступами на дисках 1 стискається пружиною 4 через штовхач 5. Пружина утримується різьбовим ковпачком 2, і при її вгвинчуванні в корпус бурової штанги осьова сила стиснення  $N$  збільшується. Положення кришки фіксується контргайкою 3. Для визначення напрямку дії ударних імпульсів, що передаються елементами гасителя на бурову штангу, виготовлено конструкцію динамічного гасителя з кільцевими виступами на дисках. Досліджуваний віброгасник є удародинамічним і дозволяє оптимізувати ударні характеристики. Відомо, що ефект гасіння коливань істотно залежить від характеристик ударного імпульсу. Для підвищення ефективності удару вектор ударного імпульсу узгоджується з віссю

симетрії диска і його центром ваги. Ударна поверхня диска розташована в середній частині циліндричної поверхні і виконана у вигляді кільцевого виступу. Форма поперечного зрізу виступу, який впливає на розмір площі контакту при зіткненнях, вибирається емпіричним шляхом в залежності від ефективності гасіння коливань. При оптимальному зчепленні диски можуть рухатися тільки в напрямку сили різання. Форма поперечного перерізу виступу і ширина платформи, по якій здійснюється контакт при ударі, вибирається в залежності від характеристик матеріалу, з якого виготовлені диски. Зазначимо, що форма виступу у вигляді гострого кута забезпечує найкраще гасіння ударного імпульсу. Дві інші форми виступів збільшують демпфірування в амортизаторі. Наявність тертя в демпфері послаблює амортизаційну дію. У той же час наявність загасання розширить частотний діапазон, на якому проявляється ефект затухання коливань.

При випробуванні гасителя коливань осьові сили стиснення визначали за допомогою калібрувального приладу (рис. 2.29). При зміні осьового зусилля стиснення пружини 2, що передається на диски 1, штовхач 3 переміщується в отворі різьбової кришки 4. Величина цього переміщення вимірюється циферблатним індикатором, встановленим у корпусі 5 приладу, який фіксується на хвостовику різьбової кришки під час регулювання. Пристрій калібрується шляхом навантаження штовхача через динамометр, при цьому різьбовий кожух знято з бурової штанги.

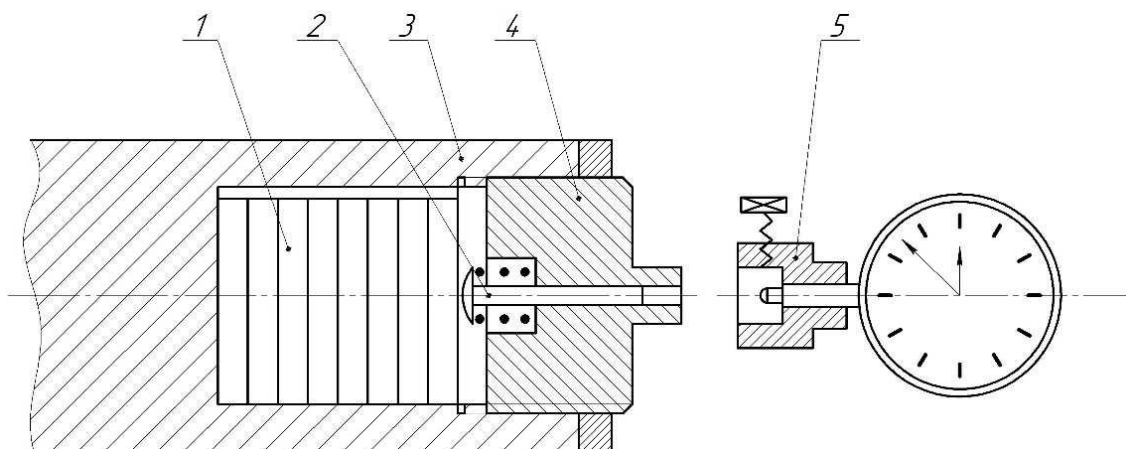


Рисунок 2.29 – Багатоелементний динамічний гаситель коливань з пристроєм для калібрування осьового зусилля стиснення.

Ефективність динамічного гасителя оцінювали двома способами: шляхом визначення АЧХ бурових штанг ( $d_1 = 25$  і  $50$  мм;  $l_1/d_1 = 6-8$ ) і вимірюванням вібрації бурових штанг ( $d_1 = 15, 25, 50$  і  $70$  мм) під час розточування.

## 2.8 Експериментальні результати динамічних гасників коливань для розточування розривних поверхонь

### 2.8.1 Встановлення залежності амплітуди коливань від кількості елементів динамічного гасителя коливань

Залежність амплітуди коливань  $A_d$  бурових штанг з динамічним гасником коливань від кількості гасників коливань (рис. 2.30) є немонотонною для обох методів випробувань. Використання динамічного гасителя коливань з оптимальним значенням  $n$ , рівним 8, призводить до зменшення амплітуди коливань під час різання в 3–5 разів порівняно з одноелементним гасником.

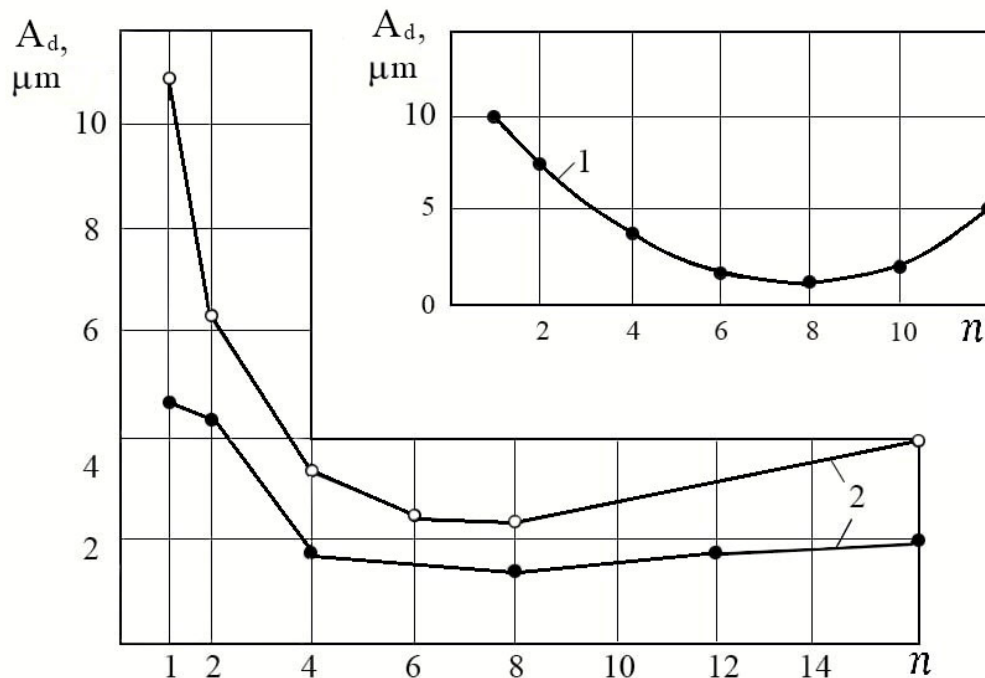


Рисунок 2.30 – Залежність амплітуди коливань від кількості елементів динамічного гасителя коливань: 1–за АЧХ; 2–при розточуванні;  $n$ –кількість елементів;  $\circ$ –  $d_1 = 50$  мм,  $l_1 = 475$  мм;  $\bullet$ –  $d_2 = 25$  мм,  $l_2 = 175$  мм.

При дослідженні частотних характеристик за міру приймають відношення максимальних значень  $A_{0\max}/A_{d\max}$ , де  $A_0$  – амплітуда коливань в системі без

демпфера ефективності динамічного гасителя коливань. За змінами ефективності: при спільній зміні діаметрального зазору та сили осьового стиснення дисків встановлено значення цих параметрів.

Досліджено умови ефективного використання динамічного гасителя коливань для обробки несучільних поверхонь. Досліджуючи гаситель коливань за умови збудження лише параметричних резонансів, виявимо, що максимальна ефективність динамічного демпфера коливань досягається з незначним коефіцієнтом демпфування. Цей результат узгоджується з теоретичним висновком рівняння (2.4). При включенні постійної складової сили різання, що призводить до параметричного збудження вимушених коливань

Враховуючи, отримуємо відмінне від нуля оптимальне значення коефіцієнта демпфування для лінійної моделі динамічного гасителя коливань. Значення  $\alpha_{opt}$ , отримане під час моделювання, приблизно на 30% менше, ніж розраховане DenHartog [265]. При дослідженні частотних характеристик за показник ефективності прийнято відношення величин  $A_0max/A_dmax$ , де  $A_0$  – амплітуда коливань в системі без демпфера.

Натурні випробування динамічного демпфера при розточуванні зразків з несучільною поверхнею проводили зміною сили стиснення дисків і діаметрального зазору. Результати цих випробувань (табл. 2.1) показують, що  $N_{opt} = 15-17$  Н і дещо більше, ніж при розточуванні твердих поверхонь, а  $2b_{opt} = 0,2-0,4$  мм. Амплітуда коливань бурильної штанги з встановленим амортизатором з оптимізованими параметрами зменшується приблизно на третину.

У табл. 2.7 наведено значення амплітуд коливань розточувальної штанги при зміні значень зусиль стиснення та діаметрального зазору (діаметр отвору  $d = 30$  мм, шість рівновіддалених канавок, сталь С45, глибина різання  $t = 0,1$  мм, швидкість різання).  $v = 200$  м/хв, а осьова подача  $s = 0,04$  мм/об).

Одноелементні динамічні гасителі коливань зменшують амплітуду коливань при резонансі і збільшують граничну податливість бурової штанги в 3–4 рази, багатоелементні – у 5–10 разів.

Таблиця 2.7 – Залежність амплітуд коливань розточувальної штанги (мкм) від діаметрального зазору (2б) і осьового зусилля стиснення дисків (Н) при розточуванні несущільної поверхні[264]

Diameter clearance $2b$ , mm	Oscillation amplitudes of the boring bar, $\mu\text{m}$					
	With vibration damper for $N$					Without vibration damper
	5	10	15	20	30	
0.1	8	7.5	5	5.5	7	10
0.2	6	4	5	5	7	
0.3	5	3.5	3	4	5	
0.4	5	4	3.5	4.5	5.5–6	
0.5	6	6	4	6	8	

### 2.8.2 Подача повітряного потоку в зону різання

Консольні розточувальні стрижні з осьовими і радіальними отворами для підведення рідини або повітря в зону різання широко застосовуються в чистових і розточувальних верстатах. Такі розточувальні стрижні забезпечують не тільки підвищену ефективність охолодження ріжучого інструменту, але й відведення стружки із зони різання. Відомі також пропозиції використовувати реакцію струменя, що витікає з розточувальної штанги, для врівноваження сили різання. Однак характеристики інструменту та взаємодія заготовки з середовищем, що витікає з розточувальної штанги, недостатньо вивчені.

Експериментальний стенд (рис. 2.31) містить спеціальну розточувальну штангу 4 ( $d_1 = 26$  мм,  $l_1/d_1 = 6,5$ ) з центральним осьовим отвором і трьома радіальними отворами, розташованими на однаковій відстані один від одного, розташованими біля різця. Розточувальна планка встановлена на шпindelній бабці 3 чистового-розточувального верстата моделі 2706В.

Кількість розеток можна змінювати за допомогою гвинтових заглушок. Повітря, що подається в зону різання, надходить в бурову штангу від компресора 1 через ресивер 2, обладнаний датчиком тиску і порожнистим шпинделем.

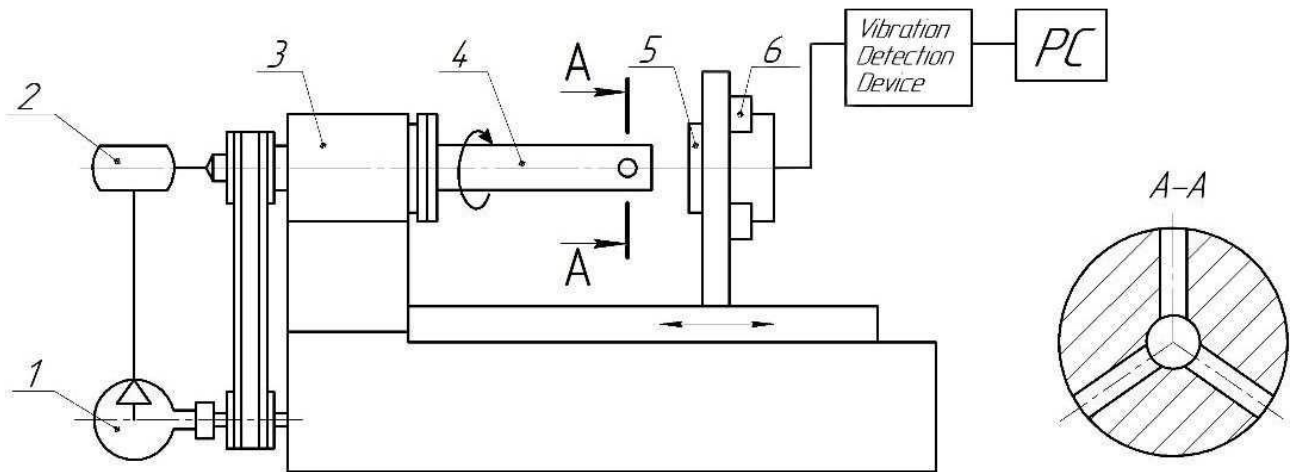


Рисунок 2.31 – Схема стану для дослідження дії повітряного потоку, що вводиться в зону різання [264]

Тиск  $P$  на виході з ресивера змінювався від 0 до 500 кПа з кроком 50 кПа при постійній витраті повітря. Індуктивний датчик 6 вимірював пружні переміщення вільного кінця бурової штанги за наявності або відсутності обробленого зразка 5. Сигнал передається на ПК через пристрій визначення вібрації.

Вимірювали пружні переміщення, коли повітря проходило через один отвір, щоб дослідити постійну складову сили взаємодії між буровою штангою та потоком. Порівнювали переміщення при виході повітря в атмосферу та в зазор між внутрішньою поверхнею зразка та зовнішньою поверхнею бурової штанги. Вихідний отвір встановлювався в середній частині зразка, довжина якого становила 30 мм. Вимірювання з обертанням бурової штанги та без нього проводили шляхом зміни тиску повітря та зазору.

Залежність пружних переміщень у від тиску  $P$  при різних значеннях зазору  $D$  (рис. 2.32, а) показує, що переміщення спрямовані в бік витікання струменя з бурової штанги.

