

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(назва факультету)  
Кафедра автоматизації технологічних процесів та виробництв  
(повна назва кафедри)

# ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи

**магістр**

(освітній рівень)

на тему: Дослідження експлуатаційних параметрів пневматичних  
захоплювальних пристроїв при автоматизації завантаження  
габаритних вантажів

Виконавли: студенти 6 курсу, групи КАм-61

Спеціальність 151

“Автоматизоване управління технологічними процесами”  
(шифр і назва спеціальності)

Колонюк С.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Цапик Р.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Михайлишин Р.І.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Козбур І.Р.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Курко А.М.

(прізвище та ініціали)

## А н о т а ц і я

В дипломній роботі використані такі терміни: струминний захоплюючий пристрій, маніпулятор, транспортування, кінематична схема.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії кінцевого ефектора промислового робота з об'єктом маніпулювання під час виконання завантажувальних операцій.

Мета роботи – зниження енергоспоживання струминного захоплювального пристрою за рахунок оптимізації орієнтації кінцевої ланки маніпулятора в процесі транспортування габаритних об'єктів виробництва по прямолінійній траєкторії.

Розглянуто випадок, коли захоплювальний пристрій призначений для транспортування плоских деталей типу пластин. Удосконалено математичну модель динамічної взаємодії струминного захоплювального пристрою з вантажем при його транспортуванні по прямолінійній траєкторії. Виконано дослідження впливу сили лобового опору повітря, що діє на об'єкт маніпулювання під час виконання транспортної операції, на мінімальну необхідну силу притягання захоплювача Бернуллі. Запропоновано конструкції орієнтуючих-подовжувачів для СЗП та встановлено технічні вимоги до їх габаритів, маси та жорсткості. Для заданих параметрів захватної системи доведено, що збільшення геометричних параметрів орієнтуючого-подовжувача призводить до зростання енергетичних затрат на виконання транспортних операцій в 1,6 рази. Проведено дослідження процесу транспортування габаритних об'єктів маніпулювання без оптимізації орієнтації та із оптимізацією орієнтації захватної системи. Проведено порівняльний аналіз енергоефективності транспортування габаритних об'єктів із оптимізацією орієнтації захватної системи на базі вихрових, вакуумних захоплювачів та захоплювачів Бернуллі.

In the thesis used the following terms: Bernoulli gripping device, manipulator, transportation, kinematic scheme.

The object of the study is the process of interaction of the industrial robot's end effector with the object of manipulation during the execution of boot operations.

The purpose of the work is to reduce the power consumption of the Bernoulli gripping device by optimizing the orientation of the end link of the manipulator in the process of transporting the overall production objects along a straight line.

A case where a gripper is designed to transport flat plate-like parts is considered. The mathematical model of dynamic interaction of the Bernoulli gripper with the cargo during its transportation along a straight path has been improved. The influence of the air drag force acting on the object of manipulation during the operation of the transport on the minimum required force of attraction of the Bernoulli invader has been performed. The design of orientation extensions for the BGD is proposed and the technical requirements for their dimensions, weight and rigidity are set. For the given parameters of the gripping system, it is proved that the increase of the geometrical parameters of the orienting-extension leads to an increase of energy costs for performing transport operations by 1.6 times. The process of transportation of dimensional objects of manipulation without optimization of orientation and with optimization of orientation of the gripping system is carried out. A comparative analysis of the energy efficiency of transportation of dimensional objects with optimization of the orientation of the gripping system based on Vortex, Vacuum and Bernoulli grippers.

# ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....	9
1.1 Аналіз сучасного стану проблем управління .....	9
промисловими роботами .....	9
1.1.1 Виконавчі механізми .....	11
1.1.2 Приводи та передавальні механізми .....	12
1.1.3 Інформаційно вимірювальні системи .....	12
1.1.4 Системи управління .....	13
1.2 Области застосування та технічні рішення систем .....	14
керування маніпуляторами .....	14
1.2.1 Автоматичне управління .....	15
1.2.2 Інтерактивне управління .....	15
1.2.3 Біотехнічне управління .....	17
1.2.4 Системи командного управління .....	19
1.2.5 Системи напівавтоматичного управління .....	19
1.2.6 Системи копіюючого управління .....	20
1.3 Використання ЕОМ для моделювання руху роботів .....	25
1.4 Аналіз методів захоплення та транспортування вантажів .....	28
1.5 Струминні захоплювачі, як ефективна альтернатива безконтактного захоплення вантажів .....	31
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	42
2.1 Технічні вимоги до струменевих захоплювачів .....	42
2.2 Технічні характеристики струменевих захоплювачів .....	45
2.2.1 Точність базування об'єктів маніпулювання .....	45
2.2.2 Надійність роботи струменевих захоплювачів .....	50
2.2.3 Стабільність присмоктуючої дії .....	53
2.2.4 Питома підйомна сила струменевих захоплювачів .....	55
2.2.5 Коефіцієнт корисної дії струменевих захоплювачів .....	56
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА .....	60
3.1 Конструкція струминних захоплюючих пристроїв для безконтактного маніпулювання .....	60
3.1.1 Опірні струминні захоплювачі об'єктів маніпулювання .....	60
3.1.2 Вихрові струминні захоплювачі об'єктів маніпулювання .....	62
3.1.3 Струминні захоплювачі з одним циліндричним соплом .....	66
3.1.4 Струминні ежекційні захоплювачі з кільцевим соплом .....	70
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА .....	77
4.1 Дослідження впливу сил лобового опору при маніпулювання габаритними об'єктами .....	77
4.2 Дослідження енергозатрат на виконання вантажно-розвантажувальних операцій з врахуванням параметрів захватної системи .....	87
4.3 Дослідження енергоефективності маніпулювання габаритними об'єктами з використанням пневматичних захоплювальних пристроїв .....	99

5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА .....	110
5.1 Розробка і налагодження програмованої математичної моделі в середовищі MathCAD.....	110
5.2 Реалізація методики моделювання оптимізації орієнтації кисті промислового робота в програмному середовищі RobotStudio .....	112
6 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	125
6.1 Розрахунок річного економічного ефекту від впровадження струменевих захоплюючих пристроїв при автоматизації процесів завантаження листових заготовок .....	125
6.2 Техніко-економічне обґрунтування розробки.....	129
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	130
7.1 Значення охорони праці в забезпеченні здорових умов праці .....	130
7.2 Охорона праці як система заходів щодо гармонізації використання комп'ютерних технологій .....	130
7.3 Аналіз потенційних небезпек та шкідливостей виробничого середовища .....	132
7.4 Розрахунок освітленості робочого місця при розробці криптографічних систем .....	137
7.5 Електромагнітний імпульс ядерного вибуху і захист від нього радіоелектронних засобів .....	138
7.6 Забезпечення нормальних умов праці.....	140
7.6.1 Вибір приміщення .....	141
7.6.2 Забезпечення нормальних санітарно- гігієнічних умов на робочому місці.....	141
8 ЕКОЛОГІЯ .....	146
8.1 Характеристика енергетичних забруднень та методи їх знешкодження..	146
8.1.1 Забруднення виробничого та навколишнього середовища відходами виробництва.....	146
8.1.2 Експлуатації моніторів і ПЕОМ .....	147
8.1.3 Освітлення приміщень і робочих місць з моніторами і ПЕОМ.....	148
8.1.4 Вимоги до екологічних рівнів шуму і вібрації .....	151
8.2 Зниження енергоємності енергозбереження систем стисненого повітря	152
ВИСНОВКИ .....	155
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	157
ДОДАТКИ.....	168

## ВСТУП

Перехід народного господарства України на шлях інтенсивного розвитку – об'єктивна вимога часу. Збільшення випуску продукції машинобудування і покращання її якості при одночасному зниженні виробничих затрат забезпечується за рахунок удосконалення існуючих і впровадження нових видів обладнання і технологічних процесів, засобів їх механізації і автоматизації, за рахунок підвищення ефективності організації і управління виробництвом.

Одним із найбільш ефективних шляхів вирішення транспортно-завантажувальних завдань автоматизованого виробництва є створення автоматичних механізмів, здатних виконувати на виробництві ряд допоміжних операцій. До них відносяться автоматичні маніпулятори і промислові роботи, експлуатаційна надійність яких в основному залежить від конструкції захоплюючого пристрою. Завдання створення конструктивно простих, економічних і надійних в експлуатації захоплюючих пристроїв, розробки теорії і методів їх розрахунку набуває особливого значення, якщо врахувати, що приблизно 40...45% відмовлень існуючих засобів завантаження припадає на невиконання ними операцій захоплення і відпускання об'єктів. Перспективним є застосування нових високопродуктивних і надійних сруменевих захоплюючих пристроїв (СЗП) об'єктів різної форми, ваги, фізичних та механічних властивостей, тому питання їх розробки і дослідження є актуальним завданням.

# 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Аналіз сучасного стану проблем управління промисловими роботами

Робототехнічна система (РТС) - це технічна система, в якій перетворення і зв'язку енергії, маси та інформації відображені з використанням роботів різного призначення [1].

РТС володіють основними ознаками системності: цілісністю системи машин, що виявляється в тому, що вона має властивості, відмінними від властивостей складових її елементів; ієрархічністю структури, що дається взнаки в наявності декількох рівнів ієрархії і можливістю опису РТС з різним ступенем деталізації, яка визначається розглянутим рівнем залежно від розв'язуваних завдань. Так, окремі складові РТС, виконують самостійні функції, можна розглядати при диференціюванні в якості самостійних складних систем і, навпаки, в процесі інтегрування можна прийти від системи нижчого рівня до вищого.

Існують різні класифікації роботів, прийнято виділяти два основні класи маніпуляційні роботи та мобільні роботи.

Маніпуляційні РТС отримали найбільший розвиток і практичне застосування в промисловості, де їх називають промисловими роботами. Промисловий робот (ПР) - автоматична машина, стаціонарна або пересувна, що складається з виконавчого пристрою у вигляді маніпулятора, що має кілька ступенів рухливості, і перепрограмовуваного пристрою програмного управління для виконання у виробничому процесі рухових і керуючих функцій (по ДСТУ 25686-85). У технічній літературі часто зустрічається і більш коротке визначення: ПР - перепрограмований автоматичний маніпулятор промислового застосування. Характерними признаками ПР є автоматичне керування; перепрограмовуваність - здатність до швидкої автоматичної або за

допомогою людини-оператора заміні керуючої програми (до зміни послідовності, системи та змісту команд); здатність до виконання трудових дій. Існують різні класифікації роботів, наприклад роботи маніпулятори можуть бути класифіковані залежно від компонентів з яких складаються, конфігурації та використання, для роботів маніпуляторів найбільш поширені три класифікації за типами систем управління, типам приводів, і формі робочої зони [2].

Мобільні (рухомі) РТС забезпечують автоматичне переміщення корисного навантаження в просторі. Можуть мати запрограмований маршрут руху і (або) автоматичне адресування мети. Оснащуються рушіями різних типів: колісними, гусеничними, крокуючими, водометними, гвинтовими, ракетними і т.п. У промисловості застосовуються для обслуговування складів, міжцехового і внутрішньоцехового транспортування матеріалів, деталей, інструменту та оснастки. Такі рухливі РТС часто оснащуються маніпуляторами.

В літературі про крокуючих роботів часто можна зустріти терміни "локомоція" синергія ". Локомоція - пересування крокуючого пристрою будь-яким способом, шляхом ходьби, стрибків або будь-якого їх поєднання. Синергія - упорядкована послідовність дій приводить до локомоції [3].

Серед робототехнічних систем, тобто керованих систем твердих тіл, помітну роль відіграють крокуючі пристрою або, як їх ще часто називають, локомоційні системи (ЛС). На відміну від маніпуляційних локомоційні пристрої являють собою сукупність відкрито-замкнутих ланцюгів (кінцівок), за допомогою яких здійснюється пересування ЛЗ в просторі. Крокуючі роботи мають ширші можливості для переміщення по пересіченій місцевості ніж колісні або гусеничні машини. Обмеженням крокуючих машин є складна конструкція рушія і як наслідок складна система управління рухами робота.

Не залежно від галузі застосування і використовуваних виконавчих механізмів РТС складається і наступних компонентів:

- Виконавчі механізми;



- Приводи та передавальні механізми;
- Інформаційні системи, що складаються їх різних; датчиків і вимірювальних систем;
- Системи управління.

Важливо відзначити що сучасні РТС можуть обладнуватися сотнями ступінь свободи, а частоти роботи систем управління 200 Гц [4, 5] при управлінні рухом таких складних систем необхідно враховувати безліч умов. Тому завдання розробки систем управління рухом таких роботів є актуальною.

### **1.1.1 Виконавчі механізми**

Маніпулятори роботів і деталі рушіїв приводяться в дію за допомогою виконавчих приводів, які забезпечують рухливість системи та виконання цільових функцій.

У біологічних організмах функції виконавчих органів покладаються на м'язи, які складаються з пучків скорочуються волокон.

Середній час скорочення одного волокна сто мілі-секунд, а створюване зусилля може досягати двохсот грамів. Посилення, створюване всім м'язом, визначається числом задіяних волокон, а плавність рухів забезпечується їх послідовним підключенням. В цілому м'яз являє своєрідний біологічний двигун, що включає кілька тисяч простіший двигунів імпульсного типу. Всі вони об'єднуються в пучки, а потім - в рухові одиниці.

Приводи роботів класифікуються по ряду характерних ознак. Залежно від типу енергії, використовуваної двигуном, вони можуть бути електричними, гідравлічними і пневматичними.

### **1.1.2 Приводи та передавальні механізми**

Пристроїв передачі механічної енергії від двигуна до ланок механічним елементам РТС досить багато:

- Кулько-гвинтова передача;
- Зубчато-рейкова передача;
- Хвильової редуктор;
- Ланцюгові передачі, стрічки та приводні ремені;
- Шарнірно-важільні передачі.

Часто в якості приводів використовують механотронні модулі, які частково об'єднують в собі виконавчі та інформаційні компоненти РТС. Механотронні модулі - це базові функціональні компоненти механотронних систем і машин з комп'ютерним управлінням, призначені для виконання рухів, як правило, по одній керованій координаті. Головними перевагами механотронних систем є виняток багатоступінчастого перетворення енергії та інформації, спрощення кінематичних ланцюгів і отже висока точність і поліпшені динамічні характеристики, конструктивна компактність модулів і отже поліпшені масо-габаритні характеристики. Можливість об'єднання мехатронних модулів в складні механотронні системи, і комплекси, що допускають швидку реконфігурацію, відносно низька вартість установки, настройки і обслуговування системи, завдяки модульності конструкції, уніфікації апаратних і програмних засобів, здатність виконувати складні рухи, завдяки застосуванню методів адаптивного та інтелектуального управління.

### **1.1.3 Інформаційно вимірювальні системи**

Головна задача інформаційно вимірювальної системи, це забезпечення інформацією систему управління. Можна виділити два типи даних одержуваних від інформаційно системи. Відповідно до рівнів ієрархії системи

управління для тактичного рівня це інформація про об'єкт маніпулювання і про навколишнє робочому середовищі, для тактичного рівня це дані про стан виконавчої системи, переміщення в приводах, стан різних систем, гальмівних муфт, положення кінцевих вимикачів і т.д. Інформація про стан виконавчої системи необхідна для організації зворотного зв'язку.

#### **1.1.4 Системи управління**

Об'єктом управління є різні виконавчі механізми - маніпуляційні, пересування і системи управління. Загалом механічна система як об'єкт управління може бути охарактеризована: типом і числом переносних і орієнтуючих робочих органів ступенів рухливості (переносні - поступальний і обертальні, що орієнтують - обертальні), типом і розміром робочої зони. Виконавчі механізми складаються з механічної системи і приводів. Для маніпуляторів механічна система буде закінчуватися яким або робочим органом або інструментом. Для систем пересування також можуть мати робочий орган, наприклад бульдозерний ніж, підйомник, лебідка і т.д. також в якості робочого органи можуть виступати елементи крокуючого рушія, наприклад стопи [6] [7].

Система управління має ієрархічну організацію в якій можна виділити такі рівні [3]:

1. Формулювання завдання. Система управління апаратом отримує завдання від оператора (наприклад пройти з пункту А в пункт В).

2. Планування поведінки та прийняття рішення. Алгоритми цього рівня виконують аналіз ситуації і здійснюють підбір оптимального режиму руху, що забезпечує досягнення поставленої мети з урахуванням перешкод і конструктивних обмежень.

3. Рівень побудови руху та управління приводами. Алгоритми цього рівня будують програмні руху окремих ланок апарат т.п. закон зміни їх узагальнених координат.

Частіше перші два рівня ієрархії об'єднують в один рівень і тоді задачу управління рухами робота можна розділити на два рівня тактичний і виконавчий. На тактичному рівні визначається траєкторії і цілі руху. Виконавчий рівень вирішує задачу генерації управляючих сигналів забезпечують необхідний рух [8].

Основне завдання виконавчої частини системи управління мобільним роботом - це управління рухом. Сучасний підхід полягає в тому щоб управляти рухом в кожному зчленуванні за допомогою вбудованого механізму [9, 10].

Окремо варто виділити управління локомоційним рухом. Локомоційний рух-це пересування динамічних керованих систем в просторі. Проблема синтезу локомоцій головним чином досліджувалася стосовно до крокуючим роботам. Складні завдання організації систем управління крокуючих робототехнічних пристроїв становлять значний інтерес з точки зору моделювання та конструювання різних засобів протезування кінцівок (екзоскелетони), проникнення в важкодоступні, небезпечні або заражені місця, освоєння інших планетарних просторів [11].

## **1.2 Области застосування та технічні рішення систем керування маніпуляторами**

Маніпуляційні роботи (МР) згідно з класифікацією, запропонованого академіком РАН Є.П. Поповим, поділяються на: автоматичні МР з програмним, адаптивним і інтелектуальним управлінням; біотехнічні МР з командним, копіюючим і напівавтоматичним керуванням; інтерактивні МР з автоматизованим, супервізорним і діалоговим керуванням.

Процес розвитку робототехніки за аналогією з розвитком обчислювальної техніки складається з декількох етапів. Перший етап розвитку промислової робототехніки характеризувався створенням маніпуляторів з ручним і дистанційним управлінням для звичайних цехових і екстремальних умов роботи і МР з автоматичним управлінням (промислових роботів) для виконання допоміжних і підйомно-транспортних операцій, пов'язаних з обслуговуванням основного технологічного обладнання та складських приміщень.

Подібні ПР відносяться до групи допоміжних (підйомно-транспортних) роботів. Розвиток робото технічних систем (РТС) як засобів гнучких автоматизованих виробництв визначає другий етап розвитку робототехніки. Цей етап пов'язаний зі створенням технологічних (виробничих) роботів, які безпосередньо виконують технологічні операції механообробки, що характеризуються складною просторовою оброблюваної поверхнею при невисоких вимогах до розмірної точності, в тому числі лазерного та гідро абразивного обробки; монтажно-збиральних і зварювальних операцій; обробки поверхонь шляхом їх забарвлення або напилення антикорозійних рідин, випробування, контролю.

### **1.2.1 Автоматичне управління**

Автоматичне програмне управління реалізується у вигляді: циклового, позиційного, контурного і контурно-позиційного управління. МР з програмним управлінням працюють тільки в умовах детермінованою зовнішнього середовища, що вимагає застосування різного роду орієнтуючих пристроїв , наповнювачів та інших пристосувань. При не детермінованої зовнішньому середовищі застосовуються адаптивне та інтелектуальне управління.

### **1.2.2 Інтерактивне управління**

Супервізорним засобом керування роботом називають систему керування, при якій оператор обирає для виконання одну за одною заздалегідь укладених в пам'ять робота типових операцій, забезпечуючи таким чином виконання певної заданої складної роботи.

При цьому, команди оператора включають в себе два види інформації: назва типової операції і введення чисельних значень деяких заздалегідь не визначених параметрів цієї операції. Прикладом такої інформації є необхідні для виконання операції координати зовнішнього середовища. Це здійснюється за допомогою, наприклад, керуючої рукоятки, світлової мітки на екрані дисплея, світлового пера, миші, засобів віртуальної реальності в комп'ютерному тривимірному просторі.

Операція може задаватися через клавіатуру, за допомогою мовного командного устрою та інших засобів спілкування. Більш досконале інтерактивне управління передбачає діалоговий зв'язок з роботом. Після отримання певного завдання, робот може повідомити про нездійсненність якоїсь операції із зазначенням причин, може запитати у оператора відсутню для його виконання інформацію або будь-які уточнення, повідомити про виникнення несправності і т. п. У свою чергу оператор може запитати у робота додаткову інформацію про зміст пам'яті, додаткову сенсорну інформацію про зовнішнє середовище, або стан окремих його систем. Для реалізації подібного діалогового режиму, включаючи мовний обмін, потрібен інтелектуальний інтерфейс.

Супервізорний метод управління дозволяє поєднати інтелектуальні можливості людини при вирішенні складних неформальних завдань та обчислювальні можливості ЕОМ при вирішенні формалізованих задач. Для розробки такої системи управління потрібні: правильний вибір засобів і методів сенсорного забезпечення роботів, розробка адаптивних алгоритмів керування, чітке визначення і розмежування функцій між людиною і ЕОМ при взаємодії з

роботом. Алгоритми управління забезпечують реалізацію типових рухів елементів маніпулятора, так і корекцію його дій.

Співвідношення між ланками і характеристичними координатами руки робота є основою алгоритмів безпосереднього розрахунку, причому для маніпуляційних систем, в яких більше ніж три ланки, накладаються обмеження для виключення надмірності їх структури.

Можливість обчислення характеристичних координат елементів маніпуляційної системи робота в заданій точці за одну ітерацію є однією з переваг таких алгоритмів управління. До недоліків - обмеженість застосування даного алгоритму тільки для даної кінематичної структури робота, та не оптимальність одержуваної траєкторії руху робочих органів в задану позицію.

Неузгодженість між вихідним і заданим положеннями робочих органів маніпуляційної системи, в алгоритмах оптимізації, розглядається як цільова функція, яка імітується в процесі управління роботом з урахуванням обмежень на орієнтацію ЗУ.

Забезпечення оптимальної, траєкторії переміщення ланок маніпуляційної системи, є перевагами алгоритму оптимізації, однак при цьому різко збільшуються час і обсяг обчислень. Інтерактивний режим управління, при русі мобільних роботів у невідомій місцевості, має особливо велике значення. В цьому випадку діалоговий режим часто необхідний при виникненні складних і непередбачених перешкод, плануванні маршруту, а також інших нештатних ситуацій.

### **1.2.3 Біотехнічне управління**

Відмітною ознакою біотехнічного управління маніпуляторів є участь людини в процесі управління. Системи керування, в яких керуючі сигнали виробляються в процесі взаємодії людини і машини називаються людино-машинні системи керування. Така система управління застосовується, коли

реалізація автоматичного управління не вигідна в порівнянні з керуванням людиною, або неможлива на базі сучасної техніки.

До першого варіанту, коли людське управління являється кращим за автоматику, відносяться операції, які людина робить швидше, якісніше і дешевше, хоча вони цілком піддаються роботизації, або особливо відповідальні операції, які людина не може довірити автоматом (деякі операції в космосі, під водою в екстремальних ситуаціях).

Другий варіант відповідає досить складним технічним операціям та об'єктам управління. Наприклад: дугове зварювання складних виробів, вільна ковка, деякі складальні і налаштувальні операції, різні аварійно-рятувальні операції. Приклади об'єктів: мобільні роботи у складній непередбачуваній обстановці, космічні та підводні маніпулятори.

Інтелект людини та її органи чуття дозволяють оператору швидко орієнтуватися в робочій обстановці, аналізувати умови роботи, приймати необхідні рішення і вибирати раціональні алгоритми виконання технологічних операцій. Це і визначає застосування маніпуляторів з ручним і дистанційним управлінням для виконання складних і нетипових операцій з не детермінованими варіативними об'єктами як при звичайних, так і екстремальних умовах роботи. До маніпуляторів з ручним управлінням відносяться збалансовані і механічні копіюючі маніпулятори. При експлуатації збалансованих маніпуляторів оператор впливає безпосередньо на підвішений вантаж. Управляти рухом збалансованого маніпулятора можна і не безпосередньо, а за допомогою спеціального виносного пульта дистанційного командного управління.

Необхідність більшого видалення оператора від небезпечних зон, що виникають при аварійних ситуаціях та екстремальних умовах експлуатації, збільшення вантажопідйомності маніпулятора і зниження стомлюваності оператора призвела до створення в повному розумінні дистанційно керованих



маніпуляторів. З точки зору методів управління дані маніпулятори поділяються на маніпулятори з командним, напіваавтоматичним і копіюючим керуванням.

#### **1.2.4 Системи командного управління**

Система командного управління передбачає управління окремими приводами, і здійснюється в релейному режимі управління швидкістю та переміщенням. Таке управління застосовується виключно як додатковий спосіб управління, наприклад, для програмування методом навчання промислових роботів, а також в аварійних і нештатних ситуаціях. Швидкодія такого управління дуже низька, так як, для отримання прийнятної точності таке управління ведеться зазвичай на зниженій швидкості, а, також тому, що тут приводи працюють послідовно. Точність управління визначається вмінням оператора, через якого замикається зоровий зворотній зв'язок в контурі управління.

#### **1.2.5 Системи напіваавтоматичного управління**

Один з найперших способів управління маніпуляторами є управління за допомогою керуючої рукоятки. Принцип роботи системи досить простий. По задаючій рукою оператора траєкторії робочого органу керуюча рукоятка (джойстик), визначає завдання його приводам. Це робиться за допомогою математичної моделі маніпулятора рішенням оберненої задачі кінематики. Кожна ступінь рухливості оснащена датчиком положення. Оператор, зміщуючи своєю рукою керуючу рукоятку, задає координати робочого органу маніпулятора, за допомогою цих датчиків. По даним цих датчиків, комп'ютер визначає завдання для приводів. Для управління рухом робочого органу потрібно шість координат - три орієнтуючі кутові і три переносні його центру.

Для цього застосовуються дві трьох статичні керуючі рукоятки: одна для управління переміщенням, а інша - орієнтацією робочого органу.

Невисока точність відображення геометрії перешкоди є недоліком таких систем управління. Для того, щоб визначити напрямок руху руки, повинна бути забезпечена деяка свобода руху. Отже, рука повинна мати можливість зміщуватися також і в напрямку перешкоди. Якщо треба рухатися вздовж перешкоди, роблячи на нього деякий тиск, то виникне протиріччя, тому що, ступеня рухливості повинні бути звільнені, щоб здійснити такий рух, однак імітація опору з боку перешкоди призведе до блокування приводів.

Використання електромеханічного маніпулятора, є ще одним способом реалізації відображення зусиль опору руху, на якому встановлений сило вимірювальні датчик замість схвата.

Цей спосіб дозволяє точніше виконувати рух уздовж границі перешкоди. Однак, недоліком є те, що рух маніпулятора відбувається з відчутними автоколиваннями, що ускладнює роботу оператора. Це обумовлено тим, що величина переміщення рукоятки пропорційна діючій на неї силі.

Управління за допомогою керуючої рукоятки, на сьогоднішній день, був практично повністю витиснений більш сучасними системами.

### **1.2.6 Системи копіюючого управління**

Системи копіюючого управління маніпулятором або MSM (master-slave manipulators) отримали широке розповсюдження, особливо в тих умовах, коли необхідно проводити маніпуляції в небезпечних для людини умовах, а також в тих ситуаціях, в яких необхідна висока точність виконання операцій.

Перші конструкції систем копіюючих маніпуляторів почали використовуватися в атомних лабораторіях США. Оператор, з безпечної відстані, управляє рухами маніпуляторів і спостерігає за їх роботою,

перебуваючи в безпечному приміщенні. В Атомній промисловості США зараз використовується понад 2500 телеоператорів.

Ще одною сферою застосування копіюючих маніпуляторів є медицина. Компанії, які займаються медичною технікою та обладнанням, такі компанії, як Intuitive Surgical виробляють хірургічні роботи - маніпулятори, якими управляє лікар - хірург завдяки системам копіюючого маніпулятора, із застосуванням «віртуальних» методів, таких як 3D - анімація і тактильне відчуття. Перевагою використання комп'ютеризованого методу є те, що хірургу не потрібно бути присутнім при проведенні операції, адже лікар може бути де завгодно в світі, що приводить до можливості віддаленої хірургії. У разі відкритої хірургії, автономні інструменти стали замінювати традиційні, виконуючи тіж самі дії, але з набагато більш гладким зворотним зв'язком руху, у порівнянні з людською рукою. Головною метою таких інструментів, є зменшення або повне усунення розривів тканин, які традиційно асоціюються з відкритою хірургією. Ця технологія дозволяє проводити операції, без необхідності різання тіла пацієнта для забезпечення доступу для рук хірурга, а саме, через крихітні розрізи. Хірург, засобами робототехніки, може "проникати" у внутрішні області тіла і маніпулювати невеликими хірургічними інструментами.

Основні принципи побудови копіюючих маніпуляторів використовуються і при розробці навантажувальних маніпуляторів з аналогічним способом управління, проте їх вузька спеціалізація дозволила ввести ряд змін в систему управління. Перш за все слід зазначити, що за наявності кругових обслуговуваних обсягів немає можливості розташувати оператора нерухомо щодо обслуговується обсягу, практично він робить поворот разом з виконавчим механізмом, як це має місце, наприклад, у екскаваторах та кранах. У зв'язку з цим для управління поворотом використовується, як правило, управління по швидкості і лише в особливих випадках можливе введення додаткового механізму повороту з сервоприводом, управління яким здійснюється від пристрою, що задає, керуючого і рухом інших ланок маніпулятора. Це дозволяє

згодом при розгляді ряду систем управління зупиняться тільки на плоских схемах виконавчих механізмів, що забезпечують рух в базовій площині.

Система керування копіюючим маніпулятором є системою, яка розширює можливості людини, дозволяючи оперувати предметами на відстані. Така система основана на принципі синхронної дії між органом управління і об'єктом управління. Об'єктом управління є виконавчий (ВМ) маніпулятор, а органом управління ним служить керуючий маніпулятор (КМ).

Керуючий механізм кінематично повністю повторює виконавчий. Замість схвату, як у виконавчого маніпулятора, у керуючого є рукоятка. Оператор, переміщаючи цю рукоятку, змушує робочий орган виконавчого маніпулятора повторювати цей рух. Таким чином, виконавчий маніпулятор повторює, копіює рух керуючого.

Керуючий маніпулятор, за звичай, набагато менше виконавчого, для того щоб відповідати розмірам робочої зони руки людини, а також в силу обмеження простору, що надається оператору за пультом управління, де розміщується керуючий маніпулятор.

Задача о копіюванні захватом переміщень виконавчого маніпулятора, які задають керуючий маніпулятор зводиться до того, що ланки першого, повинні виконувати ті ж відносні рухи, які мають місце в другому. Система передач для відтворення цих рухів може бути різною. Наприклад, керуючий механізм оснащується датчиками відносних переміщень його ланок. Сервоприводи, які розташовані на рухомих ланках виконуючого маніпулятора керуються сигналами цих датчиків і приводять виконавчий маніпулятор в положення, яке відповідає положенню керуючого.

Існують два типи систем копіюючих маніпуляторів - незворотні, або односторонньої дії, і оборотні, або двосторонньої дії. Вони відрізняються один від одного, наявністю, так званого, ефекту силового відчуття у другому типі. Коли оператор переміщує керуючий механізм, він відчуває на своїй руці протидію яке пропорційне зусиллю, з яким робочий орган виконавчого

маніпулятора діє на об'єкти зовнішнього середовища (так званий ефект відображення зусилля).

В системах двосторонньої дії присутні приводи, які необхідні для здійснення зазначеного ефекту силового відчуття, у відмінку від копіюючих маніпуляторах односторонньої дії, в яких приводи відсутні.

Ефект відображення зусилля дуже важливий для точності і надійності управління маніпулятором. Коли людина сама виконує яку-небудь операцію, наприклад піднімає і переміщує вантаж, вона, сама того не помічаючи, враховує масу вантажу і докладає силу, пропорційну їй, а коли відкриває або закриває двері, люк, пересуває деталь і т.д., інстинктивно діє з силою, яка не призводить поломки або деформації предметів, заклинювання або зрив різьби з них і т. п. Оператор потребує інформації про зусилля, що розвиваються маніпулятором, щоб уникнути деформацій і псування деталей, не знижуючи швидкості проведення операцій і підвищуючи тим самим продуктивність праці та якість робіт, виконуючи подібні операції за допомогою робота.

В залежності від типу зв'язку між задаючим і керуючим механізмом, копіюючі маніпулятори можна розділити на три групи.

#### **1.2.6.1 Маніпулятори з механічним зв'язком**

Механічні маніпулятори були першими пристроями, які почали використовувати в небезпечних для життя людини умовах. Перші конструкції таких систем були представлені в 1951 році Раймондом Гоерцом (Raymond Goertz) Комісії з ядерної енергетики. В цих маніпуляторах керуючий і виконавчий механізми зв'язані механічними передачами: зубчатими, тросово-стрічковими та іншими. За допомогою цього виконавчий маніпулятор переміщувався під дією зусилля з боку людини-оператора, прикладеного до керуючого маніпулятора. Механічна конструкція, забезпечувала з'єднання один-до-одного між двома сторонами, створюючи відтворення фактичної

маніпуляції. Механічні передачі є реверсивними і мають високий рівень КПД, тому на задаючому механізмі достатньо точно відтворюються зусилля, яке прикладено до виконавчого маніпулятора. З сьогоденної точки зору ці пристрої здаються примітивними, так як не мали електроніки та комп'ютерного управління. Тим не менш, вони були досить ефективними і до цих пір широко використовуються. Ці механічні телеманіпулятори прості, надійні, та зручні в використанні. Вони були першими механізмами подібного типу. Вантажопідйомність цих систем становила від 3 до 16кгс. По суті, чисто механічні пристрої були обмежені відстанню приблизно 5 метрів між виконавчим і керуючим маніпулятором. Крім того, ця відстань визначалася під час установки системи, наслідком чого жодна із сторін не могла переміщатися по відношенню до іншої.

#### **1.2.6.2 Маніпулятори з магнітним приводом**

Маніпулятори цього типу використовуються в тих випадках, коли необхідно забезпечити абсолютну герметизацію об'єму камер(робота в зоні значного тиску, вакуумі і т.д). У якості приводів в них використовуються муфти на постійних магнітах, які дозволяють передавати переміщення через “глуху” стінку, без отворів під передаточні механізми. Маніпулятори з магнітними муфтами бувають двох видів: с торцевими магнітними муфтами, і с циліндричними магнітними муфтами.

#### **1.2.6.3 Сервоманіпулятори**

Ця назва закріпилась за копіюючими маніпуляторами, в яких керуючий і виконуючий механізми, зв'язані системами управління особливого виду — об'єктні стежачі системи (ОСС), розроблені в 70-х роках ХХ століття. Такі системи забезпечують відтворення по положенню між задаючими та

виконуючими органами, а також відтворюють на задаючому зусилля, яке прикладене до виконуючого.

Використовуються, також приводи на сельсинах. Вони складаються з сельсина-датчика і сельсина-приймача, які мають конструкцію звичайного мотора. Обмотки роторів і статорів обох сельсинов з'єднані між собою по індикаторній схемі. Ротори сельсинов-датчиків зв'язані з ланками керуючого маніпулятора, а ротори сельсинов-приймачів — з ланками виконуючого маніпулятора. Якщо обернути ротор сельсина-датчика, то при відсутності на виконавчому механізмі навантаження ротор сельсина-приймача буде мати синхронне з ним обертання. У результаті виконавчий маніпулятор в цілому і його робочий орган відстежують положення керуючого маніпулятора, переміщувачого оператором. Однак, в маніпуляторах зі стежачими приводами або з магнітними муфтами виконавчий механізм відтворює рухи керуючого механізму лише приблизно. Саме тому вони не забезпечують необхідної синхронності між керуючим і виконавчим маніпулятором.

### **1.3 Використання ЕОМ для моделювання руху роботів**

Внаслідок складності РТС як об'єктів дослідження основним засобом для такого дослідження є математичне моделювання з використанням ЕОМ. Цей спосіб має ряд переваг у порівнянні з фізичним моделюванням і натурними експериментами, і може опинитися особливо корисним на етапі конструювання робота.

Проаналізувавши різне загальнодоступне програмне забезпечення використовується для моделювання та дослідження роботів були виділені наступні групи:

- Інтегровані пакети;
- Керуючі пакети;
- Засоби програмування та чисельних розрахунків;

- Засоби моделювання;
- Пакети штучного інтелекту.

Інтегровані пакети - це програмне забезпечення орієнтоване на його використання в складі системи управління, можуть застосовуватися в якості бортовий операційної системи. Програмне забезпечення цієї групи в першу чергу орієнтовано на рішення задач взаємодії та обміла даними між елементами системи управління та виконавчими механізмами. Прикладом таких систем можуть служити: MissionLab, FlowDesigner, ROSSUM, Darwin2K, Tekkotsu.

Керуючі пакети - це пакети орієнтовані на моделювання систем управління, передачу сигналів і виконувати роль центрального елемента в систем е управління роботом. Як приклад можна навести такі системи: OROCOS Open Robot Control Software, RobotStudio, Motion Strategy Library, Modular Controller Architecture, Microb, DROS Dave's Robotic Operating System.

Засоби програмування та чисельних розрахунків. Як правило це бібліотеки або програми мають інструменти для роботи зі спеціалізованими мовами програмування. Octave, Scilab, Mathcade, Lisp Universal Shell (LUSH), Hybrid Systems Description Language (HYSDEL).

До засоби моделювання можна віднести різні універсальні програмні пакети які дозволяють моделювати необхідні процеси і мають в собі спеціальні модулі для моделювання роботів. Вони використовуються для моделювання роботи системи управління, дослідження динаміки і кінематики конструкції роботів і т.д. Відмінною особливістю від ПО інших типів, зручні інтерфейси і інструменти по створенню і редагуванню моделей. До засобів моделюванні використовуваних в робототехніці можна віднести наступні інструменти: MatPLC, MjbWorld, Model Transformation Tools, DynaMechs, SimRobot, Open Dynamics Engine (ODE), Genetic Programming System, Robotics Toolbox tor MATLAB. Серед Російськомовних систем моделювання можна виділити пакети: «Універсальний механізм», ФРУНД. У цих системах реалізовані



необхідні інструменти для створення та дослідження моделей роботів, крім того на базі цих пакетів вже успішно вирішуються завдання з моделювання рухів мобільних роботів.

До пакетам штучного інтелекту можна віднести наступні програмні пакети: Machine Learning Library, GiNaC, Pyro Python, Machine Vision Toolbox. До цієї групи відносячи кошти за рішенням задач штучного інтелекту, вони дозволяють моделювати штучні нейронні мережі і досліджувати різні моделі. Як правило використовуються для вирішення задач високо рівневої системи управління: побудова карт, пошук маршруту, визначення цілей, завдання розпізнавання і т.д.

Проаналізувавши різне доступне програмне забезпечення використовується для моделювання, конструювання та управління робототехнічними системами. Можна зробити наступні висновки:

- Серед пакетів моделювання велику частку займають пакети орієнтовані на роботу з конкретними моделями або конструкціями роботів, до таких пакетам як правило відносяться програми та бібліотеки розроблені університетами або дослідницькими групами;

- Пакети орієнтовані на вирішення задач управління та інтегрування в бортову систему керування не надають достатніх можливостей з моделювання динаміки і кінематики роботів, їх головна функція забезпечення обміну даними між елементами бортової системи управління;

- Для синтезу програмного руху доцільно використовувати існуючі універсальні пакети моделювання, це дозволяє домогтися високого рівня достовірності побудованих моделей та якісного стійкого чисельного розв'язання рівнянь моделі. Однак ці пакети не володіють достатніми можливостями для використання їх в бортовий ЕОМ, тому доцільним є розробка таких інструментів моделювання, які б дозволяли використовувати функціонал систем моделювання в бортовий системі управління;

- Пропретарне програмне забезпечення дозволяє домогтися гарних результатів при вирішенні дослідницьких завдань моделювання, проте закритий вихідний код і використання пропретарних форматів моделей, сильно ускладнює використання таких пакетів в складі систем управління.

#### 1.4 Аналіз методів захоплення та транспортування вантажів

Методи захоплення та транспортування вантажів проаналізовано у працях Проця Я.І., Савківа В.Б. та Фендьо О.М. [21, 22]. Так для здійснення вантажно-розвантажувальної операції необхідно здійснити захоплення, орієнтування та кінцеве переміщення захопленого вантажу [23]. Безконтактні методи захоплення та транспортування виробів дають змогу уникнути контактних деформацій захоплюваної поверхні, і на відміну від механічних методів, убезпечують вантаж від пошкодження та руйнування. В результаті ефективність піднімально-транспортних операцій покращується.

Аналіз літературних джерел [24, 25, 26, 27, 28] дає змогу виділити наступні методи, на яких базується захоплення вантажу (рис. 1.1): електромагнітний, електростатичний, оптичний принцип, принцип на основі стоячої хвилі, принцип на основі повітряної подушки та принцип Бернуллі.

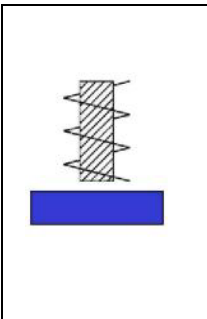
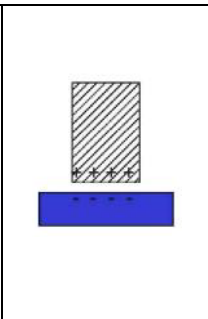
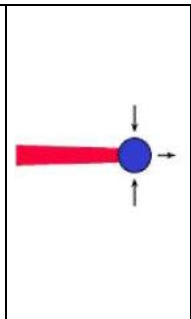
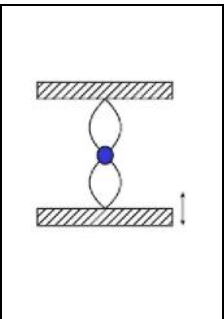
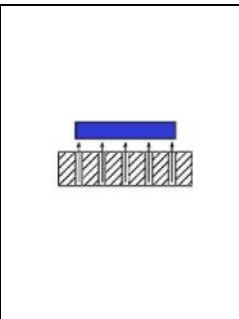
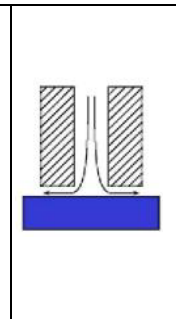
					
магнітний метод	електростатичний метод	оптичний метод	метод на основі стоячої хвилі	метод на основі повітряної подушки	метод Бернуллі

Рис. 1.1 Методи захоплення вантажів

Захоплення вантажів з використанням магнітних захоплювачів відбувається під дією магнітних сил, створених постійними магнітами або

електромагнітами [29]. Магнітні захоплювачі захоплюють вироби, навіть якщо вони неорієнтовані і лежать насипом (наприклад у бункерах, лотках, магазинах). В разі одночасного захоплення декількох виробів, необхідно обладнати захоплювач спеціальним пристроєм - скидачем [30, 31].

Водночас, електромагнітні захоплювачі мають ряд недоліків: захопленню підлягають лише вироби з намагнічуваних матеріалів; можливе захоплення сторонніх часток (стружки, металевого пилю), що може призвести до пошкодження поверхні захоплюваного виробу або самого захоплювача; після відпускання виробу захоплювачем, має місце залишковий магнетизм; підйомна сила електромагніту зменшується з підвищенням температури матеріалу; наявність у металах марганцю та нікелю також призводить до зниження підйомної сили електромагнітних захоплювачів.

Електростатичний метод досить успішно застосовується для захоплення дуже тонких пластин, наприклад, тонких скляних панелей. Також, може бути використаний при транспортуванні товстіших пластин, зокрема кремнієвих у напівпровідниковому виробництві [32].

Необхідно відмітити, що недоліком даного методу захоплення є мала стабільність, пов'язана з виникненням нових сил внаслідок електризації тертям, а також розмірні обмеження по відношенню до вантажів.

Оптичний метод полягає в тому, що матеріальні частки можуть бути вільно підвішені і прискорені силами тиску променя від видимого лазерного світла. Потрібно відзначити, що цей принцип призводить до зусилля захвату, що ледь сягає 0,1-1 нН, і доцільний для невеликих часток сферичної форми до 50 мкм.

Метод захоплення на основі стоячої хвилі прийнятний лише для тих виробів, у яких розмір менший однієї восьмої довжини хвилі [33].

Системи на базі повітряної подушки та методу Бернуллі передбачають використання тиску струменя повітря на вантаж, і на відміну від механічних систем, практично виключають можливість пошкодження легкодеформованих

виробів [28]. Пневматичні системи доцільно використовувати для маніпулювання групою заготовок з порівняно невеликою щільністю матеріалу та значною поверхнею обтікання [34, 35].

В роботах [36, 37, 35] широко висвітлено питання вакуумного методу захоплення вантажів, що полягає в утримуванні виробу (заготовки, деталі) шляхом розрідження повітря в замкненій порожнині робочого елемента – присмоктувача. Створення вакууму здійснюється вакуум-насосом або ежектором від мережі стиснутого повітря.

За допомогою вакуумних захоплювачів можливе захоплення як плоских, так і сферичних вантажів. Вакуумні захоплювачі використовують для маніпулювання вантажами з рівними, сухими і чистими поверхнями, зокрема для перевантаження полірованих дерев'яних панелей, листового скла, виробів з кольорових металів, мармуру, полімерних матеріалів, для яких використання інших видів вантажозахоплювальних пристроїв є неможливим.

У порівнянні з підйомними електромагнітами, вакуумні захоплювачі володіють наступними перевагами:

- здійснюють захоплення та транспортування виробів з різних матеріалів (металу, бетону, дерева, пластмаси, скла та ін);
- мають меншу вагу та габарити;
- є конструктивно простими, достатньо надійними та довговічними.

Водночас, вакуумні захоплювачі мають наступні обмеження:

- забезпечують обмежену силу притягання для даної площі;
- придатні тільки для плоских та рівних поверхонь усіх матеріалів;
- характеризуються низькою точністю базування через еластичність присмоктувачів;
- вимагають повної відсутності чужорідних тіл між присмоктувачем і поверхнею виробу;
- потребують певного часу для створення вакууму.

