

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ
УДК 681.5

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету (Директор ННІ)

конструювання та дизайну
(назва факультету (ННІ))

Зіновій РУЖИЛО
(підпис) (ПІБ)

— ” — 2024р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(підпис) (ПІБ)

— ” — 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Оптимізація режимів руху робота

з однією обертальною і двома поступальними ланками

(код і назва)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(код і назва)

Освітня програма Робототехнічні системи і комплекси сільськогосподарського виробництва

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.т.н. професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Юрій РОМАСЕВИЧ
(ПІБ)

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи

д.т.н. професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

К.Т.Н.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Віктор КРУШЕЛЬНИЦЬКИЙ
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

КАЛЕНІЧЕНКО Богдан Володимирович

(ПІБ студента)

КИЇВ – 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання

д.т.н., професор _____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь, (підпис) (ПІБ)
вчене звання)

— ” _____ 2024 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
КАЛЕНІЧЕНКО БОГДАН ВОЛОДИМИРОВИЧ

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність _____ 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Освітня програма _____ Робототехнічні системи і комплекси сільськогосподарського
(назва)
виробництва

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи _____

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РУХУ РОБОТА З ОДНІЄЮ ОБЕРТАЛЬНОЮ І

ДВОМА _____ ПОСТУПАЛЬНИМИ

ЛАНКАМИ

затверджена наказом ректора НУБіП України від — 29 ” грудня 2023 р. № 2400 –Є”

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ 2024.11.15
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи _____

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз літератури
2. Оптимізація режимів руху робота
3. Оптимізація висування руки маніпулятора
4. Охорона праці
5. Техніко економічне обрuntuвання

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання — ” _____ р.

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи _____ Ловеїкін В. С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ Крушельницький В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Каленіченко Б.В.
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1 Типи робіт та їх класифікація	9
1.2 Режими руху робіт	18
1.3 Аналіз досліджень щодо оптимізації режимів руху	23
1.4 Застосування робіт з обертально-поступальними ланками	27
РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ РУХУ МАНІПУЛЯТОРА	38
2.1. Визначення кінематичних характеристик захватного пристрою	38
2.2 Оптимізація енергетичного режиму руху захватного пристрою.	40
2.3. Оптимізація оптимального динамічного режиму руху захвату ..	42
2.4. Оптимізація комплексного режиму руху захвату	46
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ВИСУВАННЯ РУКИ РОБОТА- МАНІПУЛЯТОРА	54
3.1 Побудова схеми будови робота маніпулятора	54
3.2 Визначення оптимального режиму руху руки робота- маніпулятора при пуску	55

3.3 Побудова графіків системи керування за отриманими рівняннями	59
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	63
4.1. Типи інтерактивної взаємодії роботів з людиною в умовах забезпечення безпеки	64
4.2. Три основні підходи до безпеки праці в роботизованих середовищах	66
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	73
5.1. Розрахунок економічної вигоди від впровадження роботизації ..	73
5.2. Розрахунок економії на заробітній платі	74
5.3. Витрати на навчання та перекваліфікацію персоналу	76
ВИСНОВКИ	79
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА	80
ДОДАТКИ	86

РЕФЕРАТ

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження оптимізації режимів руху робота з однією обертальною і двома поступальними ланками, що забезпечує точне позиціонування та швидке переміщення до кінцевого положення. Представлено аналіз основних типів роботів, їх конструктивні особливості та переваги для різних виробничих завдань.

Перший розділ містить огляд літератури сучасних конструкцій та методів оптимізації руху роботів та маніпуляторів. Наведено застосування роботів і маніпуляторів у різних видах виробництва.

У другому розділі розглянуто математичні моделі та алгоритми, що дозволяють оптимізувати поступальний рух захватного пристрою вздовж обраної траєкторії. За траєкторію руху захвату без перешкод обрано пряму, що з'єднує початок і кінець руху, яка мінімізує енергоспоживання й підвищує продуктивність. Тут також зосереджено увагу на оптимізації руху захватного пристрою маніпулятора. Було проведено математичне моделювання для визначення параметрів, які сприяють мінімізації енергоспоживання при забезпеченні високої точності виконання транспортних операцій. Описані підходи можуть бути застосовані в промислових умовах, де важливою є висока швидкість і точність виконання транспортних робіт.

Третій розділ присвячений питанням охорони праці: заходам безпеки при роботі з маніпуляторами та зниженню ризиків для операторів. Описано шляхи забезпечення безпечного середовища для мінімізації аварій.

Четвертий розділ охоплює економічні аспекти роботизації, зокрема економію на витратах на робочу силу, розрахунки рентабельності інвестицій (ROI) і внутрішньої норми рентабельності (IRR). Результати свідчать про економічну доцільність автоматизації, що підвищує продуктивність і сприяє зниженню витрат.

Ключові слова: оптимізація, маніпулятор, робот, критерій, привод, захватний пристрій, автоматизація, зворотна задача кінематики.

ВСТУП

Сучасна робототехніка є однією з найперспективніших галузей, що активно розвивається та знаходить широке застосування у промисловості, медицині, логістиці та інших сферах. Різноманітні види роботів, залежно від їх кінематичної структури та функціональних можливостей, дозволяють автоматизувати складні виробничі процеси, покращуючи їхню ефективність, точність і швидкість виконання завдань.

Особливе місце серед промислових роботів займають роботи з комбінованою кінематикою, які мають як обертальні, так і поступальні ланки. Такі роботи характеризуються гнучкістю та високою маневровістю, що забезпечує виконання багатьох складних операцій. Зокрема, конфігурація з однією обертальною та двома поступальними ланками відкриває нові можливості для виконання точних і швидких маніпуляцій, що є важливим аспектом для виробничих середовищ, де висока точність і мінімальні затрати часу є критичними.

Ключову роль в ефективному функціонуванні роботів відіграють системи керування, які забезпечують злагоджену роботу всіх механічних компонентів та оптимізацію режимів руху. Системи керування для роботів виконують завдання, пов'язані з контролем і корекцією положення, швидкості та прискорення ланок, що дозволяє досягати високої точності і стабільності роботи. Саме за допомогою розумного управління можна не тільки реалізувати задану траєкторію руху, а й оптимізувати процес з точки зору енерговитрат, часу виконання операцій та зниження навантажень на конструкцію робота. Це стає можливим завдяки поєднанню різних підходів, зокрема, застосуванню адаптивних і оптимізаційних алгоритмів, що враховують специфіку руху кожної ланки.

Останнім часом особливої уваги набувають системи керування, що базуються на алгоритмах штучного інтелекту та машинного навчання. Завдяки використанню методів глибокого навчання, нейронних мереж і

генетичних алгоритмів, сучасні роботи здатні аналізувати великі обсяги даних у реальному часі, адаптуючи свої рухи до змінних умов. Такий підхід дозволяє значно підвищити продуктивність та точність роботи, адже системи керування можуть прогнозувати оптимальні траєкторії, враховуючи фактори, що важко врахувати традиційними методами. Це робить оптимізацію режимів руху не просто завданням для математичного моделювання, а інтегрованою системою, що базується на самонавчанні та адаптації, що особливо актуально для роботів, які працюють в умовах непередбачуваних змін.

Отже, оптимізація режимів руху робота не можлива без надійної системи керування, яка здатна адаптуватися до змінних умов і забезпечувати виконання завдань з найменшими затратами ресурсів. У цьому контексті даний розділ буде зосереджено на аналізі літератури щодо класифікації і кінематичних особливостей роботів з обертальними та поступальними ланками, методах оптимізації їхніх режимів руху, а також на характеристиці систем керування, які сприяють ефективній реалізації руху робота.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Типи роботів та їх класифікація

Роботи класифікуються за їх кінематичною структурою та типом рухових ланок, які визначають можливості переміщення та маніпуляції в робочому просторі. Класифікація основних типів роботів включає такі види:

Прямолінійні (картезіанські) роботи:

Ці роботи мають просту та зрозумілу конструкцію, яка включає три поступальні осі, що переміщаються по осях X, Y, і Z, утворюючи прямокутну робочу зону. Ця особливість робить їх дуже ефективними для завдань, які потребують високої точності та стабільності, таких як операції з підбору та розміщення, упаковка, складання компонентів і автоматизовані процеси у виробництві електроніки. Їхня конструкція забезпечує високу точність та простоту управління, особливо для задач, де потрібні прості прямолінійні переміщення, наприклад, у друкарській або складальній промисловості. Прямолінійні роботи часто використовуються в операціях підбору та розміщення, де необхідна прямокутна траєкторія [1].

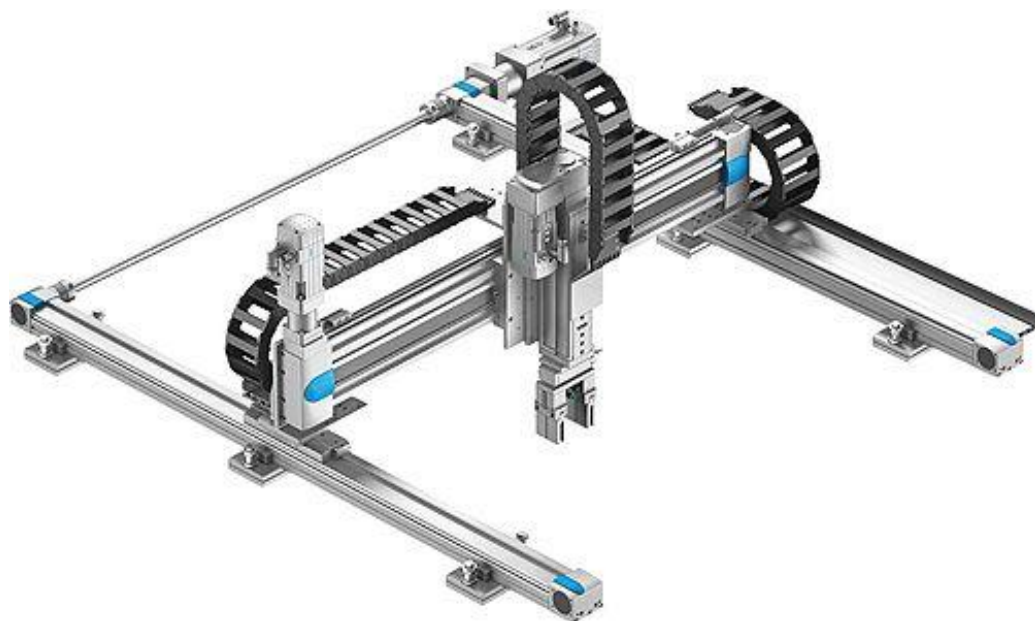


Рис.1.1.1. Картезіанський робот

Шарнірно-промислові роботи:

Також відомі як роботизовані маніпулятори з обертальними з'єднаннями, характеризуються високою маневровістю завдяки кільком обертальним ланкам. Ця конструкція дозволяє їм виконувати складні траєкторії та досягати важкодоступних місць, що робить їх особливо корисними в промислових умовах.

Шарнірні роботи зазвичай використовуються для завдань, де потрібна висока точність позиціонування, наприклад, у зварюванні та фарбуванні. Їхня конструкція дозволяє виконувати дрібні та точні рухи, забезпечуючи контрольоване і плавне переміщення кінцевого ефектора, а також високу швидкість і маневровість. Завдяки багатьом ступеням свободи шарнірні роботи можуть швидко змінювати положення та орієнтацію. Це дозволяє використовувати їх для завдань, що вимагають швидкого переміщення та гнучкості, таких як обслуговування обладнання та упаковка. [2].



Рис.1.1.2. Роботизована рука з 6-ти віссю

Портальні роботи:

Портальні роботи мають три поступальні осі, закріплені на порталній конструкції, що забезпечує їм значну робочу зону. Завдяки великій стабільності та точності, вони є ідеальними для обробки великогабаритних об'єктів, зокрема в таких галузях, як автомобільна промисловість, логістика та обробка матеріалів.

Завдяки своїй міцній конструкції, порталні роботи можуть переміщувати важкі об'єкти на великі відстані, що важливо для виробничих середовищ, де необхідно транспортувати матеріали або готові вироби між різними етапами процесу.

Портальна конструкція дозволяє адаптувати розміри робочої зони відповідно до конкретних вимог виробництва, забезпечуючи достатньо простору для обробки об'єктів різних розмірів і ваги. Це особливо корисно на виробництвах, де варіативність розмірів об'єктів вимагає гнучкості в налаштуванні. [3].



Рис.1.1.3. XYZ Stage Багатоосьовий позиціонуєчий стіл, порталний робот

SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm):

SCARA роботи вирізняються своєю здатністю виконувати швидкі та точні переміщення в горизонтальній площині. Ці роботи мають дві паралельні обертальні ланки, що дозволяє їм досягати високої маневровості в горизонтальній площині та обмеженої рухливості у вертикальній. Це робить SCARA-роботи ідеальними для складальних операцій, де потрібно швидко і точно позиціонування.

