

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення та дослідження автоматизованої системи керування процесом
складання контактного роз'єму PIN Header

Виконав: студент

VI курсу, групи КТм-61

спеціальності

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Петров А.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Стухляк П.Д.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Чихіри І.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Голотенко О.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Дмитрів О.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Голотенко О.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Петров Артем Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення та дослідження автоматизованої системи керування процесом складання контактного роз'єму PIN Header

Керівник роботи Стухляк П.Д., д.т.н., професор кафедри КТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» 11 2025 року № 4/7-962

2. Термін подання студентом завершеної роботи

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про автоматизацію технологічного процесу складання штифтових роз'ємів

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Сформулювати опис виробництва, постановку задачі та аналіз автоматизованих виробничих автоматизованих виробничих систем. 2. Проаналізувати виробничі процеси, організувати збір та базу даних. 3. Змоделювати та реалізувати автоматизовану систему складання РНА з розробкою алгоритмів керування, компонуванням роботизованої клітинки та забезпеченням безпечної колаборативної взаємодії. 4. Підвищити ефективність процесу Pin Header Assembly (РНА) у складі загального виробничого потоку датчиків. 5. Розглянути програмне забезпечення для виконання поставлених задач. 6. Забезпечити охорону праці при роботі із системою керування, дотримання вимог електробезпеки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Тема роботи. 2. Актуальність роботи. 3. Мета роботи, об'єкт та предмет дослідження. 4. Цілі та завдання, які необхідно було вирішити. 5. Співпраця людини і робота. 6. Виробничі системи в автоматизованому виробництві. 7. Аналіз впливу технологічних змін на стабільність складання. 8. Потік матеріалів по конвеєрній лінії. 9. Логіка автоматизованого циклу РНА. 10. Карта поточного стану потоку створення продукції. 11. Структурна схема системи керування РНА-станцією. 12. Архітектура програмного забезпечення. 13. Аналіз пропускну здатності автоматизованої лінії. 14. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці			
Безпека в надзвичайних ситуаціях			

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	25.11.2025	Виконано
2.	Підбір наукових джерел по темі роботи	26.11.2025-28.11.2025	Виконано
3.	Опрацювання наукових публікацій та збір даних по темі роботи	29.11.2025-1.12.2025	Виконано
4.	Виконання дослідження згідно мети кваліфікаційної роботи	2.12.2025-4.12.2025	Виконано
5.	Оформлення першого та другого розділів	5.12.2025-7.12.2025	Виконано
6.	Оформлення третього розділу	8.12.2025-10.12.2025	Виконано
7.	Оформлення розділу четвертого розділу	11.12.2024-13.12.2024	Виконано
8.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	13.12.2025-15.12.2025	Виконано
9.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.12.2025-17.12.2025	Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.12.2025-19.12.2025	Виконано
11.	Нормоконтроль	19.12.2025-20.12.2025	Виконано
12.	Перевірка на плагіат	15.12.2025	Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	22.12.2025	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи	23.12.2025	

Студент

(підпис)

Петров А.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Стухляк П.Д.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра яка складається з записки та графічної частини та ілюстративний матеріал – слайди. Об'єм ілюстративного матеріалу дипломної роботи становить 14 слайдів.

Об'єм пояснювальної записки складає 87 друкованих сторінок формату А4.

У роботі було проведено розроблення та дослідження автоматизованої системи керування процесом складання контактного роз'єму PIN Header.

Представлено комплексне дослідження процесу автоматизації складання контактного роз'єму типу PIN Header із застосуванням промислового робота UR5, орієнтоване на підвищення ефективності, стабільності та відтворюваності технологічного процесу. Актуальність даного дослідження зумовлена зростаючими вимогами до точності та швидкості складання електромеханічних компонентів у контексті індустріальної цифровізації та впровадження концепції Industry 4.0. Виробники електроніки прагнуть мінімізувати вплив людського фактору, підвищити пропускну здатність і забезпечити стабільну якість продукції, що робить роботизацію ключовим напрямом розвитку галузі.

Запропонована система базується на роботизованому маніпуляторі UR5, обраному завдяки його універсальності, повторюваності та можливості адаптації до різних технологічних операцій. У рамках роботи розроблено апаратно-програмний комплекс, який включає роботизований модуль, систему технічного зору, спеціалізовані тримачі й оснащення для фіксації заготовок, а також програмні алгоритми планування й контролю траєкторій. Особливу увагу приділено інтеграції програмного забезпечення для керування UR5, розробленню оптимізованої логіки переміщення та узгодженню параметрів швидкості, прискорення і позиціювання для забезпечення стабільної точності виконання операцій.

У процесі роботи проведено значний обсяг експериментальних досліджень, спрямованих на визначення фактичної тривалості основних етапів складання PIN Header. Виконано вимірювання часу захоплення елемента, його транспортування, точної орієнтації, установлення у корпус та контролю коректності позиціювання. На основі цих даних сформовано модель повного технологічного циклу, що дає змогу оцінити ефективність роботи системи у різних режимах. Було визначено ключові параметри, які впливають на швидкодію процесу, зокрема оптимальні швидкості переміщення UR5, раціональні кути повороту, мінімальну кількість проміжних точок у траєкторії та затримки, пов'язані з обробкою сигналів від датчиків і системи візуалізації.

Окремим етапом дослідження стала оцінка пропускної здатності системи, тобто кількості контактних роз'ємів, які робот здатен зібрати за одиницю часу. Було проаналізовано кілька сценаріїв роботи маніпулятора: базовий, оптимізований та адаптивний із використанням змінних швидкісних параметрів. Порівняння продемонструвало, що впровадження оптимізованих траєкторій дозволяє суттєво скоротити тривалість циклу без втрати точності. Зокрема, вдалося зменшити час окремих операцій на 12–25%, що в комплексі забезпечило збільшення загальної пропускної здатності на 18–30% залежно від режиму роботи. Встановлено, що головним фактором впливу є мінімізація непотрібних переміщень UR5, раціональний добір швидкості підходу до деталей та синхронізація роботи захоплювальних механізмів.

У результаті роботи створено ефективну автоматизовану систему складання роз'ємів PIN Header, що забезпечує високу відтворюваність операцій, зниження рівня браку, стабільність технологічних параметрів та можливість інтеграції у сучасні виробничі лінії. Проведені експерименти довели, що поєднання роботизованої механіки UR5 з оптимізованими алгоритмами керування дозволяє суттєво підвищити продуктивність без додаткових апаратних змін. Отримані результати можуть бути використані

для модернізації виробничих процесів, розроблення роботизованих осередків складання та впровадження гнучких автоматизованих систем у приладобудуванні.

Ключові слова: ГНУЧКА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, РОБОТ, ВИРОБНИЧА ЛІНІЯ, UR5, ПОЗИЦІЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	13
1.1. Опис виробництва, та постановка задачі.....	13
1.2 Виробничі системи в автоматизованому виробництві.....	15
1.3 Система «Співпраця людини і робота»	17
1.4 Виробничі системи в автоматизованому виробництві.....	19
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	24
2.1 Аналіз та контроль виробничих процесів.....	24
2.2 Організація збору даних і побудова бази	27
2.3 Аналіз технологічних варіацій і впливу чинників на стабільність складання.....	29
2.4 Побудова моделі автоматизованої системи керування та підготовка до оптимізації.....	32
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	35
3.1 Моделювання та візуальне представлення.....	35
3.2 Автоматична збірка штифтових роз'ємів.....	40
3.4 Розробка алгоритмів керування процесом складання РНА.....	49
3.4.1 Архітектура програмного забезпечення РНА-станції.....	49
3.4.2 Структура програми UR5 для РНА-циклу.....	50
3.4.3 Логіка ПЛК та обмін сигналами з UR5.....	51
3.4.4 Машина станів РНА-циклу	52
3.4.5 Обробка помилок і безпекові сценарії	53

3.5 Компонування роботизованої РНА-клітинки та організація робочого простору	54
3.5.1 Вихідні дані для компонування	55
3.5.2 Зонування робочого простору РНА-клітинки.....	55
3.5.3 Розміщення бази UR5 та робочого стола РНА.....	56
3.5.4 Траєкторії руху та уникнення колізій	57
3.5.5 Організація буферів і логістика касет	58
3.5.6 Вимоги до безпеки та колаборативної взаємодії	59
3.5.7 Узагальнення щодо компонування РНА-клітинки.....	60
4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	61
5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	69
5.1 Опис програмного забезпечення PolyScore	69
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	75
6.1 Організація охорони праці при роботі з системою управління	75
6.2 Електробезпека	77
6.3 Розрахунок заземлення	80
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	84
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	86

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку промислового виробництва визначають автоматизацію та роботизацію як ключові чинники підвищення продуктивності, якості та гнучкості технологічних процесів. Особливо це стосується електронної промисловості, де складання дрібних контактних елементів, зокрема роз'ємів типу PIN Header, вимагає високої точності позиціювання, стабільності рухів та мінімізації впливу людського чинника. Зростання обсягів серійного виробництва та підвищення вимог до надійності готових електромеханічних компонентів формують потребу у впровадженні сучасних автоматизованих систем керування, здатних забезпечити відтворюваність процесу та адаптацію до змінних умов.

Використання роботизованих маніпуляторів, зокрема універсального промислового робота UR5, відкриває можливості для формування високопродуктивних та компактних автоматичних робочих станцій. UR5 завдяки своїй конструкційній гнучкості, високій повторюваності руху й можливості програмної адаптації до складних траєкторій є оптимальним рішенням для автоматизації операцій складання контактних роз'ємів. Проте ефективність його застосування значною мірою залежить від розробки оптимізованих алгоритмів керування, правильного вибору швидкісних параметрів та опрацювання логіки послідовності дій.

Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю підвищення продуктивності складання PIN Header, зниження часу технологічного циклу та збільшення пропускної здатності виробничих ліній. Ефективна автоматизована система керування дозволяє мінімізувати відхилення, скоротити кількість помилок позиціювання та зменшити витрати на ручну працю. Разом із тим, постає завдання пошуку балансу між швидкістю рухів UR5 і забезпеченням високої точності виконання операцій, що потребує проведення експериментального аналізу та моделювання.

Метою роботи є розроблення, налаштування та експериментальне дослідження автоматизованої системи керування процесом складання контактного роз'єму PIN Header із використанням UR5, оцінка параметрів часу окремих операцій, тривалості циклу та пропускної здатності, а також визначення оптимальних режимів роботи роботизованої системи. Отримані результати сприятимуть підвищенню ефективності виробничих процесів та впровадженню сучасних роботизованих рішень у промисловість.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Опис виробництва, та постановка задачі.

Складання передбачає виробничий процес, під час якого вироби або вузли, що складаються з різних компонентів, збираються у певній послідовності етапів. Цей процес зазвичай відбувається на взаємопов'язаних робочих станціях, причому виріб переміщується між станціями з постійною швидкістю, відомою як такт. Системи складання можна класифікувати на ручні, автоматизовані та гібридні. Автоматизовані системи використовують машини та автоматизовану обробку матеріалів, тоді як ручні системи покладаються на операторів-людей і часто є більш складними. Гібридні системи, що поєднують елементи обох типів, стають все більш важливими для управління відхиленнями. Система складання зазвичай складається з робочих станцій, систем транспортування матеріалів (MHS), пристроїв для обробки деталей та механізмів подачі деталей. Ця структура може бути ручною, автоматичною або гібридною. З урахуванням тенденції до більшої індивідуалізації та модульності продукції гібридні складальні лінії стають все більш актуальними для задоволення вимог виробництва, орієнтованого на клієнта. Вирішення цих завдань за допомогою повної автоматизації може бути фінансово та технічно складним, часто вимагаючи значних інвестицій та спеціалізованих знань. У випадках, коли автоматизація є особливо складною для впровадження, інвестиції в удосконалення ручної складальної станції залишаються прийнятною альтернативою.

Необхідність інтеграції значної кількості датчиків на материнській платі зумовлює потребу в компактному розміщенні елементів, що спрощує комунікацію між ними та підведення живлення. Для цього застосовують штирьові роз'єми, Pin Header (PH), з'єднання. Як видно з рисунка 1, конструкція передбачає чотири отвори у верхній частині та п'ять — у нижній. Штирьові роз'єми монтуються на датчик шляхом виконання процесу

Pin Header Assembly (РНА) і надалі припаюються у відповідних посадкових місцях для формування жорсткого та надійного електромеханічного контакту. На даний момент цей процес здійснюється вручну, що є трудомістким, часовитратним і підвищує ймовірність помилок, здатних негативно впливати на якість і надійність готових виробів. У зв'язку з цим усунення проблем, притаманних ручному виконанню РНА, набуває ключового значення та визначає мотивацію дослідження, спрямованого на пошук і оцінювання можливих рішень. Серед таких рішень автоматизація процесу РНА розглядається як найбільш перспективний напрям, оскільки здатна зменшити вплив людського фактора, підвищити продуктивність і стабілізувати показники якості продукції.

Окрім операційних труднощів, зумовлених ручним опрацюванням зазначених компонентів, суттєвим обмеженням є зниження масштабованості виробництва. Наразі штирьові роз'єми збираються вручну лише для одного замовника, що стримує можливість підприємства забезпечувати аналогічними рішеннями ширше коло споживачів і, відповідно, обмежує потенціал зростання доходів.

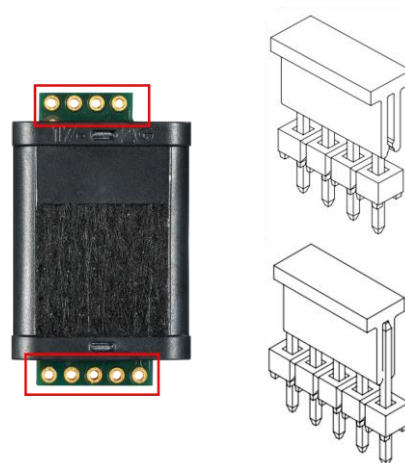


Рисунок 1: Датчик вуглекислого газу та його штирьові роз'єми.

Отже, основною метою цього дипломного проекту було з'ясувати доцільність автоматизації відповідного процесу та визначити рівень і характер її потенційних переваг.

1.2 Виробничі системи в автоматизованому виробництві.

Важливо відзначити, що участь людини залишається центральною у складальних операціях, навіть попри прогрес у цій галузі. Виробники впроваджують нові технології та обладнання, щоб підвищити свою здатність реагувати на коливання та мінливість потреб. Ключовим фактором цієї зміни є акцент на гнучкості та адаптивності в процесах прийняття рішень, що підвищує загальну оперативність системи. Це досягається шляхом інтеграції гнучкого обладнання в різних сферах роботи складального заводу, включаючи виробництво кузовів, фарбувальний цех та кінцеве складання. На складальних лініях з високою різноманітністю та низьким обсягом виробництва (HMLV) наявність операторів-людей є необхідною через потребу в гнучкості та адаптивності при роботі з різноманітним асортиментом продукції. У процесі переходу до автоматизації інтеграція технологій змішаної реальності (MR) забезпечує покращене керівництво для операторів складальних ліній, надаючи розширені графічні інструкції, що перевершують традиційні формати. Ця технологія ефективно допомагає операторам точно виконувати складальні завдання, хоча її поточні обмеження, включаючи обмеження поля зору та втому користувачів, свідчать про те, що апаратне забезпечення MR ще має вдосконалюватися, перш ніж стати стандартом у промисловому керуванні складанням. Крім того, технології віртуальної реальності (VR) пропонують імпульсивні симульовані середовища, надаючи користувачам інтерактивні та інтуїтивні навчальні можливості. Оператори, які розпочали навчання з VR, повідомили про значне поліпшення в освоєнні навичок роботи з фізичними маніпуляторами. Це дослідження також виявило, що VR є більш ефективним і простішим для

навчання початківців-операторів у порівнянні з традиційними методами, що передбачають використання фізичних маніпуляторів

Операції складання можуть виконуватися вручну, автоматично або інтегровані певним чином за допомогою комбінації систем. Якщо використовується ручне складання, оператор може адаптуватися до мінливих умов, таких як різноманітність деталей, неправильне розташування та асортимент моделей продукції. Оператор може компенсувати ці умови, що змінюються, і, як результат, може не потребувати складних інструментів та пристосувань для виконання завдань складання. Однак помилки оператора можуть призвести до проблем з якістю. Більшість підприємств автоматизують виробництво в першу чергу, для зниження витрат і, таким чином, поліпшення своєї конкурентоспроможності на ринку. Однак справжня мета цих інвестицій — не тільки економія коштів, а й отримання прибутку. У порівнянні з ручним складанням, переваги автоматизованого складання зазвичай включають зниження собівартості одиниці продукції, стабільно високу якість, усунення небезпечних ручних операцій і збільшення резервних виробничих потужностей.

У традиційних підходах ефективність інвестицій в автоматизацію переважно пов'язували зі зниженням прямих витрат на матеріали та робочу силу, а також із підвищенням коефіцієнта використання обладнання. Саме тому автоматизація ручних операцій зазвичай розглядається як первинний етап послідовної автоматизації виробничих процесів підприємства, оскільки економічний ефект від заміщення трудових витрат є чітко спостережуваним і вимірюваним. Водночас додаткові вигоди формуються у сфері внутрішньозаводської логістики: за умов застосування концепцій «у визначений термін», мінімізації запасів, безперервного потоку та планування потреб у матеріалах (MRP) автоматизація або усунення операцій з обробки матеріалів забезпечують стабільний, надійний і економічно доцільний рух ресурсів між виробничими ділянками. Дослідження також засвідчують

наявність прихованого ефекту, коли підвищення виробничої результативності після автоматизації трансформується у зростання загальної економічної ефективності підприємства. Разом із тим упровадження автоматизованих систем супроводжується низкою суттєвих обмежень: необхідністю синхронізації роботизованих засобів із безперервними конвеєрними лініями, забезпеченням гнучкості щодо варіативності продукції та адаптації рішень до специфічних потреб різних сегментів галузі. Додаткову складність становить створення та інтеграція цифрових двійників, що потребують високої точності, функціонування в режимі реального часу й коректного узгодження фізичних та віртуальних моделей у складних виробничих середовищах. Окрім цього, автоматизація часто вимагає значних капітальних вкладень, а її ефективність безпосередньо залежить від досягнення заданих показників надійності та продуктивності системи.

1.3 Система «Співпраця людини і робота»

Ручне виробництво спричиняє значне фізичне навантаження на працівників, що призводить до розладів опорно-рухового апарату (MSD) та високого рівня захворюваності, що, в свою чергу, викликає часті простої виробництва. Просто покладатися на програмування нових траєкторій або оснащення маніпуляторів новим інструментом недостатньо для роботи в динамічному виробничому середовищі. Необхідне подальше вдосконалення робототехнічних систем, щоб продемонструвати більше якостей людських операторів. Щоб вирішити ці проблеми, європейська робототехнічна промисловість рухається в напрямку гібридних, гнучких виробничих систем для підвищення економічної ефективності та відновлення конкурентоспроможності виробничого сектору. Останні тенденції досліджень в ЄС підтримують застосування співпраці людини і робота (HRC), де заводи використовують сильні сторони операторів-людей і роботів-помічників. Ця нова виробнича парадигма створює технічні виклики,

включаючи забезпечення безпеки в спільних робочих приміщеннях, розробку зручного для користувачів програмного забезпечення для роботів для неекспертів, створення інтуїтивних інтерфейсів людина-робот та впровадження масштабованих механізмів моніторингу та контролю, які інтегрують операторів-людей у цикл виконання.

