Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Розроблення маніпулятора для переміщення крихких виробів
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-2
Юрій УВАРОВ
(власне ім'я, прізвище)

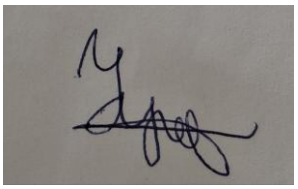
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно - інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)
Керівник доцент Наталія ДЕМСЬКА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Уваров Юрій Дмитрович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



"07" липня 2026 р. Юрій УВАРОВ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКІТС
Кафедра КІТАРБІ
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
« 28 » квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві Уварову Юрію Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи Розроблення маніпулятора для переміщення крихких виробів
затверджена наказом університету від 04.06.2026 р. № 472 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 11.07.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Використання декартової (XYZ) кінематичної схеми типу ППП
3.2 Робоча зона маніпулятора становить 350 мм ×300 мм ×100 мм, що забезпечує обслуговування конвеєрної лінії з флаконами діаметром до 50 мм.
3.3 Об'єкт маніпулювання – скляні фармацевтичні флакони об'ємом 10–50 мл
3.4 Технічні вимоги до маніпулятора: вантажопідйомність – до 0,3 кг; точність позиціонування – ±0,5 мм; робоча зона (X × Y × Z) – 350 мм × 300 мм × 100 мм; максимальна швидкість переміщення– до 120 мм/с; сила утримання захвату – ≥ 10 Н (запас не менше ×5); матеріал захвату – силікон або поліуретан; напруга живлення – 24 В DC; тиск стисненого повітря – 4–6 бар.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Аналіз предметної області та постановка технічного завдання
4.2 Постановка технічного завдання на розроблення маніпулятора
4.3 Розроблення конструкції маніпулятора для переміщення крихких виробів
4.4 Проектування вакуумної системи захвату
4.5 Розроблення системи керування та електричних компонентів
4.6 Розрахунок кінематичних і силових параметрів маніпулятора
4.7 Охорона праці
4.8 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал в форматі (*.ppt) – 11 арк. ф. А4.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Постановка технічного завдання на розроблення маніпулятора	01.05.26 – 04.05.26	викон.
2	Розроблення конструкції маніпулятора для переміщення крихких виробів	05.05.26 – 08.05.26	викон.
3	Проектування вакуумної системи захвату	09.05.26 – 15.05.26	викон.
4	Розроблення системи керування та електричних компонентів	16.05.26 – 20.05.26	викон.
5	Розрахунок кінематичних і силових параметрів маніпулятора	21.05.26 – 24.05.26	викон.
6	Оформлення пояснювальної записки	25.05.26 – 29.05.26	викон.
7	Нормоконтроль	9.07.26 – 11.07.26	викон.
8	Подання роботи на перевірку Інтернетсервісом StrikePlagiarisma	12.07.26 – 13.07.26	викон.
9	Подання роботи на рецензію	13.07.26 – 14.07.26	викон.
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	14.07.26 – 15.07.26	викон.
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	15.07.26 – 16.07.26	викон.

Дата видачі завдання 28.04.2025 р.

Здобувач _____ Юрій УВАРОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ доцент Наталія ДЕМСЬКА
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 65 с., 5 табл., 19 рис., 1 дод., 19 джерел.

МАНІПУЛЯТОР, ВАКУУМНИЙ ЗАХВАТ, КРИХКІ ВИРОБИ, СКЛЯНІ ФЛАКОНИ, КРОКОВИЙ ДВИГУН, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ.

Об'єкт розробки – процес автоматизованого переміщення крихких фармацевтичних скляних виробів (флаконів) у виробничих умовах.

Предмет розробки – конструкція, кінематика та система керування маніпулятора з вакуумними присосками, призначеного для переміщення крихких виробів.

Мета роботи – розроблення маніпулятора для переміщення крихких фармацевтичних скляних флаконів з вакуумними присосками, що забезпечує необхідну точність позиціонування за суттєво нижчої вартості порівняно з іноземними промисловими аналогами.

У роботі виконано аналіз існуючих конструкцій промислових роботів та засобів захоплення крихких виробів, сформульовано технічне завдання на проектування. Розроблено конструкцію рами на основі алюмінієвого профілю 2080 (сплав АД31) з лінійними напрямними HIWIN EGW15CA, приводами на базі крокових двигунів NEMA17 з передачами GT2 (осі X, Y) та Tr8×2 (вісь Z), що забезпечує точність позиціонування ±0,0125 мм за осями X, Y та ±0,000625 мм за віссю Z. Розроблено вакуумну систему захоплення на основі ежектора SMC ZH05BS (розрідження –88 кПа) та присосок SMC ZP25DU, що забезпечує зусилля утримання 43,2 Н та коефіцієнт запасу 19–22 під час руху з прискоренням. Виконано кінематичні та силові розрахунки маніпулятора (споживана потужність приводів 131 Вт, швидкість переміщення до 120 мм/с, робоча зона 350 мм ×300 мм ×100 мм), а також розроблено заходи з охорони праці під час його експлуатації та технічного обслуговування.

ABSTRACT

Explanatory note: 65 pages, 5 tables, 19 figures, 1 appendix, 19 sources.

MANIPULATOR, VACUUM GRIPPER, GLASS VIALS, STEPPER MOTOR, CONTROL SYSTEM.

The object of development is the process of automated movement of fragile pharmaceutical glass products (vials) in production conditions.

The subject of development is the design, kinematics and control system of a manipulator with vacuum suction cups designed for moving fragile products.

The aim of the work is to develop a manipulator for handling fragile pharmaceutical glass vials using vacuum cups, providing the required positioning accuracy at a substantially lower cost compared to foreign industrial analogues.

The work includes an analysis of existing industrial robot designs and gripping devices for fragile products, and the formulation of technical specifications. A frame structure based on 2080 aluminium profile (AD31 alloy) with HIWIN EGW15CA linear guides was developed, driven by NEMA17 stepper motors through GT2 belt transmissions (X, Y axes) and a Tr8×2 lead screw (Z axis), providing a positioning accuracy of ±0,0125 mm along the X, Y axes and ±0,000625 mm along the Z axis. A vacuum gripping system based on an SMC ZH05BS ejector (–88 kPa vacuum) and SMC ZP25DU suction cups was designed, providing a holding force of 43.2 N and a safety factor of 19–22 during accelerated motion. An ESP32-based control system running FluidNC firmware with TMC2209 stepper drivers was selected. Kinematic and force calculations were performed (drive power consumption of 131 W, travel speed up to 120 mm/s, working area of 350 mm ×300 mm ×100 mm), and occupational safety measures for operation and maintenance of the manipulator were developed.

ЗМІСТ

Вступ 7
1 Аналіз предметної області та постановка технічного завдання 9
1.1 Класифікація та функції маніпуляторів і промислових роботів 9
1.2 Структурні та геометричні характеристики маніпуляторів 14
1.2.1 Особливості маніпулювання крихкими виробами та аналіз захватних пристроїв 22
1.3 Постановка технічного завдання на розроблення маніпулятора для переміщення крихких виробів 25
1.3.1 Технічні вимоги до маніпулятора 26
1.3.2 Огляд існуючих промислових аналогів 27
1.4 Висновки до відділу 1 28
2 Розроблення конструкції маніпулятора для переміщення крихких виробів 29
2.1 Розробка конструкції декартового маніпулятора 29
2.1.1 Компонувальна схема та несуча рама 29
2.1.2 Лінійні напрямні та передачі 31
2.1.3 Розрахунок та вибір крокових двигунів 32
2.1.4 Розрахунок точності позиціонування 33
2.2 Проектування вакуумної системи захвату 35
2.2.1 Розрахунок сили утримання вакуумної присоски 35
2.2.2 Вибір та опис вакуумного ежектора 37
2.2.3 Пневматична схема підключення 38
2.3 Розроблення системи керування та електричних компонентів 39
2.3.1 Контролер ESP32 та прошивка FluidNC 39
2.3.2 Драйвери крокових двигунів TMC2209 40
2.3.3 Структурна схема системи керування 40
2.3.4 Алгоритм роботи маніпулятора 41
2.3.5 Приклад програми керування (G-код) 42

2.3.6 Специфікація компонентів системи керування 43
2.4 Висновки до розділу 2 44
3 Розрахунок кінематичних і силових параметрів маніпулятора 45
3.1 Розрахунок кінематики ремінної передачі осей X та Y 45
3.2 Розрахунок кінематики гвинтової передачі осі Z 46
3.3 Розрахунок максимальної швидкості переміщення 47
3.4 Розрахунок крутного моменту та запасу крокового двигуна 47
3.5 Розрахунок сили утримання вакуумного захвату 48
3.6 Розрахунок споживаної потужності системи 49
3.7 Зведена таблиця результатів розрахунків 50
3.8 Висновки до розділу 3 51
4 Охорона праці 52
4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів 52
4.2 Технічні заходи забезпечення електробезпеки 53
4.3 Заходи пневматичної безпеки 55
4.4 Забезпечення безпеки рухомих частин маніпулятора 56
4.5 Безпека під час роботи з крихкими скляними виробами 56
4.6 Пожежна безпека 57
4.7 Виробнича санітарія, освітлення та мікроклімат робочого місця оператора 58
4.8 Організаційні заходи охорони праці під час технічного обслуговування 59
4.9 Висновки до розділу 4 59
Висновки 61
Перелік джерел посилання 63
Додаток А Демонстраційний матеріал 66

ВСТУП

Фармацевтична промисловість висуває підвищені вимоги до автоматизації технологічних процесів, пов'язаних із переміщенням крихких скляних виробів – флаконів, ампул, пляшечок для лікарських засобів.

Ручне транспортування таких виробів супроводжується підвищеним ризиком браку внаслідок биття скла, порушення стерильності продукції та травматизму обслуговуючого персоналу [1].

Застосування промислових роботів-маніпуляторів дає змогу суттєво підвищити продуктивність і стабільність технологічного процесу, проте наявні на ринку рішення провідних виробників вакуумного обладнання (Piab, SMC, Schmalz) мають високу вартість – від 3000 USD до 8000 USD, що обмежує їх впровадження на підприємствах малого та середнього бізнесу України [2].

Тому розроблення доступного за вартістю маніпулятора з вакуумними присосками для переміщення крихких фармацевтичних виробів є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи – розроблення конструкції та системи керування маніпулятора для автоматизованого переміщення крихких фармацевтичних скляних флаконів з використанням вакуумних присосок, що забезпечує необхідну точність позиціонування за суттєво нижчої вартості порівняно з іноземними аналогами.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі задачі:

– проаналізовано існуючі конструкції та класифікацію промислових роботів, а також засоби захоплення крихких виробів;

– сформульовано технічне завдання на проектування маніпулятора;

– розроблено конструкцію рами та кінематичну схему переміщення робочого органа за осями X, Y, Z;

– обрано та розраховано приводи, лінійні напрямні й передавальні механізми;

– розроблено вакуумну систему захоплення крихких виробів;

– обрано систему керування та визначено алгоритм її роботи;

– виконано розрахунки кінематичних і силових параметрів маніпулятора;

– розроблено заходи з охорони праці під час експлуатації та технічного обслуговування маніпулятора;

– сформульовано загальні висновки щодо результатів роботи.

Об'єкт розробки – процес автоматизованого переміщення крихких фармацевтичних виробів у виробничих умовах.

Предмет розробки – конструкція, кінематика та система керування маніпулятора з вакуумними захватами.

У роботі використано аналіз науково-технічної літератури та патентної інформації, розрахунково-конструкторський метод, методи технічної механіки та теорії автоматичного керування, а також комп'ютерне моделювання конструктивних вузлів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні економічно ефективного технічного рішення орієнтовною вартістю 250–300 USD, що у 10–30 разів менше за вартість промислових аналогів, за збереження необхідних показників точності (±0,0125 мм за осями X, Y та ±0,000625 мм за віссю Z) і вантажопідйомності до 0,3 кг.

Розроблений маніпулятор може бути впроваджений на дільницях пакування та переміщення крихких скляних виробів на підприємствах малого та середнього фармацевтичного бізнесу.

Робота виконана згідно [3, 4]. Результати роботи відповідають Цілям сталого розвитку (ЦСР), а саме цілі № 9: Інновації та інфраструктура [5].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Класифікація та функції маніпуляторів і промислових роботів

Маніпулятор – механічний пристрій, оснащений робочим органом, призначений для переміщення в просторі тіла (об’єкта маніпулювання), що утримується захватом. Маніпулятор (лат. «manipulus» – кисть руки) можна розглядати як аналог людської руки. Його конструкція значною мірою визначає можливості робота [6].

Можливості руки робота значно нижчі за можливості руки людини, яка має 27 ступенів рухливості або, якщо не враховувати рухи пальців руки, 12 ступенів рухливості. Кількість ступенів рухливості маніпулятора обмежена і зазвичай не перевищує семи.

Автоматичні роботи, що набули поширення в промисловості, називаються промисловими роботами.

Промисловий робот (ПР) – це автоматична машина, що складається з виконавчого пристрою у вигляді маніпулятора, який має кілька ступенів рухливості, та перепрограмованого пристрою для виконання у виробничому процесі рухових або керуючих функцій [6].

ПР за ступенем досконалості прийнято поділяти на роботи 1, 2 і 3-го поколінь.

Роботи 1-го покоління мають жорстку програму (тому їх ще називають програмними роботами) і вимагають точного позиціонування деталей, з якими працюють. Більшість роботів, що застосовуються в даний час у промисловості, належать до 1-го покоління. Вони складаються з маніпулятора та програмних блоків: генератора машинного часу, пристрою зчитування, пристрою введення та зберігання програми.

Людина-оператор через панель управління задає режим роботи (навчання, автоматичний, ручне управління, поциклове виконання програми), здійснює запуск і зупинку робота. Робот може керувати технологічним обладнанням. Темп виконання програми визначається генератором машинного часу.