## 1.5 Струминні захоплювачі, як ефективна альтернатива безконтактного захоплення вантажів

Протягом останніх років широкого застосування набувають пристрої в яких використовується стиснуте повітря [38, 39, 40, 41]. Так, наприклад, окремі елементи струменевої техніки використовуються при автоматизації контрольних операцій [42, 43, 44, 35, 45], складальних процесів (орієнтація заготовок) [42, 26, 46, 47, 48], в пристроях транспортування виробів [49, 50, 25, 51, 41, 28], в живильних механізмах верстатів [52, 53] та ін. Завдяки різноманітному характеру силової дії потоку повітря на тверде тіло (реактивною силою, присмоктуючою дією, силами в'язкого тертя), а також в зв'язку з централізованим постачанням підприємств стиснутим повітрям, струменеві захоплювальні органи мають суттєві переваги перед іншими пристроями при розв'язанні задач автоматизації процесів завантаження та орієнтації вантажів.

Дослідженням силових характеристик і параметрів застосування струминних захоплювальних пристроїв займалися Xavier F. Brun [54-58], Проць Я. І., Савків В. Б. [21] та Фендьо О. М. [22]. Вони моделювали та прогнозували сили повітряного потоку, які виникають у струминних безконтактних захоплювачах, що використовувались в основному для захоплення нежорстких об'єктів. Моделі цих авторів можуть бути використані для розуміння впливу змінних, таких як відстань до вантажу та витрата повітря, на розподіл тиску по поверхні вантажу та силу підймання захоплювального пристрою.

Відомі наступні типи струминних захоплюючих пристроїв: опірні, вихрові, захоплювачі з одним циліндричним соплом, ежекційні захоплювачі з кільцевим соплом.

До опірних струминних захоплювачів відносять пристрої, які в якості робочого агента використовують потік спеціально підведеного від мережі стиснутого повітря. При цьому використовується аеродинамічний ефект притягування, який є особливо ефективним при завантаженні штучних

заготовок з базовою плоскою поверхнею та невеликою вагою [59, 60]. Теоретичні основи по розрахунку струминних пристроїв автоматики та течій повітря у вузьких каналах заклали вчені Залманзон Л.А., Герц С.В., Ідельчик І.Є. [61, 51, 62].

Струминні пристрої характеризуються довговічністю та надійністю в роботі, володіють високою швидкістю, а простота конструктивного виконання не потребує значних затрат на їх виготовлення. Опірні пристрої є універсальними, мають можливість комплектації виробів або накопичення об'єктів [63].

Вихрові струминні захоплювачі, які використовують ефект зміни характеристик потоку повітря при його завихренні, набувають все більшого застосування, про що свідчать роботи наступних авторів [64, 38, 65]. Принцип роботи даних захоплювачів базується на тому, що в приосьовій області захоплювача, всередині ізольованого вихрового потоку повітря, утворюється зона розрідження, в яку під дією радіальної сили тяги втягуються вантаж різної форми. Характерною ознакою таких захоплювачів є збільшене значення величини радіального зазору  $h$  між торцями корпусу та вантажу, що робить їх менш чутливими до шорсткості поверхонь захоплюваних вантажів.

На рис. 1.2 представлена схема вихрового струминного захоплювача [66]. Пристрій працює наступним чином: при подачі стиснутого повітря через отвір 9 в кожух 8 і далі через тангенціально розташовані отвори 7 в корпус 1, стиснуте повітря завихрюється, створюючи в приосьовій частині область пониженого тиску. Коли захоплювач наближається до поверхні вантажу на певну відстань, під дією розрідження в центральній області вихору, вантаж притягується до плоскої поверхні ребер 5. При цьому, утворюються щілинні проточні канали, по яких повітря витікає в атмосферу. Ребра 5 мають таку висоту, яка створює оптимальну величину зазору між поверхнею насадки 2 та вантажу.

Недоліком даного пристрою є мала вантажопідйомність внаслідок неповного використання присмоктуючої дії струменя стиснутого повітря.

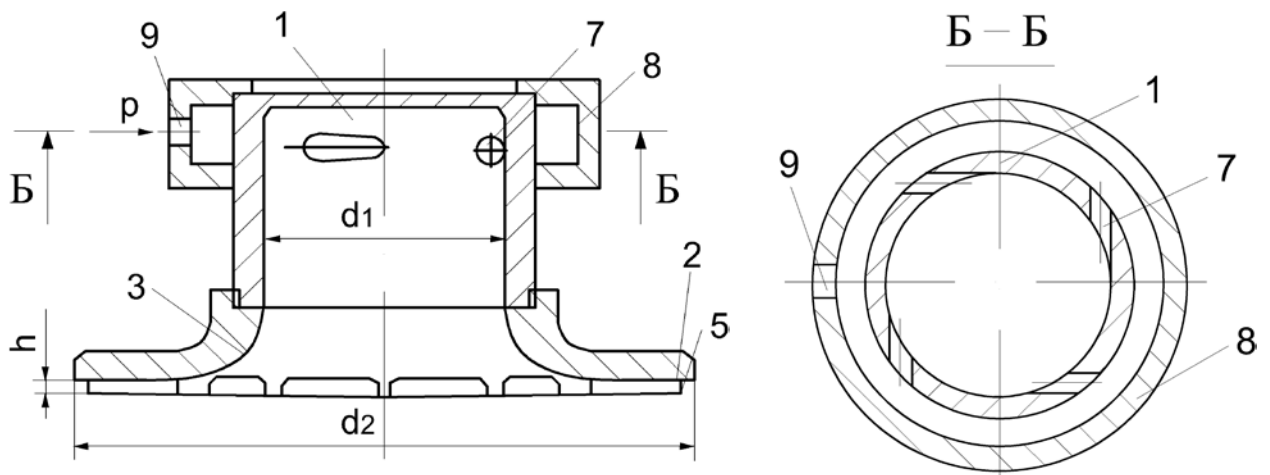


Рис. 1.2 Вихровий струминний захоплювач

Розробкою вихрових захоплювачів займаються і закордонні фірми. Зокрема, корпорація SMC Pneumatics випускає безконтактні вихрові захоплювальні пристрої серії XT661 [67].

Принцип роботи даних захоплювачів ілюструє рис. 1.3. Повітря подається в камеру захоплювача, а потім через тангенціальні сопла витікає в проміжок між захоплювачем та вантажем, де утворюються ефект вихору. В результаті, на поверхні вантажу створюється зона вакууму. Оскільки повітря безперервно протікає між поверхнями захоплювача та вантажу, то забезпечується безконтактне утримування вантажів.

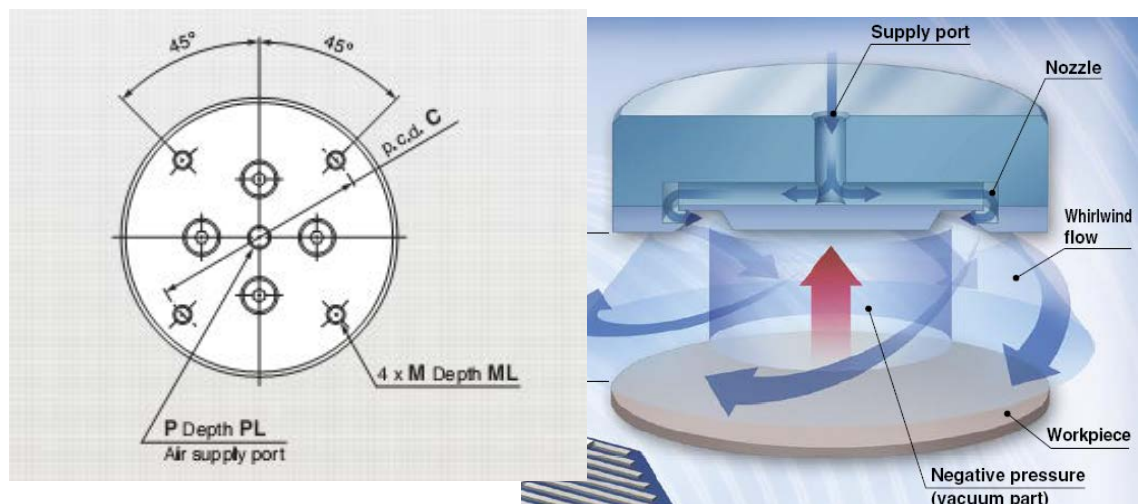


Рис. 1.3 Конструктивна схема та принцип роботи вихрових захоплювачів серії ХТ661

Виробник рекомендує застосовувати дані захоплювачі для маніпулювання пористими, тонкими, гарячими, вологими вантажами або виробами з покриттями. Серія даних захоплювачів включає 5 типорозмірів, із зовнішніми діаметрами 20, 40, 60, 80 і 100 мм, при цьому їх силові характеристики відповідно становлять 3, 11, 19, 27 і 35 Н, а об'ємне споживання повітря відповідно 85, 145, 170, 200 і 240 л/хв. Зовнішній вигляд та силові характеристики захоплювача моделі ХТ661-8А із зовнішнім діаметром 80 мм представлені на рис. 1.4.

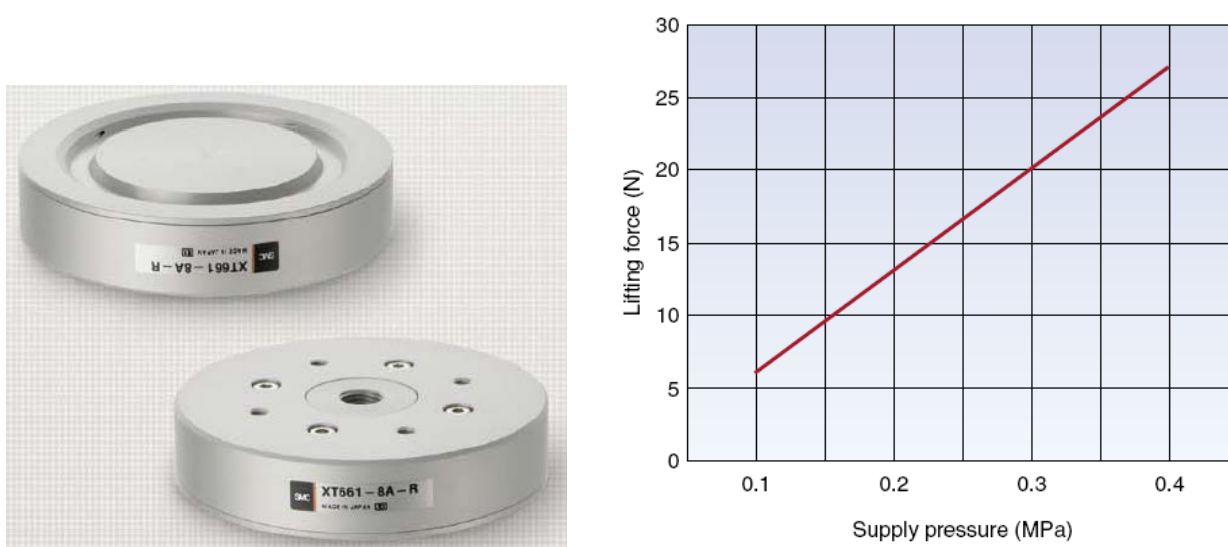


Рис. 1.4 Фотографія та силові характеристики захоплювача моделі ХТ661-8А

Ще один варіант вихрових захоплювачів представлений на рис. 1.5. Принцип роботи полягає у витіканні струменя повітря у вихрову чашу через тангенціальні сопла для створення завихреного потоку повітря [68]. Шляхом експериментів та аналізу основних характеристик потоку повітря, було підтверджено, що розрідження викликано відцентровою силою завихреного потоку повітря. Вихор поширюється у вигляді параболічної кривої, створюючи підйомну силу, під дією якої вироби притягуються до захоплювача.



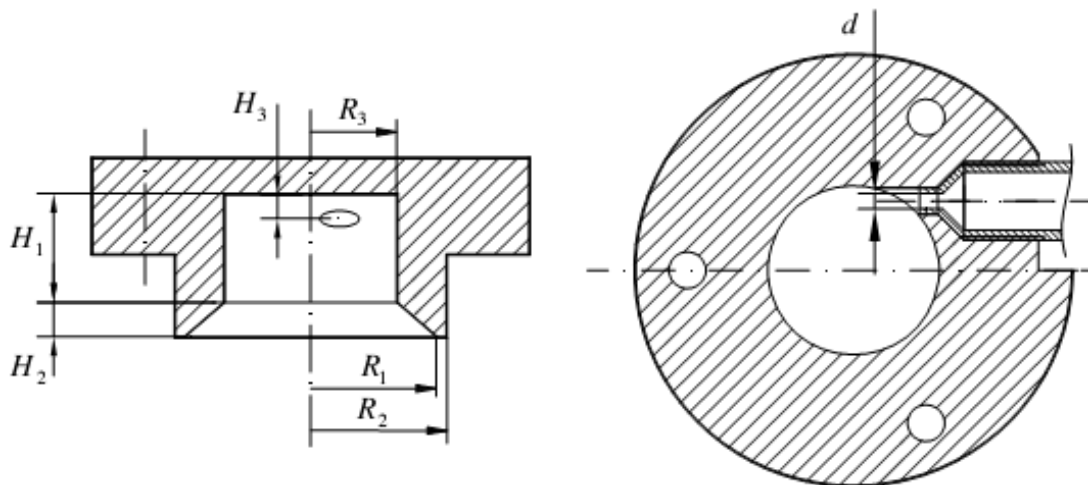
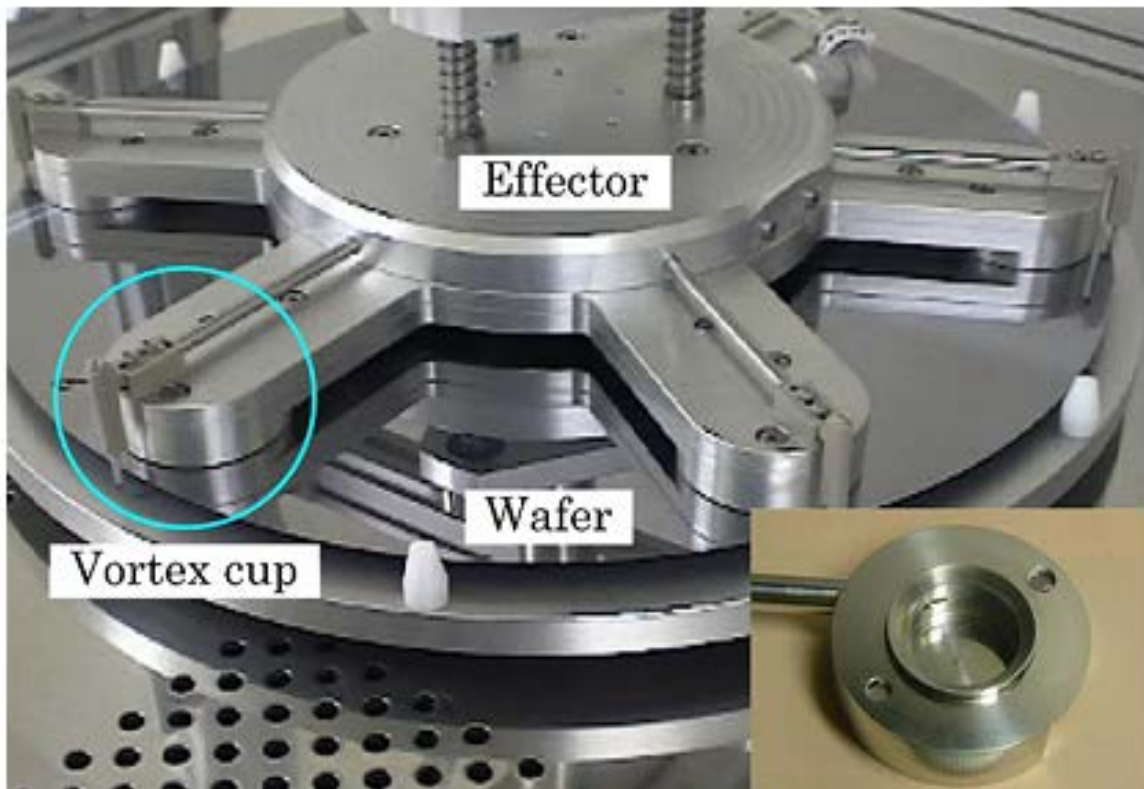


Рис. 1.5 Фотографія та конструктивна схема вихрового захоплювача

Необхідно зауважити, що вихрові ЗП для забезпечення необхідної вантажопідйомності потребують значних витрат стисненого повітря, тому їх використання може бути виправдане лише при маніпулюванні плоскими вантажами зі значними параметрами шорсткості захоплюваної поверхні ( $Ra > 10$  мкм) та невеликими відхиленнями від площинності [38].

Доцільність використання струминних захоплювачів обумовлена їх високою надійністю, довговічністю роботи та низькою собівартістю виготовлення [69, 70]. Вони забезпечують можливість безконтактного

захоплення та утримування вантажів з різного матеріалу, з різними механічними характеристиками, структурою поверхневого шару та температурою, що робить їх надзвичайно ефективними та практичними.

Принцип роботи струминних захоплювачів полягає у виникненні аеродинамічного ефекту притягання при взаємодії витікаючого з сопла струменя повітря з плоскою поверхнею заготовки [21]. При наявності звукової швидкості на вході потоку в радіальний зазор, аеродинамічний ефект передбачає утворення зон розрідження між торцями захоплювача та заготовки. Збільшення площі поперечного перерізу надзвукового потоку приводить до зростання його швидкості з одночасним зменшенням статичного тиску в зазорі. Далі надзвуковий потік різким стрибком переходить у дозвуковий. У результаті подальшого розширення швидкість дозвукового потоку спадає, а статичний тиск у зазорі плавно зростає до величини атмосферного.

Для переміщення скляних листів ефективним є використання захоплювального пристрою, запропонованого авторами у роботі [71]. Варіація насадок дозволяє переносити плоскі вантажі різноманітної форми.

Оскільки використання повітряного струменя для левітації є досить обмеженим, тому є мало публікацій з дослідження цієї проблеми. Незважаючи на брак аналітичних досліджень, є ряд пристроїв, які використовують струминну левітацію.

Реальним прикладом є використання цього ефекту в пристрої для безконтактного транспортування NCT (non-contact transport unit) [72]. Принцип дії цього пристрою показаний на рис. 1.6.

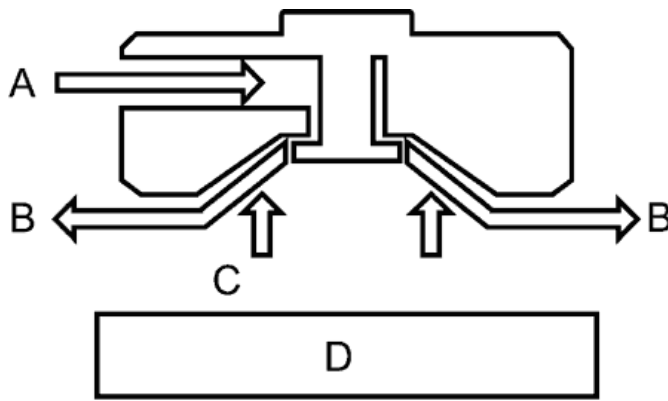


Рис. 1.6 Принцип дії струминного захоплювального пристрою: *A* – стиснуте повітря, *B* – повітряний потік, *C* – підйомна сила, *D* – вантаж

NCT являє собою плоский алюмінієвий диск діаметром від 20 до 60 мм і завтовшки 17 мм. Диск має різьбовий отвір, до якого під'єднується шланг із стиснутим повітрям. Всередині цього диску використана «форсунка Бернуллі». Повітря, що проходить через кільцевий канал, викликає зниження тиску в нижній конусній частині диску до величини нижчої за атмосферний. Як наслідок, на вантаж діє підйомна сила. Потік повітря, що виходить з форсунки назовні, відштовхує вантаж від поверхні захоплювального пристрою, протидіючи торканню. Таким чином реалізується стан динамічної рівноваги – левітації. Технічні характеристики ЗП наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

**Технічні характеристики захоплювальних пристроїв NCT  
корпорації Bosh Rexroth**

Позначення	Діаметр, [мм]	Вантажопідйомність при тиску 5 bar, [Н]	Витрати повітря, [л/хв]	Вага, [кг]
	20	0,9	100	0,02
	30	1,3	100	0,03
	40	2	110	0,05
	60	6	210	0,12

Згідно даних таблиці 1.1 [72], підйомна сила однієї з модифікацій пристрою NCT діаметром 60 мм при тиску повітря 0,6 МПа складає 6 Н. При цьому, витрата стисненого повітря приведена до нормальних умов складає

210 л/хв. NCT – це простий і надійний пристрій, який може бути використаний в різних галузях промисловості (фармацевтичній, харчовій, електронній) з метою автоматизації операцій подачі і транспортування вантажів.

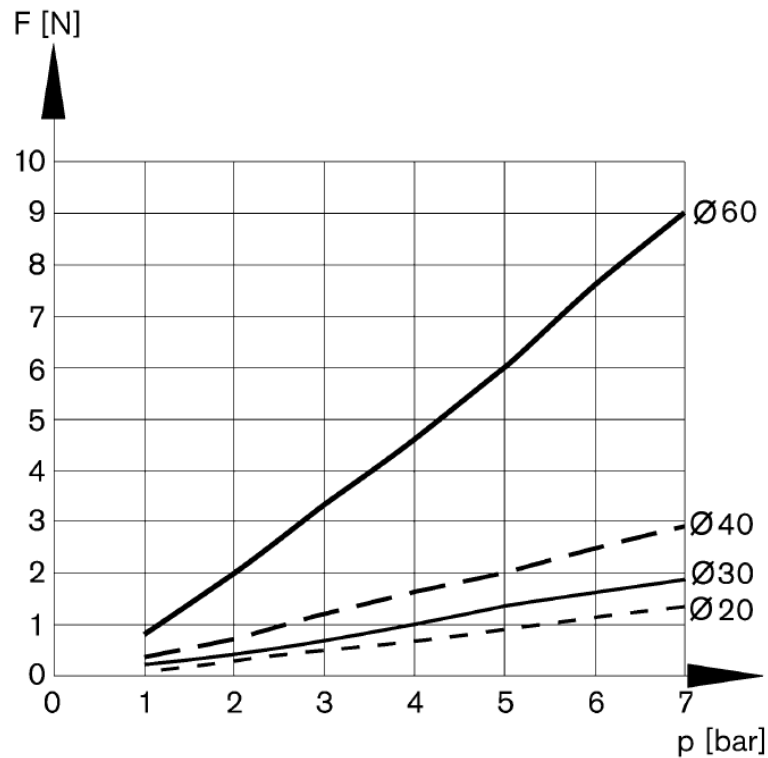


Рис. 1.7 Графіки зміни підйомної сили в залежності від тиску для захоплювачів різного діаметру

Подібні захоплювальні пристрої виготовляються також компанією Schmalz. На рис. 1.8 представлено один із захоплювальних пристроїв моделі SBS 60 M5-IG, що має зовнішній діаметр 60 мм [73].

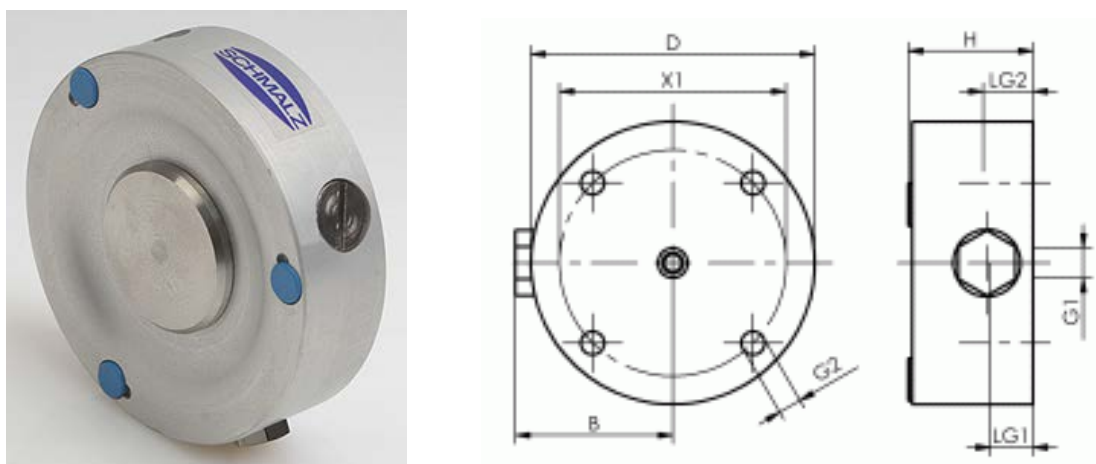


Рис. 1.8 Захоплювальний пристрій моделі SBS 60 M5-IG

Представляють інтерес експериментальні результати, які представив Xavier F. Brun для розподілу напружень в об'єкті маніпулювання, залежно від тиску повітря та сили підйому [54-58]. На рис. 1.9 представлено результат дослідження напружень у кремнієвих пластинах та їх деформацій.

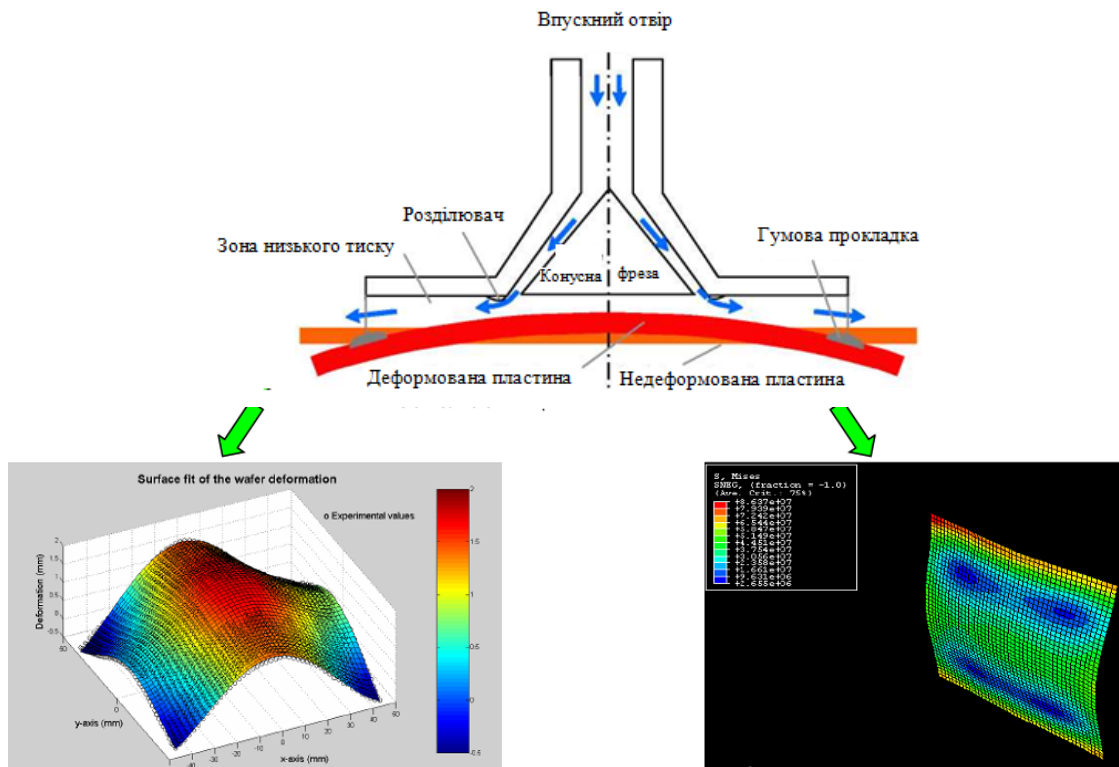


Рис. 1.9 Дослідження напруження (деформації) у кремнієвій пластині викликане дією струминного захоплювача

У праці Фендьо О. М. [21] проаналізовано вплив конструктивного виконання кільцевого сопла на силові характеристики захоплювачів ежекційного типу. Також було встановлено, що виконання приведених вимог до конструкції соплової частини струминного захоплювача, при сталих інших конструктивних параметрах та тиску живлення  $p_0$ , дозволяє підвищити силові характеристики лише на 2-3%.

Значно більший вплив на силові характеристики даних захоплювачів має форма активної (взаємодіючої з об'єктом) поверхні торця захоплювача, яка й визначає геометрію повітряного потоку між взаємодіючими поверхнями захоплювального пристрою та об'єкта маніпулювання. Активна поверхня повинна бути гладкою, тобто не мати ніяких виступів та заглибин, які б

перешкождали потоку повітря, і забезпечувати плавне розширення потоку з метою його безвідривного режиму руху. Активна поверхня захоплювача може бути плоскою, конічною, сферичною або складатися з комбінації цих елементарних поверхонь. Раціональні конструкції струминних ежекційних захоплювачів наведені на рис. 1.10. Вони забезпечують максимальну присмоктуючу силу, виключають можливість відриву об'єкта від торця захоплювача та забезпечують стабільне положення об'єкта при його безконтактному утримуванні.

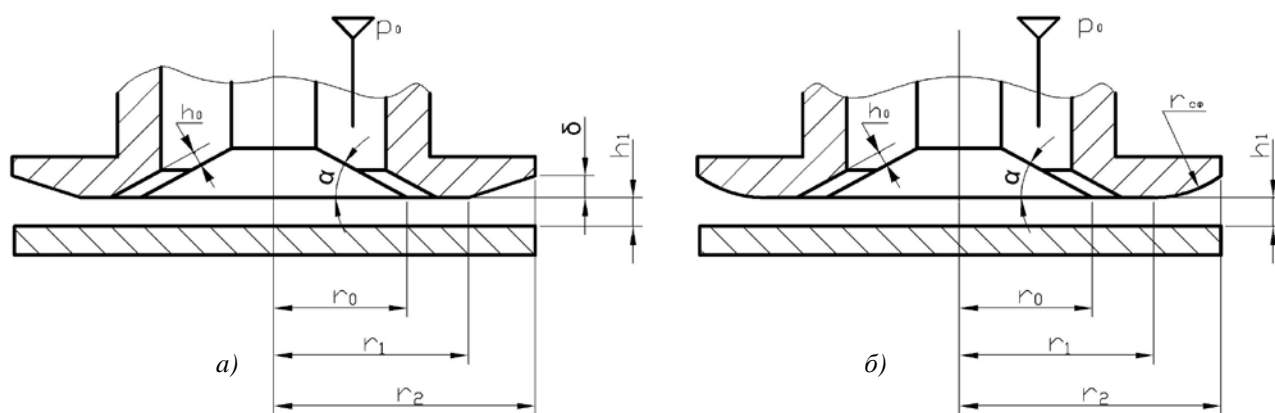


Рис. 1.10 Схеми ежекційних струминних захоплювачів з різними формами активної поверхні: *a)* – плоско-конічна; *б)* – плоско-сферична

Характер течії повітряного потоку в радіальному проміжку між активною поверхнею струминного захоплювача та об'єкта маніпулювання досить складний. При надлишковому тиску живлення захоплювача стиснутим повітрям більшим від 0,1 МПа, потік входить в кільцеве сопло із швидкістю рівною місцевій швидкості звуку. Внаслідок збільшення площі поперечного перетину сопла, в його вихідному перетині потік досягає надзвукової швидкості.

Подальше розширення потоку в радіальному проміжку забезпечує зростання надзвукової швидкості, а за рахунок явища ежекції відбувається падіння статичного тиску в зоні навпроти конічної вставки до величини  $p_1$  меншої за атмосферний. Зростання швидкості відбувається до певного радіуса, на якому відбувається гальмування потоку, що супроводжується різким

зростанням тиску та зменшенням швидкості потоку до дозвукової. В результаті подальшого розширення, швидкість дозвукового потоку  $V_r$  спадає, а статичний тиск  $p_r$  у радіальному проміжку плавно зростає до величини атмосферного.

Для спрощення теоретичних досліджень силових характеристик даних захоплювачів зроблено наступні припущення: площа поперечного перерізу камери захоплювача набагато більша площі прохідного січення кільцевого сопла; значення всіх параметрів газового потоку на радіусі  $r$  – сталі в межах виділеного елементарного кільця радіальному проміжку; потік повітря входить в кільцеве сопло з швидкістю рівною швидкості звуку для даних умов; максимальне значення швидкості  $V_0$  надзвукового потоку та його перехід в дозвуковий відбувається у вихідному перерізі кільцевого сопла; термодинамічний процес протікання надзвукового потоку – адіабатичний, дозвукового – ізохоричний; характер розподілу швидкостей потоку на виході з кільцевого сопла та на будь якому радіусі радіального проміжку приймається рівномірним.

Результуюча сила  $F$  з якою захоплювач діє на об'єкт:

$$F = F_1 + F_2; \quad (1.1)$$

$$F_1 = \pi r_1^2 (p_{am} - p_1); \quad (1.2)$$

$$F_2 = 2\pi \int_{r_0}^{r_2} (p_{am} - p_r) r dr, \quad (1.3)$$

де  $F_1$ ,  $F_2$  – сили, що викликані розрідженням в проміжку між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта відповідно у зоні навпроти конічної вставки та зоні навпроти торця корпусу;  $p_{am}=0,1033$  МПа – атмосферний тиск при нормальних умовах;  $p_1$ ,  $p_r$  – абсолютні значення тиску відповідно у зоні навпроти конічної вставки та на радіусі  $r$ ;  $r_0$  - радіус конічної вставки;  $r_2$  - радіус корпусу захоплювача.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Технічні вимоги до струменевих захоплювачів

Струменеві захоплювачі відрізняються по складності та призначенню, проте існують певні вимоги, які відносяться практично до всіх їх типів.

СЗП повинен бути по можливості легким, тому що його маса суттєво впливає на функціонування робота. Значення граничного навантаження, тобто маси яка може бути закріплена на приєднувальному фланці маніпулятора, включає в себе масу захоплювача. Величина навантаження впливає на швидкість виконання робочих рухів ПР, що є важливим з точки зору тривалості робочого циклу, тобто чим менше навантаження тим з більшою швидкістю може переміщуватись робот.[12] Для дотримання цієї вимоги СЗП слід виготовляти з легких матеріалів (алюміній, пластмаси та ін.) і скрізь де це можливо, робити вибірку лишнього матеріалу.

СЗП повинен мати якомога менші габарити. Зменшення габаритів захоплювача дозволяє знизити його масу та економить робочий простір роботизованої комірки. Що стосується ПР, то розрахунок його граничного навантаження пов'язаний з розрахунком моменту інерції останньої ланки маніпулятора, тобто загального навантаження, яке знаходиться на певній відстані від поверхні приєднувального фланця. Тому, чим менші габарити СЗП і чим ближче до приєднувального пристрою знаходиться його центр тяжіння, тим кращі робочі характеристики ПР.

Бажано, щоб СЗП забезпечував можливість роботи з ОМ різної форми, що зменшить потребу у його заміні та знизить затрати на придбання оснащення. Проте, слід зазначити, що зменшення габаритів СЗП в деякій мірі звужує спектр утримуваних ним ОМ, у відповідності з цим розроблені методи, які задовольняють обидві вимоги. В конструкції СЗП можна передбачити можливість їх швидкого ручного переналагодження на ОМ різних розмірів. Для



переходу на ОМ з іншим розміром і формою, можна використати змінні кільця, накладки, насадки та ін. Можлива і автоматична зміна СЗП в залежності від класу оброблюваних ОМ, причому кожен із змінних захоплювачів забезпечує роботу з певною частиною ОМ із всього діапазону. Таке рішення зменшує масу та габарити СЗП та їх кількість [74-93].

Наступною вимогою до конструкції СЗП являється максимальна приєднувальна жорсткість, яка в цілому визначає робочі характеристики ПР. ПР забезпечують певну точність позиціонування і захоплення ОМ, а при недостатній жорсткості СЗП виникає похибка позиціонування. При малій точності виготовлення деталей це може призвести до різкого зниження надійності виконуваних операцій. Нежорстке закріплення СЗП на приєднувальному фланці може викликати надмірну вібрацію. Оскільки ПР можуть переміщувати захоплювач з великою швидкістю, така вібрація може призвести до його пошкодження або руйнування. Використання жорстких конструкцій дозволяє уникнути вібрацій.

Конструкція СЗП повинна забезпечувати максимальні силові характеристики, що важливо із міркувань безпеки. Як правило ОМ повертають навколо осі ПР, і при цьому виникають відцентрові сили. При переміщенні від однієї точки до іншої на ОМ діють сили викликані прискоренням і гальмуванням маніпулятора. Тому, при розрахунку конструктивних параметрів СЗП ці фактори слід враховувати, щоб забезпечити надійне утримання ОМ та уникнути можливих травм робочого персоналу і пошкодження периферійного обладнання. З іншого боку силові характеристики СЗП не повинні бути настільки великими, щоб викликати деформацію або руйнування більш крихких ОМ. Якщо під час транспортування ОМ вісь СЗП горизонтальна, то він утримується тільки за рахунок дії сил тертя і тому може висковзнути із захоплювача, особливо в моменти початку руху. Повернувши СЗП так, щоб його вісь була вертикальна, можна зменшити необхідну силу притягування і збільшити швидкість переміщення.

При проектуванні оснастки слід враховувати зручність її технічного обслуговування або заміни. Необхідно передбачити можливість швидкої заміни неміцних та зношуваних елементів конструкції, а також змінних деталей (фрикційних накладок, кілець, втулок). В конструкції СЗП по можливості, слід використовувати один і той самий тип кріпильних деталей, що зменшує число інструментів, необхідних для їх технічного обслуговування.

Матеріал та фізичні властивості ОМ також впливають на конструкцію СЗП. На основі їх аналізу визначається тип СЗП (для безконтактного захоплення чи із частковим контактом, СЗП із вмонтованим електромагнітом та ін.); максимально допустимий аеродинамічний ефект; розташування і кількість точок контакту СЗП із ОМ, які забезпечують фіксацію об'єкта під час переносу; необхідність давачів та пристроїв, регулюючих силу притягування ОМ.

На основі аналізу маси і розташування центру тяжіння ОМ визначається кількість і розташування точок контакту, які забезпечують надійне його перенесення. Статичне і динамічне навантаження та моменти інерції ОМ і СЗП відносно приєднувального фланця ПР узгоджуються із його робочими характеристиками.

Аналіз чистоти поверхні і форми ОМ необхідні для уточнення типу СЗП (наприклад, ежекційні СЗП менш чутливі до шорсткості поверхні ОМ, особливо при розмірах щілини  $h_{щ} > 0,1$  мм). Якщо ОМ має складну форму, то слід використовувати комбінацію двох або більше незалежних СЗП. Вони можуть бути змонтовані окремо і захоплювати різні ділянки об'єкта.

Поряд з аналізом ОМ для визначення оптимальних параметрів оснащення необхідно провести і аналіз процесу його обробки. Слід передбачити багатофункційність СЗП. Таке рішення дозволяє одночасно виконувати декілька операцій обробки деталі. Наприклад, ПР із СЗП, розвантажуючий машину для лиття у постійні форми, може не тільки брати об'єкт, але й обприскувати поверхні прес-форм, за рахунок підсмоктування повітрям змащувальної речовини. Іншими прикладами можуть бути: миття об'єктів, їх

сушіння (при подачі гарячого повітря) та розігрів (наприклад заготовок із термопласту при подачі їх в прес для штамповки) в процесі маніпулювання. При необхідності СЗП дозволяють проводити пневматичний контроль та орієнтацію об'єктів в процесі маніпулювання.

Необхідно проаналізувати спектр ОМ, що використовуються у виробничому процесі і розробити вимоги до СЗП. На підставі цих вимог розв'язується питання про необхідну кількість СЗП. Для роботи з об'єктами різних розмірів заміна СЗП відбувається автоматично, або вручну. Для прискорення заміни слід передбачити зручні засоби роз'єднання і суміщення (встановлювальні штифти і отвори).

Необхідність контролю за перебігом процесу обробки деталі також впливає на конструкцію СЗП. Вона визначає вимоги до управління СЗП, до давачів і вимірювальних пристосувань які входять у його конструкцію. Умови обробки деталі можуть вимагати включення в СЗП декількох давачів і забезпечення незалежної роботи декількох захоплювачів.

На конструкцію СЗП впливають і зовнішні умови роботи. Необхідно оцінити можливий вплив температури, вологості, наявних у повітря забруднень, а також дії кислот і лугів, вібрації і ударів. За результатами проведеної оцінки робиться вибір матеріалу, оснащення, давачів, механічних з'єднань і, якщо це необхідно, захисних пристосувань.

## **2.2 Технічні характеристики струменевих захоплювачів**

### **2.2.1 Точність базування об'єктів маніпулювання**

Як правило, будь-яка роботизована операція починається із захоплення ОМ роботом, причому спосіб фіксації об'єкта у захоплювачі у великій мірі визначає точність його базування та центрування і тим самим визначає подальші дії роботизованої системи. При визначені положення захоплення ОМ відомої форми необхідно забезпечити наступні вимоги: слід виключити

можливість пошкодження СЗП в момент захоплення об'єкта та в момент його розвантаження; ПР повинен мати можливість подати СЗП у зону захоплення і з захопленим ОМ без зіткнень перейти у зону розвантаження; СЗП повинен надійно утримувати захоплений ОМ, протидіяти силам, що виникають при переміщеннях і складальних операціях, щоб забезпечити початкову точність його базування.

Більшість відомих методів вибору положення захоплення складається з трьох етапів. На першому етапі формується множина можливих положень захоплювача. На другому етапі із цієї множини відкидаються положення, які конкретний робот не може виконати або виконання яких веде до зіткнення. На третьому етапі із залишених положень вибирається одне, в певному розумінні оптимальне. Початкове формування множини можливих початкових положень захоплення може здійснюватись із міркувань геометричної форми об'єкту, способу захоплення, похибки позиціонування ПР або усунення невизначеності. Для СЗП паралельної дії вибір положення захоплення визначається умовою паралельності захоплюваних поверхонь відповідним поверхням об'єктів. Додатковим критерієм, що враховується при виборі місця захоплення на ОМ, являється мінімальність моментів інерції відносно осі СЗП. В якості критерію оптимальності можна використовувати, наприклад, степінь надійності базування, який зводиться до визначення зміщення центру тяжіння ОМ відносно осі СЗП.

При обслуговуванні технологічних процесів обробки і особливо складання, часто необхідна додаткова точність встановлення об'єктів. У випадку використання у якості робочих органів струменевих захоплюючих пристроїв до них ставиться цілий ряд спеціальних вимог, зокрема вимоги до точності базування заготовок на власному торці і точності центрування об'єктів відносно осі захоплювача потоком стиснутого повітря.

Аналіз процесу встановлення об'єктів у затискні пристрої технологічного обладнання або у отвори інших об'єктів при складальних операціях, показує,

що точність та надійність виконання цих операцій визначається такими основними похибками: сумарною похибкою позиціювання всіх виконавчих механізмів маніпулятора, приведеною до фактичного положення ОМ, що відрізняється від заданої керуючою програмою ПР; похибкою базування (центрування) об'єкта відносно торця (осі) СЗП; похибкою установки (розміщення) затискного пристрою (поверхні деталі у яку встановлюється ОМ). Всі ці три складові частини представляють собою систему “робот – захоплювач – об'єкт”. В ідеальному випадку, коли осі всіх трьох елементів співпадають, відповідні похибки  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0$ . У реальному випадку точність повторного позиціювання маніпулятора  $\delta_1$  є величиною відміною від нуля і являє собою радіус сфери, описаної навколо сукупності точок кінцевого положення, в які маніпулятор попадає із одного і того ж початкового положення при однакових навантаженнях і початкових умовах, при керуванні однією і тією ж програмою. Типові значення точності  $\delta_1$  повторного позиціювання маніпулятора можуть лежати в діапазоні від 2мм (для важких ПР) до  $\pm 0,01$ мм (для ПР що обслуговують верстати з ЧПК) і навіть до 0,005мм (для легких прецизійних ПР).

При розташуванні осей СЗП, ОМ та затискного пристрою у одній площині, похибки  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  і  $\delta_3$  додаються і складають максимальну похибку. Очевидно, що такий розподіл похибок не завжди обов'язковий, і носить ймовірнісний характер.

При нормальному законі розподілу похибок густина розподілу

$$P_p(x) = \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_p^2}}, \quad (2.1)$$

де  $P_p(x)$  – ймовірність для випадкової величини попасти в точку  $x$ ;

$\sigma_p$  – середнє квадратичне вiдхилення розподiлу похибок позицiювання ПР, тобто, та точка в якiй повинен знаходитись ОМ.

Густина розподiлу похибок базування ОМ вiдносно осi СЗП

$$P_0(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (2.2)$$

де  $\sigma_0$  – середнє квадратичне вiдхилення похибок базування об'єкту у захоплювачi.

Сумарна похибка вiд дiї трьох факторiв

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_0^2 + \sigma_3^2}, \quad (2.3)$$

де  $\sigma_3$  – середнє квадратичне вiдхилення похибок установки затискного пристрою (поверхнi деталi у яку встановлюється ОМ).

Очевидно, що

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_c^2}}. \quad (2.4)$$

Отже, якщо

$$\sum \delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \leq 3\sigma_c, \quad (2.5)$$

то ПР виконує своє завдання i ОМ буде встановлений у затискний пристрiй.

Якщо, ж

$$\sum \delta > 3\sigma_c, \quad (2.6)$$

то операція передбачена програмою може бути не виконана. В такому випадку слід добиватись вищої точності базування ОМ в СЗП, або застосовувати ПР з вищою точністю повторного позиціювання.

Величина зміщення осі об'єкта відносно осі СЗП була перевірена двома індикаторами годинникового типу МКГ ГОСТ 9696–75 з ціною поділки 1мкм розташованими під кутом 90° один відносно одного. Зміщення об'єкта визначалось у вигляді:

$$\delta_2 = \sqrt{\delta_{2x}^2 + \delta_{2y}^2}, \quad (2.7)$$

де  $\delta_{2x}$ ,  $\delta_{2y}$  – похибки центрування по осях  $x$  і  $y$ .

Результати дослідження дозволили встановити, що середнє значення похибки центрування об'єктів струменевими захоплювачами становить близько  $\delta_2=22$  мкм, при середньому квадратичному відхиленні  $\sigma_0=6$  мкм.

Похибка базування об'єктів на торці СЗП залежить від жорсткості розташованих на ньому базуючих елементів, їх сумарної площі та величини аеродинамічного ефекту. Її можна підрахувати за формулою:

$$\delta_\delta = \frac{Fh}{ES_{\text{сум}}}, \quad (2.8)$$

де  $F$  – величина присмоктуючої сили;

$h$  – висота базуючих елементів;

$E$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу базуючих елементів (фрикційних накладок);

$S_{\text{сум}}$  – сумарна площа поперечного перерізу базуючих елементів.