Завдяки своїй жорсткості та конструкції, SCARA-роботи здатні виконувати рухи з високою швидкістю та високою повторюваною точністю, що важливо для задач збирання, таких як установка компонентів на платах в електронній промисловості.

Завдяки точності та стабільності, SCARA-роботи ідеально підходять для операцій із дрібними компонентами, таких як збирання електронних деталей або установлення деталей у точні положення, що особливо важливо в машинобудівній промисловості.

SCARA-роботи часто використовуються в таких галузях, як виробництво електроніки, автомобілебудування та харчова промисловість, де необхідна висока продуктивність і точність для роботи зі швидко переміщуваними об'єктами. [4].



Рис.1.1.4. 4-осьовий робот Scara Robot

Дельта-роботи

Дельта-роботи складаються з трьох або більше паралельних важелів, які з'єднують кінцевий ефектор з основою, дозволяючи йому швидко переміщуватися в тривимірному просторі. Їхня конструкція забезпечує високу жорсткість та легкість, що дозволяє досягати великої швидкості та точності маніпуляцій. Кожен важіль приводиться в рух окремим двигуном, який забезпечує координацію і стабільність під час швидких рухів, що є критичним для операцій, що вимагають високої продуктивності.

Дельта-роботи відрізняються високою швидкістю та здатністю до швидкого підбору і розміщення об'єктів. Їх легка конструкція зменшує інерційні навантаження, дозволяючи досягати циклів швидких маніпуляцій. Це робить їх ідеальними для застосувань, де потрібна обробка великої кількості предметів за короткий час, наприклад, на виробничих лініях у харчовій промисловості. Крім того, завдяки своїй паралельній структурі, дельта-роботи демонструють високу точність і стабільність під час переміщення, що є важливим для маніпуляцій з крихкими або малими об'єктами.

Завдяки своїм технічним характеристикам, дельта-роботи забезпечують ефективну автоматизацію процесів, що вимагають швидкої обробки великої кількості об'єктів з високою точністю. [5]

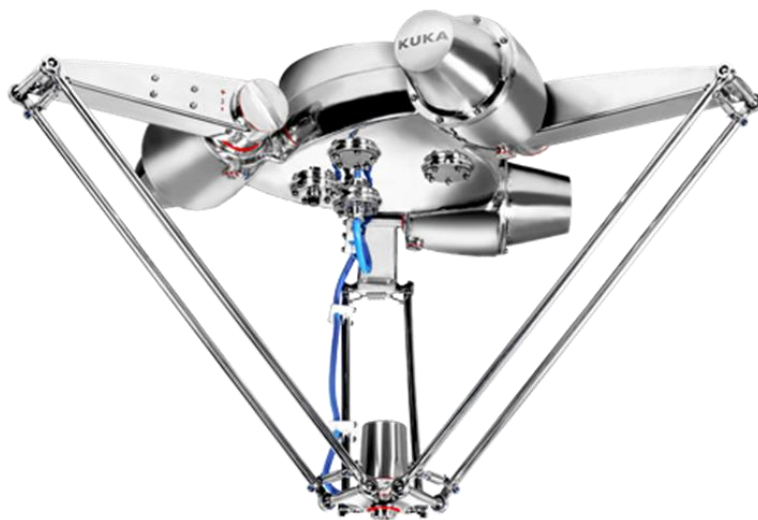


Рис.1.1.5. Pick-and-Place DELTA-Roboter

Автономні мобільні роботи

Цей тип роботів, може пересуватися в просторі самостійно, орієнтуючись у навколишньому середовищі, що робить їх особливо корисними для виконання завдань, де необхідна мобільність. Зазвичай мобільні роботи оснащені колесами, гусеницями або навіть ногами для пересування, а також сенсорами для сканування навколишнього середовища. Вони можуть виконувати різні операції, як у промислових умовах, так і в небезпечних зонах, недоступних для людини.

Автономні мобільні роботи здатні орієнтуватися у просторі завдяки системам навігації, які включають лазерні сканери (LiDAR), камери та ультразвукові сенсори. Використовуючи технології SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), вони створюють та оновлюють карту середовища, що дозволяє їм точно визначати своє положення та планувати маршрут.

Автономні роботи здатні аналізувати ситуацію і приймати рішення на основі змін у середовищі. Це включає адаптацію маршруту, коригування швидкості, а також динамічну взаємодію з іншими об'єктами. Завдяки машинному навчанню та алгоритмам штучного інтелекту, вони можуть поліпшувати свої навички з часом.

Більшість роботів розроблені з урахуванням енергетичної ефективності, що дозволяє їм працювати протягом тривалого часу без підзарядки. Деякі моделі мають системи автоматичного повернення на зарядну станцію, що робить їх більш автономними.[6]



Рис.1.1.6. Автономні мобільні роботи (AMRs)

Роботи з обертально-поступальними ланками та вибір конфігурації

Роботи з обертально-поступальними ланками поєднують обертальні та поступальні з'єднання, що забезпечує їм більшу функціональність і здатність виконувати завдання в умовах, де потрібні як складні маневри, так і точне позиціонування. Комбіновані типи з'єднань дозволяють цим роботам обертатися навколо заданих осей, а також переміщатися лінійно в різних напрямках, що створює широкі можливості для роботи в тривимірному просторі.

Обертально-поступальні роботи поєднують такі ключові переваги:

Гнучкість і маневровість. Обертальні ланки надають можливість обертання навколо однієї або кількох осей, що дозволяє роботу змінювати орієнтацію та кут нахилу свого маніпулятора. Завдяки цьому такі роботи здатні досягати важкодоступних точок, що особливо корисно у складальних процесах або роботі з об'єктами неправильної форми.

Точність лінійного переміщення. Поступальні ланки забезпечують точне лінійне переміщення, що особливо цінно для роботи в обмежених просторах, де потрібні прямолінійні рухи. Вони дозволяють роботам зберігати стабільність і точність при маніпуляціях, що потребують детального позиціонування, наприклад, під час складання електронних компонентів чи ювелірних виробів.

Стабільність конструкції. Завдяки поєднанню обертальних і поступальних з'єднань роботи з обертально-поступальними ланками мають відносно компактну та стійку структуру, яка дозволяє їм витримувати навантаження і зберігати стабільність навіть при виконанні швидких рухів або зміні траєкторії. Це робить їх особливо корисними в промислових умовах, де стабільність є важливим фактором.

Швидкість адаптації до змінної траєкторії. Завдяки комбінованій кінематиці обертально-поступальні роботи можуть швидко адаптуватися до нових умов і змін в траєкторії. Це особливо важливо для задач, де траєкторія руху може змінюватися в залежності від об'єкта або зовнішніх факторів.

Вибір конфігурації з однією обертальною та двома поступальними ланками:

Конфігурація з однією обертальною і двома поступальними ланками є оптимальною для задач, де потрібна висока точність і швидка адаптація до змінного робочого середовища. Така конструкція дозволяє одночасно досягати стабільності в лінійних рухах і маневровості в обертальних. Двоступеневі поступальні ланки забезпечують лінійний рух у двох взаємоперпендикулярних напрямках, що полегшує точне позиціонування. Одна обертальна ланка додає можливість повороту в площині, що дозволяє гнучко змінювати орієнтацію маніпулятора без втрати точності.

Ця конфігурація є ідеальним вибором для ряду промислових завдань, де потрібно забезпечити баланс між маневровістю і простотою управління, а також високою точністю, стабільністю та енергоефективністю, що робить її придатною для роботи в динамічному середовищі з обмеженим простором.

Обґрунтування конфігурації з однією обертальною та двома поступальними ланками

Конфігурація робота з однією обертальною та двома поступальними ланками є оптимальним вибором для промислових застосувань, що вимагають високої точності, стабільності та маневровості. Така комбінація кінематичних ланок забезпечує не лише просте управління, але й підвищену енергоефективність і адаптацію до складних виробничих умов.

Маневровість. Завдяки обертальному з'єднанню робот здатний досягати широкого кута повороту, що дозволяє легко змінювати орієнтацію інструмента або робочого елемента в просторі. Це є значною перевагою, особливо для завдань, де потрібен доступ під різними кутами або в обмежених просторах. Така маневровість дозволяє роботу виконувати складні траєкторії, що особливо важливо для операцій монтажу, зварювання або роботи з нестандартними за формою об'єктами, де потрібні додаткові обертальні маніпуляції для точного позиціонування.

Простота управління та енергоефективність. Використання конфігурації з двома поступальними та однією обертальною ланкою знижує енерговитрати в порівнянні з повністю обертальними конструкціями, оскільки основний рух відбувається по прямолінійній траєкторії, що вимагає меншого навантаження на систему. Поступальні ланки, рухаючись у фіксованих площинах, спрощують розрахунки траєкторії та знижують енергоспоживання, що є важливим фактором для тривалих циклів роботи. Зважаючи на це, такі роботи можуть забезпечувати високу продуктивність при економічно ефективному споживанні енергії.

Точність у складальних операціях. Дві поступальні ланки, що рухаються у взаємоперпендикулярних напрямках, надають роботу можливість точного лінійного позиціонування, що є важливим для таких задач, як збирання компонентів або виконання точних рухів у рамках технологічного процесу. Така конфігурація дозволяє чітко контролювати розташування маніпулятора відносно об'єкта без значних обертальних зсувів, що підвищує точність виконання завдання. Обертальна ланка, своєю чергою, додає гнучкість, дозволяючи легко змінювати орієнтацію інструмента для зручного підходу до об'єкта, що особливо важливо при виконанні дрібних операцій у складальних процесах або в роботі з нестандартними деталями.

Стійкість конструкції та мінімізація вібрацій. Конструкція з однією обертальною і двома поступальними ланками також забезпечує високу стійкість та мінімізацію вібрацій, оскільки більшість переміщень

відбувається по прямолінійних траєкторіях. Відсутність багатьох обертальних ланок знижує інерційні навантаження, що виникають при швидких змінах напрямку. Це знижує ризик механічних деформацій та вібрацій, що може вплинути на якість виконання операцій.

Гнучкість застосування. Дана конфігурація є універсальною для багатьох виробничих процесів, адже дозволяє легко адаптувати рухи робота до змінних умов, не вимагаючи складної переконфігурації. Це робить її ефективною для середовищ, де варіативність завдань і швидка зміна продукції є частими вимогами. [7]

Таким чином, конфігурація з однією обертальною та двома поступальними ланками забезпечує роботам баланс між точністю, маневровістю та стабільністю, що робить її ідеальною для застосування у складальних, зварювальних і транспортних операціях, де необхідно одночасно досягати високої точності та гнучкості.

1.2 Режими руху роботів

Для роботів-маніпуляторів існує кілька режимів руху, які забезпечують різноманітні способи виконання завдань залежно від специфіки їх функцій та робочих умов. Кожен з цих режимів має свої особливості, переваги та сфери застосування, що дозволяє адаптувати роботи до різних виробничих процесів.

Детальніший опис наведено нижче основних режимів руху, що використовуються у робототехніці:

1. Режим руху по точках (Point-to-Point, PTP)

Цей режим є одним із найбільш базових і передбачає, що робот переміщується з однієї фіксованої точки до іншої за найкоротшим шляхом без урахування точної траєкторії між ними. Використовується для завдань, де немає потреби в контролі проміжних точок, а важливо лише дістатися кінцевого положення. Застосування:

Прості маніпуляції, як-от захоплення та розкладання об'єктів на виробничій лінії.

Операції завантаження та розвантаження, де пріоритетом є швидке переміщення між пунктами.

Завдання, де не потрібно слідкувати за траєкторією через відсутність ризику зіткнення.

2. Режим руху по траєкторії (Path)

У режимі руху по траєкторії робот слідує за заздалегідь визначеною траєкторією, яка складається з багатьох точок або ліній. Це дозволяє виконувати плавний рух та уникати перешкод або небезпечних зон. Використання траєкторії підходить для завдань, де важлива точна відповідність траєкторії:

Зварювальні роботи, де потрібно зберігати однакову відстань між інструментом та матеріалом.

Операції нанесення клею, фарби або різання, що потребують точного слідування траєкторії.

Завдання, де об'єкт, з яким взаємодіє робот, рухається або змінює положення.

3. Режим руху по координатам (Coordinate)

У цьому режимі руху роботу задається конкретна координата в просторі, що дозволяє точно перемістити маніпулятор в певне положення з високою точністю. Цей метод забезпечує легке досягнення цільових координат у тривимірному просторі. Застосовується для:

Операцій складання, де кожен компонент повинен бути точно розміщений на своїй позиції.

Технічних перевірок та калібрування, де важливо забезпечити фіксоване положення в просторі.

Взаємодії з об'єктами, розташованими на різній висоті або відстані від
робота.

4. Режим руху по силі (Force)

У режимі руху по силі робот реагує на зовнішні сили, що впливають на нього, і коригує свій рух залежно від цих сил. Це дозволяє більш делікатну та гнучку взаємодію з об'єктами нестандартної форми або вагою. Використовується для:

Монтажу об'єктів, які потребують обережного тиску та вирівнювання.

Роботи з крихкими об'єктами, де потрібно уникати надмірної сили.