Програмні пристрої можуть мати різні принципи побудови та реалізовуватися на різній елементній базі. Загалом вони будуються на аналогових або цифрових принципах. Як носії програми (елементи пам'яті) використовуються штекерні панелі, штекерні барабани, касети з магнітною стрічкою тощо.

Початкова програма дій робота записується в його пам'ять, як правило, за допомогою людини. Це називається етапом навчання робота [7].

Розрізняють три методи навчання:

– за допомогою налаштування механічних пристроїв типу кулачків, кінцевих перемикачів, барабанів – «навчання по точках»;

– за допомогою пульта управління, як у верстатів з ЧПУ, – «навчання з пульта», аналітичне програмування;

– безпосередньо рукою оператора – «навчання показом».

Ця інформація запам'ятовується, тобто зберігається в елементах пам'яті, потім за сигналом пуску відтворюється, зчитується і відпрацьовується приводами.

Роботи 2-го покоління є більш досконалими пристроями, які певною мірою пристосовані до мінливих зовнішніх умов і не вимагають точного позиціонування деталей. Тому їх ще називають адаптивними. Роботи 2-го покоління мають велику перевагу перед роботами 1-го покоління, оскільки не вимагають розробки додаткових пристроїв, володіють необхідною гнучкістю. Сфера застосування таких роботів значно ширша, ніж роботів 1-го покоління. В даний час ведуться інтенсивні роботи з доопрацювання адаптивних роботів до промислових зразків [6].

Функціональна схема керування роботом 2-го покоління включає схему керування роботом 1-го покоління, доповнену елементами адаптації. Блоки адаптації включають датчики процесу та блоки корекції сигналів керуючих пристроїв. Засоби сенсорного сприйняття адаптивних роботів є досить різноманітними. Порівняно просто реалізується тактильне сприйняття.

Тактильні датчики встановлюються безпосередньо на робочих органах – губках захватів. Застосовуються також локаційні датчики, робота яких базується на різних принципах. Найчастіше вони можуть працювати на невеликих відстанях від предметів. Локаційні датчики дають можливість ще до зіткнення з предметом керувати напрямком і швидкістю зближення. В якості сенсорних пристроїв можуть застосовуватися й будь-які інші датчики, що визначають температуру, колір предметів, магнітні та електричні властивості, хімічний склад тощо.

Роботи 3-го покоління здатні сприймати навколишнє оточення і залежно від нього обирати спосіб руху для досягнення мети, сформульованої в програмі в загальному вигляді. Їх називають інтегральними або інтелектуальними. Такий робот повинен вміти будувати моделі зовнішнього середовища на основі інформації, що отримується від різних датчиків. Людина стосовно робота 3-го покоління виступає вже не як оператор, а як диспетчер (видає завдання, приймає інформацію про виконання).

Термін «покоління» слід розуміти лише як ступінь розвитку технічних можливостей. Розглянуті різновиди роботів не витісняють один одного, кожен з них існуватиме поряд з іншими при поступовому вдосконаленні їх елементної бази.

За ступенем спеціалізації ПР поділяються на спеціальні, спеціалізовані (цільові) та багатоцільові. Спеціальним називається робот, призначений для виконання певних технологічних операцій або обслуговування конкретної моделі технологічного обладнання [7]. Спеціалізовані роботи служать для виконання технологічних операцій одного виду (зварювання, фарбування, складання тощо) або для обслуговування певної групи моделей технологічного

обладнання (наприклад, групи моделей верстатів з горизонтальною віссю шпинделя). Багатоцільові роботи призначені для виконання різних основних і допоміжних технологічних операцій. Вони конструктивно не залежать від обладнання, що обслуговується, і характеризуються різнотипністю рухів, що виконуються.

За функціями, які вони виконують, ПР поділяються на допоміжні, технологічні та універсальні. Допоміжні роботи виконують операції типу «взяти-перенести». Технологічні роботи використовуються як виробничі або обробні машини для таких операцій, як гнуття, зварювання, складання, фарбування, контроль тощо. Універсальними називаються роботи, що поєднують функції допоміжного та технологічного роботів.

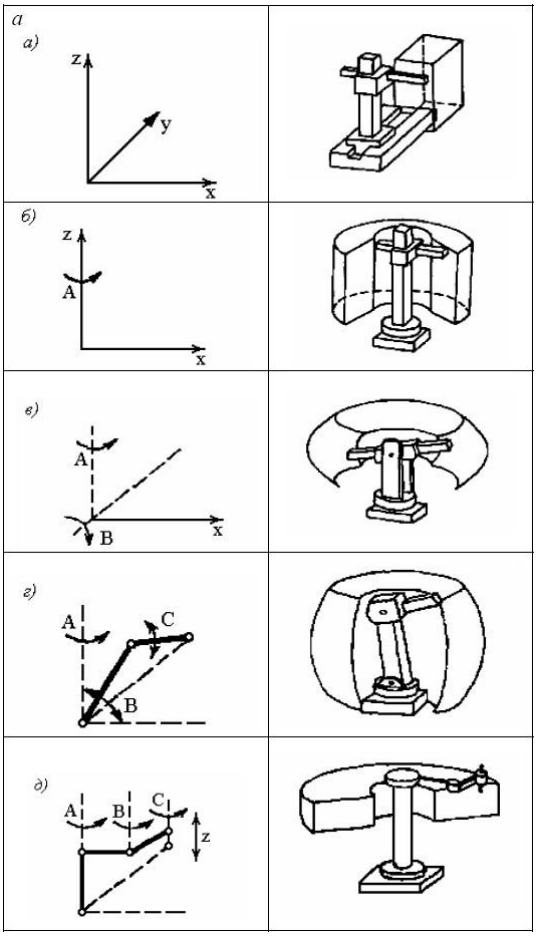
Під вантажопідйомністю ПР розуміється найбільша маса об’єктів маніпулювання (включаючи масу робочого органу), які можуть переміщатися рукою робота за заданих умов (при максимальній або мінімальній швидкості, при максимальному вильоті руки тощо). За вантажопідйомністю ПР поділяються на надлегкі (до 1 кг), легкі (до 10 кг), середні (до 200 кг), важкі (до 1000 кг), надважкі (понад 1000 кг).

Робоча зона маніпулятора (РЗМ) – це простір, у якому знаходиться його робочий орган при всіх можливих положеннях маніпулятора. РЗМ характеризується об’ємом. За об’ємом робочої зони ПР поділяються на мікророботи, що виконують особливо точні операції з дуже дрібними деталями (наприклад, при виробництві виробів мікроелектроніки), міні-роботи для точних операцій з дрібними деталями (наприклад, при виробництві годинникових механізмів), малі роботи, призначені, наприклад, для операцій холодного штампування, середні роботи для операцій, які робітники виконують стоячи, великогабаритні роботи для виконання операцій, що перевищують фізичні можливості людини, і, нарешті, мобільні роботи, що переміщуються по рейковому шляху, монорейці або якимось іншим чином.

За кількістю ступенів рухливості ПР поділяються на роботи з двома, трьома, чотирма ступенями рухливості та роботи зі ступенями рухливості

більше чотирьох [8].

За формою РЗМ ПР поділяються на прямокутні, циліндричні, сферичні, ангулярні (антропоморфні) та комбіновані (рис. 1.1). Це визначається системою координат, з якою збігається система узагальнених координат маніпулятора.



а – прямокутна; б – циліндрична; в – сферична; г – антропоморфна;
д – комбінована

Рисунок 1.1 – Схеми промислових роботів

За типом приводу ПР поділяються на електромеханічні, гідравлічні, пневматичні, роботи з комбінованим приводом.

Під програмним керуванням розуміється автоматичне керування виконавчим пристроєм промислового робота за заздалегідь введеною керуючою програмою. За типом системи керування ПР поділяються на роботи з позиційним керуванням і з контурним керуванням.

Під позиційним керуванням розуміється програмне керування ПР, при якому рух робочого органу відбувається по заданих точках позиціонування без контролю траєкторії руху між ними. Окремим випадком позиційного керування є циклове керування, при якому точки позиціонування задаються за допомогою жорстких упорів. При цикловому керуванні програмується тільки послідовність рухів.

Під контурним керуванням розуміється керування ПР, при якому рух робочого органу відбувається по заданій траєкторії з певною швидкістю. При позиційній системі керування зводиться до мінімуму відхилення від необхідного положення при наближенні до кінцевих точок, але не контролюється рух між цими точками, а також не контролюється поєднання рухів за окремими ступенями рухливості. Таке переміщення прийнятне для операцій завантаження-розвантаження металорізальних верстатів, точкового зварювання, але не придатне для операцій фарбування або дугового зварювання [8].

Системи контурного керування забезпечують рух по безперервних траєкторіях із заданою швидкістю. Для цього необхідно здійснити скоординоване керування рухом по всіх ступенях рухливості. Зазвичай використовується спосіб контурного керування з інтерполятором. Це, по суті, позиційне керування, доповнене спеціальним обчислювальним блоком – інтерполятором, який за певним алгоритмом здійснює розрахунок відрізків траєкторій між заданими програмними точками.

1.2 Структурні та геометричні характеристики маніпуляторів

Рухи, що виконуються людиною та відтворюються роботом, можна розділити на три класи: глобальні, регіональні, локальні. Глобальні рухи – це переміщення на відстані, що перевищують розміри робота. Робот, який виконує глобальні рухи, називається мобільним, а той, що їх не виконує, – стаціонарним. Глобальні рухи здійснює робот, переміщуючись по підвісному

монорейку. Так, наприклад, працюють роботи, що обслуговують групу металорізальних верстатів, встановлених на одній лінії. У більшості роботів глобальні рухи відсутні.

Рухи, що здійснюються рукою робота в межах його робочої зони і співмірні з його габаритами, називаються регіональними. Їх також називають переносними, оскільки вони забезпечують перенесення об’єкта в необхідну точку. Ці рухи відповідають рухам, що здійснюються плечем і передпліччям руки людини.

Локальні рухи – це переміщення робочого органу в малій зоні. Вони відповідають рухам кисті руки. Основне призначення цих рухів – орієнтування об’єкта маніпулювання в даній точці робочого простору, тому їх також називають орієнтувальними.

З введенням понять регіонального та локального рухів кінематичний ланцюг стаціонарного маніпулятора можна розчленувати на дві функціональні частини, що відповідають за ці рухи, – переносну та орієнтуючу, і відповідно виділити переносні та орієнтуючі ступені рухливості, що забезпечують ці рухи.

Як відомо з механіки, положення тіла в просторі визначається шістьма узагальненими координатами. Довільний рух твердого тіла можна розкласти на поступальне переміщення, пов’язане з деякою довільно обраною точкою, та обертання відносно цієї точки. Відповідно, із шести незалежних узагальнених координат, що описують рух твердого тіла, три координати задають переміщення деякої фіксованої точки тіла в просторі, а три характеризують його обертання.

Просторовий маніпулятор у загальному випадку повинен мати шість ступенів рухливості (СР): три для відпрацювання регіональних (переносних) рухів і три – для локальних (орієнтуючих) [9].

У тому випадку, коли доводиться маніпулювати з несвободними предметами, на які накладені додаткові зв’язки, може виявитися, що зазначених СП замало. Так, наприклад, для того щоб наживити і закрутити гайку, підняти з підлоги ящик столу для встановлення його в напрямні столу, достатньо мати

маніпулятор із шістьма СП. Однак без сьомого руху, гвинтового або прямолінійно-поступального вздовж напрямних, не можна накрутити гайку і засунути ящик у стіл інакше, як використовуючи складну комбінацію рухів.

Кількість СП більше шести може виявитися необхідною при виконанні складних робіт, пов’язаних з додатковими обмеженнями на переміщення ланок маніпулятора при роботі в обмеженому просторі. Збільшення кількості СП наділяє маніпулятор цінною властивістю надмірності, однак це ускладнює його і підвищує його вартість.

Для промислових роботів, що працюють в організованому робочому просторі, де робочі зони впорядковані і, як правило, лежать у горизонтальних та вертикальних площинах, при виконанні робочих операцій зазвичай виявляється достатнім 4–5 ступенів (3 переносних і 1–2 орієнтуючих). Найпростіші, неперепрограмовані роботи, які називаються автооператорами, можуть мати 1–2 ступені рухливості.

Кінематичний ланцюг (КЛ) регіональних рухів зазвичай здійснюється з використанням кінематичних пар п’ятого класу (обертальних, поступальних з’єднань) і містить три ланки. У такому випадку можливі такі послідовності розташування кінематичних пар: ВВВ, ВВП, ВПВ, ПВВ, ППВ, ПВП, ВПП, ППП.

Осі сусідніх кінематичних пар можуть мати найрізноманітніше відносне розташування, проте набули поширення маніпулятори з колінеарними або ортогональними осями (їх називають ортогональними маніпуляторами). Схеми маніпуляторів дуже різноманітні (рис. 1.2).

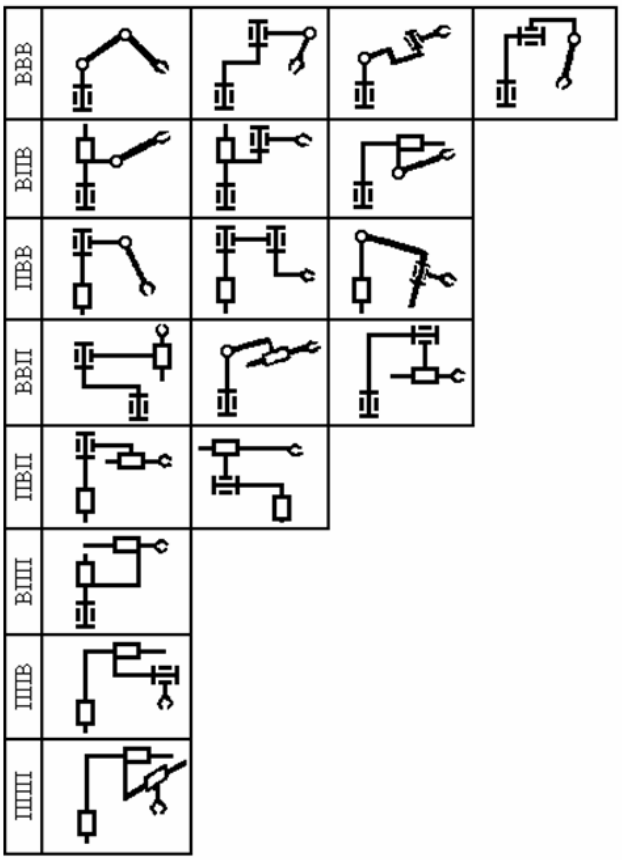


Рисунок 1.2 – Структурні схеми ортогональних маніпуляторів

З наведених на рисунку 1.2 схем найбільш поширені структурні схеми типу ВВВ, ВВП, ВПП, ППП. Однією з найпростіших є схема ППП (рис. 1.3) з прямокутною системою координат, форма її робочої зони – паралелепіпед. Така схема найбільш зручна для виконання прямолінійних рухів.