Вимоги до конструктивного виконання базуючих елементів на торці СЗП повинні попереджувати утворення вихрових зон при обтіканні їх потоком стисненого повітря. Базуючі елементи виконуються у вигляді кутових секторів з величиною кута  $\varphi \leq 10^\circ$ . Кількість базуючих елементів обмежена, так як їх зростання приводить до зниження силових характеристик захоплювача. Якщо вихідна площа  $S_v$  радіального зазору зменшується при розташуванні базуючих елементів не більш як на 10% то силові характеристики захоплювача практично не змінюються. Враховуючи, що вихідна площа радіального зазору при відсутності фрикційних накладок рівна  $S_v = 2\pi r_k h$ , а при їх присутності

$$S_{vн} = (2\pi - \varphi n) r_k h, \quad (2.9)$$

отримаємо залежність для розрахунку кількості  $n$  накладок з кутовою величиною  $\varphi$  і висотою  $h$

$$n \leq \frac{0,2\pi}{\varphi \text{ [рад.]}} = \frac{36}{\varphi \text{ [град.]}}. \quad (2.10)$$

### 2.2.2 Надійність роботи струменевих захоплювачів

У переважній більшості випадків ПР являються частиною виробничого процесу і призначені для обслуговування дорогого основного обладнання, тому повинні бути надійними, зручними для технічного обслуговування і безпечними у роботі. Ті ж вимоги відносяться і до струменевих захоплювачів, як однієї з основних частин ПР.

Надійність СЗП забезпечується на етапі проектування, тому необхідно детально вивчити умови у яких вони будуть працювати. СЗП повинні надійно працювати на будь-яких операціях. При цьому вони часто підлягають шкідливому впливу, що визначається екстремальними температурами, вологістю, атмосферними домішками, тепловим випромінюванням, ударами і



вібраціями, агресивними аерозолями, абразивними частинками у поєднанні з вибухонебезпечним середовищем, різними хімічними речовинами і іншими факторами. Так, наприклад, в ковальських цехах де часті удари передаються і на ПР, СЗП повинен бути не тільки надійно закріпленим, але й встановленим на амортизаторах. Відмінною особливістю СЗП є інтенсивний обдуб ОМ, що дає їм можливість ефективно працювати із нагрітими заготовками (термічні цехи, ливарні цехи та ін.), та при розвантаженні металообробних верстатів де небезпеку складають залишки металевої стружки та змащувально-охолоджувальної емульсії.

Таким чином, при розрахунку надійності необхідно проаналізувати не тільки взаємодію СЗП з ПР, але і його роботу при різних зовнішніх умовах.

Надійність СЗП визначається як імовірність задовільної його роботи протягом певного періоду часу в певних умовах. Залежність між надійністю обладнання ( $R$ ) і середнім часом напрацювання на відмовлення  $T_{нв}$  носить експоненційний характер, тобто значення надійності залишиться без змін у тому випадку, якщо відмовлення СЗП наступають через сталі проміжки часу протягом всього періоду експлуатації:

$$R(\text{за } t \text{ годин}) = \exp\left(\frac{-t}{T_{нв}}\right). \quad (2.11)$$

Згідно з останнім співвідношенням, надійність може бути виражена через допустимий середній час напрацювання на відмовлення.

Іншою характеристикою, що тісно пов'язана з надійністю є коефіцієнт готовності, що характеризує ймовірність того, що в будь-який момент часу СЗП буде готовий виконувати свої функції. Коефіцієнт готовності залежить від середнього часу напрацювання на відмовлення і середнього часу тривалості відновлення працездатності –  $T_{вп}$ . Їх взаємозв'язок визначається наступним рівнянням:

$$A = \frac{T_{нв}}{T_{нв} + T_{вп}} = \frac{I}{I + \frac{T_{вп}}{T_{нв}}}, \quad (2.12)$$

де А – коефіцієнт готовності.

Таким чином, середній час відновлення працездатності являється характеристикою зручності обслуговування і точності діагностики та усунення несправності.

Стосовно даної роботи експериментальні дослідження на надійність ґрунтувались у визначенні величини ймовірності безвідмовної роботи СЗП. Для цього використовувався ПР із струменевим захоплювачем за допомогою якого переносились із попередньо підготовленого набору об'єкти вагою 5 Н і діаметром рівним 0,1 м. Зроблено біля 1000 циклів переносу, отримано два відмовлення. Для аналізу ймовірності безвідмовної роботи СЗП використовувалась наступна формула

$$P = \frac{Z - П}{Z} \cdot 100\%, \quad (2.13)$$

де z – кількість циклів випробовувань;

П – кількість відмовлень.

Для даного випадку P=99,8%.

Середній час напрацювання на відмовлення можна визначити за формулою

$$T_{нв} = \frac{Z}{П} \cdot T_y, \quad (2.14)$$

де T<sub>y</sub> – тривалість циклу машинобудування.

В даному випадку  $T_y=70\text{с}$ ;  $T_{\text{нв}}\approx 10\text{год}$ .

### 2.2.3 Стабільність присмоктуючої дії

Показником нестабільності присмоктуючої дії СЗП можна вважати відношення максимальної різниці тривалості часу присмоктування при періодичній подачі в захоплювач стисненого повітря до середнього значення цього часу

$$K_n = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\text{cp}}} \cdot 100\% \quad , \quad (2.15)$$

де  $K_n$  [%] – коефіцієнт нестабільності роботи СЗП.

Стабільність роботи СЗП залежить від кількості повітря, що подається від магістралі, стану повітропровідних шляхів, забрудненості повітря, часу спрацювання командної апаратури, температури та інших факторів, які розрахунковим шляхом врахувати неможливо. Тому у кожному конкретному випадку стабільність визначається експериментально.

Дослідження проводились при багатократному захопленні плоского об'єкта вагою 1 Н із записом тривалості часу присмоктування. Із множини отриманих значень вибирались  $t_{\max}$  і  $t_{\min}$ , а також знаходилось середнє значення часу  $t_{\text{cp}}$ . Після чого по формулі (2.15) знаходили  $K_n$ . Результати експериментальних досліджень залежності коефіцієнта нестабільності присмоктуючої дії  $K_n$  СЗП типу “сопло з плоским торцем” від надлишкового тиску живлення  $P_{\text{мн}}$  показані на рис. 2.1. Графік 1 на даному рисунку відповідає параметрам  $r_c=1$  мм,  $r_k=20$  мм, графік 2 –  $r_c=2$  мм,  $r_k=25$  мм, графік 3 –  $r_c=3$  мм,  $r_k=30$  мм, графік 4 –  $r_c=4$  мм,  $r_k=35$  мм. Результати досліджень коефіцієнта нестабільності  $K_n$  для СЗП ежекційного типу з параметрами

$h_{щ}=0,1$  мм,  $g_{в}=30$  мм,  $l_{щ}=0,6$  мм представлені на рис. 2.2 (графік 1 –  $g_{к}=50$  мм, графік 2 –  $g_{к}=45$  мм, графік 3 –  $g_{к}=40$  мм).

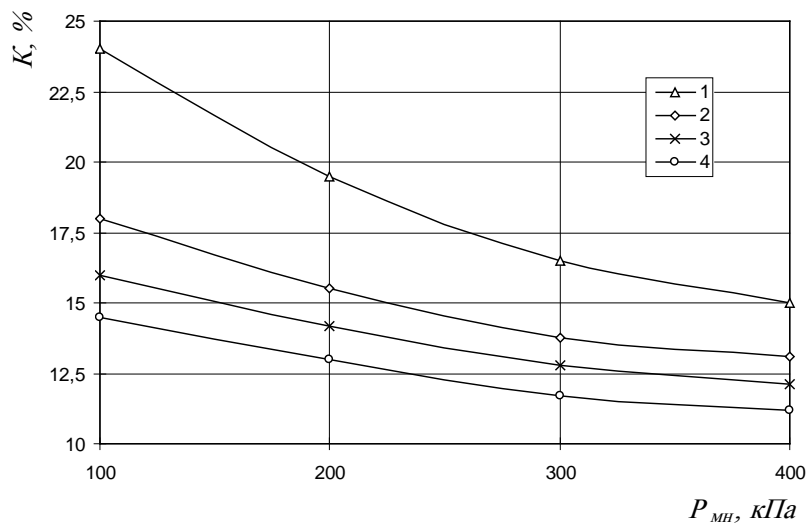


Рис. 2.1. Залежність коефіцієнта нестабільності роботи струменевого захоплювача “сопло з плоским торцем” від магістрального тиску  $P_{MH}$

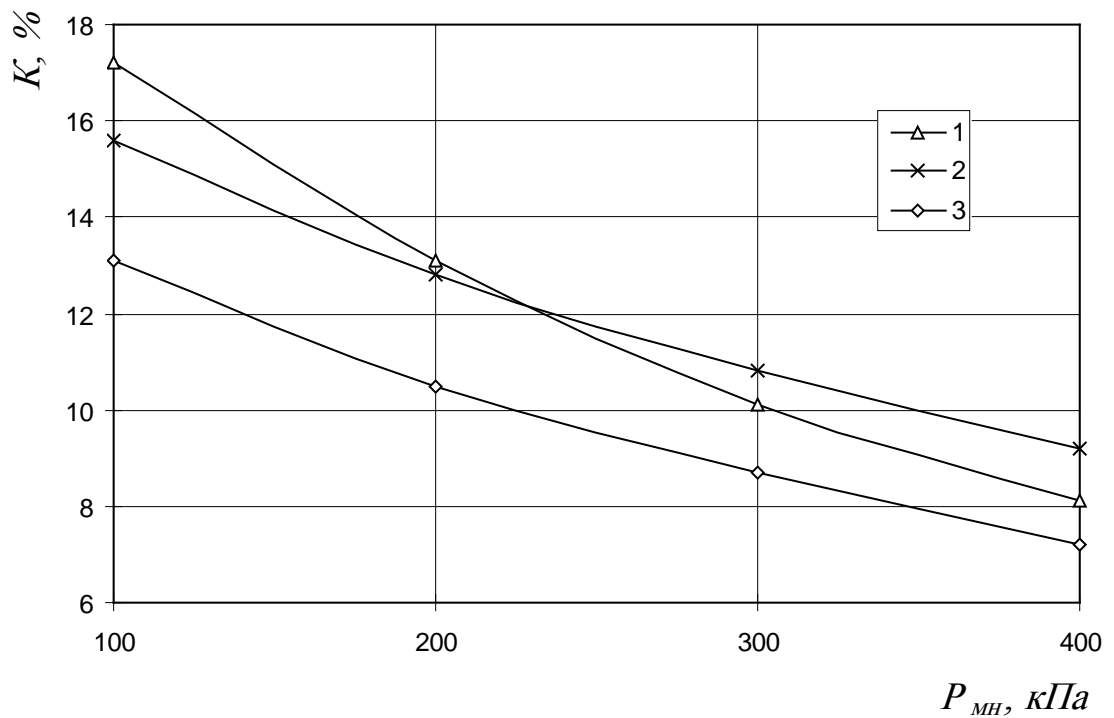


Рис. 2.2. Залежність коефіцієнта нестабільності роботи струменевого ежекційного захоплювача від магістрального тиску  $P_{MH}$

## 2.2.4 Питома підйомна сила струменевих захоплювачів

Важливою характеристикою СЗП являється середня питома підйомна сила  $F_{пит}$ , яка визначається відношенням присмоктуючої сили  $F$  захоплювача до площі робочого торця  $S_m = \pi r_k^2$

$$F_{пит} = \frac{F}{S_m} \quad (2.16)$$

Теоретичні графіки залежності  $F_{пит}(r_k)$  для СЗП типу “сопло з плоским торцем” показані на рис. 2.2. Вони відповідають таким параметрам:  $h=0,2$  мм;  $r_c=r_k/4,8-0,0022$ м;  $\Delta_{ом}=1$  мкм; графік 1 –  $P_k=500$  кПа, 2 –  $P_k=400$  кПа, 3 –  $P_k=300$  кПа. На рис.2.3 показані теоретичні графіки  $F_{пит}(r_k)$  для ежекційних СЗП плоских об’єктів (графік 1 при  $P_k=500$  кПа, 2 –  $P_k=400$  кПа, 3 –  $P_k=300$  кПа). При розрахунках радіус конічної вставки приймався рівним  $r_{в}=r_k-0,01$ м а параметри  $h_{щ}=0,1$  мм,  $h_{рк}=0,25$  мм,  $l_{щ}=0,5$  мм,  $\Delta_{ом}=1$  мкм.

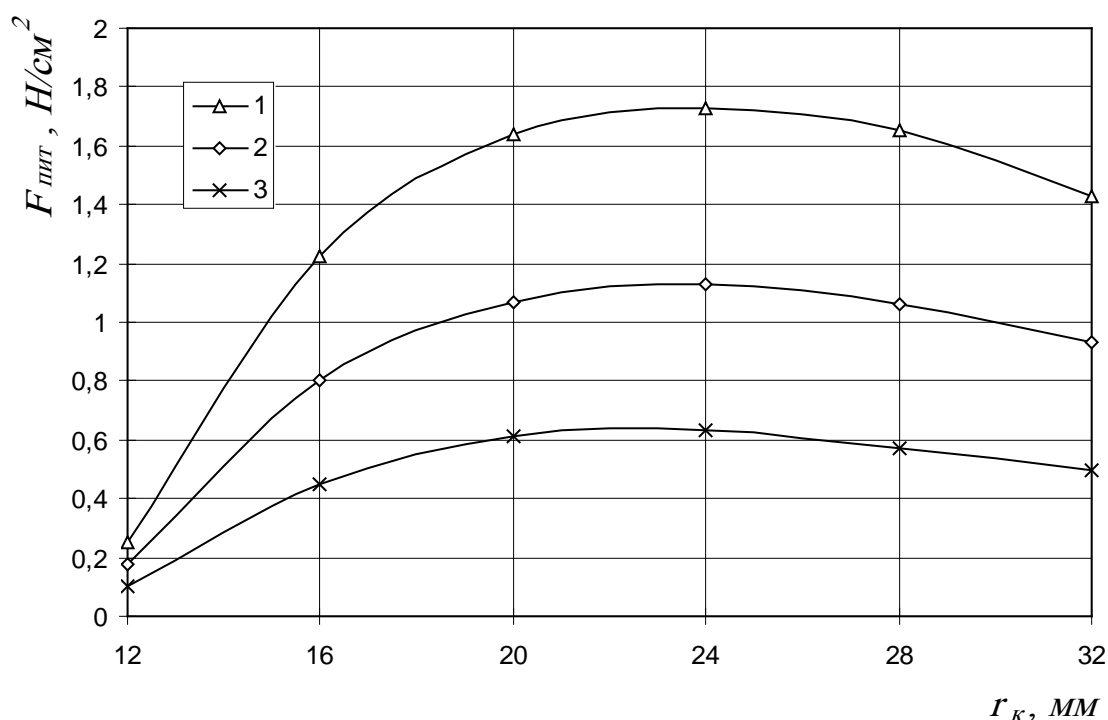


Рис. 2.3. Графік зміни питомої підйомної сили  $F_{пит}$  струменевих захоплювачів “сопло з плоским торцем” в залежності від радіуса торця  $r_k$

### 2.2.5 Коефіцієнт корисної дії струменевих захоплювачів

Однією із характеристик СЗП являється його механічний коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta_m$ , який визначається відношенням дійсної вантажопідйомності захоплювача  $G_{зах}$  до теоретичної (розрахункової) присмоктуючої сили  $F$

$$\eta_m = \frac{G_{зах}}{F} . \quad (2.17)$$

Найбільш повною характеристикою СЗП являється його загальний ККД, що визначає частину енергії, яка затрачається на корисну роботу, тобто безпосередньо на процес захоплення. Для здійснення цього процесу необхідна корисна потужність  $N_{кор}$  яка рівна

$$N_{кор} = \frac{A}{t} , \quad (2.18)$$

де  $A$  – робота, здійснювана захоплювачем при підніманні об'єкта вагою  $G_{заг} = m \cdot g$  з відстані  $H$  під дією аеродинамічного ефекту;

$t$  – час піднімання об'єкта.

Потужність  $N_{сп}$ , що споживається захоплювачем від джерела стиснутого повітря, регламентується магістральним тиском  $P_m$  і об'ємними витратними характеристиками  $Q$ , тобто

$$N_{сп} = P_m Q = \frac{P_m G_{ш}}{\rho_a} . \quad (2.19)$$

В даному випадку ККД СЗП вказує на затрати споживаної потужності в процесі захоплення і формула для його розрахунку визначається відношенням корисної потужності до споживаної:

$$\eta_{заг} = \frac{N_{кор}}{N_{сп}} = \frac{m_{ом} g H \rho_a}{P_m G t} \quad (2.20)$$

Формула буде справедливою, якщо припустити, що тиск  $P_m$  і масові витрати  $G$  повітря в процесі захоплення практично не змінюються і за час  $t$  тривалості цього процесу добуток  $P_m \cdot G = \text{const}$ .

Для СЗП із кільцевою щілиною на плоскому торці і конструктивними параметрами  $g_b=30$  мм,  $g_k=50$  мм,  $h_{щ}=0,12$  мм,  $H=5$  мм,  $h_{рк}=0,32$  мм,  $t=0,12$  с ККД знаходиться в межах  $\eta_{заг}=0,09\dots 0,18$ . У кожному конкретному випадку ККД струменевих захоплювачів змінюється і його необхідно визначати або експериментальним шляхом, або на основі теоретичних формул.

Характеристикою ефективності СЗП в статичному режимі, що є корисною при порівнянні різних груп захоплювачів, являється відношення величини присмоктуючої сили  $F$  притягнутого до торця ОМ до споживаної потужності  $N_{сп}$

$$K_{ef} = \frac{F}{N_{сп}} = \frac{\rho_a F}{P_m G}, \quad (2.21)$$

де  $K_{ef} \left[ \frac{Н}{Вт} \right]$  – коефіцієнт ефективності СЗП.

Теоретичні графіки залежності коефіцієнта ефективності  $K_{ef}(P_{мн})$  СЗП “сопло з плоским торцем” від магістрального тиску  $P_{мн}$  показані на рис. 2.4. Вони відповідають таким параметрам:  $h=0,2$  мм;  $g_k=30$  мм;  $\Delta_{ом}=1$  мкм; графік 1 –  $g_c=1$  мм, 2 –  $g_c=2$  мм, 3 –  $g_c=3$  мм, 4 –  $g_c=4$  мм. Результати досліджень коефіцієнта ефективності  $K_{ef}(P_{мн})$  захоплювачів ежекційного типу

представлені на рис.2.5. Приведені криві відповідають параметрам:  $l_{щ}=0,5$  мм;  $\Delta z=0,5$  мкм;  $\Delta_{ом}=1$  мкм; графік 1 відповідає –  $h_{щ}=0,08$  мм,  $h_{рк}=0,22$  мм,  $g_{в}=30$  мм,  $g_{к}=40$  мм; графік 2 –  $h_{щ}=0,1$  мм,  $h_{рк}=0,25$  мм,  $g_{в}=20$  мм,  $g_{к}=30$  мм.

Аналіз приведених кривих показує, що ефективність СЗП групи “сопло з плоским торцем” є нижчою від групи ежекційних. Ефективна величина надлишкового тиску живлення СЗП “сопло з розвинутою поверхнею торця” становить  $P_{кн.еф}=25\dots100$  кПа, а для групи ежекційних –  $P_{кн.еф}=150\dots400$  кПа.

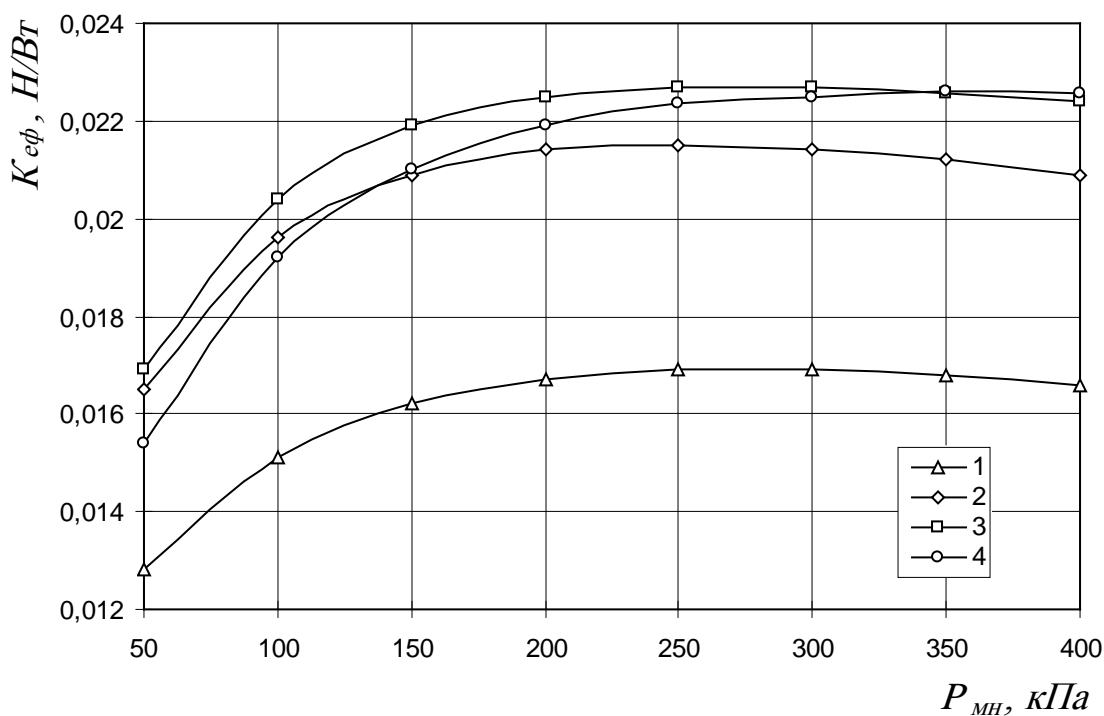


Рис. 2.4. Графік залежності коефіцієнта ефективності струменевих захоплювачів “сопло з плоским торцем” від магістрального тиску  $P_{MH}$



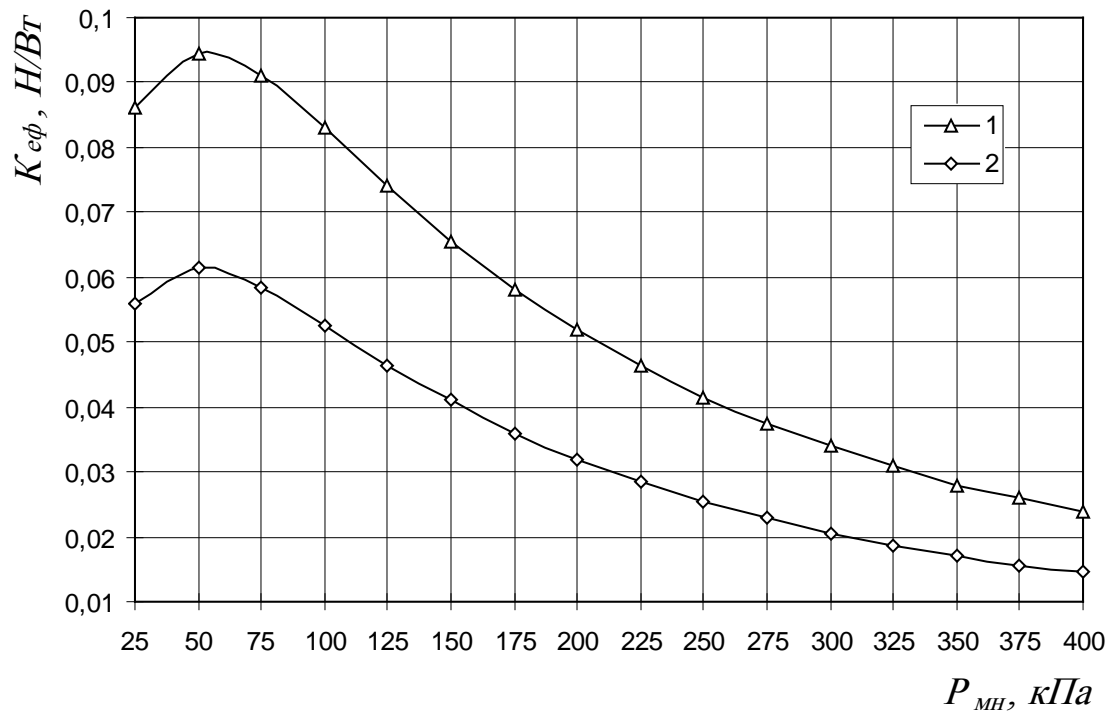


Рис. 2.5. Графік залежності коефіцієнта ефективності струменевих ежекційних захоплювачів від магістрального тиску  $P_{\text{мн}}$

## **3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА**

### **3.1 Конструкція струминних захоплюючих пристроїв для безконтактного маніпулювання**

#### **3.1.1 Опірні струминні захоплювачі об'єктів маніпулювання**

До струминних захоплювачів відносять пристрої, які в якості робочого агента використовують потік спеціально підведеного від мережі стиснутого повітря. При цьому використовується аеродинамічний ефект притягування, який є особливо ефективним при завантаженні штучних заготовок з базовою плоскою поверхнею та невеликою вагою [5, 18]. Теоретичні основи по розрахунку струминних пристроїв автоматики та течій повітря у вузьких каналах заклали вчені Залманзон Л.А., Герц Є.В., Ідельчик І.Є. [29, 40, 47].

Струминні пристрої характеризуються довговічністю та надійністю в роботі, володіють високою швидкістю, а простота конструктивного виконання не потребує значних затрат на їх виготовлення.

На рис. 3.1 представлений струминний захоплювач, який з метою уникнення нераціонального використання стиснутого повітря, спеціально оснащений ковпачком з хрестоподібно розташованими каналами, що знаходяться по висоті на відстані, яка забезпечує перекриття одних каналів при співпаданні інших з каналами корпусу. При цьому, в крайньому верхньому положенні ковпачка відкривається нижній отвір 4, а верхній перекривається [5].

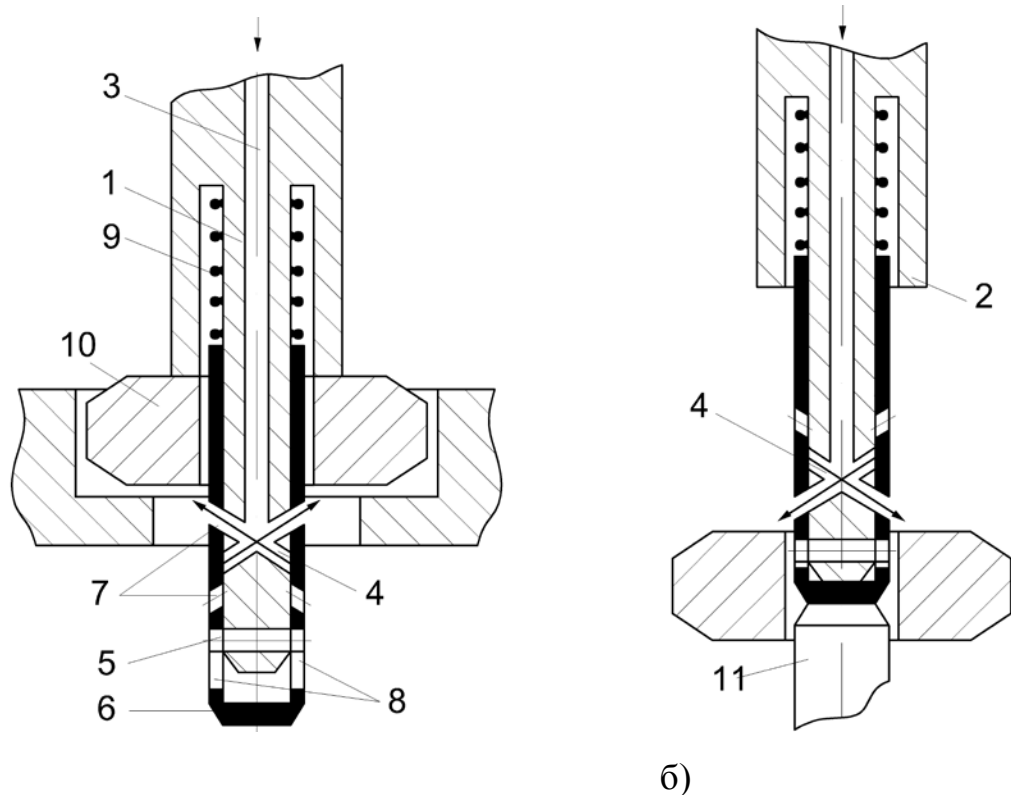


Рисунок 3.1 – Струминний захоплювач: а) – положення захоплення деталі;  
 б) – положення скидання деталі

Досить часто при захопленні виробу не відбувається точне його центрування, до того ж розміри захоплювача повинні відповідати кожному типорозміру захоплюваного виробу. Усунення вищевказаних недоліків реалізовано в струминному захоплювачі, зображеному на рис. 3.2 [1]. В даному захоплювачі стержень виконаний у вигляді набору телескопічних індивідуально підпружинених пружинами 2 відносно корпусу 1 оправок 3. В центральній оправці виконаний глухий осьовий канал та відкриті в нього і назовні похилі радіальні канали. В інших оправках виконані похилі радіальні канали 4, співвісні з радіальними каналами центральної оправки, причому оправки зафіксовані від повороту одна відносно одної.

Опірні пристрої є універсальними, мають можливість комплектації виробів або накопичення об'єктів [3].

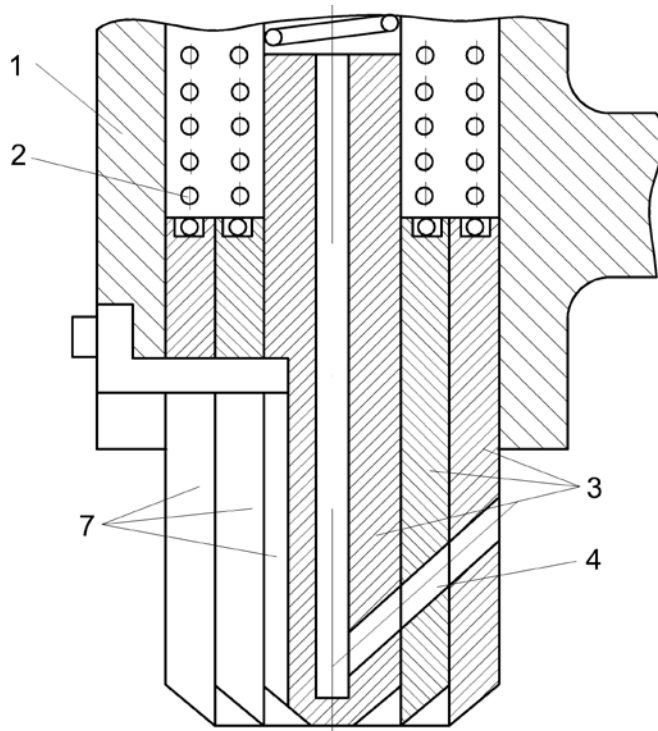


Рисунок 3.2 – Струминний захоплювач

### 3.1.2 Вихрові струминні захоплювачі об'єктів маніпулювання

Вихрові струминні захоплювачі, які використовують ефект зміни характеристик потоку повітря при його завихренні, набувають все більшого застосування, про що свідчать роботи наступних авторів [20]. Принцип роботи даних захоплювачів базується на тому, що в приосьовій області захоплювача, всередині ізольованого вихрового потоку повітря, утворюється зона розрідження, в яку під дією радіальної сили тяги втягуються об'єкти різної форми. Характерною ознакою таких захоплювачів є збільшене значення величини радіального зазору  $h$  між торцями корпусу та об'єкта, що робить їх менш чутливими до шорсткості поверхонь захоплюваних об'єктів.

На рис. 3.3 представлена схема вихрового струминного захоплювача [13]. Пристрій працює наступним чином: при подачі стиснутого повітря через отвір 9 в кожух 8 і далі через тангенціально розташовані отвори 7 в корпус 1, стиснуте повітря завихрюється, створюючи в приосьовій частині область пониженого

тиску. Коли захоплювач наближається до поверхні об'єкта на певну відстань, під дією присмоктуючої сили струменя і розрідження в центральній області вихору, об'єкт прилипає до плоскої поверхні ребер 5. При цьому, утворюються щілинні проточні канали, по яких повітря витікає в атмосферу. Ребра 5 мають таку висоту  $h$ , яка створює оптимальну величину зазору між поверхнею насадки 2 та об'єктом.

Недоліком даного пристрою є мала вантажопідйомність внаслідок неповного використання присмоктуючої дії струменя стиснутого повітря.

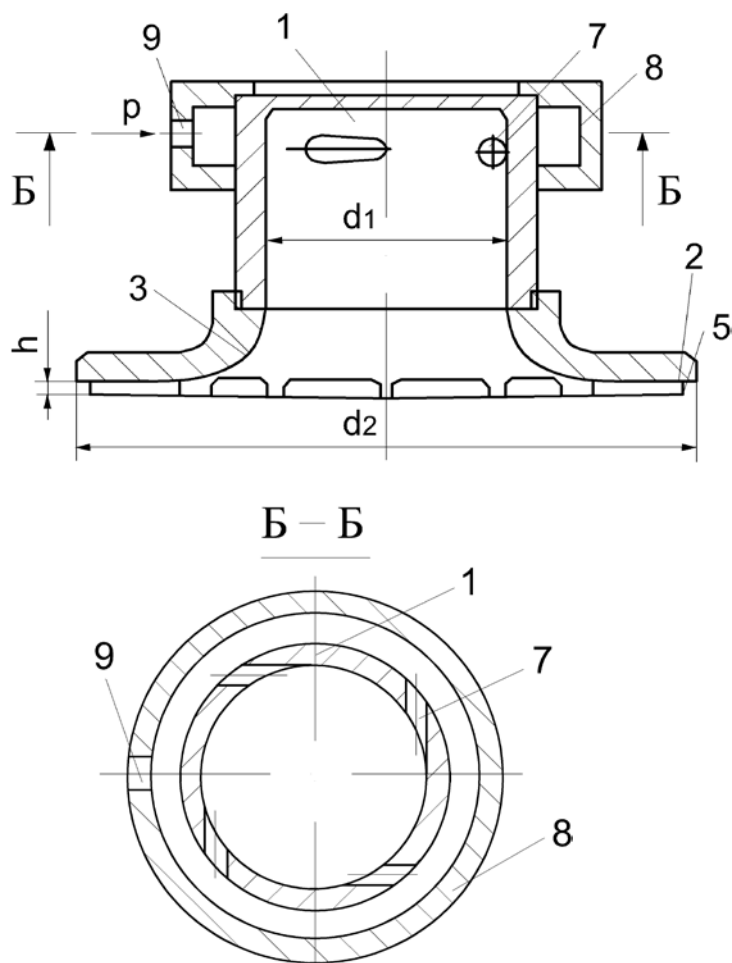


Рисунок 3.3 – Вихровий струминний захоплювач

Розробкою вихрових захоплювачів займаються і закордонні фірми, зокрема, корпорація SMC Pneumatics випускає безконтактні вихрові

захоплювальні пристрої серії ХТ661 . Дані захоплювачі не вимагають джерела вакууму і живляться стиснутим повітрям.

Принцип роботи даних захоплювачів ілюструє рис. 3.4. Повітря подається в камеру захоплювача, а потім через тангенціальні сопла витікає в проміжок між захоплювачем та об'єктом, де утворюється ефект вихору. В результаті, на поверхні об'єкта створюється зона вакууму. Оскільки повітря безперервно протікає між поверхнями захоплювача та об'єкта, то забезпечується безконтактне утримування об'єктів маніпулювання.

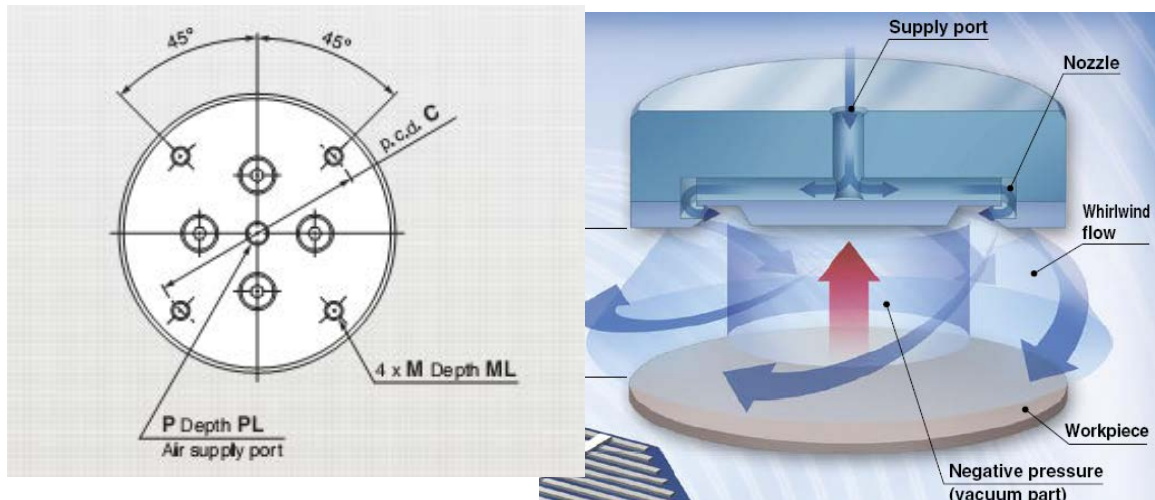


Рисунок 3.4 – Конструктивна схема та принцип роботи вихрових захоплювачів серії ХТ661

Виробник рекомендує застосовувати дані захоплювачі для маніпулювання пористими, тонкими, гарячими, вологими об'єктами або виробами з покриттями. Серія даних захоплювачів включає 5 типорозмірів, із зовнішніми діаметрами 20, 40, 60, 80 і 100 мм, при цьому їх силові характеристики відповідно становлять 3, 11, 19, 27 і 35 Н, а об'ємне споживання повітря відповідно 85, 145, 170, 200 і 240 л/хв. Зовнішній вигляд та силові характеристики захоплювача моделі ХТ661-8А із зовнішнім діаметром 80 мм представлені на рис. 3.5.

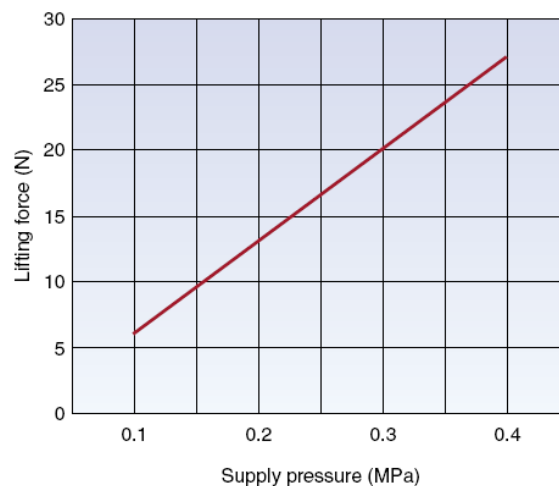
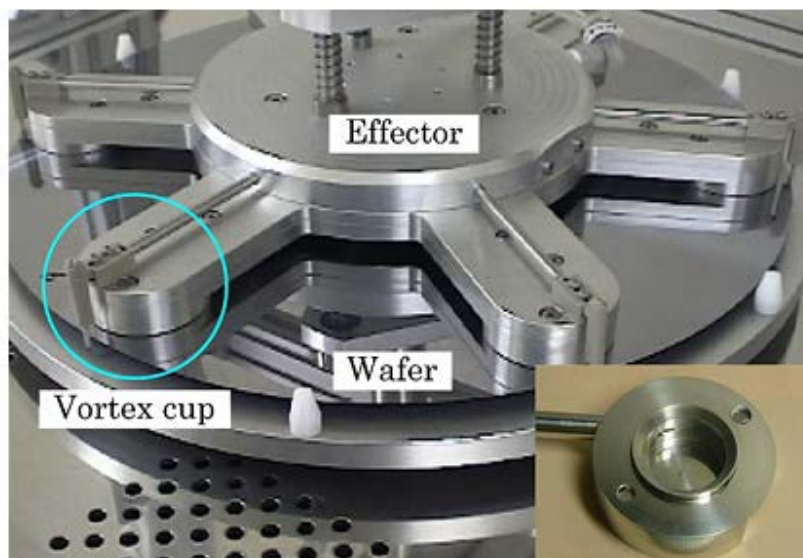


Рисунок 3.5 – Фотографія та силові характеристики захоплювача моделі XT661-8A

Ще один варіант вихрових захоплювачів представлений на рис. 3.6. Принцип роботи полягає у вдуванні повітря у вихрову чашу через тангенціальні сопла для створення завихреного потоку повітря. Шляхом експериментів та аналізу основних характеристик потоку повітря, було підтверджено, що тиск викликано відцентровою силою завихреного потоку повітря. Вихор поширюється у вигляді параболічної кривої, створюючи підйомну силу, під дією якої вироби були приведені в положення рівноваги.



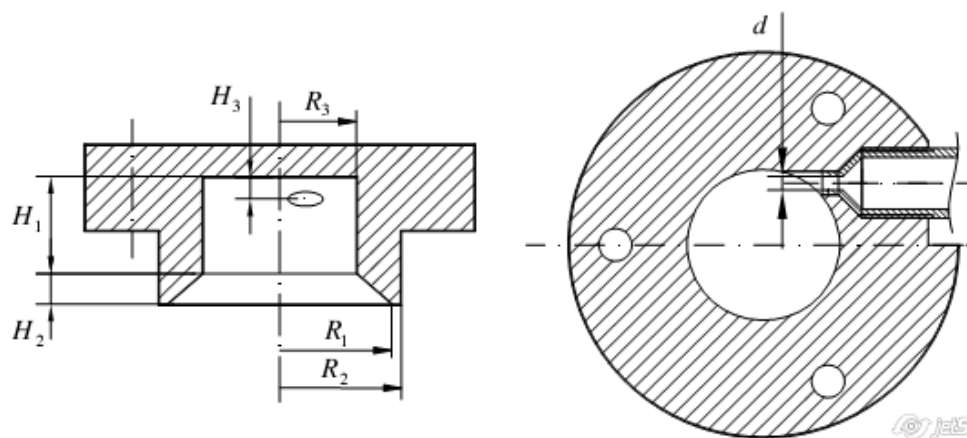


Рисунок 3.6 – Фотографія та конструктивна схема вихрового захоплювача

Необхідно зауважити, що вихрові ЗП для забезпечення необхідної вантажопідйомності потребують значних витрат стисненого повітря, тому їх використання може бути виправдане лише при маніпулюванні плоскими об'єктами зі значними параметрами шорсткості захоплюваної поверхні ( $R_a > 10$  мкм) та невеликими відхиленнями від площинності.

### 3.1.3 Струминні захоплювачі з одним циліндричним соплом

Можливість безконтактного захоплення та утримування об'єктів маніпулювання з різного матеріалу, різними механічними характеристиками, структурою поверхневого шару та температурою, робить їх надзвичайно ефективними та практичними. Доцільність використання струминних захоплювачів обумовлена високою надійністю, довговічністю роботи та низькою собівартістю виготовлення.

Принцип роботи струминних захоплювачів полягає у виникненні аеродинамічного ефекту притягання при взаємодії витікаючого з сопла струменя повітря з плоскою поверхнею заготовки. При наявності звукової швидкості на вході потоку в радіальний зазор, аеродинамічний ефект передбачає утворення зон розрідження між торцями захоплювача та заготовки. Збільшення площі поперечного перерізу надзвукового потоку приводить до зростання його швидкості з одночасним зменшенням статичного тиску в зазорі.



На радіусі гнд надзвуковий потік різким стрибком переходить у дозвуковий. У результаті подальшого розширення швидкість дозвукового потоку спадає, а статичний тиск у зазорі плавно зростає до величини атмосферного ра.

Для переміщення скляних листів ефективним є використання захоплювального пристрою, запропонованого авторами у роботі (рис. 3.6). Варіація насадок дозволяє переносити плоскі об'єкти різноманітної форми.

При великих значеннях тиску, ЗП може створювати звук з амплітудою 90 дБ. З метою мінімізації небажаного шуму автор у роботі використовує ряд інтерференційних смуг на зовнішній частині фланця (рис. 3.7).

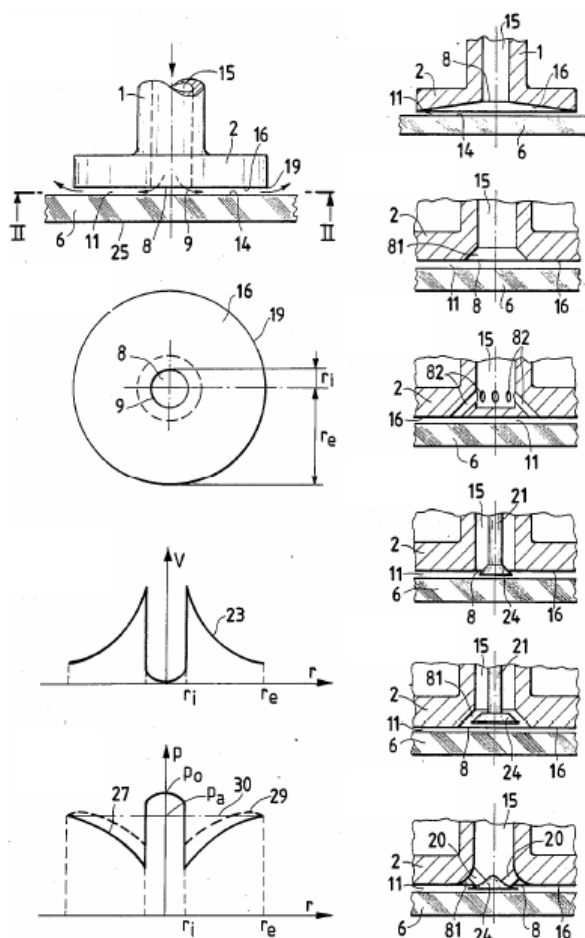


Рисунок 3.7 – Захоплювальний пристрій для переміщення скляних листів

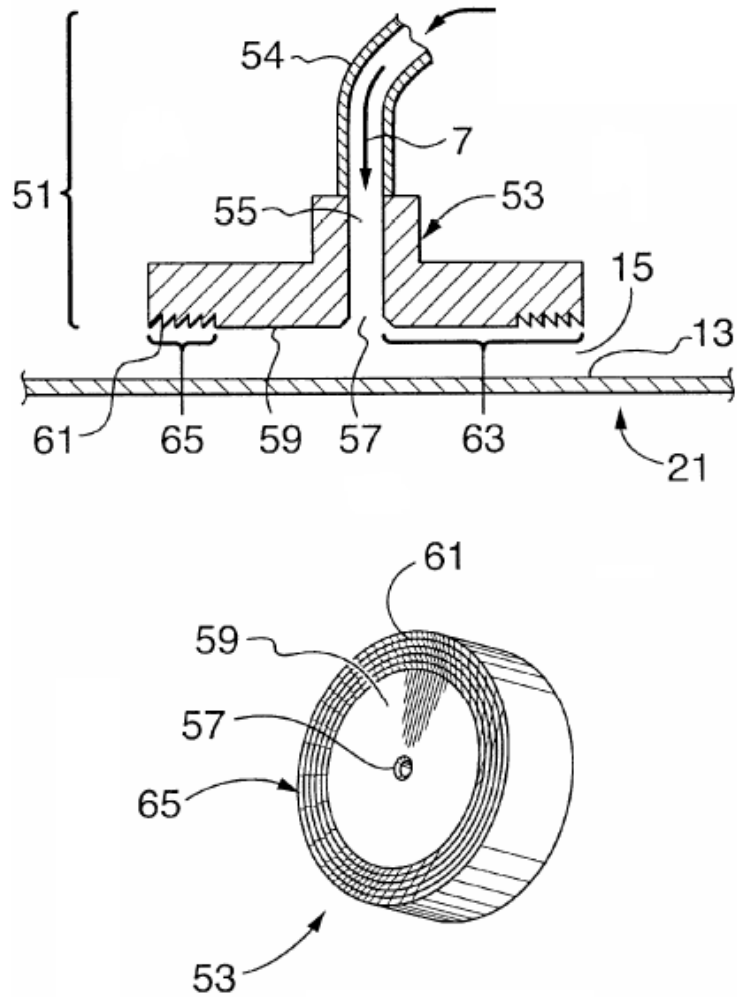


Рисунок 3.8 – Захоплювальний пристрій з можливістю мінімізації  
небажаного шуму

Методика розрахунку струминного захоплювача з одним циліндричним соплом (рис. 3.8).