Співпраця людини і робота (HRC) — це галузь, що вивчає, як люди і роботи працюють разом для досягнення спільної мети. Хоча роботи вже використовуються в промисловості, питання безпеки та прийнятності обмежують їхній розвиток. Безпека є головним питанням, і для безпеки працівників часто потрібні такі пристрої, як сталеві огорожі та лазерні завіси. Додавання нових роботів вимагає переосмислення взаємодії між людьми та роботами та перепроєктування робочих приміщень, що створює нові проблеми безпеки. Безпека є критично важливою, оскільки промислові роботи можуть бути небезпечними, що призводить до їх утримання в безпечних клітках, що заважає справжній співпраці. Ефективна співпраця вимагає взаєморозуміння та здатності передбачати дії один одного. Люди природно добре справляються з цим у взаємодії з іншими людьми, але незрозуміло, чи те саме стосується взаємодії з роботами. Дії людей є передбачуваними через природні обмеження рухів, але роботи не мають таких обмежень і можуть рухатися більш складними способами. Передбачувані дії роботів є критично важливими для ефективної співпраці, особливо в умовах стресу або втоми. Потрібні додаткові дослідження, щоб зрозуміти, як зовнішній вигляд і моделі руху роботів впливають на тонкі показники ефективності користувачів, такі як точність рухів і дані про погляд очей. Інтеграція віртуальної реальності (VR) в ці дослідження може покращити вивчення цих факторів, надаючи контрольоване середовище для детального аналізу. Гнучкість VR дозволяє досліджувати когнітивні аспекти, такі як відчуття присутності та покладання провини в разі помилок. На рис. 2 показано рівні співпраці людини і робота відповідно до міжнародної

федерації робототехніки (IFR). Переходячи від рівня 1 до 5, для ефективної співпраці необхідно використовувати передові технології, при цьому безпека стає все більш важливою. Цей рисунок ілюструє прогрес і важливість досягнення вищих рівнів співпраці в більш широких рамках колаборативної робототехніки для підвищення ефективності та безпеки у виробничих середовищах

Рівень співпраці	1 Комірка	2 Співіснування	3 Послідовна співпраця	4 Кооперація	5 Активна співпраця
моги до вбудованих функцій безпеки порівняно із зовнішніми датчиками	Робот в огороженій зоні	Без огорожі, але без спільного робочого простору	Робот і працівник активні в одному робочому просторі, але їхні рухи відбуваються послідовно	Робот і працівник одночасно працюють над однією деталлю, обидва перебувають у русі	Робот у реальному часі реагує на рухи оператора.

Рисунок 2. Рівні співпраці між людиною і роботом

1.4 Виробничі системи в автоматизованому виробництві.

У сучасних промислових умовах вибір виробничої системи є не лише технічним, а й стратегічним рішенням: він визначає, як відбувається рух матеріалів, як регулюється незавершене виробництво (WIP), як планується використання ресурсів і наскільки надійно можна задовольнити вимоги клієнтів в умовах невизначеності та змін. На цьому тлі розділ зосереджується на двох фундаментальних парадигмах — виробництві за попитом та серійному виробництві — перед тим, як розглянути їх практичну інтеграцію в гібридні конфігурації, які стають все більш типовими в реальних заводах.

Система виробництва за принципом «pull» історично пов'язана з Toyota Production System і ранніми внесками Таїчі Оно, який стверджував, що виробництво повинно бути обумовлене фактичним попитом, а не прогнозованими очікуваннями. У концептуальному плані контроль за принципом «pull» є протилежним традиційній логіці «push»: замість того, щоб випускати продукцію відповідно до прогнозованих потреб, кожен наступний етап вимагає саме те, що йому потрібно від попередніх процесів,

тим самим узгоджуючи обсяг виробництва з безпосереднім споживанням. У Toyota Way «Pull» втілює ідеальний стан виробництва «точно в строк», що означає, що клієнти (як зовнішні покупці, так і внутрішні етапи процесу) отримують необхідний продукт у необхідний час і в необхідній кількості. Теоретичною межею pull є потік з однією деталлю, де кожне замовлення виробляє одну одиницю, яка без затримок безперервно рухається по системі. Така конфігурація мінімізує запаси, швидко виявляє проблеми в процесі та скорочує загальний час виконання замовлення. Однак реальне виробництво неминуче містить розриви, такі як переналагодження обладнання, пункти перевірки, етапи транспортування та буферизація, необхідна для нерівномірних темпів процесу, тому повністю беззапасна система рідко є досяжною. Натомість системи «pull» навмисно управляють запасами, розглядаючи незавершене виробництво як контрольований ресурс, що стабілізує потік, а не як небажаний побічний продукт.

Важливо, що логіка «pull» не виключає партійне виробництво. Навпаки, система «pull» може поєднуватися з партійним виробництвом шляхом структурування попиту на повторювані партії та приведення попередніх етапів виробництва у відповідність до потреб наступних етапів. Коли поставки та виробництво організовані партіями, які випускаються тільки у відповідь на сигнали споживання, можна мінімізувати непотрібний час очікування та надмірно довгі цикли, що зменшує як прямі, так і непрямі витрати. У такій комбінації «pull-batch» ключовим завданням менеджменту є визначення розмірів партій та частоти випуску, які зберігають контроль, орієнтований на попит, і водночас дозволяють використовувати економію масштабу в операціях, що вимагають значних витрат на налагодження. Це створює проблему планування, в якій «найкращою» конфігурацією є та, яка спільно оптимізує склад партії та розподіл персоналу або ресурсів, забезпечуючи високий рівень використання без створення надлишкових запасів. Таким чином, виробництво за принципом «pull» слід розуміти не

стільки як жорсткий набір правил, скільки як принцип координації, чутливий до попиту, який може бути реалізований у різних технічних формах

На відміну від цього, системи серійного виробництва, в першу чергу, мотивовані необхідністю враховувати різноманітність продукції та коливання обсягів, зберігаючи при цьому конкурентоспроможність за витратами. Зростаючі очікування споживачів щодо диференціації та скорочення життєвого циклу продукції, а також посилення конкуренції зробили гнучкість та інновації основними вимогами виробничої стратегії. Системи серійного виробництва відповідають цим вимогам, дозволяючи виробляти різні типи продукції на спільному обладнанні, що забезпечує високу гнучкість ресурсів, але також створює конкуренцію за обмежені потужності. В результаті продукція фактично конкурує за обладнання, інструменти та робочу силу, що робить короткострокове планування критично важливим для підтримки продуктивності та дотримання термінів поставки [26]. Компанії, що працюють в умовах серійного виробництва, повинні одночасно поставляти різноманітний асортимент продукції та управляти варіаціями розміру, асортименту та послідовності замовлень, що є викликом, який відповідає парадигмі масової кастомізації [27]. Досягнення цього балансу зазвичай вимагає додаткових стратегій у дизайні продукції та процесів, таких як модульна архітектура продукції, стандартизовані інтерфейси, практики швидкої переналагодження та координація поставок з швидким реагуванням, які спрямовані на зменшення втрат від переходу між варіантами продукції.

З точки зору управління операціями, серійне виробництво є особливо ефективним для досягнення прагматичного компромісу між економічною ефективністю та гнучкістю. Виробляючи певну кількість продуктів одного сімейства, організації можуть амортизувати витрати на налагодження та стабілізувати якість, зберігаючи при цьому можливість коригувати розміри партій або послідовність у міру зміни потреб ринку [28]. Проте серійні

системи також несуть в собі певні ризики: великі партії можуть збільшити час виконання замовлення та витрати на зберігання, тоді як малі партії можуть підвищити частоту налагодження та знизити використання виробничих потужностей. Отже, серійне виробництво не є по суті «ефективним» або «неефективним» — його ефективність залежить від того, як на практиці управляються розміри партій, правила планування та мінливість попиту [26–28]. Концептуальний зв'язок між розміром партії та ключовими показниками ефективності (витрати на налагодження на одиницю, час виконання замовлення, незавершене виробництво) проілюстровано на рис. 3.

Концептуальний компроміс у партійному виробництві

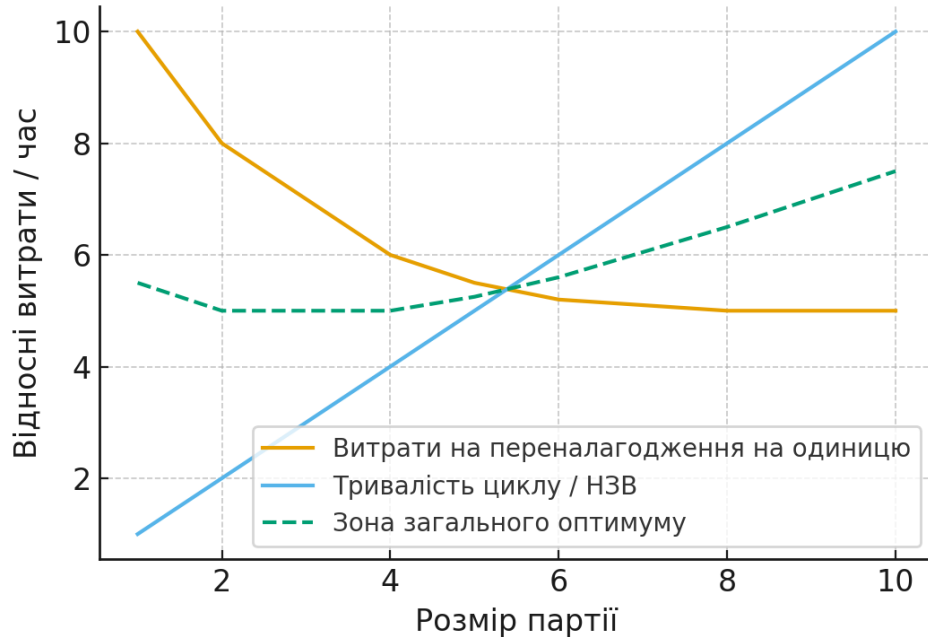


Рисунок 3. Концептуальна залежність між розміром партії та показниками ефективності у batch-виробництві.

У промисловій реалії ці дві парадигми часто зливаються в гібридні системи, розроблені для використання переваг обох. Типова гібридна конфігурація зберігає контроль на основі попиту на рівні системи, що означає, що виробництво починається тільки після отримання реального замовлення від клієнта або підтвердженої вимоги від нижчих ланок, а фізичні

етапи виробництва виконуються партіями для підвищення операційної ефективності. За такої організації сигнали попиту запобігають надвиробництву та надмірним запасам, забезпечуючи використання ресурсів відповідно до фактичних потреб. Після підтвердження замовлення одиниці продукції групуються в партії, щоб подібні завдання (наприклад, складання, калібрування, перевірка або пакування) могли виконуватися послідовно. Це зменшує втрати на налагодження, спрощує обробку матеріалів, сприяє стабільній якості результатів та покращує передбачуваність тривалості циклів. Фактично, логіка «pull» визначає, коли має відбуватися виробництво і скільки має бути вироблено, тоді як «batching» визначає, як робота виконується найефективніше на рівні процесу.

Загалом, розглянуті виробничі системи підкреслюють центральну тему: сучасна ефективність виробництва залежить від узгодження реагування на попит з операційною ефективністю. Системи «pull» наголошують на потоці, синхронізації та зменшенні відходів; системи «batch» наголошують на гнучкості та спільному використанні ресурсів; а гібридні системи намагаються поєднати ці пріоритети в єдиній операційній моделі. Розуміння цих логік є важливим для оцінки рішень щодо автоматизації, оскільки переваги автоматизації, такі як покращення пропускну здатності, зменшення мінливості та підвищення стабільності якості, реалізуються по-різному залежно від того, чи виробництво організовано за суворим принципом «pull», «batch» або їх інтеграцією.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Ефективність процесу складання контактного роз'єму PIN Header значною мірою залежить від глибокого розуміння реальних виробничих умов, чинників варіативності та параметрів, що визначають стабільність технологічного циклу. Перед розробленням автоматизованої системи керування важливо отримати об'єктивну картину поточного стану процесу, ідентифікувати послідовність операцій, характерні відхилення, неявні втрати часу та особливості взаємодії між обладнанням, матеріалами та оператором. Такий підхід дозволяє не лише виявити технологічні обмеження, але й визначити елементи, які потребують автоматизації першочергово.

Збір достовірних даних, включно з хронометражем, аналізом просторових потоків і характеристик компонентів, створює підґрунтя для формування реалістичної моделі виробничого циклу. Додатково враховуються фактори нестабільності, пов'язані з людським виконанням операцій, фізичними властивостями контактів та точністю позиціонування. Узагальнення цих характеристик дає змогу виділити ключові параметри, що визначають продуктивність, передбачуваність і якість складання.

Отримані результати слугують основою для переходу до моделювання автоматизованої системи керування, у межах якої формуються алгоритми взаємодії механізмів, умови логічних переходів та базові вимоги до сенсорики й виконавчих модулів. Така передумова забезпечує цілісність подальших досліджень та обґрунтовує необхідність їх поетапного розгортання.

2.1 Аналіз та контроль виробничих процесів

Для результативного усунення проблем і раціоналізації виробничих процедур принципово важливим є безпосереднє спостереження за процесами та верифікація фактичних даних, а не опора лише на теоретичні припущення, вторинні джерела чи інформацію з цифрових інтерфейсів. Відповідно,

управлінські рішення та комунікація мають ґрунтуватися на даних, підтверджених «з першоджерела» у реальних виробничих умовах [24]. Початковий етап виконання дослідження був спрямований на формування цілісного уявлення про проблему шляхом ознайомлення з виробничими дільницями та детального обходу складальної лінії з фіксацією перебігу операцій. Такий підхід дав змогу отримати загальний огляд технологічних маршрутів, послідовності операцій і взаємодії персоналу ще до переходу до основного завдання роботи. Спостереження за виробничим потоком у поєднанні з консультаціями з працівниками та інженерно-технічним персоналом забезпечили комплексне розуміння «життєвого шляху» виробу — від надходження сировини до отримання готової продукції.

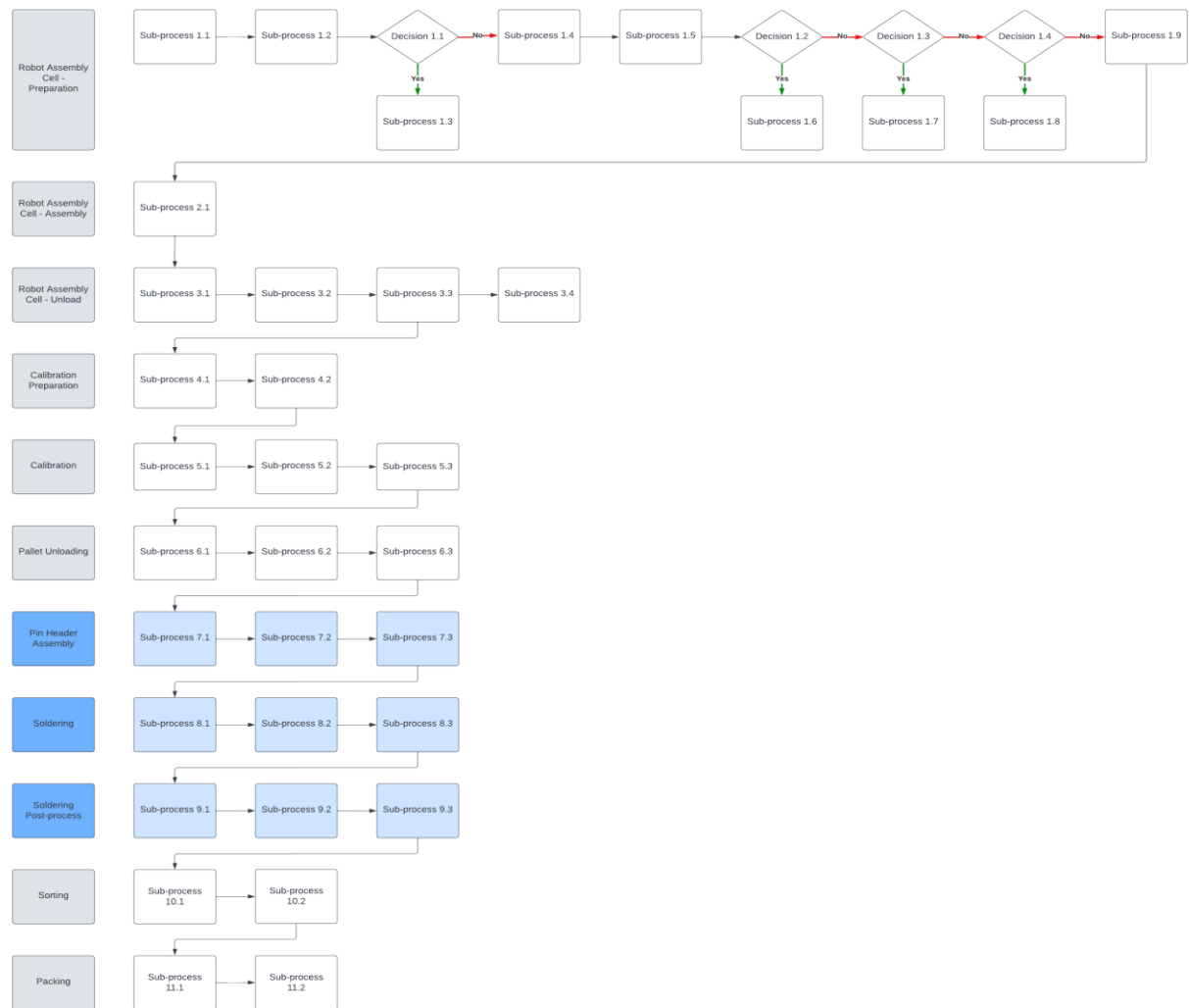


Рисунок 2.1. Блок-схема процесу ручної збірки РН.

На основі зібраних даних було сформовано блок-схему процесів (рис. 2.1–2.2), що дозволило згрупувати операції, уніфікувати їхні найменування та ідентифікаційні коди й тим самим створити спільну термінологічну основу для подальшого аналізу. Далі, спираючись на схему поточного (ручного) виконання процесу складання штирьових роз'ємів, було побудовано карту потоку створення цінності (Value Stream Map, VSM) стану «as-is» з метою візуалізації матеріальних і інформаційних потоків, обсягів незавершеного виробництва, а також показників тактового й циклового часу та загальної тривалості виробничого проходження. Паралельно з VSM розроблено планування виробничої ділянки, яке слугувало інструментом для наочного відображення внутрішньозаводської логістики та просторових/фізичних бар'єрів між процесами; отримані результати використано для ідентифікації вузьких місць і уточнення напрямів подальших удосконалень.

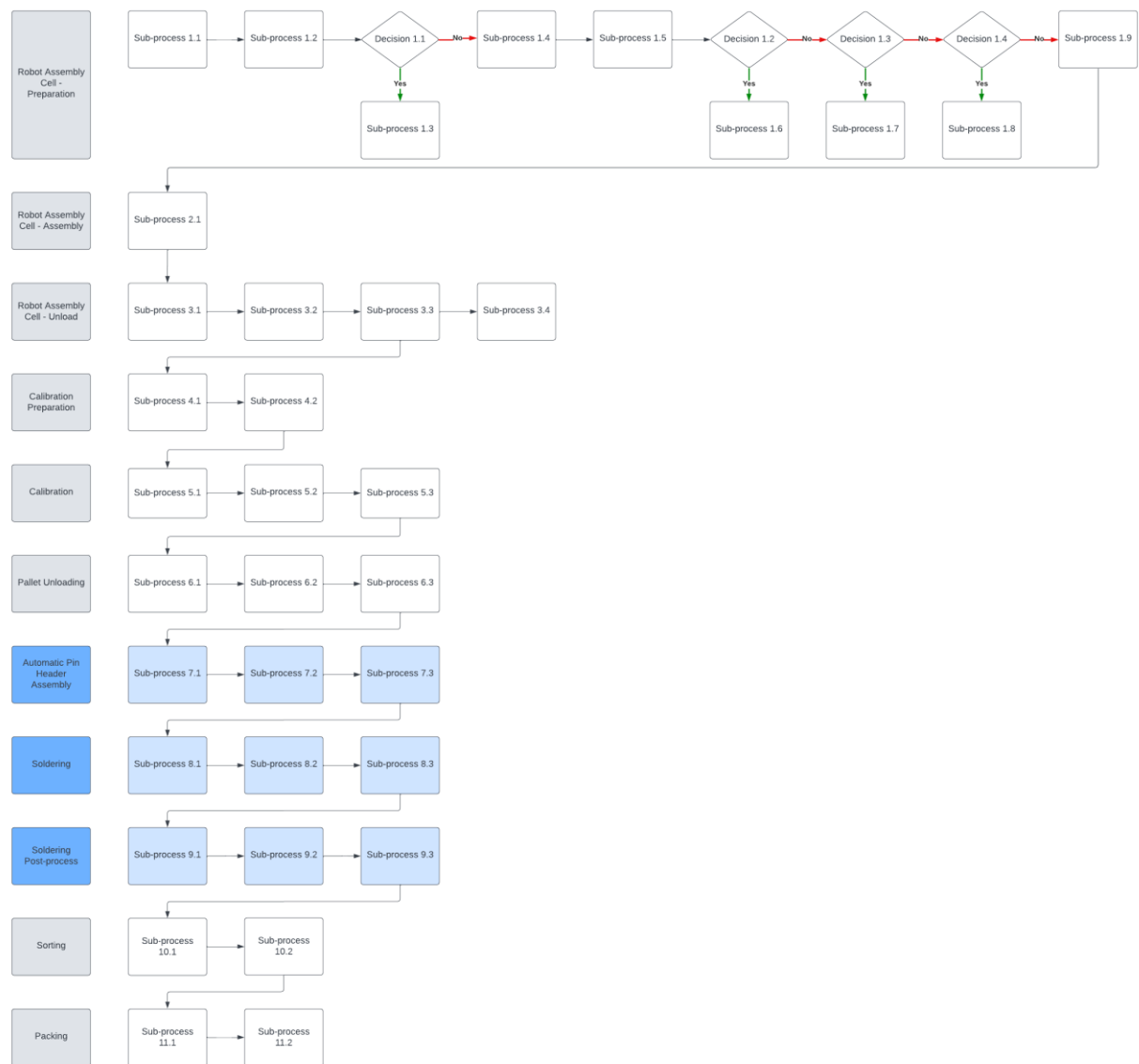


Рисунок 2.2. Блок-схема процесу автоматизованої збірки РН.