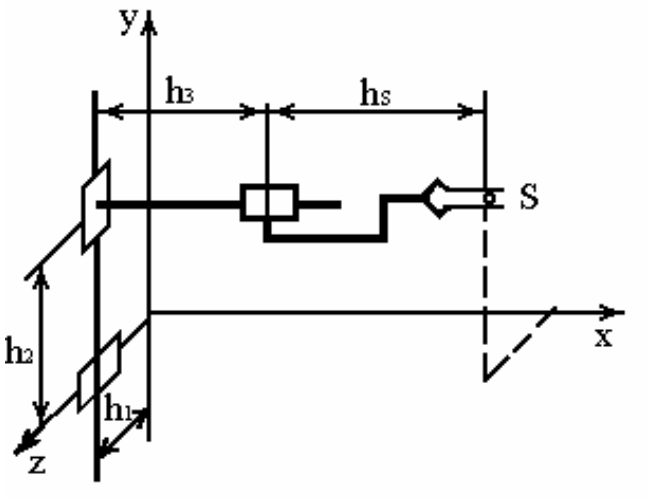


Рисунок 1.3 – Маніпулятор з прямокутною системою координат

При цьому максимально спрощено програмування робота, оскільки немає необхідності перерахунку декартових координат в узагальнені координати ($q_1 = h_1 = z_s$, $q_2 = h_2 = y_s$, $q_3 = h_3 + h_s = x_s$). Ця система застосовується у верстатах з ЧПУ, які також є своєрідними маніпуляторами, та у складальних роботах. Недоліки цього виконання – збільшення габаритів пристрою, порівняно низька швидкодія, складність виготовлення напрямних [10].

Наразі найбільшого поширення набули роботи зі схемою ВПП – роботи з циліндричною системою координат (рис. 1.4). Їх робочий простір має форму циліндра або його частини. Рука може здійснювати рух по горизонталі та вертикалі і поворот навколо осі колони. Робот з таким виконанням компактний при великому обсязі обслуговування, відносно простий у програмуванні. Його недоліком є наявність мертвого необслуговуваного простору біля основи. Таку схему зазвичай мають транспортні роботи [11].

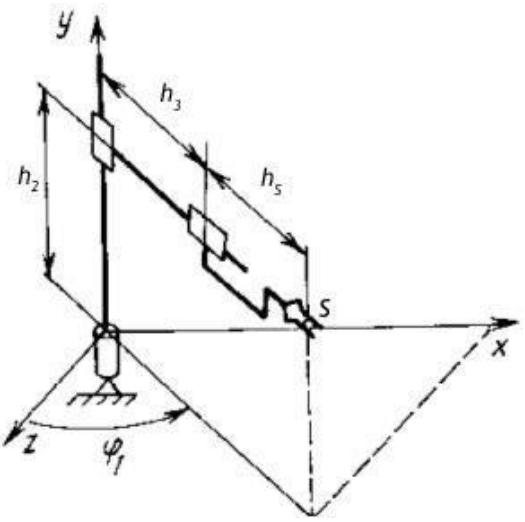


Рисунок 1.4 – Маніпулятор з циліндричною схемою та його узагальнені координати

Маніпулятор виконання $ВВП_2$ має сферичну систему координат, його робочий простір – сферичний сегмент (рис. 1.5). Роботи з такою системою координат складніші, ніж з циліндричною системою, але компактніші, обслуговують більший об’єм, включаючи зони, що виходять за їхні габарити зверху та знизу. Роботи цього виконання мають підвищену жорсткість, що

дозволяє їх використовувати при великих навантаженнях, наприклад при автоматизації точкового зварювання тощо.

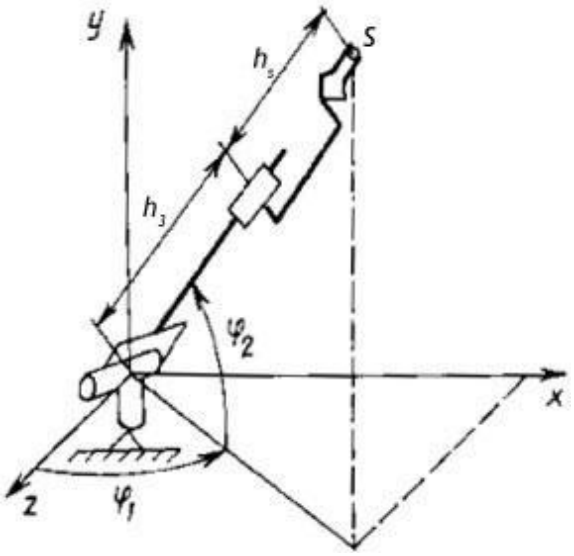


Рисунок 1.5 – Маніпулятор зі сферичною схемою та його узагальнені координати

Маніпулятор виконання $ВВВ_1$ зі складною сферичною системою координат (рис. 1.6) називається ангулярним, шарнірним або антропоморфним.

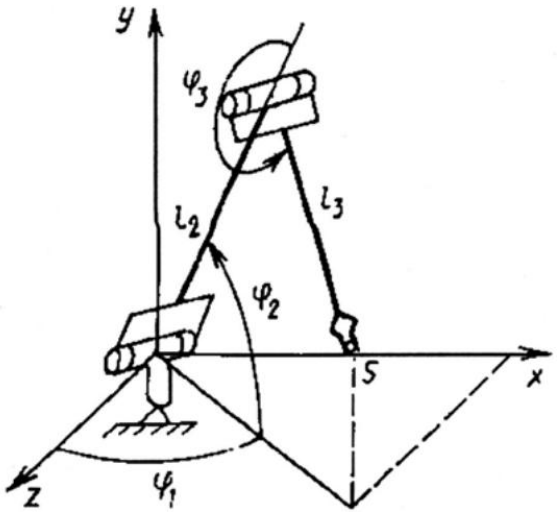


Рисунок 1.6 – Маніпулятор з антропоморфною схемою (шарнірний маніпулятор) та його узагальнені координати

Основна перевага такого маніпулятора – значно менші габарити, ніж у маніпулятора з поступальними парами, при великій зоні обслуговування. Він може застосовуватися в обмеженій зоні обслуговування. Такі маніпулятори зазвичай добре врівноважені і тому часто використовуються, коли програмування здійснюється методом навчання рукою людини на операціях фарбування, нанесення захисних покриттів тощо.

Кожна з розглянутих схем має певні переваги та недоліки, тому вибір схеми є компромісним рішенням і здійснюється з урахуванням вимог, що висуваються до даного робота. При виборі схем слід брати до уваги не тільки їхні функціональні можливості, а й спрощення конструкції, технологічність її виготовлення, вартість. При вирішенні цих питань слід керуватися вже накопиченим досвідом проектування роботів.

Основні технічні характеристики робота – вантажопідйомність, розміри зони обслуговування, швидкодія, точність – тісно пов’язані між собою та з його компонуванням. Поліпшення одних характеристик можна досягти лише за рахунок погіршення інших. Так, зокрема, велика вантажопідйомність несумісна з великим розміром зони обслуговування, велика швидкість – з високою точністю. Звідси випливає, що не існує такої схеми робота, яка була б оптимальною в усіх випадках.

Маніпулятор, що реалізує локальні рухи, називається кистю робота, оскільки вона виконує функції, аналогічні кисті руки людини. Призначення кисті – орієнтуючі рухи. З механіки відомо, що довільну орієнтацію твердому тілу можна задати шляхом трьох послідовних плоских поворотів, що здійснюються відносно неспівпадаючих осей, зокрема взаємно ортогональних, пов’язаних з тілом (рис. 1.7).

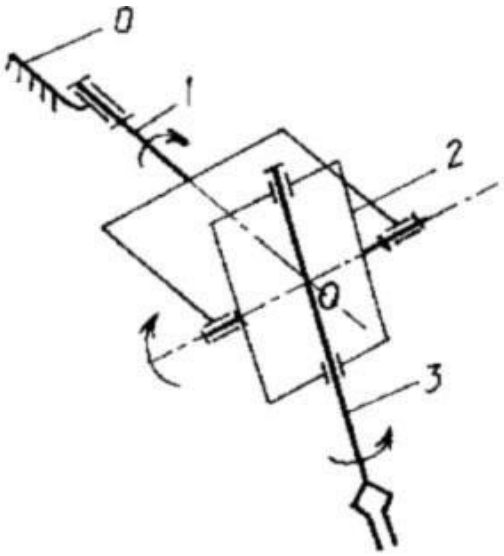


Рисунок 1.7 – Пристрій для орієнтації кисті на основі карданного підвісу

Для утримання об’єкта маніпулювання кисть оснащується захоплювальним пристроєм. Призначення переносних і орієнтуючих рухів – помістити захоплювальний пристрій у будь-яку точку робочої зони [6]. Однак не кожна точка робочої зони маніпулятора однаково доступна захоплювальному пристрою, оскільки на його положення накладаються обмеження, пов’язані з конструкцією кінематичних пар і довжиною ланок. Ці обмеження не дозволяють підводити захват (схват) до даної точки під будь-яким бажаним кутом (рис. 1.8).

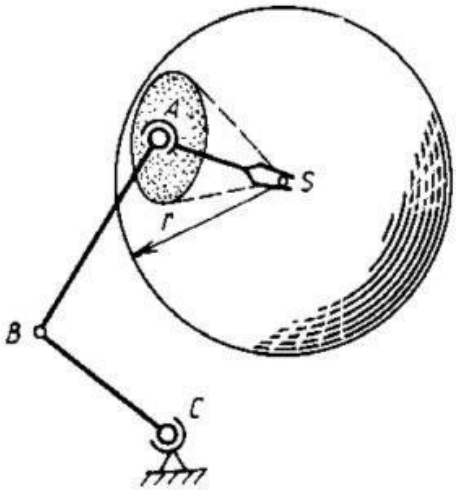


Рисунок 1.8 – Зона обслуговування маніпулятора

1.2.1 Особливості маніпулювання крихкими виробами та аналіз захватних пристроїв

Під крихкими виробами розуміють об'єкти, матеріал яких має низьку здатність до пластичної деформації перед руйнуванням. На відміну від пластичних матеріалів, крихкі руйнуються практично без попередження – накопичена пружна енергія вивільняється стрибкоподібно у вигляді тріщини. Це явище описується критерієм Гріффітса, згідно з яким критичне напруження руйнування визначається співвідношенням:

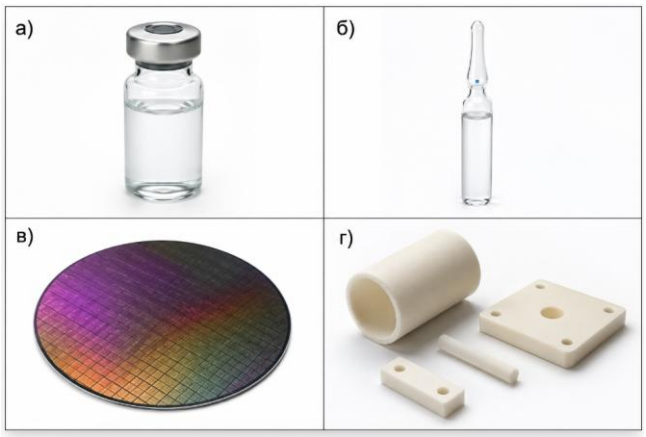
$$\sigma_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot \alpha}} \quad , \tag{1.1}$$

де E – модуль пружності матеріалу;

γ – питома поверхнева енергія;

α – довжина найбільшого мікродефекту в матеріалі.

З формули (1.1) випливає, що міцність скляного флакона визначається наявністю поверхневих мікродефектів, а сам момент руйнування є малопередбачуваним.



а – скляні флакони; б – ампули; в – кремнієві пластини; г – технічна кераміка

Рисунок 1.9 – Характерні типи крихких виробів промислового виробництва

У промисловій робототехніці застосовують кілька типів захватів; їх порівняння щодо переміщення скляних флаконів наведено нижче:

– механічні (кліщові) захвати – утримання силовим стисканням кулачками; недолік – зусилля прикладається в обмеженій кількості точок контакту, що спричиняє небезпечну концентрацію напружень;

– адгезійні та електростатичні захвати – забезпечують малі питомі зусилля утримання, недостатні для флаконів масою 0,05–0,3 кг при транспортних прискореннях;

– вакуумні захвати – утримання за рахунок перепаду тисків без механічного стискання; навантаження розподіляється рівномірно по поверхні присоски, що мінімізує ризик тріщин.