Величина сили притягування заготовки захоплювачем визначається за формулою:

$$F = F_n + F_d - F_c - F_p, \quad (3.1)$$

де  $F_n$ ,  $F_d$  - сили викликані розрідженням відповідно в надзвуковій і дозвуковій зонах;  $F_c$  - сила викликана статичним тиском у зоні навпроти сопла;  $F_r$  - реактивна сила струменя повітря.

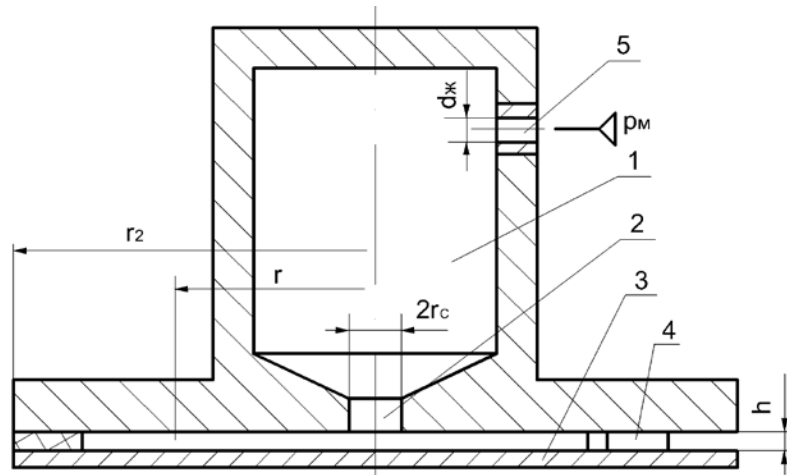


Рисунок 3.9 – Конструктивна схема струминного захоплювача

Силу  $F_n$  знаходять за формулою:

$$F_n = \pi(1 - K_2)P_a(r_{нд}^2 - r_c^2) - 4K_1\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}P_0r_c^2 \times \left(a(b-1) + (1-a)\ln b + \frac{a^3}{6}\left(1 - \frac{1}{b}\right) + \frac{a^2(1-a)}{4}\left(1 - \frac{1}{b^2}\right) + \frac{a(1-a)^2}{6}\left(1 - \frac{1}{b^3}\right) + \frac{(1-a)^3}{24}\left(1 - \frac{1}{b^4}\right)\right) \quad (3.2)$$

де  $a = \frac{\lambda_n r_c}{2h}$ ,  $b = \frac{r_{нд}}{r_c}$  - коефіцієнти.

Сила, викликана розрідженням у дозвуковій зоні:

$$F_d = \frac{\pi\mu^2 k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} r_c^2 P_0^2}{(k+1)RT_0\rho_2 r_2^2} \left(2r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_{нд}} + r_{нд}^2 - r_2^2 - \frac{\lambda_d}{2h} \left(r_2(r_2 - r_{нд})^2\right)\right) \quad (3.3)$$

Для визначення радіуса гнд, на якому відбувається перехід надзвукового потоку в дозвуковий, використано закон зміни швидкості потоку у прямому стрибку тиску:

$$V_H V_D = V_{кр}^2, \quad (3.4)$$

де  $V_H$ ,  $V_D$  - відповідно надзвукова і дозвукова швидкість потоку на радіусі гнд.

При зазорах  $h < 0,3$  мм і радіусах  $r_c > 1$  мм статичний тиск на зрізі сопла  $P_c \cong P_0$ , тому силу  $F_c$ , викликану статичним тиском у зоні навпроти сопла, визначено як:

$$F_c = (P_0 - P_a) \pi r_c^2. \quad (3.5)$$

Реактивну силу струменя повітря, згідно теореми про зміну кількості руху потоку, визначено як:

$$F_p = 8\pi\mu^2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} h^2 P_0. \quad (3.6)$$

### 3.1.4 Струминні ежекційні захоплювачі з кільцевим соплом

Оскільки використання повітряного струменя для левітації є досить обмеженим, тому є мало публікацій з дослідження цієї проблеми. Незважаючи на брак аналітичних досліджень, є ряд пристроїв, які використовують струминну левітацію.

Реальним прикладом є використання цього ефекту в пристрої для безконтактного транспорту NCT (non-contact transport unit) [68]. Принцип дії цього пристрою показаний на рис. 3.10.

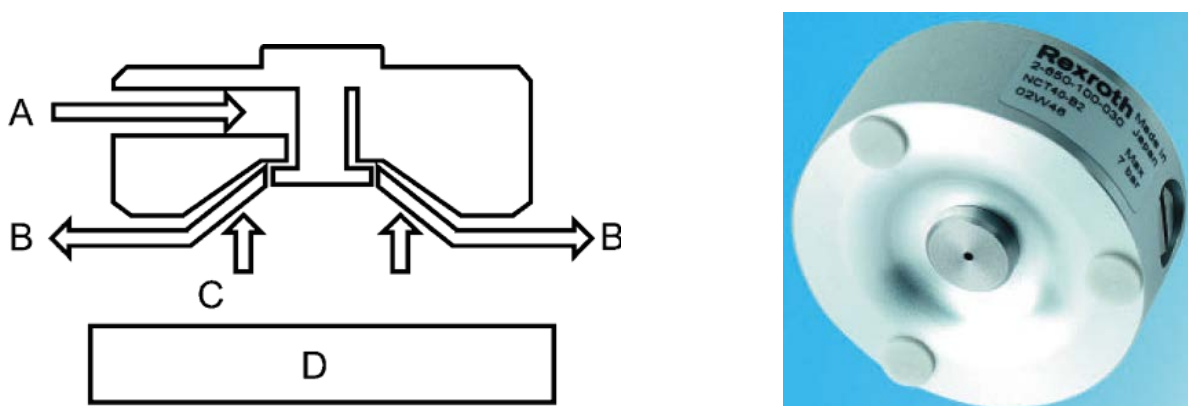


Рисунок 3.10 – Принцип дії пристрою для безконтактного транспорту NCT:

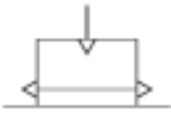
A – стиснуте повітря, B – повітряний потік, C – підйомна сила, D – об’єкт

NCT являє собою плоский алюмінієвий диск діаметром від 20 до 60 мм і завтовшки 17 мм. Диск має різьбовий отвір, до якого під’єднується шланг із стиснутим повітрям. Всередині цього диску використана «форсунка Бернуллі». Тиск повітря, що проходить через звуження, падає нижче атмосферного і в нижній конусній частині диску виникає вакуум. Як наслідок, на об’єкт діє підйомна сила. Потік повітря, що виходить з форсунки назовні, відштовхує об’єкт від поверхні NCT, протидіючи торканню. Таким чином реалізується стан динамічної рівноваги – левітації. Технічні характеристики ЗП наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Технічні характеристики захоплювальних пристроїв NCT корпорації Bosh Rexroth

Позначення	Діаметр, [мм]	Вантажопідйомність при тиску 5 bar,	Витрати повітря, [л/хв]	Вага, [кг]

		[Н]		
	20	0,9	100	0,02
	30	1,3	100	0,03
	40	2	110	0,05
	60	6	210	0,12

Згідно даних таблиці 3.1, підйомна сила однієї з модифікації пристрою NCT діаметром 60 мм при тиску стислого повітря 0,6 Мпа складає 6 N. При цьому, витрата стислого повітря приведена до нормального тиску складає 210 л/хв. NCT – це простий і надійний пристрій, який може бути використаний в різних галузях промисловості: фармацевтичній, харчовій, в області електроніки, з метою автоматизації операцій подачі і транспортування об’єктів маніпулювання.

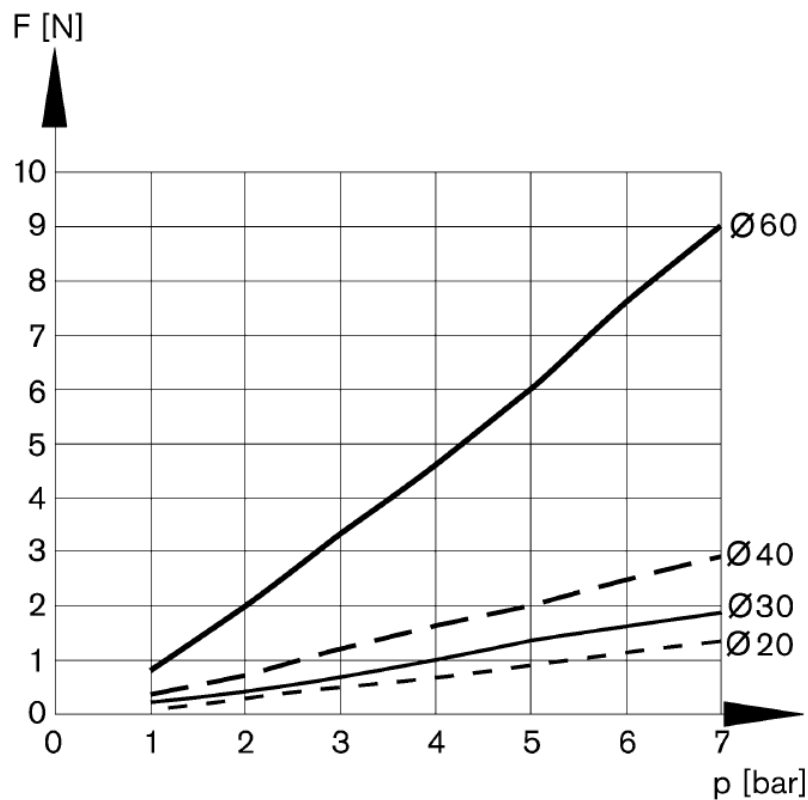


Рисунок 3.11 – Графік підйомної сили в залежності від тиску і розміру захоплювача

Подібні захоплювальні пристрої виготовляються також компанією Schmalz. На рис. 1.18 представлено один із захоплювальних пристроїв моделі SBS 60 M5-IG, що має зовнішній діаметр 60 мм.

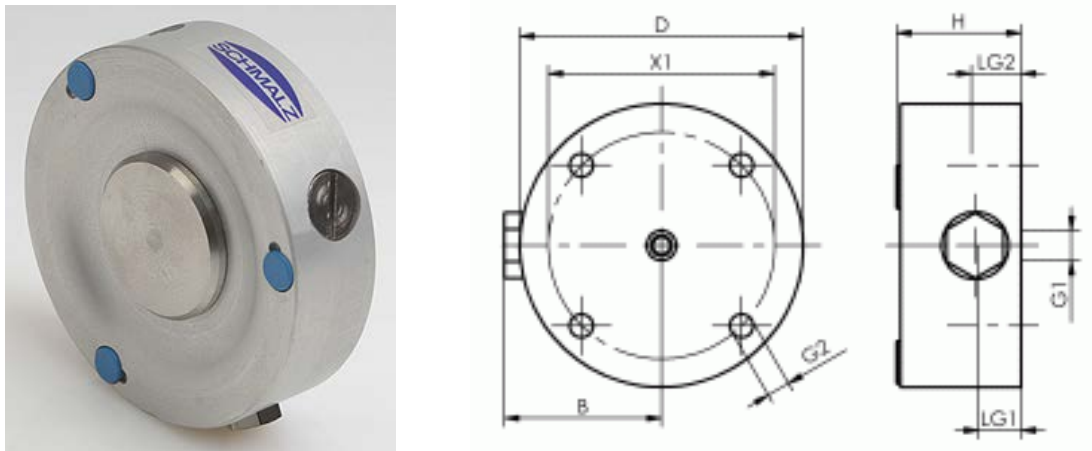


Рисунок 3.12 – Захоплювальний пристрій моделі SBS 60 M5-IG

На рис. 3.12 представлено вимірювання залишкових напружень у кремнієвих пластинах та проведено аналіз деформацій пластини.

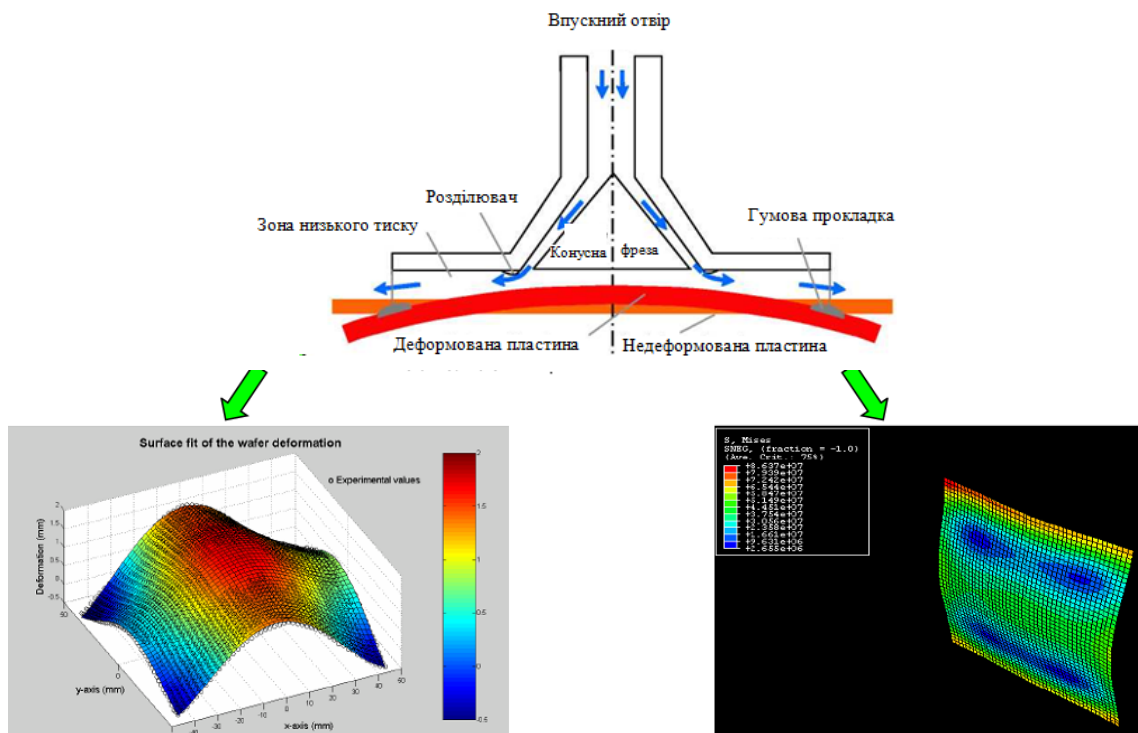


Рисунок 3.13 – Струминний захоплювальний пристрій

Характерним для ежекційних струминних захоплювачів є наявність в площині їх торця кільцевої щілини 5 (рис. 3.14).

Об'єкт захоплюється та утримується під робочим органом маніпулятора завдяки повітрю, яке поступово під високим тиском витікає вниз через сопло і після удару до заготовки розтікається в різні сторони. Якщо проміжок зазору між соплом і заготовкою малий, то радіальна швидкість витікання зростає і зменшення перерізу приводить до динамічного зменшення тиску завдяки ефекту Бернуллі, і як результат, відбувається притягання заготовки. Коли проміжок зазору стає надто великим, проявляються відштовхуючі сили, внаслідок чого заготовка відштовхується. У випадку, коли зазор стає надто малий, повітря не може більше витікати, і сили притягання зменшуються. Заготовка таким чином набуває стійкого положення під захоплювачем.

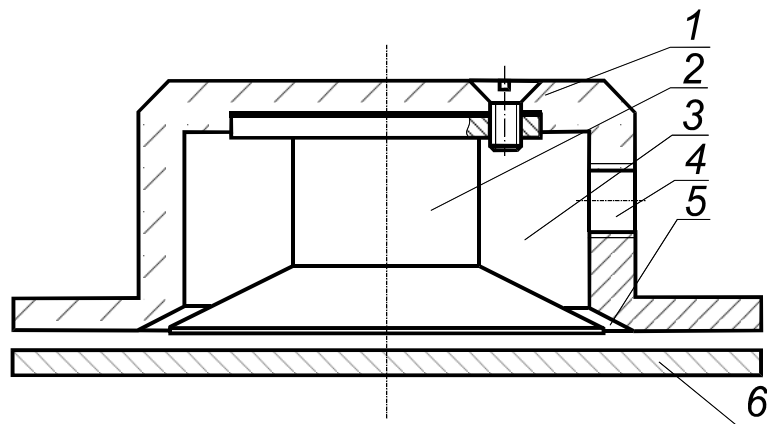


Рисунок 3.14 – Конструкція ежекційного струминного захоплювача

Сили, викликані падінням статичного тиску в надзвуковій і дозвуковій зонах, визначаються за формулами:

$$F_H = 2\pi \int_{r_c}^{r_{H0}} (P_a - P_{rH}) r dr \quad , \quad F_D = 2\pi \int_{r_{H0}}^{r_k} (P_a - P_{rD}) r dr \quad (3.7)$$



де  $P_{гн}$ ,  $P_{гд}$  – абсолютні тиски на радіусі  $r$  в області надзвукових і дозвукових швидкостей відповідно;  $r_{гд}$  – радіус на якому відбувається перехід надзвукового потоку в дозвуковий.

Для захоплення та центрування циліндричних об'єктів типу “фланці”, використовується струминний захоплювач, показаний на рис. 3.15. Він містить корпус 1, на якому стакан 2 закріплений таким чином, що утворюється закрита камера 3 для підводу стисненого повітря, та кільцева конічна щілина 4 для виходу повітря із камери 3 в атмосферу.

Захоплення попередньо зорієнтованої та розташованої у визначеній позиції заготовки включає підвід закріпленого на маніпуляторі захоплювача, подачу стисненого повітря від магістралі у камеру 3, опускання захоплювача в отвір заготовки та притягання останньої до базуючих елементів 7. Аеродинамічний ефект притягання виникає в результаті ежекції атмосферного повітря через радіальний зазор 6 висотою  $h < 0,08$  мм.

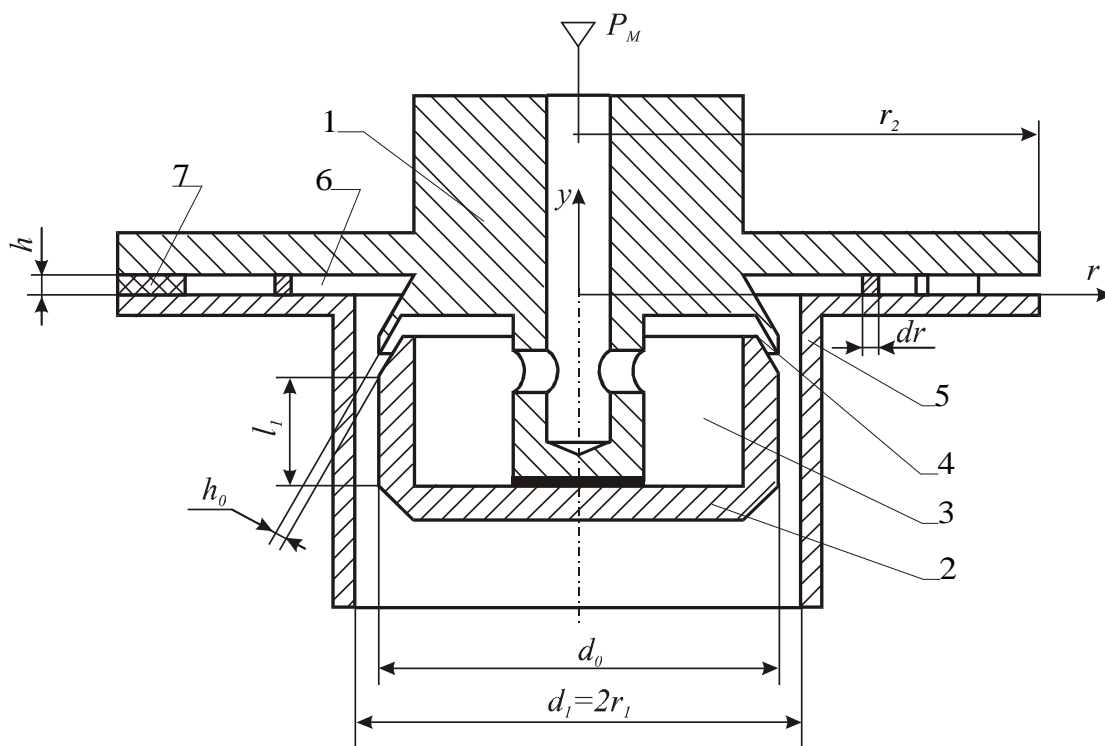


Рисунок 3.15 – Конструктивна схема струминного захоплювача для об'єктів типу “фланці”

Конструктивна схема струминного захоплювача для об'єктів типу “диски” зображена на рис. 3.16 . В центральній порожнині корпусу 1 захоплювача закріплена конічна вставка 2 таким чином, що у верхній частині порожнини утворюється закрыта камера 3, яка з'єднана отвором 4 з джерелом стиснутого повітря. Утворена на торці корпусу 1 між фаскою його порожнини і конічною периферією вставки 2 кільцева конічна щілина 5, з'єднує камеру 3 з атмосферою. На торці корпусу встановлений змінний спрямовуючий стакан 6 висотою  $l_1$  і діаметром, який перевищує розміри кільцевої щілини 5 і захоплюваного виробу 7.

Для фіксації положення виробу 7 при маніпулюванні, на зовнішньому торці вставки розміщені фрикційні елементи 8, висота яких над площиною торця перевищує товщину конічної щілини  $h_0$ , вимірювану в нормальному до її стінок напрямі.

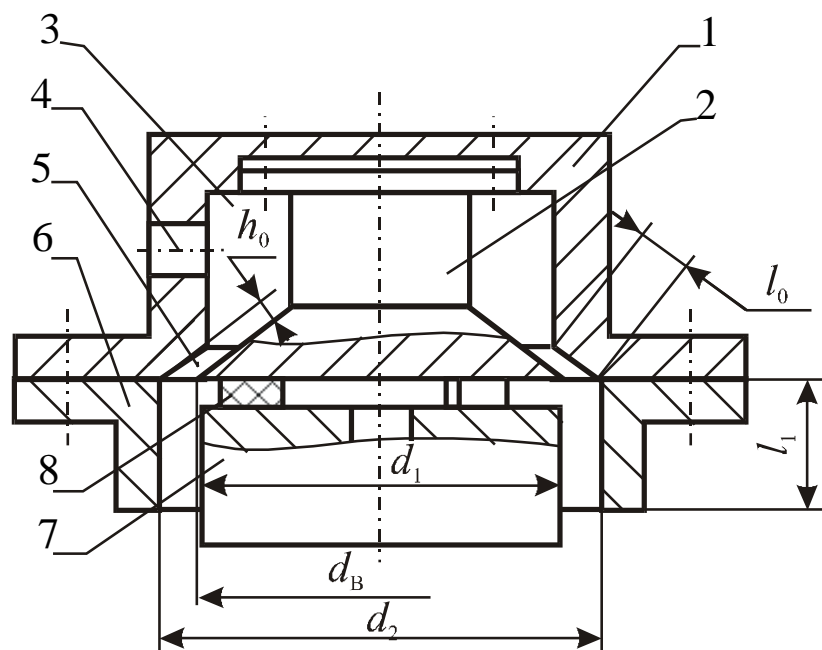


Рисунок 3.16 – Конструктивна схема струминного захоплювача для об'єктів типу “диски”

## 4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

### 4.1 Дослідження впливу сил лобового опору при маніпулювання габаритними об'єктами

Зниження енергетичних затрат під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій є актуальним завданням. Найчастіше мінімізація енергоспоживання транспортної системи зводиться до розв'язання завдань оптимізації траєкторії та методів транспортування [73-85].

В [82] показано, що значна частина енергетичних затрат під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій припадає на захватну систему промислового робота. Авторами статті було запропоновано метод оптимізації орієнтації захоплювача в процесі виконання транспортних операцій по прямолінійній або дуговій траєкторії. Це дозволило мінімізувати енергетичні затрати захоплювального пристрою (ЗП) під час транспортування об'єкта маніпулювання (ОМ).

В статтях [90-91] запропоновані залежності для знаходження мінімальної необхідної сили притягання під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій та орієнтуючих рухів для вакуумних систем.

Автори в статті [86] враховують вплив сил лобового опору середовища при обчисленні мінімальної необхідної сили утримування ОМ. Проте сила лобового опору суттєво залежить від швидкості руху ОМ та його габаритів.

Тому доцільно встановити закономірності впливу швидкості та габаритів ОМ на силу лобового опору повітря. Також необхідно встановити який вплив має сила лобового опору на мінімальну необхідну силу утримування ОМ у порівнянні із силами тяжіння та інерції.

Оптимізація орієнтації захоплювача Бернуллі у процесі транспортування ОМ дозволяє знизити мінімальну необхідну силу притягання. Мінімальна необхідна сила притягання ОМ, під час транспортування на всіх ділянках прямолінійної траєкторії, визначається з рівняння [75]:

$$F_{li} = m \left[ \begin{array}{c} g \left( \frac{\sin(\alpha)}{f} - \cos(\alpha) \right) - \\ -\omega^2 \left( \frac{E}{f} - \frac{H}{2} \right) + \\ +\varepsilon \left( \frac{H}{2f} + E \right) \end{array} \right] - (4.1)$$

$$-(Q_1 + Q_2 + ma) \left( \frac{\cos(\alpha + \beta)}{f} + \sin(\alpha + \beta) \right),$$

де  $a$  – прискорення захоплювача;  $m$  – маса об'єкта маніпулювання;  $Q_1, Q_2$  – складові сил лобового опору вантажу;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $\alpha$  – кут між напрямком руху ОМ і нормаллю до площини захоплення;  $\beta$  – кут нахилу траєкторії відносно глобальної площини  $XOY$ ;  $\omega, \varepsilon$  – кутова швидкість та кутове прискорення центра мас ОМ під час переорієнтації;  $H$  – висота ОМ;  $E$  – відстань від центра захоплювача до проекції центра мас на вісь  $Oy$ .

Для габаритних вантажів необхідно враховувати вплив сили лобового опору повітря. Ця сила зростає зі збільшенням швидкості транспортування об'єктів маніпулювання. Для прикладу на Рисунку 4.1 зображена залежність сили лобового опору повітря від числа Рейнольдса для тіл сферичної форми.

Число Рейнольдса прямо пропорційне швидкості транспортування об'єкта маніпулювання:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (4.2)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $v$  – швидкість переміщення об'єкта маніпулювання;  $L$  – габаритний розмір ОМ, виміряний у площині перпендикулярній до вектора швидкості  $v$ ;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря.

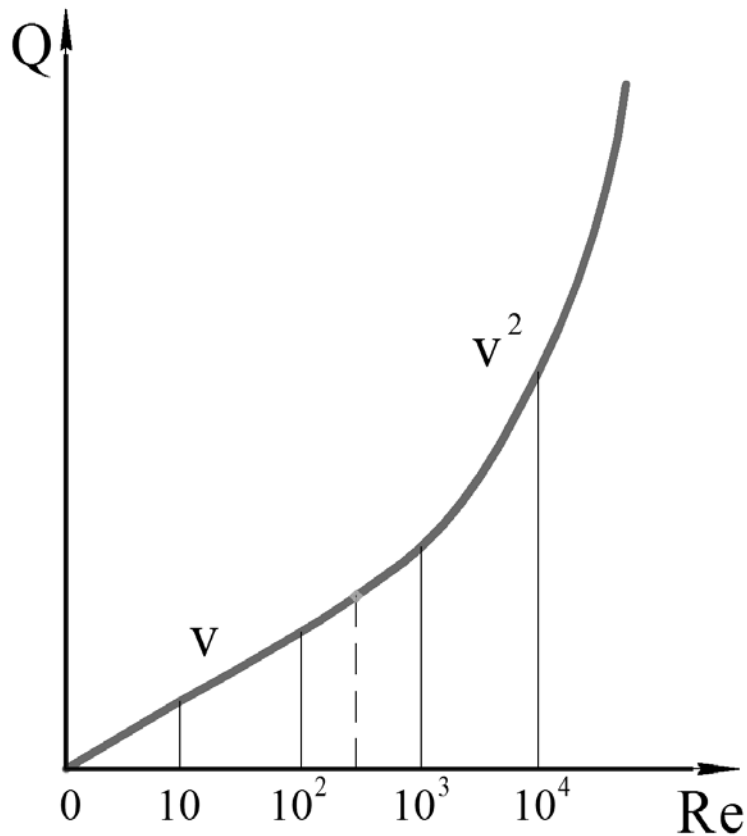


Рисунок 4.1 – Залежність сили лобового опору від числа Рейнольдса

При малих швидкостях транспортування на об'єкт маніпулювання діють сили в'язкого тертя повітря до його поверхні. При таких швидкостях спостерігається ламінарне обтікання повітрям об'єкта маніпулювання. Сила лобового опору на даній ділянці прямо пропорційна швидкості руху  $OM$  і визначається за законом Стокса:

$$Q = 6\pi\mu LV. \quad (4.3)$$

При числах Рейнольдса  $Re > 10^2$ , симетрія обтікання об'єкта маніпулювання потоком повітря порушується, позаду об'єкта утворюються вихрі і потік стає турбулентним. Це відповідає  $v > 0,1 \text{ м/с}$  та  $L > 0,05 \text{ м}$ . При цьому результуюча сила, що діє на  $OM$  буде пропорційна швидкісному напору  $\rho v^2/2$  та площі  $S$  міделевого перерізу:

$$Q = k_{lo} \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (4.4)$$

де  $k_{lo}$  - коефіцієнт лобового опору тіла, який залежить від форми поверхні об'єкта маніпулювання.

Для плоского та тонкого об'єкта маніпулювання силу лобового опору визначають за формулою:

$$Q = \rho \cdot S \cdot v^2 \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha}, \quad (4.5)$$

де  $\alpha$  кут між напрямком руху об'єкта і нормаллю до плоскої поверхні ОМ.

Для ОМ призматичної форми складові сил лобового опору визначаються за формулами (Рисунок 4.2):

$$Q_1 = \rho B H v^2 \frac{\pi \cos \alpha}{4 + \pi \cos \alpha}, \quad (4.6)$$

$$Q_2 = \rho A B v^2 \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha}, \quad (4.7)$$

де  $Q_1$  – сила лобового опору, що діє на площину  $PGTF$ ,  $Q_2$  – сила лобового опору, що діє на площину  $LNGP$ ,  $A$  та  $B$  – довжина та ширина ОМ,  $\alpha$  – кут між напрямком руху ОМ і нормаллю до площини захоплення.

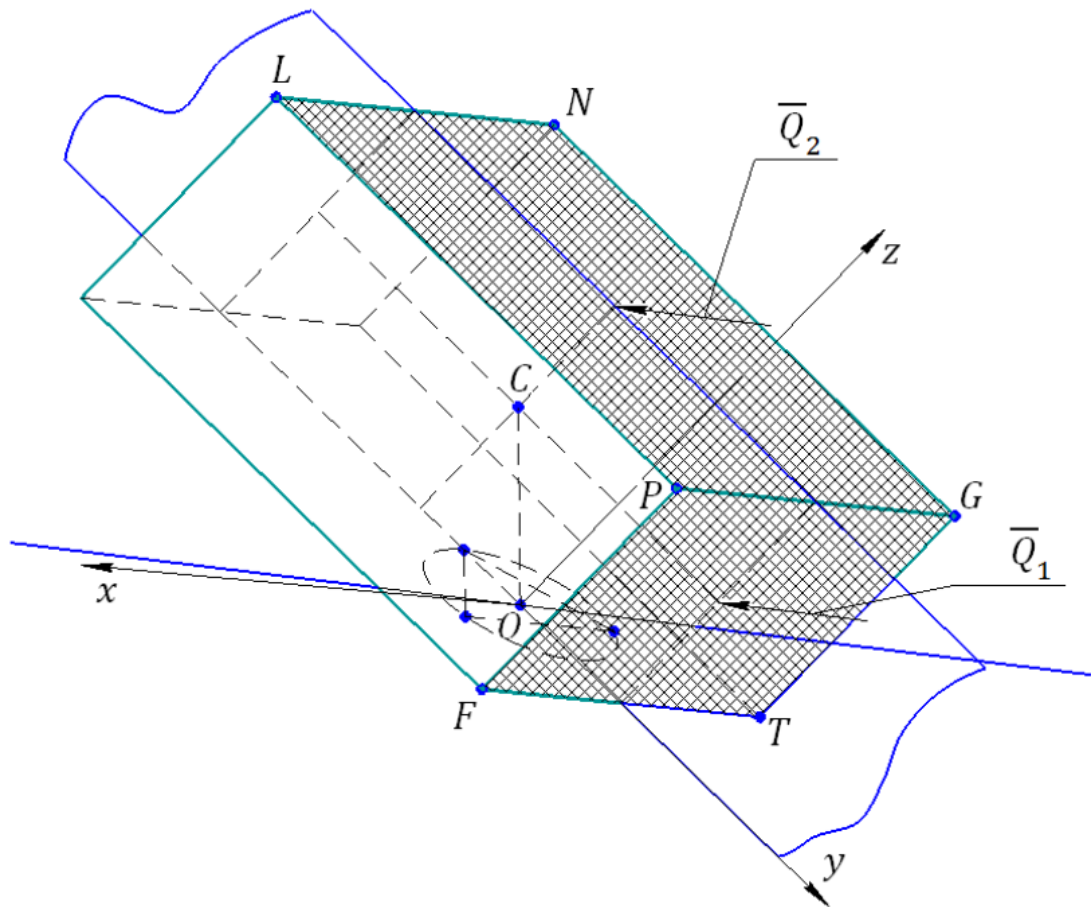


Рисунок 4.2 – Площини об'єкта маніпулювання де діють сили лобового опору

Для ОМ іншої форми коефіцієнт лобового опору  $k_{lo}$  визначають відповідно до [30].

Розглянемо транспортування ОМ по прямолінійній траєкторії (Рисунок 4.3) із оптимізацією орієнтації захоплювального пристрою.

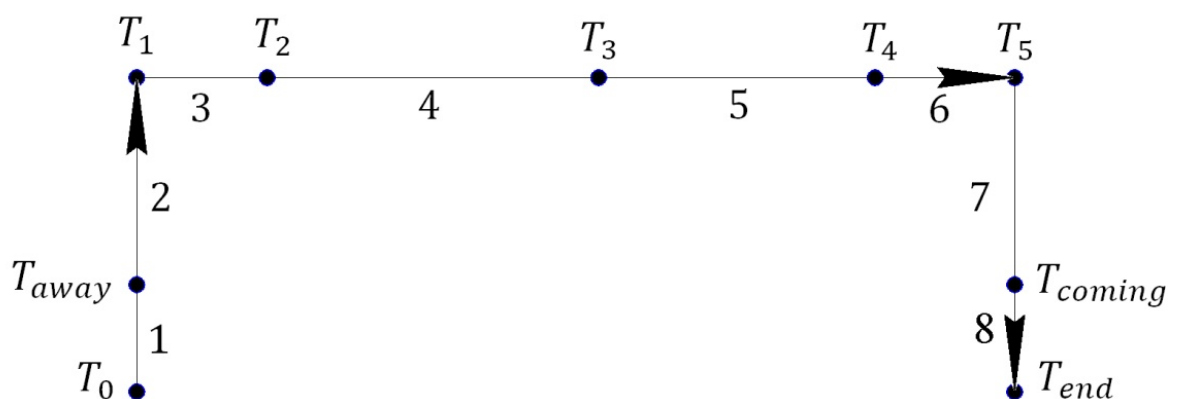


Рисунок 4.3 – Траєкторія транспортування об'єкта маніпулювання

Метод оптимізації орієнтації захоплювача Бернуллі (СЗП) передбачає розбиття прямолінійної траєкторії (Рисунок 4.3) на ділянки: 1 – захоплення і відвід, 2 – підйом та переорієнтація, 3 – розгін, 4 – переорієнтація, 5 – переорієнтація, 6 – уповільнення, 7 – опускання і переорієнтація, 8 – підвід і розвантаження. Визначимо мінімальну необхідну силу притягання та силу лобового на даних ділянках траєкторії. Оптимальні орієнтація захоплювача Бернуллі на ділянках 3 та 6 розраховується відповідно до моделі [76].

Вплив сил лобового опору у найбільшій мірі проявляється при транспортуванні габаритних ОМ малої маси. Для прикладу розглянемо транспортування ОМ з параметрами  $A=0,5$  м,  $B=0,5$  м,  $H=0,5$  м,  $E=0$  м,  $f=0,6$ ,  $m=1$  кг та характеристиками руху по траєкторії відповідно до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри руху ОМ.

Ділянка траєкторії		Параметри руху
№	Точки	
1	$T_0-T_{away}$	$a=0,5\text{м/с}^2$ , $v=0\dots0,5\text{м/с}$ , $\beta=\pi/2\text{рад}$ , $\omega=0\text{рад/с}$ , $\varepsilon=0\text{рад/с}^2$ , $\alpha= \pi\text{рад}$ , $t=0\dots0,3\text{с}$ .
2	$T_{away}-T_1$	$a=0,5\text{м/с}^2$ , $v=0,5\dots0$ м/с, $\beta=\pi/2$ рад, $\omega=0\dots2,4$ рад/с, $\varepsilon=6$ рад/с <sup>2</sup> , $\alpha= \pi\dots0,625$ рад, $t=0,3\dots1,5\text{с}$ .
3	$T_1-T_2$	$a= 5\text{м/с}^2$ , $v=0\dots3\text{м/с}$ , $\beta=0$ рад, $\omega=0$ рад/с, $\varepsilon=0$ рад/с <sup>2</sup> , $\alpha= 0,625$ рад, $t=1,5\dots1,7\text{с}$ .
4	$T_2-T_3$	$a= 0\text{м/с}^2$ , $v=3\text{м/с}$ , $\beta=0$ рад, $\omega=0\dots1,3$ рад/с, $\varepsilon=3$ рад/с <sup>2</sup> , $\alpha=0,625\dots0,17$ рад, $t=1,7\dots2,3\text{с}$ .
5	$T_3-T_4$	$a= 0\text{м/с}^2$ , $v=3\text{м/с}$ , $\beta=0$ рад, $\omega=0$ рад/с, $\varepsilon=0$ рад/с <sup>2</sup> , $\alpha=0,17\dots-0,406$ рад, $t=2,3\dots2,9\text{с}$ .
6	$T_4-T_5$	$a= 5\text{м/с}^2$ , $v=3\dots0\text{м/с}$ , $\beta=0$ рад, $\omega=0\dots1,3$ рад/с, $\varepsilon=3$ рад/с <sup>2</sup> , $\alpha= -0,406$ рад, $t=2,9\dots3,1\text{с}$ .



7	$T_{5^-}$ $T_{coming}$	$a=0,5\text{м/с}^2$ , $v=0\dots0,5\text{м/с}$ , $\beta=\pi/2$ рад, $\omega=0\dots2,4$ рад/с, $\varepsilon=6$ рад/с <sup>2</sup> , $\alpha=-0,406\dots-\pi$ рад, $t=3,1\dots4,3\text{с}$ .
8	$T_{coming^-}$ $T_{end}$	$a=0,5\text{м/с}^2$ , $v=0,5\dots0$ м/с, $\beta=\pi/2$ рад, $\omega=0$ рад/с, $\varepsilon=0$ рад/с <sup>2</sup> , $\alpha=-\pi$ рад, $t=4,3\dots4,6\text{с}$ .

Результати розрахунків мінімальної необхідної сили притягання та сили лобового опору, що залежать від швидкості транспортування ОМ на різних ділянках траєкторії, представлені на Рисунку 4.4.

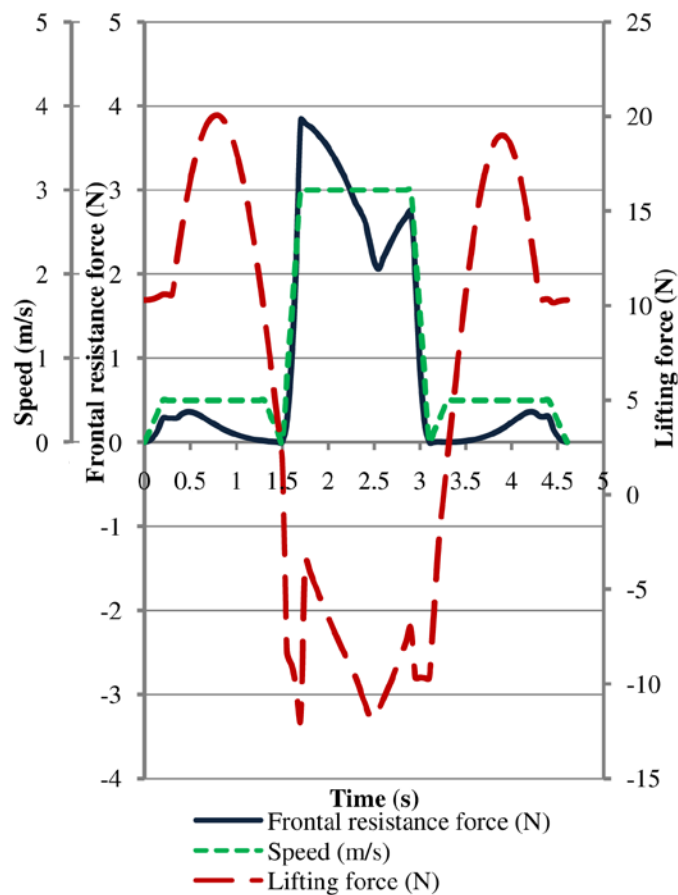


Рисунок 4.4 – Графіки залежності сил що діють на ОМ від часу виконання захоплювальної операції

Розглянемо випадок транспортування плоских деталей за допомогою утримуючого захоплювального пристрою. Рух по заданій прямолінійній траєкторії здійснюється за допомогою маніпулятора IRB 1200 (ABB), який має 6 ступенів вільності.

На ділянці прямолінійної траєкторії  $T_1$ - $T_5$  ( $t=1,5-3,1c$ ) мінімальна сила притягання приймає від'ємне значення. Це зумовлено тим, що ОМ притискується до захоплювача, за рахунок його оптимальної орієнтації (напрямок вектора рівнодійної всіх сил, що діють на ОМ протилежний до напрямку осі  $OZ$  захоплювального пристрою). Важливим є вплив сили лобового опору на ділянках  $T_{away}$ - $T_1$  та  $T_5$ - $T_{coming}$  на яких необхідно забезпечити найбільшу силу притягання протягом всього часу транспортування. Для прикладу розглянемо ділянку  $T_{away}$ - $T_1$  траєкторії на якій відбувається переорієнтація з заданої орієнтації ( $\pi$ ) на оптимальну орієнтацію ( $0,625$  рад) на наступній ділянці із одночасним підйомом (Рисунок 4.5).

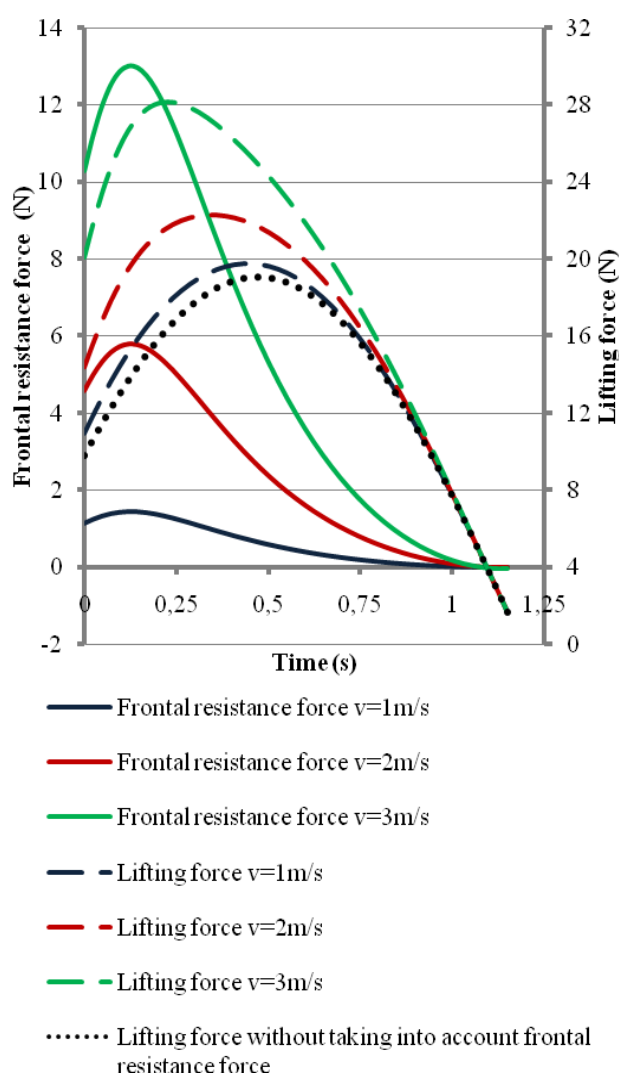


Рисунок 4.5 – Графіки зміни сили лобового опору повітря та мінімальної необхідної сили притягання СЗП на ділянці  $T_{away}$ - $T_1$

З Рисунку 4.5 очевидним є вплив сили лобового опору повітря на мінімально необхідну силу притягання, зокрема під час зростання швидкості транспортування. При переорієнтації захоплювача з утримуванням ним ОМ та його підйомом із швидкістю 3м/с сила лобового опору повітря становить 47% від мінімальної необхідної сили притягання.