2.2 Організація збору даних і побудова бази

Для формування повної бази даних було створено електронну таблицю, призначену для систематизації параметрів виробничого циклу. Водночас відсутність верифікованих фактичних тривалостей окремих операцій зумовила потребу у проведенні хронометражного дослідження, що забезпечило необхідну точність подальшого аналізу. Збір даних здійснювався безпосередньо у виробничому середовищі шляхом послідовного відстеження проходження продукту від надходження сировини до отримання готового виробу. На кожному етапі тривалість операцій вимірювалася багаторазово,

що дало змогу знизити випадкову похибку та підвищити надійність результаті. Під час хронометражу враховувалися не лише основні технологічні дії, а й підготовчо-завершальні та супровідні операції, зокрема налаштування робочого місця, поповнення матеріалів, переміщення між постами, а також можливі повторні виконання у разі невдалого результату. Такий підхід дозволив зберегти відповідність вимірювань реальному робочому потоку, включно з потенційним паралельним або комбінованим виконанням окремих дій. Після проходження повного маршруту було додатково ідентифіковано процеси, що не належать до досліджуваного варіанта виробу, однак є елементами загального виробничого циклу. Для забезпечення повноти та репрезентативності даних зазначені операції також були включені до програми вимірювань. Загалом застосована методика поєднувала багаторазові прямі вимірювання з урахуванням допоміжних чинників та частоти повторів, визначеної на основі спостережень, що забезпечило реалістичність і достовірність отриманих часових характеристик процесів.

Вищезазначена база даних Excel була створена для об'єднання цінних даних для порівняння, включаючи деталі процесів, групування, пункти, інформацію про продукти та часові показники. Основними ключовими показниками ефективності, які використовувалися для цього аналізу, були собівартість одиниці продукції, пропускна здатність, час на 1 одиницю, час циклу.

- Одинична вартість поєднує змінні та фіксовані витрати для визначення загальної вартості виробництва однієї одиниці. Це допомагає зрозуміти загальну економічну ефективність виробничого процесу.

- Пропускна здатність визначається як швидкість, з якою система генерує кошти за рахунок продажів, і вимірює максимальну продуктивність, яку може досягти станція, відображаючи динамічну потужність та ефективність кожної ділянки виробничої лінії.

- Час на 1 одиницю показує, як швидко ділянка може завершити виробництво однієї одиниці. Це допомагає оцінити швидкість роботи окремих ділянок.
- Час циклу відображає загальний темп виробництва, показуючи, як швидко продукція проходить весь виробничий процес. Це має вирішальне значення для розуміння потоку та термінів роботи всієї виробничої лінії.

2.3 Аналіз технологічних варіацій і впливу чинників на стабільність складання

Після завершення збору та первинної обробки часових характеристик операцій було проведено поглиблений аналіз технологічних варіацій, який дав змогу детально оцінити вплив окремих чинників на стабільність і передбачуваність процесу складання контактних роз'ємів PIN Header. Метою цього етапу було визначення параметрів, що можуть бути використані як контрольовані змінні в автоматизованій системі керування, а також встановлення потенційних джерел нестабільності, які необхідно усунути або компенсувати в керуючих алгоритмах.

Першочергово було проаналізовано розкид тривалостей виконання ключових операцій: встановлення корпусу роз'єму, позиціонування контактів, фіксація елементів, перевірка механічної цілісності та візуальний контроль відповідності. У ручному процесі, який передуює автоматизації, було виявлено значну варіабельність часу, пов'язану з індивідуальними особливостями оператора: швидкістю моторики, особистим досвідом, рівнем втоми та ступенем повторюваності операцій. Аналіз показав, що відхилення у межах 15–25 % від середнього значення для деяких операцій є типовим, а для більш складних дій можуть досягати до 40 %, що суттєво впливає на загальний час циклу та рівномірність потоку.

Окрім людського фактора, значний вплив на стабільність процесу мають технічні параметри обладнання та фізичні характеристики

компонентів. До таких належать зміна жорсткості контактів залежно від партії сировини, мікровідхилення у геометрії пластикового корпусу, тертя елементів під час встановлення, а також коливання сили, необхідної для пресування контактів у корпус. Наявність цих варіацій було підтверджено шляхом порівняння партій різних дат постачання, що дозволило зафіксувати відмінності у зусиллях, які оператори витрачали на встановлення елементів. На практиці ці чинники часто спричиняють повторне виконання операцій, що збільшує фактичний час складання та підвищує ризик виникнення дефектів.

Особливу увагу приділено аналізу мікропереміщень — коротких додаткових рухів, які оператор виконує несвідомо для уточнення позиції компонента. Такі рухи не завжди фіксуються під час стандартного хронометражу, проте здатні накопичувати затримки, що впливають на такт виробничої лінії. Їх виявлення стало можливим завдяки детальному спостереженню з розбиттям операцій на мікроетапи. Це дало змогу виділити ключові джерела невизначеності, які необхідно компенсувати у майбутній автоматизованій системі: неточність подачі, невідповідність центрування та потребу у додатковому коригуванні положення деталі.

Аналіз також показав, що нестабільність ручних операцій суттєво впливає на пропускну здатність дільниці. У пікові моменти процес може працювати в режимі «накопичення», коли оператор не встигає обробляти елементи зі швидкістю, необхідною для підтримання рівномірного потоку, що призводить до утворення незавершеного виробництва (рис. 2.3). У свою чергу, автоматизація дозволяє уникнути цього явища за рахунок синхронізації всіх механізмів і зниження варіативності часу виконання операцій до мінімально можливого рівня.

Фактори впливу на стабільність складання PIN Header



Рисунок 2.3. Схема взаємодії чинників, що визначають стабільність складання PIN Header.

Отримані результати дали змогу визначити комплекс параметрів, які доцільно включити до архітектури системи керування. Насамперед це контроль положення та геометрії компонента, моніторинг зусиль пресування, відстеження часу зворотного переміщення механізмів, а також реєстрація помилок позиціонування, що можуть спричиняти повторні цикли. Виділення цих параметрів забезпечує можливість точного налаштування виконавчих механізмів і системи датчиків та формує основу для подальшого синтезу логіки керування автоматизованою станцією.

Таким чином, проведений розширений аналіз технологічних варіацій дав змогу отримати глибоке розуміння реальної поведінки процесу складання PIN Header, виявити ключові фактори, що впливають на його стабільність, і

підготувати основу для коректного моделювання та розроблення оптимізованої автоматизованої системи керування.

2.4 Побудова моделі автоматизованої системи керування та підготовка до оптимізації

На основі отриманих вимірювань, структурованої інформації про виробничі операції та аналізу варіабельності технологічних процесів було розпочато комплексну побудову параметричної моделі автоматизованої системи керування процесом складання контактного роз'єму PIN Header. Модель покликана відобразити реальну логіку функціонування виробничої дільниці, урахувати всі ключові зміни станів, можливі відхилення, зони ризику та точки прийняття рішень, які повинні контролюватися алгоритмами керування. Створення такої моделі виступає перехідним етапом між аналізом «поточних» (as-is) процесів і формуванням «цільових» (to-be) сценаріїв функціонування автоматизованої лінії.

Першим кроком було визначення структури основних операцій, що здійснюються у процесі складання: подача корпусу роз'єму, позиціонування корпусу, подача і орієнтація контактів, їх встановлення, контроль правильності посадки та відведення зібраної деталі. Кожна з цих операцій була представлена у вигляді окремого функціонального блоку зі своїми вхідними параметрами, обмеженнями і вихідними умовами. Для кожного блоку встановлено критичні часові характеристики, допустимі діапазони відхилення, а також типові джерела помилок, що дозволило побудувати детальну структуру для подальшого програмування ПЛК.

Особливу увагу приділено моделюванню логіки переходів між станами механізмів. У типовій ручній збірці такі переходи виконуються оператором інтуїтивно, залежно від ситуації, тоді як автоматизована система потребує чітко визначених умов для зміни стану. Наприклад, перехід від процесу подачі до процесу пресування має відбуватися лише після підтвердження

правильного позиціонування корпусу, відповідності геометрії та наявності контакту у робочому положенні. Такі умови стали основою для визначення набору сенсорів та індикаторів стану, необхідних у майбутній системі.

Наступним етапом стало моделювання взаємодії між виконавчими механізмами. Оскільки складання PIN Header вимагає синхронізації руху подаючого вузла, вузла орієнтації, механізму позиціонування та пресувального блоку, модель має враховувати усі можливі конфлікти або затримки. Зокрема, були розроблені схеми, що описують залежність між швидкістю подачі контактів та допустимими допусками їхнього входження у корпус. Ці дані мають критичне значення для налаштування приводів, добору раціональної швидкості руху та визначення оптимального тактового часу станції.

Було також враховано сценарії обробки помилок та нестандартних ситуацій. Наприклад, якщо сенсор фіксує перекіс контакту або недостатню глибину посадки, система повинна автоматично зупинити процес, подати сигнал та активувати процедуру повторної спроби або відведення деталі у зону відбракування. Для кожної такої ситуації створено відповідні блоки логіки, що значно підвищує робастність майбутньої системи керування.

Окремим елементом моделі є опис взаємодії людини з автоматизованою системою. Передбачено можливість ручного втручання в окремі етапи, наприклад, під час дозавантаження контактів, регулювання механічних вузлів чи обслуговування пресувального механізму. Для цього у моделі закладено окремі стани, що активуються після підтвердження оператором, а також умови безпечного вимкнення виконавчих механізмів.

Завершальним етапом побудови моделі стало формування інтегрованої діаграми, яка описує повний життєвий цикл процесу складання роз'єму — від моменту початку подачі корпусу до видачі готового виробу. У діаграму включено часові параметри, логічні умови, сенсорні зони, зворотні зв'язки та

алгоритмічні вузли, що дозволяє перейти до наступного етапу — оптимізації параметрів та розроблення програми керування для ПЛК.

Таким чином, побудована параметрична модель стала основою для синтезу алгоритмічної частини автоматизованої системи керування, забезпечивши повну відповідність між реальними виробничими особливостями і програмною логікою. Її використання дозволяє мінімізувати ризики помилок на етапі впровадження, підвищити точність, передбачуваність і стабільність процесу складання PIN Header, забезпечуючи підготовку до подальшої оптимізації.

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Моделювання та візуальне представлення

У конструкторській частині роботи імітаційне моделювання застосовано як інструмент перевірки та обґрунтування проєктних рішень щодо організації й автоматизації процесу складання РН роз'ємів, зокрема для кількісної оцінки очікуваного ефекту від запропонованих змін. Поряд із сформованою базою виробничих даних було розроблено базову симуляційну модель, яка забезпечила узгодженість вихідної інформації, прозорість розрахунків і можливість оперативного коригування параметрів під час конструкторського опрацювання. Модель орієнтована на визначення сумарного циклового часу виготовлення партій виробів і відтворює логіку їх проходження через послідовність робочих станцій.

Симуляція побудована за принципом дискретного моделювання виробничого потоку. Початкові умови передбачали порожню складальну лінію, тобто відсутність незавершеного виробництва на старті експерименту. Далі модель послідовно ініціює виготовлення партій і фіксує час їх проходження через усі передбачені операції, завершуючи розрахунок після отримання десяти повних партій. Такий горизонт моделювання прийнято як достатній для виявлення характерних закономірностей накопичення часу, зміни завантаження станцій і стабілізації виробничого ритму. Результатом моделювання є профіль накопиченого циклового часу для кожної партії та інтегральний показник тривалості виробничого проходження (lead time), що дає змогу порівнювати ефективність різних варіантів організації процесу.

Метою симуляції, по-перше, було отримання реалістичної оцінки lead time з урахуванням фактичної послідовності операцій і пропускної здатності робочих місць. У реальних умовах навіть незначні відмінності в продуктивності окремих станцій або в їх кількості спричиняють утворення черг, зростання незавершеного виробництва та збільшення загальної тривалості проходження партій. По-друге, модель використано для наочного

відтворення зв'язків між станціями, їхньої взаємозалежності та відношень передування, тобто технологічно допустимих і необхідних послідовностей операцій. Це є принципово важливим на етапі конструкторського проєктування, оскільки дозволяє перевірити коректність маршруту, узгодити його з можливостями обладнання та усунути логічні «розриви» у потоці. По-третє, симуляція виконувала роль порівняльного інструмента для двох сценаріїв — ручного та автоматизованого виконання процесу РНА — що забезпечило кількісне визначення потенційного скорочення lead time у разі впровадження автоматизації.

Для розрахунку тривалості виробничого проходження в модель закладено параметри, які відображають конструктивно-технологічні характеристики системи. Ключовим є кількість доступних станцій, тобто робочих місць або модулів, задіяних у виконанні операцій. Зі збільшенням кількості станцій зростає потенціал паралельної обробки, проте водночас ускладнюються синхронізація потоків і внутрішня логістика, що має враховуватися при виборі конфігурації лінії. Другий параметр — пропускна здатність кожної станції, яка визначає кількість виробів, що можуть оброблятися одночасно. У межах конструкторських рішень цей показник задається типом оснащення, можливостями інструменту, ергономікою розміщення деталей і режимами роботи обладнання. Третій параметр — доступний добовий фонд робочого часу станцій, що відображає реальні обмеження тривалості змін, регламентних перерв і підготовчо-завершальних робіт. Четвертий параметр — відношення передування між процесами, які задають технологічну послідовність операцій та забезпечують коректність моделювання маршруту проходження партії.

Оскільки основним завданням моделі була оцінка lead time як інтегрального показника динаміки потоку, симуляція навмисно має спрощений характер. Зокрема, вона не враховує ймовірність відмов процесів і рівень дефектності, що у виробничій практиці можуть спричиняти повторні

операції або зупинки лінії. Так само не моделювалися відмови обладнання, які впливають на фактичну доступність станцій, а також людський фактор у вигляді затримок, помилок і варіативності часу виконання ручних операцій. Окремо не враховано можливі втрати ефективності, пов'язані з недосконалістю оперативного-календарного планування, зміною пріоритетів замовлень або неузгодженістю внутрішніх постачань. Такі припущення відповідають меті побудови базової конструктивної моделі й забезпечують її інтерпретацію як «ідеалізованої» оцінки, де домінує вплив структури лінії та її пропускної здатності, а не випадкових збурень.

У підсумку розроблена імітаційна модель є складовою конструкторського проектування, що дозволяє:

- Перевірити логіку та узгодженість технологічного маршруту;
- Оцінити чутливість lead time до зміни кількості станцій, їх пропускної здатності та режимів роботи;
- Виконати попереднє кількісне порівняння ручного й автоматизованого варіантів процесу;
- Сформулювати обґрунтовані вимоги до конфігурації майбутньої автоматизованої ділянки.

Отримані результати слугують підґрунтям для подальшого детального конструкторського опрацювання, включно з вибором обладнання, розробленням компоновальних рішень і уточненням параметрів продуктивності системи.

На рисунку 3.1 показано фактичне планування заводу, всі розміри взято з плану робочого приміщення. На рисунку показано рух матеріалів по конвеєрній лінії. Жовті станції позначають стан виробництва, в якому робот-складальник починає роботу, а сірі станції належать до стану, в якому датчики збираються вручну. На малюнку показано рух матеріалів по конвеєрній лінії для встановлення пріоритетності процесів у моделюванні. Рух матеріалів відбувається наступним чином:

1. Складання робототехнічної комірки: Складання фізичних компонентів датчика та застосування методів з'єднання.
2. Підготовка до калібрування: Зібрані датчики встановлюються на піддони, які будуть поміщені в калібрувальні камери.
3. Калібрування: Датчики залишаються в калібрувальних камерах протягом декількох годин.
4. Постпроцес калібрування: Датчики знімаються з піддонів, скануються і поміщаються в ESD-коробки.
5. Складання штирьових роз'ємів: до датчиків додаються штирьові роз'єми, а датчики встановлюються на пристосування для паяння.
6. Вибіркове паяння: датчики паяються.
7. Візуальний огляд: процес паяння перевіряється вручну.
8. Упаковка: датчики запаковуються в пакети, а потім у коробки для доставки.

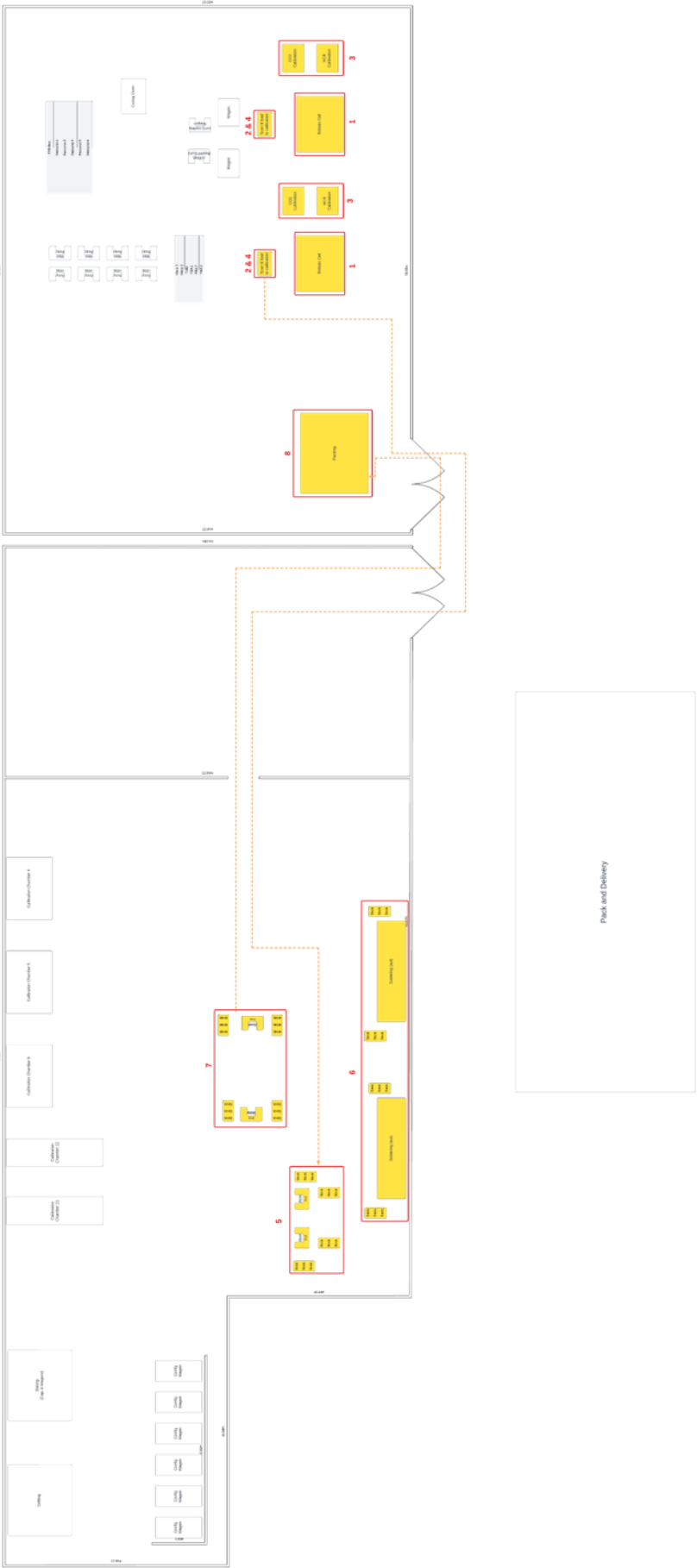


Рисунок 3.1. Потік матеріалів по конвеєрній лінії

3.2 Автоматична збірка штифтових роз'ємів

У межах конструкторської частини даної роботи нами запропоновано застосування колаборативного робота-маніпулятора UR5 для автоматизації процесу Pin Header Assembly (PHA). Вибір UR5 зумовлений тим, що на підприємстві вже наявні робототехнічні засоби цього типу, а отже, впровадження не потребує закупівлі базової роботизованої платформи та істотно спрощує інтеграцію у чинну виробничу лінію. Додатковими аргументами є колаборативна природа робота, яка дає змогу розміщувати його у спільному робочому просторі з оператором за умови дотримання вимог безпеки, та дружній до користувача інтерфейс керування, що ґрунтується на графічному програмуванні і не вимагає від персоналу глибоких знань мов програмування. UR5 належить до класу шестивісних колаборативних роботів середнього типорозміру, орієнтованих на високоточні операції складання, маніпулювання дрібними компонентами й внутрішньоцехову логістику. Конструктивно це робота-маніпулятор з 6 ступенями вільності, що забезпечують просторову орієнтацію інструмента практично у будь-якому положенні та дозволяють виконувати складні траєкторії в обмеженому робочому просторі. Для моделі UR5 характерні такі основні технічні параметри:

- номінальна вантажопідіймальність до 5 кг;
- радіус досяжності (reach) 850 мм;
- максимальна швидкість обертання суглобів до 180°/с;
- типова лінійна швидкість інструмента близько 1 м/с;
- компактний монтажний слід Ø149 мм;
- маса робота близько 18,4 кг.