Завдань, які вимагають взаємодії із середовищем, що чинить опір, наприклад, обробка поверхні або полірування.

5. Режим руху по швидкості (Velocity)

Цей режим задає певну швидкість руху робота, що забезпечує рівномірне переміщення. Швидкість може бути визначена у метрах за секунду (лінійне переміщення) або градусах за секунду (обертальне). Такий режим є ефективним у завданнях, де потрібно зберігати постійну швидкість:

Операції транспортування, де важливо зберігати стабільний темп руху.

Робота з об'єктами, що потребують однакової обробки за часом (наприклад, покриття клеєм).

Завдання, що вимагають контролю швидкості для безпеки під час взаємодії з людьми.

6. Режим руху по інерції (Inertia)

У цьому режимі робот продовжує рух з визначеною швидкістю після того, як зовнішній вплив припинився. Це дозволяє роботу підтримувати плавний рух і зменшувати зношування обладнання. Застосовується для:

Переміщення важких вантажів на далекі відстані, де різка зупинка небажана.

Застосування в логістичних процесах, де потрібна плавність і стабільність руху.

Завдань, які вимагають мінімального рівня вібрацій при збереженні швидкості.

7. Режим руху по градієнту (Gradient)

Цей режим дозволяє роботу виконувати оптимізацію руху, націлену на мінімізацію або максимізацію певного критерію, наприклад, мінімізацію шляху чи витрат енергії. Він підходить для:

Завдань оптимізації траєкторії між двома точками з урахуванням навколишніх умов.

Роботи, де потрібно зберігати оптимальну швидкість для забезпечення продуктивності.

Завдань із пошуку оптимальної позиції для зменшення енергоспоживання.

8. Режим руху по програмі (Programmed)

У цьому режимі руху робот слідує за наперед визначеною програмою, що описує детальну послідовність рухів. Це дозволяє виконувати комплексні операції, що потребують численних різних рухів і дій. Використовується для:

Завдань, що повторюються, і вимагають автоматизації, таких як збирання або пайка.

Процесів, де важлива послідовність дій і неможливо вносити корективи в реальному часі.

Автоматизованих операцій із тривалими циклами, як-от тестування або транспортування.

9. Режим руху по зоні (Zone)

У цьому режимі роботу визначають певні зони, в яких він повинен працювати, з обмеженням його переміщення за межі цих зон. Це дозволяє створити певний робочий простір для забезпечення безпеки та точності. Застосовується для:

Роботи в умовах, де є необхідність уникати перетину визначених областей.

Забезпечення безпеки в зоні, де можуть перебувати люди або інші машини.

Завдань, де важливо контролювати робочий простір і уникати виходу за його межі. [8,9]

Кожен із цих режимів руху дозволяє роботу адаптуватися до конкретних вимог задачі, зберігаючи ефективність, точність та безпеку. Вибір режиму залежить від конкретних потреб виробничого процесу та умов експлуатації.

1.3 Аналіз досліджень щодо оптимізації режимів руху

Оптимізація режимів руху роботів є важливою складовою сучасних досліджень у сфері робототехніки. У науковій літературі представлено безліч підходів до покращення ефективності та продуктивності роботи маніпуляторів. Аналіз проведених досліджень дозволяє виявити основні напрямки, методи та технології, які використовуються для оптимізації режимів руху.

Розглянемо деякі наукові публікації, які висвітлюють різноманітні підходи та технології оптимізації руху, що можуть бути корисними для аналізу нашої теми.

Автори Чандер, Мукерджі, Шивлінг і Сінгла представляють модифіковане формулювання рівнянь Ейлера–Лагранжа для аналізу динаміки ходи людини. Вони підкреслюють, що традиційне формулювання передбачає фіксовану базову систему відліку, що може призводити до неточностей при застосуванні до рухомої системи відліку в контексті аналізу людської ходи. У статті запропоновано адаптацію рівнянь, розроблених для роботизованих маніпуляторів із фіксованою базою, з урахуванням динаміки руху базової системи відносно інерціальної системи, розташованої поза людським тілом.

Основна мета модифікації — підвищення точності розрахунку крутних моментів і сил у суглобах нижніх кінцівок, що є критичним для

аналізу ходи, розробки протезів і екзоскелетів. Для оцінки застосовності запропонованої моделі були використані три набори даних з фазами ходи та бігу. Отримані крутні моменти були порівняні з еталонними значеннями шляхом розрахунку середньої абсолютної похибки і аналізу графіків Бланда–Альтмана, які продемонстрували високу відповідність між запропонованою моделлю та опублікованими даними.

Запропоноване формулювання демонструє цінність у створенні надійних моделей для аналізу руху людини, які можуть знайти застосування в галузі розробки ортопедичних пристроїв. Це робить дану публікацію важливим джерелом для дослідників у сфері біомеханіки та робототехніки, які працюють над оптимізацією механізмів, що взаємодіють з людиною.[10]

У статті автори De La Melena та Duan представляють новий планарно-паралельний маніпулятор (PPM) із двома ступенями свободи, спеціально розроблений для застосування в 3D-друці з нескінченною віссю. На відміну від традиційних конструкцій, що вимагають підтримки порталу та мають високі вимоги до руху маси, представлена конструкція PPM спрямована на зменшення загальної ваги, що дозволяє підвищити швидкість роботи, обмежуючи робочу зону.

Основною ідеєю інноваційної конструкції є розділення руху гарячої частини від руху двигуна, що зменшує навантаження та забезпечує підвищену швидкість. Двигуни прикріплені до рами, і через систему шківів та важелів забезпечують керування гарячим кінцем. Автори також розробили кінематичні та динамічні рівняння, провели аналіз методом кінцевих елементів для критичних компонентів і випробували прототип.

Метаевристичний метод оптимізації було використано для визначення оптимальних конструктивних параметрів, таких як довжина плеча з'єднувачів, з метою покращення динамічних характеристик. Результати підтвердили стійкість і надійність PPM під час роботи, що свідчить про його життєздатність для нескінченного 3D-друку.

Ця робота є цінним джерелом для дослідників, які займаються розробкою нових конструкцій для 3D-друку, і демонструє перспективи використання кутового PPM у майбутніх проектах, що потребують інноваційних рішень для безперервного друку.[11]

У цій статті автори Ян Шенлі, Ву Чжіган, Мен Дешань, Лі Цінцзюнь та Шао Ке досліджують динамічні аспекти роботів, що здійснюють орбітальні рухи для складання космічних конструкцій. Такий метод є перспективним для будівництва великих космічних об'єктів, але динамічні ефекти, які виникають через зв'язок між роботом і конструкцією під час пересування по її поверхні, створюють нові виклики для інженерії. Автори запропонували модель зв'язаної динаміки, яка базується на рівнянні Лагранжа та моделі балки Ейлера-Бернуллі, що дозволяє передбачити динамічну реакцію робота при переміщенні.

Ключовою метою дослідження є оптимізація ходи робота для мінімізації вібрацій конструкції, спричинених його рухом. Автори виявили, що частота кроків робота має значний вплив на динамічну стабільність конструкції, а тому частоту кроків слід вибирати так, щоб уникати резонансу з власною частотою космічної конструкції. Крім того, результати моделювання показують, що зменшення довжини кроку та висоти підйому робота сприяє зниженню вібрацій.

Це дослідження надає важливу інформацію для проектування та оптимізації ходи роботів, що будуть використовуватися в космічному будівництві, і є цінним ресурсом для подальшого розвитку космічної робототехніки.[12]

У цій статті автори Чіу-Хунг Чен, Лі Чі-Куанг та Фу-І Чоу пропонують багатокритеріальний підхід для оптимізації задач призначення послідовностей завдань для колаборативних роботів, орієнтуючись на забезпечення безколізійної роботи. В умовах сучасної автоматизації виробничих процесів проблема зіткнень між роботами, що працюють

одночасно, є важливим викликом, оскільки вона ускладнює планування та зменшує ефективність процесів.

Замість традиційних методів, які часто обмежуються локальними рішеннями або підходом «майстер-слуга», автори представляють глобальний метод оптимізації, що охоплює кілька аспектів. Серед них — автоматичне призначення завдань (RTSA), вибір інверсної кінематики (ІК), безколізійне управління в просторі суглобів та досягнення різних виробничих цілей. Оскільки оптимізація RTSA є NP-складною задачею, у статті пропонується застосування гібридного генетичного алгоритму NSGA-III, що інтегрує стратегію на основі відстані Геммінга та жадібний підхід для покращення розмаїття рішень та їхньої якості.

Ефективність методу перевірялась у симуляціях, де основними показниками були час виконання завдань та балансування навантаження. Результати показали, що запропонований підхід досягає Pareto-оптимальних рішень, що дозволяє покращити ефективність колаборативного виробництва. Важливо, що запропонований метод перевершив традиційні підходи, що робить його перспективним для майбутніх досліджень оптимізації режимів руху роботів у контексті комплексної автоматизації виробництва.[13]

1.4 Застосування роботів з обертально-поступальними ланками

Роботи з обертально-поступальними ланками відіграють важливу роль у сучасній промисловості завдяки своїй здатності поєднувати обертальний і поступальний рухи. Така конфігурація робота дозволяє йому працювати в обмежених просторах і виконувати складні маніпуляції з високою точністю, що є особливо корисним у завданнях, де точність руху та маневреність мають вирішальне значення. Застосування таких роботів розширюється від традиційної промисловості до новітніх сфер, таких як медицина, наукові дослідження, логістика та будівництво.

Із розвитком сучасних технологій і появою нових матеріалів роботи з обертально-поступальними ланками стають ще більш затребуваними, оскільки вони здатні ефективно виконувати автоматизовані завдання, які раніше потребували людського втручання. Це дозволяє зменшити витрати на виробництво, підвищити безпеку робіт і збільшити продуктивність у різних галузях. Використання таких роботів у складних умовах також сприяє зменшенню ризиків, пов'язаних з людським фактором, і забезпечує більш стабільні результати за рахунок точного програмування траєкторій і режимів руху. Основні сфери застосування таких роботів наведені нижче.[14-16]

1. Промислове збирання та обробка матеріалів

Роботи з обертально-поступальними ланками набули широкого застосування в сфері промислового збирання та обробки матеріалів завдяки своїй здатності виконувати швидкі та точні маніпуляції в обмеженому просторі. У таких роботах поєднання обертальних та лінійних рухів забезпечує високу гнучкість і точність під час виконання завдань, що є ключовим для швидкісного та якісного збирання елементів або обробки матеріалів. Це дозволяє ефективно автоматизувати операції, які традиційно потребували великих зусиль від працівників і несли високий ризик помилок.

У сфері збирання роботи з обертально-поступальними ланками використовуються для точного розташування і встановлення деталей, що

знижує ймовірність помилок і значно скорочує час виробництва. Завдяки цьому підприємства можуть підвищити продуктивність і якість своєї продукції. Наприклад, роботи можуть використовуватися для встановлення мікросхем у процесорах, де потрібна виняткова точність для забезпечення коректної роботи електронних компонентів бці матеріалів роботи з обертально-поступальними ланками часто застосовують у складних процесах, таких як зварювання, шліфування, різання або нанесення покриття. Вони можуть працювати на високих швидкостях, забезпечуючи рівномірний розподіл зусиль і точність у роботі з матеріалами різної міцності й твердості. Наприклад, робот KUKA (рис.1.4.1) з обертально-поступальними ланками здатний виконувати обробку металу з високою точністю, що дозволяє уникати дефектів та зменшувати відходи .[17]



Рис.1.4.1. Промислові роботи KUKA

Сучасні інструменти, такі як машинне навчання і алгоритми оптимізації, також допомагають у покращенні функціональності таких роботів. Вони можуть адаптуватися до різних типів матеріалів, що особливо

корисно у виробництві електроніки та автомобільних компонентів, де необхідна точна робота з деталями різної форми та розміру .

2. Логістика та складські операції

Роботи з обертально-поступальними ланками стають дедалі важливішими в сфері логістики та складських операцій завдяки своїй здатності підвищувати ефективність, швидкість і точність обробки товарів. Ці технології автоматизують численні процеси, що дозволяє зменшити витрати та покращити загальний сервіс.

Автоматизація збирання замовлень. Завдяки роботам, які можуть маневрувати в обмежених просторах, компанії можуть автоматизувати процеси збирання замовлень. Роботи виконують завдання з вибору і пакування товарів, що скорочує час обробки замовлень і зменшує ймовірність помилок. Цей процес значно покращує обслуговування клієнтів, зменшуючи час доставки.[18.19]



Рис.1.4.2. Автоматизований логістичний процес

Переміщення вантажів. Роботи, здатні піднімати та переміщувати важкі вантажі, суттєво знижують ризик травм для працівників. Використання таких роботів дозволяє зменшити фізичне навантаження на людей, покращуючи безпеку на складах і підвищуючи продуктивність.

Оптимізація простору. Маневреність роботів дозволяє максимально використовувати складські приміщення, зменшуючи площу, що займається товарами, і підвищуючи ефективність зберігання. Роботи можуть виконувати завдання в тісних просторах, чого важко досягти традиційними методами.