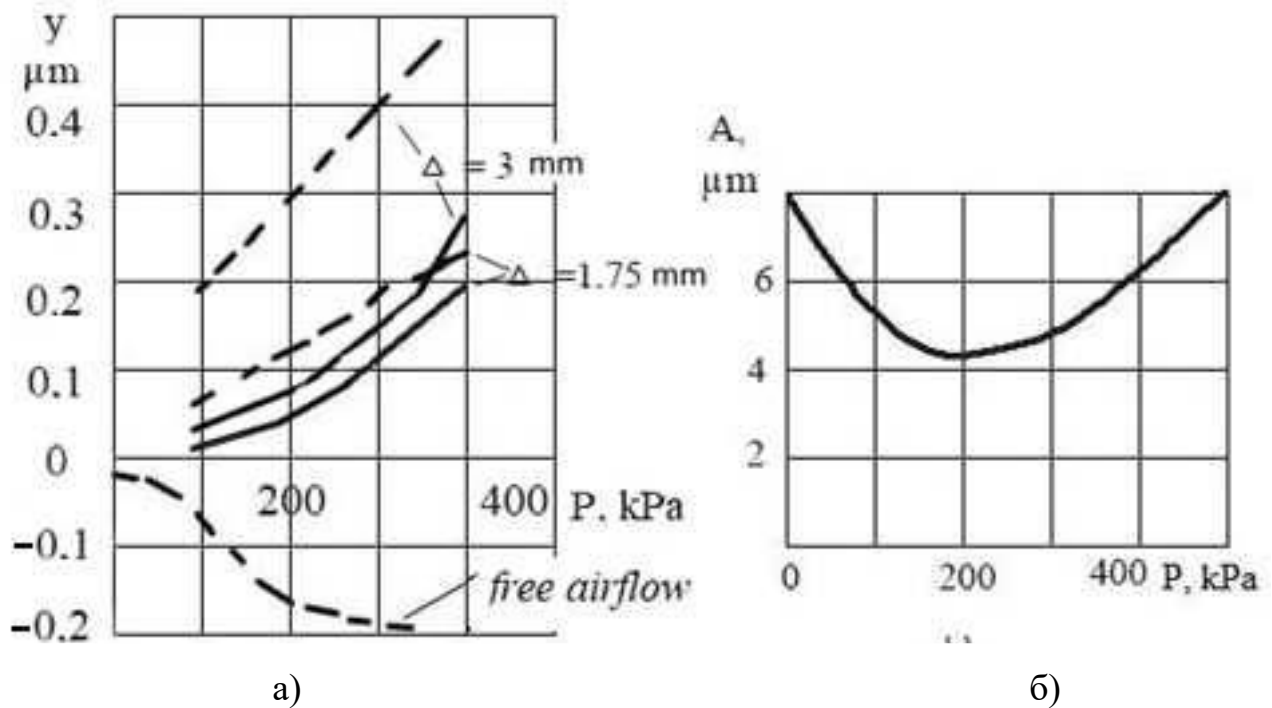


Рисунок 2.32 – Залежність пружних переміщень (а) і амплітуд коливань бурильної штанги під час розточування (б) на тиск  $P$ : – – розточувальна штанга обертається; - – бурова штанга не обертається [264]

Зі збільшенням зазору переміщення збільшуються. Обертання бурової штанги призводить до зменшення переміщень і прояву нелінійності їх залежності від тиску. При розташуванні вихідного отвору бурової штанги поза зразком і вільному надходженні повітря в атмосферу пружні переміщення спрямовані протилежно потоку, що витікає, оскільки їх викликає сила реакції струменя. Коли повітря надходить у зазор між бордюрним стрижнем і зразком, перепад тиску в потоці створює силу, яка змінює знак переміщення.

Умови відтоку повітря і напрямок сили взаємодії бурильної штанги з потоком під час буріння змінюються, оскільки рух подачі призводить до зміни положення вихідного отвору бурової штанги щодо зразка. Тому, коли повітря витікає через один отвір, сила взаємодії розточувальної штанги з повітряним потоком не може врівноважити силу різання по всій довжині обробки, в результаті чого оброблена поверхня відхиляється від циліндричності, і застосування бурових штанг з одним виходом нераціонально. Сила взаємодії бурильної штанги з потоком не викликає відхилення обробленої поверхні від

циліндричності при витіканні повітря через кілька рівновіддалених один від одного отворів в одному поперечному перерізі бурильної штанги.

Цінний ефект повітряного потоку для такої бурової штанги зростає зі збільшенням демпфірування.

При введенні бурової штанги в отвір зразка без підведення повітря виміряно значення логарифмічного вібродекременту  $d = 0,10$ . Вимірювання при протіканні повітря через три отвори показують, що зі збільшенням тиску логарифмічний декремент коливань зростає, досягаючи великих значень  $d = 0,23$  при надходженні в зазор між бурильною штангою і буровим отвором – D.

Свердлильна штанга була оснащена бурильним інструментом з Ельбор-Р. У зразках із чавуну ГП18 при різанні виточували циліндричні отвори діаметром 30 мм швидкість 250 м/хв, подача 0,04 мм/об, глибина різання 0,1 мм. Встановлено наявність мінімуму на залежності амплітуди коливань бурильної штанги під час різання від тиску повітря на виході з ресивера при  $P = 250$  кПа (рис. 2.26 б).

Перехід від обробки без подачі повітря до обробки при оптимальному тиску призводить до зменшення амплітуди коливань у 3–4 рази та зменшення висоти мікронерівностей обробленої поверхні з 3,0 до 1,1 мкм (л/д. = 10). У цьому випадку відхилення від округлості досягає значень 1–3 мкм.

### 2.8.3 Збудження коливань по дотичній до обробленої поверхні

Результати досліджень зв'язку вібраційних форм, що виникають під час розточування та фрезерування, дають змогу керувати коливаннями перпендикулярно оброблюваній поверхні шляхом збудження коливань, спрямованих по дотичній до цієї поверхні, і не породжувати похибок обробки.

Відомий позитивний ефект осьових коливань і можливість гасіння автоколивань вимушеними коливаннями. Проте розглядається лише одновимірна модель взаємодіючих коливань, а природа взаємодії різних просторових мод коливань залишається невивченою. Наприклад, незрозуміло, які характеристики гасіння коливань дозволяють збуджувати коливання,



нормальні до обробленої поверхні. Для вирішення цих проблем було проведено ряд експериментів.

На стенді досліджено вплив коливань пристосування 2 (x-вібрацій) у напрямку подачі на у-коливань перпендикулярно до поверхні, що обробляється, розточувальної штанги 6 (рис. 2.33). Індуктивні датчики 3 і 4 коливань пристосування і розточувальної штанги підключені до ПК через підсилювач віброреєстратора, на якому також реєструються імпульси від показника обертів шпинделя 5.

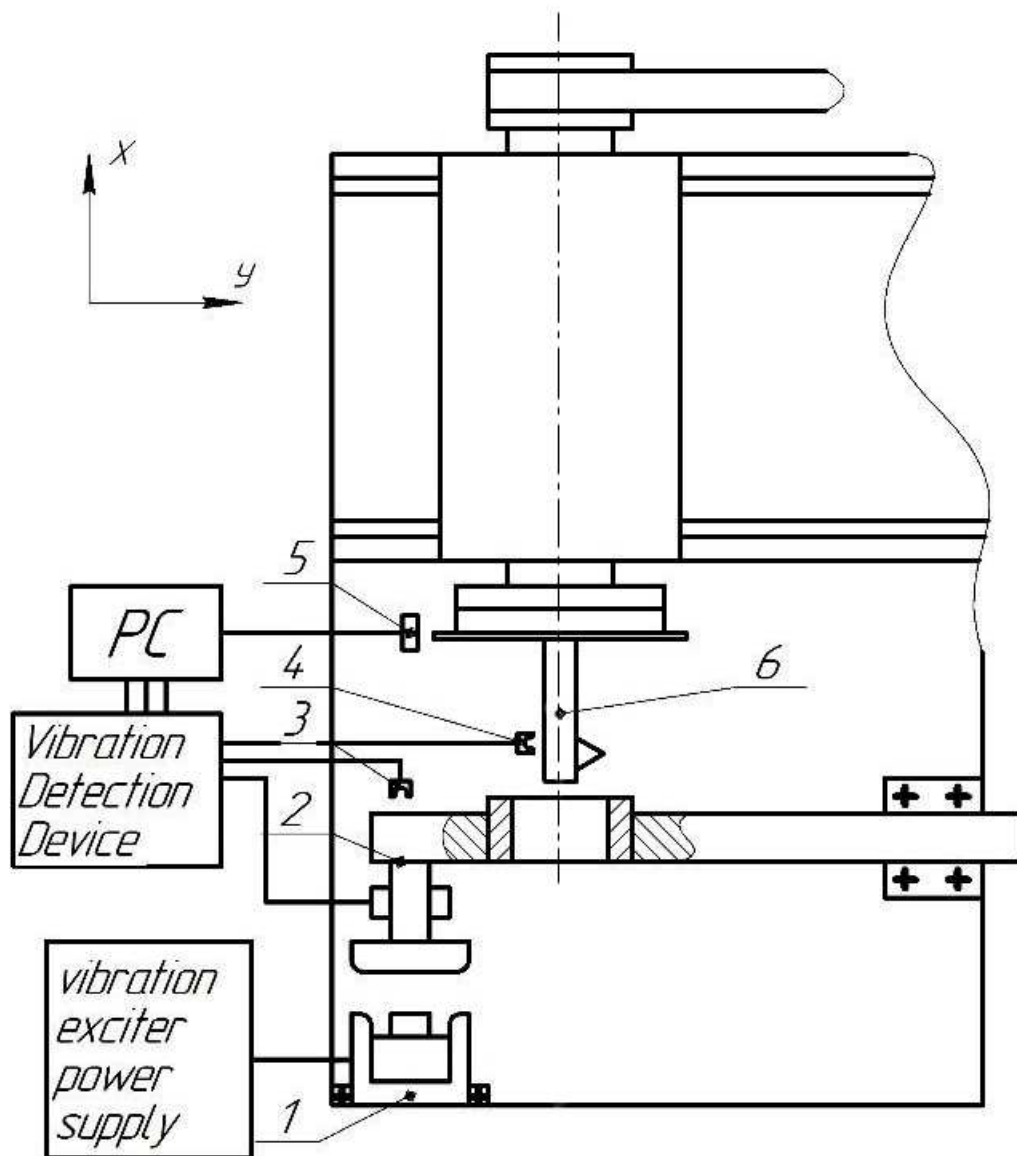


Рисунок 2.33 – Схема стенду для дослідження гасіння автоколивань коливаннями в напрямку подачі

Зразки зі сталі С45 розточували на глибину різання 0,1 мм і подачу 0,02 мм/об твердосплавним різцем, вістря якого було затуплено для забезпечення самозбудження в системі стабільних у-коливаний нудний бар. Частота обертання змінювалася в межах 1200–1800 об/хв з кроком 50 об/хв. Частота  $f_x$  змінювалася в широких межах, включаючи частоту автоколиваний  $f_y$ .

Інтенсивні автоколивання з амплітудою 10–15 мкм, що супроводжувалися характерним звуком, спостерігалися в системі за однієї з наступних умов: а) амплітуда вимушених коливаний пристосування  $a_x = 0$  або достатньо мала; ( $a_x < 2$  мкм); (б) коли частота  $f_x$  вимушених коливаний пристрою збігається з власною частотою  $f_y$  коливаний розточувальної штанги, (в) на частоті  $f_x$ , кратній частоті обертання шпинделя, тобто при досягненні рівності  $60 f_x/n = 1, 2, 3, \dots$

Ці результати проілюстровані діаграмою (рис. 2.34), на якій амплітуди  $a_y$  показані колами для різних комбінацій вимушених коливаний і частот обертання.

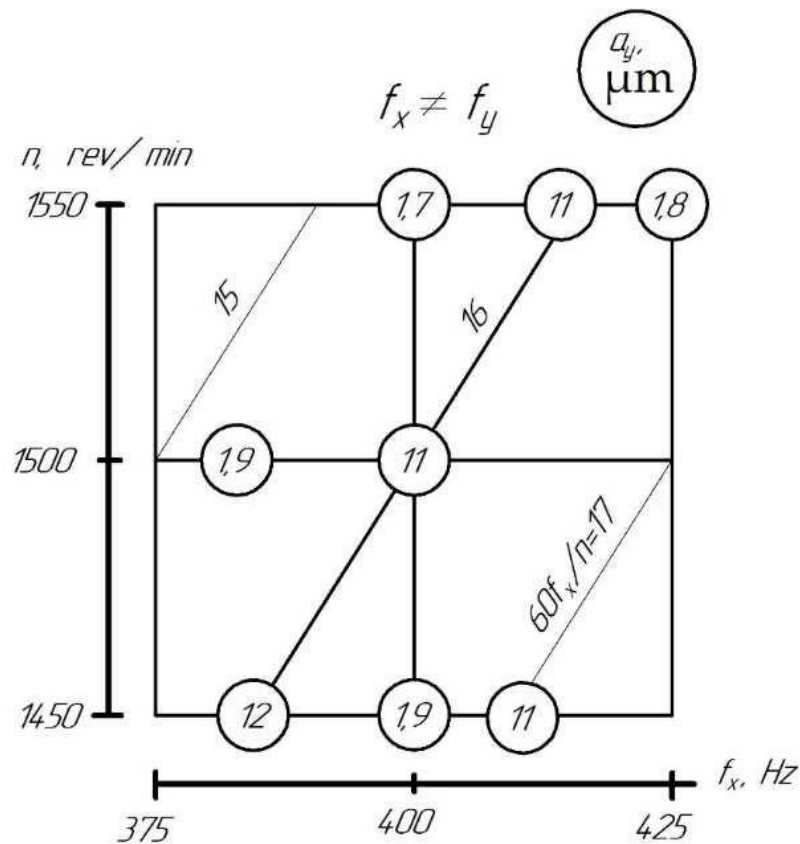


Рисунок 2.34 – Аналіз умов демпфування автоколиваний.

Зауважимо, що  $x$ -коливання змінюють переріз зрізаного шару, що призводить до зміни параметрів процесу різання; при цьому розвиваються параметричні коливання.

Зміни коефіцієнта різання породжують додаткові «сили тертя», пропорційні параметричному фактору збудження. Отже, придушення автоколивань можливе при досить великих, тобто при достатньо  $ax$ .

Умова (b) виключає кількість доступних частот вимушених коливань, які відповідають резонансу бурової штанги. Умова (в) показує, що корисна дія вимушених коливань залежить від мінливості перетину зрізаного шару.

Якщо амплітуда вимушених осьових коливань перевищує конкретне значення (для досліджуваної системи – 2 мкм),  $f_x \neq f_y$  і  $f_x/n = k + 1/2$  ( $k$  – ціле число), то амплітуди саморегулювання вібрації зменшуються в 6–7 разів. Таким чином, коливання в напрямках, дотичних до поверхні, що обробляється, здатні розстроювати та пригнічувати коливання, що збуджуються регенерацією «слідових» і «первинних» автоколивань, породжених нелінійністю елементів замкнутої динамічної системи машина.

## 2.9 Висновок

За результатами роботи розглянуто основні сфери застосування систем машинного зору для комірок спільного складання та їх місце в концепції Industry 4.0. Проведено роботи з систематизації досвіду використання систем машинного зору в колаборативних осередках та проаналізовано ринок систем машинного зору.

Встановлено, що технології спільної роботи відіграють вирішальну роль у появі Індустрії 5.0, оскільки вони забезпечують безперервний зв'язок і координацію між різними взаємопов'язаними системами, включаючи людей, машини та інші системи. Співпрацюючи з людьми, роботи можуть виконувати завдання, які вимагають спритності та гнучкості, навчаючись на людських діях, щоб адаптуватися до мінливих виробничих процесів. Крім того, технології співпраці Industry 5.0 використовують потенціал штучного інтелекту та

машинного навчання для підвищення ефективності прийняття рішень і операцій.

Сучасні дослідження пневматичних м'яких роботів довели, що вони можуть різними способами взаємодіяти з людьми та навколишнім середовищем, пересуватися по невідомій місцевості та хапати об'єкти неправильної форми, незалежно від їхнього положення.