Також на силу лобового опору має вплив площа міделевого січення об'єкта маніпулювання. Результати досліджень впливу габаритних параметрів ОМ на силу лобового опору та мінімальну необхідну силу притягання СЗП при сталій швидкості 2м/с представлені на Рисунку 4.6. З графіків очевидним є значний вплив габаритних розмірів об'єкта маніпулювання на силу лобового опору повітря та на мінімально необхідну силу притягання. При переорієнтації захоплювача з утримуванням ним ОМ із габаритами  $A=B=H=1.5\text{м}$  сила лобового опору повітря становить 78% від мінімальної необхідної сили притягання.

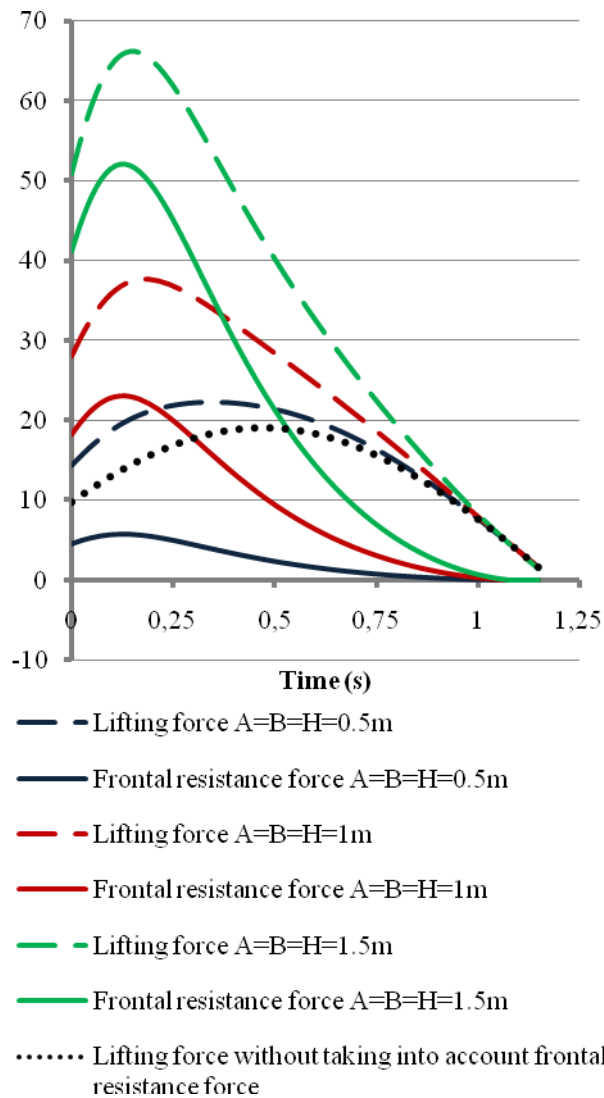


Рисунок 4.6 – Графіки зміни сили лобового опору повітря та мінімальної необхідної сили притягання СЗП на ділянці  $T_{away}-T_1$

Проаналізовано вплив сили лобового опору повітря, що діє на об'єкт маніпулювання під час виконання транспортної операції, на мінімальну необхідну силу притягання захоплювача Бернуллі. Моделювання проводилось для випадку руху об'єкта маніпулювання по прямолінійній траєкторії із застосуванням методу оптимізації орієнтації захоплювача Бернуллі. Встановлено основні закономірності впливу швидкості транспортування об'єкта та його габаритів на силу лобового опору повітря. Для заданих параметрів руху захоплювача Бернуллі встановлено, що при його швидкості 3m/s, масі об'єкта маніпулювання 1кг та розмірах 0,5x0,5x0,5м, сила лобового

опору повітря складає 47% від мінімальної необхідної сили притягання захоплювача. Встановлено, що вплив сил лобового опору у найбільшій мірі проявляється при транспортуванні габаритних об'єктів маніпулювання малої маси. Отже, при визначенні вантажопідймальності захоплювальних пристроїв, необхідно враховувати діючі на об'єкт маніпулювання у процесі транспортування сили лобового опору повітря. Це дозволить підвищити точність обчислення мінімальної необхідної сили притягання захоплювача Бернуллі для утримування об'єкта маніпулювання у процесі транспортування.

#### **4.2 Дослідження енергозатрат на виконання вантажно-розвантажувальних операцій з врахуванням параметрів захватної системи**

Під час впровадження сучасних засобів автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій із застосуванням промислових роботів використовують різні типи захоплювачів та подовжувачі [73-90]. Від вибору типу захватної системи залежить енергоефективність процесу маніпулювання об'єктами виробництва. Зазвичай задачі мінімізації енергетичних затрат на транспортування об'єктів маніпулювання промисловими роботами передбачають оптимізацію параметрів руху та траєкторії промислового робота [79-82].

Продовжуючи дану тематику доцільно дослідити вплив параметрів захватної системи (ЗС) на енергозатрати промислового робота при виконанні вантажно-розвантажувальних операцій.

Використовуючи методику оптимізації орієнтації наведену вище (Рисунок 4.3) на ділянці траєкторії  $T_1-T_2$  забезпечується оптимальна орієнтації ЗС, а на ділянках  $T_2-T_3$ ,  $T_3-T_4$  відбувається його переорієнтація для забезпечення оптимальної орієнтації на ділянці  $T_4-T_5$  (Рисунок 4.7).

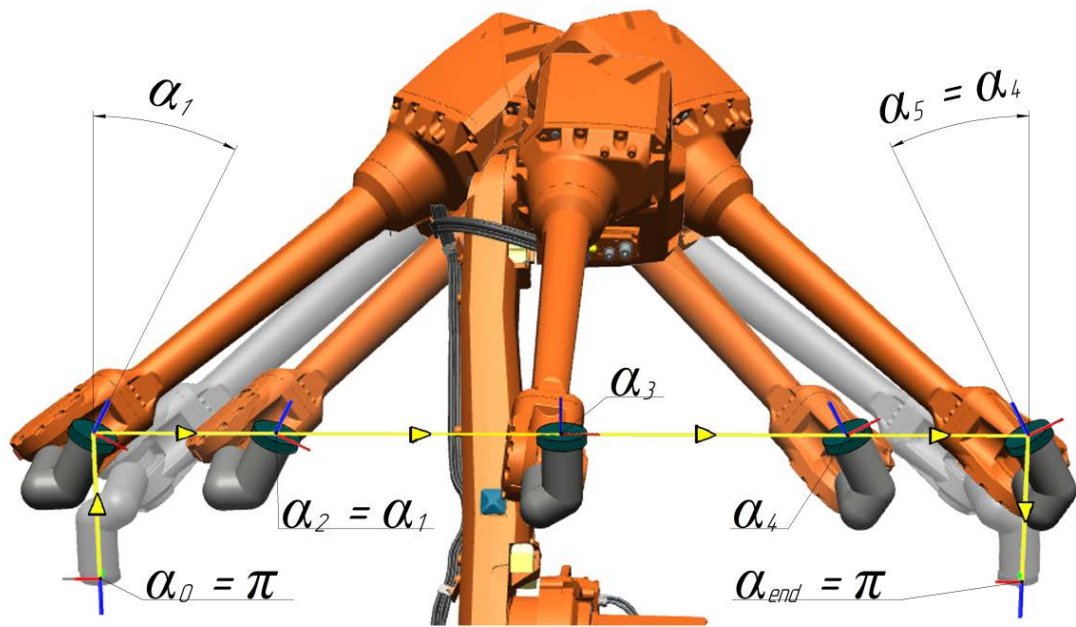


Рисунок 4.7 – Modeling of the orientation optimization method of Bernoulli gripping device in RobotStudio software environment

Мінімальна необхідна сила притягання ОМ, під час транспортування на всіх ділянках прямолінійної траєкторії, визначається з рівняння [74]:

$$F_{li} = m \left[ \begin{array}{c} g \left( \frac{\sin(\alpha)}{f} - \cos(\alpha) \right) - \\ -\omega^2 \left( \frac{E}{f} - \frac{H}{2} \right) + \\ + \varepsilon \left( \frac{H}{2f} + E \right) \end{array} \right] - (Q_1 + Q_2 + F_{in}) \left( \frac{\cos(\alpha + \beta)}{f} + \sin(\alpha + \beta) \right). \quad (4.8)$$

Для захоплення об'єктів маніпулювання використовуються захоплювачі Бернуллі, як такі які володіють рядом переваг [24-31]. Обчислення затраченої енергії роботи захоплювачем Бернуллі проводились за формулою:

$$A = N \cdot t = P \cdot Q \cdot t, \quad (4.9)$$

де  $P$  – тиск у робочій камері BGD,  $Q$  – об’ємна витрата стиснутого повітря, приведена до нормальних умов,  $N$  – споживана потужність захоплювача.

Робота затрачена маніпулятором на виконання транспортних операцій розраховувалась за допомогою функціональних можливостей програмного пакету RobotStudio (ABB group).

В результаті проведених досліджень встановлено вплив використання методу оптимізації орієнтації захоплювача Бернуллі у процесі транспортування по прямолінійній траєкторії для різних схем вантажно-розвантажувальних операцій (Рисунок 4.8).

Оптимізація орієнтації дозволила мінімізувати енергетичні затрати BG на транспортування OM. В результаті зменшились сумарні енергетичні затрати при захопленні OM за верхню горизонтальну площину – на 35%, при захопленні OM з вертикальної площини – на 54%, а при захопленні OM за нижню горизонтальну площину – на 14% [88].

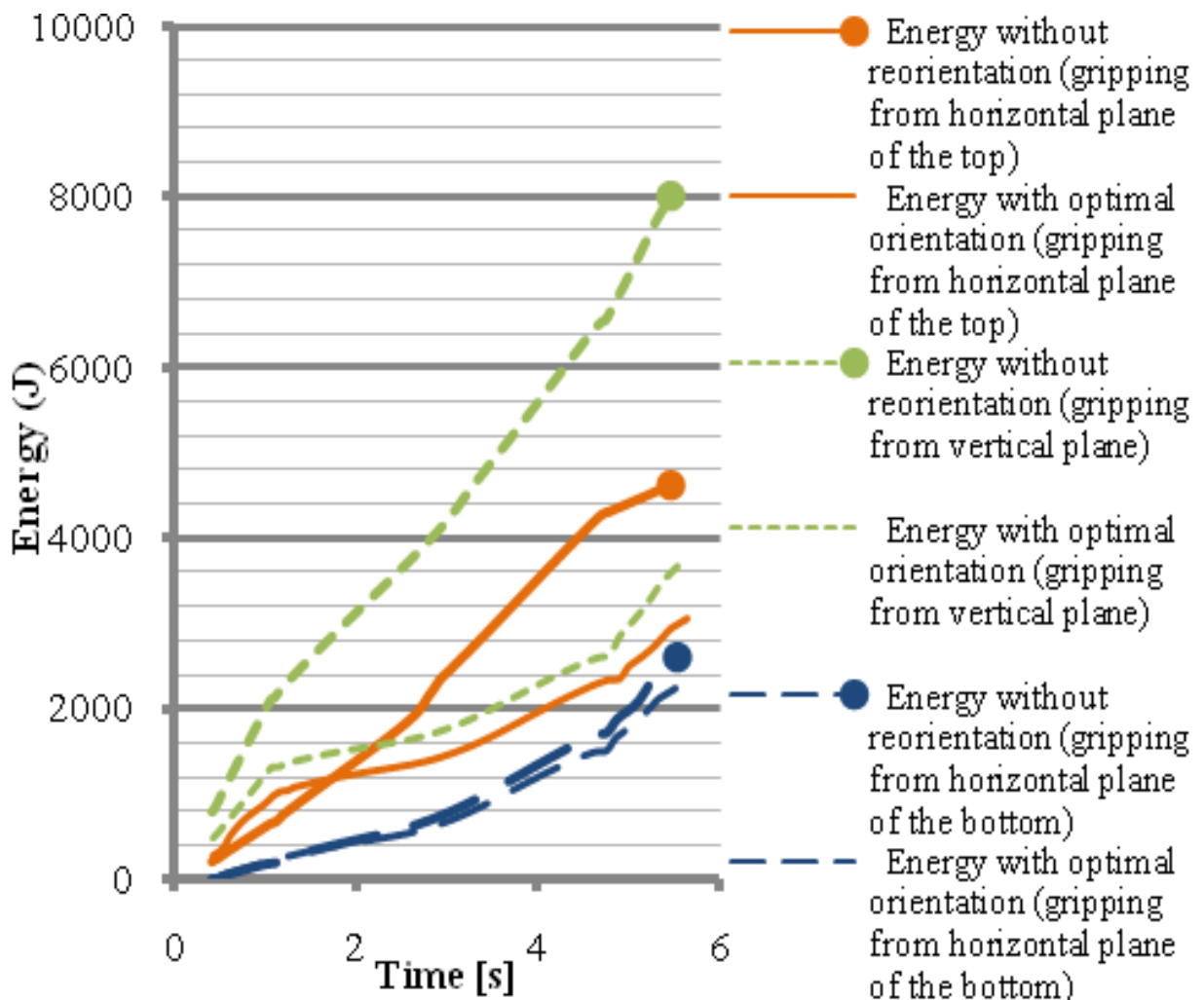


Рисунок 4.8 – Графіки сумарної затраченої енергії (ЗП та ПР) на транспортування ОМ при різних схемах вантажно-розвантажувальних операцій

Вагомий вплив на енергетичні затрати промислового робота, під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій, мають масо-габаритні параметри захоплювальної системи. Тому необхідно дослідити вплив маси, координат центру мас захоплювальної системи та її конструкції на енергетичні затрати промислового робота під час виконання транспортних операцій із застосуванням методу оптимізації орієнтації.

Для цього розглянемо вантажно-розвантажувальну операцію з транспортування ОМ по прямолінійній траєкторії (Рисунок 4.9) в програмному середовищі RobotStudio (ABB group) [82]. При цьому координати tool center point (TCP (X, Y, Z,  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ )) прийнято:



$$T_0 \begin{pmatrix} X, & Y, & Z, \\ \psi, & \theta, & \varphi \end{pmatrix}; \quad T_0 \begin{pmatrix} 750, & -450, & 779, \\ 180, & 0, & 90 \end{pmatrix};$$

$$T_1 \begin{pmatrix} 750, & -450, & 1000, \\ 0, & -27, & -90 \end{pmatrix}; \quad T_2 \begin{pmatrix} 750, & -350, & 1000, \\ 0, & -27, & -90 \end{pmatrix};$$

$$T_3 \begin{pmatrix} 750, & 0, & 1000, \\ 0, & 0, & -90 \end{pmatrix}; \quad T_4 \begin{pmatrix} 750, & 350, & 1000, \\ 0, & 27, & -90 \end{pmatrix};$$

$$T_5 \begin{pmatrix} 750, & 450, & 1000, \\ 0, & 27, & -90 \end{pmatrix}; \quad T_{end} \begin{pmatrix} 750, & 450, & 600, \\ 180, & 0, & 90 \end{pmatrix}.$$

де  $\psi$  – кут орієнтації локальної системи координат відносно осі OX,  $\theta$  – кут орієнтації локальної системи координат відносно осі OY,  $\varphi$  – кут орієнтації локальної системи координат відносно осі OZ. Для визначення оптимальної орієнтації прийнято:  $a=5$  м/с<sup>2</sup>,  $v=0,25$ м/с,  $m=1$ кг,  $f=0,6$ ,  $A=0,2$  м,  $B=0,2$  м,  $H=0,003$  м,  $E=0$  м,  $\beta=0$  рад,  $\omega=0$  рад/с,  $\varepsilon=0$  рад/с<sup>2</sup>,  $d=0,05$  м,  $c=0,025$  м.

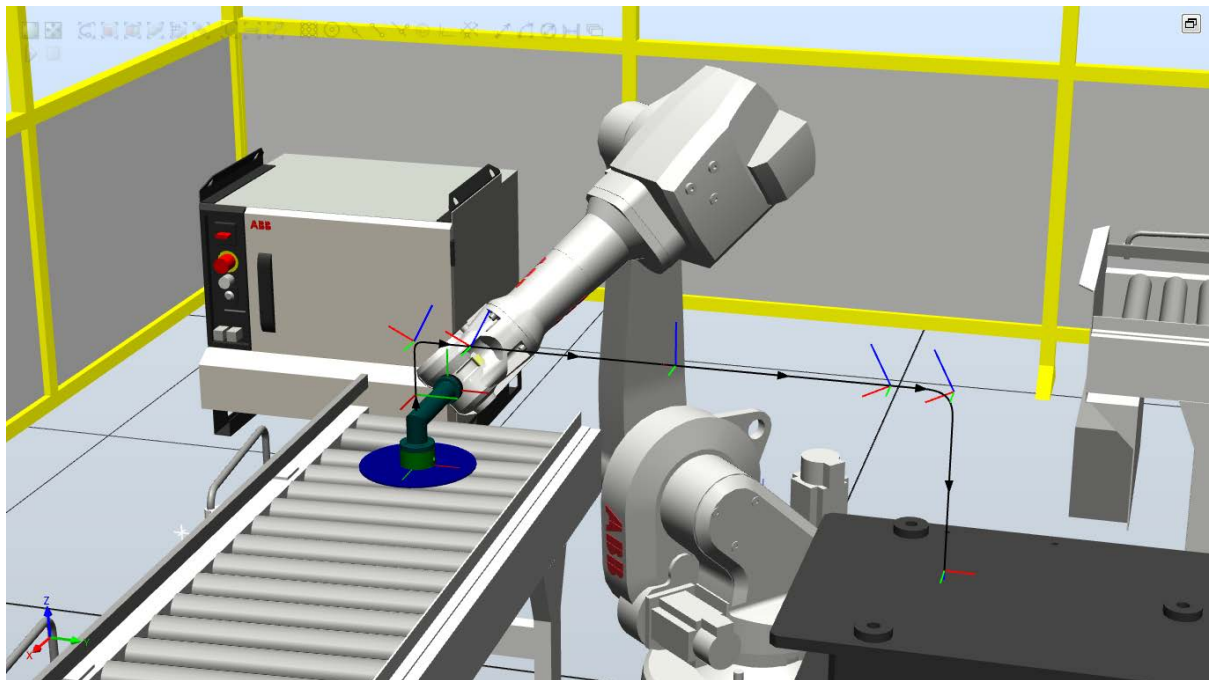


Рисунок 4.9 – Схема транспортування із застосуванням методу оптимізації орієнтації ЗС на базі промислового робота ABB IRB 1600-10-1.45

Для розширення діапазону кутів орієнтації  $\alpha$  доцільно використовувати орієнтуючий подовжувач (Рисунок 4.10). Такий самий підхід використовують при роботизації дугової зварки деталей. Варіанти конструктивного виконання орієнтуючих подовжувачів представлені на (Рисунок 4.10), а принцип дії захоплювача Бернуллі на (Рисунок 4.11).

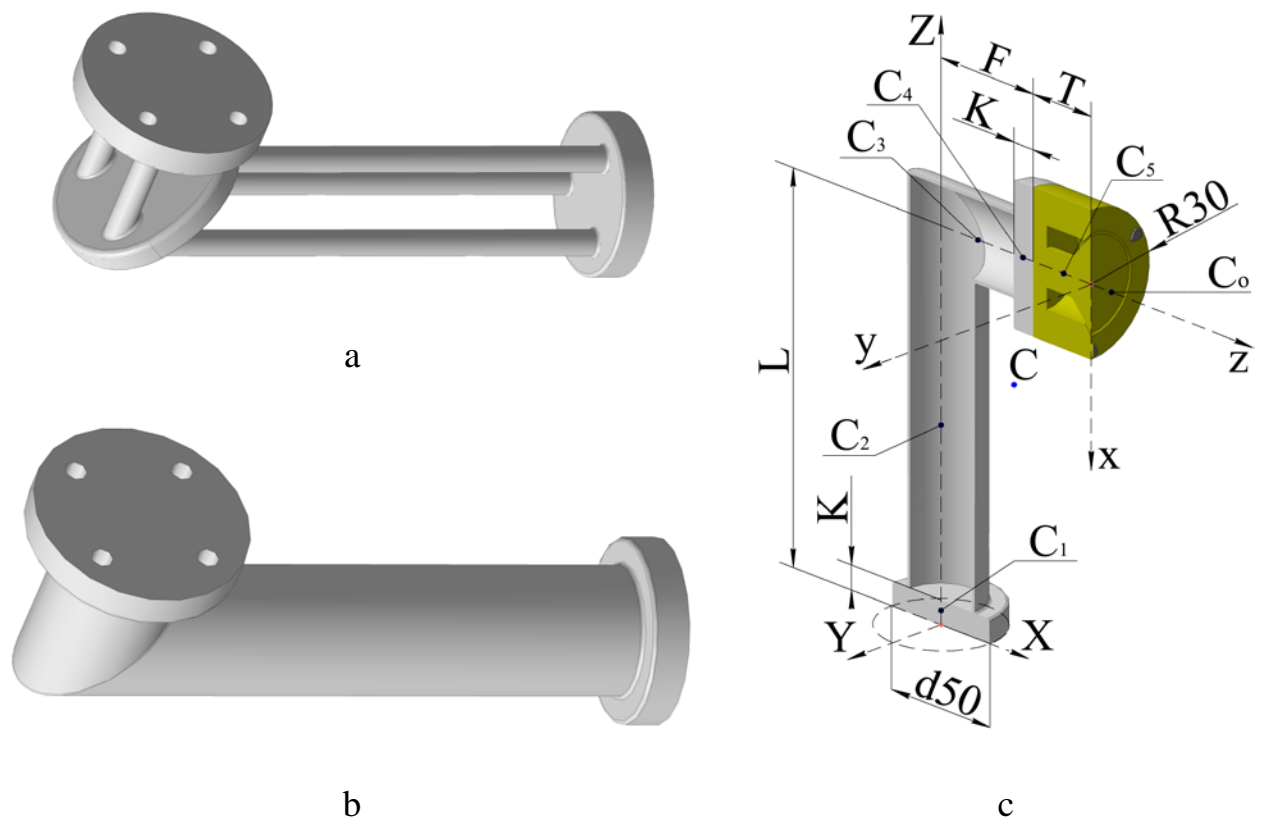


Рисунок 4.10 – а, b – 3D моделі орієнтуючих подовжувачів, с – геометричні параметри трубчастого подовжувача ( $C_1(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $C_2(X_2, Y_2, Z_2)$ ,  $C_3(X_3, Y_3, Z_3)$ ,  $C_4(X_4, Y_4, Z_4)$ ,  $C_5(X_5, Y_5, Z_5)$  – координати центру мас елементів ЗС;  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  – маса елементів ЗС,  $C_0(X_0, Y_0, Z_0)$ ,  $m_0$  – координати центру мас та маса ОМ)

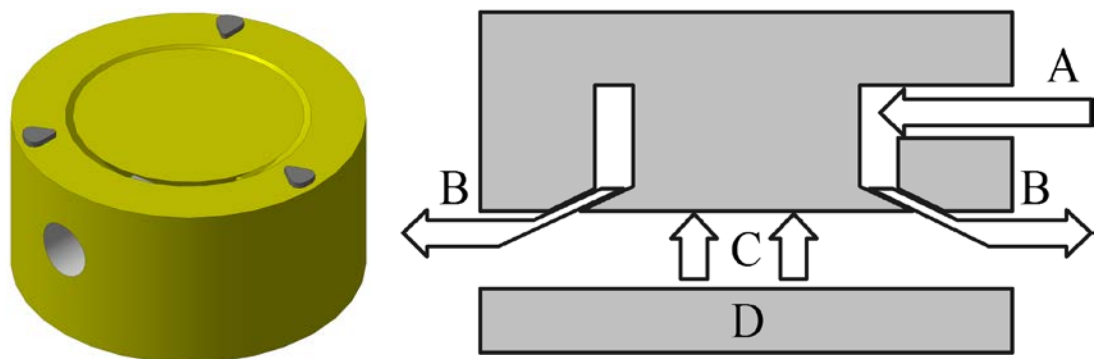


Рисунок 4.11 – 3D модель захоплювача Бернуллі та принцип його дії: А – compressed air, В – air flow, С – lifting capacity, D – object

Координати центру мас захватної системи «орієнтуючий подовжувач-захоплювальний пристрій-об'єкт маніпулювання»  $C(X_c, Y_c, Z_c)$ , визначається за допомогою формули:

$$X_c = \frac{\sum X_i m_i}{\sum m_i}, \quad Y_c = \frac{\sum Y_i m_i}{\sum m_i}, \quad Z_c = \frac{\sum Z_i m_i}{\sum m_i}, \quad (4.10)$$

де  $X_i, Y_i, Z_i$  – координати центру мас елементарних частин об'єкту, які об'єднані або вилучені з моделі, а  $m_i$  їх маса.

В нашому випадку центр мас захватної системи (Рисунок 4.10) з об'єктом маніпулювання буде визначатися за допомогою формули:

$$\begin{cases} X_c = \frac{X_1 m_1 + X_2 m_2 + X_3 m_3 + X_4 m_4 + X_5 m_5 + X_o m_o}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_o}, \\ Y_c = \frac{Y_1 m_1 + Y_2 m_2 + Y_3 m_3 + Y_4 m_4 + Y_5 m_5 + Y_o m_o}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_o}, \\ Z_c = \frac{Z_1 m_1 + Z_2 m_2 + Z_3 m_3 + Z_4 m_4 + Z_5 m_5 + Z_o m_o}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_o}. \end{cases} \quad (4.11)$$

Проте, для складних об'єктів координати центру мас визначаються за допомогою систем САД для проектування 3D моделей (AutoCAD, Kompas-3D, SolidWorks і т.д.).

При проектуванні СЗП та орієнтуючих подовжувачів необхідно намагатися знизити їх масу, тому що вона суттєво впливає на функціонування робота. Значення граничного навантаження, тобто маси яка може бути закріплена на приєднувальному фланці маніпулятора, впливає на швидкість виконання робочих рухів ПР, що є важливим з точки зору тривалості робочого циклу. Отже, чим менше навантаження на приєднувальному фланці ПР тим з більшою швидкістю він може переміщуватись. Тому слід виготовляти СЗП та

орієнтуючі подовжувачі з легких матеріалів (алюміній, пластмаси та ін.), і скрізь де це можливо, робити вибірку лишнього матеріалу.

Також СЗП та орієнтуючий подовжувач повинні мати якомога менші габарити. Зменшення габаритів даних пристроїв дозволяє знизити їх масу та економить робочий простір ПР. Що стосується ПР, то розрахунок його граничного навантаження пов'язаний з розрахунком моменту інерції останньої ланки маніпулятора, тобто загального навантаження, яке знаходиться на певній відстані від поверхні приєднувального фланця. Тому, чим менші габарити і чим ближче до приєднувального фланця знаходиться центр тяжіння захватної системи, тим кращі експлуатаційні характеристики ПР.

При конструюванні орієнтуючих подовжувачів необхідно враховувати, що при їх недостатній жорсткості існує можливість виникнення коливань ЗС на ділянках розгону і гальмування ПР. Для конструкцій орієнтуючих подовжувачів представлених на Рисунок 4.10 можливе виникнення як поперечних так і крутильних коливань. Оскільки сучасні ПР можуть переміщувати ЗС з великими швидкостями та прискореннями, така вібрація може призвести до погіршення точності позиціонування та стабільності утримування об'єктів маніпулювання, а в деяких випадках - до пошкодження або руйнування останніх. Для уникнення таких вібрацій необхідно підвищувати жорсткість конструкції орієнтуючого подовжувача. Враховуючи також вимоги до маси орієнтуючого подовжувача, більш раціональною буде конструкція трубчастого подовжувача (Рисунок 4.10, b).

Проведемо моделювання процесу транспортування ОМ різної маси із оптимізацією орієнтації ЗП використовуючи захватну систему (Рисунок 4.10,b)  $m=0,39\text{кг}$ , у програмному середовищі RobotStudio (ABB group) [37] (Рисунок 4.12).

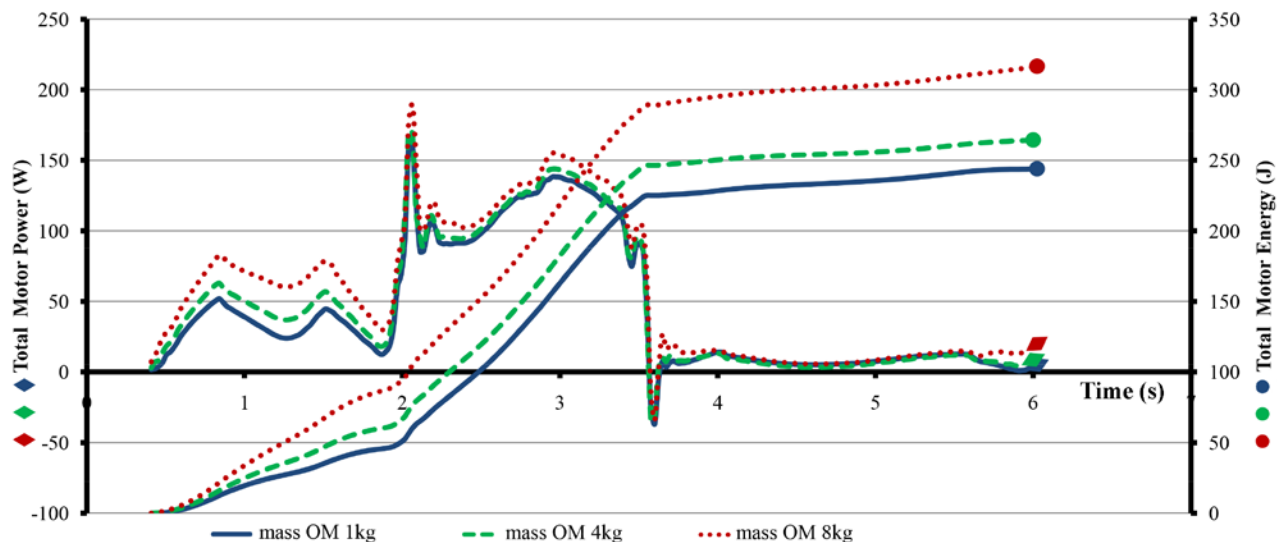


Рисунок 4.12 – Графік максимальної потужності моторів та енергетичних затрат промислового робота під час транспортування ОМ із оптимізацією орієнтації ЗС (ЗС  $m=0,39\text{кг}$ )

Як видно з Рисунок 4.12 енергетичні затрати та напруга (подана на двигуни) ПР на транспортування ОМ зростають із збільшенням маси ОМ та віддалення його центру мас від фланця ПР. Це пов'язано із зростанням моменту зовнішніх сил, що діють на ЗС в цілому:

$$\sum_i M_i = I \frac{d\vec{\omega}}{dt}, \quad (4.12)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість,  $I$  – момент інерції.

Для конструкції трубчастого-подовжувача (Рисунок 4.10,b) моменти інерції по осях будуть приймати такі значення (ОМ розглядається як матеріальна точка):

$$\begin{aligned}
I_x &= \frac{1}{3}m_1K^2 + \frac{1}{3}m_2(L-K-r)^2 + m_2K^2 + m_3r^2 + \\
&+ \frac{1}{2}m_4R^2 + m_4L^2 + \frac{1}{2}m_5R^2 + m_5L^2 + m_oL^2, \\
I_y &= \frac{1}{3}m_1K^2 + \frac{1}{3}m_2(L-K-r)^2 + m_2K^2 + \frac{1}{3}m_4K^2 + \\
&+ \frac{1}{12}m_3(F-K+r)^2 + m_3(X_3^2 + L^2) + m_4((F-K)^2 + L^2) + \\
&+ \frac{1}{3}m_5T^2 + m_5(F^2 + L^2) + m_o(X_o^2 + Z_o^2), \\
I_z &= \frac{1}{2}m_1\left(\frac{d}{2}\right)^2 + m_2r^2 + \frac{1}{12}m_3(F-K+r)^2 + m_3X_3^2 + \\
&+ \frac{1}{3}m_4K^2 + m_4(F-K)^2 + \frac{1}{3}m_5T^2 + m_5F^2 + m_oX_o^2,
\end{aligned} \tag{4.13}$$

де  $r$  – радіус тонкостінної труби подовжувача.

Доцільно визначити вплив параметрів  $L$  та  $K$  захватної системи на енергетичні затрати під час виконання вантажно-розвантажувальної операції промисловим роботом (Рисунок 4.13-4.14). Графіки на Рисунок 4.13-4.14 відповідають параметрам зведеним у Таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри захватної системи

Зміщення $L$ (м)	Параметри	ТСП	Центр мас з ОМ $m=1\text{кг}$	Центр мас з ОМ $m=4\text{кг}$	Центр мас з ОМ $m=8\text{кг}$
0,04	$K=40\text{mm}$	(71,0,40)	(64,0,39) $m=1,34$	(71,0,40) $m=4,34$	(72,0,40) $m=8,34$
0,09		(71,0,90)	(63,0,86) $m=1,36$	(71,0,89) $m=4,36$	(72,0,89) $m=8,36$
0,14		(71,0,140)	(62,0,132) $m=1,39$	(70,0,138) $m=4,39$	(72,0,139) $m=8,39$
0,19		(71,0,190)	(61,0,178) $m=1,4$	(70,0,186) $m=4,4$	(71,0,188) $m=8,4$
0,24		(71,0,240)	(61,0,224) $m=1,42$	(69,0,235) $m=4,42$	(71,0,237) $m=8,42$
0,29		(71,0,290)	(60,0,268) $m=1,45$	(69,0,283) $m=4,45$	(71,0,286) $m=8,45$
Зміщення $K$ (м)	Параметри	ТСП	Центр мас з ОМ $m=1\text{кг}$	Центр мас з ОМ $m=4\text{кг}$	Центр мас з ОМ $m=8\text{кг}$
0,04	$L=40\text{mm}$	(71,0,40)	(64,0,39) $m=1,34$	(71,0,40) $m=4,34$	(72,0,40) $m=8,34$
0,09		(121,0,40)	(110,0,38) $m=1,36$	(120,0,40) $m=4,36$	(121,0,40) $m=8,36$
0,14		(171,0,40)	(156,0,39) $m=1,38$	(168,0,40) $m=4,38$	(171,0,40) $m=8,38$
0,19		(221,0,40)	(201,0,39) $m=1,4$	(216,0,40) $m=4,4$	
0,24		(271,0,40)	(245,0,39) $m=1,42$	(265,0,40) $m=4,42$	
0,29		(321,0,40)	(289,0,39) $m=1,45$	(312,0,40) $m=4,45$	

Аналіз графіків доводить, що параметри орієнтуючого подовжувача  $K$  та  $L$  мають суттєвий вплив на енергетичні затрати, а характер цього впливу близький до параболічного. Так, наприклад, для маси захватної системи 8кг, при збільшенні довжини  $L$  на 0,25м, енергозатрати зростуть в 1,6 рази. Отже, при проектуванні захватних систем, необхідно комплексно вирішувати

завдання розширення діапазону кутів орієнтації разом із завданням мінімізації параметрів  $K$  та  $L$  орієнтуючого подовжувача. Збільшення геометричних параметрів  $K$  та  $L$  орієнтуючого подовжувача призводить до збільшення моменту інерції захватної системи та зростання крутного моменту на валах електродвигунів. При певних параметрах руху ланок маніпулятора, електродвигун однієї з ланок може досягнути максимально допустимої потужності (Рисунок 4.13, графік для  $m=8\text{кг}$ ).

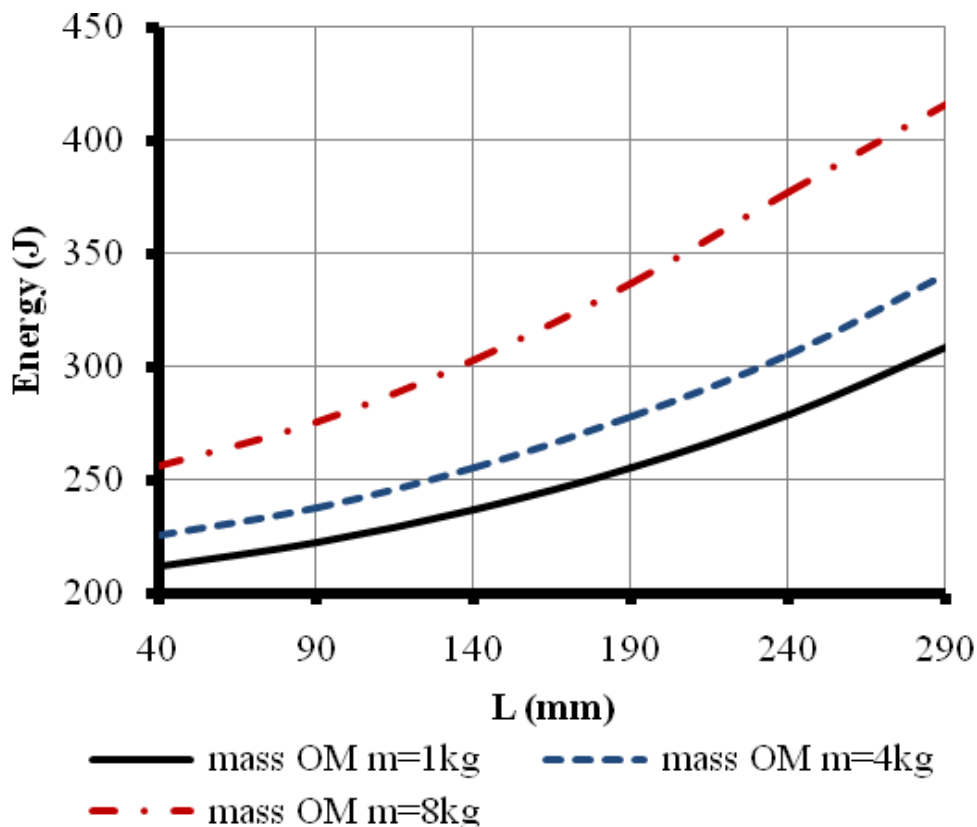


Рисунок 4.13 – Графік впливу параметру  $L$  на енергетичні затрати під час транспортування промисловим роботом ОМ різної маси

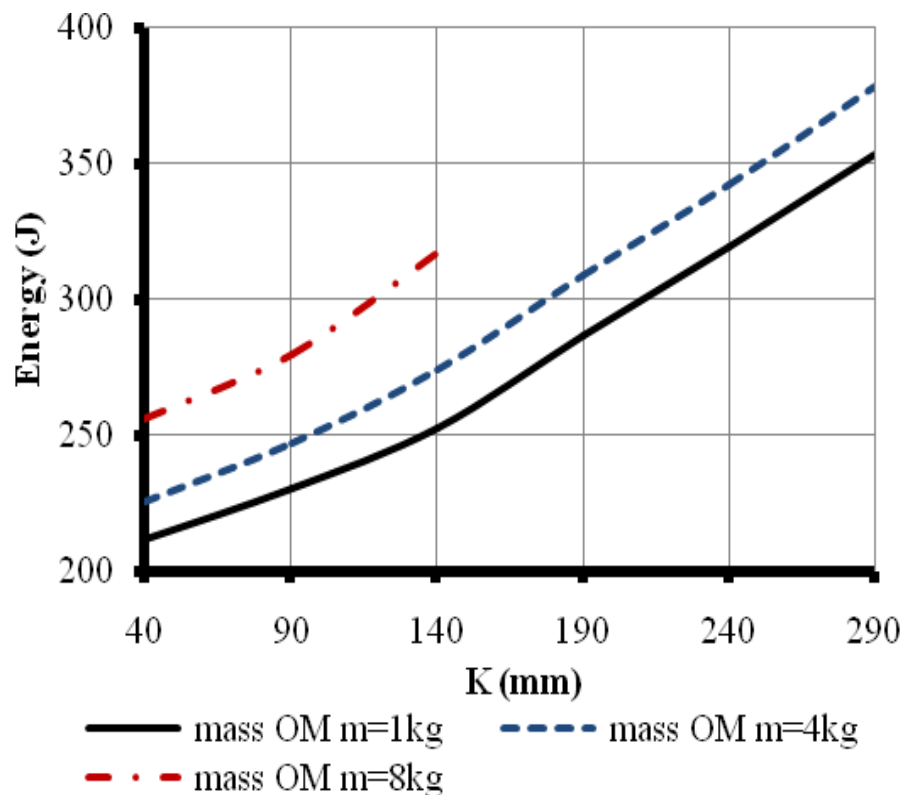


Рисунок 4.14 – Графік впливу параметру  $K$  на енергетичні затрати під час транспортування промисловим роботом OM різної

В результаті проведеного аналізу встановлено, що дослідженням впливу параметрів захватної системи на енергоефективність виконання вантажно-розвантажувальної операції не було приділено достатньої уваги. Запропоновано конструкції орієнтуючих-подовжувачів для СЗП та встановлено технічні вимоги до їх габаритів, маси та жорсткості. Для заданих параметрів захватної системи доведено, що збільшення геометричних параметрів орієнтуючого-подовжувача призводить до зростання енергетичних затрат на виконання транспортних операцій в 1,6 рази. Запропоновано залежності для розрахунку координат центру мас захватної системи та її моменту інерції. Визначено сумарну потужність та енергетичні затрати промислового робота на транспортування об'єкта маніпулювання із оптимізацією орієнтації захватної системи.



### **4.3 Дослідження енергоефективності маніпулювання габаритними об'єктами з використанням пневматичних захоплювальних пристроїв**

Вагомий вплив на загальні енергетичні затрати при виконанні вантажно-розвантажувальних операцій мають масо-габаритні параметри об'єкта. Зазвичай для захоплення габаритних об'єктів використовують комбінацію декількох пневматичних захоплювальних пристроїв. До основних представників пневматичних захоплювальних пристроїв можна віднести: Бернуллі, вихрові та вакуумні захоплювачі. Тому необхідно дослідити енергетичні затрати на виконання вантажно-розвантажувальних операцій із використанням захоплювальних систем (ЗС) на разі вище перерахованих захоплювальних пристроїв.

У роботі [82] досліджений процес транспортування вантажів по прямолінійній траєкторії із використання методу оптимізації орієнтації. Вплив параметрів захоплювальної системи на енергетичні затрати промислового робота під час транспортування дослідженні в статті [83]. При цьому для захоплення та утримуванні ОМ у процесі маніпулювання використовувався лише один захоплювач Бернуллі. Для габаритних ОМ необхідно використовувати групу захоплювальних пристроїв змонтованих на спільній рамі. Таке конструктивне рішення дозволить підвищити вантажопідіймальність ЗС та покращити стабільність утримування ОМ, за рахунок максимального розсосередження сил, що діятимуть на об'єкт під час маніпулювання. Для аналізу енергозатрат розглянемо транспортування об'єкта масою 4кг та габаритами 0.5x0.5 метра. Для транспортування без оптимізації орієнтації використаємо типову рамну конструкцію із трьома захватами (Рисунок 4.15,a,b,c).

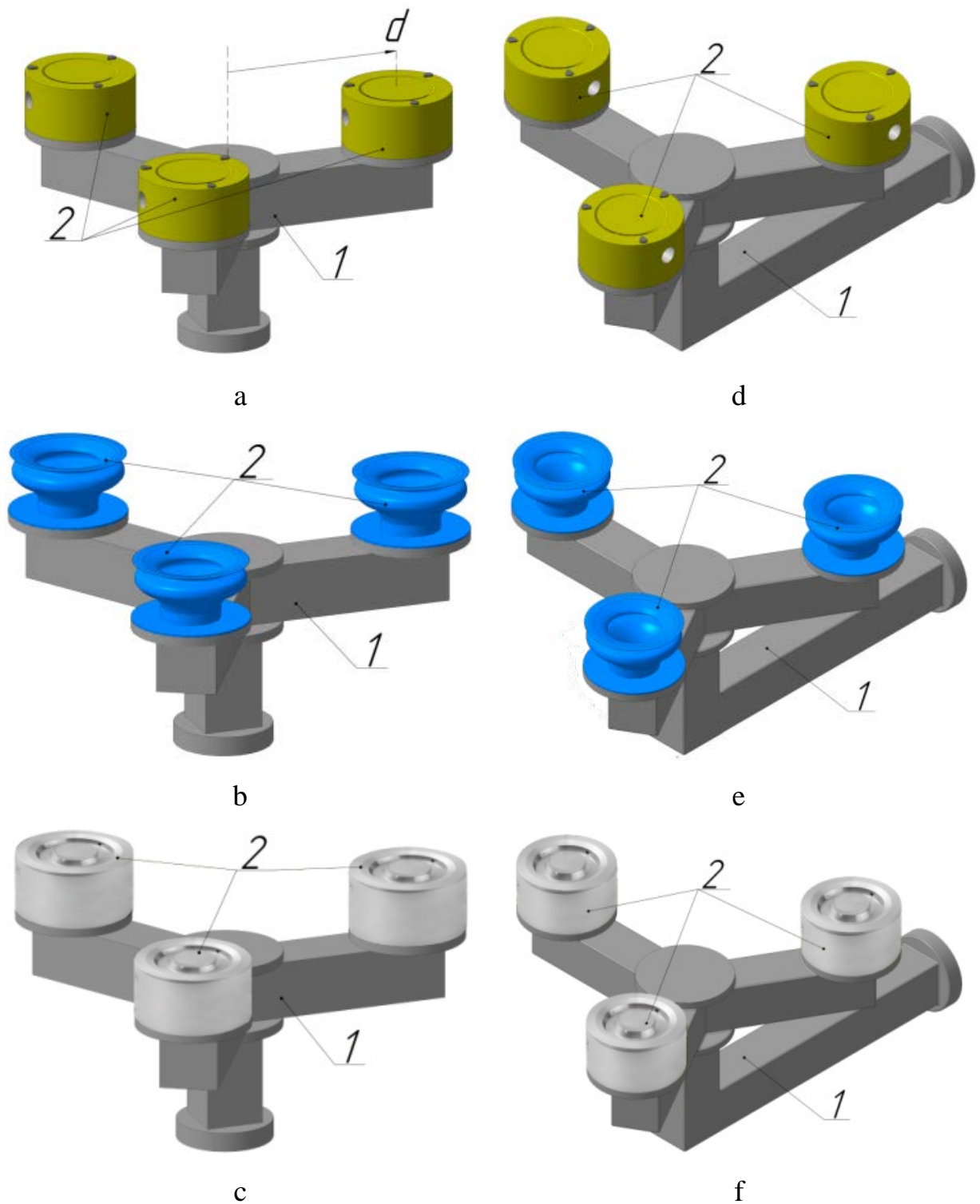


Рисунок 4.15 – Конструкції захватних систем: 1 захоплювачі, 2 подовжувачі

Для транспортування об'єктів з оптимізацією орієнтації в конструкції ЗС необхідно використати орієнтуючий подовжувач. Він дозволить розширити діапазон можливих положень ЗС у просторі (Рисунок 4.15,d,e,f). Оптимальна орієнтація під час моделювання знаходиться за допомогою формули (1), в якій

відстань від центру захвата до фрикційних елементів  $d$  замінюється відстанню від осі захватної системи до осі захоплювального пристрою (Рисунок 4.15,а).