Моніторинг і управління запасами. Роботи також можуть виконувати інвентаризацію в автоматичному режимі, що сприяє підтримці точності даних про наявність товарів. Ця автоматизація дозволяє підприємствам своєчасно поповнювати запаси і уникати ситуацій з нестачею товарів.

Системи управління транспортом. Роботи можуть інтегруватися в системи управління логістикою, автоматизуючи транспортування товарів між ділянками складу. Це підвищує загальну ефективність операцій і зменшує витрати на перевезення.

3. Медичні маніпуляції та хірургія

Роботи з обертально-поступальними ланками знаходять все більше застосувань у медичних маніпуляціях та хірургії, що суттєво покращує результати лікування та підвищує безпеку пацієнтів. Завдяки своїй точності і здатності виконувати складні рухи, ці роботи стають важливими інструментами в руках хірургів.



Рис.1.4.3.Робот хірург от UPM

Роботизовані хірургічні системи. Такі системи, як da Vinci Surgical System, дозволяють лікарям виконувати мінімально інвазивні процедури з високою точністю. Ці роботи надають хірургам можливість виконувати складні операції через невеликі розрізи, зменшуючи ризик ускладнень і час відновлення пацієнтів. описують успіхи та виклики, пов'язані з використанням роботизованих систем у хірургії.

Дослідження в області телехірургії. З розвитком телекомунікаційних технологій з'являється можливість виконання операцій на відстані. Це стає особливо актуальним в умовах віддалених регіонів, де доступ до кваліфікованих хірургів обмежений. Розглядають потенціал телехірургії та вплив на медичну практику.

Роботи в реабілітації. Після хірургічних втручань роботизовані системи також можуть використовуватися для реабілітації пацієнтів. Вони допомагають пацієнтам відновлювати рухливість, проводячи адаптивні програми тренування, що підвищують ефективність реабілітаційного процесу. Дослідження показують, що використання роботів у реабілітації може призводити до кращих результатів порівняно з традиційними методами. Демонструють ефективність роботизованих реабілітаційних систем.

Медичні маніпуляції з високою точністю. Роботи можуть виконувати різноманітні медичні маніпуляції, такі як ін'єкції, біопсії та інші процедури, які вимагають високої точності. Це дозволяє зменшити ризик ускладнень і підвищити ефективність лікування. Дослідження показують, що використання роботів у таких маніпуляціях може призводити до зменшення ускладнень і покращення задоволеності пацієнтів.

Тренування та підготовка хірургів. Роботизовані симулятори допомагають хірургам відточувати свої навички перед проведенням реальних операцій. Вони дозволяють лікарям практикуватися в складних процедурах у безпечному середовищі. Симулятори покращують навчання медичних спеціалістів.[20]

Загалом, роботи з обертально-поступальними ланками в медицині та хірургії не тільки покращують результати лікування, але й підвищують безпеку пацієнтів, що робить їх важливими інструментами у сучасній медицині.

4. Наукові дослідження та лабораторна автоматизація

У наукових лабораторіях роботи з обертально-поступальними ланками застосовуються для точних маніпуляцій з малими і крихкими об'єктами, що необхідні при дослідженнях мікрочастинок, біологічних структур або хімічних реакцій. Такі роботи дозволяють точно позиціонувати маніпулятор без надмірного впливу на об'єкт, що важливо при роботі з чутливими матеріалами.

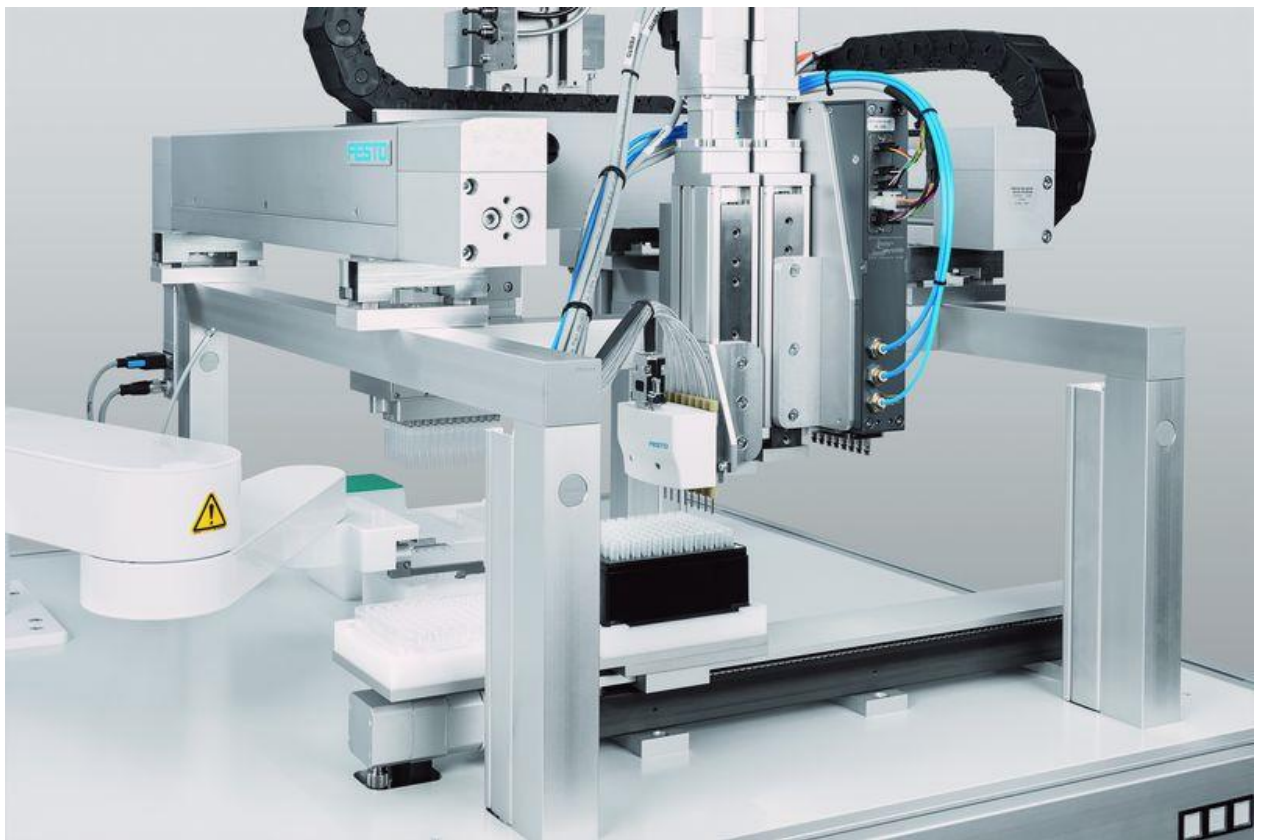


Рис.1.4.4. Лабораторна автоматизація

Автоматизація лабораторних процесів. Роботи можуть автоматизувати рутинні лабораторні процедури, такі як відбір проб, змішування реагентів і проведення аналізів. Це знижує ймовірність людської помилки і підвищує ефективність досліджень. Наприклад, автоматизовані системи дозволяють проводити тисячі експериментів одночасно, що значно прискорює процес збору даних.

Висока точність у біомедичних дослідженнях. Роботи використовуються для виконання складних маніпуляцій у біомедичних дослідженнях, таких як геноміка і протеоміка. Вони забезпечують точність, необхідну для роботи з живими клітинами та біологічними зразками.

Клітинна біологія та роботизовані платформи. Використання роботизованих платформ у клітинній біології дозволяє вивчати взаємодію між клітинами та їх середовищем. Роботи можуть автоматизувати процеси, такі як культивування клітин, спостереження за їхньою поведінкою та збору даних. Це відкриває нові можливості для вивчення патологій і терапевтичних втручань.

Машинне навчання та обробка даних. Роботизовані системи часто інтегруються з технологіями машинного навчання, що дозволяє оптимізувати експерименти та аналізувати великі обсяги даних. Вони можуть автоматично налаштовувати параметри експерименту на основі попередніх результатів, що підвищує якість досліджень.

Вдосконалення протоколів і стандартів. Використання роботів у лабораторних дослідженнях також сприяє стандартизації протоколів, що забезпечує більшу повторюваність результатів. Це важливо для впровадження нових методів і технологій у медичній практиці.

В цілому, роботизовані системи в наукових дослідженнях та лабораторній автоматизації не тільки підвищують ефективність, але й сприяють розвитку нових технологій, які можуть істотно змінити підходи до досліджень у різних наукових галузях. [21]

5. Будівництво та зварювальні роботи

У будівництві роботи з обертально-поступальними ланками використовуються для точного зварювання та встановлення компонентів у важкодоступних місцях. Вони можуть точно виконувати зварювальні шви на металоконструкціях, забезпечуючи стабільність конструкцій. Обертальні ланки робота дозволяють йому працювати під різними кутами, що є критичним для операцій в умовах складних архітектурних конструкцій. [22]

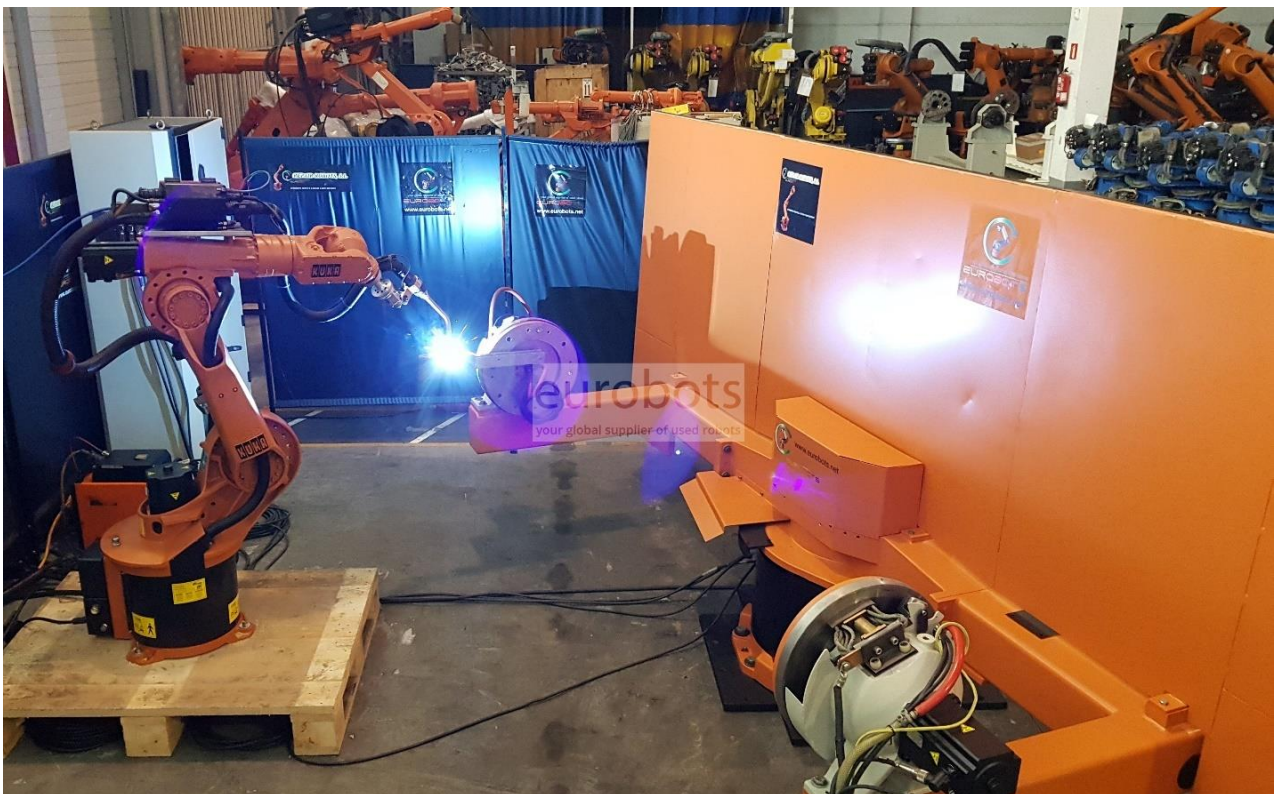


Рис.1.4.5. Зварювальний робот Кука KR15

Автоматизація зварювальних процесів. Роботи використовуються для автоматизації зварювання в різних галузях промисловості, включаючи автомобільну, авіаційну та виробництво металоконструкцій. Роботи можуть виконувати зварювання в важкодоступних місцях і в умовах, які небезпечні для людей. Системи зварювання на основі робототехніки забезпечують

високу точність і повторюваність, що критично важливо для якості зварних швів.

Побудова складних конструкцій. Роботи з обертально-поступальними ланками можуть виконувати складні маніпуляції при зведенні будівель і споруд. Вони здатні піднімати важкі елементи, розміщувати їх на місці, а також виконувати точні монтажні роботи.