Ці основні операції відкривають двері для програм, де роботи тісно співпрацюють з людьми. Тому в останні десятиліття зростає інтерес до розробки нових типів пневматичних м'яких роботів.

Оскільки роботи стають більш практичними, чутливістю, міцністю і підвищення ефективності стають все більш важливими. Вважається, що в найближчому майбутньому завдяки інтеграції промислового дизайну з суміжними технологіями прогрес у цій галузі створить новий стиль життя та зміни в галузі, дозволяючи інтелектуальним пневматичним м'яким роботам обслуговувати всі аспекти суспільства та виробництва.

Створено цифровий двійник металорізального верстата, що здатний контролювати параметри верстату, використовуючи швидкість різання, подачу та глибину різання як основу для моніторингу, аналізу та оптимізації в реальному часі. Це дозволить: по-перше, оптимізувати параметри різання, зменшуючи час виробництва та підвищуючи ефективність машини. По-друге, може допомогти у виборі оптимальних ріжучих інструментів і матеріалів для конкретних виробничих процесів. По-третє, є потенціал для прогнозування та запобігання можливим несправностям машин, тим самим зменшуючи витрати на обслуговування та мінімізуючи час простою.

У роботі досліджено три шляхи підвищення динамічної якості консольних розточувальних штанг, спрямовані на розширення технологічних можливостей операції тонкого розточування. Досліджено динаміку спеціальних консольних розточувальних оправ у складних режимах різання (переривчасте різання, розточування глибоких отворів із відношенням  $l/d > 3$  до  $l/d = 12$  та в умовах автоколивань). Всі три методи забезпечують гасіння коливань і

підвищують вібростійкість інструменту. Сформульовані в роботі завдання спрямовані на досягнення поставленої мети.

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених наукових досліджень можна зробити наступні висновки.

Ґрунти, де вносилися гумати, характеризуються найкращими умовами азотного та фосфатного режимів при накопиченні в них гумусових сполук за рахунок утворення гумінових кислот. Встановлено, що однією особливістю цих добрив є зниження чи повне усунення негативного впливу несприятливих на розвиток рослин чинників. Так, при відхиленні умов живлення рослин від норми, добрива ефективніші в ранні періоди розвитку рослин при значній нестачі в ґрунті фосфору. Гумінові добрива ефективніші за несприятливих для розвитку рослин погодних умов, більший ефект добрив спостерігається при відхиленні хоча б одного з факторів росту та розвитку рослин від оптимального. Нарешті, є дані, що гумінові добрива виявляють захисні властивості: радіозахист, захист від фітотоксичної дії гербіцидів, адсорбційні властивості по відношенню до шкідливих домішок і пестицидів у ґрунті.

За результатами пошуку альтернативної калієвмісної сировини для виготовлення добрив в Україні встановлено перспективність застосування золи від спалювання рослинних рештків сільськогосподарського виробництва. Основними елементами золи від спалювання соломи озимої пшениці є калій, фосфор, кальцій, магній та сірка у вигляді оксидів, карбонатів тощо. При цьому вміст калію в перерахунку на  $K_2O$  залежно від виду сировини і умов спалювання в золі може коливатися від 12 % до майже 43 %. А вміст фосфору в перерахунку на  $P_2O_5$  від 4–5 % до 16 %.

З метою підвищення споживчої цінності добрив НДІ МІНДІП СумДУ протягом останніх років проводилися технологічні й агрохімічні дослідження з одержання та застосування гуматів лужних металів. Одержані на основі торфу зразки мікродобрива «Гумат натрію» і «Гумат калію» пройшли вегетаційні, мікропольові дослідження і показали свою ефективність. Так, при вирощуванні цукрових буряків на дослідній ділянці с.м.т. Угроїди Краснопільського р-ну Сумської області на полі № 3 тільки при застосуванні гумату калію в

залежності від дози внесення було отримано прибавку врожаю від 15 % до 30 %.

В роботі встановлено раціональний склад органо-мінерального добрива на основі вітчизняної мінеральної сировини зі збільшеним вмістом масової частки водорозчинного фосфору з умістом поживних речовин, зокрема масові частки: загального азоту– 2,9 %; загальних фосфатів у перерахунку на  $P_2O_5$ – 20,0 %; водорозчинних фосфатів у перерахунку на  $P_2O_5$ – 4,0 %; загального калію у перерахунку на  $K_2O$ – 20,5 %; водорозчинного калію у перерахунку на  $K_2O$ – 17,7 %; води– 2,46 %. Показник активності водневих іонів – 6,9 рН.

Для встановлених в роботі умов отримання гранульованого добрива доведено, що тарілчастий гранулятор є найбільш раціональною конструкцією для отримання гранул органо-мінеральних добрив.

Спроектовано, виготовлено та випробувано робочий прототип фільтруючого апарату для фільтрації гумату калію. Це дозволяє отримати органічні добрива які можна буде вносити на лист, що дає можливість рослині отримувати швидше корисні речовини, тим самим підвищити урожайність.

За результатами досліджень викликів Індустрії 5.0, встановлено, що більшість питань вже можна вирішити за допомогою сучасних технологій. Невирішені або погано розроблені технології мають ментальний компонент (відсутність довіри до технологій з боку людей, відсутність емпатії у роботів, етичні проблеми). Технології співпраці є життєво важливими для Індустрії 5.0, оскільки вони забезпечують ефективний зв'язок і координацію між різноманітними системами, основними компонентами яких є роботи та штучний інтелект. Вони сприяють швидшому прийняттю рішень і підвищують операційну ефективність, забезпечуючи конкурентоспроможність та інноваційність бізнесу на сучасному ринку, що швидко розвивається.

Встановлено, що технології спільної роботи постійно розвиваються, і очікується, що численні тенденції вплинуть на майбутнє співпраці в найближчі роки. Примітно, що твердження, сформульовані в цьому дослідженні, підтверджуються результатами попередніх досліджень [266], які окреслили

низку методів співпраці людини та робота та оцінили їх придатність для різноманітних методів виробництва. Дослідження [267] визначило програми, сприятливі технології та майбутні напрямки розвитку промисловості 5.0. Автори дослідження [268] висвітлили майбутні тенденції та прогнози щодо впровадження нових технологій та їхньої ролі у співпраці людини та робота. Відповідно до висновків [269], було показано, що спільна робототехніка відіграє вирішальну роль у забезпеченні якості. Його основне застосування – візуальні перевірки в процесі роботи для підвищення загальної ефективності системи.

Встановлено, що поєднання м'яких роботів і клітинного виробництва створить умови для подальшого вдосконалення виробничого процесу за рахунок підвищення ефективності, надійності, швидкості та зменшення виробничих площ. Реалізація концепції цифрового близнюка в повному виробництві забезпечує достатньо даних про кожну збірку для моніторингу виробничих процесів у режимі реального часу. Він дозволяє індивідуально налаштовувати елементи кріплення в пристрої для кожного окремого вузла на основі даних сканування сполучених частин цього вузла. Результати показали, що за допомогою цього методу можна було отримати покращення до 81 % у точності геометричних розмірів (довжини, висоти, ширини) використовуваних вузлів і 78 % у середньому відхиленні вузлів порівняно з вузлами без регулювання [270]. Використання технології цифрових близнюків у цьому контексті пропонує значний потенціал для підвищення керованості, критичної характеристики сучасних пневматичних роботів.

Виготовлення цифрового близнюка у вигляді м'якої гнучкої роботизованої руки збільшить діапазон рухів і точність порівняно зі звичайними маніпуляторами. На відміну від маніпуляторів із жорсткими ланками, з'єднаними шарнірами, ці важелі мають міцну, гнучку та еластичну структуру, що робить їх придатними для багатьох застосувань. Найбільш ефективним у цьому напрямку є використання м'якої роботизованої руки як пневматичного м'язового приводу. Недоліком використання пневматичного



м'язового актуатора є складність управління, пов'язана з нелінійністю механізму приводу зап'ястя.

В роботі визначено перелік основних властивостей і особливостей систем машинного зору, пов'язаних з вимогами до сучасних монтажних майданчиків для спільної роботи. Система машинного зору складається з наступних елементів: датчика зображення, пристрою обробки зору, лінзи, освітлення та комунікаційних компонентів [271]. В роботі було розглянуто лише датчики зображення та пристрої обробки зору, оскільки їх оптимальний вибір є важливим для забезпечення якості та продуктивності програми. Запропоновано рекомендації щодо оптимального вибору систем машинного зору для колаборативних сфер. Ці рекомендації були перевірені в тематичному дослідженні під час вибору систем машинного зору для робототехнічної комірки спільного складання лабораторії SmartTechLab (Факультет виробничих технологій з місцем розташування в Пряшові, Технічний університет у Кошице).

Встановлено, що інерційні динамічні гасителі використовуються для придушення гармонійних, а також вузькосмугових випадкових коливань. Ці динамічні демпфери налаштовані на частоту пригнічених коливань шляхом встановлення жорсткості пружного елемента та маси демпфера. В умовах дії широкосмугових вібраційних впливів застосовуються динамічні гасителі з фрикційними і віброгасителями. Для динамічних амортизаторів величину і масу зазору вибирають залежно від частоти та амплітуди збурюючої сили. Динамічні амортизатори найчастіше використовуються для розточувальних штанг. У той же час їх багатоелементність найефективнішими є страти. Таким чином, щоб налаштувати динамічні демпфери, необхідно розуміти особливості впливів, що викликають вібрацію. Крім силових і зовнішніх кінематичних впливів на пружну систему машини, джерелами коливань є параметричні збурення.

Ці особливості породжують низку обчислювальних проблем. Одну з таких задач – умови організації динамічного гасителя коливань для

придушення параметричного резонансу – розв’язано в цій роботі. Періодичні повтори врізання і виходу інструмента під час переривчастого різання призводять до мінливості параметрів пружної системи, процесу різання та інших робочих процесів. У цьому випадку коливання більш високого рівня збуджуються більше, ніж при безперервному різанні. Для ударно-динамічного гасителя коливань умови оптимальної настройки (зі зміною зусиль стиснення дисків і діаметрального зазору) дозволяють зменшити амплітуду згинальних коливань у три рази порівняно з розточуванням без гасителя коливань. Умови оптимального налаштування при придушенні параметричних і вимушених коливань якісно близькі.

Встановлено, що найбільша ефективність віброгасіння досягається за допомогою багатоелементних ударно-динамічних пристроїв. Одноелементні амортизатори коливань підвищують величину граничної податливості бурильної штанги в 3–4 рази, а багатоелементні – у 5–10 разів.

В роботі досліджено три способи гасіння коливань спеціальних консольно-розточувальних оправ для тонкого розточування в особливих умовах різання (при обробці глибоких отворів, періодичному розточуванні та при автоколиванні). Для розширення технологічних можливостей тонкого розточування необхідно підвищити динамічну якість консольного інструменту. Аналітично визначено умови налаштування динамічного гасителя коливань для придушення параметричного резонансу: часткова власна частота гасителя має дорівнювати частоті параметричного збудження, а непружний опір зв’язку гасителя з об’єктом має бути якомога меншим.

Встановлено, що умови оптимального налаштування віброгасителів при придушенні параметричних вимушених коливань якісно близькі. Найвища ефективність гасіння коливань досягається при застосуванні багатоелементних ударно-динамічних пристроїв. При переривчастому різанні умови оптимального налаштування наступні: 1) багатоелементний віброгаситель бурової штанги, що зменшує амплітуду згинальних коливань в три рази; 2) кількість елементів (мас) абсорбера  $n = 8$ ; 3) залежність амплітуд коливань

бурової штанги від сили осьового стиснення дисків і величини діаметрального зазору ( $N_{\text{опт}} = 15 \text{ Н}$ ,  $D = 0,2\text{--}0,4 \text{ мм}$ ).

Досліджено особливості взаємодії повітряного потоку, що витікає з радіальних отворів у розточувальному прутку, із заготовкою. Визначено значення тисків, що забезпечують мінімальний рівень коливань і найменші похибки обробки. При тиску 200–400 кПа та зазор між свердловиною та зразком приблизно 2 мм значення логарифмічного вібродекременту зростають до 0,25. В цьому випадку амплітуда вібрації розточувального бруска зменшується з 7–8 мкм до 1,5–2 мкм, а шорсткість обробленої поверхні  $R_a = 1\text{--}2 \text{ мкм}$ .

Досліджено можливість ефективного зменшення згинальних коливань, перпендикулярних до обробленої поверхні, під дією вимушених осьових коливань у напрямку подачі. Визначено умови демпфування амплітуд автоколивань до семи разів порівняно з коливаннями бурильної штанги без вимушених осьових коливань (5 мкм). В експериментах на розточувальних зразках сталі без осьових коливань амплітуда досягала значень 15–20 мкм.

Отримані в ході виконання науково-дослідної роботи результати були або будуть частиною випускних кваліфікаційних робіт здобувачів факультету «Технічних систем та енергоефективних технологій» Сумського державного університету, зокрема: О. А. Заєць, М. І. Ілюхін, Р. В. Мовчан, Д. Ю. Потомаха, Д. А. Соловйов, Р. В. Тіцький, Д. К. Гринько, Д. С. Коваленко, Н. В. Костюк, О. О. Кулак, Р. Ю. Малиник, О. О. Мандрика, Д. І. Мищенко, О. М. Москальчук, Х. С. Пирогов, Л. В. Рудецька, А. Р. Сергієнко; аспірантів: О. Д. Євдокимов, Б. А. Остапенко, Д. В. Острога, О. С. Соколов, В. К. Андрусишин; докторанта Р. О. Острога. Науковими керівниками зазначених кваліфікаційних робіт були або є науково-педагогічні працівники виконавці відповідної науково-дослідної роботи.

Частина результатів науково-дослідної роботи було оприлюднено в наступних наукових публікаціях: [136, 190, 195, 198, 201, 204, 238, 264, 272, 273,

274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291].

## РЕКОМЕНДАЦІЇ

Тестовий вегетаційний дослід з вирощування ярого ячменю з дослідженням дії на врожайність добрива, що виготовлене з золи з додаванням фосфорної кислоти показав достовірну прибавку врожаю на 3,1 %, що вказує на перспективність цього напрямку досліджень.

Проведено аналіз інформаційних технологій, що можуть вирішити виклики Індустрії 5.0. Результатом дослідження є систематизація інформації про вже наявні технології, які можуть вирішити проблеми Індустрії 5.0 та проблеми, які зараз не вирішуються технологіями. Результати дослідження можуть бути використані як основа для подальших досліджень технологій співпраці в контексті Індустрії 5.0. Це може бути основою для подальших наукових досліджень зі створення спільної системи робот-людина для процесів металообробки та складання.

Запропонована методологія для створення цифрового близнюка м'якого робота з використанням пневматичних м'язів має численні практичні застосування, зокрема у виробництві клітин. Це потенційно може оптимізувати робоче середовище та зменшити вимоги до простору. Майбутні дослідження в цій галузі можуть вивчити додаткові додатки цифрових близнюків у робототехніці та продовжити дослідження їхнього потенціалу для покращення керованості, зниження витрат виробництва та оптимізації робочого середовища в різних галузях промисловості.

У роботі представлено порівняння цифрового двійника робота з пневматичними м'язами, а також реального робота. Результати моделювання показують, що цифровий близнюк і фізичний об'єкт майже ідентичні. Максимальна відносна похибка між ними не більше 10%.