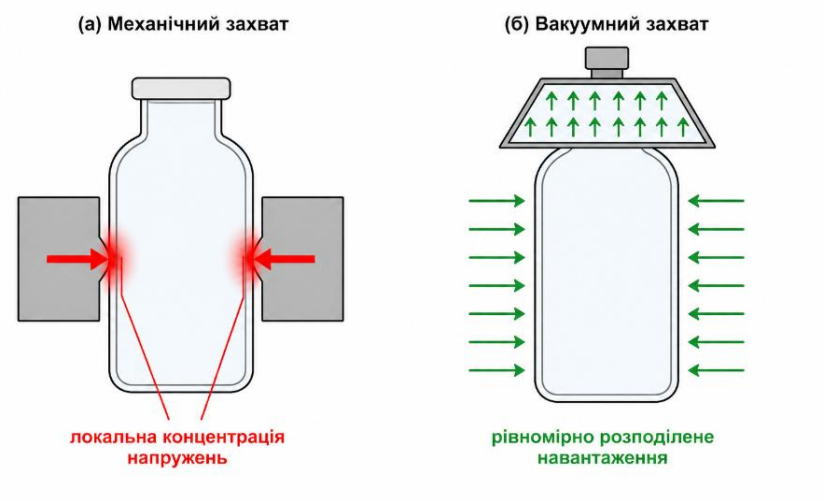
Узагальнені результати порівняльного аналізу за релевантними критеріями наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз типів захватних пристроїв для крихких виробів

Критерій порівняння	Механічний захват	Магнітний захват	Адгезійний захват	Вакуумний захват
Розподіл навантаження	точкове або лінійне	не застосовно	розподілене, але слабке	розподілене рівномірно
Придатність для скла	умовно (потрібні накладки)	непридатний	обмежено придатний	повністю придатний
Регулювання зусилля	складне	не застосовно	практично відсутнє	плавне (через тиск)
Несуча здатність (до 0,3 кг)	достатня	не застосовно	недостатня	достатня
Швидкодія циклу	середня	не застосовно	низька	висока

За результатами аналізу (табл. 1.1) для подальшого проєктування

маніпулятора обрано вакуумний захватний пристрій. Он забезпечує безпечне поводження зі склом при високій швидкодії та простоті конструкції. Принципова відмінність у характері навантаження на виріб ілюструється на рис. 1.10.



а – механічний (кліщовий); б – вакуумний

Рисунок 1.10 – Порівняння принципів дії захватних пристроїв

1.3 Постановка технічного завдання на розроблення маніпулятора для переміщення крихких виробів

Об’єктом розробки є процеси переміщення та обробки крихких виробів у виробничих системах. Предметом розробки є конструкція маніпулятора, а також його програмне та технічне забезпечення для безпечного транспортування крихких об’єктів.

Метою розробки є створення маніпулятора, здатного переміщувати крихкі вироби (фармацевтичні флакони) без ризику їх пошкодження, із забезпеченням точного позиціонування в трьох координатах та мінімізацією механічного впливу на вироби під час їх транспортування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати класифікацію та конструктивні схеми існуючих маніпуляторів і промислових роботів;

– обґрунтувати вибір кінематичної схеми маніпулятора, що

відповідає вимогам до точності та простоти програмування;

– розробити конструкцію маніпулятора та виконати розрахунок і вибір основних компонентів (приводів, напрямних, передач);

– спроектувати систему захоплення флаконів, яка унеможливлює пошкодження їх скляної поверхні;

– розробити структурну схему системи керування маніпулятором та електричних компонентів.

На основі проведеного в підрозділах 1.1–1.2 аналізу для вирішення поставленої задачі обрано декартову (XYZ) кінематичну схему типу ППП (поступальна-поступальна-поступальна), яка порівняно з циліндричними, сферичними та антропоморфними схемами забезпечує найбільш просте програмування та високу точність лінійних переміщень, що є визначальним при роботі з крихкими виробами.

Робоча зона маніпулятора становить 350 мм ×300 мм ×100 мм, що забезпечує обслуговування конвеєрної лінії з флаконами діаметром до 50 мм.

1.3.1 Технічні вимоги до маніпулятора

На підставі аналізу об'єкта маніпулювання – скляних фармацевтичних флаконів об'ємом 10–50 мл – та умов виробничого процесу сформульовано технічні вимоги до маніпулятора, наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні вимоги до маніпулятора

Параметр	Значення	Обґрунтування
Вантажопідйомність	до 0,3 кг	Маса флакона з вмістом – до 200 г, маса захвату – до 100 г
Точність позиціонування	±0,5 мм	Допуск на укладання флакона у лоток пакувальної лінії

Продовження таблиці 1.2

Параметр	Значення	Обґрунтування
Робоча зона (X × Y × Z)	350 мм × 300 мм × 100 мм	Перекриває стандартну ширину фармацевтичного конвеєра
Максимальна швидкість переміщення	до 120 мм/с	Забезпечує темп виробничої лінії без ризику зриву флакона
Сила утримання захвату	≥ 10 Н (запас не менше ×5)	Враховує інерційні навантаження при прискоренні та гальмуванні
Матеріал захвату	Силікон або поліуретан	Хімічна нейтральність, відповідність вимогам фарм. виробництва
Напруга живлення	24 В DC	Стандарт промислових контролерів і драйверів крокових двигунів
Тиск стисненого повітря	4–6 бар	Робочий діапазон ежектора SMC ZH05BS для досягнення –88 кПа

1.3.2 Огляд існуючих промислових аналогів

Перед розробкою власного рішення проведено аналіз наявних на ринку систем захоплення крихких виробів, щоб визначити актуальний технічний рівень та виявити можливості для удосконалення.

Piab (Швеція) – один із провідних виробників вакуумних захватних систем у світі. Компанія випускає спеціалізовану лінійку для фармацевтичної галузі (серія piFLOW), орієнтовану на роботу зі скляними флаконами та ампулами. Системи Piab відповідають стандартам FDA та GMP, оснащені силіконовими присосками та вбудованими датчиками вакууму. Орієнтовна вартість комплексного рішення – від 3 000 USD до 8 000 USD, що є надмірним для малосерійного або дослідного виробництва [12].

SMC Corporation (Японія) – виробник пневматичних компонентів, у тому числі ежекторів серії ZH та присосок серії ZP, що широко застосовуються в складальних та пакувальних лініях. На відміну від Piab, SMC не пропонує готового маніпулятора, однак є постачальником ключових пневматичних вузлів, які використано в даній роботі. Компонентний підхід SMC дозволяє суттєво знизити вартість системи [13].

Schmalz (Німеччина) – виробник вакуумних захватних пристроїв для автоматизації виробництва. Пропонує модульні системи з можливістю налаштування під конкретний тип виробу. Вартість спеціалізованих рішень – від 2 000 EUR.

Порівняльний аналіз промислових аналогів свідчить, що всі готові рішення орієнтовані на великосерійне виробництво і мають надлишкові можливості та завищену вартість для умов малосерійного фармацевтичного підприємства або дослідної лабораторії. Розроблюваний у даній роботі маніпулятор забезпечує необхідний функціонал за вартістю компонентів близько 250–300 USD, що є його ключовою конкурентною перевагою.

1.4 Висновки до розділу

У першому розділі проведено комплексний аналіз предметної області, що охоплює класифікацію промислових роботів і маніпуляторів за поколіннями, ступенем спеціалізації, вантажопідйомністю та формою робочої зони, а також

структурні та геометричні характеристики кінематичних схем типу ВВВ, ВВП, ВПП, ППП.

Виконано аналіз типів захватних пристроїв – механічного, вакуумного, магнітного та адаптивного – стосовно задачі транспортування скляних фармацевтичних флаконів; встановлено, що вакуумний захватний пристрій є єдиним типом, що забезпечує рівномірний розподіл зусилля на крихку поверхню без ризику ініціювання мікротріщин.

Розглянуто фізико-механічні особливості крихких матеріалів і критерій Гріффітса, що пояснює залежність міцності скла від наявності поверхневих дефектів.

Сформульовано технічне завдання з переліком восьми ключових вимог до маніпулятора, проведено огляд промислових аналогів (Piab, SMC, Schmalz), що підтвердив актуальність розроблюваного рішення з огляду на його вартісні переваги.

За результатами аналізу для подальшої розробки обрано декартову кінематичну схему типу ППП у поєднанні з вакуумним захватним пристроєм на базі ежектора SMC ZH05BS та присоски SMC ZP25DU.

2 РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ КРИХКИХ ВИРОБІВ

У цьому розділі наведено результати практичного конструювання трьохосьового маніпулятора для переміщення фармацевтичних флаконів відповідно до технічного завдання, сформульованого у підрозділі 1.3. Розділ містить обґрунтування вибору та опис конструктивних елементів (несуча рама, лінійні напрямні, передачі, крокові двигуни), розрахунок зусилля приводу та точності позиціонування, опис вакуумної системи захвату з розрахунком сили утримання флакона, а також розроблення системи керування на базі контролера ESP32 із драйверами TMC2209. Усі технічні рішення спрямовані на забезпечення надійного та безпечного транспортування крихких скляних виробів без ризику їх пошкодження.

2.1 Розробка конструкції декартового маніпулятора

2.1.1 Компонувальна схема та несуча рама

Маніпулятор побудовано за декартовою (XYZ) кінематичною схемою типу ППП із трьома лінійними осями, що забезпечує пряме відображення координат програми руху в координати реального переміщення без тригонометричного перерахунку, характерного для шарнірних схем. Така архітектура є найбільш поширеною в задачах pick-and-place для виробів з жорсткими вимогами до точності позиціонування.

Несуча рама маніпулятора виготовлена з алюмінієвого конструкційного профілю перерізом 2080 (80×80 мм), виконаного зі сплаву АД31 (аналог AW-6082 за EN 573). Вибір матеріалу обумовлений поєднанням таких властивостей: модуль пружності E = 70 ГПа забезпечує достатню жорсткість конструкції, маса профілю 1,95 кг/м у 2,7 раза менша за сталь аналогічного перерізу, а анодоване покриття забезпечує корозійну стійкість в умовах фармацевтичного

виробництва. Профіль 2080 має стандартні пази типу T-slot 20 мм × 8 мм, що дозволяють кріпити лінійні напрямні та допоміжні вузли без свердління рами.

Компонувальна схема маніпулятора включає такі основні вузли:

– горизонтальні осі X та Y: переміщення у площині реалізовано за допомогою лінійних напрямних HIWIN EGW15CA і ремінних передач GT2; довжина рейки осі X – 400 мм, осі Y – 350 мм;

– вертикальна вісь Z: переміщення захватного пристрою вгору-вниз реалізовано на гвинтовій передачі Tr8×2 для забезпечення підвищеної точності і самогальмування (утримання флакона без подачі струму на двигун);

– захватний вузол: вакуумна присоска SMC ZP25DU, закріплена на каретці осі Z через алюмінієвий кронштейн товщиною 3 мм.

Загальні габарити маніпулятора у зборі: 520 мм × 470 мм × 380 мм (Д×Ш×В). Маса конструкції без системи керування – близько 3,2 кг (рис. 2.1).

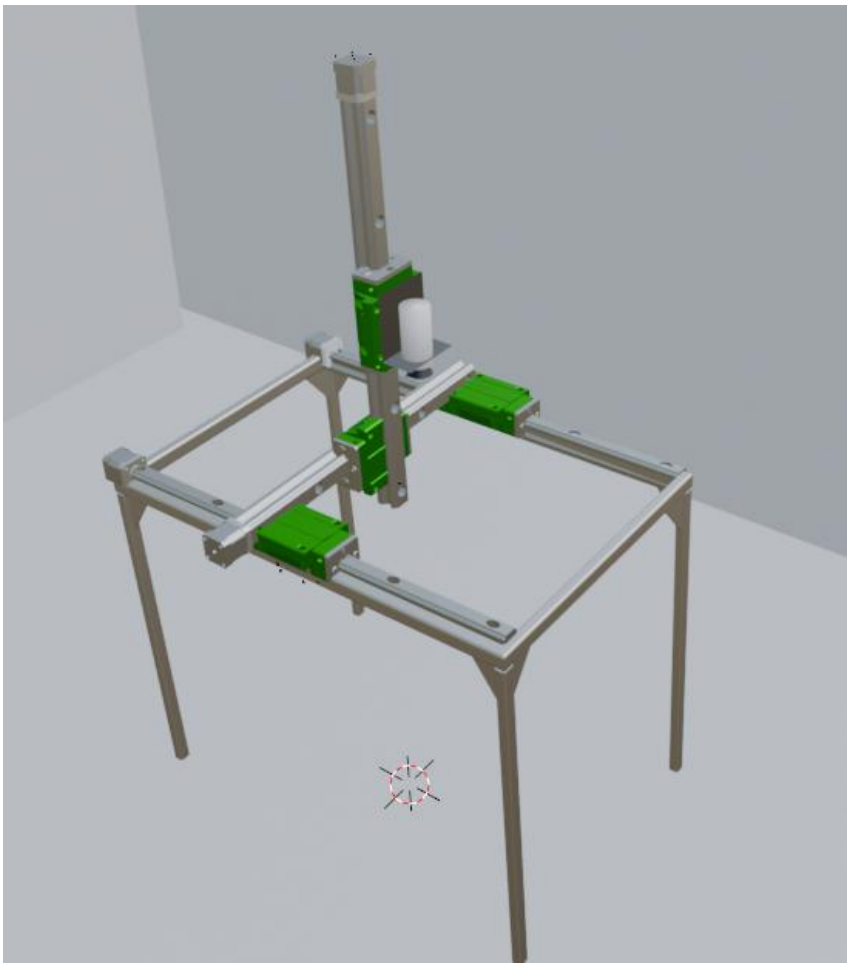


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд маніпулятора у зборі

2.1.2 Лінійні напрямні та передачі

Для переміщення по осях X та Y обрано профільні лінійні напрямні HIWIN серії EGW15CA (рис. 2.2). Напрямні цієї серії мають чотирирядний контакт кульок із рейкою, що забезпечує статичне навантаження до 16,19 кН та динамічне навантаження до 9,72 кН – значно більше за фактичне навантаження маніпулятора (не більше 15 Н). Клас точності H (High Precision) гарантує відхилення паралельності каретки не більше 0,015 мм/м, а коефіцієнт тертя кочення $\mu \approx 0{,}003$ забезпечує мінімальний опір руху і, відповідно, малий споживаний момент двигуна.