Забезпечення безпеки. Автоматизація зварювальних робіт за допомогою роботів знижує ризики для працівників, оскільки зварювання часто пов'язане з небезпечними умовами, такими як висока температура, шкідливі дим та іскри. Роботи можуть виконувати небезпечні завдання без ризику для здоров'я людей.

Оптимізація ресурсів. Використання робототехніки у будівництві та зварювальних роботах також дозволяє зменшити витрати на матеріали та енергію. Роботи можуть працювати з високою точністю, що зменшує відходи та покращує ефективність використання ресурсів.

Розвиток технологій. Постійний розвиток робототехніки та зварювальних технологій веде до нових інновацій, які відкривають нові можливості для автоматизації в будівництві. Наприклад, роботи можуть бути оснащені системами візуалізації та датчиками для кращого розуміння навколишнього середовища, що дозволяє їм адаптуватися до змін у процесі роботи. [23]

Таким чином, роботи з обертально-поступальними ланками стають невід'ємною частиною сучасних будівельних процесів, сприяючи підвищенню продуктивності, безпеки та ефективності в галузі зварювальних робіт і будівництва в цілому.

Ці сфери показують, що роботи з обертально-поступальними ланками здатні забезпечити високу точність і маневреність, що дозволяє ефективно вирішувати завдання різної складності в багатьох галузях.

РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ РУХУ МАНІПУЛЯТОРА

2.1. Визначення кінематичних характеристик захватного пристрою

Для дослідження режиму руху ланок маніпулятора використаємо маніпулятор з двома поступальними та однією обертальною ланками, схема якого наведена на рис. 2.1.1.

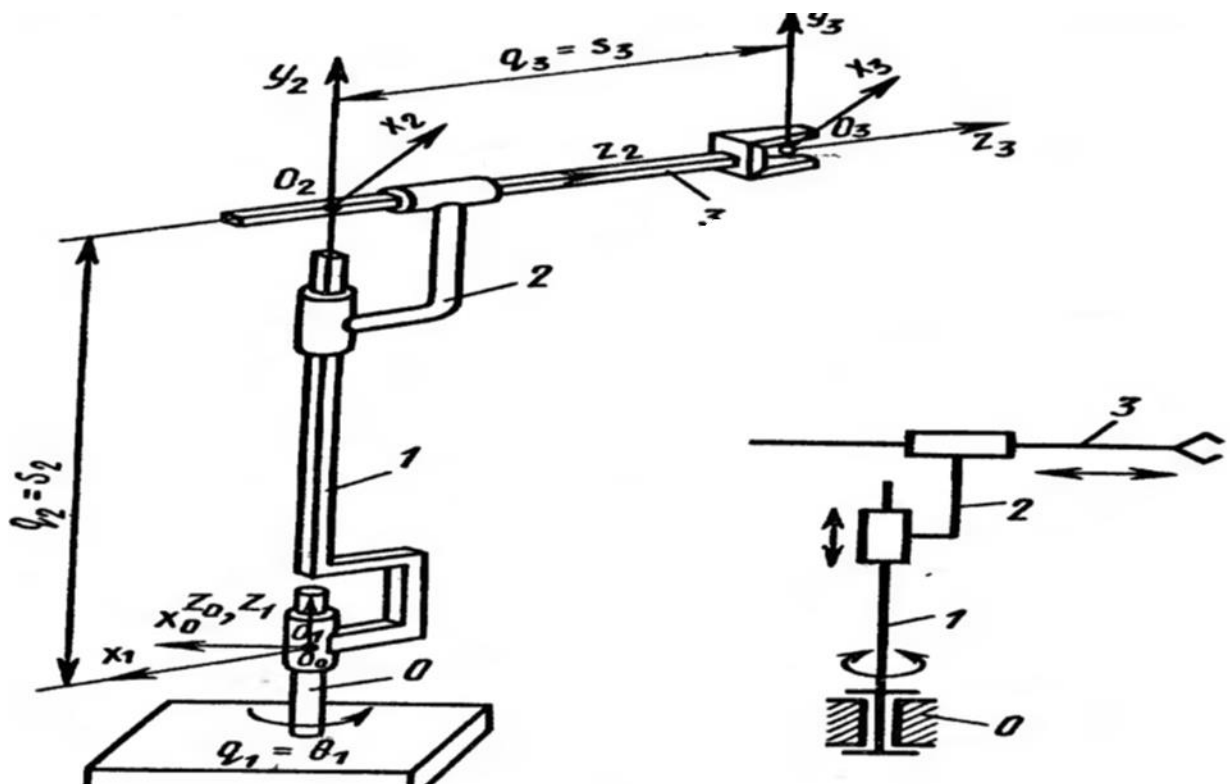


Рис.2.1.1. Схема маніпулятора з двома поступальними і однією обертальною ланками

Представлений маніпулятор складається з нерухомої стійки – 0, обертальної ланки – 1, що обертається навколо нерухомої стійки, ланки – 2, що здійснює вертикальний поступальний рух відносно ланки -1 та ланки -3, яка поступально рухається в горизонтальній площині відносно ланки -2. За узагальнені координати обрані: θ_1 – кутова координата повороту першої ланки; S_2 – лінійна координата вертикального переміщення другої ланки; S_3 – лінійна координата горизонтального переміщення третьої ланки.

Тоді кінематичні характеристики (переміщення, швидкість та пришвидшення) руху захватного пристрою визначаються наступними залежностями:

$$\xi = \sqrt{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}; \quad (2.2)$$

$$\dot{\xi} = \frac{d\xi}{dt} = \frac{(y - y_0)\dot{y} + (z - z_0)\dot{z}}{\sqrt{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}}; \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\xi} &= \frac{d^2\xi}{dt^2} \\ &= \frac{[(y - y_0)\dot{y} + \dot{y}^2 + (z - z_0)\dot{z} + \dot{z}^2]\sqrt{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} - [(y - y_0)\dot{y} + (z - z_0)\dot{z}]^2}{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} * \\ &\quad * \frac{(y - y_0)\dot{y} + (z - z_0)\dot{z}}{\sqrt{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \\ &\quad * \frac{\sqrt{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}}{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \\ \ddot{\xi} &= \frac{[(y - y_0)\dot{y} + (z - z_0)\dot{z} + \dot{y}^2 + \dot{z}^2] * [(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2] - [(y - y_0)\dot{y} + (z - z_0)\dot{z}]^2}{[(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.2 Оптимізація енергетичного режиму руху захватного пристрою

Визначимо оптимальний енергетичний режим руху захвату вздовж прямої ξ на ділянці 0-1. [25] За критерій оптимізації оберемо середнє значення кінематичної енергії захвату на ділянці руху $0 \leq \xi \leq \xi_1$

за час $0 \leq t \leq t_1$

$$T_{cp} = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} T dt \rightarrow \min, \quad (2.5)$$

де t – час; t_1 – тривалість руху; T – кінематична енергія захвату

$$T = \frac{1}{2} m \dot{\xi}^2. \quad (2.6)$$

Умовою мінімуму критерію (2.5) є рівняння Ейлера

$$\frac{\partial T}{\partial \xi} - \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\xi}} \quad (2.7)$$

В результаті підстановки виразу (2.6) в рівняння (2.7) отримаємо:

$$\frac{\partial T}{\partial \xi} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\xi}} = m\dot{\xi}; \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\xi}} = m\ddot{\xi} = 0. \quad (2.8)$$

Рівняння (2.8) справедливе тоді, коли

$$\ddot{\xi} = 0. \quad (2.9)$$

Двічі проінтегруємо рівняння (2.9), в результаті чого отримаємо:

$$\dot{\xi} = C_1; \quad \xi = C_1 t + C_2 \quad (2.10)$$

Де C_1, C_2 — постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов руху:

$$t=0; \quad \xi = 0; \quad t=t_1; \quad \xi = \xi_1. \quad (2.11)$$

Після підстановки умов (2.11) в залежності (2.10) будемо мати:

$$C_2 = 0; \quad \xi_1 = C_1 t_1 \rightarrow C_1 = \frac{\xi_1}{t_1}. \quad (2.12)$$

Тоді отримаємо переміщення, швидкість та пришвидшення руху захвату при оптимальному енергетичному режимі:

$$\xi = \frac{\xi_1 t}{t_1}; \quad \dot{\xi} = \frac{\xi_1}{t_1} = \text{const}; \quad \ddot{\xi} = 0. \quad (2.13)$$

Отже, для забезпечення оптимального енергетичного режиму руху захват повинен рухатися на всій ділянці руху з постійною швидкістю.

Знайдемо для цього режиму руху кінематичні характеристики узагальнених координат маніпулятора, виражених через координату ξ

$$S_2 - Z_0 = \xi * \sin \alpha.$$

Тоді будемо мати

$$S_2 = Z_0 + \xi * \sin \alpha = Z_0 + \xi_1 * \frac{t}{t_1} * \sin \alpha \quad (2.14)$$

$$\text{де} \quad \sin \alpha = \frac{Z_1 - Z_0}{\xi_1}; \quad \cos \alpha = \frac{y_1 - y_0}{\xi_1}; \quad (2.15)$$

Після підстановки першого виразу з (2.15) в залежності (2.14) отримаємо:

$$S_2 = Z_0 + \xi_1 * \frac{t}{t_1} * \frac{Z_1 - Z_0}{\xi_1} = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \frac{t}{t_1} \quad (2.16)$$

$$\dot{S}_2 = \frac{Z_1 - Z_0}{t_1} = \text{const.}$$

Аналогічно знайдемо координату S_3

$$S_3 - y_0 = \xi * \cos \alpha.$$

Тоді

$$S_3 = y_0 + \xi * \cos \alpha \quad (2.17)$$

Після підстановки виразів (2.13) і (2.15) в залежності (2.17) будемо мати:

$$S_3 = y_0 + \xi_1 \frac{t}{t_1} * \frac{y_1 - y_0}{\xi_1} = y_0 + (y_1 - y_0) \frac{t}{t_1}; \dot{S}_3 = \frac{y_1 - y_0}{t_1} = \text{const.} \quad (2.18)$$

З виразів (2.16) та (2.18) випливає, що для забезпечення оптимального енергетичного режиму руху захвату необхідно, щоб приводні механізми рухались з постійною швидкістю рис. 2.2.3 і 2.2.4.

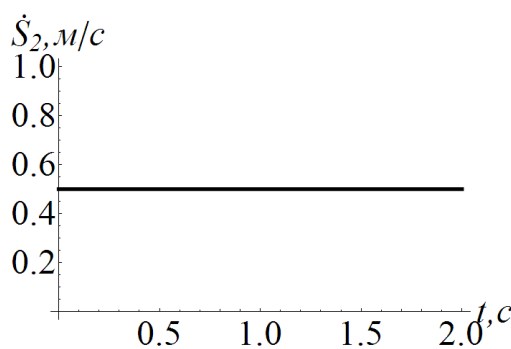


Рис.2.2.3

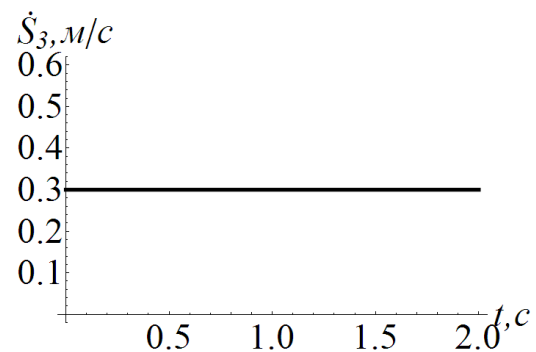


Рис.2.2.4

Оскільки оптимальний енергетичний режим не вдається реалізувати на практиці, бо в нього відсутні ділянки пуску та гальмування, тому він може бути використаний лише на ділянці усталеного руху приводних механізмів.

2.3. Оптимізація оптимального динамічного режиму руху захвату

Тепер знайдемо оптимальний режим руху захвату, який мінімізує динамічну складову потужності приводного механізму.[26]

За критерій оптимізації використаємо середнє значення динамічної складової потужності, що витрачається на рух захвату з вантажем

$$P_{cp} = \int_0^{t_1} V dt \rightarrow \min, \quad (2.19)$$

де V = енергія пришвидшення, яка для захвату визначається наступної залежністю

$$V = \frac{1}{2} m \ddot{\xi}^2. \quad (2.20)$$

Тут m — маса вантажу з захватом.