В роботі визначені основні властивості та особливості систем машинного зору в частині її основних елементів: датчики зображення та пристрої обробки зору. Це дозволяє в подальшому дослідникам та інженерам спростити та прискорити процес прийняття рішень щодо раціонального вибору систем

машинного зору для лабораторій та виробничих ліній, до складу яких можуть входити колаборативні роботи.

Рекомендовано в подальшому провести більш детальний аналіз застосування систем машинного зору у сфері безпеки та аналіз інших елементів систем машинного зору, таких як освітлення та лінзи.

В роботі досліджено три способи гасіння коливань спеціальних консольно-розточувальних оправ для тонкого розточування в особливих умовах різання. Для покращення динамічних властивостей розточувальних оправ із налаштованим гасником коливань під час переривчастого різання потрібно додатково провести ряд експериментів. В якості одного з варіантів таких експериментів може виступати конструктивне збільшення крутильної податливості розточувальної штанги з вбудованим гасником коливань. Це збільшить час занурення (перехідний час), відбудеться амортизація ударів і зменшиться знос ріжучих лез. У розвитку проведених експериментів необхідно визначити умови виключення «застійних зон» у багатоелементних динамічних демпферах при роботі мас як єдине ціле.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

- 1 Балюк С. А. Наукове забезпечення розвитку виробництва та застосування добрив у землеробстві України : доп. засідання президії НААН, 09.2021 р. – К. : НААН України : ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського, 2021. Режим доступу: [http://naas.gov.ua/news/?ELEMENT\\_ID=7171](http://naas.gov.ua/news/?ELEMENT_ID=7171).
- 2 Омельчук О., Садогурська, С. Як воєнне вторгнення Росії впливає на довкілля України [Електронний ресурс] // ZN.ua. Дзеркало тижня. 27 березня 2022 р. Режим доступу: <https://zn.ua/ukr/ECOLOGY/priroda-stohne-vid-vijni.html>.
- 3 Иванов Е. В. Чрезвычайные ситуации со взрывами боеприпасов: закономерности возникновения и протекания / Е. В. Иванов, В. М. Лобойченко, С. Р. Артемьев, А. Е. Васюков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 1(10). – С. 26–35.
- 4 Фатеев А. И. Локальный способ внесения удобрений // Почвенно-агрохимические аспекты. – Харьков : Друкарня № 13, 2002. – 160 с.
- 5 Мудрый И. В. Эколого-гигиенические аспекты применения минеральных удобрений в сельском хозяйстве // Гигиена и санитария. – 2006. – № 4. – С. 40–43.
- 6 Балюк С. А., Воротинцева Л. І., Ладних В. Я. Заходи з детоксикації забруднених ґрунтів та зменшення транслокації важких металів в сільськогосподарські культури. Рекомендації. Харків : Смугаста типографія. 2014. 56 с.
- 7 Наукові основи та практичні рекомендації з використання важкорозчинних форм фосфорних добрив з місцевих родовищ / за ред. д. с-г. наук, проф., акад. УААН Б. С. Носка. – Х. : Типографія № 13, 2005. – 109 с.
- 8 Давидова О. Є. Перспективні засоби підвищення ефективності фосфоритного добрива агрофоски / О. Є. Давидова, М. Д. Аксиленко, К. Ю. Дерев'янку // Фосфор і калій у землеробстві. Проблеми мікробіологічної мобілізації : Міжнародна науково-практична конференція. – Чернігів-Харків, 2004. – С. 39–48.

- 9 Носко Б. С. Використання фосфоритного борошна з родовищ України для зменшення забруднення продукції рослинництва важкими металами / Б. С. Носко, А. О. Христенко, Т. А. Юнакова // Вісник аграрної науки. – 2004. – № 3. – С. 55–58.
- 10 Шевчук М. Й. Ефективність використання фосфоритонесних агроруд / М. Й. Шевчук, В. А. Гаврилюк // Вісник аграр. науки. – 2002. – № 3. – С. 10–12.
- 11 Брагін Ю. М. Зернисті фосфорити України [Текст]. – Сімферополь : Таврія, 2000. – 73 с.
- 12 Місцева фосфатна сировина для виробництва екологічно безпечних добрив / Вакал В. С., Мальований М. С. Вакал С. В. – Кременчук, 2017. – С. 131.
- 13 Сучасний стан фосфатно-тукової промисловості України / С. В. Вакал, І. М. Астрелін, М. О. Трофіменко, О. Є. Золотарьов. — Суми : Собор, 2005. — 80 с.
- 14 Фосфоровмісні мінеральні добрива. Вітчизняна фосфатна сировина для їх виробництва / В. С. Вакал, С. В. Вакал ; рец. Л. Д. Пляцук // Хімічна промисловість України : науково-виробничий журнал. – 2013. – № 1. – С. 36-39.
- 15 Мальований М. С., Вакал С. В., Вакал В. С. Місцева фосфатна сировина для виробництва екологічно безпечних добрив. Проблеми екологічної безпеки : збірник тез доповідей XV міжнародної науково-технічної конференції (11–13 жовтень 2017). – Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2017. – 134 с. – С. 131.
- 16 Процес формування нових екологічно безпечних добрив пролонгованої дії на основі сировини фосфоритових родовищ. (2021): звіт про НДР (проміжний) / кер. Г. О. Яновська. – Суми : СумДУ. – 128 с. – № 0120U102003.
- 17 Методичні вказівки з охорони ґрунтів / Греков В. О., Дацько Л. В., Жилкін В. А., Майстренко М. І. та ін. – К., 2011. – 108 с.
- 18 Заречений В. Г. Кадмій у фосфоровмісних мінеральних добривах / В. Г. Заречений, С. В. Вакал // Хімічна промисловість України. – 2003. – № 6. – С. 18–20.



- 19 Гуминовые удобрения. Теория и практика их применения [Текст] : тематический сборник. / Ред.-изд. отдел Днепропетровского СХИ, 1983. – т. IX. – С. 181.
- 20 Драгунов, С. С. Химическая характеристика гуминовых кислот и их физиологическая активность [Текст] // Гуминовые удобрения. Теория и практика их применения : сб. научн. тр. – Днепропетровск : ДСХИ, 1980. – т. 7. – С. 2–21.
- 21 Рекомендации по применению гумата натрия под сельскохозяйственные культуры / Днепропетровский гос. агр. ун–т [Текст]. – Днепропетровск, 1991. – С. 20.
- 22 Корнієнко, Я. М. Процес одержання модифікованих гранульованих гуміново-мінеральних добрив [Електронний ресурс] : монографія для студентів, які навчаються за напрямком «Машинобудування» спеціальність «Обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів» / Я. М. Корнієнко, А. М. Любека, С. С. Гайдай ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 206 с.
- 23 Центило А. В. Органічні добрива для сучасних систем землеробства : монографія. – Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2017. – 260 с.
- 24 Марчук І. У., Савчук А. В., Філонов Є. А. Добрива та їх використання : Довідник. – К. : Арістей, 2010. – 254 с.
- 25 Нагурський О.А. закономірності капсулювання речовин у стані псевдо зрідження та їх дифузійного вивільнення: монографія / О.А. Нагурський. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 188 с.
- 26 Giroto, A. S., do Valle, S. F., Guimarães, G. G. F., Molina, A., Reis, H. P. G., Fernandes, D. M. et al. (2020). Tailoring Efficient Materials for NPK All-in-One Granular Fertilization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59 (41), 18387–18395. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c02985>.

- 27 Sherkuziev, D. (2021). Simple superphosphate by two-stage acid treatment of phosphate raw materials. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 939 (1), 012057. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/939/1/012057>
- 28 Yukhymenko, M., Ostroha, R., Bocko, J. (2022). Design of a shelf pneumatic classifier for separating a polydisperse mixture of granulated superphosphate. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (1 (120)), 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.67037>
- 29 Fazullin, R. K., Khalitov, R. A., Khuziahmetov, R. K., Matuhin, E. L., Fazullina, A. A. (2020). Granular nitrogen and nitrogen-potassium fertilizers containing sulfur from the spent acid mixture of nitrocellulose production. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 862 (6), 062034. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/862/6/062034>
- 30 Корнієнко Я. М. Процес одержання модифікованих гранульованих гуміново-мінеральних добрив [Електронний ресурс] : монографія / Я. М. Корнієнко, А. М. Любека, С. С. Гайдай. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 206 с.
- 31 Erro, J., Urrutia, O., Baigorri, R., Fuentes, M., Zamarreño, A. M., Garcia-Mina, J. M. (2016). Incorporation of humic-derived active molecules into compound NPK granulated fertilizers: main technical difficulties and potential solutions. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 3 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0071-7>
- 32 Ostroha, R. Technology of producing granular fertilizers on the organic basis / R. Ostroha, M. Yukhymenko, Ya. Mikhajlovskiy, A. Litvinenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 1, Issue 6 (79). – P. 19–26. doi: [10.15587/1729-4061.2016.60314](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.60314)
- 33 Skydanenko, M., Sklabinskyi, V., Nadhem, A.-K. M., Nichvolodin, K. (2021). Determination of granule (prill) movement modes in the prilling tower for mineral fertilizer production. Technology Audit and Production Reserves, 5 (3 (61)), 6–9. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.241142>

- 34 Nadhem, A.-K. M., Sklabinsky, V., Ostroha, R., Skydanenko, M., Yukhymenko, M., Bocko, J., Ostroha, D., Zabitsky, D., Moskalchuk, O., Serhiienko, A. (2023). Study of temperature changes in mineral fertiliser granules after contact with air in a granulation tower. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (3 (72)), 10–14. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286693>
- 35 Baboo, P. (2021). Prilling tower and granulator heat and mass transfer. *Journal of Global Optimization*, 9 (1).
- 36 Казакова О. О. Гранулювання і охолодження азотовмісних добрив / О.О. Казакова. – М.: Хімія, 1980. – 288 с.
- 37 Холін Б. Г. Відцентрові та вібраційні гранулятори плавів та розпилювачі рідини / Б. Г. Холін. – М.: Машинобудування, 1977. – 182 с.
- 38 Method for transforming a prilling section including a prilling tower, in particular in a plant for the synthesis of urea (2016). European patent specification. No. Publication: 28 .09.2016 Bul. No. 2016/39.
- 39 Лавренченко Г. К., Грудка, Б. Г. (2020). Поліпшення показників грануляційної вежі карбамідного виробництва. *Холодильна техніка та технологія*, 56 (1-2), 44-53. <https://doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1828>
- 40 Gezerman, A. O. (2020). Mathematical modeling for prilling processes in ammonium nitrate production. *Engineering Reports*, 2 (6). doi: <https://doi.org/10.1002/eng2.12173>
- 41 Saikh M.A. A technical note on granulation technology: a way to optimise granules / *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, vol. 4, 2013, pp.55-67.
- 42 Sheng, T. C. One-Dimensional Modeling of Hydrodynamics in a Swirling Fluidized Bed / T. C. Sheng, S. A. Sulaiman, V. Kumar // *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*. – 2012. – Vol. 12, Issue 6. – P. 13–22.
- 43 Gupta, S. K. Microencapsulation techniques and its application in pharmaceutical / S. K. Gupta, I. J. Singhvi, M. K. Shirsat, G. Karwani, A. Agarwal,

Aditi // Asian Journal of Pharmaceutical Sciences and Clinical Research. – 2011. – Vol. 1, Issue 3. – P. 67–77.

44 Yukhymenko, M. Hydrodynamic and kinetic processes of the mineral fertilizer granules encapsulating in the multistage device with suspended layer [Text] / M. Yukhymenko, R. Ostroga, A. Artyukhov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, Issue 6 (84). – P. 22–28. doi: 10.15587/1729-4061.2016.84179

45 Caiyuan, Y. Heat and mass transfer in process of fluidized bed spray granulation [Text] / Y. Caiyuan, Q. Tao, W. Xizhong // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2004. – Vol. 16, Issue 6. – P. 836–839.

46 Нагурський, О. А. Експериментальні дослідження теплообміну під час капсулювання дисперсних матеріалів в залежності від швидкості теплоносія [Текст] / О. А. Нагурський // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – № 3. – С. 105–109.

47 Ostroha R. Investigation of the kinetic laws affecting the organic suspension granulation in the fluidized bed / R. Ostroha, M. Yukhymenko, S. Yakushko, A. Artyukhov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Engineering technological systems. – 2017. – № 4/1(88). – P. 4–10. DOI 10.15587/1729-4061.2017.107169

48 Askarishahi, M.; Salehi, M.-S.; Radl, S. Challenges in the Simulation of Drying in Fluid Bed Granulation. Processes 2023, 11, 569. <https://doi.org/10.3390/pr11020569>

49 Heinrich, S., Henneberg, M., Peglow, M., Drechsler, J., & Mörl, L. (2005). Fluidized bed spray granulation: analysis of heat and mass transfers and dynamic particle populations. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 22, 181-194. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322005000200004>

50 Grimmett, E. S. Kinetics of particle growth in the fluidized bed calcinations process / E. S. Grimmett // AJChE Journal. – 1964. – Vol. 10, Issue 5. – P. 717–722. doi: 10.1002/aic.690100527

- 51 Kornienko, Y. Mathematical modeling of continuous formation of multilayer humic-mineral solid composites / Y. Kornienko, R. Sachok, V. Rayda, O. Tsepka // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2009. – Vol. 4. – P. 335–338.
- 52 Davidson J.F. Fluidization / J.F. Davidson, D. Harrison. – London: Department of Chemical Engineering University of Cambridge, 1971. – 728 p.
- 53 Острога Р.О. Процес покриття гранул мінеральних добрив органічною суспензією. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. 2014 [Режим доступу: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/36852>]
- 54 Caiyuan, Y. Heat and mass transfer in process of fluidized bed spray granulation [Text] / Y. Caiyuan, Q. Tao, W. Xizhong // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2004. – Vol. 16, Issue 6. – P. 836–839.
- 55 Patel, P. Comparison of Different Granulation Techniques for Lactose Monohydrate [Text] / P. Patel, D. Telange, N. Sharma // *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Drug Research*. – 2011. – Vol. 3. – P. 222–225.
- 56 Agrawal, R. Pharmaceutical Processing – A Review on Wet Granulation Technology [Text] / R. Agrawal, Y. Naveen // *International Journal of Pharmaceutical Frontier Research*. – 2011. – Vol. 1. – P. 65–83.
- 57 Artyukhov, A. E., Sklabinskyi, V. I. (2015). Hydrodynamics of gas flow in small-sized vortex granulators in the production of nitrogen fertilizers. In: *Chemistry & Chemical Technology*, Vol. 9, No. 3, pp. 337 - 342.
- 58 Kaewklum, R. Hydrodynamics of air–sand flow in a conical swirling fluidized bed: A comparative study between tangential and axial air entries / R. Kaewklum, V. I. Kuprianov, P. L. Douglas // *Energy Conversion and Management*. – 2009. – Vol. 50, Issue 12. – P. 2999–3006. doi: 10.1016/j.enconman.2009.07.019
- 59 Volchkov, E. P. Investigation of the flow in the vortex chamber with centrifugal fluidizing bed with and without combustion / E. P. Volchkov, N. A. Dvornikov, V. V. Lukashov, R. Kh. Abdrakhmanov // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2013. – Vol. 20, Issue 6. – P. 663–668. doi: 10.1134/s0869864313060024