Проведемо моделювання процесу транспортування за схемою відповідно до Рисунок 4.3. Для цього обчислимо мінімальну необхідну силу притягання захватної системи за допомогою формули (2) на всіх ділянках траєкторії. Результати розрахунків мінімальної необхідної сили для різних ділянок траєкторії та маси ОМ подано в Таблиці 1. Розрахунки проведені при таких параметрах:  $f=0,6$ ,  $A=0,5\text{м}$ ,  $B=0,5\text{м}$ ,  $H=0,05\text{м}$ ,  $E=0\text{м}$ ,  $\omega=0\text{рад/с}$ ,  $\varepsilon=0\text{рад/с}^2$ ,  $d=0,1\text{м}$ ,  $c=0,05\text{м}$ . Координати tool center point (ТСР):

$$T \begin{pmatrix} x, & y, & z, \\ \alpha, & \beta, & \varphi \end{pmatrix}; T_0 \begin{pmatrix} 750, & -450, & 435, \\ 180, & 0, & 90 \end{pmatrix}; T_1 \begin{pmatrix} 750, & -450, & 900, \\ 0, & -27, & -90 \end{pmatrix};$$

$$T_2 \begin{pmatrix} 750, & -350, & 900, \\ 0, & -27, & -90 \end{pmatrix}; T_3 \begin{pmatrix} 750, & 0, & 900, \\ 0, & 0, & -90 \end{pmatrix}; T_4 \begin{pmatrix} 750, & 350, & 900, \\ 0, & 27, & -90 \end{pmatrix};$$

$$T_5 \begin{pmatrix} 750, & 450, & 900, \\ 0, & 27, & -90 \end{pmatrix}; T_{\text{co min g}} \begin{pmatrix} 750, & 450, & 700, \\ 180, & 0, & 90 \end{pmatrix}; T_{\text{end}} \begin{pmatrix} 750, & 450, & 478, \\ 180, & 0, & 90 \end{pmatrix}.$$

Таблиця 4.3 – Сила притягання впродовж траєкторії

Спосіб транспортування	T <sub>0</sub> -T <sub>1</sub> , T <sub>5</sub> -T <sub>end</sub>		T <sub>1</sub> -T <sub>5</sub>	
	Параметри для розрахунку	мін F <sub>li</sub> , Н	Параметри для розрахунку	мін F <sub>li</sub> , Н
Без оптимізації орієнтації	$a=11\text{м/с}^2$ , $v=0,2\text{м/с}$ , $\beta=\pi/2$ рад, $\alpha=\pi$ .	84	$a=22\text{м/с}^2$ , $v=0,5\text{м/с}$ , $\beta=0$ рад, $\alpha=\pi$ .	186
З оптимізацією орієнтації	$a=0,5\text{м/с}^2$ , $v=0,3\text{м/с}$ , $\beta=\pi/2$ рад, $\alpha=\pi \dots 0,472$ , $-0,472 \dots \pi$ рад.	80	$a=5\text{м/с}^2$ , $v=0,6\text{м/с}$ , $\beta=0$ рад, $\alpha=0,472 \dots -0,472$ рад.	-5

Знаючи мінімальну необхідну силу притягання захоплювальних пристроїв можна підібрати необхідні модифікації пневматичних захоплювальних пристроїв (ПЗП) відомих компаній, які задовольняли б максимальну силу

притягання для забезпечення безвідривного транспортування ОМ. Згідно даних наведених в таблиці 1. необхідно забезпечити силу притягання 186 Н за допомогою трьох захоплювачів, тобто один захоплювач повинен забезпечувати силу притягання не менше 62 Н. У таблиці 4.4 представлено модифікації ПЗП, які задовольняють вище згадану умову.




Для порівняльного аналізу вибраних ПЗП доцільно скористатися так званим *C – Factor* [86] (Рисунок 4.16). Як зазначено в [89], *C – Factor* ЗП може бути обчислений як відношення сили, яку він утворює, до своєї ваги, і помножине це відношення на хід. Отримане значення, є показником ефективності захвату і може бути використане для порівняння між різними виробами, конструкціями, тощо.

Для розрахунку потужності ПЗП використовується формула [40]:

$$\dot{E} = P_a Q \ln(P_u / P_a), \quad (4.14)$$

де  $P_a$  - атмосферний тиск;  $P_u$  - тиск в системі; і  $Q$  витрата в стандартному стані.

Таблиця 4.4 – Пневматичні захоплювальні пристрої

Тип	Назва	Компанія	Вигляд
Bernoulli (BGD)	SBS 120 HF G1/8-IG	Schmalz	
Vacuum (VP)	ZHP 60 BM N B – 15 C6	SMC	
Vortex (VG)	XT661 – 10A – R	SMC	

З Рисунок 4.16 очевидно, що розглядаючи енергетичні показники захоплювачів різних типів, перевагу має Вакуумний захоплювач. Проте не завжди є можливість використати вакуумні захоплювачі. До таких причин можна віднести: наявність отворів в ОМ; нежорсткі або пружні ОМ; ОМ що мають тонкі покриття не стійкі до стирання; ОМ з пористого матеріалу. Тому в подальшому розглянемо процес транспортування ОМ використовуючи всі три типи захоплювачів.

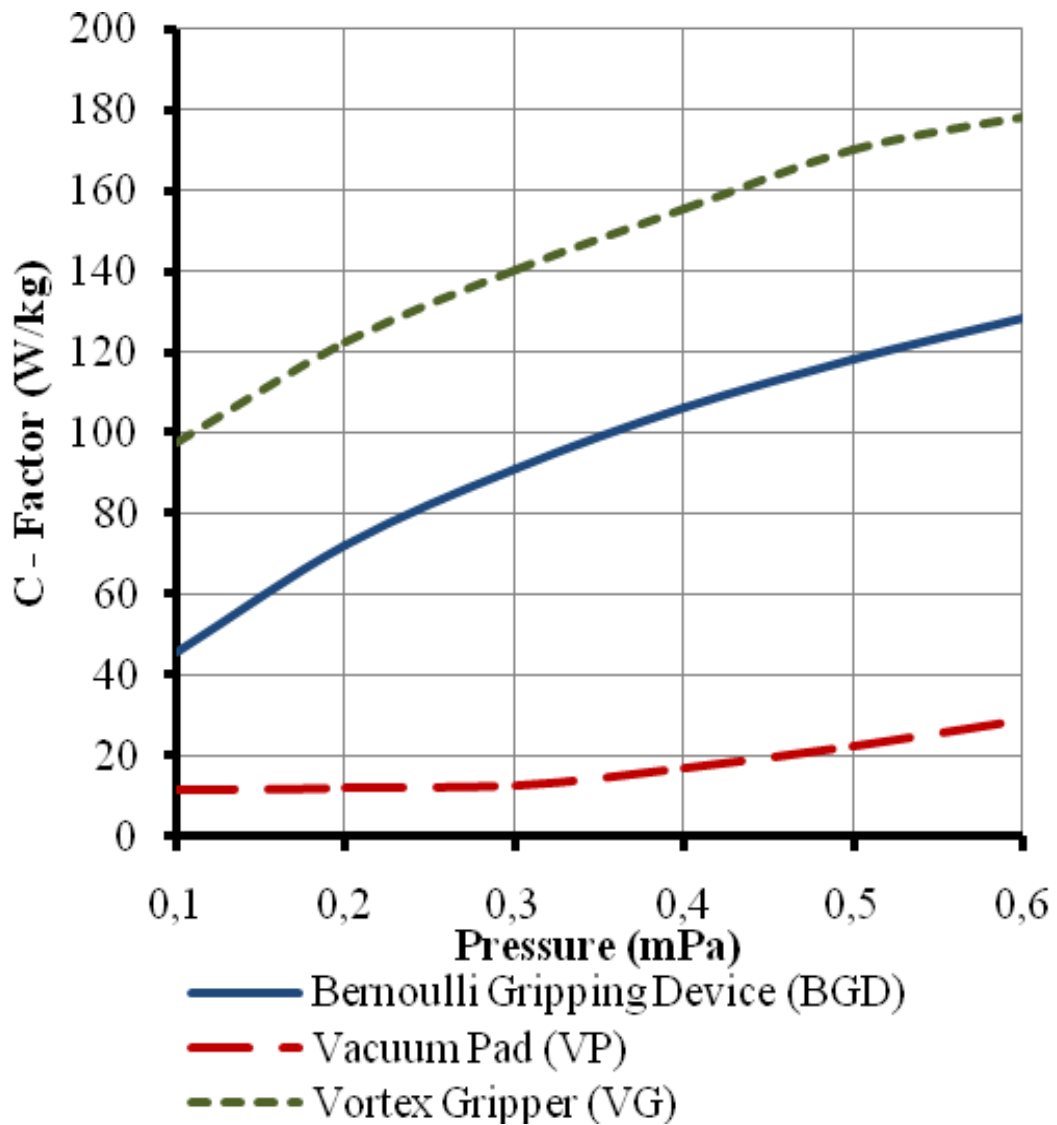


Рисунок 4.16 – Залежність C – Factor від тиску живлення ЗП

Маючи технічні характеристики захоплювальних пристроїв можна знайти параметри при яких буде відбуватися вантажно-розвантажувальна операції (Таблиця 4.5). Для знаходження мінімально необхідного розрідження в чашці захоплювача із діаметром внутрішнього присосу 45,8мм використовується формула:

$$\rho_v \geq \frac{4F_{li}}{\pi d_v^2}, \quad (4.15)$$

де  $F_{li}$  – сила притягання,  $d_v$  – діаметр зони розрідження.

Таблиця 4.5 – Параметри пневматичних захоплювальних пристроїв

Метод транспортування	$T_0-T_1, T_5-T_{end}$						
	мін $F_{li}, N$	BGD		VP		VG	
		P, бар	Q, л/хв	P, бар	Q, л/хв	P, бар	Q, л/хв
Без оптимізації орієнтації	84	1.6	112	1	40	2.5	175
З оптимізацією орієнтації	80	1.54	108	0.95	37	2.4	170
Метод транспортування	$T_1-T_5$						
	мін $F_{li}, N$	BGD		VP		VG	
		P, бар	Q, л/хв	P, бар	Q, л/хв	P, бар	Q, л/хв
Без оптимізації орієнтації	186	3.58	251	1.7	54	5.5	350
З оптимізацією орієнтації	-5	0	0	0	0	0	0

Знаючи мінімальну необхідну силу притягання для всіх ділянок траєкторії, можна знайти енергозатрати захоплювальних систем необхідні для безвідривного утримування ОМ під час транспортування (Рисунок 4.17). Для розрахунку енергетичних затрат кожного із захватів використано формулу (4.14).

Визначимо затрати енергії на транспортування ОМ масою 4кг промисловим роботом ABB IRB 1600-10-1.45. Моделювання проведемо за допомогою програмного середовища RobotStudio (ABB group) [37]. Для підвищення точності моделювання необхідно задати значення спільного центру мас ЗС та ОМ.

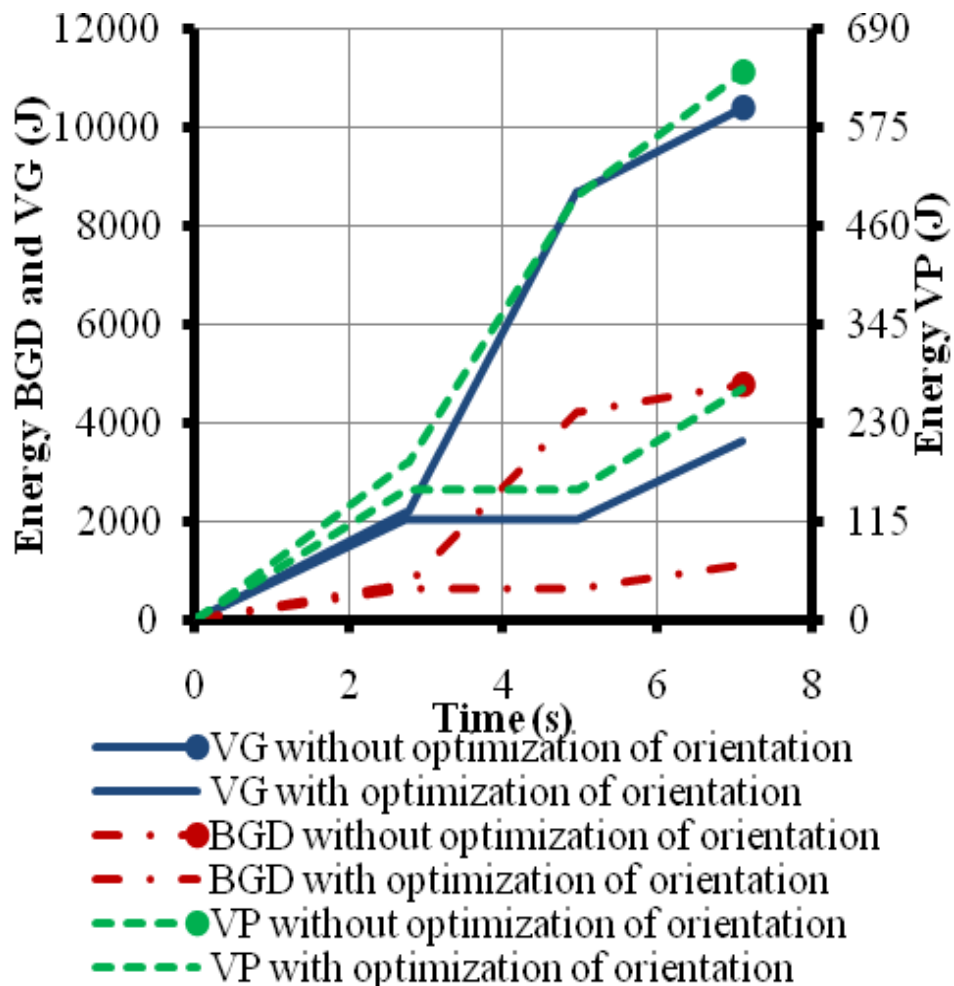


Рисунок 4.16 – Енергоспоживання ЗС на базі BGD, VP and VG у процесі транспортування об'єкта маніпулювання

Так для транспортування без оптимізації орієнтації із захоплювачами Бернуллі та Вихровими (Рисунок 4.15,а,с) координати центру мас захватної системи матимуть значення  $(0, 0, 130)$  та масу  $m=5\text{кг}$ , а для вакуумної захватної системи (Рисунок 4.15,б)  $(0, 0, 131)$  і  $m=4.56\text{кг}$ . Для транспортування з оптимізацією орієнтації із захоплювачами Бернуллі та Вихровими (Рисунок 4.15,д,ф) координати центру мас захватної системи матимуть значення  $(127, 0, 206)$  та маса  $m=5.2\text{кг}$ , а для вакуумної захватної системи (Рисунок 4.15,е)  $(128, 0, 206)$  і  $m=4.7\text{кг}$ .

Проведемо моделювання процесу транспортування в програмному середовищі RobotStudio для всіх параметрів захватних систем (Рисунок 4.17-18.).



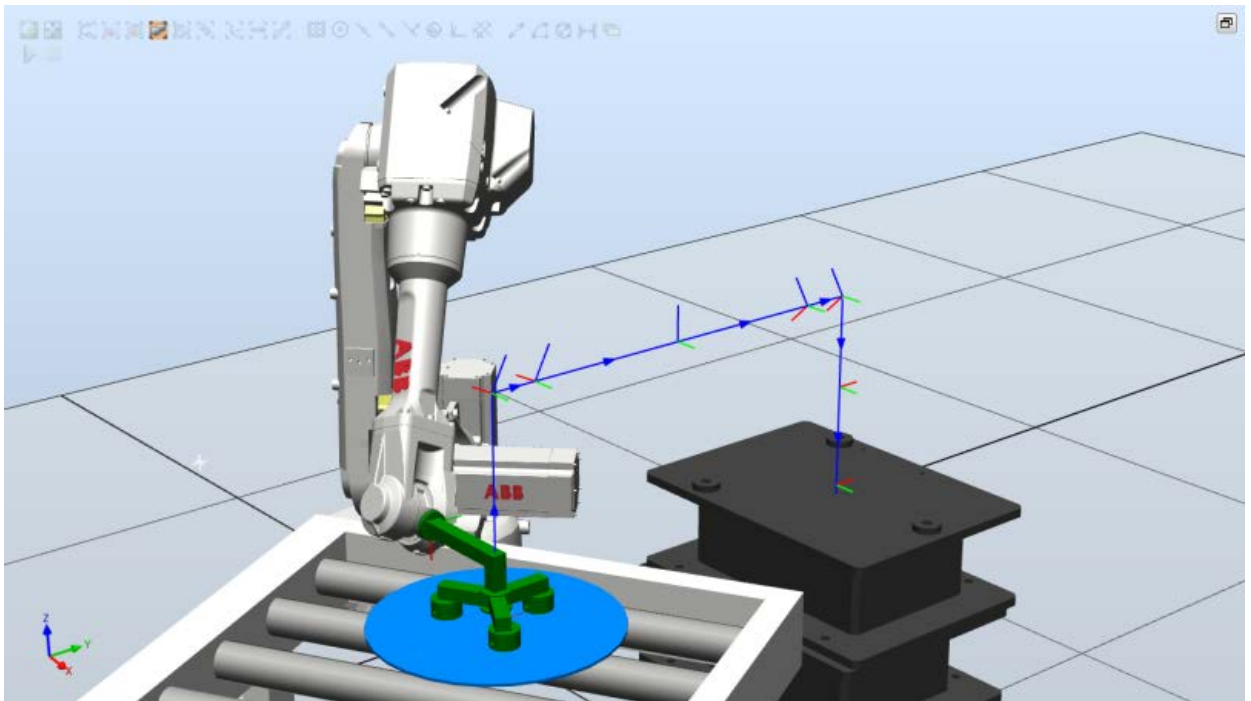


Рисунок 4.17 – Візуалізація процесу маніпулювання у програмному середовищі RobotStudio з використанням ЗС на базі пневматичних захоплювачів

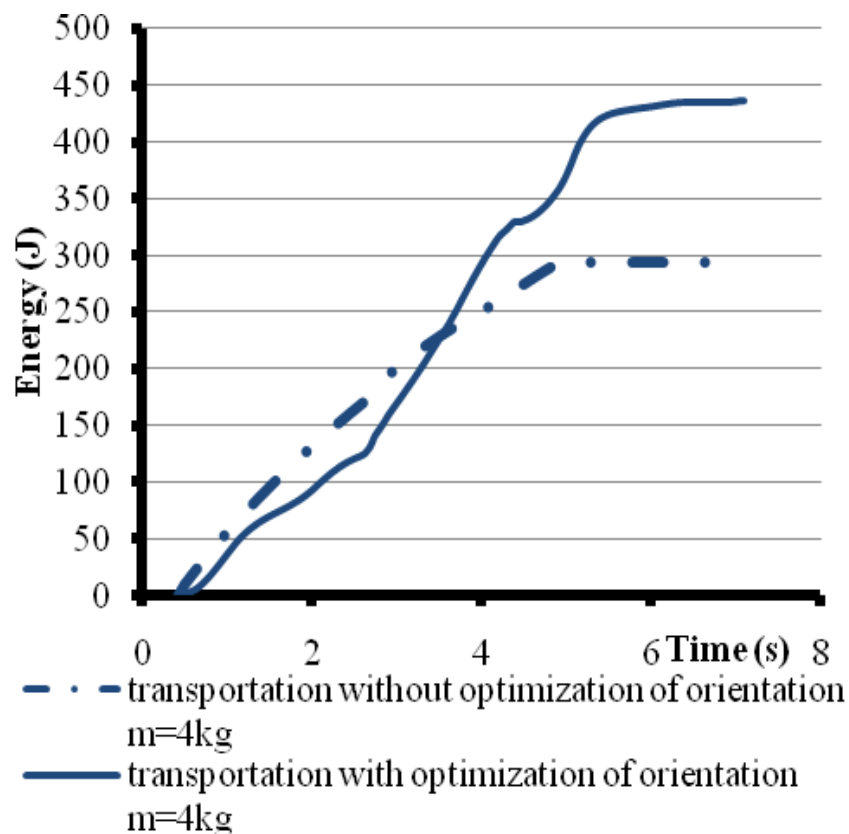


Рисунок 4.18 – Графік затраченої енергії промисловим роботом IRB 1600-10 на виконання транспортної операції

Як видно із графіку (Рисунок 4.17), під час виконання транспортної операції з оптимізацією орієнтації промисловим роботом затрачається на 43%

більше енергії ніж без оптимізації орієнтації. Це пов'язано із тим, що для зміни орієнтації кінцевого ефектора використовуються двигуни кисті промислового робота, які не використовуються під час транспортування без оптимізації орієнтації.

Тепер розглянемо сумарні енергетичні затрати промислового робота та захватної системи на транспортування об'єкта маніпулювання (Рисунок 4.19).

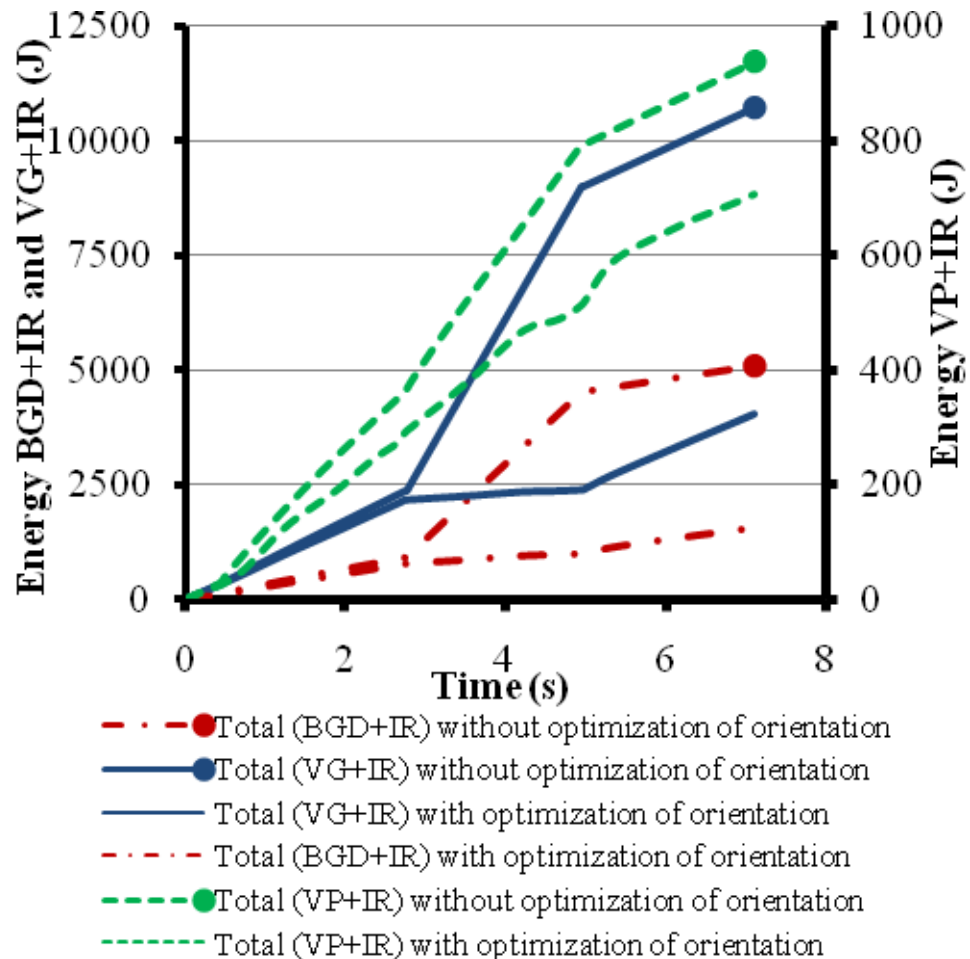


Рисунок 4.19 – Графік сумарної затраченої енергії промисловим роботом IRB 1600-10 та захватними системами

Як видно із графіків (Рисунок 4.19) використання методу оптимізації орієнтації ЗС дозволяє знизити сумарні енергетичні затрати на виконання транспортної операції для всіх груп ПЗП. Це зумовлено тим, що енергетичні затрати захоплювальних систем є в декілька раз більшими за енергетичні затрати промислового робота. Так використовуючи захватні системи із мінімально можливою масою та оптимізуючи їх орієнтацію під час

маніпулювання дозволить мінімізувати сумарні енергетичні затрати на транспортування ОМ.

Для захватної системи, яка використовує захоплювачі Бернуллі із оптимізацією орієнтації захватної системи та наведеного прикладу, енергетичні затрати на транспортування ОМ знизилися на 69% в порівнянні із транспортуванням без оптимізації орієнтації захватної системи. Використовуючи вихрові захоплювачі в захватній системі із оптимізацією її орієнтації дозволили знизити енергетичні затрати на 62% в порівняння із транспортуванням без оптимізації орієнтації захватної системи. А використовуючи вакуумні захоплювачі в захватній системі із оптимізацією її орієнтації дозволили знизити енергетичні затрати на 25% в порівняння із транспортуванням без оптимізації орієнтації захватної системи.

У роботі досліджено процес транспортування габаритних об'єктів маніпулювання без оптимізації орієнтації та із оптимізацією орієнтації захватної системи. Проведено порівняльний аналіз енергоефективності транспортування габаритних об'єктів із оптимізацією орієнтації захватної системи на базі вихрових, вакуумних захоплювачів та захоплювачів Бернуллі.

Використання методу оптимізації орієнтації захоплювального системи у процесі транспортування об'єкта промисловим роботом, дозволило знизити енергетичні затрати до 69% у порівнянні з транспортуванням без переорієнтації.

Доведено ефективність використання методу оптимізації орієнтації захватної системи на базі пневматичних захоплювальних пристроїв.

## 5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### 5.1 Розробка і налагодження програмованої математичної моделі в середовищі MathCAD

Математичне програмування полягає в обробці методів оптимізаційних задач та дослідження одержання розв'язків.

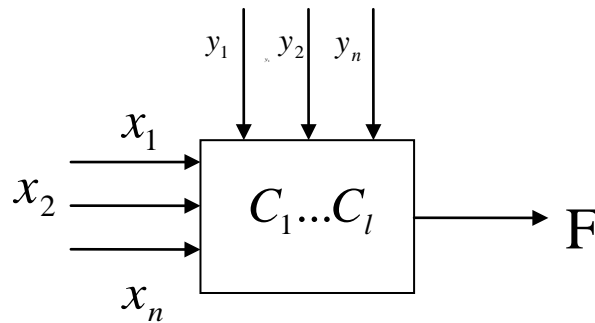


Рис. 5.1. Схема математичного програмування

$C_1, \dots, C_l$  - це кількісні характеристики системи;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  - це незалежні керовані змінні;

$y_1, y_2, \dots, y_n$  - незалежні, некеровані змінні;

$F = F(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, C_1, \dots, C_l) \rightarrow \text{extr}$

$F$  - цільова функція, яка кількісно характеризує ефективність функціонування системи.

Такі значення керованих змінних  $x_1, \dots, x_n$ , при яких цільова функція набуває екстремального значення. В кожній реальній системі можливості вибору значень  $x_1, \dots, x_n$  завжди обмежені деякими зовнішніми умовами, які можна записати за допомогою рівностей або нерівностей виду

$$q_2(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, C_1) \quad \{ \leq, \geq, = \}$$

$$r = \overline{1, s}$$

В кожній умові маємо один із трьох знаків  $\{\leq, \geq, =\}$ . Система обмежень або система умов задачі.

В економічних задачах часто накладається умова невід'ємності змінних.

$$x_i \geq 0 \quad i = \overline{1, n}$$

Необхідно намагатись при записі обмежень по можливості уникати знаку « $\Rightarrow$ ». Також треба слідкувати, щоб не було суперечливих обмежень.

Довільний набір змінних  $x_1, \dots, x_n$ , що задовольняє систему  $q_2(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, C_1)$  називається допустимим планом. Кожному плану відповідає таке значення цільової функції, яке можна обчислити за формулою (1). Тоді допустимий план, при якому цільова функція набуває  $\text{extr}$ . Значення називається оптимальним планом і саме він є розв'язком задачі математичного програмування.

Класифікація методів математичного програмування.

1. Лінійне. Знаходження  $\text{extr}$  значення лінійної цільової функції багатьох змінних при лінійних обмеженнях.

2. Нелінійне. Якщо хоча б один з обмежень є нелінійним, тоді маємо задачу з нелінійними обмеженнями.

3. Ціле чисельне. Можуть бути як лінійні так і нелінійні програмування. Але розв'язки мають бути цілими числами.

4. Динамічне. Змінні  $x_1, \dots, x_n$  залежать від часу.

5. Теорія графів. Розв'язує мережеві задачі. Наприклад пов'язані з протяжністю мережі, або побудова кінцевого маршруту.

6. Стохастичне. Цільова функція шукається в умові невизначеності.

Методи лінійного програмування бувають:

I. Універсальний метод. Дозволяє розв'язати будь-яку задачу. Найвідоміший із них симплекс метод.

II. Спеціальний метод. Розв'язують лише певні класи задач лінійного програмування. Наприклад транспортну задачу.

## **5.2 Реалізація методики моделювання оптимізації орієнтації кисті промислового робота в програмному середовищі RobotStudio**

Вихідними даними для проектування технологічного процесу з використанням промислових роботів для автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій є: параметри вантажу (маса, зміщення центра мас, форма вантажу), характеристики вантажно-розвантажувального процесу (схема вантажно-розвантажувального процесу, наявність перешкод, час транспортування).

Методика застосування оптимізації орієнтації струминного захоплювального пристрою при виконанні вантажно-розвантажувальних операцій складається з таких етапів:

1. Визначення технічних характеристик промислового робота для забезпечення виконання параметрів технологічного процесу.

2. Вибір струминного захоплювального пристрою в залежності від параметрів вантажу.

3. Вибір траєкторії по якій буде здійснюватись вантажно-розвантажувальний процес.

4. Визначення оптимальної орієнтації струминного захоплювального пристрою, відповідно до заданої траєкторії, параметрів захоплювального пристрою, промислового робота та розрахунків.

5. В залежності від всіх вище наведених параметрів, згідно розрахунків, які викладені в розділі 4, визначають параметри руху захоплювального пристрою, при яких забезпечується мінімальне енергоспоживання

захоплювальним пристроєм із максимальною продуктивністю вантажно-розвантажувального процесу.

6. Програмування промислового робота на виконання вантажно-розвантажувального процесу.

Для прикладу розглянемо автоматизацію процесу завантаження заготовок у фрезерний верстат з ЧПК. При цьому транспортуються паралелепіпед 300x300x100мм масою 3кг, без зміщеного центра мас відносно осі захоплювального пристрою. Довжина транспортного шляху від конвеєра, що подає заготовку до місця розвантаження складає 1 метр без перешкод.

Перший етап визначення параметрів промислового робота для забезпечення виконання вхідних параметрів технологічного процесу.

На вибір промислового робота буде впливати лише два параметри, які задаються при виконанні вантажно-розвантажувального процесу. Перший параметр - маса вантажу. Отже необхідно врахувати вантажопідйомність промислового робота. В нашому випадку транспортуватиметься вантаж масою 3 кг, попри це необхідно враховувати масу самого струминного захоплювального пристрою із комунікаціями для його роботи (1 кг) та масу орієнтуючого подовжувача (2 кг). Тобто для забезпечення такого технологічного процесу необхідно вибрати промисловий робот, який має вантажопідйомність більшу-рівну 5 кг, але яка не перевищує 10 кг (таблиця 5.1). Промисловий робот з більшою вантажопідйомністю не доцільно використовувати з точки зору зростання енергетичних затрат на виконання поставленого технологічного завдання.



**Промислові роботи вантажопідіймальністю  $5 \leq m \leq 10$  кг різних виробників**

Виробник	Модель ПР
ABB	IRB 1200, IRB 140, IRB 1410, IRB 1600, IRB 1660ID
KUKA	KR 6, KR 16, KR AGILUS, KR CIBERTECH, LBR iiwa
Fanuc	ARC MATE 50iD/7L, ARC MATE 100iC/7L, CR-7iA/L, LR MATE 200iD/7L, M-10iA/7L
Mitsubishi	RV-7F, RV-7FL, RV-7FLL
Motoman (Yaskawa)	EPX1250, GP7, GP8, MH5LS II
Denso	VS-068, VS-087

Другий параметр який впливає на вибір промислового робота це параметри робочої зони ПР. Так як із технологічного завдання вантаж потрібно транспортувати впродовж 1 метра, необхідно обрати ПР з робочою зоною більшою за 1 метр. Це зумовлено тим, що ПР не може виконувати орієнтуючі дії на межі своєї робочої зони і ми не зможемо в такому випадку застосувати метод оптимізації орієнтації. Розглянемо для прикладу ПР виробників ABB та KUKA, як таких, що мають найбільші функціональні можливості серед інших виробників. Для аналізу вибрано ABB IRB 1600-6/1.45 та KUKA KR6-3 (таблиця 5.2).



Порівняльна таблиця IRB 1600 та KR 6

Назва	ABB IRB 1600-6 / 1.45	KUKA KR 6-3
Вигляд		
Вантажопідіймальність	6 кг	6 кг
Параметри робочої зони	1,45 м	1,6 м
Точність позиціонування	0,02 мм	0,05 мм

Моделі ПР слід вибирати з точки зору забезпечення параметрів робочої зони роботи при найменшій вантажопідіймальності з наведених ПР. Як видно з таблиці 5.2 характеристики даних ПР практично ідентичні. Для прикладу вибираємо ABB IRB 1600-6/1.45.

Другий етап - вибір струминного захоплювального пристрою для виконання вантажно-розвантажувальної операції. При виборі СЗП необхідно враховувати параметри вантажу: масу, зміщення центру мас, тип захоплення (контактний або безконтактний). Перш за все, в залежності від вантажу, вибирається тип захоплення. Наприклад для транспортування заготовки, що буде проходити етап фрезерування на верстаті з ЧПУ, немає додаткових вимог до способу її утримування, так як заготовка із сталі і контактні деформації – відсутні. Якщо вантаж має легко пошкоджувану поверхню або є крихким то необхідно використовувати безконтактні струминні захоплювальні пристрої.

Визначення типу необхідного струминного захоплювального пристрою залежно від параметрів вантажу викладений у розділі 1 магістерської роботи.

Третій етап передбачає вибір траєкторії по якій буде здійснюватись вантажно-розвантажувальний процес. Якщо на шляху транспортування немає перешкод - застосовують прямолінійну траєкторію, при наявності перешкод - використовують дугову або гвинтову траєкторію.

На четвертому етапі, для заданої траєкторії, параметрів захоплювального пристрою, промислового робота, згідно розрахунків, які викладені в підрозділі 4 дипломної роботи (додаток А), визначають оптимальну орієнтацію струминного захоплювального пристрою. Так як найбільш вагомий вплив на оптимальну орієнтацію має прискорення струминного захоплювального пристрою, використовуючи методику описану в розділі 4 можна побудувати графік залежності мінімальної необхідної сили притягання від прискорення (рис. 5.2) з показниками оптимальної орієнтації на ділянках прискорення при яких і визначається мінімальна необхідна сила притягання.

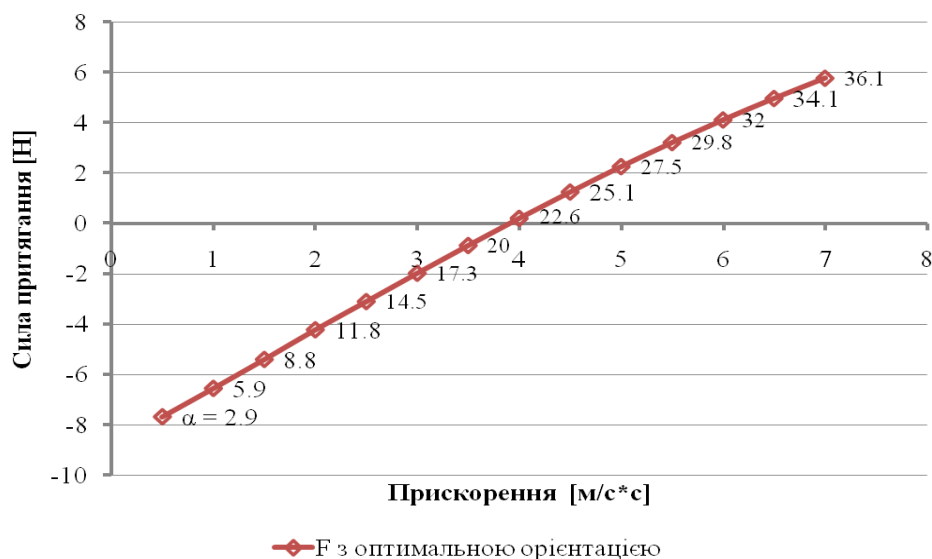


Рис. 5.2 Графік залежності мінімальної необхідної сили притягання від прискорення струминного захоплювального пристрою

На п'ятому етапі, в залежності від всіх вище наведених параметрів та розрахунків, визначають параметри руху захоплювального пристрою, при яких

забезпечується мінімальне енергоспоживання при максимальній продуктивності вантажно-розвантажувального процесу. Так мінімальне енергоспоживання захоплювального пристрою буде забезпечуватись доти, доки мінімальна необхідна сила притягання буде рівна нулю (рисунок 5.2). Максимальна продуктивність досягається при максимальному прискоренні, отже при мінімальному часі проведення вантажно-розвантажувальної операції. В нашому випадку максимальне прискорення  $3,8 \text{ м/с}^2$  при якому забезпечуватиметься максимальний ефект впровадження методу оптимізації орієнтації.

На шостому етапі відбувається програмування вантажно-розвантажувального процесу. Після запуску програми RobotStudio необхідно створити проект в діалоговому вікні (рис. 5.3). При цьому вибираємо місце збереження, назву проекту, пункт «Solution with Station and Robot Controller», в пункті «Robot model» вибираємо модель ПР «IRB 1600 6kg 1.45m» та настикаємо кнопку «Create».

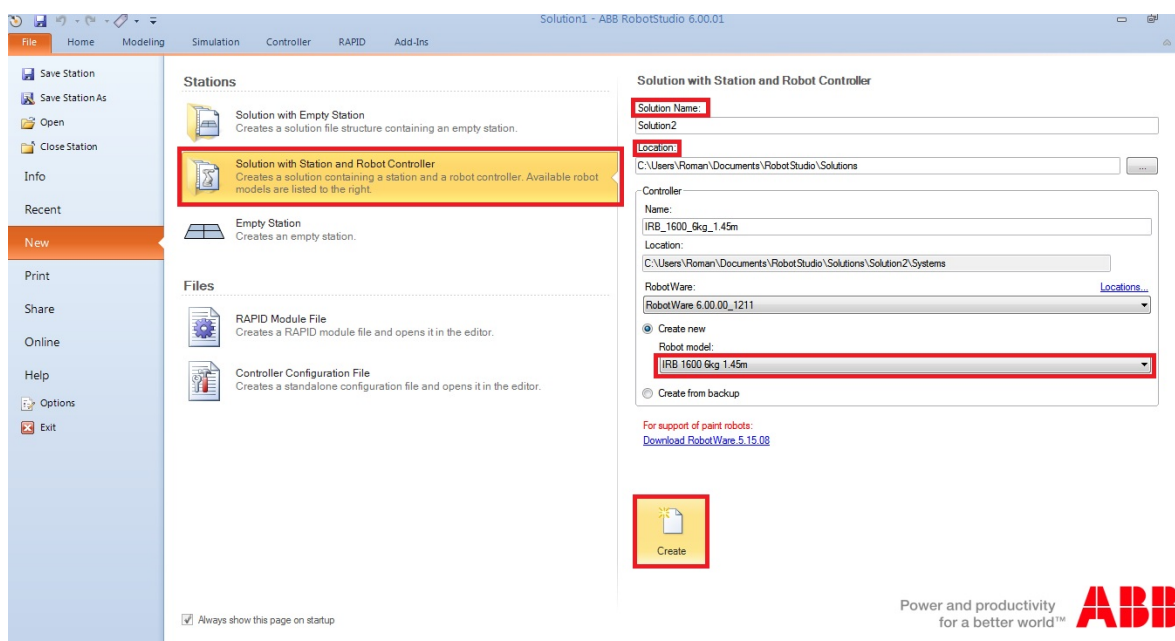


Рис. 5.3 Створення проекту в RobotStudio

Після створення проекту відкриється вікно «Home» (рис. 5.4). На якому є такі елементи:

1. Панель меню.

2. Інструменти кожної панелі.
3. Робоча область.
4. Параметри руху, при яких буде програмуватись ПР.
5. Панелі: компонентів, траєкторій, режимів і подій.
6. Промисловий робот (IRB 1600).

Про готовність до програмування і справності проекту свідчить зелений фон «Controller status» в правому нижньому краю вікна програми.

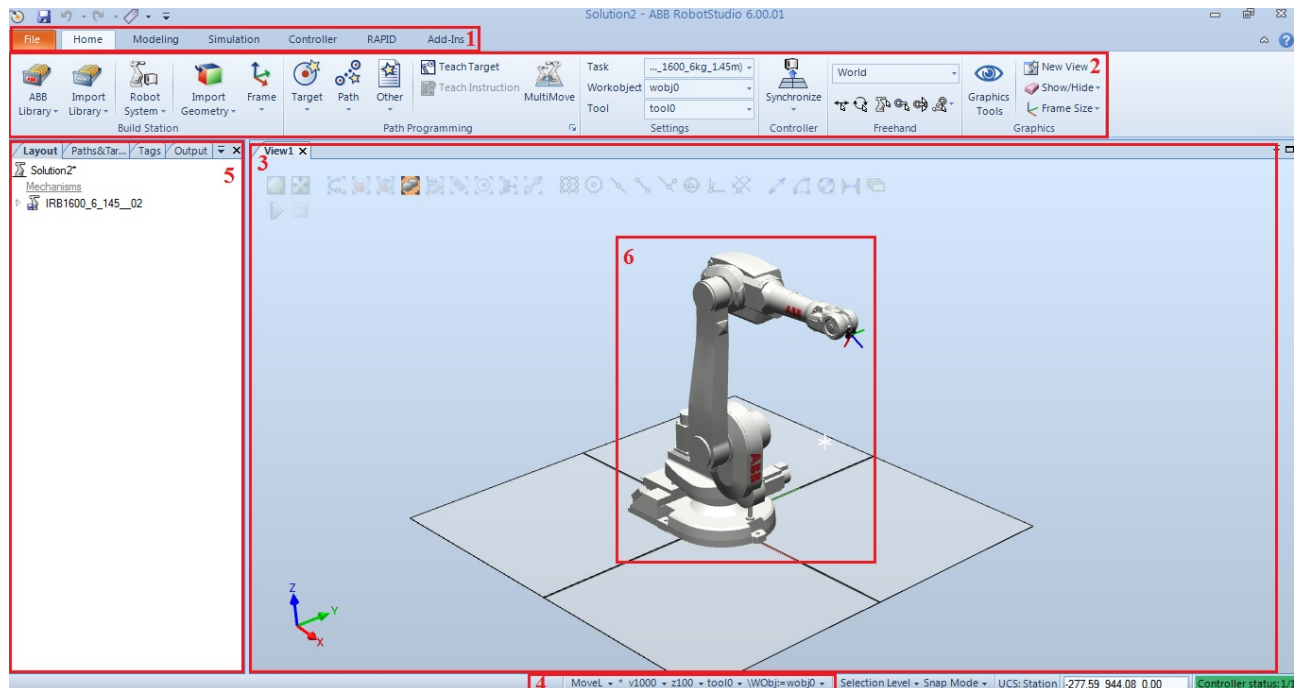


Рис. 5.4 Візуальне середовище програми (пункт меню - «Home»)

Тепер необхідно додати всі додаткові елементи для подальшої роботи з ними:

1. Конвеєр;
2. Контролер;
3. Захоплювальний пристрій з периферією;
4. Вантаж;
5. Місце розвантаження.

Щоб додати об'єкт в систему необхідно вибрати його з бібліотеки або додати його модель. Для додання об'єкта з бібліотеки необхідно

натиснути «Import Library» - «Equipment» - «Об'єкт (IRC5)» (рис. 5.5). Після чого розмістити всі компоненти на їх місце знаходження. В результаті всі об'єкти мають зайняти своє місце і бути готовим до програмування (рис. 5.6).