Позиційна повторюваність класичної версії UR5 становить близько $\pm 0,1$ мм, що є достатнім для більшості операцій складання та точного позиціонування роз'ємів.

Зазначені характеристики забезпечують оптимальний баланс між габаритами, точністю та силовими можливостями, що є критичним для автоматизації РНА-операцій, де потрібні «акуратне» захоплення, орієнтація і встановлення дрібних штифтів та фіксаторів. У випадку використання е-серії (UR5e) технічні можливості залишаються співмірними за досяжністю та вантажопідіймальністю, але повторюваність підвищується до $\pm 0,03$ мм, маса становить близько 20,7 кг, а енергоспоживання — орієнтовно до 570 Вт (максимальне) і близько 200 Вт у типовому режимі, що додатково покращує точність і чутливість у колаборативних режимах.

Для забезпечення автоматизованого виконання РНА нами розглянуто компонування станції з багатофункціональним захватним модулем, який складається з двох окремих захватів: перший призначений для маніпулювання паяльними фіксаторами (оснасткою), другий — для захоплення та подавання штирьових роз'ємів; додатковий захват для встановлення датчиків перебуває на стадії проєктування (рис. 3.2). Логіка роботи автоматизованої станції передбачає послідовність технологічних дій, узгоджену з конструктивними можливостями UR5:

1. захват для фіксатора вилучає оснастку зі зберігальної касети та точним переміщенням установлює її на робочу позицію;
2. захват для штирьових роз'ємів здійснює їх подавання та позиціонування над контактними зонами датчика з подальшим укладанням у монтажні отвори;
3. після завершення циклу оснастка повертається у касету зберігання.

Таке компонування дозволяє перевести основні операції РНА у роботизований режим, мінімізуючи вплив людського фактора на точність позиціонування та повторюваність процесу. За відсутності захвата для датчиків на поточному етапі передбачається часткова участь оператора, який здійснює встановлення датчиків у фіксатор перед початком циклу. Водночас, навіть у цій конфігурації забезпечуються суттєві організаційні переваги: робот бере

на себе найбільш трудомісткі та точні операції подавання й встановлення роз'ємів, тоді як оператор виконує лише підготовчо-завантажувальні дії.

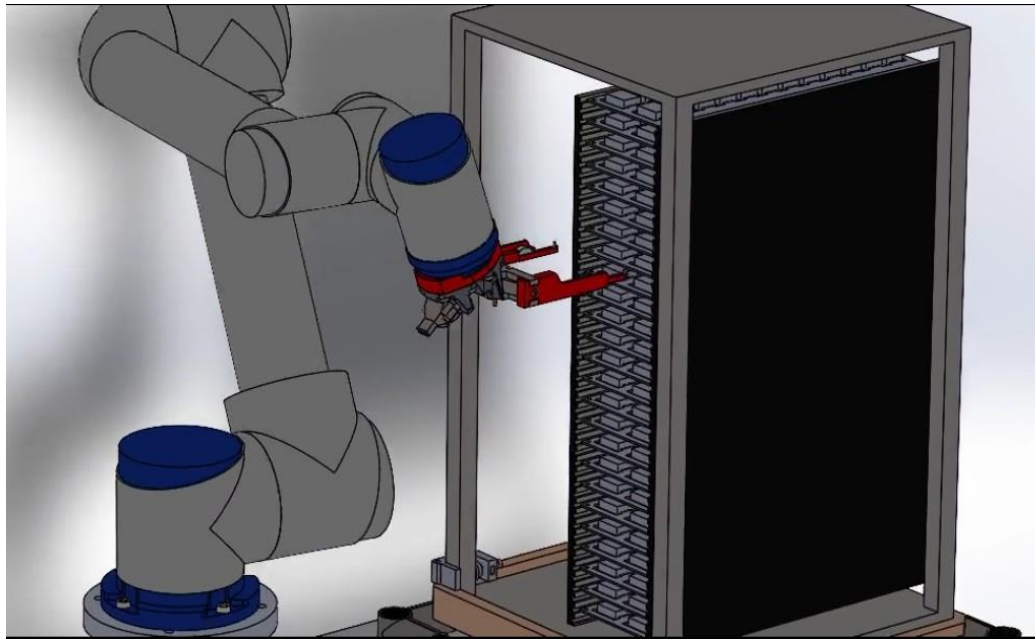


Рисунок 3.2: Багатофункціональний захват — один захват для роботи з пристосуваннями для паяння та один захват для роботи з штирьовими роз'ємами

Для підвищення автономності й тривалості безперервної роботи станції передбачається розміщення в межах робочого простору робота декількох касет з оснасткою, роз'ємами та заготовками. Завдяки цьому робот може працювати упродовж тривалих інтервалів без втручання людини, зокрема в нічний час, за умови попереднього завантаження достатньої кількості касет. В організаційному аспекті така схема відповідає середньому рівню людино-роботної співпраці: оператор підводить касети із заготовками та відводить касети з готовими виробами, тоді як робот паралельно виконує цикл складання. Отже, продуктивність системи в режимі 24/7 визначається переважно ритмічністю поповнення касет і коректним налаштуванням маршрутів подавання, а не обмеженнями ручної праці.

Узагальнюючи, запропоноване використання UR5 у поєднанні зі спеціалізованими двоканальними захватами формує конструктивну основу автоматизованої РНА-станції, що забезпечує:

- стабільне та повторюване позиціонування штирьових роз'ємів;
- скорочення циклового часу завдяки роботизованому виконанню ключових операцій;
- зниження ймовірності монтажних помилок і підвищення якості з'єднань;
- можливість тривалої автономної роботи при мінімальному залученні оператора.

Це створює передумови для подальшого розвитку рішення — зокрема, інтеграції третього захвата для повного замикання циклу без участі людини та переходу до високого рівня колаборації й масштабованості виробництва.

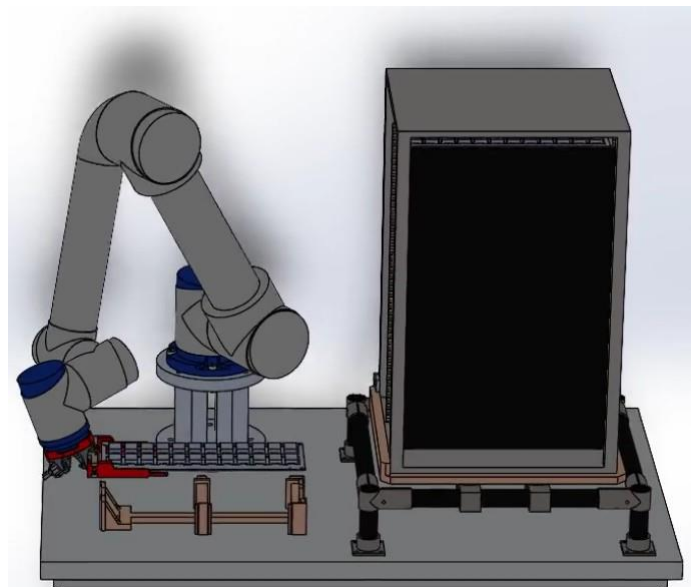


Рисунок 3.3 Захват, що утримує кріплення та розміщує його на робочій станції

Компонування РНА-клітинки та організація робочого простору:

Рациональне компонування РНА-клітинки визначає досяжність усіх зон обслуговування, безпечність колаборативної взаємодії та мінімізацію

непотрібних переміщень. База UR5 встановлюється так, щоб робочий радіус перекривав:

- 1) позицію робочої станції РНА (стіл/пост із фіксатором, місцем пайки та/або оптичного контролю);
- 2) зону зберігання касет із фіксаторами;
- 3) зону зберігання касет із штирьовими роз'ємами;
- 4) буферну ділянку для касет із заготовками/готовими виробами;
- 5) сервісну «зону оператора» для підведення/відведення касет і контролю процесу.

Під час компонування слід забезпечити прямолінійні або плавні траєкторії підходу робота до кожної касети й до осі фіксатора, уникати вимушених обхідних рухів, а також закладати простір для можливого подальшого розширення — наприклад, для третього захвата під маніпулювання самим датчиком. Для підвищення автономності доцільне розміщення кількох касет одного типу в робочому об'ємі робота, що дозволяє виконувати цикли впродовж тривалого часу без втручання людини.

Початкове налаштування UR5 перед запуском РНА-циклу:

Перед введенням робота в експлуатацію у складі РНА-станції здійснюється комплекс початкових налаштувань:

- 1) механічне позиціювання бази й перевірка жорсткості монтажу;
- 2) під'єднання робота до системи живлення та керування;
- 3) налаштування робочих координат і нульових положень;
- 4) задання інструментального центру (ТСР) для кожного захвата/режиму;
- 5) калібрування робочих зон і контрольних точок;
- 6) конфігурування параметрів колаборативної безпеки (обмеження швидкості, сили, робочих ділянок).

Нульове положення й базові обмеження рухів перевіряються шляхом контрольного прогону по крайніх значеннях суглобів у безпечному

середовищі без оснастки. Далі задаються робочі координатні системи: «База робота», «Станція РНА», «Касети/буфери». Кожна зона фіксується як окрема робоча площа або система координат, що дозволяє будувати траєкторії незалежно від незначних зміщень у компонованні.

Точне визначення ТСР є ключовим етапом, що забезпечує повторюваність укладання штифтів. Для багатозахватного інструмента ТСР визначається окремо для кожного активного захвата або для кожного режиму, якщо забезпечується перемикання робочої точки. Калібрування виконується у декілька кроків:

- вибір геометрично стабільної контрольної точки (калібрувальний пін, конус або еталонна виїмка);
- підведення інструмента до точки з різних орієнтацій;
- обчислення координат ТСР відносно фланця робота;
- перевірка повторюваності підходів.

Для РНА рекомендовано додатково верифікувати ТСР на робочій станції: робот підводить захват 2 до контрольного отвору фіксатора у кількох повтореннях, після чого аналізується відхилення. Якщо відхилення перевищують допустимий рівень, проводиться корекція ТСР або механічне юстування захвата.

Робочий цикл РНА у роботизованій клітинці реалізується як послідовність макрооперацій: «отримання фіксатора», «підготовка/встановлення заготовки», «подавання штирів», «укладання штирів», «повернення фіксатора», «перехід до наступної заготовки». Загальна логіка циклу подана на рисунку 3.4. На поточному етапі, за відсутності захвата 3, операція встановлення датчика у фіксатор виконується оператором, тоді як подавання й позиціювання штирів повністю автоматизується.

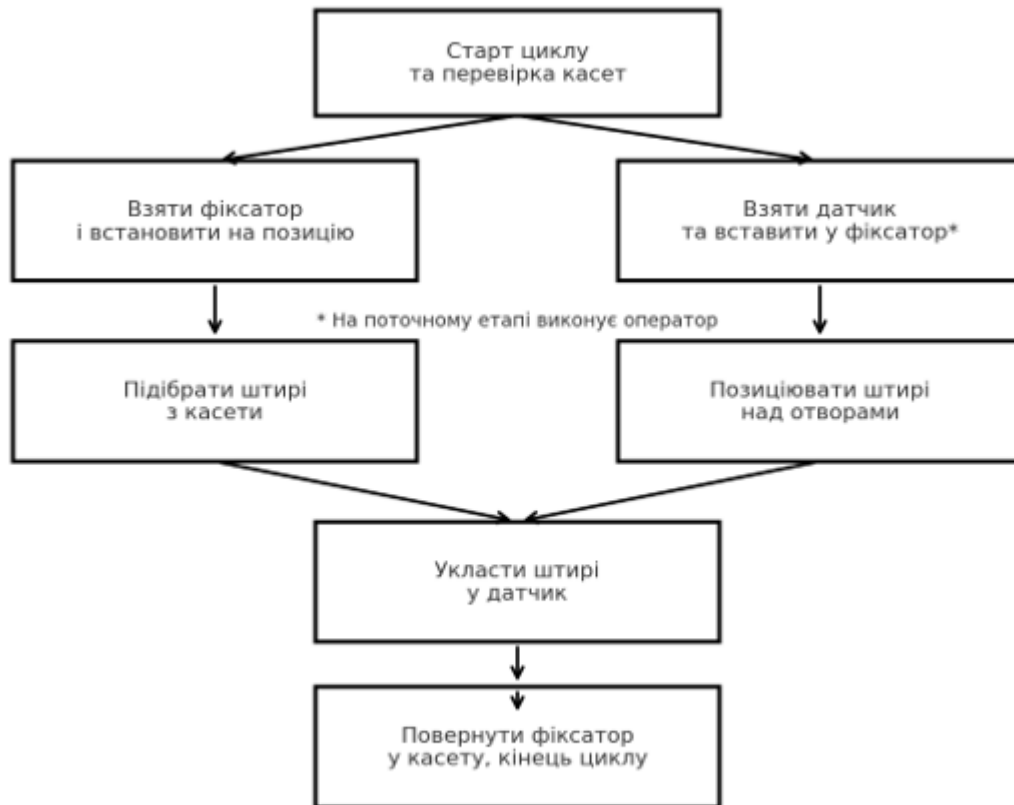


Рисунок 3.4 Логіка автоматизованого циклу РНА.

Під час програмування траєкторій слід застосовувати такі принципи:

- підходи до касет виконуються по траєкторіях із проміжними «точками безпеки», що знижує ризик зачеплення;
- у зоні фіксатора швидкості зменшуються, а орієнтація інструмента фіксується, щоб уникнути зсувів під час введення штифтів;
- для укладання використовуються керовані лінійні переміщення вздовж осі введення;
- після кожної укладки передбачено коротку паузу стабілізації, що зменшує пружні відскоки.

У програмі передбачено обробку типових ситуацій: відсутність штифтів у касеті, неправильне захоплення, перевищення сили під час введення (контакт із кромкою отвору), відсутність фіксатора на місці. Для цього застосовуються умовні переходи та сигнали датчиків/контролера.

Налаштування колаборативної безпеки:

Оскільки станція працює у спільному просторі з оператором, критичною є верифікація параметрів безпеки. Налаштування включає:

- обмеження максимальної швидкості рухів у «людинозалежних» зонах;
- обмеження допустимого моменту/сили на суглобах;
- виділення робочих зон (роботизована, сервісна, заборонена);
- визначення сценаріїв зупинки та відновлення після контакту.

У зоні взаємодії з оператором (підведення касет) рекомендовано використовувати найнижчі допустимі швидкості й автоматичне відведення робота у безпечне положення під час підходу людини. У «технологічній» зоні (фіксатор і штифти) дозволяється підвищення швидкості за умови відсутності оператора в межах робочого об'єму.

Налагодження та перевірка точності РНА-операцій:

Після програмування та налаштувань проводиться комплекс пусконалагоджувальних робіт:

- 1) «сухий» прогін траєкторій без компонентів для перевірки колізій;
- 2) прогін із фіксатором без штифтів для перевірки точності позиціювання;
- 3) тестове укладання штифтів у контрольний виріб із фотоконтролем або виміром відхилень;
- 4) серія повторень (не менше 30 циклів) для оцінки статистичної повторюваності.

Критеріями прийнятності є відсутність перекосів штифтів, стабільна глибина введення, відсутність пошкодження контактних площадок і допустимі відхилення положення. За потреби коригується ТСП, опорні точки або режими швидкості/прискорення.

Для роботи у тривалому режимі (включно з нічними змінами) станція має бути забезпечена достатнім запасом касет. Оператор виконує

завантаження касет до буферної зони та вивантаження заповнених касет із готовими виробами. Робот послідовно відпрацьовує касети, переходячи від однієї до іншої за програмою, що дозволяє підтримувати безперервний такт без прямого втручання людини.

Для додаткової стійкості процесу доцільно передбачити:

- маркування касет та контроль їх типу;
- датчики наявності компонентів;
- лічильники відпрацьованих циклів;
- повідомлення про необхідність поповнення.

На рис. 3.5 наведено карту потоку створення цінності (VSM) для поточного стану виробництва. Операції згруповано з метою акцентування ключових етапів виготовлення датчиків. Між окремими процесами передбачені буферні запаси, організовані за принципом «pull», оскільки виробнича система поєднує «pull» управління потоком із серійним випуском. На вході та виході конвеєрної лінії відповідно розміщені місця зберігання сировини та готової продукції. На схемі група процесів складання штирьових роз'ємів виділена різними кольорами для наочного розмежування операцій. Відмінність між картою поточного та майбутнього станів полягає в тому, що у перспективній конфігурації процес складання штирьових роз'ємів передбачається виконувати в автоматизованому режимі.

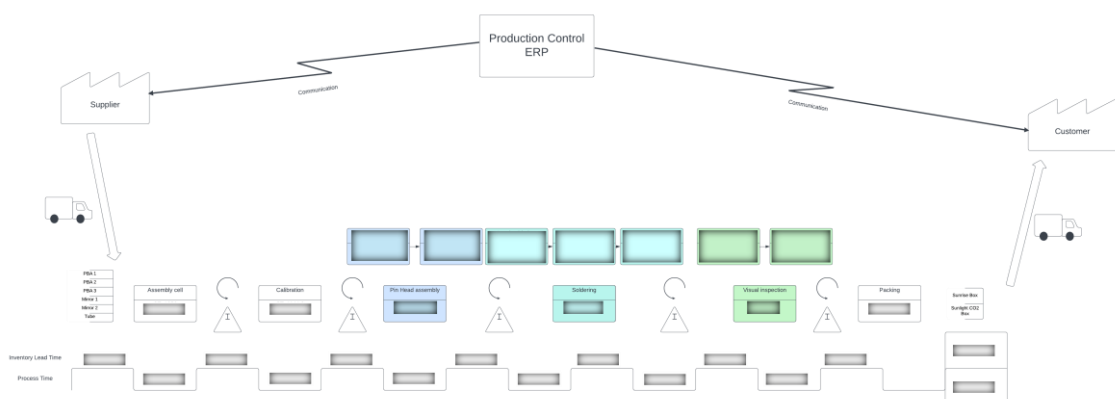


Рисунок 3.5: Карта поточного стану потоку створення продукції

3.4 Розробка алгоритмів керування процесом складання РНА

Розробка алгоритмів керування РНА-станцією ґрунтується на інтеграції двох рівнів керування: локального керування роботом UR5 (через середовище PolyScore та мову URScript) і верхнього рівня диспетчеризації на основі ПЛК, який координує взаємодію робота з іншими вузлами лінії (конвеєр, станція паяння, система візуального контролю тощо). Такий підхід відповідає сучасним рекомендаціям щодо побудови роботизованих комірок, де робот розглядається як «підлеглий виконавець» у складі загальної системи керування, а ПЛК виступає центральним модулем логіки й обміну сигналами.