- 60 36. Dvornikov, N. A. Investigation of a fluidized bed in a vortex chamber / N. A. Dvornikov, P. P. Belousov // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2011. – Vol. 52, Issue 2. – P. 206–211. doi: 10.1134/s0021894411020076
- 61 Острога Р. О. Кінетика капсулювання гранульованих мінеральних добрив органічною оболонкою / Р. О. Острога // *Вісник НТУ ХПІ. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – 2014. – № 7 (1050). – С. 146–151.
- 62 Класен П.В. Гранулювання / П.В. Класен, І.Г. Гришаєв, И.П. Шомін. – М.: Хімія, 1991. – 240 с.
- 63 Петряєв М.В., Полякова Ю.П., Топоров А.А., Трет'яков П.В. Порівняльно-оглядова характеристика екструдерних та грануляційних установок // *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Машинобудування і машинознавство»*, No1(16), 2019. – с. 36 – 44. : <https://doi.org/10.31474/2308-5312-2019-1-36-44>
- 64 Garcia, L., Rodriguez, G., Orjuela, A. (2021). Study of the pilot-scale pan granulation of zeolite-based molecular sieves. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 38 (1), 165–175. doi: <http://doi.org/10.1007/s43153-020-00087-x>
- 65 Ouchiya, N., Tanaka, T. (1981). Kinetic analysis of continuous pan granulation. Possible explanations for conflicting experiments and several indications for practice. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 20 (2), 340–348. doi: <http://doi.org/10.1021/i200013a025>
- 66 Azrar, H., Zentar, R., Abriak, N.-E. (2016). The Effect of Granulation Time of the Pan Granulation on the Characteristics of the Aggregates Containing Dunkirk Sediments. *Procedia Engineering*, 143, 10–17. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.002>
- 67 Pamungkas, R. B., Jos, B., Djaeni, M., Saputri, K. A. D. (2020). Granulation processing variables on the physical properties of granule slow release urea fertilizer. *Proceedings of 2nd international conference on chemical process and product engineering (ICCPPE) 2019*, 2197. doi: <http://doi.org/10.1063/1.5140952>

- 68 Przywara, M., D r r, R., Otto, E., Kienle, A., Antos, D. (2021). Process Behavior and Product Quality in Fertilizer Manufacturing Using Continuous Hopper Transfer Pan Granulation – Experimental Investigations. *Processes*, 9 (8), 1439. doi: <http://doi.org/10.3390/pr9081439>
- 69 Leszczuk, T. (2014). Evaluation of the Fertilizer Granules Strength Obtained from Plate Granulation with Different Angle of Granulation Blade. *Acta Mechanica et Automatica*, 8 (3), 141–145. doi: <http://doi.org/10.2478/ama-2014-0025>
- 70 Chadwick, P. C., Rough, S. L., Bridgwater, J. (2005). Holdup and Residence Time Distributions in Inclined Dishes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44 (19), 7529–7539. doi: <http://doi.org/10.1021/ie040252z>
- 71 Гідродинамічний фільтр : пат. 42231 Україна : B01D29/11. № 2000116765 ; заявл. 28.11.2000 ; опубл. 15.10.2001, Бюл. № 9. 2 с.
- 72 Фільтр для очищення рідини : пат. 132880 Україна : B01D29/00, B01D35/26. № u 2018 10678 ; заявл. 29.10.2018 ; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5. 7 с.
- 73 US 2011/0042289 A1, МПК B01D 15/22, B01D 35/30 ; опубл. 2011.
- 74 Фільтр для очищення рідини або газу : пат. 136388 Україна : B01D46/24. № u 201903001 ; заявл. 27.03.2019 ; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15. 8 с.
- 75 Фільтр для очищення рідини : пат. 129309 Україна : B01D29/00, B01D35/15, B01D35/26. № u 201804847 ; заявл. 03.05.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 6 с.
- 76 Патент DE № 3529706 : B01D 29/40 ; опубл. 1987.
- 77 Патент Японії № 4-70921 : B01D29\07, B01D29\06 ; опубл. 21.11.1992.
- 78 Спосіб очищення рідини від механічних домішок та пристрій для його здійснення : пат. 124241 Україна : B01D29/23, B01D29/72, B01D35/22, B01D29/90, B01D29/56, C02F1/38, B01D35/30, B01D37/00. № a 2019 03809 ; заявл. 12.04.2019 ; опубл. 12.08.2021, Бюл. № 32. 10 с.
- 79 Патент США № 4085051 : B01D36/16 ; опубл. 22.08.1978.
- 80 Патент США № 4759846 : B01D33/06 ; опубл. 15.02.1989.

- 81 Фільтр : пат. 4967 Україна : B01D29/00. № 20040604651 ; заявл.04.06.2004 ; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2. 2 с.
- 82 Сидоров Ю. І. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості (2 том) /Ю. І. Сидоров, Р. Й. Влязло, В. П. Новіков. – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 240 с.
- 83 Ken Sutherland, 2008. Filters and Filtration Handbook. Fifth ed. Elsevier Ltd.<https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-464-0.00006-7>
- 84 С.Н. Kadurumba & S.C. Nwanya (2016) Modeling of a centrifuge for cassava mash (Manihot species) dewatering, Journal of the Chinese Advanced Materials Society, 4:4, 285-301, DOI: 10.1080/22243682.2016.1215934
- 85 Н. Anlauf, Recent developments in centrifuge technology, Sep. Purif. Technol. (2017),doi:10.1016/j.seppur.2007.05.012
- 86 Kol, Rita, Elisabetta Carrieri, Sergei Gusev, Michiel Verswyvel, Norbert Niessner, Angeliki Lemonidou, Dimitris S. Achilias, and Steven De Meester. 2023. “Removal of Undissolved Substances in the Dissolution-Based Recycling of Polystyrene Waste by Applying Filtration and Centrifugation.” SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY 325. doi:10.1016/j.seppur.2023.124682.
- 87 Nwogu, Chukwunonso N. “Design and Development of an Industrial Centrifuge for Small and Medium Scaled Industries.” Innovative Systems Design and Engineering 6 (2015): 1-9.
- 88 Соколов В. И. Центрифугирование. – М.: Химия, 1976. – 408 с.
- 89 Лукьяненко В.М., Таранец А.В. Промышленные центрифуги. — М.: Химия, 1974. - 376 с.
- 90 Процеси та обладнання хімічної технології – 3. Гідромеханічні та механічні процеси: практикум / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Я.М. Корнієнко, С.С. Гайдай – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2023. – 210 с.
- 91 Михалева М. Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств примеры и задачи. - Ленинград: «Машиностроение», 1984. - 303 с.



- 92 А. А. Лацинский, А. Р. Толчинский. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры, -Л.; Машиностроение, 1970 г.– 752 с.
- 93 Attaran, M., Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, Vol. 6, 100165.
- 94 Botkina, D., Hedlind, M., Olsson, B., Henser, J., Lundholm, T. (2018). Digital Twin of a cutting tool. *Procedia CIRP*, Vol. 72, pp. 215–218.
- 95 Xie, Y., Lian, K., Liu, Q., Zhang, C., Liu, H. (2021). Digital twin for cutting tool: Modeling, application and service strategy. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 58(B), pp. 305–312.
- 96 Ghobakhloo, M., Fathi, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., Morales, M.E.: Industry 4.0 ten years on: a bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants. *J. Clean. Prod.* 302, 127052. Elsevier BV (2021)
- 97 Rea, P., Ottaviano, E., Machado, J., Antosz, K. (eds.): *Design, Applications, and Maintenance of Cyber-Physical Systems. Advances in Systems Analysis, Software Engineering, and High Performance Computing.* IGI Global, Hershey (2021)
- 98 Demir, K.A., Döven, G., Sezen, B.: Industry 5.0 and human-robot co-working. *Procedia Comput. Sci.* 158, 688–695. Elsevier BV (2019)
- 99 Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., Wang, L.: Industry 4.0 and Industry 5.0— inception, conception and perception. *J. Manuf. Syst.* 61, 530–535. Elsevier BV (2021)
- 100 Li, S., et al.: Proactive human–robot collaboration: mutual-cognitive, predictable, and selforganising perspectives. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 81, 102510. Elsevier BV (2023)
- 101 Evangelou, G., Dimitropoulos, N., Michalos, G., Makris, S.: An approach for task and action planning in human–robot collaborative cells using AI. *Procedia CIRP* 97, 476–481. Elsevier BV (2021)

- 102 Castro, A., Silva, F., Santos, V.: Trends of human-robot collaboration in industry contexts: handover, learning, and metrics. *Sensors* 21(12), 4113. MDPI AG (2021)
- 103 Li, S., Wang, R., Zheng, P., Wang, L.: Towards proactive human–robot collaboration: a foreseeable cognitive manufacturing paradigm. *J. Manuf. Syst.* 60, 547–552. Elsevier BV (2021)
- 104 El Zaatari, S., Marei, M., Li,W., Usman, Z.: Cobot programming for collaborative industrialtasks: an overview. *Robot. Auton. Syst.* 116, 162–180. Elsevier BV (2019)
- 105 El Zaatari, S., Marei, M., Li,W., Usman, Z.: Cobot programming for collaborative industrialtasks: an overview. *Robot. Auton. Syst.* 116, 162–180. Elsevier BV (2019)
- 106 Naneva, S., Sarda Gou, M., Webb, T.L., Prescott, T.J.: A systematic review of attitudes, anxiety, acceptance, and trust towards social robots. *Int. J. Soc. Robot.* 12(6), 1179–1201. Springer Science and Business Media LLC (2020)
- 107 Longo, F., Padovano, A., Umbrello, S.: Value-oriented and ethical technology engineering in industry 5.0: a human-centric perspective for the design of the factory of the future. *Appl. Sci.* 10(12), 4182. MDPI AG (2020)
- 108 Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Pannek, J., Thoben, K.-D.: Safety requirements in collaborative human–robot cyber-physical system. *Dyn. Logist.* 41–51, Springer International Publishing (2016)
- 109 Zerrouki, N., Harrou, F., Sun, Y., Houacine, A.: Vision-based human action classification using adaptive boosting algorithm. *IEEE Sens. J.* 18(12), 5115–5121, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2018)
- 110 Tölgyessy, M., Dekan, M., Chovanec, Ľ.: Skeleton tracking accuracy and precision evaluation of Kinect V1, Kinect V2, and the azure Kinect. *Appl. Sci.* 11(12), 5756, MDPI AG (2021)

- 111 Marín-Jiménez, M.J., Romero-Ramirez, F.J., Muñoz-Salinas, R., Medina-Carnicer, R.: 3D human pose estimation from depth maps using a deep combination of poses. *J. Vis. Commun. Image Represent.* 55, 627–639, Elsevier BV (2018)
- 112 Duan, Y., Zhang, X., Li, Z.: A new quaternion-based Kalman filter for human body motion tracking using the second estimator of the optimal quaternion algorithm and the joint angle constraint method with inertial and magnetic sensors. *Sensors* 20(21), 6018, MDPI AG (2020)
- 113 Maheswari, B.U., Sonia, R., Raja Kumar, M.P., Ramya, J.: Novel machine learning for human actions classification using histogram of oriented gradients and sparse representation. *Inf. Technol. Control* 50(4), 686–705, Kaunas University of Technology (KTU) (2021)
- 114 Lo Presti, L., La Cascia, M.: 3D skeleton-based human action classification: a survey. *Pattern Recogn.* 53, 130–147, Elsevier BV (2016)
- 115 Gharaee, Z., Gärdenfors, P., Johnsson, M.: Hierarchical self-organizing maps system for action classification. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications (2017)
- 116 Gharaee, Z., Gärdenfors, P., Johnsson, M.: Online recognition of actions involving objects. In: *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, vol. 22, pp. 10–19. Elsevier BV (2017)
- 117 Hernández-García, R., Ramos-Cózar, J., Guil, N., García-Reyes, E., Sahli, H.: Improving bag-of-visual-words model using visual n-grams for human action classification. *Expert Syst. Appl.* 92, 182–191. Elsevier BV (2018)
- 118 Garcia-Hernando, G., Yuan, S., Baek, S., Kim, T.-K.: First-person hand action benchmark with RGB-D videos and 3D hand pose annotations. In: *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE (2018)
- 119 Deuerlein, C., Langer, M., Seßner, J., Heß, P., Franke, J.: Human-robot-interaction using cloud-based speech recognition systems. *Procedia CIRP* 97, 130–135. Elsevier BV (2021)

- 120 Hareendar, S., Jeya Raghul R., Aashish, K.: Brain computer interface for controlling mobile robot. *Int. J. Recent Technol. Eng.* 8(2S4), 152–156. Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Engineering and Sciences Publication - BEIESP (2019)
- 121 Peruzzini, M., Grandi, F., Pellicciari, M.: Exploring the potential of Operator 4.0 interface and monitoring. *Comput. Ind. Eng.* 139, 105600. Elsevier BV (2020)
- 122 Pérez, L., Diez, E., Usamentiaga, R., García, D.F.: Industrial robot control and operator training using virtual reality interfaces. *Comput. Ind.* 109, 114–120. Elsevier BV (2019)
- 123 Bartolozzi, C., Natale, L., Nori, F., Metta, G.: Robots with a sense of touch. *Nat. Mater.* 15(9), 921–925. Springer Science and Business Media LLC (2016)
- 124 Duan, X., Taurand, S., Soleimani, M.: Artificial skin through super-sensing method and electrical impedance data from conductive fabric with aid of deep learning. *Sci.Rep.* 9(1). Springer Science and Business Media LLC (2019)
- 125 Sun, H., Martius, G.: Machine learning for haptics: inferring multi-contact stimulation from sparse sensor configuration. *Front. Neurobot.* 13. Frontiers Media SA (2019)
- 126 Girbés-Juan, V., Schettino, V., Gracia, L., Solanes, J.E., Demiris, Y., Tornero, J.: Combining haptics and inertial motion capture to enhance remote control of a dual-arm robot. *J. Multimodal User Interfaces* 16(2), 219–238. Springer Science and Business Media LLC (2022)
- 127 Yang, W.-T., Chen, B.-H., Lin, P.-C.: A dual-arm manipulation strategy using position/force errors and Kalman filter. *Trans. Inst. Meas. Control* 44(4), 820–834. SAGE Publications (2021)
- 128 Sone, J., Matsumoto, Y., Yasuda, Y., Hasegawa, S., Yamada, K.: Development of MEMS tactile sensation device for haptic robot. *J.Robot. Mechatronics* 32(2), 315–322. Fuji Technology Press Ltd. (2020)

- 129 Lu, Y., Liu, C., Wang, K.I.-K., Huang, H., Xu, X.: Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 61, 101837. Elsevier BV (2020)
- 130 Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C.: Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access* 8, 108952–108971. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2020)
- 131 Barricelli, B.R., Casiraghi, E., Fogli, D.: A survey on digital twin: definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access* 7, 167653–167671. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2019)
- 132 He, B., Bai, K.-J.: Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review. *Adv. Manuf.* 9(1), 1–21. Springer Science and Business Media LLC (2020)
- 133 Huynh, B.H., Akhtar, H., Sett, M.K.: A universal methodology to create digital twins for serial and parallel manipulators. In: 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). IEEE (2019)
- 134 Zhang, Z., Lu, J., Xia, L., Wang, S., Zhang, H., Zhao, R.: Digital twin system design for dual-manipulator cooperation unit. In: 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE (2020)
- 135 Bevilacqua, M., et al.: Digital twin reference model development to prevent operators' risk in process plants. *Sustainability* 12(3), 1088. MDPI AG (2020)
- 136 Palazhchenko, Y., Shendryk, V., Ivanov, V., Hatala, M. (2024). Industry 5.0: Aspects of Collaboration Technologies. In: Silva, F.J.G., Ferreira, L.P., Sá, J.C., Pereira, M.T., Pinto, C.M.A. (eds) *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems*. FAIM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-38165-2\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-031-38165-2_71)
- 137 Haidabrus, B., Druzhinin, E., Elg, M., Jason, M., Grabis, J.: Programs to Boost IT-readiness of the machine building enterprises. In: Ivanov, V., et al. (eds.) *DSMIE*

2019. LNME, pp. 75–84. Springer, Cham (2020). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_8)
- 138 Haidabrus, B., Protsenko, S., Rosenberger, P., Grabis, J.: Data analysis of readiness programs of machine-building enterprises. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds.) DSMIE 2020. LNME, pp. 128–136. Springer, Cham (2020). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_13)
- 139 Grieves, M., Vickers, J.: Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds.) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, pp. 85–113. Springer, Cham (2017). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- 140 Gartner: Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2018. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-10-04-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2018>. Accessed 3 July 2022
- 141 Gartner: Gartner Survey Reveals Digital Twins Are Entering Mainstream Use, <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mainstream>, last accessed 2022/7/3.
- 142 Liu, S., Bao, J., Lu, Y., Li, J., Lu, S., & Sun, X. Digital twin modeling method based on biomimicry for machining aerospace components. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 180–195 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2020.04.014>.
- Psarommatis, F., & May, G. A literature review and design methodology for digital twins in the era of zero defect manufacturing. *International Journal of Production Research*. Advance online publication (2021). <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2101960>.
- 143 Psarommatis, F., & May, G. A literature review and design methodology for digital twins in the era of zero defect manufacturing. *International Journal of Production Research*. Advance online publication (2021). <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2101960>.
- 144 What is a digital twin? <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>, last accessed 2022/7/3.