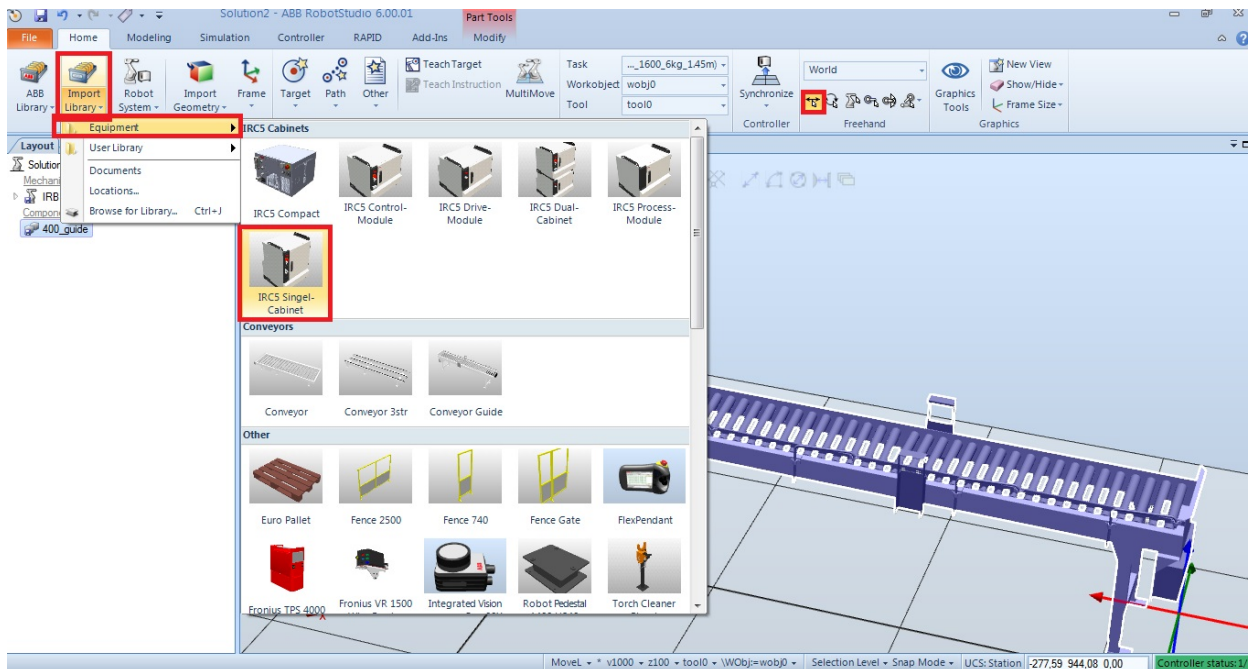


Рис. 5.5 Додавання нового об'єкта

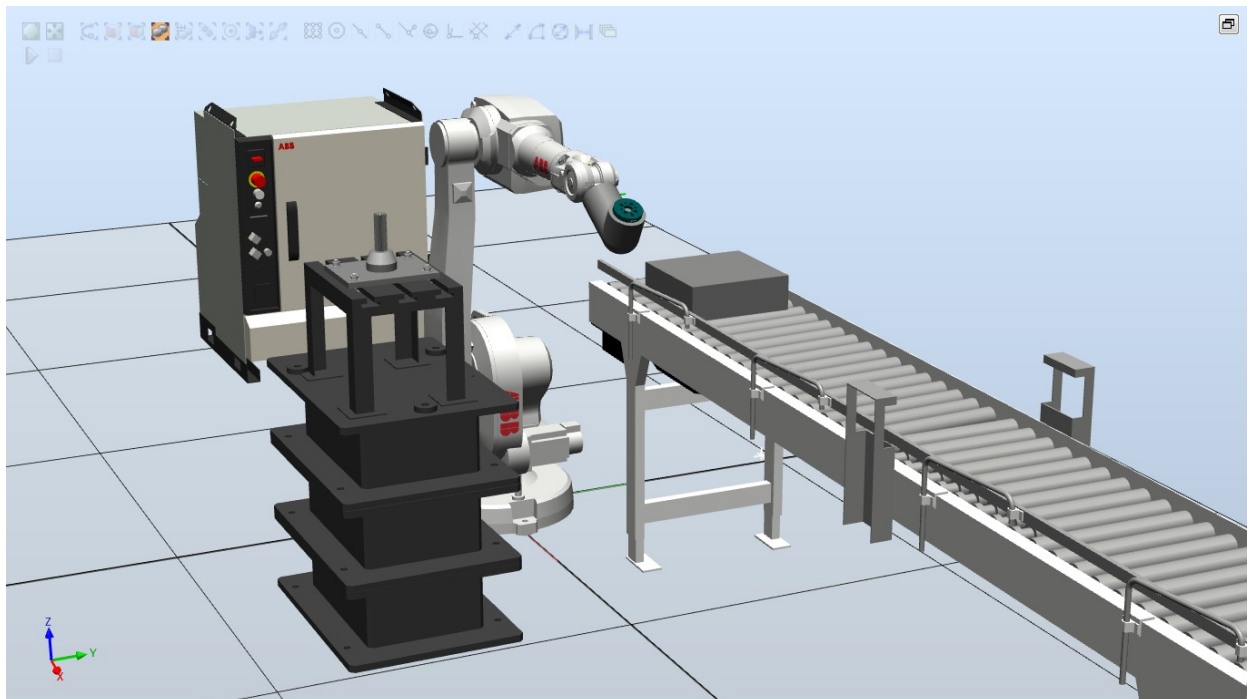


Рис. 5.6 Загальний вигляд всіх компонентів

Після цього необхідно задати основні точки траєкторії згідно запропонованого методу оптимізації траєкторії. Є два методи задання за допомогою візуального програмування і за допомогою програмного коду мовою RAPID. Розглянемо метод візуального програмування (рис. 5.7).

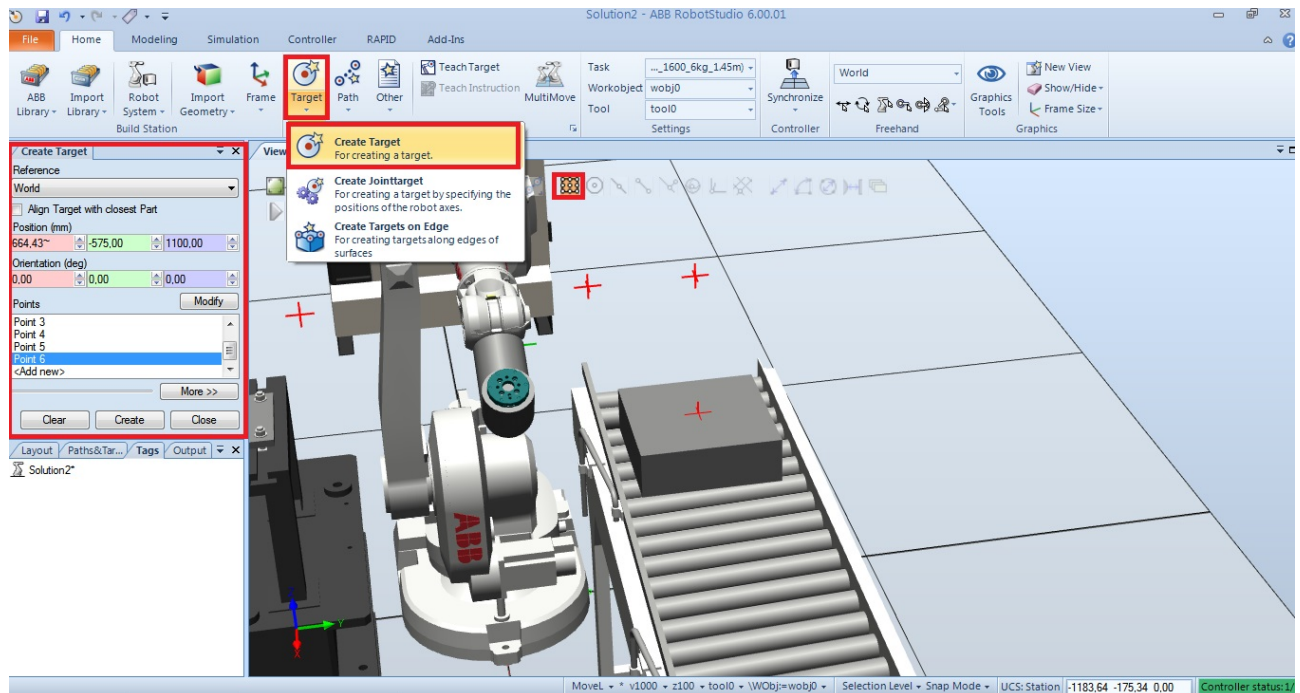


Рис. 5.7 Створення точок траєкторії

Спершу необхідно вибрати інструмент «Target» - «Create Target», після чого задати початкову точку траєкторії на вантажі. Після створення всіх точок траєкторії необхідно підтвердити їх, натиснувши на кнопку «Create» на панелі «Create Target».

Для створення траєкторії по ключових точках, необхідно в вкладці «Path» створити траєкторію під іменем «main», після чого виділити по порядку руху всі точки траєкторії і через меню правої кнопки миші вибрати пункт «Add to path» - «main» - «first» (рис 5.8).

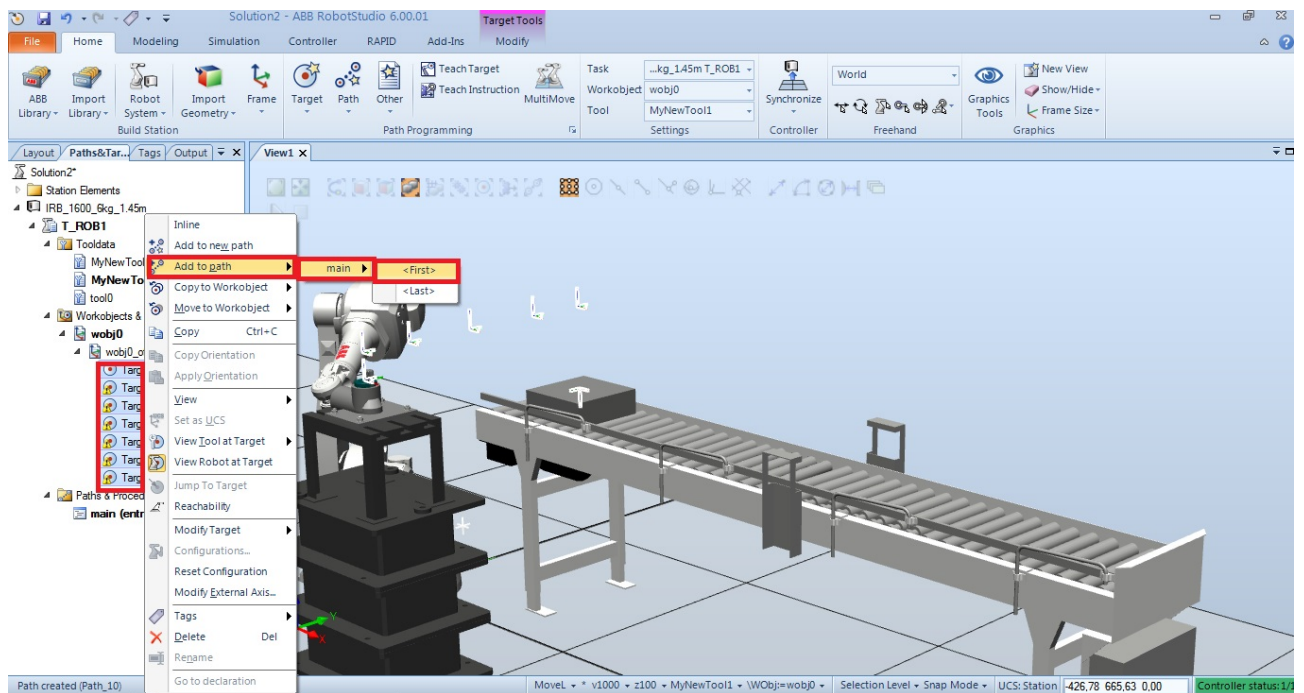


Рис. 5.8 Створення шляху (траєкторії)

Після створення шляху необхідну здійснити конфігурацію ланок маніпулятора. Зазвичай використовується автоматична конфігурація. Для цього потрібно правою клавішею миші натиснути на траєкторії «main» - «Configurations» - «Auto Configurations» (рис. 5.9).

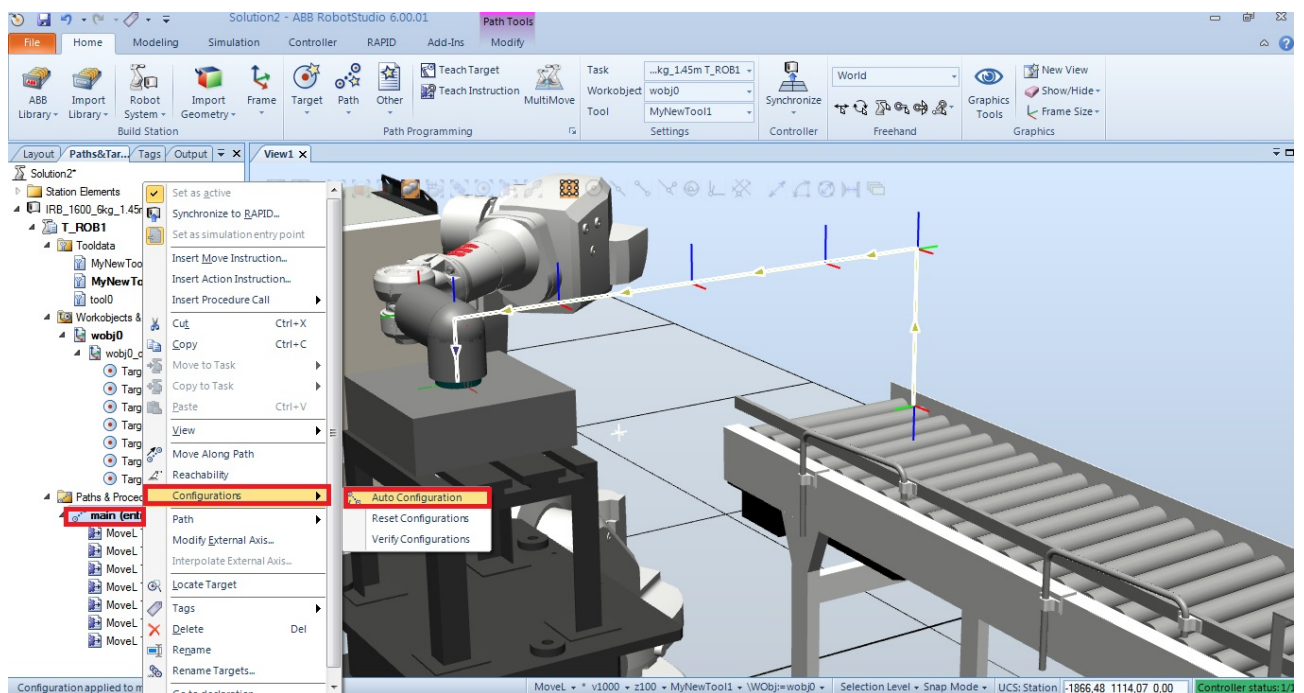


Рис. 5.9 Конфігурація ланок маніпулятора для виконання заданої траєкторії

Маючи параметри оптимальної орієнтації, що отримані на четвертому етапі (розділ 4), ми можемо запрограмувати орієнтацію згідно цього методу. Так для ділянки розгону запрограмовуємо орієнтацію 21.217 (град), тобто дві точки, що відповідають за цю ділянку (рис. 5.10). Для цього вибираємо точку траєкторії («Target\_20, Target\_30»), права кнопка миші на ній «Modify Target» - «Set Position».

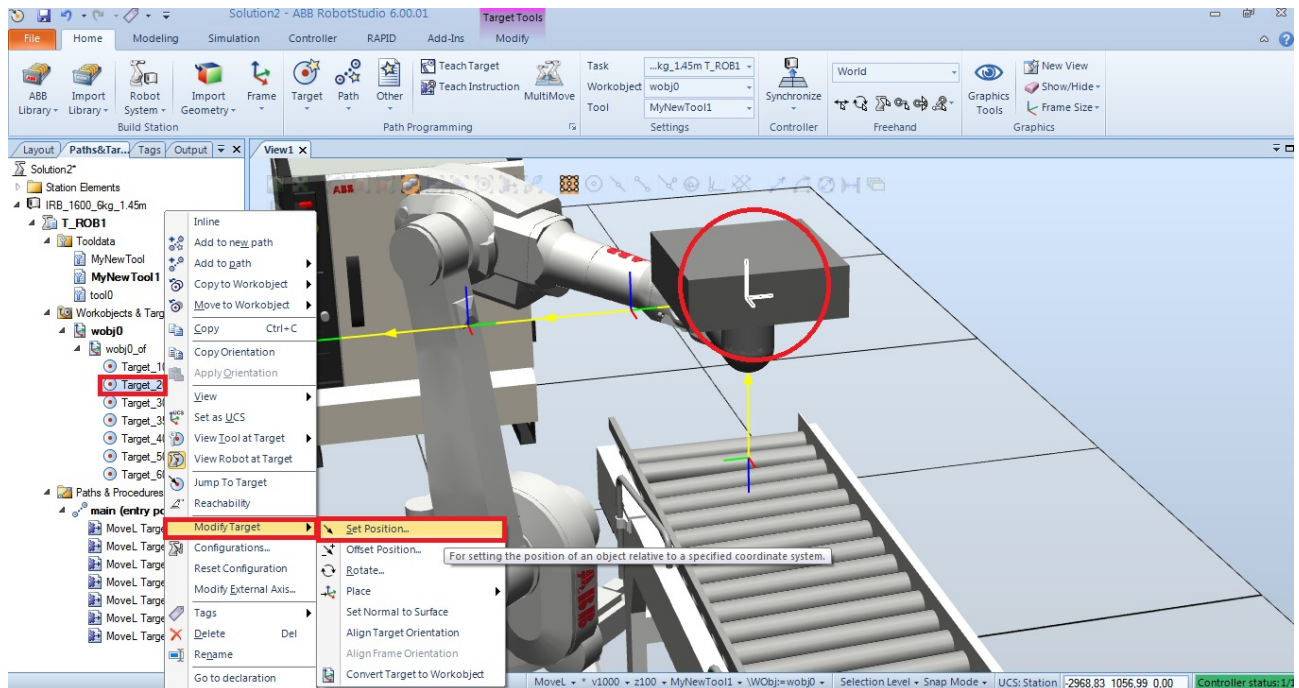


Рис. 5.10 Задання оптимальної орієнтації захоплювальному пристрою

Після задання оптимальної орієнтації захоплювального пристрою, необхідно запрограмувати параметри руху визначені на п'ятому етапі. Для цього необхідно синхронізувати розроблену візуальну програму з програмним кодом в RAPID, тому виконуємо «Synchronize» - «Synchronize to RAPID» (рис. 5.11). Після цього переходимо в вкладку RAPID та на вкладку Controller, далі відкриваємо програму керування промислового робота «RAPID» - «T\_ROB1» - «Module1» (рис. 5.12). Для керування швидкістю додаємо функцію «**VAR speeddata vmedium**», а для керування прискоренням, в залежності від ділянок



(захоплення, переорієнтація, пряма траєкторія, переорієнтація і розвантаження), додаємо функцію «PathAccLim».

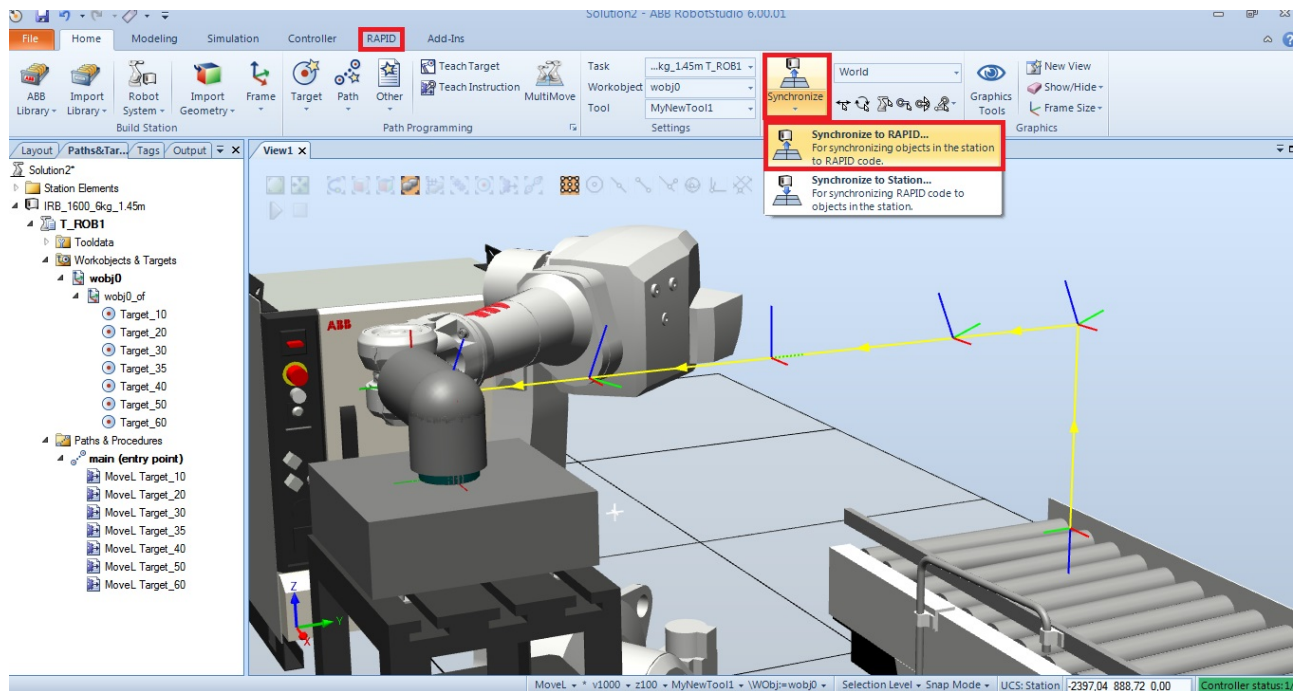


Рис. 5.11 Конфігурація ланок маніпулятора для виконання заданої траєкторії

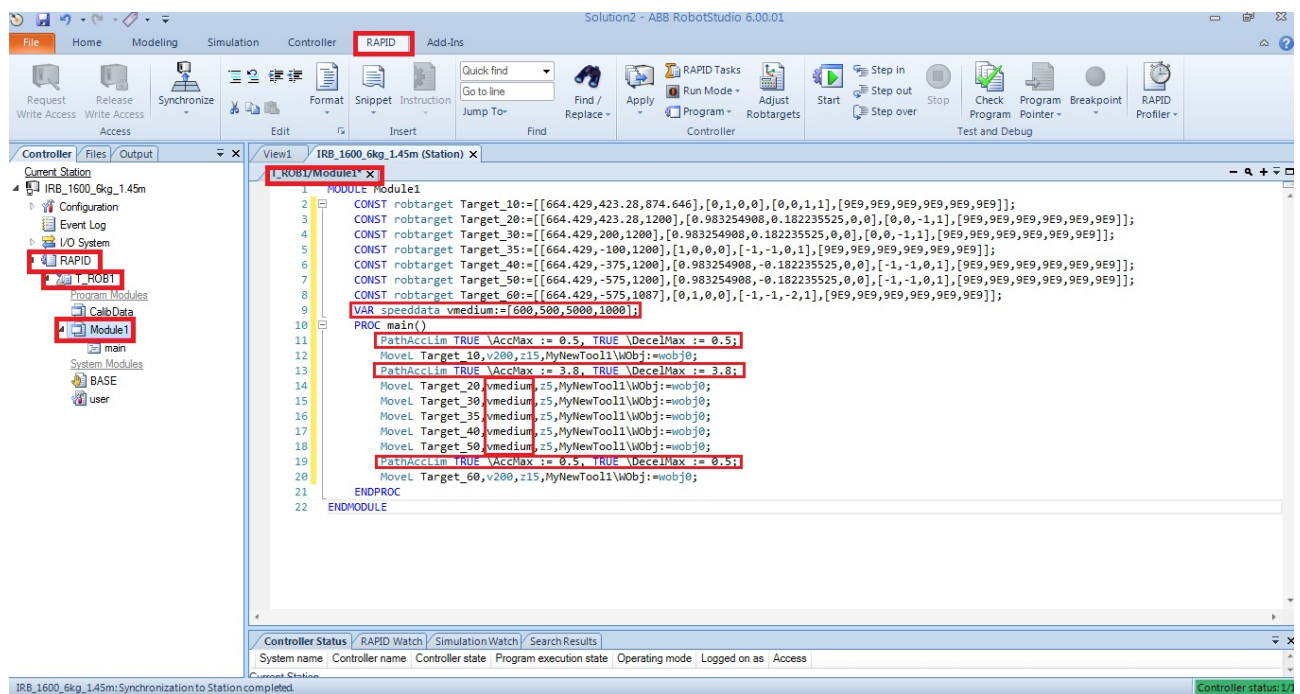


Рис. 5.12 Задання обмежень на прискорення та уповільнення кінцевої ланки маніпулятора

Після виконання вказаних змін синхронізуємо виконавчу програму в контролер. Тепер робот готовий до виконання вантажно-розвантажувальної операції. Програма представлена в Додатку Б.

## 6 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

### 6.1 Розрахунок річного економічного ефекту від впровадження струменевих захоплюючих пристроїв при автоматизації процесів завантаження листових заготовок

Річний економічний ефект від впровадження струменевих захоплюючих пристроїв при автоматизації процесів завантаження листових заготовок в прес та розвантаження штампованих тарілок параболічних антен визначається за формулою

$$E = (C_n - Z_n)P_n - (C_b - Z_b)P_b - Z_{\text{виг}}, \quad (6.1)$$

де  $Z_{\text{виг}}$  – разові витрати на виготовлення струменевих захоплювачів і їх експлуатації на протязі року, грн;

$C_n, C_b$  – відповідно ціна одиниці продукції, що виробляється на новому і базовому обладнанні, грн;

$Z_n, Z_b$  – відповідно затрати по виготовленню одиниці продукції на новому і базовому обладнанні, грн;

$P_n, P_b$  – відповідно продуктивність нового і базового обладнання, шт/рік.

Разові затрати на виготовлення і експлуатацію струменевих захоплювачів визначаються за формулою

$$Z_{\text{виг}} = pC_{\text{с.з}}K_{\text{зн}}, \quad (6.2)$$

де  $p$  – кількість струменевих захоплювачів ( $p=3$ );

$C_{\text{с.з}}$  – собівартість виготовлення одного струменевого захоплювача,  $C_{\text{с.з}}=12,48$  грн (із заводських даних);

$K_{zn}$  – коефіцієнт змінності струменевого захоплювача на протязі року,  
 $K_{zn}=1,1$ .

Отже,  $Z_{виг} = 3 \cdot 12,48 \cdot 1,1 = 41,18$  грн.

Ціна одиниці продукції, що виготовляється на новому і базовому обладнанні одна і таж  $C_n = C_b = 14,03$  грн/шт (з заводських даних).

Затрати на виготовлення одиниці продукції на базовому обладнанні виначаються за формулою

$$Z_b = Z_{mb} + Z_{тзвб} + Z_{зпб} + Z_{нарб} + Z_{еб} + Z_{рб} + Z_{упб}, \quad (6.3)$$

де  $Z_{mb}$  – затрати на матеріал,  $Z_{mb}=11,70$  грн (із заводських даних);

$Z_{тзвб}$  – транспортно-заготівельні витрати, які складають 10% від матеріальних:  $Z_{тзвб}=0,1 \cdot 11,70=1,17$  грн;

$Z_{зпб}$  – затрати на заробітну плату:  $Z_{зпб}=0,44$  коп/шт= $0,0044$  грн/шт;

$Z_{нарб}$  – затрати по нарахуванню на заробітну плату, які складають 42,5% від  $Z_{зпб}$ :  $Z_{нарб}=0,425 \cdot 0,0044=0,0019$  грн/шт;

$Z_{еб}$  – затрати по електроенергії;

$Z_{рб}$  – затрати на ремонт технологічного обладнання;

$Z_{упб}$  – умовно-постійні затрати.

Затрати по електроенергії визначаються за формулою

$$Z_{еб} = C_e N_{двб} K_{двб} t_b, \quad (6.4)$$

де  $C_e$  – вартість 1кВт·год електроенергії  $C_e=0,1564$  грн/кВт;

$N_{двб}$  – сумарна потужність двигунів обладнання,  $N_{двб}=12,4$  кВт;

$K_{двб}$  – коефіцієнт завантаження двигунів по потужності,  $K_{двб}=0,8$ ;

$t_b$  – час виготовлення одиниці продукції.

Продуктивність базового обладнання за годину  $\Pi_6=258$  шт/год, отже час виготовлення  $t_6 = 1/258 = 0,0039$  год, а затрати на електроенергію  $Z_{e6} = 0,1564 \cdot 12,4 \cdot 0,8 \cdot 0,0039 = 0,0061$  грн.

Затрати на ремонт технологічного обладнання

$$Z_{p6} = \frac{B_{тo} P_6}{\Pi_{p6}}, \quad (6.5)$$

де  $B_{тo}$  – початкова вартість технологічного обладнання,  $B_{тo}=540000$  грн;  
 $P_6$  – середні проценти затрат на всі види ремонтів (капітальні, проміжні, поточні),  $P=10\%$ ;

$\Pi_{p6} = \Pi_6 \cdot \Phi$  – річна продуктивність обладнання.

Для дійсного річного фонду часу роботи обладнання при однозмінному навантаженні  $\Phi=2008$  год,  $\Pi_{p6}=258 \cdot 2008=518064$  шт/рік, тоді

$$Z_{p6} = \frac{540000 \cdot 0,1}{518064} = 0,1042 \text{ грн}$$

Умовно-постійні затрати для базового варіанту визначаються за формулою

$$Z_{уп6} = Z_{утр6} + Z_{цех6} + Z_{зав6} + Z_{ін6}, \quad (6.6)$$

де  $Z_{утр6}$  – затрати на утримання і експлуатацію базового обладнання,  $Z_{утр6} = Z_{p6} = 0,1042$  грн;

$Z_{цех6}$  – цехові (загальновиробничі) затрати,  $Z_{цех6} = 1,53 Z_{утр6} = 0,1563$  грн;

$Z_{зав6}$  – заводські (загальногосподарські) затрати,  $Z_{зав6} = 23 Z_{утр6} = 0,2084$  грн;

$Z_{ін6}$  – інші виробничі затрати,  $Z_{ін6} = 0,53 Z_{утр6} = 0,0521$  грн.

Отже,  $Z_{уп6} = 0,1042 + 0,1563 + 0,2084 + 0,0521 = 0,521$  грн.

Таким чином, затрати на виготовлення одиниці продукції на базовому обладнанні, згідно з формулою (6.3)

$$Z_6 = 11,70 + 1,17 + 0,0044 + 0,0019 + 0,0061 + 0,1042 + 0,521 = 13,5076 \text{ грн.}$$

Затрати на виготовлення одиниці продукції на новому обладнанні визначаються з формули (6.3)

$$Z_n = Z_{mn} + Z_{tzvn} + Z_{znn} + Z_{narh} + Z_{en} + Z_{pn} + Z_{unh},$$

де  $Z_{mn} = Z_{mb} = 11,70 \text{ грн.}$ ,

$$Z_{tzvn} = Z_{tzvb} = 1,17 \text{ грн.}$$

$Z_{znn}$  – затрати на заробітну плату – відсутні, оскільки дільниця роботизована а заробітна плата оператора, що обслуговує РТК знаходиться в умовно-постійних затратах, а саме затратах по експлуатації і утриманню обладнання;

$Z_{narh}$  – відсутні (як наслідок відсутності затрат на заробітну плату);

$Z_{en}$  – затрати по електроенергії, які визначаються з формули (6.4): при  $N_{двн} = 15,7 \text{ кВт}$  і  $t_n = \frac{1}{285} = 0,0035 \text{ год}$   $Z_{en} = 0,1564 \cdot 15,7 \cdot 0,8 \cdot 0,0035 = 0,0069 \text{ грн.}$

$Z_{pn}$  – затрати на ремонт технологічного обладнання: при  $V_{тон} = 592000 \text{ грн}$  і  $P_{pn} = 285 \cdot 2008 = 572280 \text{ шт/рік}$  користуючись формулою (6.5) знайдемо

$$Z_{pn} = \frac{592000 \cdot 0,1}{572280} = 0,1034 \text{ грн.}$$

$Z_{unh}$  – умовно-постійні затрати: згідно з формулою (6.6) знайдемо  $Z_{unh} = 0,1034 + 1,5 \cdot 0,1034 + 2 \cdot 0,1034 + 0,5 \cdot 0,1034 = 0,517 \text{ грн.}$

Отже, затрати на виготовлення одиниці продукції на новому обладнанні  $Z_n = 11,70 + 1,17 + 0,0069 + 0,1034 + 0,517 = 13,4973 \text{ грн.}$

Таким чином, внаслідок збільшення продуктивності і зменшення собівартості виробів, економічний ефект за рік складатиме:

$$E=(14,03-13,4973)\cdot 572280-(14,03-13,5076)\cdot 51806441,18=34175 \text{ грн.}$$

## **6.2 Техніко-економічне обґрунтування розробки**

Метою даного дипломного проекту є розробка такої математичної моделі, у якій використовуються досягнення в області управління промисловими роботами. Використання штучного інтелекту ПР дозволяє забезпечити високу точність базування ЗП відносно об'єкта маніпулювання, а також набагато ефективніше використовувати існуючі алгоритми при зниженні енергоспоживання апаратури. Створювані маніпулятори повинні розроблятися так, щоб їх можна було використовувати з математичними моделями із зменшенням потреби стиснутого повітря і з зменшенням затрат часу на процес маніпулювання.

## **7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **7.1 Значення охорони праці в забезпеченні здорових умов праці**

Під охороною праці розуміється система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Охорона праці - прикладна наука правового, санітарно-гігієнічного і технічного напрямку, що виявляє і вивчає виробничі небезпеки, розробляє методи їх попередження і послаблення з метою усунення виробничого травматизму, професійних захворювань робочих, попередження аварій, пожеж і вибухів, забезпечує оздоровлення умов праці і захист населених пунктів від шкідливих і небезпечних впливів виробництва.

За останні роки всі сфери промисловості автоматизувались, що привело до зменшення нещасних випадків на виробництві, але в той самий час виникло ряд інших шкідливих факторів пов'язаних з використанням ЕОМ і інших обчислювальних засобів.

Найбільш повні дані про вплив комп'ютера на людину можна отримати, зібравши і проаналізувавши дані за період, як мінімум, до 60 років, оскільки така середня тривалість життя людини. В Харківському інституті професійних захворювань і гігієни праці є лабораторія, яка уже на протязі 12 років поглиблено займається цими питаннями.

### **7.2 Охорона праці як система заходів щодо гармонізації використання комп'ютерних технологій**

Науково-технічний прогрес призводить до корінної зміни характеру та засобів трудової діяльності. Він створює для людини велику кількість благ: зменшує тяжкість праці (фізичне навантаження), робить її інтелектуальною,



цікавою, різноманітною, розвиває творчі здібності людини, сприяє удосконаленню її професійних навичок тощо.

Проте сучасна техніка є потенційним джерелом високої небезпеки для життя та здоров'я працівника, оточуючих його людей, а також навколишнього середовища. Особливо це стосується сучасних технологій, що активно використовують комп'ютери. Мільйони користувачів відеодисплейних терміналів (ВДТ) персональних комп'ютерів працюють практично у всіх галузях народного господарства.

Праця цих користувачів дуже різноманітна. Це працівники обчислювальних центрів, що обслуговують автоматизовані системи управління підприємствами, касири, працівники довідкових служб, оператори енергетичних, хімічних, газових, нафтових та інших підприємств, працівники поліграфічної промисловості, службовці редакцій журналів, газет, книжкових видань, працівники сфери освіти, перекладачі, особи, які працюють у агентствах новин, та багато інших категорій працівників. Всіх їх об'єднує використання у своїй роботі відеодисплейних терміналів персональних електронно-обчислювальних машин та розумовий характер праці.

Проте активне впровадження у практику персональних комп'ютерів має двоякий характер. З одного боку, підвищується результативність праці, а з другого — з'являються фактори, які несприятливо впливають на здоров'я працюючої людини. У зв'язку з цим набуває актуальності вивчення фізіологічних, психологічних, соціальних та виробничих наслідків використання ВДТ ПЕОМ, розробка та активне застосування заходів, що нормалізують працю та зберігають здоров'я користувачів.

Збереження здоров'я користувачів ВДТ, підтримання ефективності та надійності їх праці на належному рівні є одним з аспектів застосування дисципліни — охорона праці. Ця важлива прикладна наука вивчає небезпечні та шкідливі виробничі фактори, визначає ступінь їх впливу на організм

працюючих і розробляє організаційні та технічні заходи щодо усунення або у всякому разі зменшення їх несприятливого впливу на працюючих.

Разом з тим, у межах охорони праці вирішуються питання створення технічних засобів захисту від дії шкідливих факторів, розробляються заходи щодо попередження нещасних випадків, професійного травматизму, профілактики професійних та професійно зумовлених захворювань.

Охорона праці — системо законодавчих актів, соціально-економічних, організаційно-технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я та працездатність людини у процесі праці.

Все різноманіття нормативних документів, що включають поняття охорона праці, передбачає створення таких умов праці, за яких виключено або значно ослаблено вплив на працюючих шкідливих та небезпечних факторів трудового середовища.

Під шкідливим виробничим фактором розуміємо такий фактор виробничого середовища, вплив якого на працюючого завдає шкоди його здоров'ю та працездатності.

### **7.3 Аналіз потенційних небезпек та шкідливостей виробничого середовища**

Прискорене впровадження ЕОМ практично у всі галузі діяльності веде до появи великої кількості робочих місць з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ), що є основним засобом спілкування з ЕОМ. Вони поширюються як на виробництві у різних системах контролю та управління, так і в різних адміністративно-господарських приміщеннях, де розташовуються обчислювальні центри організацій та інститутів. За даними всесвітньої організації охорони здоров'я, професійна діяльність з ВДТ може в окремих випадках призводити до порушень з боку зорового аналізатора, кістково-м'язових (вимушена поза) та порушень, пов'язаних із стресовими ситуаціями та нервово-емоційними навантаженнями при роботі, захворювань шкіри та ін.

Зараз в нашій країні є комплекс розроблених організаційних заходів і технічних засобів захисту, накопичений передовий досвід роботи великої кількості обчислювальних центрів який показує, що є можливість досягнути значно більших успіхів в справі знешкодження дії шкідливих та небезпечних виробничих факторів на персонал. Але стан умов праці та її безпеки при роботі з ЕОМ ще не задовільняє сучасним вимогам. Працівники ще стикаються з дією на них таких фізично небезпечних та шкідливих виробничих факторів, як дія шкідливих випромінювань від монітора та комп'ютера, підвищений рівень шуму, підвищена температура середовища, відсутність або недостатня освітленість робочої зони, електричний струм, статична електрика та ін. В період роботи з ВДТ на електронно-променевих трубках на організм користувача впливає цілий ряд факторів фізичної природи, але всі вони знаходяться в межах і значно нижче за нормовані величини відповідно до діючих зараз нормативних документів (таблиця 7.1).

**Таблиця 7.1 – Вид електромагнітних випромінювань ВДТ**

<b>Види випромінювань</b>	<b>Діапазон</b>	<b>Фактичні (середні) дані вимірів</b>	<b>Нормовані значення</b>
Рентгенівське випромінювання	понад 1.2 Кев	9-10-12 мкр/год	75.0 мкр/год
Ультрафіолетове випромінювання	220-280 нм 280-320 нм	0 0-0.02	0.1 Вт/м <sup>2</sup>
Видимий діапазон	320-400 нм 400-700 нм	0.1-0.2 2.5-4.0	10.0 Вт/м <sup>2</sup>
Яскравість		75-80 кд/м <sup>2</sup>	Не менше 35 кд/м <sup>2</sup>
α-випромінювання	700 нм-1 мм	0.05-4.0	100.0 Вт/м <sup>2</sup>
Електростатичне поле	0 Гц	15 кВ/м	20-60 кВ/м

Велика кількість працюючих з ЕОМ зв'язані з дією на них таких факторів, як розумове перевантаження, перевантаження слухових та зорових

аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження. Вплив вказаних факторів приводить до зниження працездатності, що викликається втомою. Поява та розвиток втоми пов'язана з змінами, які виникають під час роботи в центральній нервовій системі, з тормозними процесами в корі головного мозку.

Світлотехнічна специфіка робочих місць з ВДТ викликана такими унікальними особливостями:

1. Світлотехнічна різноманітність об'єктів зорової роботи користувачів ЕОМ, що працюють з ВДТ, пов'язана з наявністю трьох об'єктів (екран, клавіатура, документація), розташованих у різних зонах спостереження, що вимагає багаторазового переведення лінії зору від одного до іншого. Робоча документація частіше за все розміщена на столі у горизонтальній площині на відстані оптимальної зони видимості (приблизно 350 мм), об'єкти розрізнення мають негативний контраст, тобто об'єкти на світловому фоні. Об'єкти на клавіатурі визначаються більшим розміром і розташовані у похилій площині. Яскраві знаки на темному фоні майже вертикально орієнтованого екрану дисплея вимагають незвично горизонтальної орієнтації лінії зору. Таким чином умови роботи з ВДТ ускладнюються необхідністю постійної переадаптації від яскравих об'єктів з позитивним контрастом на темні-з негативним.

2. Робота з пульсуючим самосвітним об'єктом, який постійно знаходиться у центрі поля зору, що не відповідає нормативним вимогам щодо обмеження пульсації та засліпленості. Наявність пульсацій яскравості знаків виникає дискомфорт і втому, загальну і зорову.

3. На робочому місці несприятливо розподілена яскравість у полі зору, оскільки освітлені поверхні периферії поля зору можуть виявитись світлішими, ніж центр поля зору- темний, обмежено освітлений, а іноді заповнений знаками екран ВДТ. Такий розподіл яскравості у полі зору сприяє порушенню основних зорових функцій.

4. Засліплююча дія світильників, які освітлюють приміщення на робочому місці з ВДТ більша, ніж інших, що призводить до зменшення кута дії різних засліплюючих джерел і, відповідно, до зростання освітленості.

5. Наявність дзеркального відбиваючої і неплоскої зовнішньої поверхні не дає можливості повністю усунути з поля зору користувача всі відбиті відблиски.

В приміщеннях найчастіше використовується бокове природне освітлення. Як наслідок слабкої освітленості робочого приміщення, створюється різкий контраст між освітленістю моніторів та освітленістю навколишніх предметів, що дуже шкідливо для зору оператора. В тих випадках коли одного природнього освітлення недостатньо, встановлюється сумісне освітлення. При цьому додаткове штучне освітлення використовується не тільки в темноті, але й в світлий час доби.

Штучне освітлення по характеру виконуваних завдань ділиться на робоче, аварійне, евакуаційне.

Раціональне кольорове оформлення приміщення направлене на покращення санітарно-гігієнічних умов праці, підвищення його продуктивності та безпеки. Оформлення приміщень діє на нервову систему людини, її настрій та в кінцевому рахунку на продуктивність праці. Основні виробничі приміщення доречно фарбувати в відповідності з кольором технічних засобів. Освітленість приміщення і обладнання повинно бути м'яким, без відблисків.

Зниження шуму, що створюється на робочому місці внутрішніми джерелами, а також шуму, який проникає ззовні, є дуже важливим завданням. Зниження шуму в джерелі можна забезпечити використання пружних прокладок між основою машини, приладу і опорою поверхні. В якості прокладок використовується гума, войлок, пробка, різної конструкції амортизаторів. Під настільні апарати, які є джерелами шуму, можна підкладати м'які коврики з синтетичних матеріалів, а під ножки столу, на яких вони

встановлені,- прокладки з м'якої гуми, войлока, товщиною 6-8 мм. Кріплення прокладок можливе шляхом приклеювання їх до опорних частин.

Можливе також використання звукопоглинаючих кожухів, які не заважають технологічному процесу. Не менш важливим для зниження шуму в процесі експлуатації є питання правильного і своєчасного регулювання, змащення і заміни механічних вузлів обладнання, яке шумить.

Зниження рівня шуму, що надходить в виробниче приміщення ззовні, може бути досягнуто збільшенням звукоізоляції огорожуючих конструкцій, притисненням притворів вікон, дверей.

Таким чином для зниження шуму, що створюється на робочих місцях внутрішніми джерелами, а також шуму, що надходить ззовні:

- ослабити шум самих джерел (застосування екранів, звукоізолюючих кожухів);
- знизити ефект сумарної дії відбитих звукових хвиль (звукопоглинаючі поверхні конструкцій);
- використовувати архітектурно-планувальні та технологічні вирішення ізоляцій джерел шуму;
- використовувати раціональне розміщення обладнання.

Електричні установки, до яких відносяться практично всі складові ЕОМ, носять для людини велику потенційну небезпеку, так як в процесі експлуатації або проведення профілактичних робіт людина може доторкнутися до частин, які знаходяться під напругою. Специфічна небезпека електроустановок: струмоведучі провідники, корпуси стійок ЕОМ та іншого обладнання, які опинилися під напругою в результаті пошкодження (пробою) ізоляції, не подають будь-яких сигналів, які попереджують людину про безпеку. Реакція людини на електричний струм виникає тільки при протіканні останнього через тіло людини.

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом широко використовуються заземлювачі.

## 7.4 Розрахунок освітленості робочого місця при розробці криптографічних систем

Правильне освітлення виробничих приміщень сприяє підвищенню комфортності праці, збереженню здоров'я, зниженню імовірності нещасного випадку.

Розрахунок системи висвітлення зводиться до вибору виду освітлення, визначенню типу і числа світильників.

Будемо використовувати метод розрахунку по світловому потоку.

Вибір параметрів освітлення робочого місця залежить від характеру виконуваної роботи. Об'єкт розрізнення визначається як найменший розмір предмета або його частини, яку необхідно розрізнити.

В залежності від розмірів об'єкта розрізнення і відстані предмета від очей працюючого, всі роботи поділяються на вісім розрядів. Наша робота – високої точності, яка відповідає третьому розряду. Найменший лінійний розмір об'єкта розрізнення цього розряду – 0.3-0.5 мм.

В приміщенні передбачається організація штучного освітлення комбінованого типу, яке включає місцеве і загальне освітлення.

В якості джерела світла використовуються люмінесцентні лампи типу ЛБ (лампи білі), включені у світильники АОД.

Останні встановлюються на висоті 3.5 м від підлоги.

Лампи включаються в мережу з напругою 220 В, їхня потужність 40 Вт.

Нормована міні освітленість:

$$E_{\min} = (F_{\text{л}} \cdot n \cdot \eta \cdot z) / (S \cdot k) \quad (7.1)$$

$F_{\text{л}}$  – світловий потік 1-ї лампи, лм;

$n$  – число ламп у приміщенні;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку, тобто частка світлового потоку всіх ламп, які попадають на освітлену поверхню;

$z$  – коефіцієнт нерівномірності висвітлення;

$S = A \cdot B$  – площа поля освітленого приміщення;

$k$  – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в процесі експлуатації.