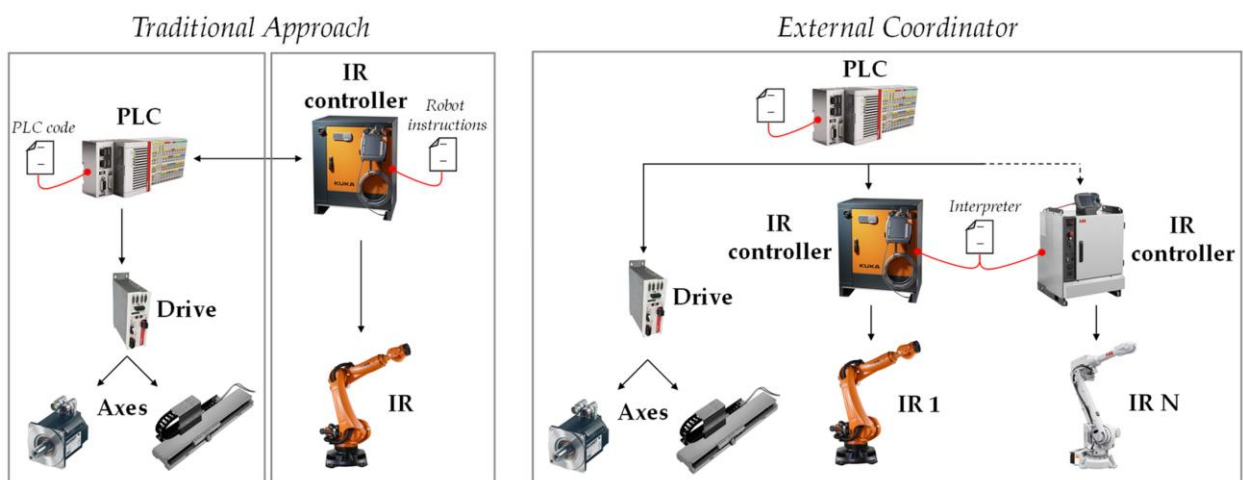


Рисунок 3.6: Загальна структурна схема системи керування РНА-станцією

3.4.1 Архітектура програмного забезпечення РНА-станції

Структурно програмна частина РНА-станції складається з трьох взаємопов'язаних рівнів:

Програма робота UR5 — відповідає за декомпозицію РНА-циклу на послідовність рухових та захватних команд (отримання фіксатора, підхід до касети зі штирьовим роз'ємом, укладання штифтів у фіксатор, відведення інструмента тощо).

Логіка ПЛК — реалізує обмін сигналами з роботами та обладнанням, керує станами «Start / Stop / Fault», синхронізує РНА з іншими процесами (калібрування, паяння, візуальний контроль).

Людино-машинний інтерфейс (HMI) — забезпечує вибір режимів роботи (ручний / напіваавтомат / автомат), відображення станів, лічильників циклів, повідомлень про помилки та сервісних підказок оператору.

Типовий приклад подібної багаторівневої структури наведено в документації Universal Robots та посібниках із інтеграції UR-роботів із зовнішніми контролерами, де підкреслюється роль URP-програм (графічних програм на панелі) як верхнього рівня над URScript-підпрограмами.

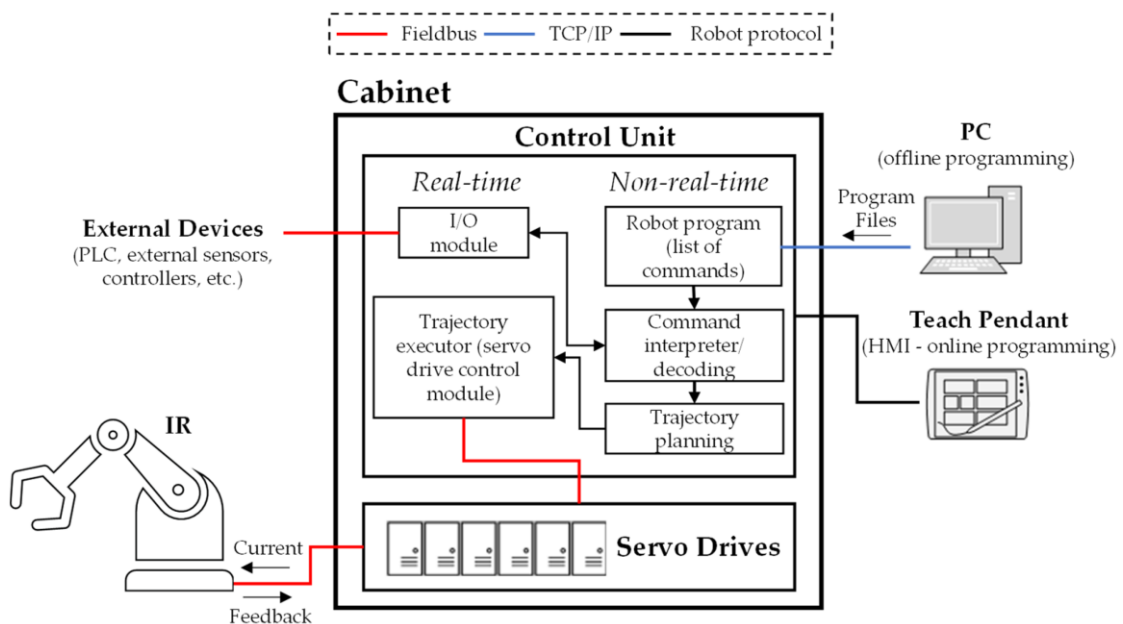


Рисунок 3.7: Спрощена UML-діаграма

3.4.2 Структура програми UR5 для РНА-циклу

Програма робота UR5 розробляється у середовищі PolyScore та містить послідовність програмних вузлів, об'єднаних у єдиний цикл РНА. Відповідно до рекомендацій виробника, доцільно використовувати ієрархічну структуру з виділенням окремих підпрограм для фаз «Pick», «Place» та допоміжних операцій.

Базова структура програми може мати вигляд:

Головна програма PHA_Main(), яка:
 виконує ініціалізацію (установлення початкової пози, завантаження параметрів, скидання лічильників);
 очікує сигналу «Start_PHA» від ПЛК;
 запускає циклічне виконання PHA-операцій до отримання сигналу «Stop» або до досягнення заданого обсягу партії.

Підпрограма Get_Fixture() — рух до касети з фіксаторами, захоплення, позиціювання фіксатора на робочому посту.

Підпрограма Pick_Header() — підхід до касети зі штирьовими роз'ємами, захоплення роз'єму другим захватом.

Підпрограма Place_Header() — точне позиціювання роз'єму над датчиком, введення штифтів у монтажні отвори за лінійною траєкторією.

Підпрограма Return_Fixture() — повернення фіксатора з зібраним датчиком у касету для подальшої операції (паяння або контролю).

При цьому URScript використовується як низькорівнева мова для реалізації більш гнучких сценаріїв, умовних операторів та обробки сигналів вводу/виводу. Структура URScript-програми (із використанням процедур, циклів і умовних переходів) детально описана в офіційному Script Manual, де наведено приклади умовного руху, реакції на цифрові входи та формування модульних підпрограм для операцій pick & place.

3.4.3 Логіка ПЛК та обмін сигналами з UR5

На рівні ПЛК алгоритм керування побудовано у вигляді машини станів, яка координує стан робота та суміжних процесів. Кожен стан (наприклад, «Очікування готовності робота», «Передача фіксатора», «Цикл PHA активний», «Аварія») представлений окремою ділянкою LAD-схеми або функціональним блоком у структурованому тексті.

Основні групи сигналів:

Команди до робота: Start_PHA, Stop_PHA, Reset_Fault, Select_Mode.

Сигнали від робота: Robot_Ready, In_Cycle, Cycle_Done, Robot_Fault, Safe_Stop.

Сигнали обладнання: Fixture_At_Position, Header_Magazine_OK, Solder_Station_Ready, EStop_Active.

Типовий приклад «handshake»-логіки між ПЛК і роботизованою системою демонструється в профільних посібниках з інтеграції роботів, де ladder-діаграма містить декілька ключових «щаблів» (rungs) для перевірки відсутності аварій, дозволу режиму «Auto», запуску головної програми робота та підтвердження станів «Home»/«In Position».

Логіка ПЛК також реалізує лічильники вироблених одиниць, таймери контролю часу циклу, обмеження на кількість повторних спроб при помилках позиціонування та алгоритми переходу станції у безпечний режим у разі аварії або зупинки суміжних вузлів.

3.4.4 Машина станів РНА-циклу

З погляду алгоритміки РНА-станцію доцільно описати у вигляді дискретної машини станів, де кожен стан відповідає певному технологічному етапу:

Idle — система очікує команду на запуск, перевіряються усі умови безпеки.

Load_Fixture — UR5 захоплює фіксатор та розміщує його на робочій позиції.

Wait_Sensor — оператор (на поточному етапі) або додатковий захват розміщує датчик у фіксаторі, ПЛК перевіряє сигнал «Sensor_Present».

Pick_Header — робот захоплює штирьовий роз'єм.

Insert_Header — виконується введення штифтів у датчик з контролем сили/моменту.

Unload_Fixture — фіксатор із зібраним вузлом повертається до касети або передається на паяння.

Cycle_Complete — інкрементується лічильник, перевіряється умова продовження циклу.

Fault / Safe_Stop — система переходить у аварійний або захищений стан до усунення причини.

Подібне подання у вигляді UML-діаграми станів або блок-схеми широко застосовується у документації до UR-роботів, а також у прикладах програм на основі шаблонів pick & place.

3.4.5 Обробка помилок і безпекові сценарії

Окремий фрагмент алгоритмів керування присвячено обробці помилок і реалізації сценаріїв безпечної зупинки. Робот UR5e має вбудовані функції безпеки — обмеження швидкості, сили, моменту, діапазону руху тощо, які можуть конфігуруватися відповідно до вимог ISO/TS 15066 для колаборативних застосувань.

У межах РНА-станції передбачено такі типові ситуації:

Перекося або неповне введення штиря — датчик сили/моменту або контролер UR реєструє перевищення допустимого навантаження, програма переходить у стан «Error_Insert», робот відводить інструмент у безпечну точку, ПЛК генерує повідомлення для оператора.

Відсутність фіксатора / роз'єму в касеті — датчики наявності формують сигнал «Not_Present», ПЛК блокує запуск чергового циклу, активується індикація «Reload_Cassette».

Спрацювання аварійної зупинки (E-Stop) — станція негайно переводиться у режим знеструмлення виконавчих приводів, цикл переривається, усі виходи робота й ПЛК переходять у безпечний стан.

Вихід за межі робочої зони або порушення колаборативних параметрів — спрацьовують внутрішні функції UR-контролера, які формують сигнал «Protective Stop», що фіксується ПЛК та потребує цілеспрямованого скидання після усунення причини.

Узагальнюючи, розроблені алгоритми керування поєднують модульну структуру програми UR5 (із чіткою декомпозицією РНА-циклу на підпрограми) з дискретною логікою ПЛК, реалізованою у вигляді машини станів і ladder-схем обміну сигналами. Це забезпечує:

- синхронізацію роботи робота й обладнання;
- можливість масштабування алгоритмів при додаванні нових захватів або операцій;
- інтеграцію безпекових функцій на рівні робота та ПЛК;
- прозорість логіки для налагодження й подальшої модернізації системи.

3.5 Компонування роботизованої РНА-клітинки та організація робочого простору

Рациональне конпонування роботизованої РНА-клітинки є ключовою передумовою досягнення стабільної продуктивності, безпечної взаємодії з оператором та можливості масштабування системи в майбутньому. На відміну від традиційних автоматизованих ліній, де доступ людини до робочої зони може бути жорстко обмежений, колаборативні робототехнічні системи, зокрема робот UR5, передбачають спільний робочий простір, у якому людина й робот можуть діяти послідовно або частково паралельно. Це накладає додаткові вимоги до просторової організації обладнання, логіки руху, розміщення касет та зон доступу оператора. Типові приклади колаборативних робочих клітин із UR-роботами вказують на доцільність компактного конпонування з чітким виділенням технологічної зони робота, буферних зон для матеріалів та окремої сервісної зони оператора. На рисунку 3.12 доцільно показати схему загального конпонування РНА-клітинки, адаптовану на основі публічно доступних прикладів розміщення UR5 у складальних застосуваннях.

3.5.1 Вихідні дані для компоновання

Проектування компоновання РНА-клітинки ґрунтується на таких вихідних даних:

Робочий радіус UR5 — до 850 мм від фланця інструмента, що визначає досяжність касет, фіксатора, зон завантаження/розвантаження та допоміжних елементів.

Наявність двоканального захватного модуля — один канал працює з фіксаторами, інший — зі штирьовими роз'ємами, що зменшує потребу у зміні інструмента, але вимагає врахування збільшеної довжини інструменту.

Необхідність колаборативної взаємодії — оператор підводить касети із заготовками та відводить касети з готовими виробами, здійснює візуальний контроль стану та, на поточному етапі, встановлює датчик у фіксатор.

Обмеження виробничого приміщення — геометрія стола, доступ до конвеєра або до зони наступних операцій (паяння, контролю), розташування огорожень або сусіднього обладнання.

Узагальнені рекомендації щодо компоновання колаборативних робочих місць з UR-роботами передбачають розміщення бази робота таким чином, щоб його робочий об'єм перекривав щонайменше три ключові зони: зону технологічної операції, зону подавання компонентів і зону відведення готових вузлів. На рисунку 3.13 доцільно подати приклад зони досяжності UR5 із типового каталогу або керівництва користувача.

3.5.2 Зонування робочого простору РНА-клітинки

Для забезпечення чіткої організації простору робоча зона РНА-клітинки поділяється на декілька функціональних підзон:

Технологічна зона робота — область, у межах якої виконуються операції маніпулювання фіксаторами, подавання та укладання штирьових роз'ємів. Тут розміщується:

робочий стіл із фіксатором;

зона точного позиціювання штирів;

локальні датчики стану (наявність фіксатора, роз'єму, датчика).

Буферні зони для касет:

касети з фіксаторами;

касети зі штирьовими роз'ємами;

касети із заготовками/готовими датчиками.

Сервісна зона оператора — місце для підведення/відведення касет, виконання ручних операцій (у поточній конфігурації — встановлення датчика у фіксатор), а також для візуального контролю й обслуговування.

Зона безпеки / спостереження — простір, у якому оператор може перебувати для моніторингу, не перетинаючи безпосередньо траєкторій робота.

Подібний підхід до зонування застосовується в практичних посібниках з впровадження колаборативних роботів, де наголошується на відокремленні області високоточних техпроцесів від зони роботи людини з мінімальними перетинами траєкторій. На рисунку 3.14 доцільно представити схему зонування робочого простору навколо UR5.

3.5.3 Розміщення бази UR5 та робочого стола РНА

Вибір положення бази UR5 є критичним для забезпечення досяжності всіх необхідних позицій без надмірних переорієнтацій та екстремальних положень суглобів. Виходячи з радіуса досяжності 850 мм, базу робота доцільно розмістити так, щоб:

робочий стіл із фіксатором знаходився у центральній, найбільш «точній» частині робочого об'єму;

касети з фіксаторами й роз'ємами були розташовані на менших або середніх відстанях, зручних для підведення по простих (майже лінійних) траєкторіях;

сервісна зона оператора знаходилася збоку або позаду від робота, уникаючи перетину типових траєкторій під час РНА-циклу.

Рекомендації виробника UR5 щодо механічного монтажу бази робота вказують на доцільність встановлення робота на жорсткій основі (металевий або бетонний постамент) із мінімальною деформацією, а також на необхідність дотримання геометричних допусків при вирівнюванні бази відносно робочого стола. На рисунку 3.15 можна подати адаптовану схему монтажу UR5 на столі чи постаменті, взяту з технічної документації.

Висота робочого стола вибирається з урахуванням ергономіки оператора та оптимального діапазону рухів UR5. Типові приклади колаборативних робочих станцій демонструють висоту стола в межах 750–900 мм, що забезпечує комфортну робочу позу оператора та зручний діапазон рухів робота для операцій складання. У цьому діапазоні відстань від фланця UR5 до площини кріплення фіксатора дозволяє виконувати лінійні рухи вздовж осі введення штифтів без виходу суглобів на межі кінематики.

3.5.4 Траєкторії руху та уникнення колізій

При компонуванні РНА-клітинки траєкторії руху UR5 повинні бути спроектовані таким чином, щоб мінімізувати:

- перетини з потенційними зонами присутності оператора;
- ризик зачеплення касет, огорожень, кабелів і допоміжних елементів;
- різкі зміни орієнтації, які збільшують час циклу та навантаження на суглоби.

У практиці роботи з UR-роботами рекомендується застосовувати проміжні «точки безпеки» (waypoints), через які робот проходить під час руху між касетами та робочим столом. Це дозволяє формувати плавні траєкторії з контрольованими орієнтаціями інструмента.

У РНА-клітинці доцільно виокремити щонайменше:

одну або дві проміжні точки над сервісною зоною (на висоті, що виключає зіткнення з касетами та обладнанням);

проміжні точки для підходу до касет (зі сторони, що не перетинає траєкторію оператора);

м'які траєкторії наближення до фіксатора з переходом на лінійний рух уздовж осі штифтів.

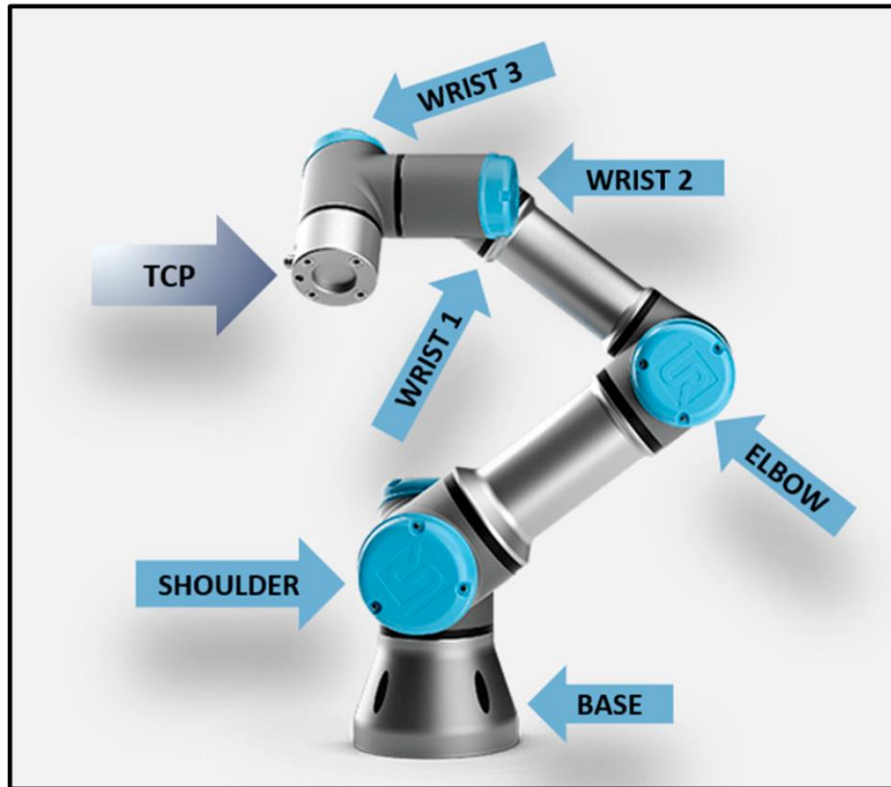


Рисунок 3.8: Типова траєкторія UR5 при виконанні операції «отримання роз'єму з касети → укладання у фіксатор → відведення»

3.5.5 Організація буферів і логістика касет

Організація буферних зон для касет визначає тривалість автономної роботи РНА-станції та рівень залучення оператора. Для забезпечення роботи впродовж тривалих інтервалів (у тому числі нічних змін) касети доцільно розміщувати групами:

2–3 касети з фіксаторами;

2–3 касети зі штирьовими роз'ємами;

2–3 касети із заготовками/готовими датчиками.

Таке компонування дозволяє UR5 послідовно обробляти касети за визначеним маршрутом, а оператору — періодично підміняти заповнені касети на порожні, не перериваючи роботу станції. Подібний підхід до організації буферів описаний у прикладах колаборативних роботизованих комірок для дрібносерійного складання та палетизації.

Важливою умовою є однозначна ідентифікація касет (маркування, фіксовані позиції, наявність упорів), що спрощує програмування та зменшує ризики помилок при захопленні. Додатково можуть використовуватися датчики наявності касети в гнізді, завдяки чому алгоритм керування здатен коректно реагувати на відсутність касети (наприклад, блокувати запуск циклу або сформувати повідомлення оператору).

3.5.6 Вимоги до безпеки та колаборативної взаємодії

Оскільки РНА-клітинка працює в режимі людино-роботної співпраці, компонування повинно враховувати вимоги стандартів ISO 10218-1/2 та ISO/TS 15066 щодо безпечної колаборативної роботи. Основні заходи включають:

Обмеження швидкості та сили рухів у зонах потенційної присутності оператора — конфігуруються в контролері UR5(е).

Виділення сервісної зони таким чином, щоб оператор не змушений був перетинати основні траєкторії робота під час завантаження касет.