- 145 Oscarsson, J., Jeusfeld, M.A., Jenefeldt, A. Towards VirtualConfidence - Extended Product Lifecycle Management. In A. Bouras, B. Eynard, S. Foufou, K.-D. Thoben (Eds.), *Product Lifecycle Management in the Era of Internet of Things: 12th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2015, Doha, Qatar, October 19-21, 2015*, pp. 708-717 (2016). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33111-9\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33111-9_64)
- 146 Söderberg, R., Wärmefjord, K., Carlson, J. S., Lindkvist, L. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Annals*, 66(1), 141-144 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.038>
- 147 Liu, J., Du, X., Zhou, H., Liu, X., Li, L., & Feng, F. A digital twin-based approach for dynamic clamping and positioning of the flexible tooling system. *Procedia CIRP*, 81, 573-578 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.063>
- 148 Laukotka, F., Hanna, M., & Krause, D. Digital twins of product families in aviation based on an MBSE-assisted approach. *Procedia CIRP*, 99, 287-292 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.144>
- 149 Schuh, G., Bergweiler, G., Chougule, M. V., & Fiedler, F. Effects of Digital Twin Simulation Modelling on a Flexible and Fixtureless Production Concept in Automotive Body Shops. *Procedia CIRP*, 104, 768-773 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.129>
- 150 Tao, F., Cheng, J., Qi, Q. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int J Adv Manuf Technol* 94, 3563–3576 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- 151 Wagner, R., Schleich, B., Haefner, B., Kuhnle, A., Wartzack, S., & Lanza, G. Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products. *Procedia CIRP*, 79, 1045-1050 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.219>
- 152 Stark, R., Fresemann, C., & Lindow, K. Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 68(1), 355-358 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.024>

- 153 Uhlemann, T. H. J., Schock, C., Lehmann, C., Freiberger, S., & Steinhilper, R. The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real-Time Data Acquisition in Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 9, 411-418 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043>
- 154 Armendia, M., Cugnon, F., Berglind, L., Ozturk, E., Gil, G., & Selmi, J. Evaluation of Machine Tool Digital Twin for machining operations in an industrial environment. *Procedia CIRP*, 82, 231-236 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.040>
- 155 Qiao, Q., Wang, J., Ye, L., & Gao, R. X. Digital Twin for Machining Tool Condition Prediction. *Procedia CIRP*, 82, 327-332 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.049>
- 156 Hänel, A., Schnellhardt, T., Wenkler, E., Nestler, A., Brosius, A., Corinth, C., Fay, A., Ihlenfeldt, S. The development of a digital twin for machining processes for the application in the aerospace industry. *Procedia CIRP*, 88, 293-298 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.017>
- 157 Digital twins. Bridging the physical and digital, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/tech-trends/2020/digital-twin-applications-bridging-the-physical-and-digital.html>, last accessed 2022/7/3.
- 158 Parrott, A., & Warshaw, L. *Industry 4.0 and the Digital Twin: Manufacturing Meets Its Match*. New York: Deloitte University Press (2017).
- 159 Digital twins. Bridging the physical and digital, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/tech-trends/2020/digital-twin-applications-bridging-the-physical-and-digital.html>, last accessed 2022/7/3
- 160 Augustine, P. Chapter Four - The industry use cases for the Digital Twin idea. *Advances in Computers*, 117(1), 79-105 (2020). <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.10.008>
- 161 Digital Twin Trends: 5 Industries Expecting Big Gains from Digital Twin Deployments <https://www.linkedin.com/pulse/2021-digital-twin-trends-5-industries-expecting-big-gains-eric-howard>, last accessed 2022/7/3



- 162 Hou, L., Wu, S., Zhang, G. (K.), Tan, Y., Wang, X. Literature Review of Digital Twins Applications in Construction Workforce Safety. *Applied Sciences*, 11(1), 339 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11010339>
- 163 Xiong, M., & Wang, H. Digital twin applications in the aviation industry: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121, 5677-5692 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09717-9>
- 164 Alvarez, O.H., Zea, L.G., Bil, C., Napolitano, M., Fravolini, M.L. Digital Twin Concept for Aircraft Sensor Failure. In: Hiekata K. et al. (eds) *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-Technical Systems*. Springer, pp. 370-379 (2019). <https://doi.org/10.3233/ATDE190143>
- 165 Zhengning, Y., Yongli, Z. An Evolution-Simulation-Verification Framework of Aviation Products in the Future. In *Proceedings of the 2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, Weihai, China, pp. 1004-1007 (2020). <https://doi.org/10.1109/ICCASIT50869.2020.9368801>.
- 166 Renganathan, S., Harada, K., Mavris, D. Aerodynamic Data Fusion Toward the Digital Twin Paradigm. *AIAA J* 58(9):3902–3918 (2020). <https://doi.org/10.2514/1.J059203>.
- 167 Borgen, K. B., Ropp, T. D., Weldon, W. T. Assessment of Augmented Reality Technology's Impact on Speed of Learning and Task Performance in Aeronautical Engineering Technology Education. *The International Journal of Aerospace Psychology*, 31(3), 219-229 (2021). <https://doi.org/10.1080/24721840.2021.1881403>.
- 168 Jonkers, R., Shahroudi, K. A Design Change, Knowledge, and Project Management Flight Simulator for Product and Project Success. *IEEE Syst J* 15(1):1130–1139 (2020). <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3006747>
- 169 Siyaev, A., Jo, G. Towards aircraft maintenance metaverse using speech interactions with virtual objects in mixed reality. *Sensors* 21(6):2066 (2021). <https://doi.org/10.3390/s21062066>

- 170 Ezhilarasu, C., Jennions, I. A system-level failure propagation detectability using anfs for an aircraft electrical powersystem. *Appl Sci* 10(8) (2020). <https://doi.org/10.3390/app10082854>
- 171 Ahmed, S.E., Pawar, S., San, O., Rasheed, A., Tabib, M. A nudged hybrid analysis and modeling approach for realtime wake-vortex transport and decay prediction. *Comput Fluids* 221, 104895 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2021.104895>
- 172 Digital Twins, <https://www.transmetrics.ai/blog/supply-chain-logistics-technology-trends/#content-2>, last accessed 2022/7/3
- 173 Peng, Y., Liu, Y., Yang, Y., Liu, N., Sun, Y., Liu, Y., Pu, H., Xie, S., Luo, J. (2019). Development of continuum manipulator actuated by thin McKibben pneumatic artificial muscle. *Mechatronics*, Vol. 60, pp. 56-65, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.05.001>
- 174 Hassanin, A.-F., Davis, S., Nefti-Meziani, S. (2018). The design and mathematical modelling of novel extensor bending pneumatic artificial muscles (EBPAMs) for soft exoskeletons. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 99, pp. 63-74, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.10.010>
- 175 Thuruthel, T. G., Ansari, Y., Falotico, E., Laschi, C. (2018). Control strategies for soft robotic manipulators: A survey. *Soft Robotics*, Vol. 5(2), pp. 149-163, <https://doi.org/10.1089/soro.2017.0007>
- 176 Faudzi, A. A. M., Razif, M. R. M., Endo, G., Nabae, H., Suzumori, K. (2017). Soft-amphibious robot using thin and soft McKibben actuator. In: 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 981-986, <https://doi.org/10.1109/AIM.2017.8014146>
- 177 Al-Ibadi, A., Nefti-Meziani, S., Davis, S. (2020). A robot continuum arm inspired by the human upper limb: The pronation and supination rotating behaviour. In: International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), pp. 1-6, <https://doi.org/10.3390/robotics7020019>

- 178 Al-Ibadi, A., Nefti-Meziani, S., Davis, S. (2018). Design, kinematics and controlling a novel soft robot arm with parallel motion. *Robotics*, Vol. 7(2), 19.
- 179 Al-Ibadi, A., Nefti-Meziani, S., Davis, S. (2018). Active soft end effectors for efficient grasping and safe handling. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 23591-235601, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2829351>
- 180 Al-Ibadi, A., Nefti-Meziani, S., Davis, S. (2017). Novel models for the extension pneumatic muscle actuator performances. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Automation & Computing*, University of Huddersfield, Huddersfield, UK, pp. 1-6, <https://doi.org/10.23919/IConAC.2017.8081973>
- 181 Al-Ibadi, A., Nefti-Meziani, S., Davis, S., Theodoridis, T. (2018). Design of two segments continuum robot arm based on pneumatic muscle actuator (PMA). In: *2018 24th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, pp. 1-6, <https://doi.org/10.23919/IConAC.2018.8749087>
- 182 Bartow, A., Kapadia, A. D., Walker, I. (2013). A novel continuum trunk robot based on contractor muscles, Vol. 2013. pp. 181-186.
- 183 Chen, Y., Zhang, J., Gong, Y. (2019). Utilizing anisotropic fabrics composites for high-strength soft manipulator integrating soft gripper. *IEEE Access*, Vol. 7, 127416-127426, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940499>
- 184 Xiang, C., Giannaccini, M. E., Theodoridis, T., Hao, L., Nefti-Meziani, S., Davis, S. (2016). Variable stiffness McKibben muscles with hydraulic and pneumatic operating modes. *Adv. Robot.*, Vol. 30, pp. 889-899, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/908/1/012036>
- 185 Tanaka, D., Kamo, D., Maehara, M., Nakamura, T. (2013). Development of two types of 2DOF wrist joint driven by pneumatic artificial muscles. In: *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Vicenza, Italy, <https://doi.org/10.1080/01691864.2016.1154801>
- 186 Belforte, G., Eula, G., Ivanov, A., Sirolli, S. (2014). Soft pneumatic actuators for rehabilitation. *Actuators*, Vol. 3, pp. 84-106, <https://doi.org/10.3390/act3020084>

- 187 Ferraresi, C., Franco, W., Quaglia, G. (2002). Bi-directional flexible pneumatic actuator. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Fluid Power (JFPS 2002), Nara, Japan, pp. 25-30, <https://doi.org/10.3390/act9040107>
- 188 Chen, Y., Zhang, J., Gong, Y. (2020). Novel design and modeling of a soft pneumatic actuator based on antagonism mechanism. *Actuators*, Vol. 9(4), 107, <https://doi.org/10.3390/act9040107>
- 189 Jeong, H., Kim, J. (2019). Echinoderm inspired variable stiffness soft actuator with connected ossicle structure. In: *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2019)*, Montreal, QC, Canada, <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793545>
- 190 Sokolov O., Hosovsky A., Ivanov V., Pavlenko I. (2023). Movement monitoring system for apneumatic muscle actuator. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), pp. A1-A5, doi:10.21272/jes.2023.10(1).a1
- 191 Aivaliotis, P., Arkouli, Z., Georgoulas, K., Makris, S. Methodology for enabling dynamic digital twins and virtual model evolution in industrial robotics - a predictive maintenance application. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(1-2), 1-19 (2023). <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2162591>
- 192 Yukisawa, T., Nishikawa, S., Niiyama, R., Kawahara, Y., Kuniyoshi, Y. Ceiling continuum arm with extensible pneumatic actuators for desktop workspace. 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 196–201 (2018). <https://doi.org/10.1109/ROBOSOFT.2018.8404919>
- 193 Косов Н.П. Станочные приспособления для деталей сложной формы. М., "Машиностроение", 1973, 234 с.
- 194 Ю. В. Хмельницкий, Захватные устройства промышленных роботов. К.: УМК ВО, 1990.
- 195 Robot grippers / під ред. G. J. Monkman. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. – 452 с.

- 196 Автоматизований верстатний пристрій для оброблення деталей типу шатунів : пат. 153742 Україна : МПК (2023.01) B23В 39/00. № u 2022 04595; заявл. 05.12.2022; опубл. 23.08.2023, Бюл. № 34. 11 с.
- 197 Hand-E Adaptive Gripper [Електронний ресурс]. URL: <https://robotiq.com/products/hand-e-adaptive-robot-gripper> (дата звернення: 13.10.2021).
- 198 Robot grippers / під ред. G. J. Monkman. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. 452 с.
- 199 Захоплювальний пристрій для деталей типу шатуни : пат. 151786 Україна : МПК (2006)B25J 15/00. № u 202107484; заявл. 15.09.2022; опубл. 14.09.2022, Бюл. № 37. 11 с.
- 200 Косов Н.П. Станочные приспособления для деталей сложной формы. М., "Машиностроение", 1973, 234 с.
- 201 Автоматизований верстатний пристрій для оброблення деталей типу вилки : пат. 153737 Україна : МПК (2023.01) B23В 39/00. № u 2022 04158; заявл. 02.11.2022; опубл. 23.08.2023, Бюл. № 34. 10 с.
- 202 Косов Н.П. Станочные приспособления для деталей сложной формы. - М.: "Машиностроение", 1973. - 234 с.
- 203 Косов Н.П. Станочные приспособления для деталей сложной формы. - М.: "Машиностроение", 1973. - 234 с.
- 204 Захоплювальний пристрій для деталей типу вилки : пат. 151785 Україна : МПК (2006) B25J 15/00. № u 2021 07466; заявл. 15.09.2022; опубл. 14.09.2023, Бюл. № 37. 10 с.
- 205 Dillinger, F., Bernhard, O., Kagerer, M., Reinhart, G.: Industry 4.0 implementation se-quence for manufacturing companies. *Production Engineering* 16, 705–718 (2022). DOI: 10.1007/s11740-022-01110-5.
- 206 Sherwani, F., Asad, M.M., Ibrahim, B.S.K.K.: Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0). In: 2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST). pp. 1–5 (2020). DOI: 10.1109/ICETST49965.2020.9080724.