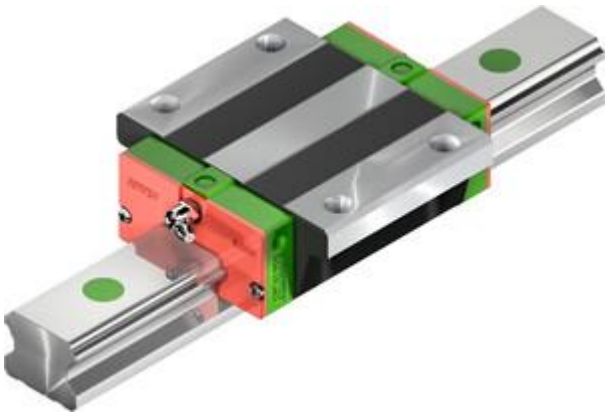


Рисунок 2.2 – Лінійна напрямна HIWIN EGW15CA

Передача обертання двигуна у лінійне переміщення по осях X та Y реалізована ремінною передачею GT2 (крок 2 мм, ширина 6 мм) із зубчастим шківом 20T (діаметр ділильного кола 12,73 мм). Ремінна передача обрана для горизонтальних осей через простоту конструкції, відсутність люфту при правильному натягу і достатню швидкодію. Для осі Z застосовано гвинтову передачу Tr8×2 (трапецієподібний гвинт, діаметр 8 мм, крок 2 мм), яка забезпечує самогальмування – каретка зі флаконом утримується на будь-якій висоті без подачі струму на двигун, що є критично важливим при аварійному відключенні живлення.

2.1.3 Розрахунок та вибір крокових двигунів

Для всіх трьох осей маніпулятора обрано крокові двигуни серії NEMA 17 (рис. 2.3) (типорозмір 42 мм × 42 мм) (рис. 2.4), що є промисловим стандартом для легких маніпуляторів і верстатів з ЧПУ малого формату.



Рисунок 2.3 – Кроковий двигун NEMA 17 (SY42STH47-1684A)

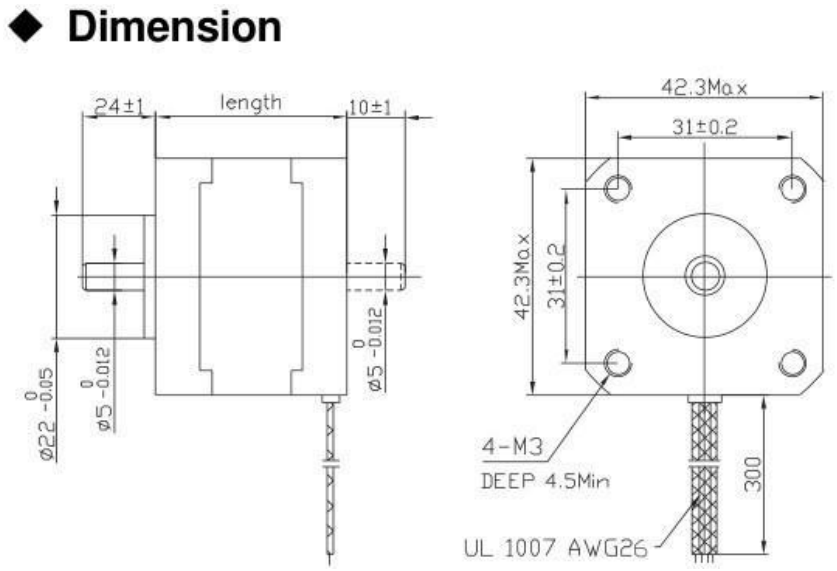


Рисунок 2.4 – Габаритні розміри крокового двигуна NEMA 17

Основні характеристики двигуна NEMA 17 (модель SY42STH47-1684A):

– крок: 1,8° (200 кроків на оберт);

– струм фази: 1,68 А;

– утримуючий момент: 0,45 Н·м;

– маса: 0,28 кг.

Виконаємо перевірочний розрахунок для найбільш навантаженої осі – вертикальної осі Z, яка піднімає масу каретки, вакуумного вузла та флакона. Загальна маса рухомої частини:

$$m = m_{кар} + m_{вак} + m_{фл} = 0,5 + 0,3 + 0,2 = 1,0 \text{ кг} .$$

Зусилля для подолання сили тяжіння та тертя:

$$F_{потр} = m \cdot g \cdot (1 + \mu) = 1,0 \cdot 9,81 \cdot (1 + 0,003) \approx 9,84 \text{ Н} .$$

Необхідний крутний момент на валу двигуна при передачі гвинт Tr8×2 (ККД $\eta = 0,9$, крок $p = 0,002$ м):

$$M_{потр} = F_{потр} \cdot p / (2\pi \cdot \eta) = 9,84 \cdot 0,002 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,9) \approx 0,0035 \text{ Н·м} .$$

Запас по моменту:

$$k = M_{дв} / M_{потр} = 0,45 / 0,0035 \approx 128 .$$

Запас $k = 128$ є надлишковим, однак для осі Z це виправдано: двигун повинен надійно утримувати каретку при динамічних навантаженнях, і навіть при зниженні моменту через нагрів або зниження напруги живлення система залишатиметься стабільною. Для горизонтальних осей X та Y навантаження ще менше (відсутня сила тяжіння), тому запас є ще більшим.

2.1.4 Розрахунок точності позиціонування

Точність позиціонування маніпулятора визначається мінімальним лінійним переміщенням за один мікрокрок двигуна. Драйвери TMC2209 забезпечують мікрокрокування 1/16.

Для осей X та Y (ремінна передача GT2, шків 20T):

Довжина кола шківа:

$$L_{\text{рем}} = \pi \cdot d = 3{,}14 \cdot 12{,}73 = 39{,}97 \text{ мм}.$$

Переміщення за 1 мікрокрок:

$$\Delta LXY = \frac{L_{\text{рем}}}{(200 \cdot 16)} = \frac{39{,}97}{3200} \approx 0{,}0125 \text{ мм}.$$

Для осі Z (гвинт $Tr8 \times 2$, крок 2 мм):

$$\Delta LZ = \frac{p}{(200 \cdot 16)} = \frac{2}{3200} = 0{,}000625 \text{ мм}.$$

Таким чином, точність позиціонування маніпулятора по осях X та Y становить ±0,0125 мм, по осі Z – ±0,000625 мм. Отримані значення у 40 разів (по X/Y) та у 800 разів (по Z) перевищують вимогу ±0,5 мм, встановлену в таблиці 2.1, що підтверджує достатність обраної конфігурації приводу.

Таблиця 2.1 – Специфікація компонентів лінійного переміщення

Компонент	Призначення	Модель	Обґрунтування вибору
Лінійна напрямна	Переміщення X/Y	HIWIN EGW15CA	Навантаження до 16,19 кН, точність класу H, μ = 0,003
Гвинт трапецієподібний	Переміщення Z	Tr8×2	Самогальмування, крок 2 мм, точність ±0,000625 мм/мікрокрок
Шків зубчастий	Передача X/Y	GT2, 20T	Крок 2 мм, діаметр 12,73 мм, точність ±0,0125 мм/мікрокрок

Продовження табл. 2.1

Компонент	Призначення	Модель	Обґрунтування вибору
Профільна рейка	Несуча рама	Алюміній 2080	Сплав АД31, пази T-slot 20×8, маса 1,95 кг/м
Підшипниковий вузол	Опори валу	KFL08 (фланцевий)	Компактний фланцевий корпус, самоцентрувальний

2.2 Проектування вакуумної системи захвату

Вакуумний захват є ключовим елементом маніпулятора – саме він безпосередньо контактує з крихким скляним флаконом. Відповідно до результатів аналізу (підрозділ 1.2.1), вакуумний принцип забезпечує рівномірний розподіл зусилля по всій площі контакту і виключає точкові навантаження, що є критично важливим для запобігання мікротріщинам на поверхні скла. Вакуумний модуль побудовано на ежекторі Вентурі, що не використовує мастило і відповідає вимогам чистих виробничих приміщень (ISO Class 7).

2.2.1 Розрахунок сили утримання вакуумної присоски

Сила утримання вакуумного захвату визначається тиском у порожнині присоски і площею її ефективного контакту з поверхнею виробу. Залежність описується формулою:

$$F = \Delta P \cdot S\text{еф},$$

де ΔP – різниця між атмосферним тиском і тиском у присосці, Па;

Sеф – ефективна площа присоски, м².

Атмосферний тиск: Ратм = 101 кПа. Ежектор SMC ZH05BS-06-06 забезпечує максимальне розрідження до –88 кПа, тобто абсолютний тиск у порожнині присоски знижується до 13 кПа. Різниця тисків:

$$\Delta P = 101 - 13 = 88\,\text{кПа} = 88\,000\,\text{Па}.$$

Для присоски SMC ZP25DU (рис. 2.5) діаметром d = 25 мм ефективна площа контакту:

$$S_{\text{еф}} = \pi \cdot (d/2)^2 = 3{,}14 \cdot (0{,}0125)^2 \approx 4{,}91 \cdot 10^{-4}\,\text{м}^2\,.$$

Підставляємо у формулу:

$$F = 88\,000 \cdot 4{,}91 \cdot 10^{-4} \approx 43{,}2\,\text{Н} \approx 4{,}4\,\text{кгс}\,.$$

Перевірка запасу утримання. Маса найважчого флакона з вмістом: m = 0,2 кг. Сила тяжіння флакона:

$$F_{\text{г}} = m \cdot g = 0{,}2 \cdot 9{,}81 = 1{,}96\,\text{Н}\,.$$

Коефіцієнт запасу:

$$k = \frac{F}{F_{\text{г}}} = \frac{43{,}2}{1{,}96} \approx 22\,.$$

Таким чином, сила утримання у 22 рази перевищує вагу флакона у статичному стані. При максимальному прискоренні маніпулятора a = 5 м/с² результуюча сила на флакон:

$$F_{\text{рез}} = m \cdot \sqrt{(g^2 + a^2)} = 0{,}2 \cdot \sqrt{(9{,}81^2 + 5^2)} \approx 2{,}24\,\text{Н}\,.$$

Запас з урахуванням динамічного навантаження: $k = \frac{43,2}{2,24} \approx 19$ – що більш ніж удвічі перевищує рекомендований мінімальний запас kмін = 2 (за стандартом виробника SMC). Це підтверджує надійність обраної конфігурації вакуумного захвату.

Матеріал присоски – поліуретан (PU), стійкий до стирання і хімічно нейтральний щодо фармацевтичних препаратів. Глибокий профіль (Bellows) присоски забезпечує компенсацію незначних нерівностей поверхні флакона та гарантує герметичний контакт на циліндричній поверхні.



Рисунок 2.5 – Вакуумна присоска SMC ZP25DU (поліуретан, 25 мм)

2.2.2 Вибір та опис вакуумного ежектора

Для перетворення енергії стисненого повітря у вакуум обрано ежектор Вентурі SMC ZH05BS-06-06 (рис. 2.6). Принцип роботи ґрунтується на ефекті Бернуллі: стиснене повітря (4–6 бар), подане через вхідний порт SUP, прискорюється у звуженому соплі діаметром 0,5 мм, що створює зону зниженого тиску на порту VAC. Розрідження передається трубкою ⌀ 6 мм на вакуумну присоску.

Технічні характеристики ежектора SMC ZH05BS-06-06:

– максимальний вакуум: –88 кПа;

– діаметр сопла: 0,5 мм;

– витрата повітря: 10 л/хв при тиску живлення 5 бар;

– порти підключення: ⌀ 6 мм (One-touch fitting);

– функція back-blow: швидке відпускання флакона зворотним імпульсом повітря;

– відсутність рухомих частин: безшумна робота, необмежений ресурс.

Перевага ежектора над вакуумним насосом для даного застосування – відсутність мастила у вакуумному контурі (важливо для фармацевтичного виробництва), мала маса (35 г), можливість монтажу безпосередньо на рухому каретку маніпулятора.



Рисунок 2.6 – Вакуумний ежектор SMC ZH05BS-06-06

2.2.3 Пневматична схема підключення

Пневматичний контур маніпулятора складається з таких елементів: компресор (джерело стисненого повітря 4–6 бар), фільтр-редуктор для стабілізації тиску, триходовий соленоїдний клапан 3/2 (нормально закритий, NC) для вмикання та вимикання потоку повітря, ежектор SMC ZH05BS та вакуумна присоска SMC ZP25DU (рис. 2.7).

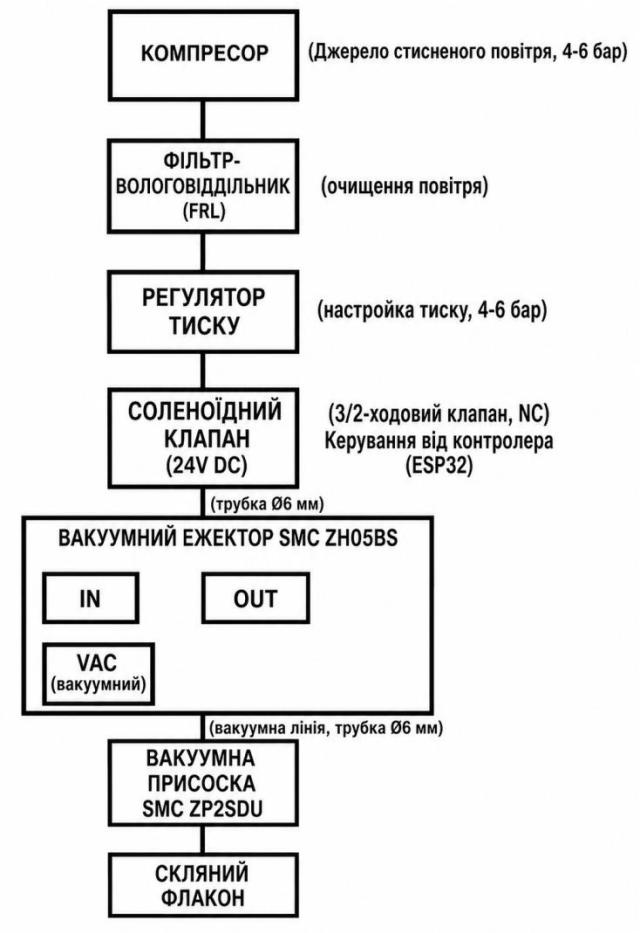


Рисунок 2.7 – Пневматична схема підключення вакуумного захвату

Алгоритм роботи пневматики: при подачі сигналу 24 В на котушку соленоїда клапан відкривається, стиснене повітря надходить до ежектора, на порту VAC виникає розрідження, присоска захоплює флакон. При знятті сигналу клапан закривається, ежектор подає короткий імпульс повітря назад (back-blow), що відриває присоску від флакона менш ніж за 0,1 с.