Застосування візуальних і звукових індикаторів (сигнальна колонка, HMI-панель), що відображають режими роботи: Auto, Manual, Fault, Safe Stop.

Встановлення фізичних обмежувачів (огороження, відбійники) для запобігання випадковому потраплянню в небажані зони, не перешкоджаючи при цьому штатним траєкторіям робота.

3.5.7 Узагальнення щодо компоновання РНА-клітинки

Запропоноване компоновання роботизованої РНА-клітинки з UR5 забезпечує:

досяжність усіх ключових зон (фіксатор, касети, буфери) в межах робочого радіуса робота без перевантаження окремих осей;

раціональну організацію траєкторій, що мінімізує холості ходи й час позиціювання;

чітке зонування простору, яке сприяє безпечній та ефективній роботі оператора в колаборативному режимі;

можливість масштабування конфігурації за рахунок додавання додаткових касет, третього захвата або інтеграції з наступними технологічними стадіями.

Таким чином, конструкторське компоновання РНА-клітинки формує просторову й функціональну основу для реалізації розроблених алгоритмів керування, забезпечуючи досягнення цільових показників продуктивності, якості та безпеки процесу складання контактних роз'ємів PIN Header.

Запропонована роботизована РНА-станція на базі UR5 із багатозахватним інструментом забезпечує конструктивні передумови для стабільного високоточого укладання штирьових роз'ємів та зменшення трудомісткості процесу. Реалізація описаних налаштувань — від компоновання клітинки і калібрування ТСП до програмування циклу й параметрів колаборативної безпеки — дозволяє досягти повторюваності операцій, скорочення lead time та підвищення якості з'єднань. Подальший розвиток рішення пов'язаний із завершенням проєктування захвата для датчиків, що забезпечить повну автономізацію РНА і перехід до вищого рівня людино-роботної співпраці.

4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

У науково-дослідній частині роботи розглядається комплекс питань, пов'язаних із підвищенням ефективності процесу Pin Header Assembly (PHА) у складі загального виробничого потоку датчиків. Актуальність дослідження зумовлена тим, що ручне виконання РНА формує суттєві часові витрати, підвищує ймовірність похибок під час позиціювання штирьових роз'ємів та обмежує масштабованість виробництва. Відтак виникає потреба у науково обґрунтованому виборі доцільного рівня автоматизації цієї операції, визначенні її впливу на ключові техніко-економічні показники та встановленні раціональної конфігурації автоматизованої станції в умовах реального виробничого середовища.

Метою науково-дослідного розділу є кількісне та якісне обґрунтування переходу від ручного до автоматизованого виконання РНА на основі порівняльної оцінки продуктивності, тривалості виробничого проходження, структури витрат і вузьких місць процесу. Для досягнення цієї мети сформульовано такі дослідницькі завдання:

Пропускна здатність

На рисунку 4.1, 4.2 показано теоретичний сценарій, за якого кожна станція працює на 100% потужності безперервно, без будь-яких перерв. Часовий зразок для цього становив один місяць. Цей графік надає іншу перспективу порівняно з такими показниками, як «час циклу» та «час на одиницю», шляхом нормалізації щоденних робочих годин кожної станції та їх накопичення. Графік позначений як «інвертований», оскільки він виділяє процеси з найнижчою «потенційною пропускнуою здатністю», вказуючи на області з найменшим потенціалом, враховуючи їх поточну операційну конфігурацію. Іншими словами, вузькі місця процесу видно в лівій частині діаграми. Права вісь Y служить як сукупний відсоток від загального обсягу, так і значенням кожної діаграми, нормалізованим до 100. У цьому аналізі перше місце посідає робототехнічна складальна комірка, тобто вона має

найнижчу потенційну пропускну здатність, за нею йде РНА. Робототехнічна складальна комірка посідає перше місце через обмежену 8-годинну щоденну роботу, що пов'язано з ручними процесами введення та виведення; оператор вручну подає один контейнер, 50 датчиків, кожного компонента, і комірка виробляє один контейнер зібраних датчиків. Після впровадження механізму подавання для роботизованої складальної комірки, який забезпечить її безперервну роботу в режимі 24/7 або протягом тривалих інтервалів, процес РНА, імовірно, стане провідним за відповідним показником у цій категорії. Найбільша різниця між автоматичним і ручним процесами полягає в тому, що автоматична станція зможе працювати 24 години на добу, що збільшить загальну пропускну здатність станції на 41%.

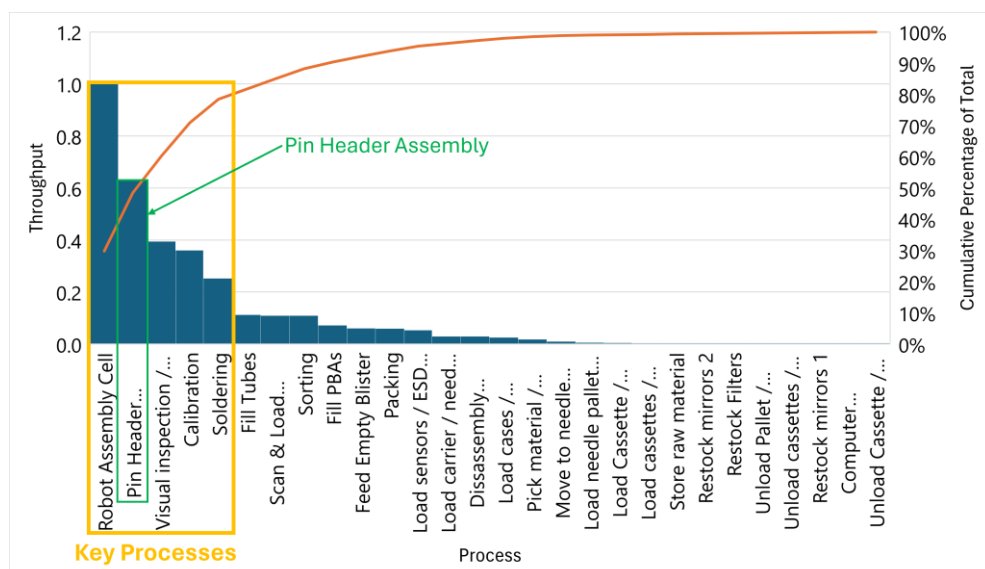


Рисунок 4.1: Пропускна здатність інвертованого потенціалу — ручна РНА

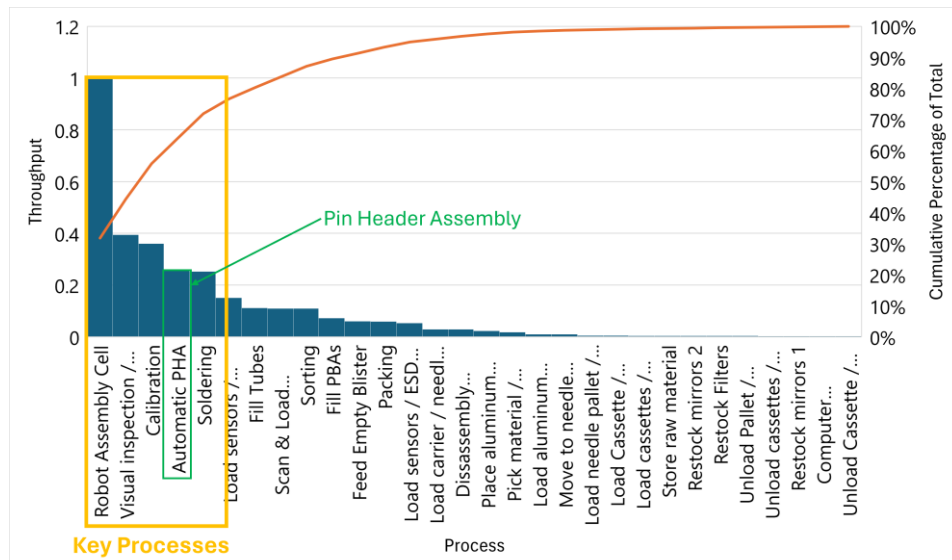


Рисунок 4.2: Пропускна здатність інвертованого потенціалу — автоматичний РНА

Час для однієї одиниці

Далі процеси були проаналізовані з точки зору «часу на одиницю» (Рис. 4.3, 4.4).

Час на одиницю був визначений шляхом безпосереднього спостереження під час виробництва. Для розрахунку цього показника було виміряно кожен етап виробничого процесу. Процеси, що не були інтегровані в звичайний виробничий цикл, виконувалися найманими працівниками на вибірці датчиків, при цьому кожна ітерація вимірювалася кілька разів.

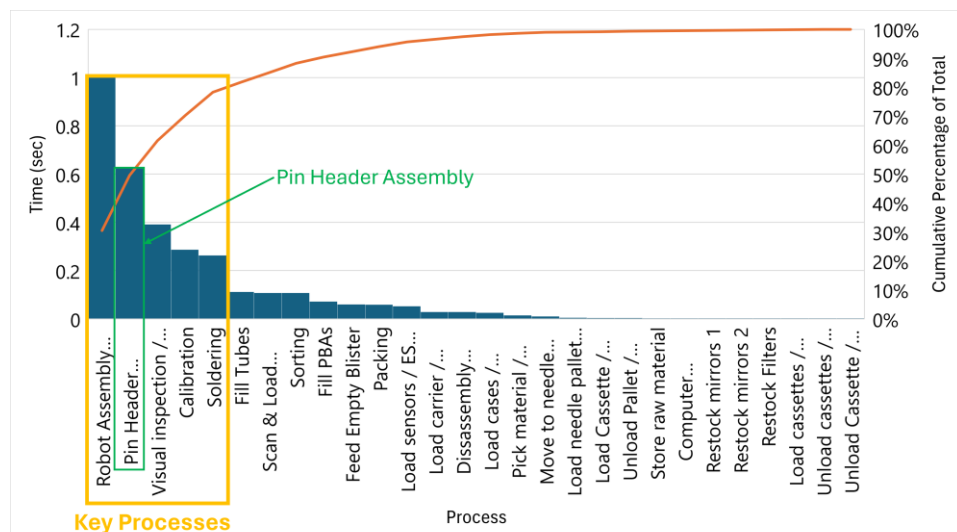


Рисунок 4.3 Час для одного блоку - Ручний РНА

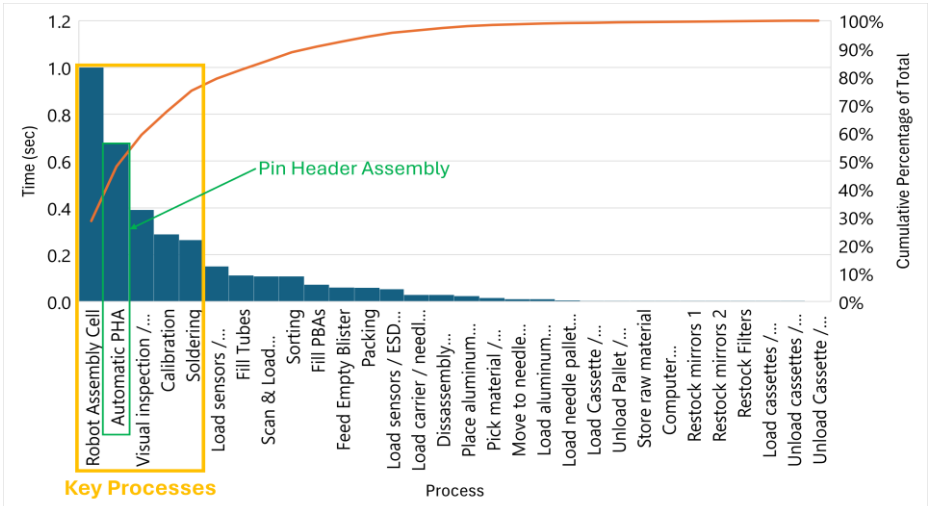


Рисунок 4.4 Час для одного блоку — автоматичний РНА

Цей показник визначає час, необхідний для завершення обробки одного датчика. Процес РНА перевершує інші в цій категорії. Час для однієї одиниці тут також буде майже однаковим, оскільки автоматична станція РНА працює з тими самими пристосуваннями для паяння, які містять однакову кількість датчиків.

Тривалість циклу

Час циклу помітно змінюється залежно від розміру партії, як показано на рисунках 4.5-4.10 відповідно. Однак у всіх сценаріях процеси з найбільшим часом циклу – це «Калібрування» та «Автоматична складальна комірка».

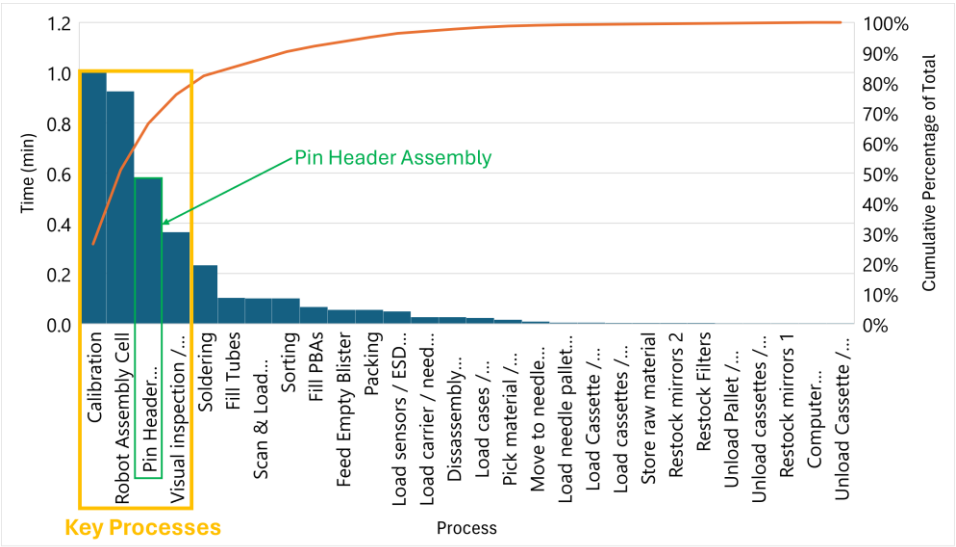


Рисунок 4.5 Тривалість циклу — партія 5 тис. — ручний РНА

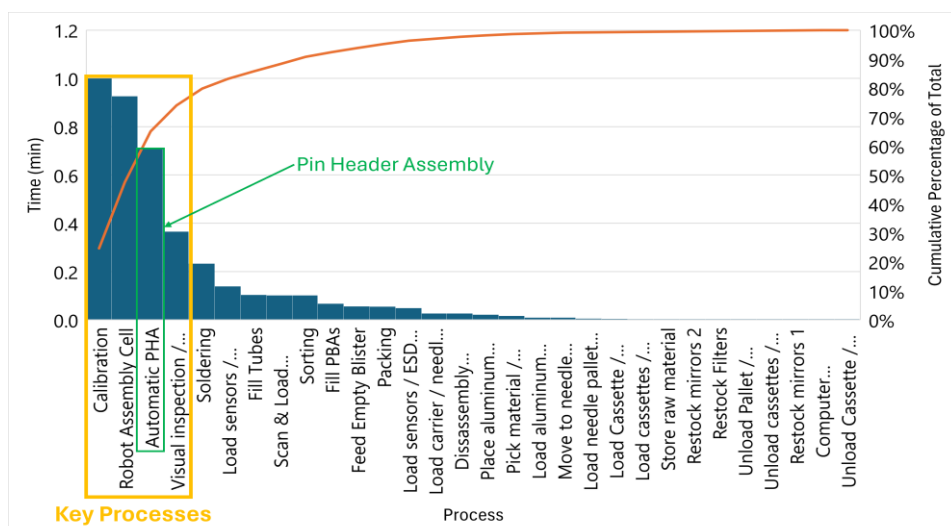


Рисунок 4.6 Тривалість циклу — партія 5 тис. — автоматичний РНА

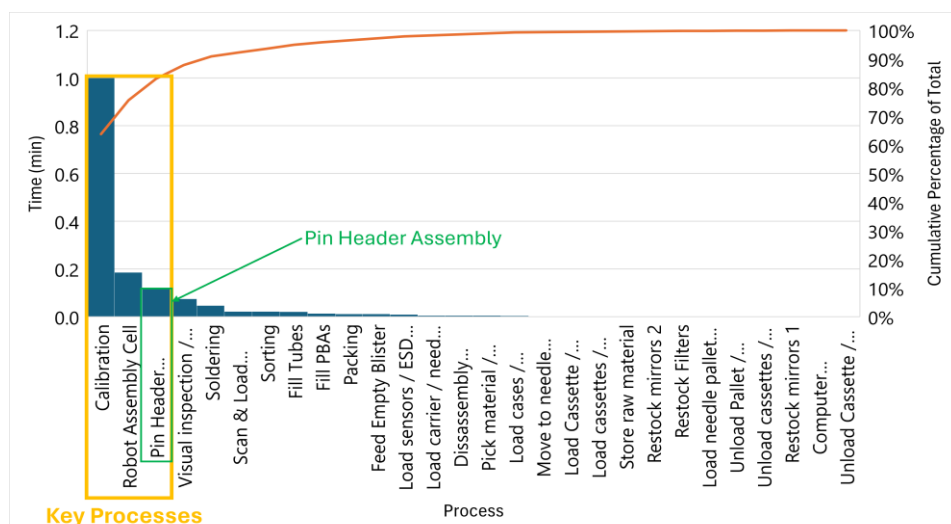


Рисунок 4.7 Тривалість циклу — партія 1 тис. — ручний РНА

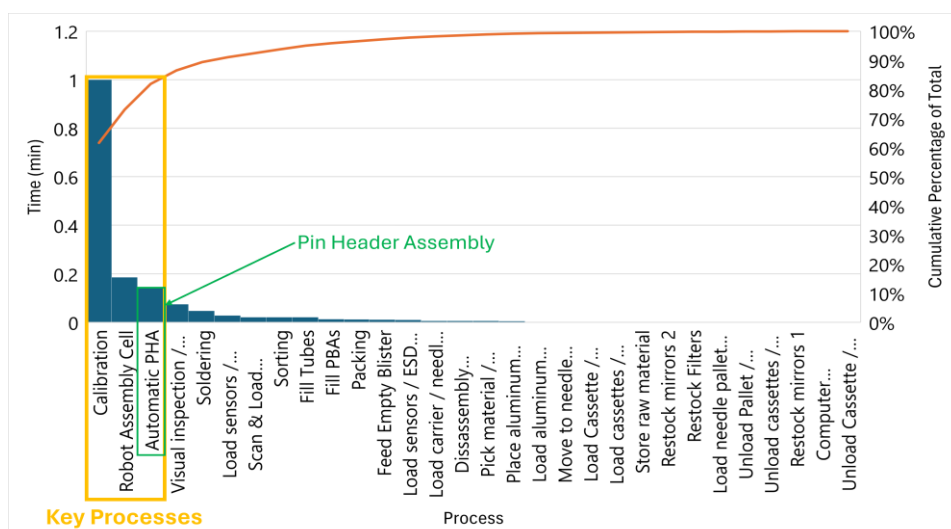


Рисунок 4.8 Тривалість циклу — партія 1 тис. — автоматичний РНА

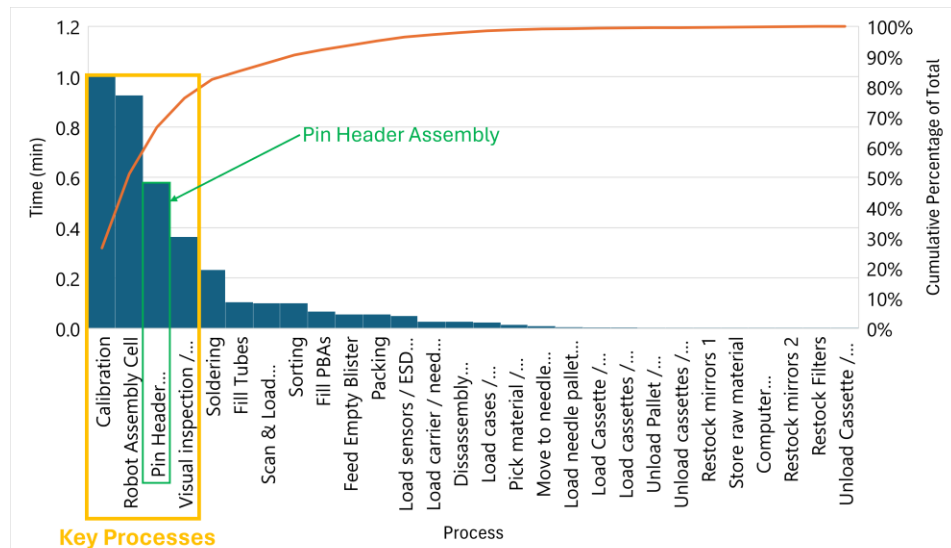


Рисунок 4.9 Тривалість циклу — партія 10 тис. — ручний РН

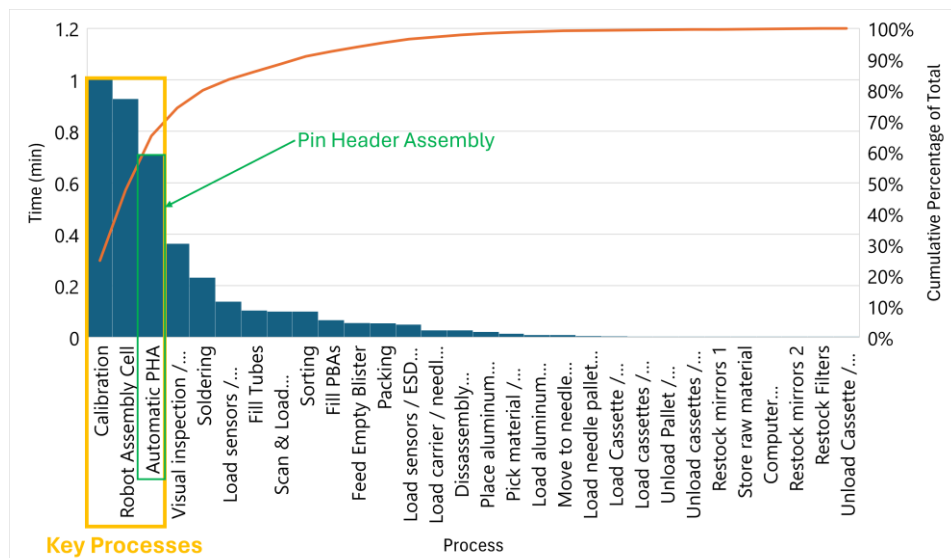


Рисунок 4.10 Тривалість циклу — партія 10 тис. — автоматичний РНА

Отже, результати в цьому розділі залежать від розміру партії. Час циклу для автоматизованої операції буде приблизно таким самим, як і для ручного РНА.