- 207 Bill, M., Müller, C., Kraus, W., Bieller, S.: World Robotics 2022 Report, Frankfurt, Germany (2022).
- 208 Saenz, J., Elkmann, N., Gibaru, O., Neto, P.: Survey of methods for design of collaborative robotics applications- Why safety is a barrier to more widespread robotics up-take. Presented at the ACM International Conference Proceeding Series (2018). DOI: 10.1145/3191477.3191507.
- 209 Villani, V., Pini, F., Leali, F., Secchi, C., Fantuzzi, C.: Survey on Human-Robot Inter-action for Robot Programming in Industrial Applications. IFAC-PapersOnLine 51(11) 66–71 (2018). DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.236.
- 210 Nimawat, D., Das Gidwani, B.: Challenges facing by manufacturing industries towards implementation of industry 4.0: an empirical research. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) 16, 1371–1383 (2022). DOI: 10.1007/s12008-022-00961-7.
- 211 Gao, Z., Wanyama, T., Singh, I., Gadhri, A., Schmidt, R.: From Industry 4.0 to Robotics 4.0 – A Conceptual Framework for Collaborative and Intelligent Robotic Systems. Procedia Manufacturing 46, 591–599 (2020). DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.085.
- 212 Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Rab, S., Suman, R.: Exploring impact and features of machine vision for progressive industry 4.0 culture. Sensors International 3, 100132 (2022). DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100132.
- 213 Quillen, D., Jang, E., Nachum, O., Finn, C., Ibarz, J., Levine, S.: Deep Reinforcement Learning for Vision-Based Robotic Grasping: A Simulated Comparative Evaluation of Off-Policy Methods. In: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 6284–6291 (2018). DOI: 10.1109/ICRA.2018.8461039.
- 214 Gao, Z., Wanyama, T., Singh, I., Gadhri, A., Schmidt, R.: From Industry 4.0 to Robotics 4.0 - A Conceptual Framework for Collaborative and Intelligent Robotic Systems. Procedia Manufacturing 46, 591–599 (2020). DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.085

- 215 D'Avella, S., Tripicchio, P., Avizzano, C.A.: A study on picking objects in cluttered environments: Exploiting depth features for a custom low-cost universal jamming grip-per. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 63, 101888 (2020). DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101888.
- 216 Eppner, C., Höfer, S., Jonschkowski, R., Martín-Martín, R., Sieverling, A., Wall, V., Brock, O.: Four aspects of building robotic systems: lessons from the Amazon Picking Challenge 2015. *Autonomous Robots* 42, 1459–1475 (2018). DOI: 10.1007/s10514-018-9761-2.
- 217 Lin, H.-Y., Liang, S.-C., Chen, Y.-K.: Robotic Grasping With Multi-View Image Acquisition and Model-Based Pose Estimation. *IEEE Sensors Journal* 21(10), 11870–11878 (2021). DOI: 10.1109/JSEN.2020.3030791.
- 218 Yu, Y., Cao, Z., Liang, S., Geng, W., Yu, J.: A Novel Vision-Based Grasping Method Under Occlusion for Manipulating Robotic System. *IEEE Sensors Journal* 20(18), 10996–11006 (2020). DOI: 10.1109/JSEN.2020.2995395.
- 219 Paxton, C., Hundt, A., Jonathan, F., Guerin, K., Hager, G.D.: CoSTAR: Instructing collaborative robots with behavior trees and vision. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 564–571 (2017). DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989070.
- 220 Liang, X., Zhu, H., Chen, Y., Yamakawa, Y.: Tracking and Catching of an In-Flight Ring using a High-Speed Vision System and a Robot Arm. In: IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. pp. 1–7 (2021). DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589565.
- 221 Scime, L., Beuth, J.: Using machine learning to identify in-situ melt pool signatures indicative of flaw formation in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Additive Manufacturing* 25, 151–165 (2019). DOI: 10.1016/j.addma.2018.11.010.
- 222 Cha, Y.-J., You, K., Choi, W.: Vision-based detection of loosened bolts using the Hough transform and support vector machines. *Automation in Construction* 71, 181–188 (2016). DOI: 10.1016/j.autcon.2016.06.008.

- 223 Wang, J., Fu, P., Gao, R.X.: Machine vision intelligence for product defect inspection based on deep learning and Hough transform. *Journal of Manufacturing Systems* 51, 52–60 (2019). DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.03.002.
- 224 Cherubini, A., Navarro-Alarcon, D.: Sensor-Based Control for Collaborative Robots: Fundamentals, Challenges, and Opportunities. *Frontiers in Neurorobotics* 14, (2021). DOI: 10.3389/fnbot.2020.576846.
- 225 Mazhar, O., Navarro, B., Ramdani, S., Passama, R., Cherubini, A.: A real-time human-robot interaction framework with robust background invariant hand gesture detection. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 60, 34–48 (2019). DOI: 10.1016/j.rcim.2019.05.008.
- 226 Ferraguti, F., Talignani Landi, C., Costi, S., Bonfè, M., Farsoni, S., Secchi, C., Fantuzzi, C.: Safety barrier functions and multi-camera tracking for human–robot shared environment. *Robotics and Autonomous Systems* 124, 103388 (2020). DOI: 10.1016/j.robot.2019.103388.
- 227 Makris, S., Aivaliotis, P.: AI-based vision system for collision detection in HRC applications. *Procedia CIRP* 106, 156–161 (2022). DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.171.
- 228 Boucher-Genesse, A.: 1D, 2D, 3D... What Kind of Vision System Should I Use for My Application?, <https://blog.robotiq.com/1d-2d-3d...-what-kind-of-vision-system-should-i-use-for-my-application>, last accessed 2022/10/08.
- 229 Line scan cameras - Quality right down the line, <https://www.stemmer-imaging.com/en-gb/technical-tips/line-scan-cameras/>, last accessed 2022/10/08.
- 230 NT, B.: Machine vision systems: 1D, 2D, and 3D, <https://roboticsbiz.com/machine-vision-systems-1d-2d-and-3d/>, last accessed 2022/11/08.
- 231 Monochrome VS color sensors - Opto Engineering Basics, <https://www.opto-e.com/en/basics/monochrome-vs-color-sensors>, last accessed 2022/10/09.
- 232 A short guide to why monochrome cameras have the edge over color cameras – e-con Systems, <https://www.e-consystems.com/blog/camera/technology/a-short->



guide-to-why-monochrome-cameras-have-the-edge-over-color-cameras/, last accessed 2022/11/09.

233 Rolling and global shutter (CMOS sensors), <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/rolling-shutter/>, last accessed 2022/10/09.

234 Ozkahraman, M., Yilmaz, C., Livatyali, H.: Design and Validation of a Camera-Based Safety System for Fenceless Robotic Work Cells. *Applied Sciences* 11(24), 11679 (2021). DOI: 10.3390/app112411679.

235 Introduction to Vision Sensors - White Papers | Cognex, <https://www.cognex.com/resources/white-papers-articles/introduction-to-vision-sensors>, last accessed 2022/10/07.

236 Sun, T., Cao, J.: Research on Machine Vision System Design Based on Deep Learning Neural Network. *Wireless Communications and Mobile Computing* 2022, 16 (2022). DOI: 10.1155/2022/4808652.

237 Demčák, J., Lishchenko, N., Pavlenko, I., Pitel', J., Židek, K.: The Experimental SMART Manufacturing System in SmartTechLab. In: Trojanowska, J., Kujawińska, A., Machado, J., and Pavlenko, I. (eds.) *Advances in Manufacturing III*. pp. 228–238. Springer International Publishing, Cham (2022). DOI: 10.1007/978-3-030-99310-8\_18.

238 Andrusyshyn, V., Ivanov, V., Pitel', J., Židek, K., Lazorik, P. (2023). Machine Vision Systems for Collaborative Assembly Applications. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel', J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_2)

239 Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Rab, S., Suman, R.: Exploring impact and features of machine vision for progressive industry 4.0 culture. *Sensors International* 3, 100132 (2022). DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100132.

240 Syed, T.N., Lakhari, I.A., Chandio, F.A.: Machine vision technology in agriculture: A review on the automatic seedling transplanters. *International Journal of Multidisciplinary Research and Development* 6(12), 79–88 (2019).

- 241 Chockalingam, S.; Natarajan, U.; Selvam, M.; Cyril, A.G. Investigation on Machinability and Damping Properties of Nickel–Phosphorus Coated Boring bar. *Arab. J. Sci. Eng.* 2016, 41, 669–676. [CrossRef]
- 242 Song, Q.; Shi, J.; Liu, Z.; Wan, Y.; Xia, F. Boring bar with constrained layer damper for improving process stability. *Int. J. Adv.Manuf. Technol.* 2016, 83, 1951–1966. [CrossRef]
- 243 Suyama, D.I.; Diniz, A.E.; Pederiva, R. The use of carbide and particle-damped bars to increase tool overhang in the internalturning of hardened steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 86, 2083–2092. [CrossRef]
- 244 Thomas, M.D.; Knight, W.A.; Sadek, M.M. Impact damper as a method of improving cantilever boring bars. *J. Eng. Ind.* Aug 1975, 97, 859–866. [CrossRef]
- 245 Thorenz, B.; Friedrich, M.;Westermann, H.-H.; Döpfer, F. Evaluation of the influence of different inner cores on the dynamicbehavior of boring bars. *Procedia CIRP* 2019, 81, 1171–1176. [CrossRef]
- 246 Thorenz, B.; Friedrich, M.;Westermann, H.-H.; Döpfer, F. Evaluation of the influence of different inner cores on the dynamicbehavior of boring bars. *Procedia CIRP* 2019, 81, 1171–1176. [CrossRef]
- 247 Rajak, D.; Pagar, D.; Menezes, P.; Linul, E. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manu-facturing, Properties, and Applications. *Polymers* 2019, 11, 1667. [CrossRef] [PubMed]
- 248 Bruckner, W. CFK: Hohe Kosten blockieren Durchbruch am Massenmarkt. 2018. Available online: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/werkstoffe/cfk-hohe-kosten-blockieren-durchbruch-am-massenmarkt/> (accessed on 12 October 2022).
- 249 Ren, Y.; Zhao, Q.; Liu, Y.; Ma, J. Analysis of bending vibration characteristics of rotating composite boring bar. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1303, 012147. [CrossRef]
- 250 Sørby, K.; Østling, D. Precision turning with instrumented vibration-damped boring bars. In *Proceedings of the 8th CIRPConference on High Performance Cutting, Budapest, Hungary, 25–27 June 2018*; pp. 666–669.

- 251 Auleley, M.; Thomas, O.; Giraud-Audine, C.; Mahé, H. Enhancement of a dynamic vibration absorber by means of an electromagnetic shunt. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2020, 32, 331–354. [CrossRef]
- 252 Hovorun, T.; Khaniukov, K.; Varakin, V.; Pererva, V.; Vorobiov, S.; Burlaka, A.; Khvostenko, R. Improvement of the physical and mechanical properties of the cutting tool by applying wear-resistant coatings based on Ti, Al, Si, and N. *J. Eng. Sci.* 2021, 8, C13–C23. [CrossRef]
- 253 Otto, A.; Radons, G. The influence of tangential and torsional vibrations on the stability lobes in metal cutting. *Nonlinear Dyn.* 2015, 82, 1989–2000. [CrossRef]
- 254 Lawrance, G.; Paul, P.S.; Varadarajan, A.S.; Vasanth, X.A.; Raj, S.B. Suppression of Tool Vibration in Boring Process: A Review. *J. Inst. Eng. India Ser. C* 2019, 100, 1053–1069. [CrossRef]
- 255 Ramesh, K.; Alwarsamy, T.; Jayabal, S. Investigation of chatter stability in boring tool and tool wear prediction using neural network. *International J. Mater. Prod. Technol.* 2013, 46, 47–70. [CrossRef]
- 256 Ramesh, K.; Alwarsamy, T.; Jayabal, S. ANN prediction and RSM optimization of cutting process parameters in boring operations using impact dampers. *J. Vibroeng.* 2012, 14, 1160–1175.
- 257 Chockalingam, S.; Natarajan, U.; George Cyril, A. Damping investigation in boring bar using hybrid copper-zinc particles. *J. Vib. Control.* 2017, 23, 2128–2134. [CrossRef]
- 258 Lu, Z.; Lu, X.; Masri, S.F. Studies of the performance of particle dampers under dynamic loads. *J. Sound Vib.* 2010, 329, 5415–5433. [CrossRef]
- 259 Ehsan, M.M.E.; Yousefi-Koma, A.; Ehyaei, D. Optimal design of an impact damper for a nonlinear friction-driven oscillator. *Int. J. Math. Models Methods Appl. Sci.* 2008, 2, 236–243.
- 260 Rubio, L.; Loya, J.A.; Miguélez, M.H.; Fernández Sáez, J. Optimization of passive vibration absorbers to reduce chatter in boring. *Mech. Syst. Signal Process.* 2013, 41, 691–704. [CrossRef]

- 261 Ivanov, V.; Pavlenko, I.; Kuric, I.; Kosov, M. Mathematical modeling and numerical simulation of fixtures for fork-type parts manufacturing. In *Industry 4.0: Trends in Management of Intelligent Manufacturing Systems*; Knapcikova, L., Balog, M., Eds.; EAI/Springer Innovations in Communication and Computing; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 133–142. [[CrossRef](#)]
- 262 Ozlu, E.; Budak, E. Analytical modeling of chatter stability in turning and boring operations Part I: Model development. *Trans. ASME* 2007, 129, 726–732. [[CrossRef](#)]
- 263 Ozlu, E.; Budak, E. Analytical modeling of chatter stability in turning and boring operations-Part II: Experimental verification. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2007, 129, 733–739. [[CrossRef](#)]
- 264 Oborskyi, G.; Orgiyan, A.; Ivanov, V.; Balaniuk, A.; Pavlenko, I.; Trojanowska, J. Improvement of the Dynamic Quality of Cantilever Boring Bars for Fine Boring. *Machines* 2023, 11, 7. <https://doi.org/10.3390/machines11010007>
- 265 Den Hartog, J.P. *Mechanical Vibrations*; Dover Publications: New York, NY, USA, 1985.
- 266 Inkulu, A.K., Bahubalendruni, M.V.A.R., Dara, A., Sankaranarayana Samy, K.: Challenges and opportunities in human robot collaboration context of industry 4.0 – a state of the art review. *Ind. Robot.* 49(2), 226–239 (2022). <https://doi.org/10.1108/IR-04-2021-0077>
- 267 Adel, A.: Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas. *J. Cloud Comput.* **11**, 40 (2022). <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00314-5>
- 268 Raja Santhi, A., Muthuswamy, P.: Industry 5.0 or industry 4.0S? Introduction to industry 4.0 and a peek into the prospective industry 5.0 technologies. *Int. J. Interact. Des. Manuf.* 17, 947–979 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01217-8>
- 269 Verna, E., Puttero, S., Genta, G., Galetto, M.: Challenges and opportunities of collaborative robots for quality control in manufacturing: evidences from research and