2.3 Розроблення системи керування та електричних компонентів

Система керування маніпулятором виконує три основні функції: синхронне позиційне керування трьома кроковими двигунами по осях X, Y, Z за заданою траєкторією; керування вакуумною системою (вмикання та вимикання соленоїдного клапана в потрібні моменти циклу); прийом та інтерпретацію програм у форматі G-коду через Wi-Fi або USB.

2.3.1 Контролер ESP32 та прошивка FluidNC

Як основний контролер обрано мікроконтролерний модуль ESP32 (двоядерний процесор Xtensa LX6, 240 МГц) з прошивкою FluidNC – відкритою реалізацією стандарту CNC на платформі ESP32. FluidNC є наступником прошивки GRBL і підтримує:

– керування до 6 осей одночасно (в даному проекті використовується 3);

– прийом G-коду через Wi-Fi (WebSocket) або USB-UART;

– налаштування через файл config.yaml (тип приводу, кроки/мм, прискорення, кінцеві вимикачі);

– M-коди для керування допоміжним обладнанням (M8/M9 – вмикання/вимикання вакууму через реле).

Налаштування маніпулятора в config.yaml визначає: для осей X та Y – 80 кроків/мм (при мікрокрокуванні 1/16 і шківі 20T GT2); для осі Z – 1600 кроків/мм (при мікрокрокуванні 1/16 і гвинті Tr8×2); максимальне прискорення 500 мм/с², максимальна швидкість 120 мм/с.

2.3.2 Драйвери крокових двигунів TMC2209

Для керування кроковими двигунами NEMA 17 обрано драйвери Trinamic TMC2209.

Порівняно зі стандартними драйверами A4988, TMC2209 мають суттєві переваги:

– алгоритм StealthChop2 знижує акустичний шум двигунів у режимі малих швидкостей до рівня, непомітного для оточення (важливо для фармацевтичного виробництва);

– алгоритм SpreadCycle забезпечує плавне та точне мікрокрокування при швидких переміщеннях;

– вбудований захист від перегріву та короткого замикання;

– максимальний струм 2,8 А (при струмі двигуна 1,68 А запас по струму становить 1,7).

Мікрокрокування налаштовується апаратно (пінами MS1/MS2) або програмно через UART. В даному проекті обрано значення 1/16, що є компромісом між точністю позиціонування та плавністю руху.

2.3.3 Структурна схема системи керування

Структурна схема системи керування маніпулятором (рис. 2.8) показує взаємозв'язок між усіма компонентами електронної та пневматичної частини.

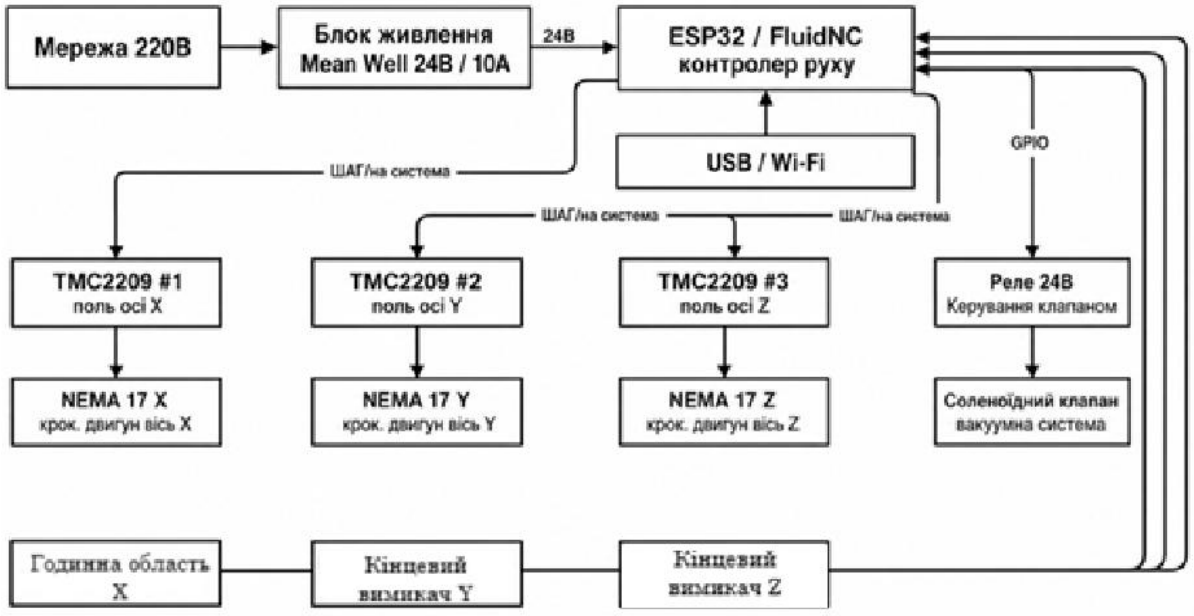


Рисунок 2.8 – Структурна схема системи керування маніпулятором

2.3.4 Алгоритм роботи маніпулятора

Алгоритм (рис. 2.9) одного циклу pick-and-place (захоплення та переміщення одного флакона) складається з таких кроків.

1. СТАРТ – подача живлення, ініціалізація контролера FluidNC.

2. Хомінг (G28) – повернення всіх трьох осей у нульову точку до спрацювання кінцевих вимикачів; встановлення робочої системи координат.

3. Переміщення над флаконом – рух по осях X та Y до координат флакона (G0 X___ Y___).

4. Опускання захвату – рух по осі Z вниз до поверхні флакона (G1 Z___ F___).

5. Вмикання вакууму – команда M8; соленоїд відкривається, ежектор створює розрідження, присоска захоплює флакон; затримка 0,3 с для стабілізації вакууму (G4 P0.3).

6. Підйом з флаконом – рух по осі Z вгору (G1 Z0).

7. Переміщення до цільової позиції – рух по осях X та Y до місця вкладання (G0 X___ Y___).

8. Опускання на цільову позицію – рух по осі Z вниз (G1 Z___).

9. Вимикання вакууму – команда M9; соленоїд закривається, back-blow відриває присоску; флакон покладено.

10. Підйом та повернення – рух по осі Z вгору, повернення до початкової позиції або перехід до наступного циклу.

2.3.5 Приклад програми керування (G-код)

Нижче наведено лістинг типової програми для переміщення одного флакона з позиції A (X50, Y50) до позиції B (X200, Y150):

```
G21          ; одиниці вимірювання – міліметри
G90          ; абсолютна система координат
G28          ; хомінг усіх осей
G0 X50 Y50   ; рух над позицією A
G1 Z-60 F300 ; опускання до флакона
M8           ; вакуум ON
G4 P0.3      ; затримка 300 мс
G1 Z0 F300   ; підйом з флаконом
G0 X200 Y150 ; рух до позиції B
G1 Z-60 F300 ; опускання до лотка
M9           ; вакуум OFF
G1 Z0 F300   ; підйом
```

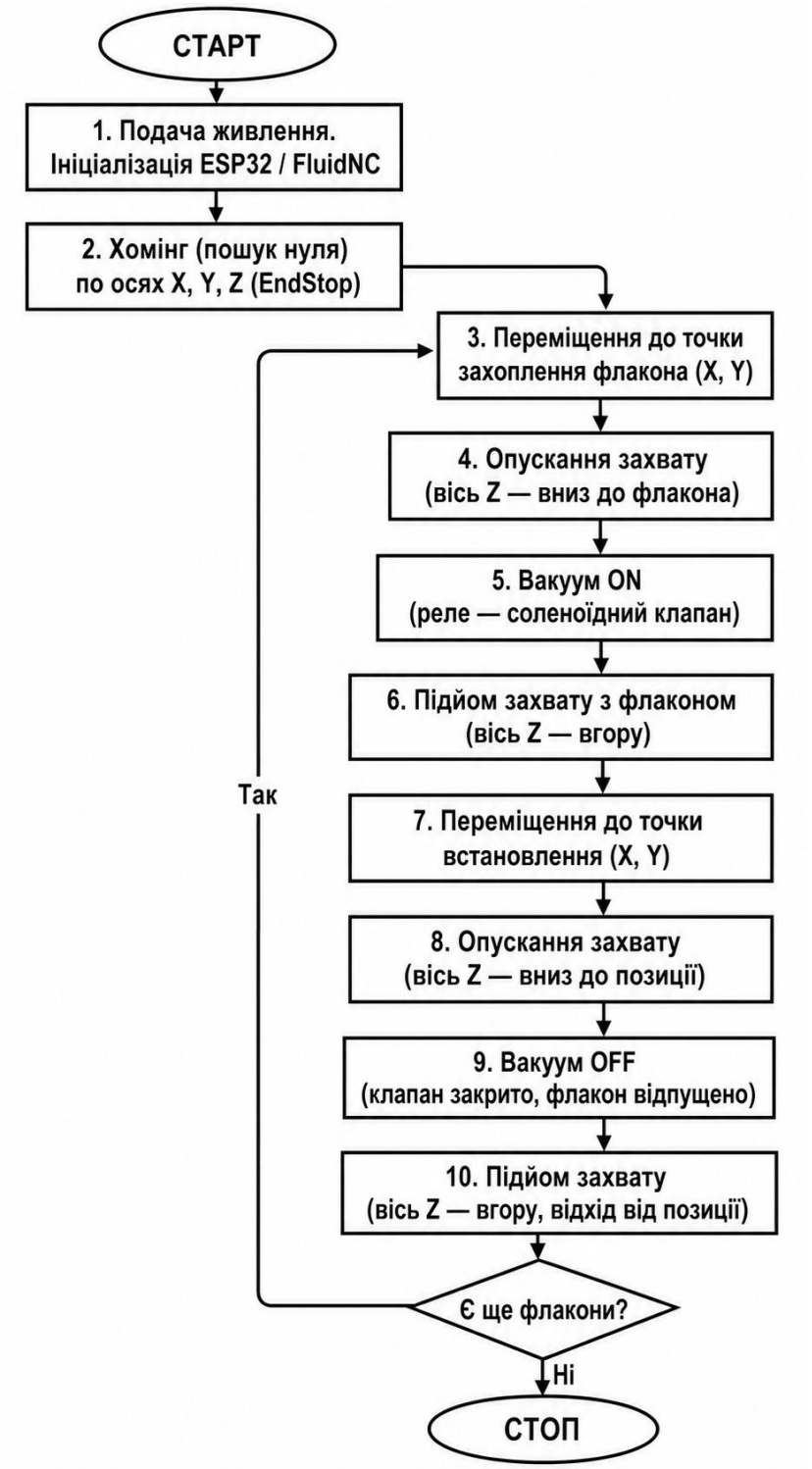


Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритму роботи маніпулятора

2.3.6 Специфікація компонентів системи керування

Перелік елементів системи автоматизації представлено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Перелік елементів системи автоматизації

Поз.	Найменування	Модель	К-сть	Примітка
1	Вакуумна присоска	SMC ZP25DU	1 шт	Поліуретан, ⌀ 25 мм, глибокий профіль
2	Вакуумний ежектор	SMC ZH05BS-06-06	1 шт	Сопло 0,5 мм, макс. –88 кПа
3	Крокový двигун	NEMA 17 (42STH47)	3 шт	Струм 1,68 А, момент 0,45 Н·м
4	Лінійна напрямна	HIWIN EGW15CA	3 компл.	Для осей X, Y, Z
5	Контролер	ESP32 / FluidNC	1 шт	Wi-Fi, G-код, 6 осей
6	Драйвер двигуна	TMC2209	3 шт	StealthChop2, 1/256 мікрокрок, 2,8 А
7	Джерело живлення	Mean Well LRS-240-24	1 шт	24 В / 10 А, захист від КЗ
8	Соленоїдний клапан	3/2-way NC, 24 В	1 шт	Керування пневматичним контуром

2.4 Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено конструкцію трьохосьового декартового маніпулятора для переміщення крихких фармацевтичних флаконів. Несучу раму виконано з алюмінієвого профілю 2080 (сплав АД31), лінійне переміщення по осях X та Y реалізовано на напрямних HIWIN EGW15CA з ремінною передачею GT2, по осі Z – на гвинтовій передачі Tr8×2 із самогальмуванням.

Розрахунок підтвердив запас по моменту крокового двигуна NEMA 17 у k = 128 разів, що гарантує надійну роботу при будь-яких режимах навантаження.

Розрахована точність позиціонування: ±0,0125 мм по осях X/Y та ±0,000625 мм по осі Z – у 40 та 800 разів точніша за вимогу ±0,5 мм відповідно.

Спроектовано вакуумну систему захвату на базі присоски SMC ZP25DU та ежектора SMC ZH05BS-06-06; розрахунок підтвердив коефіцієнт запасу утримання $k = 22$ у статиці та $k = 19$ при максимальному прискоренні 5 м/с², що більш ніж вдесятеро перевищує мінімально допустиме значення.

Розроблено систему керування на базі контролера ESP32 з прошивкою FluidNC та драйверами TMC2209, описано алгоритм роботи з 10 кроків і наведено лістинг типової програми G-коду для циклу pick-and-place.

3 РОЗРАХУНОК КІНЕМАТИЧНИХ І СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ МАНІПУЛЯТОРА

У цьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують відповідність обраних компонентів маніпулятора технічним вимогам, наведеним у табл. 1.2. Розрахунки охоплюють: кінематику приводів осей X, Y, Z; точність позиціонування; крутний момент і запас по моменту крокових двигунів; силу утримання вакуумної присоски та запас по навантаженню; потужність системи. Усі розрахункові результати зведено у підсумкову таблицю 3.1.