Вартість за одиницю

Одним з найважливіших критеріїв оцінки та ранжування процесів є собівартість одиниці продукції, враховуючи той факт, що економічна ефективність є ключовим показником для виробничої компанії.

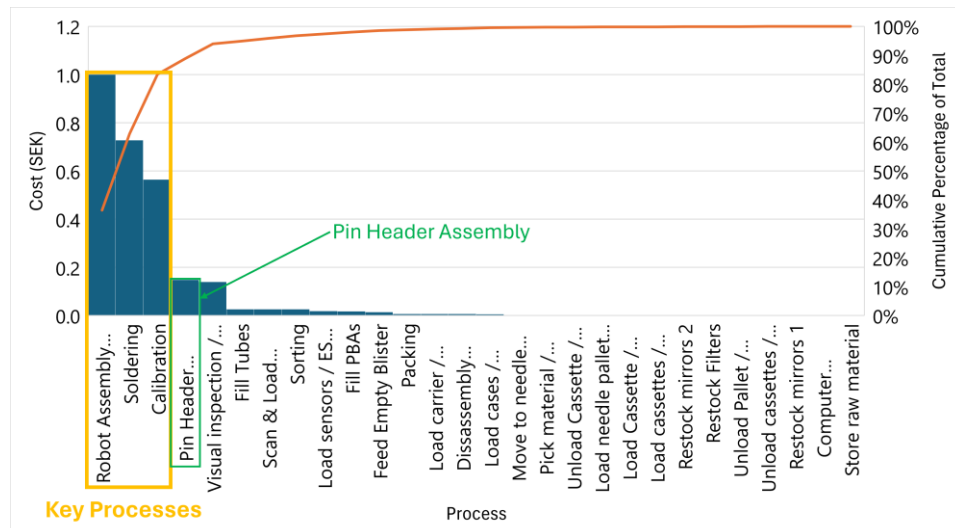


Рисунок 4.11 Одична вартість – Ручний РНА

На рисунку 4.11, 4.12 показана собівартість одиниці продукції на основі фактичного обсягу продажів. На цьому графіку показані процеси з найвищою розрахунковою собівартістю одиниці продукції.

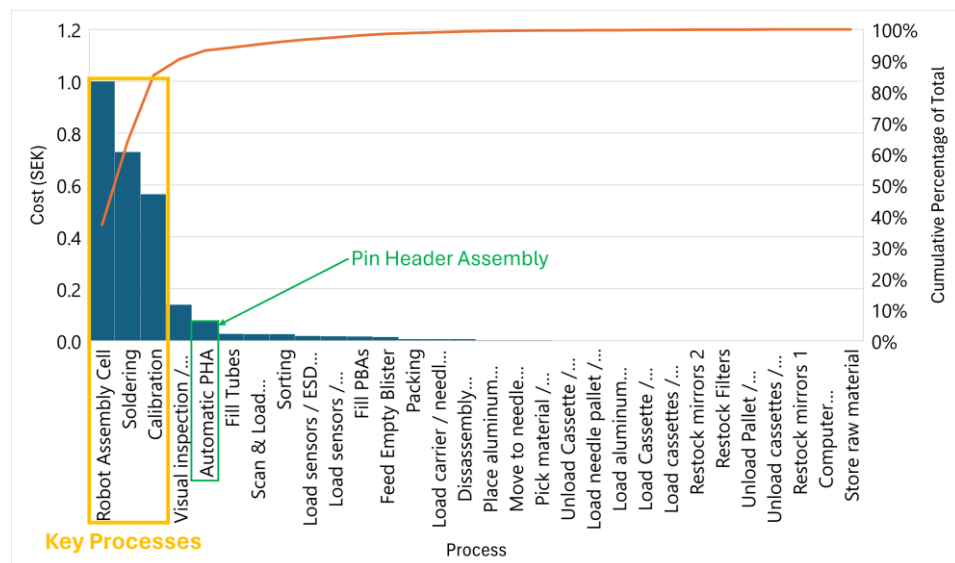


Рисунок 4.12 Одична вартість – автоматичний РНА

Отже, встановлено, що за поточної конфігурації ключовим обмеженням пропускної здатності є роботизована складальна комірка, а РНА посідає наступну позицію, проте після впровадження механізму подавання для комірки саме РНА, імовірно, стане головним вузьким місцем. Показано, що основна перевага автоматизованого РНА полягає у можливості безперервної

роботи станції, що підвищує її загальну пропускну здатність приблизно на 41%. Водночас час на одну одиницю та цикловий час для ручного й автоматизованого РНА залишаються практично співставними, оскільки використовується однакова оснастка і вирішальний вплив на цикл мають інші процеси (калібрування та складальна комірка). Отже, ефект автоматизації РНА проявляється насамперед у зростанні автономності, стабільності та потенціалу масштабування виробництва, тоді як остаточна економічна доцільність має визначатися через аналіз собівартості одиниці продукції.

5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Опис програмного забезпечення PolyScore

PolyScore — це пропрієтарна програмна платформа компанії Universal Robots, призначена для інтуїтивного програмування, налаштування та експлуатаційного керування колаборативними маніпуляторами серій e-Series (UR3e, UR5e, UR10e тощо), а також нової лінійки з PolyScore X. Її концепція орієнтована на зниження порога входу в роботизацію: середовище спроектовано так, щоб однаково ефективно підтримувати як досвідчених інтеграторів, так і користувачів без глибокої підготовки в робототехніці. Це реалізовано через візуальний, сенсорно-орієнтований інтерфейс навчального пульта, де процес керування роботом і створення програм подано у вигляді зрозумілих графічних елементів та послідовностей дій.

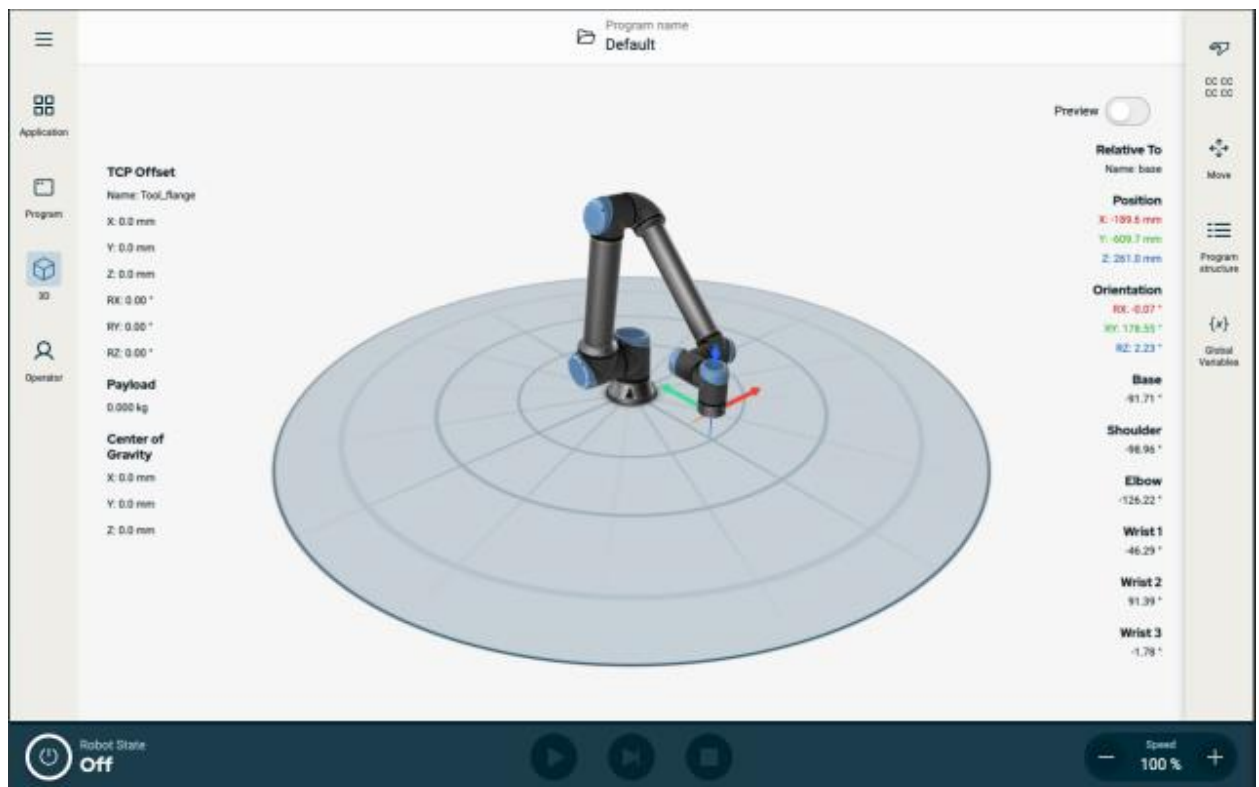
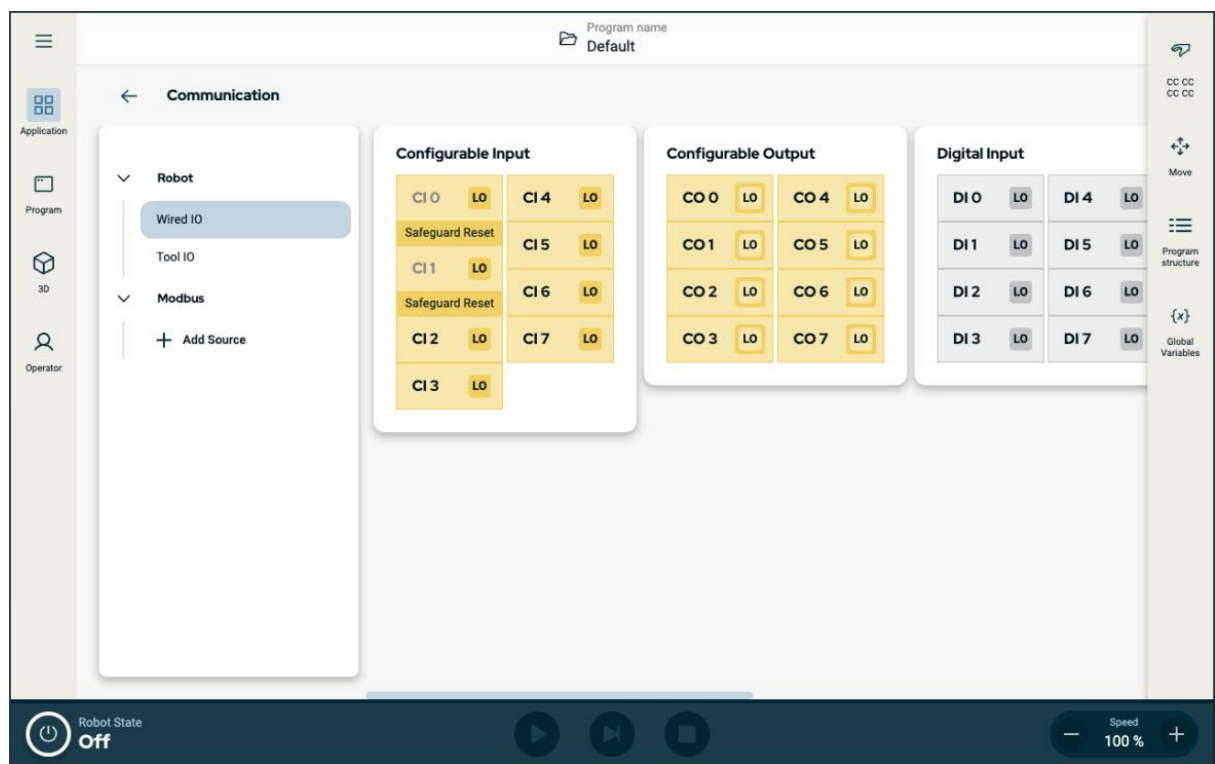
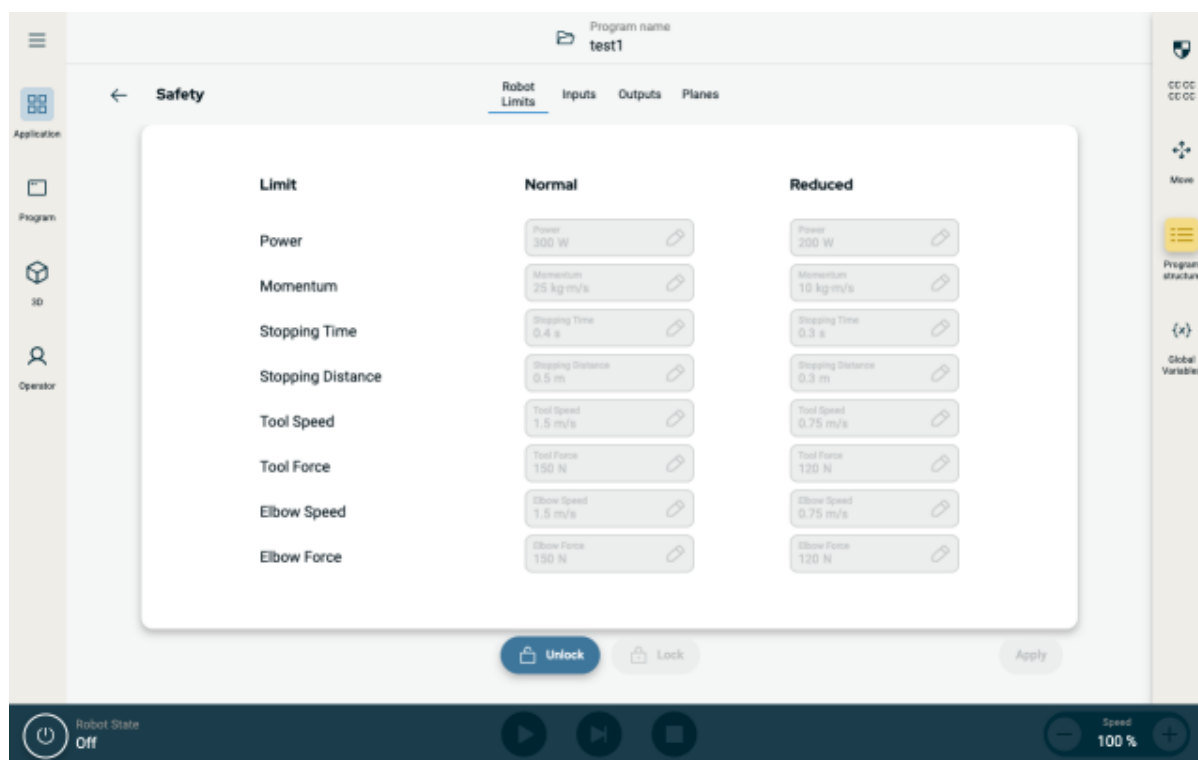


Рисунок 5.1 Зовнішній вигляд пропрієтарної програмної платформи компанії Universal Robots

З погляду функціональної архітектури PolyScore поєднує два взаємодоповнювальні середовища: режим інсталяції (Installation) та режим програмування (Program). У вкладці Installation оператор задає конфігурацію роботизованого застосунку: геометрію робочого простору, системи координат, параметри інструмента (TCP), вантаж/інерційні характеристики корисного навантаження, налаштування входів-виходів (I/O) (Рис. 5.2), мережеві протоколи та обмеження безпеки (Рис. 5.3). Саме тут формуються “умови існування” програми, які далі використовуються під час циклу.





У режимі Program користувач створює керуючу логіку через Program Tree — деревоподібну структуру, де кожен вузол відповідає певній дії або підпрограмі: переміщенням (MoveJ/MoveL/MoveP), захвату, затримкам, роботі з сигналами, умовам, циклам, підпрограмам тощо. Таке подання забезпечує прозору візуалізацію алгоритму, полегшує його налагодження та дозволяє швидко модифікувати послідовність дій під нові виробничі сценарії.

Ключовою рисою PolyScore є підтримка “lead-to-teach / freedrive” програмування: оператор може фізично підвести маніпулятор у потрібну позицію, зафіксувати її як waypoint і додати до дерева програми. Це особливо важливо для задач pick-and-place, складання чи обслуговування обладнання, де траєкторії часто визначаються не математично, а практично з урахуванням доступу та перешкод.

Для підвищення універсальності PolyScore передбачає два рівні розширення. Перший — URScript, вбудована скриптова мова, яка дозволяє доповнювати графічну програму складнішими алгоритмами (робота з

масивами точок, параметрична генерація рухів, нетипова логіка I/O, зовнішні обчислення тощо). Другий — URCaps, модульна екосистема плагінів, що інтегруються у PolyScore як нові програмні вузли або панелі налаштувань; через URCaps підключаються сторонні захвати, системи зору, конвеєрний трекінг, зовнішні осі чи спеціалізовані “майстри” для конкретних процесів.

Суттєвою складовою PolyScore є блок безпекових функцій. У середовищі наявні сертифіковані засоби обмеження швидкості, сили/моментів, зон руху (safety planes, boundaries), а також контроль режимів роботи в колаборативному просторі. Система дозволяє задавати профілі безпеки під конкретний ризик-аналіз і захищає критичні параметри паролями, що важливо для стабільної відповідності стандартам експлуатації коботів.

PolyScore також підтримує інтеграцію з виробничою інфраструктурою: налаштування цифрових/аналогових I/O, роботу зі стандартними промисловими протоколами (Modbus, Ethernet/IP, PROFI-safe тощо), а також режими Remote/Local Control. У режимі Remote Control робот може керуватися зовнішніми системами з одночасним моніторингом станів у PolyScore, що полегшує включення кобота в цифрові виробничі середовища або системи диспетчеризації.

Переваги PolyScore

1. Низький поріг входу та швидке навчання персоналу. Графічна логіка, “drag-and-drop” та lead-to-teach дають змогу запускати типові задачі без написання коду, що скорочує час впровадження кобота.

2. Прозора структура програм і зручне налагодження. Program Tree, візуалізація траєкторій і станів I/O дозволяють швидко локалізувати помилки під час пусконалагодження.

3. Гнучкість завдяки URScript і URCaps. Можна поєднувати прості GUI-програми з розширеним скриптуванням та підключенням периферії.

4. Сильний безпековий модуль. Наявність сертифікованих функцій безпеки та налаштування обмежень під ризик-аналіз підвищують прийнятність коботів у спільних зонах з операторами.

5. Промислова інтегровність і віддалене керування. Стандартні протоколи та Remote Control спрощують включення в автоматизовані лінії.