Умовою мінімуму критерію (2.19) з урахуванням виразу (2.20) є рівняння Ейлера-Пуассона

$$\frac{\partial V}{\partial \xi} - \frac{d}{dt} \frac{\partial V}{\partial \dot{\xi}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial V}{\partial \ddot{\xi}} = 0. \quad (2.21)$$

Визначимо складові частини рівняння (2.21)

$$\frac{\partial V}{\partial \xi} = 0; \quad \frac{\partial V}{\partial \dot{\xi}} = 0; \quad \frac{\partial V}{\partial \ddot{\xi}} = m \ddot{\xi}; \quad \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial V}{\partial \ddot{\xi}} = m \dot{\xi} \gg 0 \quad (2.22)$$

Підставимо вирази (2.22) в рівняння (2.21), в результаті чого будемо мати:

$$m \dot{\xi} = 0.$$

Отримане рівняння справедливе тоді, коли

$$\dot{\xi} = 0. \quad (2.23)$$

Проінтегруємо рівняння (2.23), в результаті чого будемо мати;

$$\begin{aligned} \ddot{\xi} &= D_1; \\ \dot{\xi} &= D_1 t + D_2; \\ \xi &= \frac{1}{2} D_1 t^2 + D_2 t + D_3; \\ \xi &= \frac{1}{6} D_1 t^3 + \frac{1}{2} D_2 t^2 + D_3 t + D_4, \end{aligned} \quad (2.24)$$

де D_1, D_2, D_3, D_4 — постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов руху:

$$t = 0: \xi = 0, \dot{\xi} = 0; \quad t = t_1: \xi = \xi_1, \dot{\xi} = 0. \quad (2.25)$$

Після підстановки умов (2.25) в залежності (2.24) отримаємо:

$$D_4 = 0; \quad D_3 = 0; \quad (2.26)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{6}D_1t_1^3 + \frac{1}{2}D_2t_1^2 = \xi_1; \\ \frac{1}{2}D_1t_1^2 + D_2t_1 = 0. \end{cases} \quad (2.27)$$

З другого рівняння системи (2.27) знаходимо

$$D_2 = -\frac{D_1t_1}{2}. \quad (2.28)$$

Підставивши в перше рівняння системи (2.27) вираз (2.28), отримаємо

$$\frac{1}{6}D_1t_1^3 + \frac{1}{4}D_1t_1^3 = \xi_1.$$

З отриманого рівняння маємо

$$-\frac{1}{12}D_1t_1^3 = \xi_1.$$

$$\text{Тоді } D_1 = -12\xi_1/t_1^3. \quad (2.29)$$

Після підстановки виразу (2.29) в залежність (2.28) отримаємо

$$D_2 = \frac{6\xi_1}{t_1^2}. \quad (2.30)$$

Підставивши вирази (2.26), (2.29) і (2.30) в залежності (2.24), маємо:

$$\begin{aligned} \xi &= 3\xi_1t^2/t_1^2 - 2\xi_1t^3/t_1 = \frac{\xi_1}{t_1^2} \left(3t^2 - 2\frac{t^3}{t_1} \right); \\ \dot{\xi} &= 6\frac{\xi_1}{t_1^2} \left(t - \frac{t^2}{t_1} \right); \\ \ddot{\xi} &= 6\frac{\xi_1}{t_1^2} \left(1 - 2\frac{t}{t_1} \right). \end{aligned} \quad (2.31)$$

Для забезпечення оптимального режиму, що мінімізує динамічну складову потужності, необхідно, щоб швидкість руху захвату змінювалась за параболічним законом, а пришвидшення за лінійним законом.

Знайдемо для отриманого режиму руху кінематичні характеристики узагальнених координат, виражених через координату ξ :

- Координата S_2 та її похідні за часом:

$$-S_2 = Z_0 + \xi \sin \alpha = Z_0 + \frac{\xi_1}{t_1^2} \left(3t^2 - 2\frac{t^3}{t_1} \right) * \frac{z_1 - z_0}{\xi_1} = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \frac{t^2}{t_1^2} \left(3 - 2\frac{t}{t_1} \right); \quad (2.32)$$

$$\dot{S}_2 = 6 \frac{z_1 - z_0}{t_1^2} t \left(1 - \frac{t}{t_1} \right); \quad \ddot{S}_2 = 6 \frac{z_1 - z_0}{t_1^2} t \left(1 - 2\frac{t}{t_1} \right). \quad (2.33)$$

- Координата S_3 та її похідні за часом:

$$- S_3 = y_0 + \xi \cos \alpha = y_0 + \frac{\xi_1}{t_1^2} \left(3t^2 - 2\frac{t^3}{t_1} \right) * \frac{y_1 - y_0}{\xi_1} = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{t_1^2} t^2 \left(3 - 2\frac{t}{t_1} \right); \quad (2.34)$$

$$- \dot{S}_3 = 6 \frac{y_1 - y_0}{t_1^2} t \left(1 - \frac{t}{t_1} \right); \quad \ddot{S}_3 = \frac{y_1 - y_0}{t_1^2} \left(1 - 2\frac{t}{t_1} \right). \quad (2.35)$$

З виразів (2.33) та (2.35) випливає, що для забезпечення оптимального режиму руху, що мінімізує динамічну складову потужності, необхідно, щоб швидкості приводних механізмів змінювались за параболічним законом, а пришвидшення – за лінійним.

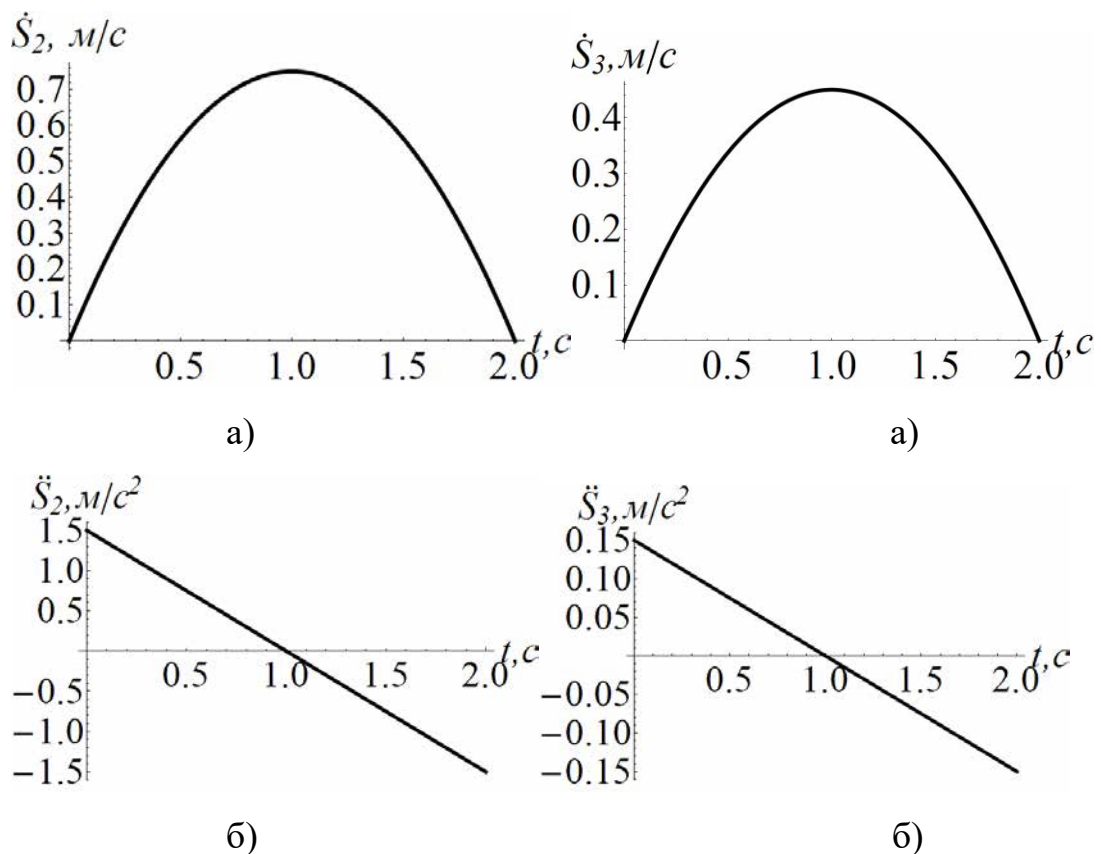


Рис.2.3.5. Швидкість (а) та

Рис.2.3.6 Швидкість (а)

та

пришвидшення (б) приводу

пришвидшення (б)

приводу

механізму підйому

механізму зміни вильоту

Такий режим руху доцільно застосовувати при переміщенні захвату на незначні відстані, коли відсутня ділянка усталеного руху і рух складається тільки з ділянок пуску та гальмування. Цей режим руху для узагальнених координат показано на рис.(2.3.5, 2.3.6).

2.4. Оптимізація комплексного режиму руху захвату

Розглянемо режим руху захватного пристрою, який складається з ділянок пуску, усталеного руху та гальмування. На ділянці усталеного руху використаємо оптимальний енергетичний режим руху, який забезпечується постійною швидкістю захватного пристрою. На ділянках пуску та гальмування застосуємо оптимальний режим руху, який мінімізує динамічну складову потужності приводних механізмів. [27]

Для визначення оптимального режиму пуску захватного пристрою використаємо залежності (2.24), в яких постійні інтегрування визначаються з наступних крайових умов:

$$t = 0: \xi = 0, \dot{\xi} = 0; t = t_p: \dot{\xi} = V, \ddot{\xi} = 0. \quad (2.36)$$

Після підстановки умов (2.36) в залежності (2.24) маємо:

$$D_4 = 0; D_3 = 0; \quad (2.37)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} D_1 t_p^2 + D_2 t_p = V; \\ D_1 t_p + D_2 = 0. \end{cases} \quad (2.38)$$

Тут t_p — тривалість розгону захватного пристрою;

V — швидкість усталеного руху захвату, яка при оптимальному енергетичному режимі руху визначається залежністю (2.13)

$$V = \xi_1/t_1. \quad (2.39)$$

З другого рівняння системи (2.38) знаходимо

$$D_2 = -D_1 t_p. \quad (2.40)$$

Підставивши в перше рівняння системи (2.38) залежності (2.40), отримаємо

$$\frac{1}{2} D_1 t_p^2 - D_1 t_p^2 = V.$$

З отриманого рівняння знаходимо

$$-\frac{1}{2} D_1 t_p^2 = V.$$

Звідки

$$D_1 = -2V/t_p^2. \quad (2.41)$$

В результаті підстановки виразу (2.41) в залежність (2.40) будемо мати:

$$D_2 = 2V/t_p. \quad (2.42)$$

Підставивши вирази (2.37), (2.41) і (2.42) в залежності (2.24) будемо мати:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{V}{t_p} t^2 - \frac{1}{3} \frac{V}{t_p^2} t^3 = \frac{V}{t_p} \left(t^2 - \frac{t^3}{3t_p} \right); \\ \dot{\xi} &= \frac{V}{t_p} \left(2t - \frac{t^2}{t_p} \right); \\ \ddot{\xi} &= 2 \frac{V}{t_p} \left(1 - \frac{t}{t_p} \right). \end{aligned} \quad (2.43)$$

Знаючи кінематичні характеристики захватного пристрою (2.43), знайдемо відповідні характеристики узагальнених координат:

$$\begin{aligned} S_2 &= Z_0 + \xi \sin \alpha = Z_0 + \frac{V t^2}{t_p} \left(1 - \frac{t}{3t_p} \right) \frac{z_1 - z_0}{\xi_1} = Z_0 + \frac{\xi_1 * t^2}{t_p t_1} \\ \left(1 - \frac{t}{3t_p} \right) \frac{z_1 - z_0}{\xi_1} &= Z_0 + (z_1 - z_0) \frac{t^2}{t_p t_1} \left(1 - \frac{t}{3t_p} \right) \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\dot{S}_2 = \frac{t_1 - z_0}{t_p t_1} \left(2t - \frac{t^2}{t_p} \right); \quad \ddot{S}_2 = 2 \frac{z_1 - z_0}{t_p t_1} \left(1 - \frac{t}{t_p} \right). \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned}
S_3 &= y_0 + \xi \cos \alpha = y_0 + \frac{Vt^2}{t_p} \left(1 - \frac{t}{3t_p}\right) \frac{y_1 - y_0}{\xi_1} = \\
&= y_0 + \frac{\xi_1 * t^2}{t_p t_1} \left(1 - \frac{t}{3t_p}\right) \frac{y_1 - y_0}{\xi_1}; \\
S_3 &= y_0 + \frac{y_1 - y_0}{t_p t_1} t^2 \left(1 - \frac{t}{3t_p}\right); \\
\dot{S}_3 &= \frac{y_1 - y_0}{t_p t_1} \left(2t - \frac{t^2}{t_p}\right), \quad \ddot{S}_3 = 2 \frac{y_1 - y_0}{t_p t_1} \left(1 - \frac{t}{t_p}\right).
\end{aligned} \tag{2.46}$$

Аналогічно визначимо оптимальні режими гальмування, що забезпечують мінімізацію динамічної складової потужності приводних механізмів.