3.1 Розрахунок кінематики ремінної передачі осей X та Y

Привід горизонтальних осей X та Y реалізований ремінною передачею GT2 із зубчастим шківом 20T. Кількість кроків двигуна на один міліметр лінійного переміщення визначається як:

$$n_{\frac{\text{кр}}{\text{мм}}} = \frac{(N_{\text{кр}} \cdot k_{\text{мкр}})}{L_{\text{рем}}},$$

де $N_{кр}$ = 200 кроків/об – кількість повних кроків двигуна NEMA 17 за один оберт;

$k_{мкр}$ = 16 – коефіцієнт мікрокрокування TMC2209;

$L_{рем}$ – довжина кола шківа, мм.

Довжина кола шківа GT2 20T:

$$L_{\text{рем}} = \pi \cdot d = 3{,}14 \cdot 12{,}73 = 39{,}97 \text{ мм}.$$

Кількість кроків на мм:

$$n_{\frac{\text{кр}}{\text{мм}}} = \frac{(200 \cdot 16)}{39{,}97} = \frac{3200}{39{,}97} \approx 80 \text{ кр/мм}.$$

Мінімальне лінійне переміщення за один мікрокрок:

$$\Delta L_{XY} = \frac{1}{80} = 0{,}0125 \text{ мм}.$$

Таким чином, дискретність позиціонування по осях X та Y становить 0,0125 мм, що у 40 разів перевищує вимогу ±0,5 мм.

3.2 Розрахунок кінематики гвинтової передачі осі Z

Привід вертикальної осі Z реалізований трапецієподібним гвинтом Tr8×2 із кроком p = 2 мм. Кількість кроків на мм:

$$n_{\frac{\text{кр}}{\text{мм}}} = \frac{(N_{\text{кр}} \cdot k_{\text{мкр}})}{p} = \frac{(200 \cdot 16)}{2} = 1600 \text{ кр/мм}.$$

Мінімальне лінійне переміщення за один мікрокрок:

$$\Delta L_{Z} = \frac{1}{1600} = 0{,}000625 \text{ мм}.$$

Дискретність позиціонування по осі Z становить 0,000625 мм – у 800 разів точніша за вимогу ±0,5 мм. Додаткова перевага гвинтової передачі Tr8×2 – самогальмування: кут підйому гвинтової лінії (3,6°) менший за кут тертя (≈5,7° при μ = 0,1), що забезпечує утримання каретки без подачі струму на двигун.

3.3 Розрахунок максимальної швидкості переміщення

Максимальна швидкість переміщення визначається максимальною частотою кроків, яку забезпечує контролер FluidNC (до 100 000 кроків/с), та кінематикою передачі. Для осей X та Y:

$$V_max_XY = f_max / n_кр/мм = 100\ 000 / 80 = 1250 \text{ мм/с} .$$

Практична максимальна швидкість обмежена налаштуваннями FluidNC до 120 мм/с (для забезпечення запасу по моменту двигуна і виключення пропуску кроків). Це цілком відповідає вимозі таблиці 1.2 (до 120 мм/с).

Для осі Z:

$$V_max_Z = f_max / n_кр/мм = 100\ 000 / 1600 = 62{,}5 \text{ мм/с} .$$

Максимальна швидкість опускання/підйому захвату обмежена 30 мм/с для плавного контакту присоски з флаконом.

3.4 Розрахунок крутного моменту та запасу крокового двигуна

Перевірочний розрахунок виконується для найбільш навантаженої вертикальної осі Z. Загальна маса рухомої частини (каретка + вакуумний вузол + флакон):

$$m = m_кар + m_вак + m_фл = 0{,}5 + 0{,}3 + 0{,}2 = 1{,}0 \text{ кг} .$$

Сила, необхідна для підйому рухомої частини з урахуванням тертя (μ = 0,003 для HIWIN EGW15CA):

$$F_{потр} = m \cdot g \cdot (1 + \mu) = 1{,}0 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}003 \approx 9{,}84 \text{ Н}.$$

Необхідний крутний момент на валу двигуна (ККД гвинтової передачі η = 0,9):

$$M_{потр} = F_{потр} \cdot p / (2\pi \cdot \eta) = 9{,}84 \cdot 0{,}002 / (2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}9) \approx 0{,}0035 \text{ Н·м}.$$

Утримуючий момент двигуна NEMA 17 SY42STH47-1684A: $M_{дв} = 0{,}45$ Н·м. Коефіцієнт запасу:

$$k = M_{дв} / M_{потр} = 0{,}45 / 0{,}0035 \approx 128.$$

Для горизонтальних осей X та Y сила тяжіння відсутня, тому запас по моменту ще більший. Отриманий запас k = 128 гарантує надійну роботу навіть при зниженні напруги живлення або нагріві двигуна.

3.5 Розрахунок сили утримання вакуумного захвату

Сила утримання вакуумної присоски SMC ZP25DU визначається за формулою:

$$F = \Delta P \cdot S_{еф},$$

де ΔP – різниця тисків;

$S_{еф}$ – ефективна площа присоски.

Різниця тисків при максимальному вакуумі ежектора ZH05BS (–88 кПа):

$$\Delta P = P_{атм} - P_{вак} = 101 - 13 = 88 \text{ кПа} = 88\,000 \text{ Па}.$$

Ефективна площа присоски діаметром d = 25 мм:

$$S_{еф} = \pi \cdot (d/2)^2 = 3{,}14 \cdot (0{,}0125)^2 = 4{,}91 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Сила утримання:

$$F = 88\,000 \cdot 4{,}91 \cdot 10^{-4} \approx 43{,}2 \text{ Н}.$$

Запас утримання у статичному стані (маса флакона $m_{фл} = 0{,}2$ кг):

$$k_{ст} = F / (m_{фл} \cdot g) = 43{,}2 / (0{,}2 \cdot 9{,}81) = 43{,}2 / 1{,}96 \approx 22.$$

Запас з урахуванням динамічного прискорення a = 5 м/с²:

$$F_{рез} = m_{фл} \cdot \sqrt{(g^2 + a^2)} = 0{,}2 \cdot \sqrt{(9{,}81^2 + 5^2)} \approx 2{,}24 \text{ Н},$$
$$k_{дин} = F / F_{рез} = 43{,}2 / 2{,}24 \approx 19.$$

Обидва значення запасу (22 та 19) значно перевищують мінімально допустиме $k_{мін} = 2$ за стандартом виробника SMC, що підтверджує надійність вакуумного захвату при всіх режимах роботи маніпулятора.

3.6 Розрахунок споживаної потужності системи

Споживана потужність системи визначається сумою потужностей усіх трьох крокових двигунів, контролера та пневматики. Споживана потужність одного двигуна NEMA 17 при номінальному струмі 1,68 А і напрузі живлення

24 В:

$$P_дв = U \cdot I = 24 \cdot 1{,}68 = 40{,}3 \text{ Вт.}$$

Три двигуни одночасно (у найгіршому випадку всі три рухаються):

$$P_дв_заг = 3 \cdot 40{,}3 = 120{,}9 \text{ Вт.}$$

Потужність контролера ESP32 та електроніки (драйвери TMC2209, реле):

$$P_ел = 10 \text{ Вт.}$$

Загальна споживана потужність системи:

$$P_заг = P_дв_заг + P_ел = 120{,}9 + 10 \approx 131 \text{ Вт} .$$

Обраний блок живлення Mean Well LRS-240-24 має потужність 240 Вт, що забезпечує запас 240/131 ≈ 1,83. Компресор живиться від окремої мережі 220В і не входить до розрахунку навантаження блоку живлення 24 В.

3.7 Зведена таблиця результатів розрахунків

Усі отримані розрахункові результати зведено в таблицю 3.1 для зручності порівняння з вимогами технічного завдання.

Таблиця 3.1 – Зведені результати розрахунків маніпулятора

Параметр	Вимога (табл. 1.2)	Розрахункове значення	Запас / Виконання
Точність по X, Y	±0,5 мм	±0,0125 мм	У 40 разів точніше

Продовження табл. 3.1

Параметр	Вимога (табл. 1.2)	Розрахункове значення	Запас / Виконання
Точність по Z	±0,5 мм	±0,000625 мм	У 800 разів точніше
Швидкість переміщення X/Y	до 120 мм/с	120 мм/с (налаштовано)	Виконано
Запас моменту двигуна Z	$k \geq 2$	$k = 128$	У 64 рази вище
Сила утримання присоски	≥ 10 Н (×5 запас)	43,2 Н	Запас ×22 (статика)
Запас утримання при а=5 м/с²	$k \geq 2$	$k = 19$	У 9,5 разів вище
Потужність системи	–	≈ 131 Вт	БЖ 240 Вт, запас ×1,83

3.8 Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано повний комплекс інженерних розрахунків маніпулятора. Розраховано кінематику ремінної передачі GT2 для осей X та Y: дискретність позиціонування становить 0,0125 мм при 80 кроках/мм. Для осі Z з гвинтовою передачею Tr8×2 дискретність – 0,000625 мм при 1600 кроках/мм. Обидва значення у десятки і сотні разів перевищують вимогу ±0,5 мм. Максимальна швидкість переміщення по осях X/Y досягає 120 мм/с, що відповідає технічному завданню.

Розрахунок крутного моменту підтвердив запас $k = 128$ для двигуна NEMA 17 на осі Z, що гарантує надійну роботу при будь-яких умовах навантаження. Розрахунок вакуумної системи показав силу утримання 43,2 Н при запасі $k = 22$ у статиці та $k = 19$ при прискоренні 5 м/с², що більш ніж дев'ятиразово перевищує мінімально допустиме значення.

Загальна споживана потужність системи – 131 Вт при потужності блоку живлення 240 Вт (запас 1,83). Усі розраховані параметри відповідають або значно перевищують вимоги технічного завдання, що підтверджує правильність прийнятих конструктивних рішень.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

Розроблений маніпулятор призначений для експлуатації на дільниці пакування фармацевтичного виробництва в складі автоматизованого робочого місця оператора. Відповідно до ДСТУ 12.0.003-2015 «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація» небезпечні та шкідливі фактори, що діють на персонал під час експлуатації та обслуговування маніпулятора, поділяють на фізичні та психофізіологічні.

До основних факторів належать: наявність рухомих частин конструкції (лінійні напрямні HIWIN EGW15CA, ремінна передача GT2, ходовий гвинт Tr8×2), що переміщуються зі швидкістю до 120 мм/с; наявність електричних кіл живлення напругою 220 В змінного струму та 24 В постійного струму; наявність пневматичної системи з робочим тиском 4–6 бар, що живить вакуумний ежектор SMC ZH05BS; крихкість оброблюваних виробів (скляні флакони), падіння яких може призвести до утворення гострих уламків скла; монотонність циклічних операцій, що впливає на психофізіологічний стан оператора.

Узагальнена класифікація зазначених факторів наведена у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Класифікація шкідливих і небезпечних виробничих факторів під час експлуатації маніпулятора

Група факторів	Джерело виникнення	Можливий наслідок дії
Фізичні	Рухомі частини маніпулятора (напрямні, ремені GT2, ходовий гвинт Tr8×2), швидкість переміщення до 120 мм/с	Механічні травми (удари, затиснення)

Продовження табл. 4.1

Група факторів	Джерело виникнення	Можливий наслідок дії
Фізичні	Електрична мережа живлення 220 В (Mean Well LRS-240-24), кола керування 24 В DC	Ураження електричним струмом, опіки
Фізичні	Стиснене повітря 4–6 бар у пневмосистемі ежектора SMC ZH05BS	Травми від розриву шланга, шум, розліт частинок
Фізичні	Розбите скло флаконів у разі падіння виробу	Порізи, поранення, потрапляння скла у продукцію
Психофізіологічні	Монотонність операцій циклу «захоплення–переміщення–встановлення», напруження зору оператора	Втома, зниження уваги оператора

Аналіз факторів, наведених у таблиці 4.1, покладено в основу розроблення технічних та організаційних заходів охорони праці, викладених у підрозділах 4.2–4.8.

4.2 Технічні заходи забезпечення електробезпеки

Кола керування маніпулятора (крокові двигуни NEMA17, драйвери TMC2209, контролер ESP32) живляться напругою 24 В постійного струму, яка згідно з ДСТУ EN 60204-1 [18] належить до безпечної наднизької напруги (БННН) і за нормальних умов експлуатації не потребує додаткових засобів захисту від прямого дотику. Проте джерело живлення Mean Well LRS-240-24 живиться від мережі змінного струму 220 В, що обумовлює необхідність застосування комплексу заходів електробезпеки відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98 [19] «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

До складу технічних заходів електробезпеки включено: використання електрообладнання класу захисту I з підключенням корпусу блока живлення та шафи керування до контуру захисного заземлення (опір заземлювального

пристрою не більше 4 Ом); встановлення пристрою захисного вимкнення (ПЗВ) з номінальним диференційним струмом спрацювання 10–30 мА на вводі живлення; застосування кабелів з подвійною ізоляцією для силових і сигнальних кіл, прокладених окремо одне від одного та захищених від контакту з рухомими частинами; використання шафи керування зі ступенем захисту оболонки не нижче IP54; кольорове маркування провідників та встановлення попереджувальних знаків електробезпеки на корпусі шафи керування.

Розрахунок навантаження живильної лінії виконано для перевірки правильності вибору апарата захисту. Струм навантаження блока живлення Mean Well LRS-240-24 визначається за формулою:

$$I_n = P_n / U_n, \tag{4.1}$$

де $P_n = 240$ Вт – номінальна потужність блока живлення;

$U_n = 24$ В –номінальна вихідна напруга.