6. Підтримка високозмінних виробництв у PolyScore X. Новий інтерфейс орієнтований на короткі переналагодження та модульність робочих процесів.

Недоліки та обмеження

1. Пропрієтарність і залежність від екосистеми виробника. PolyScore є закритою платформою; розширення можливостей здебільшого прив'язане до URScript/URCaps і сумісних рішень Universal Robots.

2. Обмежена “візуальна” виразність для дуже складних алгоритмів. Для нетипових задач доводиться переходити до скриптування чи зовнішнього керування, що підвищує вимоги до кваліфікації.

3. Remote Control накладає функціональні обмеження на локальні дії в GUI. У віддаленому режимі частина операцій на пульті заблокована, що треба враховувати під час інтеграції.

4. Версійна диверсифікація (PolyScore 5 vs PolyScore X). Поступовий перехід до нової платформи може вимагати адаптації програм і URCaps, що є додатковим інженерним завданням.

5. Окремий контролер на кожен робот. PolyScore керує одним роботом на одному контролері; координація кількох роботів можлива через мережеві протоколи/зовнішні системи, але не як “один пульт — багато роботів” у прямому сенсі.

Завдяки поєднанню інтуїтивного GUI, режимів ручного навчання траєкторій, вбудованих інженерних налаштувань і розширюваності через URScript/URCaps PolyScore виступає одним із ключових чинників широкого впровадження колаборативних роботів Universal Robots у виробництві. Його застосування особливо ефективно для процесів з частими

переналагодженнями, для задач складання, подавання/укладання компонентів, обслуговування верстатів і внутрішньоцехової логістики, де критичними є швидкість запуску, простота адаптації й безпечна взаємодія з персоналом. Суттєва перевага PolyScore полягає в тому, що він дозволяє підприємству підтримувати і змінювати роботизовані програми власними силами без залучення вузькопрофільних програмістів, проте для складних інтегрованих сценаріїв необхідне комбінування GUI-програмування зі скриптовими або зовнішніми рівнями керування.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Організація охорони праці при роботі з системою управління

Охорона праці розглядає проблеми забезпечення здорових і безпечних умов праці. Виявляє і вивчає можливі причини нещасних випадків, професійних захворювань, аварій, вибухів, пожеж і розробляє систему заходів і вимог з метою виключення цих причин і створення безпечних і сприятливих для людини умов праці.

Завдання охорони праці є зведення до мінімуму імовірності пошкодження або захворювання працівників з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці.

Навчання працівників безпеці праці проводять відповідно до вимог ГОСТ 12. 0.004 - 79, який встановлює порядок і види навчання. На всіх підприємствах і в організаціях незалежно від характеру і ступеню небезпеки виробництва навчання працівників проводять при підготовці нових робітників, проведенні різноманітних видів інструктажів і підвищенні кваліфікації.

Контроль за своєчасним і якісним навчанням виконує відділ охорони праці чи інженер з охорони праці, або ІТП, на якого наказом керівника підприємства покладено ці обов'язки. Ті, що вперше поступають на роботу, навчання проходять згідно з "Типовим положенням про підготовку і підвищення кваліфікації робітників". В журналі обліку навчальної роботи реєструють навчальну тему, за якою проводилось навчання.

Інструктаж працюючих поділяють на вступний, початковий, на робочому місці, повторний, позаплановий і початковий.

Вступний інструктаж з усіма, хто поступає на роботу незалежно від їх освіти і стажу роботи по даній професії, проводить інженер з охорони праці за програмою, затвердженою головним інженером підприємства, про

проведення вступного інструктажу з обов'язковим підписом того, хто проводив інструктаж і того, хто його отримував.

Початковий інструктаж на робочому місці, повторний, позаплановий і поточний проводить керівник робіт.

Початковий інструктаж на робочому місці проводять при прийомі на роботу нових робітників за інструкцією з охорони праці, розробленою для окремих професій або видів робіт. Всі робітники після цього інструктажу і перевірки знань 2-5 змін (залежно від навичок і стажу роботи) працюють під наглядом бригадира чи майстра, потім оформляється допуск до їх самостійної праці.

Повторний інструктаж проходять всі працівники незалежно від кваліфікації, освіти і стажу роботи через три місяці. Його проводять з метою перевірки знання робітниками правил і норм з охорони праці.

Позаплановий інструктаж проводять коли змінилися правила охорони праці або технологічний процес, обладнання, інструмент та інші фактори, що впливають на безпеку праці; коли працівники порушують правила охорони праці, що можуть призвести чи призвели до травм, аварій чи пожежі, вибуху. Його проводять індивідуально чи з групою робітників однієї професії за програмою початкового інструктажу на робочому місці. При його реєстрації вказують причину, яка спричинила його проведення.

Умови праці мають велике значення практично для всіх виробничих показників - продуктивності праці, якості робіт, безпеки працівників та інше.

Санітарно-гігієнічні умови праці характеризуються показниками виробничого середовища - рівнем освітлення, мікрокліматичними параметрами, загазованістю і запиленістю повітряного середовища, рівнем шуму і вібрації, наявністю іонізуючого випромінювання та інше.

6.2 Електробезпека

Електричні установки, з якими доводиться мати справу практично всім працюючим по встановленню та налагодженню засобів автоматизації, виявляють для людини велику потенційну небезпеку, яка збільшується у зв'язку з тим, що органи чуття людини не можуть на відстані виявити присутність електричної напруги на обладнанні.

Степінь ураження електричним струмом залежить від цілого ряду факторів: значення сили струму, електричного опору тіла людини та тривалості протікання через неї струму, виду та частоти струму, індивідуальних властивостей людини та умов навколишнього середовища.

Конструкція електроустановок має відповідати умовам їх експлуатації та забезпечувати захист персоналу від дотику з струмоведучими та рухомими частинами, а обладнання - від попадання всередину посторонніх твердих тіл та води.

Конструкція, вид виконання, спосіб встановлення, клас ізоляції застосовуваних провідників, кабелів, пристроїв та іншого електрообладнання відповідають вимогам електробезпеки. За ступенем ураження людей електричним струмом котельня відноситься згідно ПУЕ 1.1.13 до категорії приміщень з підвищеною небезпекою (висока температура, можливість одночасного дотику до металевих елементів технологічного обладнання або металоконструкцій будинку та металевих корпусів електрообладнання).

У нормальному режимі роботи обладнання - можливість ураження працівників електричним струмом виключена. Але на випадок аварії для запобігання ураження струмом людей передбачене захисне заземлення. Згідно ПУЕ 1.7.65 допустимий опір заземлення повинен бути не більшим 10 Ом.

При виконанні монтажних робіт використовуються переносні електроінструменти (електродрилі, електрошліфувальні установки, тощо).

Для забезпечення безпечної праці корпуси однофазних електроприймачів повинні занулюватись.

Захист людини від ураження електричним струмом в мережах з зануленням здійснюється тим, що при замиканні одної з фаз на занулений корпус в ланці цієї фази виникає струм короткого замикання, що діє на струмовий захист (плавкий запобіжник, автомат), в результаті чого відбувається відключення аварійної ділянки від мережі. Крім того, ще до спрацювання захисту струм короткого викликає перерозподіл напруги в мережі, що приводить до зниження напруги корпусу відносно землі. Таким чином, занулення зменшує напругу дотику та обмежує час, на протязі якого людина, що доторкнулася до корпусу, може потрапити під дію напруги.

Для того, щоб забезпечити швидке (на протязі декількох секунд) відключення аварійної ділянки, струм короткого замикання повинен бути достатньо великим. Відповідно до вимог ПУЕ струм короткого замикання повинен не менше ніж в три рази перевищувати номінальний струм плавкої вставки найближчого запобіжника або номінальний струм нерегульованого розчеплювача автоматичного вимикача. При використанні автоматичних вимикачів, що мають тільки електромагнітний розчіплювач (відсічку), струм короткого замикання повинен перевищувати значення струму встановлення миттєвого спрацювання в 1,25-1,4 рази в залежності від номінального струму.

В однофазних електроприймачів, що включені між фазним та нульовим робочим проводами, занулення корпусів слід виконувати з допомогою окремого (третього) провідника, який повинен з'єднувати корпус електроприймача з нульовим захисним проводом. В таких випадках під'єднувати корпуси електроприймачів для забезпечення електробезпеки до нульового робочого проводу недопустимо, оскільки при його розриві (перегоранні запобіжника) всі під'єднані до нього корпуси виявляться під фазною напругою відносно землі.

В мережі з зануленням недопустимо використовувати заземлення окремих електроприймачів, не під'єднавши їх перед цим до нульового захисного провідника. В цьому випадку при замиканні фази на заземлений, але не приєднаний до нульового захисного провідника корпус створюється коло струму через заземлення цього корпусу та заземлення нейтралі джерела струму. Такий випадок небезпечний, оскільки засоби захисту не зможуть відключити такий електроприймач через мале значення струму і тому небезпечна напруга на всіх корпусах може зберігатися тривалий період, поки заземлений приймач не буде відключений вручну.

Важливо відмітити, що якщо занулений корпус одночасно заземлений, то це тільки покращує умови безпеки, оскільки забезпечує додаткове заземлення нульового захисного проводу.

Для ізоляції людини від частин електроустановок, що знаходяться під напругою, використовуються основні та допоміжні ізолюючі засоби, а саме слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками, коврики, ізолюючі підставки, тощо.

У приміщеннях, де знаходяться вимірювальні прилади, необхідно забезпечити виконання заходів по боротьбі з статичною електрикою (тобто прилади повинні бути заземлені). Найпростішим засобом є підтримка відносної вологості повітря на рівні 50 - 60 % за допомогою побутового електрозволожувача.

Підлогу слід виконувати відповідно до ГОСТ 12.4.124-83, використовуючи антистатичне покриття на проходах і біля робочих місць.

Робітникам рекомендовано носити одержу з природних матеріалів або з комбінованих - природних і штучних волокон. Для зняття електростатичних зарядів з одержу слід використовувати антистатики побутового призначення.

Оскільки корпуси приладів виконані з металу, то для усунення небезпеки ураження людини електричним струмом (можливий пробій на корпус приладу) використовується захисне заземлення.

6.3 Розрахунок заземлення

Розрахуємо систему заземлення для електроустаткування, яке працює від напруги 220 В.

$$R_{\text{заз}} \leq \frac{U}{I_p} = \frac{220}{66} = 3.3 \leq 4 \text{ Ом}$$

Визначаємо опір ґрунту: $\rho = \kappa_n * \rho_n = 2 * 200 = 400 \text{ Ом м}$,

де κ_n - коефіцієнт підсилення;

ρ_n — питомий опір ґрунту (вибирається з довідкової літератури).

Визначаємо опір одиночного вертикального заземлювача:

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} * \frac{4t+1}{4t-1} \right)$$

де t - відстань від середини заземлювача до поверхні ґрунту, м;

l, d - довжина і діаметр стержня заземлювача, м;

$$R_B = 96 \text{ Ом.}$$

Визначаємо опір сталевій полосі, що з'єднує стержневі заземлювачі:

$$R_{II} = (\rho / 2\pi l) * \ln(l^2 / dt) = 61 \text{ Ом.}$$

Визначаємо орієнтовне число стержневих заземлювачів:

$$n = R_B / [r_B] \eta_B = 96 / 4 * 1 = 24 \text{ шт.};$$

r_B - допустимий по нормам опір заземляючого пристрою,

η_B - коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів (для орієнтовного розрахунку приймається рівним 1).

Приймаємо розміщення вертикальних заземлювачів по контуру з відстанню між сталевими заземлювачами рівним 21. З довідкової літератури визначаємо $\eta_B = 0,66$ і $\eta_I = 0,39$.

Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів

$$n = R_B / [r_B] \eta_B = 96 / (4 * 0.66) = 36$$

Розраховуємо загальний розрахунковий опір аземлюючого пристрою R з врахуванням з'єднувальної полоси

$$R = R_B R_{II} / (R_B \eta_I + R_{II} \eta_B n) = 3.9 \text{ Ом.}$$

Розрахунок проведено правильно, оскільки виконується умова $R \leq [r_B]$.

Розрахунок штучного заземлення:

Приймаємо, що опір захисного заземлення не повинен перевищувати 4 Ом:

$$R_{33} = \frac{R_c R_n}{R_c + R_n} \leq 4 \text{ Ом}$$

де R_{33} – опір захисного заземлення;

R_c – опір стержневих заземлювачів;

R_n – опір поперечних заземлювачів.

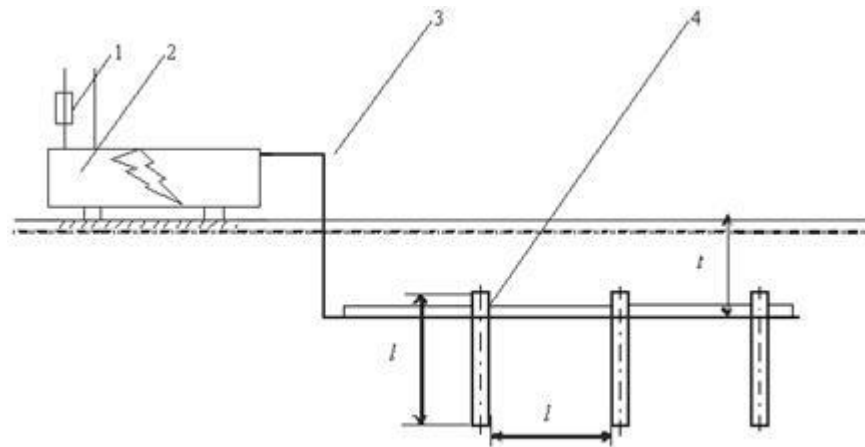


Рисунок 6.1 - Пристрій заземлення

4 – плавка вставка; 2 – електроустановка; 3 – з'єднувальна штаба; 4 – трубчатий заземлювач

Опір одиночного стержневого заземлювача розтіканню електричного струму:

$$R_{oc} = \frac{\rho_r}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{4h' + l}{4h' - l} \right)$$

де h – відстань від поверхні ґрунту до заземлювача і становить 0,8 м;

l – довжина стержневого заземлювача 3 м;

d – діаметр стержневого заземлювача 50 мм.

$$R_{oc} = \frac{750}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} + \ln \frac{4 \cdot 0,8 + 3}{4 \cdot 0,8 - 3} \right) = 39,8 \cdot (0,18 + 3,43) = 143,8 \text{ Ом}$$

Опір одиночного поперечного заземлювача:

$$R_{ок} = \frac{\rho_{\text{г}}}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bh'}$$

де l – довжина поперечного заземлювача 2,5 м;

b – ширина полоси заземлювача 30 мм;

$\rho_{\text{г}}$ – розрахунковий опір ґрунту: для поперечних електродів 1000 Ом·м, для стержневих електродів 750 Ом·м.

$$R_{ок} = \frac{1000}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \ln \frac{2 \cdot 2,5^2}{0,03 \cdot 0,8} = 63,7 \cdot 6,25 = 398,1 \text{ Ом}$$

В наслідок взаємовпливу вводимо коефіцієнт використання заземлювачів:

$$\eta = \frac{R_0}{nR_{\text{г}}}$$

де $R_{\text{д}}$ – допустимий опір заземлення, що становить 4 Ом;

R_0 – опір одиночного заземлювача.

З цієї формули методом ітерацій підбирають n , при якому $\eta = 1$:

n	R_n	R_c	R_o	η
1	398,1	143,8	105,6	26,1
5	398,1	143,8	105,6	5,2
10	398,1	143,8	105,6	2,6
15	398,1	143,8	105,6	1,7
20	398,1	143,8	105,6	1,3
25	398,1	143,8	105,6	1,1
26	398,1	143,8	105,6	1,0
27	398,1	143,8	105,6	0,9

Отже приймаємо кількість одиночних заземлюючих електродів рівною

26.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У ході виконання роботи було розроблено, реалізовано та досліджено автоматизовану систему керування процесом складання контактного роз'єму PIN Header із використанням промислового робота UR5. Проведені дослідження підтвердили ефективність впровадження роботизованих технологій у процеси точного електромеханічного складання, що традиційно характеризуються високими вимогами до точності позиціювання, стабільності траєкторій та повторюваності операцій. Створена система продемонструвала здатність забезпечувати високу якість виконання технологічних дій та суттєво зменшувати вплив людського чинника.

Експериментальні вимірювання часу окремих операцій дозволили встановити ключові фактори, що визначають тривалість загального циклу складання. Аналіз показав, що найбільший потенціал оптимізації закладено в скороченні зайвих переміщень UR5, вдосконаленні траєкторій руху та точному налаштуванні швидкісних режимів. У результаті проведеної оптимізації вдалося зменшити час виконання окремих дій на 12–25%, що комплексно забезпечило підвищення пропускну здатності системи до 30%. Це підтверджує, що правильно розроблена логіка керування, у поєднанні з належними параметрами маніпулятора, є визначальним чинником продуктивності роботизованого складання.

Також встановлено, що UR5 є ефективною платформою для виконання операцій високоточного складання, оскільки забезпечує необхідну повторюваність, стабільність рухів та можливість швидкої адаптації алгоритмів керування до різних типів контактних елементів. Система, розроблена в рамках дослідження, може бути масштабована й інтегрована у багатокомпонентні роботизовані виробничі лінії згідно з принципами Industry 4.0.

Загальні результати роботи демонструють, що застосування UR5 для складання PIN Header дозволяє не лише підвищити продуктивність і якість

виробничого процесу, але й створює основу для подальшої автоматизації та цифрової трансформації електронного виробництва. Запропоновані підходи та експериментальні висновки можуть бути використані для модернізації існуючих ліній, розробки нових роботизованих осередків та підвищення конкурентоспроможності підприємств.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Yang, X., Zhou, Z., Sorensen, J. H., Christensen, C. B., Ünal, M., & Zhang, X. Automation of SME Production with a Cobot System Powered by Learning-Based Vision. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 83, 102564, 2023.
2. Martin, A. S., Pinto, L. F. R., de Oliveira Neto, G. C., & Facchini, F. Collaborative Robot in Engine Assembly: A Socioeconomic Approach to Technological Advancement in Manufacturing. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 7(1), 2025
3. Baratta, A., Cimino, A., Gnoni, M. G., & Longo, F. Human Robot Collaboration in Industry 4.0: A Literature Review. *Procedia Computer Science*, 217, 1887–1895, 2023.
4. Dobrotvor, I., Stukhlyak, D., Buketov A., Mykytyshyn, A., Zoloty, R., & Totosko, O. (2018). Automation research of thermal and physical characteristics of particulate-filled epoxy composites. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*, 2(90), 124–132. <https://doi.org/10.31489/2018m2/124-132>
5. Zhang, K., Wang, C., Chen, H., Pan, J., Wang, M. Y., & Zhang, W. Vision-Based Six-Dimensional Peg-in-Hole for Practical Connector Insertion. In: *Proc. 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1771–1777, 2023.
6. Михайлов Є.П., Лінгур В.М. Маніпулятори та промислові роботи: навчальний посібник. – Одеса: ОНПУ, 2019. – 233 с.
7. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Крушельницький В.В. Мехатроніка: підручник. – Київ, 2020. – 404 с.
8. Хорольський В.П., Коренець Ю.М. Мехатроніка (мехатроніка та інтелектуальна автоматика): навч. посібник. – Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2023. – 342 с.

9. Chen, J., Luo, D., Xiao, Z., Yang, M., Qin, X., & Zhan, Y. Haptic–Vision Fusion for Accurate Position Identification in Robotic Multiple Peg-in-Hole Assembly. *Electronics*, 14(11), 2163, 2025
10. Jiang, T., Cui, H., & Cheng, X. A Calibration Strategy for Vision-Guided Robot Assembly System of Large Cabin. *Measurement*, 163, 107991, 2020.
11. Борисова Л.В. Автоматизовані системи управління технологічного процесу в хімічних виробництвах: курс лекцій. – Харків: НУЦЗУ, 2015. – 98 с.
12. Медвідь В. Р. Автоматизована система управління сервоприводами металорізального верстата / В. Р. Медвідь, О. І. Драбик // XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 7-8 грудня 2022 року. — Т. : ТНТУ, 2022. — С. 184.
13. Золотий Р. З. Розробка автоматизованих систем керування на базі контролерів ARDUINO / Роман Золотий, Андрій Недошитко // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 139.
14. Сидорко Ю. Д., Стухляк Д. П. Розробка та дослідження автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва цегли на базі платформи FIT // Тези XIII МНПК „Актуальні задачі сучасних технологій“, Тернопіль, 11-12 грудня 2024 року. 2024. С. 396–397.