Для обраного типу ламп:

$$F_{\text{л}} = 2120 \text{ лм}; \quad S = 7 \cdot 5 = 35 \text{ м}^2; \quad \eta = 0.5; \quad z = 0.9; \quad k = 1.5$$

Нормована  $E_{\text{мін}}$  для третього розряду точності - 500 лк.

З формули (6.1) визначаємо число ламп:

$$n = (E_{\text{мін}} \cdot S \cdot k) / (z \cdot \eta \cdot F_{\text{л}}) = (500 \cdot 35 \cdot 1.5) / (0.9 \cdot 0.5 \cdot 2120) = 27.5 = 28$$

Так як в кожному світильнику розташовано по 2 лампи, всього необхідно 14 світильників.

## **7.5 Електромагнітний імпульс ядерного вибуху і захист від нього радіоелектронних засобів**

На початку 90-х років у США стала зароджуватися концепція, відповідно до якої збройні сили країни повинні мати не тільки ядерні і звичайні озброєння, але і спеціальні засоби, що забезпечують ефективну участь у локальних конфліктах без нанесення супротивнику зайвих втрат у живій силі і матеріальних цінностях.

До цієї спеціальної зброї американські військові фахівці в першу чергу відносять:

- засоби створення електромагнітного імпульсу (ЕМІ);
- генератори інфразвуку;



- хімічні склади і біологічні рецептури, здатні змінювати структуру базових матеріалів основних елементів бойової техніки;
- речовини, що виводять з ладу змащення і гумові вироби, викликають загустення пального;
- лазери.

В даний час основні роботи з розвитку технологій зброї не смертельної дії (ЗНСД) проводяться в керуванні перспективних досліджень міністерства оборони, Ліверморській і Лос-Аламоській лабораторіях міністерства енергетики, центрі розробок озброєння міністерства армії і т.д.

Найбільш близькі до прийняття на озброєння різні типи лазерів для осліплення особового складу, хімічні засоби для його знерухомлення, генератори ЕМІ, що негативно впливають на роботу електронної техніки.

Генератори ЕМІ (супер ЕМІ), як показують теоретичні роботи і проведені за рубежом експерименти, можна ефективно використовувати для виводу з ладу електронної й електротехнічної апаратури, для стирання інформації в банках даних і псування ЕОМ.

За допомогою ЗНСД на основі генераторів ЕМІ можливий вивід з ладу ЕОМ, ключових радіо й електротехнічних засобів, систем електронного запалювання й інших автомобільних агрегатів, чи підірвавши інактивація мінних полів. Вплив цієї зброї досить вибірково і політично цілком прийнятний, однак потрібна точна доставка його в райони поразення.

Незважаючи на визнання військово-політичним керівництвом США і НАТО неможливості перемоги в ядерній війні, різні аспекти вражаючого дії ядерної зброї продовжують широко обговорюватися. Так, в одному з розглянутих іноземними фахівцями сценаріїв початкового періоду ядерної війни особливе місце приділяється потенційної можливості висновку з ладу радіоелектронної техніки в результаті впливу на неї ЕМІ.

Вважається, що підірвавши на висоті близько 400 км тільки одних боєприпасів потужністю більш 10 Мт приведе до такого порушення

функціонування радіоелектронних засобів у великому районі, при якому час їхнього відновлення перевищить припустимі терміни для вживання відповідних заходів.

По розрахунках американських експертів, оптимальною точкою підризу ядерних боєприпасів для поразки ЕМІ радіоелектронних засобів майже на всій території США була би точка в космосі з епіцентром у районі географічного центра країни, що знаходиться в штаті Небраска.

Теоретичні дослідження і результати фізичних експериментів показують, що ЕМІ ядерного вибуху може привести не тільки до виходу з ладу напівпровідникових електронних пристроїв, але і до руйнування металевих провідників кабелів наземних споруд. Крім того, можлива поразка апаратури, що знаходяться на низьких орбітах.

Для генерації ЕМІ ядерні боєприпаси можуть підриватися в космічному просторі, що не приводить до виникнення ударної хвилі і випаданню радіоактивних опадів. Тому в закордонній пресі виголошуються наступні думки про "неядерний характер" такого бойового застосування ядерної зброї і про те, що удар з використанням ЕМІ не обов'язково приведе до загальної ядерної війни.

Небезпека цих заяв очевидна, тому що одночасно деякі закордонні фахівці не виключають можливість масової поразки за допомогою ЕМІ і живої сили. У всякому разі цілком очевидно, що наводимі під впливом ЕМІ в металевих елементах техніки струми і напруги будуть смертельно небезпечні для особового складу.

## **7.6 Забезпечення нормальних умов праці**

### **7.6.1 Вибір приміщення**

При виборі приміщення для робочих місць необхідно врахувати, що вони можуть давати відблиски на екранах дисплеїв і викликати значну освітленість у сидячих перед ними, особливо літом та в сонячні дні.

В машинних залах робочі місця операторів, які працюють з дисплеями, розміщують подалі від вікон і таким чином, щоб віконні пройоми виходили збоку. Якщо екран дисплея повернутий до віконного пройому, необхідні спеціальні екрануючі пристрої. Вікна рекомендується оснащувати світлорозсіюючими шторами, регулюючими жалюзями або сонцезахисною сіткою з металізованим покриттям. Площа засклення не повинна перевищувати 25 % від площі стіни з вікнами. Для мінімізації засвічування від сонячних променів екранів ВДТ вікна можуть бути орієнтовані на північ (північний захід, північний схід).

Необхідно забезпечити відповідне оформлення інтер'єра, бо давати відблиски на екранах і сліпити працюючих можуть не тільки вікна, але й інші поверхні великої яскравості, в тому числі стеля, стіни, поверхні столів, шаф. Тому все повинно мати невисокі коефіцієнти віддзеркалювання: робочого столу, корпусу та клавіатури- 0.2-0.5; стелі- 0.6-0.7; стін- 0.2-0.5; підлоги- 0.1-0.2; шаф та стелажів- 0.25-0.35. Всі оздоблювальні матеріали приміщення повинні бути матового кольору.

### **7.6.2 Забезпечення нормальних санітарно- гігієнічних умов на робочому місці**

Приміщення, їх розміри (площа, об'єм) повинні в першу чергу відповідати кількості працюючих і розміщеному в них комплекту технічних засобів. В них передбачаються відповідні параметри температури, освітлення, чистоти повітря, забезпечують ізоляцію, захист від виробничих шумів і т. п. Робочі

місця з ВТД вимагають значної площі на одне робоче місце (6-7 м<sup>2</sup>), а при середній площі устаткування 0.8-1.2 м<sup>2</sup> навколо нього має залишатись вільний простір не менше 1 м з кожного боку. Для забезпечення нормальних умов праці санітарні норми СН245-71 встановлюються на одного працівника, об'єм виробничого приміщення не менше 15 м<sup>2</sup>, а площа приміщення огороженого глухими перегородками не менше 4.5 м<sup>2</sup>. В дисплейних класах температура повітря повинна становити 19-21 °С, відносна вологість 55-65 %, швидкість руху повітря не більше 0.1 м/с, рівні шуму та еквівалентні рівні звуку в приміщеннях не повинні перевищувати 50дБ [24].

Для експлуатації ЕОМ необхідно передбачити наступні приміщення:

- машинний зал;
- приміщення для розміщення сервісного і периферійного обладнання;
- приміщення для зберігання запасних деталей, інструментів приладів;
- приміщення для розміщення вентиляторів;
- приміщення для персоналу;
- приміщення для прийому- видачі інформації.

Ці приміщення розміщують в безпосередній близькості одне від одного. Їх обладнують загальнообмінною вентиляцією та штучним освітленням. До приміщень машинного залу і зберігання магнітних носіїв інформації ставляться особливі вимоги. Площа машинного залу повинна відповідати площі необхідної по заводським технічним умовам даного типу ЕОМ [24].

Висота залу над технічною підлогою до підвісної стелі повинна бути 3-5 м. Відстань між підвісною та основною стелями при цьому повинна бути 0,5-0,8 м. Висоту припідлогового простору приймають рівною 0,2-0,6 м.

При роботі з ЕОМ, як правило, застосовують бічне природне освітлення. Робочі кімнати і кабінети повинні мати природне освітлення. В решті

приміщень допускається штучне освітлення. В таблиці 6.2 приведені рівні освітленості в приміщеннях з ВДТ при використанні різних типів дисплеїв.

В тих випадках, коли одного штучного освітлення не достатньо, встановлюється сумісне освітлення. При цьому додаткове штучне освітлення використовується як в темноті, так і в світлий час доби.

Раціональне планування приміщення, розміщення устаткування є важливим фактором, який дозволяє понизити шум при існуючому устаткуванні. При плануванні машинний зал та приміщення для сервісної апаратури необхідно розташувати якнайдалі від устаткування, яке дуже шумить або вібрує.

**Таблиця 7.2 - Рівні освітленості в приміщеннях з ВДТ**

Характеристики дисплеїв зорової роботи		Нормована освітленість (лк) у площині столу, клавіатури (Ег), та екрану (Ев)			
Вид дисплея	Група напруженості зорової роботи	Загальне		Комбіноване	
		Ег, лк	Ев, лк	Ег, лк	Ев, лк
Одноколірний	 	300	150-100	400	150-100
		400	200-150	500	300-150
Багатоколірний	Будь-яка	-	-	200	100-75

Зниження рівня шуму, який проникає в виробниче приміщення ззовні може бути досягнуте збільшенням звукоізоляції огорожуючих конструкцій [23].

Для профілактики порушень та підтримання працездатності необхідно витримувати регламентовані перерви для відпочинку. У період роботи за дисплеєм у режимі праці та відпочинку необхідно передбачити через кожні 40-45 хв. три- або п'ятихвилинні перерви для відпочинку.

### **7.6.3 Розрахунок освітлення машинного залу**

Найбільш оптимальними для машинного залу є люмінісцентні лампи ЛБ (білого світла) і ЛТБ (тепло-білого світла) потужністю 20, 40 та 80 Вт.

Для виключення засвітки екранів дисплеїв прямими світловими потоками світильники загального призначення розміщують збоку від робочого місця, паралельно лінії зору оператора і стінці з вікнами. Таке розміщення світильників дозволяє проводити їх послідовне включення в залежності від величини дійсної освітленості і виключає подразнення очей полосами світла і тіні, які виникають при поперечному розміщенні світильників.

Для освітлення машинного залу розмірами  $A=9$  м,  $B=6$  м і висотою  $H=3$  м передбачені настельні світильники типу УСП 3 з двома люмінесцентними лампами типу ЛБ-40. Коефіцієнт відображення світлового потоку від стелі, стін і підлоги відповідно  $\rho_{ст}=70\%$ ,  $\rho_{с}=50\%$ ,  $\rho_{м}=10\%$ . Необхідне число світильників визначається наступним чином [24].

Для машинних залів рівень робочої поверхні над підлогою складає 0.8 м.

Тоді

$$h = H - 0.8 = 2.2 \text{ м.} \quad (7.1)$$

У світильників УСП 35 умовна віддаль  $\xi = 1.4$

$$\frac{L}{h} = \xi = 1.4, \quad (7.2)$$

де  $L$ - відстань між рядами світильників,

$$L = \xi * h = 1.4 * 2.2 \approx 3 \text{ м.} \quad (7.3)$$

Розмістимо світильники вздовж довгої сторони приміщення. Відстань між стиками і крайніми рядами приймаємо рівною

$$l \approx (0.3 \dots 0.5) * L. \quad (7.4)$$

При ширині машинного залу  $B=6$  м маємо число рядів світильників

$$n = \frac{B}{L} = 2. \quad (7.5)$$

Для машинних залів встановлена норма освітленості  $E_n=400$  лк. З врахуванням  $\rho_{ст}$ ,  $\rho_{с}$ ,  $\rho_{м}$  при індексі приміщення з довідкових даних знаходимо коефіцієнт використання випромінюваного світильниками потоку, який приходить на розрахункову величину,  $\eta=0.45$ .

$$j = \frac{A * B}{(h * (A + B))} = \frac{54}{(2.2 * (9 + 6))} \approx 1.64 \quad (7.6)$$

Номінальний світловий потік лампи ЛБ-40  $\Phi_{л}=3120$  лм, тоді світловий потік, який випромінюється світильником складе

$$\Phi_{св}=2*\Phi_{л}=2*3120=6240 \text{ лм.} \quad (7.7)$$

Необхідну кількість світильників знаходимо за наступною формулою

$$N = \frac{E_{н} * k_{з} * S * z}{n * \Phi_{св} * \eta * \gamma}, \quad (7.8)$$

де  $E_{н}$ - нормована мінімальна освітленість,  $E_{н}=400$  лк;

$k_{з}$ - коефіцієнт запасу, який враховує запилення світильників і знос джерел світла в процесі експлуатації,  $k_{з}=1,4 \dots 1,5$ ;

$S$  - площа приміщення, м;

$z$  - коефіцієнт нерівномірності освітлення  $z=1,1 \dots 1,2$ ;

$n$  - число рядів світильників;

$\eta$  - коефіцієнт затінення, який вводиться для приміщень з фіксованим положенням працюючих, а також при наявності крупногабаритних предметів,  $\gamma=0,8 \dots 0,9$ .

$$N = \frac{(400 * 1.5 * 54 * 1.2)}{(2 * 6240 * 0.45 * 0.9)} = 7.692 \approx 8 \text{ ламп.}$$

Отже, необхідно 8 світильників.

## 8 ЕКОЛОГІЯ

### 8.1 Характеристика енергетичних забруднень та методи їх знешкодження

#### 8.1.1 Забруднення виробничого та навколишнього середовища відходами виробництва

Під час свого функціонування обладнання, яким оснащуються комп'ютеризовані робочі місця, виробляє наступні забруднення:

- теплове;
- забруднення повітря пилом;
- іонізуюче випромінювання;
- електромагнітні випромінювання.

Теплове забруднення викликається тим, що комп'ютерне обладнання виділяє під час роботи значну кількість тепла, що призводить до підвищення температури повітря у приміщенні та, як наслідок, до перегріву організму людини.

Під час перегріву у людини частішає пульс, частота дихання, з'являється слабкість, головний біль, збільшується температура тіла, що загрожує тепловим ударом.

Забруднення повітря пилом відбувається у кабельних коробах, де виділяється вуглекислий газ, окис вуглецю; у приміщенні операторного залу, де виділяється технологічний пил під час роботи обладнання. Особливу небезпеку щодо впливу на здоров'я представляє підвищена концентрація озону – високотоксичного подразнюючого газу. З цієї причини він був внесений у список речовин, максимальні значення концентрації яких на робочих місцях обмежені та строго визначені. Основними джерелами озону на комп'ютеризованих місцях є електронні променеві трубки моніторів (ЕПТ), лазерні принтери та копіювальні апарати.



Основним джерелом іонізованого випромінювання є електронні променеві трубки моніторів. Дослідження, проведені в Україні, підтвердили негативний вплив, зумовлений збільшенням кількості позитивних іонів на розумову та фізичну працездатність, розвиток втомлювальну діяльність серцево-судинної системи, бронхо-легеневого апарату, кровотворення, вегетативної нервової системи.

Потенційним джерелом випромінювання кількох діапазонів електромагнітного спектру (рентгенівського, оптичного, радіочастотного) є дисплеї на основі електронних променевих трубок.

Встановлено, що джерелом рентгенівського випромінювання є екран, з інших сторін ЕПТ цього виду електромагнітного випромінювання взагалі не було виявлено. Найвищі рівні рентгенівського випромінювання зареєстровані при максимальній яскравості і при щільно заповненому екрані. Однак у всіх випадках випромінювання від ЕПТ не перевищувало фонового рівня.

Оптичні види випромінювання виникають завдяки взаємодії електронів з шаром люмінофору, нанесеного на екран дисплею. Область оптичного випромінювання включає ультрафіолетове (УФ), світлове та інфрачервоне (ІЧ) випромінювання.

Проведені дослідження показали, що інтенсивності випромінювання в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях оптичного випромінювання є нижчими від допустимих значень.

### 8.1.2 Експлуатації моніторів і ПЕОМ

Приміщення з моніторами і ПЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення. Природне освітлення повинно здійснюватися через світлопройми, орієнтовані переважно на північ і північний схід, забезпечувати коефіцієнт природного освітлення (КПО) не нижче 1.2 % у зонах зі стійким сніжним покривом і не нижче 1.5 % на іншій території. Зазначені значення КПО нормуються для будинків, розташованих у III світловому кліматичному поясі.

Площа на одне робоче місце з ВДТ або ПЕОМ для дорослих користувачів повинна складати не менш 6.0 м<sup>2</sup>, а об'єм - не менш 20.0 м<sup>3</sup>.

Для внутрішньої обробки інтер'єра приміщень з моніторами і ПЕОМ повинні використовуватися дифузно-віддзеркалювані матеріали з коефіцієнтом відбиття для стелі – 0.7-0.8, для стін – 0.5-0.6, для підлоги – 0.3-0.5.

Поверхня підлоги в приміщеннях експлуатації моніторів і ПЕОМ повинна бути рівною, без вибоїв, неслизькою, зручною для очищення і для вологого прибирання, мати антистатичні властивості.

У виробничих приміщеннях, в яких робота з моніторами і ПЕОМ є основною (диспетчерські, операторські, розрахункові, кабінки і пости керування, зали обчислювальної техніки і ін.) повинні забезпечуватися оптимальними параметри мікроклімату.

Для підвищення вологості повітря в приміщеннях з моніторами ПЕОМ варто застосовувати зволожувачі повітря, які заправляються щодня дистильованою або прокип'яченою питною водою.

Таблиця 8.1. Оптимальні норми мікроклімату для приміщень із ВДТ і ПЕОМ (параметри для дотримання рекомендуються)

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С не більше	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	легка - 1а	22 - 24	40 - 60	0.1
	легка - 1б	21 - 23	40 - 60	0.1
Теплий	легка - 1а	23 - 25	40 - 60	0.1
	легка - 1б	22 - 24	40 - 60	0.2

### 8.1.3 Освітлення приміщень і робочих місць з моніторами і ПЕОМ

Штучне освітлення в приміщеннях експлуатації моніторів і ПЕОМ повинно здійснюватися системою загального рівномірного освітлення. Допускається

використання місцевого освітлення, призначеного для освітлення зони розташування документів.

Освітленість на поверхні столу в зоні розміщення робочого документа повинна бути 300-500 лк. Допускається установка світильників місцевого освітлення для підсвічування документів. Місцеве освітлення не повинно створювати відблисків на поверхні екрана і збільшувати освітленість екрана більше 300 лк.

Варто обмежувати пряме відбиття від джерел освітлення, при цьому яскравість світлових поверхонь (вікна, світильники і ін.), які знаходяться в полі зору, не повинні бути більш 200 кд/м<sup>2</sup>.

Варто обмежувати нерівномірність розподілу яскравості в полі зору монітором і ПЕОМ, при цьому співвідношення яскравості між робочими поверхнями не повинно перевищувати 3:1-5:1, а між робочими поверхнями і поверхнями стін і устаткування 10:1.

Для освітлення приміщень з моніторами і ПЕОМ варто застосовувати світильники серії ЛПО36 із зеркалізованими ґратками, укомплектовані високочастотними пускорегулюючими апаратами (ВЧ ПРА). Допускається застосовувати світильники серії ЛПО36 без ВЧ ПРА тільки в модифікації “Кососвет”, а також світильники прямого світла - П, переважаючого світла - Н, відбитого світла - В. Застосування світильників без розсіювачів і неекрануючих ґраток не допускається.

Яскравість світильників загального освітлення в зоні кутів випромінювання від 50° до 90° з вертикаллю в повздовжній і поперечній площинах повинна складати не більше 200 кд/м<sup>2</sup>, захисний кут світильників повинен бути не менше 40°.

Світильники місцевого освітлення повинні мати не просвічуючий відбивач із захисним кутом не менше 40°.

Коефіцієнт пульсації не повинен перевищувати 5 %, що повинно забезпечуватися застосуванням газорозрядних ламп у світильниках загального і

місцевого освітлення з високочастотними пускорегулюючими апаратами (ВЧ ПРА) для будь-яких типів світильників. При відсутності світильників із ВЧ ПРА лампи багатолампових світильників або поруч розташовані світильники загального освітлення включати на різні фази трифазної мережі.

Робочі місця з ВДТ і ПЕОМ відносно світлових проектів повинні розташовуватися так, щоб природнє світло падало збоку, переважно ліворуч.

Схеми розміщення робочих місць із ВДТ і ПЕОМ повинні враховувати відстані між робочими столами з відеомоніторами (у напрямку тилу поверхні одного відеомонітора й екрана іншого відеомонітора), які повинні бути не менше 2.0 м, а відстань між бічними поверхнями відеомоніторів - не менше 1.2 м.

Віконні вирізи в приміщеннях використання ВДТ і ПЕОМ повинні бути обладнані регульованими пристроями типу жалюзі, занавіси, зовнішні дашки.

Екран відеомонітора повинен знаходитися на відстані 600-700 мм, але не ближче 500 мм з врахуванням алфавітно-цифрових знаків і символів.

Приміщення з ВДТ і ПЕОМ повинні бути оснащені аптечкою першої допомоги й вуглекислотними вогнегасниками.

### Вимоги до клавіатури

Конструкція клавіатури повинна передбачати:

- виконання у вигляді окремого пристрою з можливістю вільного переміщення;
- опорне пристосування, яке дозволяє змінювати кут нахилу поверхні клавіатури в межах від 5° до 15°;
- висоти середнього ряду клавіш не більше 30 мм;
- розташування часто використовуваних клавіш у центрі, внизу і праворуч, рідко використовуваних - нагору і вліво;
- виділення кольором, розміром формою і місцем розташування функціональних груп клавіш;

- мінімальний розмір клавіш - 13 мм, оптимальний - 15 мм;
- клавіші з поглибленням у центрі і кроком  $19\pm 1$  мм;
- відстань між клавішами не менше 3 мм;
- однаковий хід для всіх клавіш з мінімальним опором натискання 0.25 Н і максимальним - не більше 1.5 Н;
- звуковий зворотний зв'язок від включення клавіш з регулюванням рівня звукового сигналу і можливістю його відключення.

Таблиця 8.2. Висота одномісного столу для занять з ПЕОМ і ВДТ  
(параметри для дотримання обов'язкові)

Ріст людини в взутті, см	Висота над підлогою, мм	
	поверхня столу	простір для ніг, не менше
116 - 130	520	400
131 - 145	580	520
146 - 160	640	580
161 - 175	700	640
вище 175	760	700

#### 8.1.4 Вимоги до екологічних рівнів шуму і вібрації

При виконанні основної роботи на моніторах і ПЕОМ (диспетчерські, операторські, розрахункові, кабіни і пости керування, зали обчислювальної техніки і ін.), де працюють інженерно-технічні працівники, які здійснюють лабораторний, аналітичний або вимірювальний контроль, рівень шуму не повинен перевищувати 60 дБА.

У приміщеннях операторів ЕОМ (без дисплеїв) рівень шуму не повинен перевищувати 65 дБА.

На робочих місцях у приміщеннях для розміщення шумних агрегатів обчислювальних машин (АЦДП, принтери і ін.) рівень шуму не повинен перевищувати 75 дБА.

Шумне устаткування (АЦДП, принтери і ін.), рівні шуму якого перевищують нормовані, повинно знаходитися поза приміщенням з монітором і ПЕОМ.

Знизити рівень шуму в приміщеннях з моніторами і ПЕОМ можна використанням звукопоглинаючих матеріалів з максимальними коефіцієнтами звукопоглинання в області частот 63-8000 Гц для обробки приміщень підтверджених спеціальними акустичними розрахунками.

Додатковим звукопоглинанням служать однотонні занавіски з щільної тканини, які гармонічно поєднуються з кольором стін і підвішені в складку на відстані 15-20 см від огороження. Ширина занавіски повинна бути в 2 рази більшою ширини вікна.

## **8.2 Зниження енергоємності енергозбереження систем стисненого повітря**

Стиснене повітря дає великі зручності в роботі, але для його виробництва необхідні значні витрати електричної енергії. В загальному балансі споживання електричної енергії значної кількості заводів витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря досягають 30 %. У зв'язку з цим скорочення витрат електроенергії в компресорних пристроях повинно бути одним із головних завдань експлуатації. Виробництво стисненого повітря - це вкрай неефективний процес. Близько 90% електроенергії, яка витрачається на виробництво стисненого повітря, втрачається у вигляді тепла. Менше 10% витраченої електроенергії перетворюється в корисну. Недосконала конструкція і витоки повітря з трубопроводів розподілення призводять до подальшого зниження ефективності ще на 30-50%. Для систем стисненого повітря, як і для інших систем, які використовують енергоносії, є характерними три підсистеми:

- виробництво стисненого повітря;
- транспортування і розподілення;
- споживання.

Виробничі витрати за весь період роботи компресорної станції в багато разів перевищує первісну вартість її установки та експлуатації. Наприклад, вартість енергоресурсів становить 70-80 %, капітальні витрати – 15-20 %, технічне обслуговування – 5-10 %. Під час проектування системи стисненого повітря велике значення з погляду ефективного використання енергії є вибір типу компресора відповідно до планованого навантаження.

Таблиця 8.6 - Залежність втрат і витоків від діаметра отвору

Діаметр отвору, мм	Витоки повітря при надлишковому тиску 0,7 МПа, м <sup>3</sup> /год	Втрати енергії, кВт	Витрати за рік, грн/рік *
0,1	0,04	0,004	21
1	4,3	0,43	2260
3	42	4.2	22076
5	120	12	63072
10	433	43,3	227574

Розглянемо деякі можливості енергозбереження для кожної підсистеми.

#### Виробництво стисненого повітря:

- Керування продуктивністю компресора, якщо навантаження системи змінюється у часі.
- Запобігання неробочому ходу компресора за тривалого нульового навантаження. По можливості, компресори повинні вимикатися.
- Регулярне очищення всмоктувального фільтра.
- Удосконалення системи керування роботою мережі компресорів для досягнення оптимальної пріоритетності процесів вмикання і вимикання.
- Відбір (відновлення) тепла за наявності теплового навантаження.
- Заміна кільцевих клапанів компресорів на прямоточні.
- Усунення витоків стисненого повітря через нещільності елементів системи транспортування повітря та деталей компресора.

- Зменшення втрат електроенергії заміною застарілих компресорів на сучасні.

#### Транспортування і розподілення стисненого повітря:

- Вимикання окремих секцій мережі за допомогою вентилів.
- Поділ системи на дві або більшу кількість систем, якщо в одній і тій самій системі використовуються різні рівні тиску.
- Усунення витоків стисненого повітря з повітропроводів низького тиску.
- Зменшення витоків стисненого повітря через нещільності в арматурі та шлангах.

Рекомендується включати до складу системи стисненого повітря набір постійно діючого вимірювального обладнання.

Воно повинно увійти до складу загальної системи енергетичного менеджменту на підприємстві. Кількість необхідних вимірів залежить від того, наскільки значне споживання енергії саме системою стисненого повітря в порівнянні з іншими системами підприємства.



## ВИСНОВКИ

Проаналізовано конструкції утримуючих і підтримуючих захоплювальних пристроїв та методи планування траєкторій при виконанні маніпуляторами вантажно-розвантажувальних операцій, що дало можливість визначити умови стабільного утримування вантажу.

Проаналізовано вплив сили лобового опору повітря, що діє на об'єкт маніпулювання під час виконання транспортної операції, на мінімальну необхідну силу притягання захоплювача Бернуллі. Моделювання проводилось для випадку руху об'єкта маніпулювання по прямолінійній траєкторії із застосуванням методу оптимізації орієнтації захоплювача Бернуллі. Встановлено основні закономірності впливу швидкості транспортування об'єкта та його габаритів на силу лобового опору повітря. Для заданих параметрів руху захоплювача Бернуллі встановлено, що при його швидкості 3m/s, масі об'єкта маніпулювання 1кг та розмірах 0,5x0,5x0,5м, сила лобового опору повітря складає 47% від мінімальної необхідної сили притягання захоплювача. Встановлено, що вплив сил лобового опору у найбільшій мірі проявляється при транспортуванні габаритних об'єктів маніпулювання малої маси. Отже, при визначенні вантажопідймальності захоплювальних пристроїв, необхідно враховувати діючі на об'єкт маніпулювання у процесі транспортування сили лобового опору повітря. Це дозволить підвищити точність обчислення мінімальної необхідної сили притягання захоплювача Бернуллі для утримування об'єкта маніпулювання у процесі транспортування.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що дослідженням впливу параметрів захватної системи на енегоефективність виконання вантажно-розвантажувальної операції не було приділено достатньої уваги. Запропоновано конструкції орієнтуючих-подовжувачів для СЗП та встановлено технічні вимоги до їх габаритів, маси та жорсткості. Для заданих параметрів захватної системи доведено, що збільшення геометричних параметрів орієнтуючого-подовжувача

призводить до зростання енергетичних затрат на виконання транспортних операцій в 1,6 рази. Запропоновано залежності для розрахунку координат центру мас захватної системи та її моменту інерції. Визначено сумарну потужність та енергетичні затрати промислового робота на транспортування об'єкта маніпулювання із оптимізацією орієнтації захватної системи.

У роботі досліджено процес транспортування габаритних об'єктів маніпулювання без оптимізації орієнтації та із оптимізацією орієнтації захватної системи. Проведено порівняльний аналіз енергоефективності транспортування габаритних об'єктів із оптимізацією орієнтації захватної системи на базі вихрових, вакуумних захоплювачів та захоплювачів Бернуллі.

Використання методу оптимізації орієнтації захоплювальної системи у процесі транспортування об'єкта промисловим роботом, дозволило знизити енергетичні затрати до 69% у порівнянні з транспортуванням без переорієнтації. Доведено ефективність використання методу оптимізації орієнтації захватної системи на базі пневматичних захоплювальних пристроїв.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гавриш А. П., Ямпольский Л. С., Карлов А. Г. Промышленные роботы: Конструирование, управление, эксплуатация. Учебное пособие. Вища школа, 1985.
2. Schilling R. et al. Fundamentals of robotics. 2013.
3. Белецкий В. Двунюгая ходьба: модельные задачи динамики и управления. Москва Наука, 1984.
4. Я Аустен К. Ш., АМ Формальский. Виртуальный четырёхногий робот: конструкция, управление, моделирование, эксперименты // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Vol. 8. P. 1–28.
5. Vukobratovic M. Robot-environment dynamic interaction survey and future trends // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2010. Vol. 49. P. 329–342.
6. Павловский В. О разработках шагающих машин. Препринт ИПМ 101, Москва, 2013. Vol. 101. P. 31. URL: [http://www.keldysh.ru/papers/2013/prep2013\\_101.pdf](http://www.keldysh.ru/papers/2013/prep2013_101.pdf).
7. ДМ Гориневский А. Ш., А М Формальский. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. Физматлит, 1994. P. 384.
8. Вукобратович М. К. Н., Стокич Д. Неадаптивное и адаптивно управление манипуляционными роботами. Мир, 1989.
9. Robinette P., Wagner A. R., Howard A. M. Modeling Human-Robot Trust in Emergencies // 2014 AAAI Spring Symposium Series. 2014.
10. Zhang T., Wei Q., Ma H. Position/Force Control for a Single Leg of a Quadruped Robot in an Operation Space. // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10.

11. Тертычный-Даури В. Динамика робототехнических систем. Санкт-Петербург, 2012.
12. Савків В.Я. Автоматизація процесів завантаження об'єктів типу тіла обертання на основі струменевих захоплюючих пристроїв. Тернопіль 1999р.
13. Фендьо О.М. Обґрунтування параметрів та конструкцій струминних захоплювачів пристроїв завантаження. Тернопіль – 2012р.
14. Розенблат Г.М. Задачі механіки тіла з сухим тертям. Москва -2009р.
15. Фендьо О. Оптимізація конструкції струменевих захоплювальних пристроїв для автоматизації завантаження циліндричних об'єктів / О. Фендьо, В. Савків. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. № 26, 2010. – С. 439-448.
16. Савків В. Дослідження динаміки процесу захоплення об'єктів маніпулювання безконтактними струменевими захоплювальними пристроями / В. Савків, О. Фендьо // Вісник КНУТД. – 2010. № 6. – С.
17. Савків В. Дослідження сили присмоктування струминним захоплювачем плоского пористого об'єкта / В. Савків, Я. Проць, О. Данилюк // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2001. – том 6, № 1..
18. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навчальний посібник / Я.І. Проць – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя, 2008..
19. Проць Я. Механізми подачі стрічкового матеріалу в листоштампувальному виробництві / Я. Проць, В. Савків, О. Фендьо. // Вісник ТДТУ. – 2007. – Том 12. – № 4
20. Лебедев И.В. Элементы струйной техники / Под ред. И.В. Лебедева. – М.: Машиностроение, 1973.

21. Савків В.Б. Автоматизація процесів завантаження об'єктів типу тіла обертання на основі струменевих захоплюючих пристроїв [Текст]: дис.. канд.. техн.. наук / В.Б. Савків. 1999.
22. Фендьо О.М., Фендьо Е.Н., & Fend'o E.N. (2012). Обґрунтування параметрів та конструкцій струминних захоплювачів пристроїв завантаження [Текст]: дис.. канд.. техн.. наук / О.М. Фендьо. 2012.
23. Савків В.Б. Газодинамічний аналіз струменевих захоплювачів “сопло з розвинутою поверхнею торця” / В.Б. Савків, Я.І. Проць // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – Тернопіль, 1999. – № 3(1). – С. 48 – 54.
24. Автоматическая загрузка технологических машин: Справочник / И.С. Бляхеров, Г.М. Варьяш, А.А. Иванов и др. // Под общ. ред. И.А. Клусова. М.: Машностроение. – 1990. – 400 с.
25. Siciliano B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin : Springer, 2008. – P. 1631.
26. Промышленные роботы для миниатюрных изделий / Р.А.Бансявичюс, А.А.Иванов, Н.И.Камышный и др. / Под. ред. В.Ф.Шаньгина. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
27. Tuleja P. Unilateral gripping with active vacuum suction cup Calculation of gripping force and number of suction cups. / P. Tuleja, L. Sidlovska // Transfer inovacii. – 2014. – № 29. – P. 232 – 235.
28. Ханжонков В.И. Аэродинамика аппаратов на воздушной подушке / В.И. Ханжонков – М.: Машиностроение, 1973. – С. 359.
29. Gujarati Damodar. Econometrics by example / D. Gujarati // Palgrave Macmillan. – 2014
30. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем / С.А. Воротников // М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.
31. Яхимович В.А. Ориентирующие механизмы сборочных автоматов / В.А. Яхимович. – М.: Машиностроение, 1975. – 164 с.

32. Офіційний сайт фірми BP and Technology [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <http://www.bp.com>.
33. Shin K. Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints / K. Shin, N. McKay // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1985. – № 30(6). – P. 531 – 541.
34. Пневматические устройства и системы в машиностроении: Справочник / Е.В. Герц, А.И. Кудрявцев, О.В. Ложкин и др. / Под общ. ред. Е.В. Герца. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с
35. Рехтен А.В. Струйная техника: основы, элементы, схемы / А.В. Рехтен. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
36. Бохонский А.И. Оптимальное управление перемещением груза телескопическим манипулятором с пневмоприводами. / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Севастопольский национальный технический университет. – 2004.
37. Пупков К.А. Интеллектуальные системы. / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
38. Вакуумная техника: Справочник / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александров и др. // Под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
39. Ловейкін В.С. Динамічна оптимізація підйомних машин / В.С. Ловейкін, А.П. Нестеров. – Х.: ХДАДТУ, 2002. – 285 с.
40. Методика автоматизованого кінематичного формування програмних траєкторій переміщення схвата промислових роботів при синтезі роботизованих механоскладальних технологій / М.В. Богдановський, В.А. Кирилович, М.О. Ковбаса, Т.Є. Нужда // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2004. – №. 4 (31) Т. 2. – С. 92–102.
41. Степанов Г.Ю. Гидродинамическая теория аппаратов на воздушной подушке / Г.Ю. Степанов. – М.: Машгиз, 1963. – 186 с.

42. Non-contact Transportation of Flat Panel Substrate by Combined Ultrasonic Acoustic Viscous and Aerostatic Forces / I. Hiromi, F. Masaaki, O. Masami, K. Akira // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. April 2007. – № 8(2). – P. 44 – 48.
43. Ибрагимов И.А. Элементы и системы пневмоавтоматики / И.А. Ибрагимов, Н.Г. Фарзанае, Л.В. Илясов. // [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Высш. шк., 1985. – 544 с.
44. Проць Я.І. Струменеві пристрої для захоплення та контролю розмірів об'єктів в процесі маніпулювання / Я.І. Проць, В.Б. Савків, І.Р. Козбур // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – №1. – С. 22 – 25.
45. Челпанов И.Б. Бесконтактное вихревое вакуумное захватное устройство для промышленных роботов. / И.Б. Челпанов, А.А. Блажнов, А.В. Кочетков // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – № 7.1.
46. Рабинович А.Н. Автоматическое ориентирование и загрузка штучных деталей / А.Н. Рабинович. – К.: Техніка, 1968. – 543 с.
47. Робототехнические системы в сборочном производстве / Под ред. Е.В.Пашкова. – К.: Выща школа, 1987. – 270 с.
48. Höppner J. Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler. – Herbert Utz Verlag, 2002. – Vol. 164.
49. Babur O. Evaluation of handling results of various materials using a non-contact end-effector. / O. Babur, E. Fehmi, F. Fehim // Industrial Robot: An International Journal. – 2003. – № 30(4). – P. 363 – 369.
50. Babur O. Examination of the movement of a woven fabric in the horizontal direction using a non-contact end-effector. / O. Babur, E. Fehmi // Gebze Institute of Technology, Department of Design and Manufacturing Engineering. – 08.11.2004.
51. Идельчик И.Е. Аэродинамика технологических аппаратов / И.Е. Идельчик – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с

52. А.с. 460096 СССР, МКИ В 65 J 59/64. Автоматический питатель листовых заготовок / М.А. Козловский, Я.И. Проць и др (СССР). – №1858939/11; Заявлено 15.12.76; Опубл. 30.08.76, Бюл. №45.
53. Іванченко Ф.К. Підйомно-транспортні машини: Підручник / Ф.К. Іванченко. – К.: Вища шк., 1993. – 413 с.
54. Brun X. Effect of Substrate Flexibility on the Pressure Distribution and Lifting Force Generated by a Bernoulli Gripper. / X.F. Brun, S.N. Melkote, // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2012. – № 134(5). – DOI: 051010.
55. Brun X.F. Analysis of handling stresses and breakage of thin crystalline silicon wafers. / X. F. Brun // Georgia Institute of Technology. – 2008.
56. Brun X.F. Analysis of stresses and breakage of crystalline silicon wafers during handling and transport. / X.F. Brun, S.N. Melkote, // Solar energy materials and solar cells. – 2009. – № 93(8). – P. 1238 – 1247.
57. Brun X.F. Evaluation of handling stresses applied to EFG silicon wafer using a Bernoulli Gripper. / X.F. Brun, S.N. Melkote // In Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference. – IEEE, 2006. – № 2. – P. 1346 – 1349.
58. Brun, X. F., & Melkote, S. N. (2009). Modeling and prediction of the flow, pressure, and holding force generated by a Bernoulli handling device. / X.F. Brun, S.N. Melkote, // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2009. – № 131(3). – DOI: 031018.
59. А.с. 602345 СССР, МКИ В 23 Q 7/04. Пневматический захват / С.С. Ефремов, Е.И. Гурин (СССР). – № 2424354/25–08; заявл. 29.11.76; опубл. 15.04.78, Бюл. № 14.
60. Богачева А.В. Элементы и устройства струйной техники / А.В. Богачева, А.Н. Добрынин, В.Г. Завьялов // М.: Энергия. – 1972. – 96 с.
61. Гідроприводи та гідропневмоавтоматика: Підручник / В.О. Федорець, М.Н. Педченко, В.Б. Струтинський та ін. За ред. В.О. Федорця. – К:Вища школа, – 1995. – 463 с.



62. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Идельчик И.Е. – Рипол Классик, 2013.
63. Wu C.J. Experiments: planning, analysis, and optimization / C.J. Wu, S.H. Michael // John Wiley & Sons. – 2011. – P. 552.
64. Бронштейн Ю.П. Исполнительные механизмы захватывающих устройств / Ю.П. Бронштейн. // Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние). – 1982. – 232 с.
65. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов / Ю. Г. Козырев. – Москва: КНОРУС, 2010. – 312 с.
66. Офіційний сайт фірми Schmalz [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/special-grippers/floating-suction-cups/floating-suction-cups-sbs>.
67. Офіційний сайт фірми Automation Distribution Incorporated [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <http://www.smc-pneumatics-distributor.com/smc-product/xt-2074.html>.
68. Vandaele V. Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation / V. Vandaele, P. Lambert, A. Delchambre // Precision Engineering. – 2005. – № 29(4). – P. 491 – 505.
69. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа. / Л.Г. Лойцянский – 2003. – 840 с.
70. Иванов А.А. Проектирование систем автоматического манипулирования миниатюрными изделиями / А.А. Иванов – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с.
71. Grippers with special operating principles. Floating suction pad SBS, [http://www.millsom.com.au/vac\\_components/02\\_Suction\\_Pads/SBS.pdf](http://www.millsom.com.au/vac_components/02_Suction_Pads/SBS.pdf)
72. Офіційний сайт фірми Bosch Rexroth [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <http://www.boschrexroth.com/pneumatics-catalog>

73. Офіційний сайт фірми Schmalz [Електронний ресурс]. – Режим доступ: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/special-grippers/floating-suction-cups/floating-suction-cups-sbs>.
74. Orientation Modeling of Bernoulli Gripper Device with Off-Centered Masses of the Manipulating Object / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, O. Fendo, M. Mykhailyshyn // *Procedia Engineering*. – 2017. – № 187. – P. 264 – 271. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.374.
75. Justification of Design and Parameters of Bernoulli-Vacuum Gripping Device / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchon, O. Fendo // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2017. – DOI: 1729881417741740.
76. Energy efficiency analysis of the manipulation process by the industrial objects with the use of Bernoulli gripping devices / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchon, M. Mikhalishin // *Journal of Electrical Engineering*. – 2017. – № 68 (6). – P. 496 – 502. – DOI: 10.1515/jee-2017-0087.
77. Experimental Research of the Manipulation Process by the Objects Using Bernoulli Gripping Devices / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, M. Mikhalishin, F. Duchon // *In Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, International IEEE Conference*. – 2017. – P. 8 – 11. – DOI: 10.1109/YSF.2017.8126583.
78. Modeling of Bernoulli gripping device orientation when manipulating objects along the arc / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchon, M. Mikhalishin // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2018. – DOI: 1729881418762670.
79. Investigation of the energy consumption on performance of handling operations taking into account parameters of the grasping system / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, F. Duchon, V. Koloskov, I. Diahovchenko // *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) – IEEE*, 2018. – P. 295 – 300. – DOI: 10.1109/ieps.2018.8559586.

80. Analysis of frontal resistance force influence during manipulation of dimensional objects / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, F. Duchon, V. Koloskov, I. Diahovchenko // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) – IEEE, 2018. – P. 301 – 305. – DOI: 10.1109/ieps.2018.8559527.
81. Substantiation of Bernoulli Grippers Parameters at Non-Contact Transportation of Objects with a Displaced Center of Mass / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, F. Duchon, P. Maruschak, O. Prentkovskis // 22nd International Scientific Conference Transport Means 2018. – Klaipeda, 2018. – P. 1370 – 1375.
82. Gasdynamic analysis of the Bernoulli grippers interaction with the surface of flat objects with displacement of the center of mass / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchon // Vacuum. – 2019. – № 159, P. 524 – 533. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.11.005.
83. Protection of Digital Power Meters Under the Influence of Strong Magnetic Fields / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, I. Diahovchenko, R. Olsen, D. Danylchenko // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2019 – IEEE, 2019. – P. 314 – 320. – DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879985.
84. Research of Energy Efficiency of Manipulation of Dimensional Objects With the Use of Pneumatic Gripping Devices / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, I. Diahovchenko, F. Duchon, R. Trembach // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2019 – IEEE, 2019. – P. 527 – 532. – DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879957.
85. Rogowsky coil applications for power measurement under non-sinusoidal field conditions / I. Diahovchenko, R. Mykhailyshyn, D. Danylchenko, S. Shevchenko // Energetika. – 2019. – 65(1), P. 14 – 20. – DOI: 10.6001/energetika.v65i1.3972.

86. Control of a small quadrotor for swarm operation / A. Trizuljak, F. Duchoň, J. Rodina, A. Babinec, M. Dekan, R. Mykhailyshyn // Journal of Electrical Engineering. – 70(1). – 2019. – P. 3-15. – DOI: 10.2478/jee-2019-0001.
87. Optimization of design parameters of Bernoulli gripper with an annular nozzle / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, P. Maruschak, L. Chovanec, E. Prada, I. Virgala, O. Prentkovskis // Transport Means - Proceedings of the International Conference. – 2019. – P. 423-428.
88. Михайлишин Р.І. Обґрунтування параметрів та орієнтації струминного захоплювача маніпулятора для автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.05 “Піднімально-транспортні машини” / Р.І. Михайлишин. – Тернопіль, 2018. – 21 с.
89. Михайлишин Р. І. Optimization of bernoulli gripping device’s orientation under the process of manipulations along direct trajectory / Р.І. Михайлишин, Я. І. Проць, В.Б. Савків // Вісник ТНТУ. – Тернопіль, 2016. – Том 81. – № 1. – С. 107 – 117.
90. Михайлишин Р. І. Аналіз методів планування траєкторій маніпуляторів / Р.І. Михайлишин, В.Б. Савків // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» Луцький НТУ. – Луцьк, 2016. – №8 (1). – С. 61 – 69.
91. Justification of the object of manipulation parameters influence on the optimal orientation and lifting characteristics of Bernoulli gripping device / В.Б. Савків, Р.І. Михайлишин, Ф. Духон, М.С. Михайлишин // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2017. – № 2 (61). – С. 98 – 104.
92. The analysis of influence of a nozzle form of the Bernoulli gripping devices on its energy efficiency / R. Mykhailyshyn, P. Maruschak, F. Duchon, L. Chovanec // Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, 2019. — Tern. : TNTU, Scientific Publishing House “SciView”, 2019. — P. 66–74.

93. Pod hlavičkou Národného centra robotiky pracujú už aj odborníci zo zahraničia / F. Duchoň, Ľ. Chovanec, R. Mykhailyshyn, V. Savkiv // ATP journal. – 2017. – №3. – P. 54 – 55.