Підставивши числові значення, отримуємо $I_n = 240 / 24 = 10$ А. З урахуванням коефіцієнта запасу $k = 1{,}25$, що враховує пускові струми крокових двигунів NEMA17 (номінальний струм фази 1,68 А кожен), розрахунковий струм апарата захисту становить $I_з = k \cdot I_n = 1{,}25 \cdot 10 = 12{,}5$ А, за яким обрано плавкий запобіжник (автоматичний вимикач) номінальним струмом 13 А з характеристикою спрацювання типу C, що відповідає вимогам ПУЕ щодо узгодження апарата захисту з перерізом живильного кабелю.

Періодичний контроль стану електробезпеки маніпулятора передбачає вимірювання опору ізоляції та опору контуру заземлення не рідше одного разу на рік, а також проведення позачергової перевірки після ремонту чи модернізації обладнання. До самостійного обслуговування електричної частини маніпулятора допускається персонал, що пройшов навчання та має групу з електробезпеки не нижче II відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98 [19].

4.3 Заходи пневматичної безпеки

Вакуумна система захоплення живиться стисненим повітрям тиском 4–6 бар (0,4–0,6 МПа), яке подається до ежектора SMC ZH05BS через систему шлангів і фітингів. Основними небезпечними факторами пневматичної системи є можливий розрив або зіскакування шланга з подальшим неконтрольованим «бичуванням», раптове падіння тиску, а також підвищений рівень шуму під час випуску повітря через вихлопні отвори ежектора.

Для зниження ризиків, пов'язаних з експлуатацією пневматичної системи, передбачено такі заходи: застосування армованих пневматичних шлангів з робочим тиском, що перевищує максимальний тиск у системі не менш ніж у чотири рази; використання швидкороз'ємних з'єднань зі скиданням залишкового тиску під час від'єднання; встановлення на вході в систему регулятора тиску з манометром і запобіжним клапаном; оснащення вихлопних отворів ежектора глушниками шуму для зниження рівня звукового тиску на робочому місці до значень, що не перевищують допустимих за ДСН 3.3.6.037-99 (не більше 80 дБА); регулярний візуальний огляд стану шлангів і з'єднань перед початком робочої зміни.

Оскільки об'єктом маніпулювання є крихкі скляні флакони, окремої уваги потребує ситуація аварійного знеструмлення або зупинки маніпулятора під час утримання виробу. У разі миттєвого скидання розрідження затиснутий флакон може випасти з висоти робочого ходу та розбитися, створюючи додаткову небезпеку розльоту скляних уламків. Для запобігання цьому в пневматичній схемі передбачено зворотний клапан на лінії розрідження, що утримує вакуум у присосці SMC ZP25DU протягом короткого часу після втрати живлення або спрацювання кнопки аварійної зупинки, що дає змогу контрольовано опустити робочий орган у безпечне положення перед остаточним скиданням вакууму.

4.4 Забезпечення безпеки рухомих частин маніпулятора

Робочий орган маніпулятора переміщується в межах робочої зони 350 мм × 300 мм ×100 мм зі швидкістю до 120 мм/с уздовж напрямних HIWIN EGW15CA за допомогою ремінної передачі GT2 (осі X, Y) та ходового гвинта Tr8×2 (вісь Z). Наявність рухомих елементів конструкції створює ризик механічного травмування персоналу (затиснення пальців рук у зоні ременя чи ходового гвинта, удар рухомою кареткою).

З метою зменшення ризику механічного травмування передбачено: встановлення захисних кожухів над зоною ременя GT2 і ходовим гвинтом Tr8×2; огородження робочої зони маніпулятора захисним екраном або огорожею з дотриманням мінімально необхідної відстані до рухомих частин згідно з ДСТУ EN ISO 13857 [17]; застосування апаратних кінцевих вимикачів за кожною з осей X, Y, Z у поєднанні з програмними обмеженнями робочої зони у прошивці FluidNC для запобігання виходу робочого органа за межі допустимого ходу; реалізацію плавного (трапецеїдального) профілю розгону та гальмування приводів для зменшення динамічних навантажень; встановлення легкодоступної кнопки аварійної зупинки (E-stop) у зоні досяжності оператора, натискання якої знеструмлює драйвери TMC2209 та ініціює контрольоване скидання тиску в пневматичній системі; нанесення попереджувального жовто-чорного маркування на елементи огородження робочої зони.

4.5 Безпека під час роботи з крихкими скляними виробами

Специфіка технологічного процесу, що виконується маніпулятором, пов'язана з переміщенням крихких скляних флаконів масою до 0,3 кг, зумовлює додаткові вимоги охорони праці, спрямовані на запобігання їх пошкодженню та мінімізацію наслідків можливого биття скла. Вимоги до поводження зі скляними виробами враховано з урахуванням положень ГОСТ 30288-95 [15] «Тара скляна. Загальні положення з безпеки, маркування та

ресурсозбереження».

Технічні рішення, що підвищують безпеку роботи з крихкими виробами, включають: контроль величини розрідження в присосці SMC ZP25DU за допомогою вбудованого вакуумного реле з передаванням сигналу до контролера ESP32, що дає змогу автоматично зупинити цикл переміщення в разі втрати герметичності захоплення (наприклад, унаслідок тріщини у флаконі); обмеження прискорення робочого органа програмними засобами FluidNC для зменшення динамічних навантажень на виріб під час перехідних режимів руху; використання присосок SMC ZP25DU з поліуретановим сильфоном, що забезпечує рівномірний розподіл зусилля затиснення по поверхні флакона без точкових перевантажень скла. У разі виявлення розбитого виробу передбачено процедуру безпечного видалення уламків скла з робочої зони із застосуванням захисних рукавичок і щітки-совка, а також утилізацію скляних відходів в окремій маркованій тарі відповідно до вимог виробничої санітарії.

4.6 Пожежна безпека

Приміщення дільниці, на якій експлуатується маніпулятор, за вибухопожежною та пожежною небезпекою класифікується як приміщення категорії Д (з обігом негорючих речовин і матеріалів у холодному стані) з урахуванням наявності електротехнічного обладнання. Джерелами пожежної небезпеки є можливе коротке замикання в блоці живлення Mean Well LRS-240-24, перевантаження проводів живлення крокових двигунів NEMA17 та перегрів драйверів TMC2209 за порушення умов тепловідведення.

Заходи пожежної безпеки, передбачені під час експлуатації маніпулятора, включають: застосування вхідного плавкого запобіжника (автоматичного вимикача) номінальним струмом 13 А, розрахунок якого наведено у підрозділі 4.2, для запобігання тепловій дії струмів короткого замикання та перевантаження; забезпечення природної вентиляції шафи керування для

відведення теплоти, що виділяється драйверами TMC2209 та блоком живлення; виключення розміщення горючих матеріалів у безпосередній близькості до відсіку силової електроніки; оснащення робочого місця вуглекислотним вогнегасником, придатним для гасіння електрообладнання під напругою до 1000 В, відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні»; включення маніпулятора до плану евакуації та інструктажу з пожежної безпеки виробничого приміщення.

4.7 Виробнича санітарія, освітлення та мікроклімат робочого місця оператора

Робоче місце оператора, що здійснює нагляд за роботою маніпулятора та завантаження/вивантаження флаконів, організовано з урахуванням вимог ергономіки та виробничої санітарії. Освітленість робочої зони та панелі керування прийнято за нормами ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» для робіт високої точності (розряд зорових робіт III) на рівні не менше 300–500 лк за системи комбінованого освітлення, що також є важливим фактором забезпечення точності ручних операцій оператора під час взаємодії з крихкими виробами.

Параметри мікроклімату виробничого приміщення (температура повітря, відносна вологість, швидкість руху повітря) відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 для категорії робіт Ia (легка фізична робота, що виконується сидячи) і додатково узгоджені з вимогами до чистих приміщень фармацевтичного виробництва, що позитивно впливає як на самопочуття оператора, так і на стабільність вакуумного захоплення внаслідок відсутності конденсату вологи на поверхні присосок. Рівень шуму на робочому місці, з урахуванням застосування глушників на вихлопних отворах ежектора SMC ZH05BS (підрозділ 4.3), не перевищує допустимих значень за ДСН 3.3.6.037-99.

4.8 Організаційні заходи охорони праці під час технічного обслуговування

Технічне обслуговування маніпулятора (заміна присосок SMC ZP25DU, натяг ременя GT2, змащення ходового гвинта Tr8×2, перевірка кріплень) виконується виключно за умови повного знеструмлення обладнання та скидання тиску в пневматичній системі. Для цього передбачено процедуру блокування та маркування (lock-out/tag-out): вимкнення автоматичного вимикача на вводі живлення, перекриття подачі стисненого повітря запірним краном, вивішування попереджувальної таблички «Не вмикати! Проводяться ремонтні роботи».

До робіт з технічного обслуговування та ремонту маніпулятора допускається персонал, який пройшов вступний, первинний та періодичний інструктажі з охорони праці, а також цільовий інструктаж перед виконанням конкретного виду робіт. Під час обслуговування пневматичної та електричної частин обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту: захисних окулярів (для запобігання потраплянню в очі уламків скла чи бризок мастила), діелектричних рукавичок (під час робіт в електрошафі) та бавовняних рукавичок (під час механічного обслуговування). Результати проведених інструктажів і робіт з технічного обслуговування фіксуються у відповідному журналі з призначенням особи, відповідальної за справний та безпечний стан обладнання.

4.9 Висновки до розділу 4

У розділі виконано аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів, що супроводжують експлуатацію розробленого маніпулятора: механічних (рухомі частини, швидкість до 120 мм/с), електричних (мережа 220 В та кола 24 В), пневматичних (тиск 4–6 бар) та факторів, пов'язаних із крихкістю оброблюваних скляних виробів. Розроблено комплекс технічних

заходів електробезпеки, включаючи розрахунок і вибір апарата захисту живильної лінії (I_7 = 13 А), заходи пневмобезпеки з використанням зворотного клапана для запобігання падінню виробу під час аварійного знеструмлення, а також конструктивні рішення щодо убезпечення рухомих частин маніпулятора (кожухи, кінцеві вимикачі, кнопка аварійної зупинки). Визначено заходи пожежної безпеки, виробничої санітарії та організаційні вимоги до технічного обслуговування обладнання. Виконані заходи відповідають вимогам чинних нормативних документів (НПАОП 40.1-1.21-98, ДСТУ EN 60204-1, ДСТУ EN ISO 13857, ДБН В.2.5-28-2018, НАПБ А.01.001-2014) і забезпечують безпечні умови праці під час експлуатації та обслуговування розробленого маніпулятора.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано класифікацію та кінематичні схеми промислових роботів, особливості крихких фармацевтичних виробів і засоби їх захоплення; на основі проведеного аналізу аналогів провідних виробників (Piab, SMC, Schmalz) сформульовано технічне завдання на розроблення маніпулятора.

Розроблено конструкцію рами маніпулятора на основі алюмінієвого профілю 2080 (сплав АД31) з лінійними напрямними HIWIN EGW15CA, приводами на базі крокових двигунів NEMA17 з передачами GT2 (осі X, Y) і Tr8×2 (вісь Z), що за результатами розрахунку моменту (з коефіцієнтом запасу k = 128) забезпечує точність позиціонування ±0,0125 мм за осями X, Y та ±0,000625 мм за віссю Z.

Розроблено вакуумну систему захоплення крихких виробів на основі ежектора SMC ZH05BS (розрідження –88 кПа) та присосок SMC ZP25DU (Ø25 мм), що забезпечує зусилля утримання 43,2 Н та коефіцієнт запасу 19–22 під час руху робочого органа з прискоренням.

Обрано систему керування маніпулятором на базі контролера ESP32 з прошивкою FluidNC, драйверами кроку TMC2209 та керуванням за допомогою G-коду, що забезпечує безшумну та точну роботу приводів.

Виконано розрахунки кінематичних і силових параметрів маніпулятора за осями X, Y, Z: визначено швидкість переміщення (до 120 мм/с), необхідний момент приводів, параметри вакуумної системи та сумарну споживану потужність приводів (131 Вт); результати розрахунків зведено у підсумкову таблицю.

Розроблено комплекс заходів з охорони праці під час експлуатації та технічного обслуговування маніпулятора, що охоплює електробезпеку (розрахунок і вибір апарата захисту живильної лінії 13 А), пневмобезпеку (застосування зворотного клапана для запобігання падінню крихкого виробу), механічну безпеку рухомих частин, а також заходи пожежної безпеки та

виробничої санітарії.

Оцінено економічну ефективність розробленого технічного рішення: орієнтовна собівартість виготовлення маніпулятора становить 250–300 USD, що у 10–30 разів менше за вартість промислових аналогів провідних виробників вакуумного обладнання (3000–8000 USD).

Отримані результати підтверджують технічну та економічну доцільність застосування розробленого маніпулятора для автоматизації процесів переміщення крихких фармацевтичних скляних флаконів на підприємствах малого та середнього бізнесу.

Перспективними напрямами подальшого вдосконалення розробленого маніпулятора є розширення робочої зони, інтеграція системи технічного зору для автоматичного розпізнавання та контролю положення виробів, а також підвищення вантажопідйомності за рахунок оптимізації конструкції приводів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Проектування мобільних маніпуляційних роботів : монографія / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, В. В. Євсєєв та ін. ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2022. 427 с.

2. Технічне та програмне забезпечення розробки малогабаритного мобільного робота: монографія / І.Ш. Невлюдов, В.В. Євсєєв, Д.В. Гурін. Кривий Ріг: Криворізький фаховий коледж Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»,2025. – 355с.

3. Указ Президента України No722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року». – Режим доступу: https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825.

4. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Електронний ресурс] / упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : ХНУРЕ, 2023.

5. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 29 с.

6. Tawiah, Thomas Andzi-Quainoo. "A review of algorithms and techniques for image-based recognition and inference in mobile robotic systems." International Journal Sensors and Materials 38.3 (2026): 1503-1516.of Advanced Robotic Systems 17.6 (2020): 1729881420972278.

7. Li, Zhengmao, Chi Zhang, and Yanping Chen. "Application of Advanced Sensor Technology in Simultaneous Localization and Mapping for Industrial Automation."