- industry. In: Sampaio, P., et al. (eds.) *Proceeding of the International Conference on Quality Engineering and Management*, pp. 235–262 (2022)
- 270 Rezaei Aderiani, A., Warmefjord, K., Soderberg, R., Lindkvist, L. Individualizing Locator Adjustments of Assembly Fixtures Using a Digital Twin. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 19, 041019-1 (2019). <https://doi.org/10.1115/1.4043529>
- 271 Components of Machine Vision | Cognex, <https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/components>, last accessed 2022/10/03.
- 272 Sokolov, O., Hosovsky, A., Ciszak, O., Ivanov, V., Pavlenko, I. (2024). A Digital Twin of the Soft Robot with a Pneumatic Muscle Actuator. In: Burduk, A., Batako, A.D.L., Machado, J., Wyczółkowski, R., Dostatni, E., Rojek, I. (eds) *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance III. ISPEM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44282-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44282-7_22)
- 273 Denysenko, Y., Górski, F., Ciszak, O., Berladir, K., Kushnirov, P. (2023) *Quality Management at the Manufacturing Enterprise: Repair Processes Case Study. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp 93–101 DOI: 10.1007/978-3-031-32767-4\_9
- 274 Lieposhkina, N., Denysenko, Y., Trojanowska, J., Korotun, M., Pop, G. (2024) *Statistical Methods for Decision-Making Regarding Technological Systems. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2024*, страницы 293–305 DOI: 10.1007/978-3-031-44282-7\_23
- 275 Yurchenko O., Ostroha R., Sklabinskyi V., Gusak O., Bocko J. (2023). Formation of Liquid Droplets at the Prilling Bucket Outlet under Free Oscillations of the Liquid Jet. *Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2023*, pp 177-185 DOI: 10.1007/978-3-031-32774-2\_18
- 276 Sklabinskyi V., Pitel J., Skydanenko M., Simeiko K., Liaposhchenko O., Pavlenko I., Ostroha R., Yukhymenko M., Mandryka O., Storozhenko V. (2023). Pyrocarbon Coating on Granular Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for HTGR-Type Power Reactor. *Coatings, 2023, 13*, 1462 DOI: 10.3390/coatings13081462

- 277 Serdiuk V., Pavlenko I., Bolshanina S., Sklabinskyi V., Włodarczak S., Krupińska A., Matuszak M., Bielecki Z., Ochowiak M. (2023). Kinetic features of Cd and Zn cathodic formations in the membrane electrolysis process. *Fluids*, Vol. 8(2), 74, <https://doi.org/10.3390/fluids8020074>
- 278 Pavlenko, I., Kondus, V., Ivanov, V., Verbovyi, A., Ivchenko, O., Botko, F., Pitel, J. (2023). An Increase in Energy Efficiency and Vibration Reliability of Centrifugal Pumps for Nuclear Power Plants. In: Balog, M., Iakovets, A., Hrehova, S. (eds) *EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*, pp. 51-64. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_4)
- 279 Berladir K., Mitalova Z., Pavlenko I., Trojanowska J., Ivanov V., Rudenko P. (2023). Design and manufacturing of polymer composite materials using quality management methods. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 10(2), pp. B16–B29. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).b3](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).b3)
- 280 Pavlenko, I., Ochowiak, M., Włodarczak, S., Krupińska, A., Matuszak, M. (2023). Parameter Identification of the Fractional-Order Mathematical Model for Convective Mass Transfer in a Porous Medium. *Membranes*, Vol. 13(10), 819. <https://doi.org/10.3390/membranes13100819>
- 281 Berladir K., Hovorun T., Ivanov V., Vukelic D., Pavlenko I. (2023). Diffusion Nitride Coatings for Heat-Resistant Steels. *Materials*, Vol. 16(21), 6877. <https://doi.org/10.3390/ma16216877>
- 282 Yurchenko O., Radchuk O., Barsukova H., Savchenko-Pererva M., Ivchenko O., Kolodnenko V., Fesenko D. Determining a model of the blade in a wind turbine for regions with low wind speeds (2023) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (8-122), pp. 44 – 52 DOI: 10.15587/1729-4061.2023.277896
- 283 Berladir K., Hovorun T., Ivanov V., Vukelic D., Pavlenko I. (2023). Diffusion Nitride Coatings for Heat-Resistant Steels. *Materials*, Vol. 16(21), 6877. <https://doi.org/10.3390/ma16216877>

284 Ivchenko O., Andrusiak V., Kondus V., Pavlenko I., Petrenko S., Krupińska A., Włodarczak S., Matuszak M., Ochowiak M. Energy Efficiency Indicator of Pumping Equipment Usage (2023) *Energies*, 16 (15), art. no. 5820

DOI: 10.3390/en16155820

285 Sokolov, O., Hosovsky, A., Ciszak, O., Ivanov, V., Pavlenko, I. (2024). A Digital Twin of the Soft Robot with a Pneumatic Muscle Actuator. In: Burduk, A., Batako, A.D.L., Machado, J., Wyczółkowski, R., Dostatni, E., Rojek, I. (eds) *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance III. ISPEM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44282-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44282-7_22)

286 Кушніров, П.В. Розширення технологічних можливостей допоміжних опор верстатних пристроїв / П.В.Кушніров, А.В.Євтухов, І.М.Дегтярьов, Ю.О.Денисенко, Б.С.Басов // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», випуск 1 (51), 2023. – С. 36-42. DOI: <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.1>

287 Михайловський Я.Е., Юхименко М.П., Острога Р.О. (2023). Охолоджувальна кристалізація персульфату амонію в кристалізаторі з псевдозрідженим шаром. Вісник Черкаського державного технологічного університету, № 2. – С. 111–118. DOI: 10.24025/2306-4412.2.2023.274049

288 Nadhem A.-K. M., Sklabinskyi V., Ostroha R., Skydanenko M., Yukhymenko M., Bocko J., Ostroha D., Zabitsky D., Moskalchuk O., Serhienko A. (2023). Study of Temperature Changes in Mineral Fertiliser Granules After Contact With Air in a Granulation Tower. *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 4, № 3 (72). – P. 6–9. DOI: 10.15587/2706-5448.2023.286693

289 Ostroha R., Yukhymenko M., Mandryka O. (2023). Hydraulic Regularities of Fluidized Bed During Encapsulation of Organo-Mineral Fertilizers. *Acta Mechanica Slovaca*, 27 (2). – P. 12–17. DOI: 10.21496/ams.2023.015

290 Xin, D., Тарельник, В., Dumanchuk, M., Ivchenko, O., & Gerasimenko, V. (2023). RESEARCH ON METHODS OF IMPROVING THE QUALITY OF THE

COATING OF LOW-MELTING ALLOY B83 FORMED BY ELECTROSPARK PROCESSING METHODS. Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes, (3 (53), 3-10. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.1>

291 Berladir K., Mitalova Z., Pavlenko I., Trojanowska J., Ivanov V., Rudenko P. (2023). Design and manufacturing of polymer composite materials using quality management methods. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 10(2), pp. B16–B29. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).b3](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).b3)



**ДОДАТОК А****АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ (ВИКОРИСТАННЯ) РЕЗУЛЬТАТІВ  
НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший проректор СумДУ

Леонов С. В.

грудня 2023 р.



**АКТ**

**впровадження (використання) результатів  
науково-дослідної роботи (етапу НДР) у навчальний процес**

ДР №0121U112684 «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Сумського державного університету»

**Етап 3**

- 1) підвищення агрохімічної та технологічної ефективності органо-мінеральних фосфоровмісних добрив за рахунок збільшення масової частки водорозчинного фосфору під час переробки сировини українських родовищ фосфоритів та сорбентів;**
- 2) підвищення продуктивності механічного оброблення матеріалів шляхом розроблення комплексного підходу до проєктування систем захоплення деталей та способів зменшення вібрацій процесу різання.**

яка виконана в період з січня 2023 р. по грудень 2023 р.

Розвинуто теоретичні основи моделювання процесу віброгрануляції дисперсних матеріалів за золь-гельною технологією, розроблено моделі руху краплин, осадження золю в гелі, нанесення шару покриття на модельні мікросфери. Обґрунтовано можливості інтенсифікації гідромеханічних та тепломасообмінних процесів отримання нових гранульованих речовин за рахунок накладання віброакустичних коливань. Розроблено математичні моделі впливу активних гідродинамічних і тепломасообмінних режимів, проведено числове моделювання процесу вібраційної грануляції в активному гідродинамічному середовищі гелю. За результатами експериментальних досліджень надано рекомендації щодо режимно-технологічної та апаратурно-конструктивної оптимізації процесу гранулоутворення за золь-гельною технологією. Наведено рекомендації з вибору та обґрунтування параметрів, що впливають на характеристики отриманого продукту за золь-гельною технологією.

Проаналізовано особливості оброблення широких плоских поверхонь заготовок торцевим фрезеруванням. Здійснено моделювання характеристик агрегатних фрезерних головок, що містять кілька торцевих фрез та дослідження особливостей плоскої поверхні, сформованої траєкторіями різальних ножів, що перетинаються. Виявлено недоліки конструктивного виконання та напрями удосконалення існуючих типів допоміжних опор верстатних пристроїв. Обґрунтовано розширення технологічних можливостей допоміжних підвідних опор шляхом надання опорам властивості змінювати кут нахилу опорного штиря по відношенню до заготовки та шляхом використання поворотної допоміжної підвідної опори зі сферичною основою. На базі аналізу конструкцій вузлів кріплення різальних ножів у корпусах фрез виявлено причини ослаблення кріплення різальних елементів. Обґрунтовано використання додаткових стопорних гвинтів для закріплення циліндричних різальних вставок в розробленій конструкції торцевої фрези, що підвищує надійність фіксації кріпильного гвинта.

Керівник теми

Івченко О. В.

## Комісія в складі:

Голова комісії: декан факультету ТеСЕТ, канд. техн. наук, проф. Гусак О. Г.

Члени комісії: в. о. зав. кафедри хімічної інженерії, канд. техн. наук, доц. Острога Р. О.  
доцент кафедри хімічної інженерії, канд. техн. наук, доц. Юхименко М. П.

встановила впровадження в навчальний процес результатів досліджень та місце їх використання:

1. Результати досліджень були використані при курсовому проектуванні магістрантів (Мандрика О. О., Москальчук О. М., Сергієнко А. Р.) і підготовці випускних кваліфікаційних робіт магістрів (Гринько Д. К., Коваленко Д. С., Костюк Н. В., Кулак О. О., Малиник Р. Ю., Мищенко Д. І., Пирогов Х. С., Рудецька Л. В.). У співавторстві зі студентами опубліковано 1 статтю і подано 1 статтю до публікації у журнал, що входить до науково-метричної бази даних Scopus / Web of Science.

2. Результати досліджень були використані при курсовому проектуванні магістрантів (Зайця О. А., Потомахи Д. Ю., Тицького Р. В., Мікуліна Д. О., Скабенока М. М.), підготовці випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів (Гриценко О. О., Мірошніченко О. Р.) і підготовці випускних кваліфікаційних робіт магістрів (Соловійова Д. А., Ілюхіна М. І., Мовчана Р. В.). У співавторстві зі студентами опубліковано 1 тези конференції (Мірошніченко О. Р.), подано до публікації 3 тез конференції (Конончук Д. В., Мікулін Д. О., Скабенюк М. М.), отримано 2 патенти на корисну модель (Гриценко О. О.), подано заявку на отримання патенту (Скабенюк М. М.).

3. Виконавцями НДР (докторант – канд. техн. наук, доц. Острога Р. О. та аспірантом – Острога Д. В.) обґрунтовано фізичну модель утворення органо-мінеральних добрив підвищеної ефективності (шляхом збільшення масової частки водорозчинного фосфору), запропоновано раціональну конструкцію фільтрувального вузла рідких сумішей, що може бути використано у подальших прикладних розробках сепараційного та грануляційного обладнання на матеріально-технічній базі лабораторії грануляційного і масообмінного обладнання (ЛГМО) кафедри хімічної інженерії (ХІ) факультету ТеСЕТ СумДУ, в тому числі при виконанні практичних і лабораторних робіт, а також випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів / магістрів зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування із залученням їх до практико-орієнтованого навчання під час виконання держбюджетних та госпдоговірних НДДКР з оплатою праці.

4. Виконавцями НДР (канд. техн. наук, доц. Кушніров П. В., аспірант – Остапенко Б. А.) проведено теоретичні дослідження особливостей оброблення широких плоских поверхонь заготовок. Здійснено моделювання характеристик агрегатних фрезерних головок, що містять кілька торцевих фрез та дослідження особливостей плоскої поверхні, сформованої траєкторіями різальних ножів, що перетинаються. Запропоновано раціональну конструкцію торцевої фрези з підвищеною надійністю закріплення різальної вставки в корпусі інструмента (Пат. 153758).

5. Виконавцями НДР (канд. техн. наук, доц. Івченком О. В. та аспірантом Євдокимовим О. Д. під керівництвом канд. техн. наук Колесника В. О. виконано дослідження способів зниження вібрацій спеціальних консольних розточувальних оправок при механічній обробці важкооброблюваного сплаву Inconel 718.

6. Дослідження аспірантів Остапенка Б. А., Євдокимовим О. Д. можуть бути використані у подальших прикладних розробках різального інструмента, технологічної оснастки та удосконалення технологічних процесів виготовлення деталей на матеріально-технічній базі кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» факультету ТеСЕТ СумДУ, в тому числі при виконанні практичних і лабораторних робіт, а також випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів / магістрів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» (освітня програма «Технології машинобудування») та спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» (освітня програма «Металорізальні верстати та системи») із залученням їх

до практико-орієнтованого навчання під час виконання держбюджетних та госпдоговірних НДР.

7. Виконавцями НДР (канд. техн. наук, доц. Острога Р. О., канд. техн. наук, доц. Скиданенко М. С.) у 2023 р. підготовлено та подано заявки на конкурс проектів фундаментальних наукових досліджень, прикладних наукових досліджень, науково-технічних (експериментальних) розробок (секції «Зміна клімату, довкілля, чисте будівництво та раціональне природокористування», «Охорона навколишнього середовища»), а також згідно Постанови Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки їм призначено стипендії Кабінету Міністрів України для молодих вчених з листопада 2022 року.

8. Докторант, канд. техн. наук, доц. Острога Р. О. протягом 2023 року отримав п'ять індивідуальних наукових грантів в рамках проекту VEGA 1/0500/20 «Research of mechanical properties of materials with complex internal structure by numerical and experimental methods of mechanics» на загальну суму 187 700,00 грн. Виконавець НДР канд. техн. наук, доц. Скиданенко М. С. отримав індивідуальний грант і впродовж 02–30.07.2023 успішно виконав програму закордонного наукового дослідження «Study of technological parameters of granulation equipment for technical graphite» у Технічному університеті в Кошице (м. Кошице, Словачька Республіка).

9. Канд. техн. наук, доц. Острога Р. О. та канд. техн. наук, доц. Євтухов А. В. взяв участь у шостій Міжнародній конференції з проектування, моделювання та виробництва: обмін інноваціями (DSMIE-2023) у Високих Татрах (Словачька Республіка).

10. Отримані наукові результати і підготовлений звіт про НДР є частиною дисертаційних робіт виконавців НДР: аспірантів: О. Д. Євдокимовим, Д. В. Острога, Б. А. Остапенка та докторанта Р. О. Остроги.

“ \_\_\_\_\_ ” грудня 2023 р.

Голова комісії:

Члени комісії:



Гусак О. Г.

Острога Р. О.

Юхименко М. П.