Для визначення оптимального режиму гальмування захватного пристрою використаємо залежності (24), в яких постійні інтегрування визначаються з таких крайових умов руху:

$$t = t_1 - t_g: \dot{\xi} = V, \ddot{\xi} = 0; \quad t = t_1: \xi = \xi_1, \dot{\xi} = 0, \tag{2.47}$$

Де t_g — тривалість гальмування

В результаті підстановки умов (2.47) в залежності (2.24) отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} D_1 (t_1 - t_g)^2 + D_2 (t_1 - t_g) + D_3 = V; \\ D_1 (t_1 - t_g) + D_2 = 0; \\ \frac{1}{6} D_1 t_1^3 + \frac{1}{2} D_2 t_1^2 + D_3 t_1 + D_4 = \xi_1; \\ \frac{1}{2} D_1 t_1^2 + D_2 t_1 + D_3 = 0. \end{cases} \tag{2.48}$$

З другого рівняння системи (2.48) виразимо невідоме D_2 через D_1 ,

$$D_2 = -D_1 (t_1 - t_g). \tag{2.49}$$

В інших рівняннях системи (2.48) замінимо D_2 на вираз (2.49), тобто

$$\begin{cases} \frac{1}{2} D_1 (t_1 - t_g)^2 + D_1 (t_1 - t_g)^2 + D_3 = V; \\ \frac{1}{6} D_1 t_1^3 + \frac{1}{2} D_1 (t_1 - t_g) t_1^2 + D_3 t_1 + D_4 = \xi_1; \\ \frac{1}{2} D_1 t_1^2 + D_2 (t_1 - t_g) t_1 + D_3 = 0. \end{cases} \tag{2.50}$$

Зведемо подібні члени в системі (2.50)

$$\begin{cases} -\frac{1}{2}D_1(t_1 - t_g)^2 + D_3 = V; \\ \frac{1}{6}D_1t_1^3 - \frac{1}{2}D_1t_1^3 + \frac{1}{2}D_1t_g t_1^2 + D_3t_1 + D_4 = \xi_1; \\ \frac{1}{2}D_1t_1^2 - D_1t_1^2 + D_1t_g t_1 + D_3 = 0. \end{cases}$$

Запишемо цю систему в іншому вигляді

$$\begin{cases} -\frac{1}{2}D_1(t_1 - t_g)^2 + D_3 = V; \\ D_1t_1^2(t_g/2 - t_1/3) + D_3t_1 + D_4 = \xi_1; \\ D_1t_1(t_g - t_1/2) + D_3 = 0. \end{cases} \quad (2.51)$$

З останнього рівняння системи (2.51) виразимо невідому D_3

$$D_3 = -D_1t_1(t_g - t_1/2). \quad (2.52)$$

Підставимо вираз (2.52) в інші два рівняння системи (2.51)

$$\begin{cases} -\frac{1}{2}D_1(t_1 - t_g)^2 - D_1t_1(t_g - t_1/2) = V; \\ D_1t_1^2(t_g/2 - t_1/3) - D_1t_1^2(t_g - t_1/2) + D_4 = \xi_1. \end{cases}$$

В отриманій системі рівнянь зведемо подібні члени, в результаті чого отримаємо

$$\begin{cases} -D_1(t_1^2/2 - t_1t_g + t_g^2/2 + t_1t_g - t_1^2/2) = V; \\ D_1t_1^2(t_g/2 - t_1/3 - t_g + t_1/2) + D_4 = \xi_1. \end{cases}$$

$$\begin{cases} -D_1t_g^2/2 = V; \\ \frac{1}{2}D_1t_1^2(t_1/3 - t_g) + D_4 = \xi_1. \end{cases} \quad (2.53)$$

З першого рівняння системи (2.53) знаходимо

$$D_1 = -2V/t_g^2. \quad (2.54)$$

Підставимо вираз (2.54) в друге рівняння системи (2.53)

$$-\frac{V}{t_g^2} t_1^2 (t_1/3 - t_g) + D_4 = \xi_1.$$

З останнього рівняння знаходимо

$$D_4 = \xi_1 + V \frac{t_1^2}{t_g^2} (t_1/3 - t_g). \quad (2.55)$$

Підставивши вираз (2.54) в залежності (2.49) та (2.52) знайдемо:

$$D_2 = \frac{2V}{t_g^2} (t_1 - t_g); \quad D_3 = \frac{2V}{t_g^2} t_1 (t_g - t_1/2). \quad (2.56)$$

В результаті підстановки виразів (2.54),..., (2.56) в залежність (2.24) знайдемо оптимальний режим гальмування захватного пристрою, який мінімізує динамічну складову потужності процесу гальмування

$$\xi = -\frac{1}{3} \frac{V}{t_g^2} t^3 + \frac{V}{t_g^2} (t_1 - t_g) t^2 + 2 \frac{V}{t_g^2} (t_g - t_1/2) t_1 t + \frac{V}{t_g^2} t_1^2 (t_1/3 - t_g) + \xi_1$$

$$\begin{cases} \xi = \frac{V}{t_g^2} \left[-\frac{t^3}{3} + (t_1 - t_g) t^2 + 2(t_g - t_1/2) t_1 t + t_1^2 (t_1/3 - t_g) \right] + \xi_1; \\ \dot{\xi} = \frac{V}{t_g^2} [-t^2 + 2(t_1 - t_g) t + 2(t_g - t_1/2) t_1]; \\ \ddot{\xi} = 2 \frac{V}{t_g^2} [-t + (t_1 - t_g)]. \end{cases} \quad (2.57)$$

За кінематичними характеристиками захватного пристрою визначимо характеристики узагальнених координат, що забезпечують оптимальний режим гальмування мінімізації динамічної складової потужності:

$$S_2 = Z_0 + \xi \sin \alpha = Z_0 + \left\{ \frac{V}{t_g^2} \left[-\frac{t^3}{3} + (t_1 - t_g) t^2 + 2(t_g - t_1/2) t_1 t + t_1^2 (t_1/3 - t_g) \right] + \xi_1 \right\} \frac{z_1 - z_0}{\xi_1};$$

$$S_2 = Z_0 + \frac{z_1 - z_0}{\xi_1} \xi_1 \left\{ \frac{1}{t_1 t_g^2} \left[-\frac{t^3}{3} + (t_1 - t_g) t^2 + 2(t_g - t_1/2) t_1 t + t_1^2 \left(\frac{t_1}{3} - t_g \right) \right] + 1 \right\}$$

$$\left\{ \begin{aligned} S_2 &= Z_0 + (z_1 - z_0) \left\{ \frac{1}{t_1 t_g^2} \left[-\frac{t^3}{3} + (t_1 - t_g)t^2 + 2 \left(t_g - \frac{t_1}{2} \right) t_1 t + t_1^2 \left(\frac{t_1}{3} - t_g \right) \right] + 1 \right\}; \\ \dot{S}_2 &= \frac{z_1 - z_0}{t_1 t_g^2} \left[-t^2 + 2(t_1 - t_g)t + 2 \left(t_g - \frac{t_1}{2} \right) t_1 \right]; \\ \ddot{S}_2 &= 2 \frac{z_1 - z_0}{t_1 t_g^2} [-t + t_1 - t_g]. \end{aligned} \right.$$

(2.58)

$$S_3 = y_0 + \xi \cos \alpha = y_0 + \left\{ \frac{V}{t_g^2} \left[-\frac{t^3}{3} + (t_1 - t_g)t^2 + 2(t_g - t_1/2)t_1 t + t_1^2 \left(\frac{t_1}{3} - t_g \right) \right] + \xi_1 \right\} \frac{y_1 - y_0}{\xi_1};$$

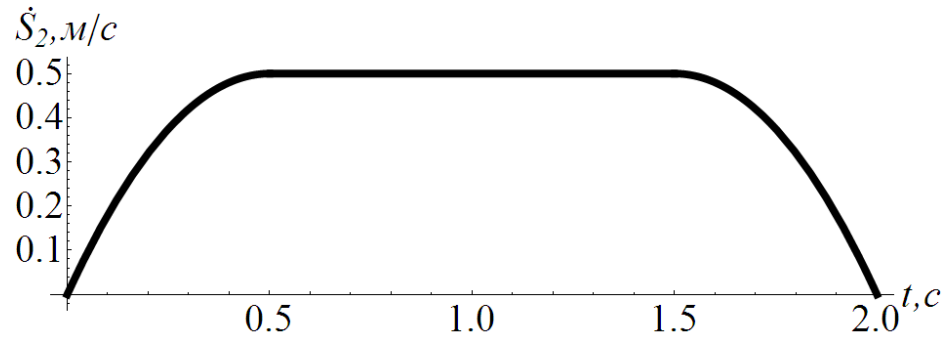
$$S_3 = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{\xi_1} \xi_1 \left\{ \frac{1}{t_1 t_g^2} \left[-\frac{t^3}{3} + (t_1 - t_g)t^2 + 2 \left(t_g - \frac{t_1}{2} \right) t_1 t + t_1^2 \left(\frac{t_1}{3} - t_g \right) \right] + 1 \right\};$$

$$\left\{ \begin{aligned} S_3 &= y_0 + (y_1 - y_0) \left\{ \frac{1}{t_1 t_g^2} \left[-\frac{t^3}{3} + (t_1 - t_g)t^2 + 2 \left(t_g - \frac{t_1}{2} \right) t_1 t + t_1^2 \left(\frac{t_1}{3} - t_g \right) \right] + 1 \right\}; \\ \dot{S}_3 &= \frac{y_1 - y_0}{t_1 t_g^2} \left[-t^2 + 2(t_1 - t_g)t + 2 \left(t_g - \frac{t_1}{2} \right) t_1 \right]; \\ \ddot{S}_3 &= 2 \frac{y_1 - y_0}{t_1 t_g^2} (-t + t_1 - t_g). \end{aligned} \right.$$

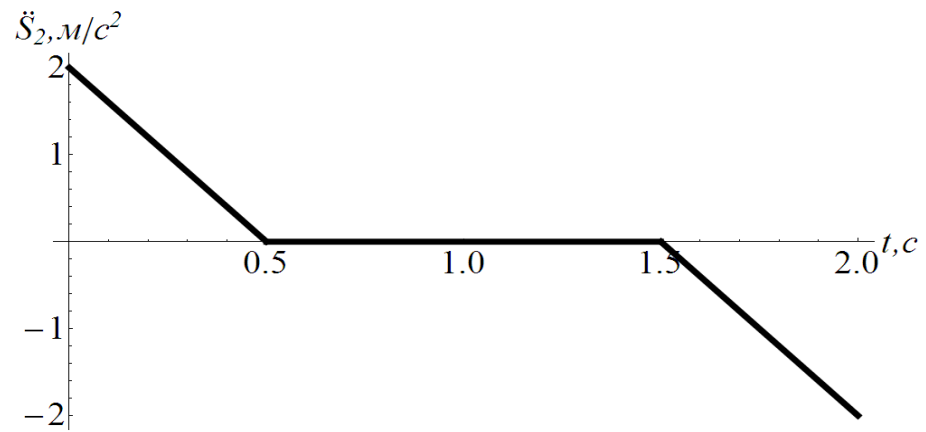
(2.59)

В результаті проведених розрахунків побудуємо графічні залежності кінематичних характеристик узагальнених координат, які на ділянці усталеного руху відповідають оптимальному енергетичному режиму, а на ділянках пуску та гальмування-режиму, що мінімізує динамічну складову потужності.

На рис.2.4.6 та 2.4.7 представлені графічні залежності швидкості та пришвидшення приводних механізмів підйому робота-маніпулятора та висування руки захвату.

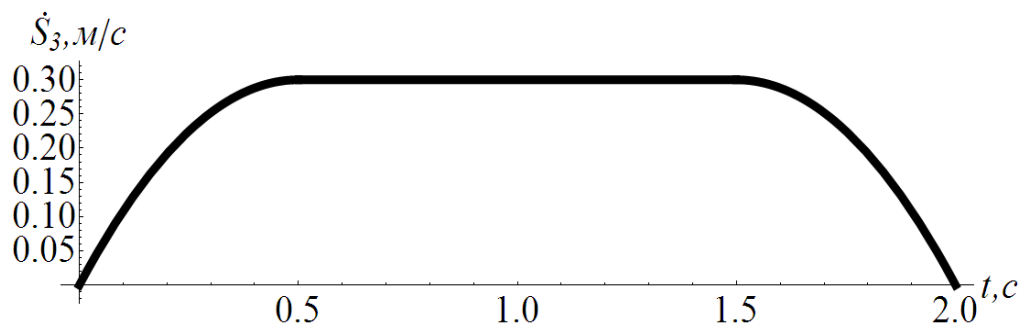


a)

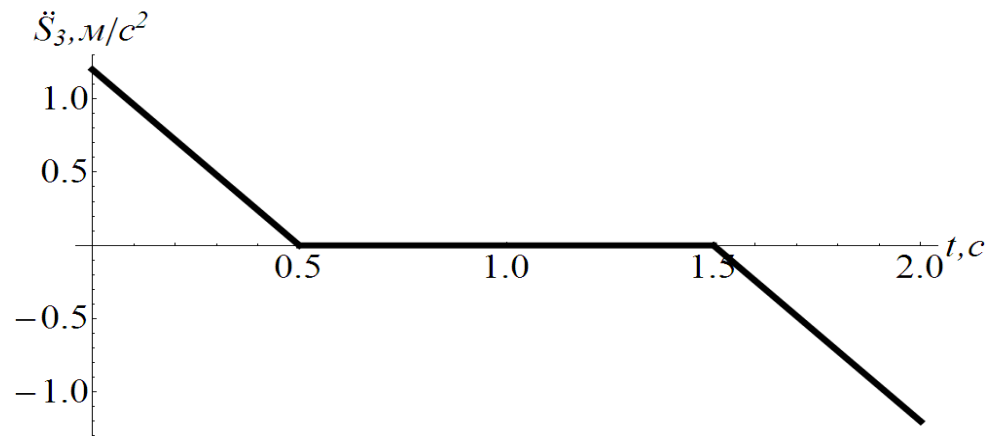


б)

Рис.2.4.6. Графік швидкості (а) та пришвидження (б) приводу механізму підйому захвату при триперіодній оптимальній діаграмі руху.



a)



б)

Рис.2.4.7. Графік швидкості (а) та пришвидження (б) приводу механізму зміни вильоту захвату при триперіодній оптимальній діаграмі руху

З отриманих графічних залежностей (рис.2.4.6 та рис. 2.4.7) можна зробити висновок, що при такому русі механізмів будуть витрачатись мінімальні витрати енергії, а встановлені приводні та гальмівні механізми будуть мати мінімальну потужність.

РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ВИСУВАННЯ РУКИ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

3.1 Побудова схеми будови робота маніпулятора

Рука робота-маніпулятора у вертикальній площині здійснює вертикальний підйом та горизонтальне висування, як це показано на рис.3.1.1.

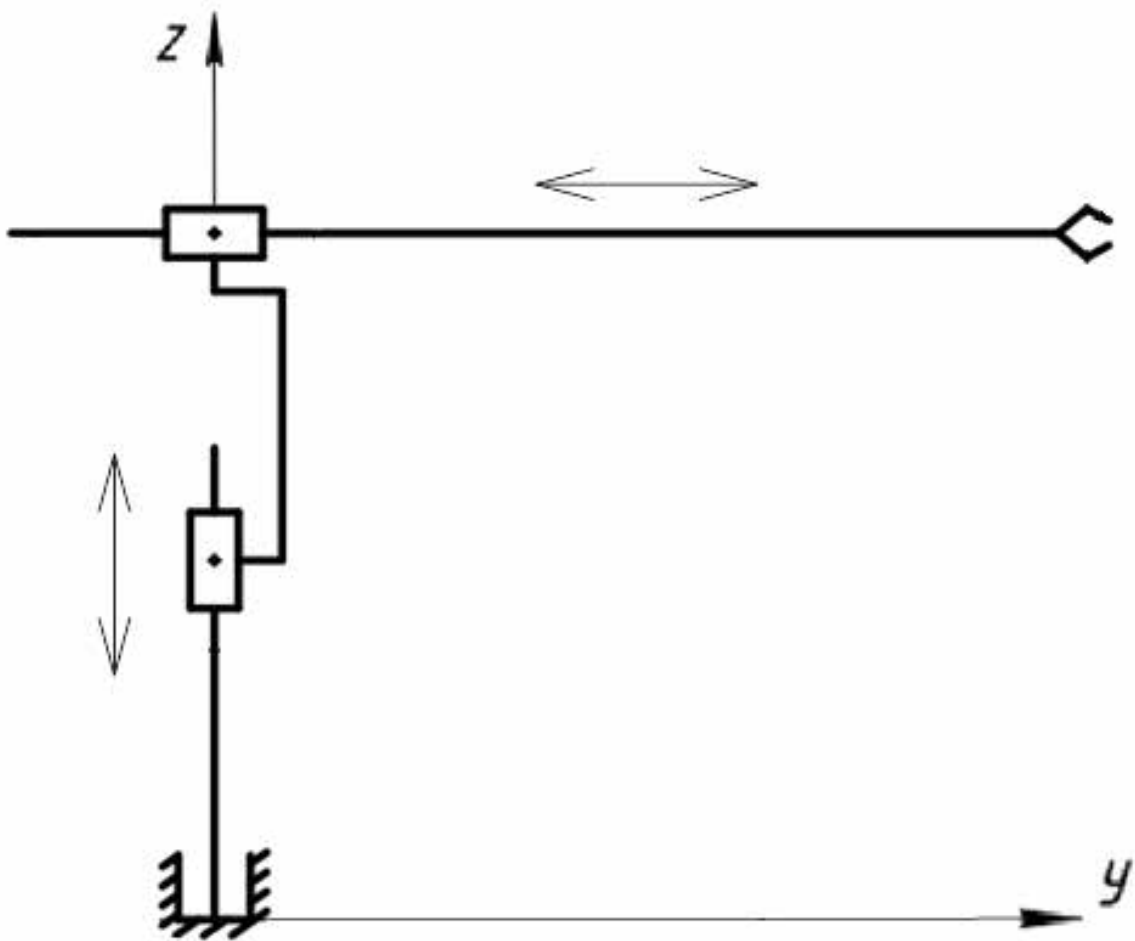


Рис. 3.1.1. Схема робота з двома поступальними і однією обертальними ланками.

Більш детально розглянемо рух руки робота-маніпулятора при її висуванні рис.3.1.2. Для такого переміщення руки робота-маніпулятора визначимо оптимальний режим руху на ділянці пуску.



Рис. 3.1.2 Ланка, для якої буде розроблена система керування

3.2 Визначення оптимального режиму руху руки робота-маніпулятора при пуску

Розглянемо рух руки робота-маніпулятора в процесі його пуску. За критерій оптимізації використаємо середньоквадратичне значення рушійної сили приводного механізму в процесі висування руки робота-маніпулятора:[28]

Рівняння руху руки робота-маніпулятора в процесі висування можна представити наступною залежністю:

$$m\ddot{s} + n_2\dot{s} = F, \#(3.1)$$

Де m – маса руки ланки робота з захватом та вантажем; n_2 – коефіцієнт опору переміщення руки робота-маніпулятора, який залежить від швидкості руху; F – рушійна сила приводу висування руки робота-маніпулятора.

Критерій оптимізації представляє собою інтегральний функціонал, який виражається наступною залежністю і підлягає мінімізації:

$$F_{ck} = \left[\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} F^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min; \#(3.2)$$

Тут t - час; t_1 – тривалість пуску руки робота-маніпулятора.

Підінтегральна функція інтегрального критерію виражається такою залежністю

$$f = F^2 = (m\ddot{s} + n_2\dot{s})^2 - \quad (3.3)$$

Умовою мінімуму функціоналу (3.2) є рівняння Ейлера-Пуассона, яке для поступального руху руки робота-маніпулятора виражається залежністю:

$$\frac{\partial f}{\partial s} - \frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial f}{\partial \ddot{s}} = 0. \#(3.4)$$

Складові рівняння (3.4) визначаються наступним чином:

$$\frac{\partial f}{\partial s} = 0; \#(3.5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \dot{s}} = 2n(m_p\dot{s} + n\dot{s}); \#(3.6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \ddot{s}} = 2m_p(m_p\ddot{s} + n\ddot{s}); \#(3.7)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{s}} = 2n(m_p\ddot{s} + n\ddot{s}); \#(3.8)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial f}{\partial \ddot{s}} = 2m_p(m_p s^{IV} + n\ddot{s}). \#(3.9)$$

Після підстановки виразів (3.5)-(3.9) в рівняння (3.4) будемо мати

$$2m_p(m_p s^{IV} + n\ddot{s}) - 2n(m_p\ddot{s} + n\ddot{s}) = 0. \#(3.10)$$

Спростимо отримане рівняння до наступного вигляду

$$m_p^2 s^{IV} + m_p n \ddot{s} - m_p n \ddot{s} - n^2 \dot{s} = 0. \#(3.11)$$

Скоротимо подібні члени отриманого рівняння, в результаті чого будемо мати

$$m_p^2 s^{IV} - n^2 \dot{s} = 0. \#(3.12)$$

Розділивши всі члени рівняння (3.12) на коефіцієнт біля найстаршої похідної, отримаємо:

$$s^{IV} - k^2 \dot{s} = 0, \quad \text{де } k = \frac{n}{m_p}. \#(3.13)$$

Для диференціального рівняння (3.13) характеристичне рівняння виглядає так:

$$r^4 - k^2 r^2 = 0; \quad r^2(r^2 - k^2) = 0; \#(3.14)$$

Корені характеристичного рівняння визначаються наступним чином:

$$r_1 = r_2 = 0; \quad r_3 = +k; \quad r_4 = -k; \#(3.15)$$

Відповідно до отриманих коренів характеристичного рівняння розв'язок диференціального рівняння (3.13) має вигляд:

$$s = C_1 + C_2 t + C_3 e^{kt} + C_4 e^{-kt}; \#(3.16)$$

$$\dot{s} = C_2 + k C_3 e^{kt} - k C_4 e^{-kt}; \#(3.17)$$

$$\ddot{s} = k^2 (C_3 e^{kt} + C_4 e^{-kt}). \#(3.18)$$

Тут C_1, \dots, C_4 – постійні інтегрування.

Розглянемо процес пуску механізму висування руки робота-маніпулятора:

Для процесу пуску руки робота-маніпулятора маємо такі початкові та кінцеві умови руху:

$$t = 0, s = 0, \dot{s} = 0; \quad t = t_1, \dot{s} = v, \quad \ddot{s} = 0.$$

Для наведених крайових умов руху отримаємо рівняння для визначання постійних інтегрування:

$$C_1 + C_3 + C_4 = 0; \#(3.19)$$

$$C_2 + kC_3 - kC_4 = 0; \#(3.20)$$

$$C_2 + kC_3e^{kt_1} - kC_4e^{-kt_1} = v; \#(3.21)$$

$$k^2C_3e^{kt_1} + k^2C_4e^{-kt_1} = 0; \#(3.22)$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.19),..., (3.22), отримаємо вирази постійних інтегрування, які визначаються наступними залежностями:

$$C_1 = \frac{v}{k(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)}(e^{2kt_1} - 1); \#(3.23)$$

$$C_2 = -\frac{v}{(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)}(e^{2kt_1} + 1); \#(3.24)$$

$$C_3 = \frac{v}{k(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)}; \#(3.25)$$

$$C_4 = -\frac{v}{k(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)}e^{2kt_1}; \#(3.26)$$

Після підстановки постійних інтегрування (3.23,..., (3.26) у вихідні рівняння (3.17), (3.18) маємо такі залежності оптимального режиму пуску при висуванні руки робота-маніпулятора :

$$s = \frac{v}{k(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)} [e^{kt} + e^{2kt_1}(1 - e^{-kt}) + (e^{2kt_1} + 1)kt - 1]; \#(3.27)$$

$$\dot{s} = \frac{v}{(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)} [e^{kt} + e^{2kt_1}(e^{-kt} - 1) - 1]; \#(3.28)$$

$$\ddot{s} = \frac{vk}{(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)} [e^{kt} - e^{k(2t_1-t)}]; \#(3.29)$$

Тобто отримали наступний закон оптимального керування режимом пуску руки робота-маніпулятора:

$$z(t) = \dot{s}(t) = \frac{v}{2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1} [e^{kt} + e^{2kt_1}(e^{-kt} - 1) - 1]; \#(3.30)$$

3.3 Побудова графіків системи керування за отриманими рівняннями

Побудуємо графічні залежності оптимальних кінематичних, силових та енергетичних характеристик руху руки робота-маніпулятора в програмі Mathematica.[29] На рис.3.3.3 – 3.3.7 представлені графічні залежності визначених характеристик.

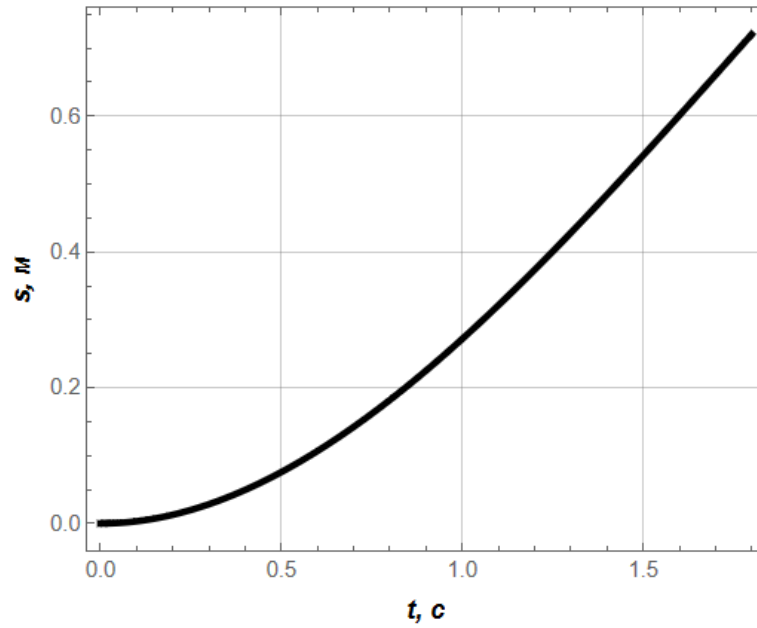


Рис. 3.3.3. Графік переміщення руки робота-маніпулятора

З графіка бачимо, що за 1,8 секунди, рука робота-маніпулятора висунеться на 0.7 метра.

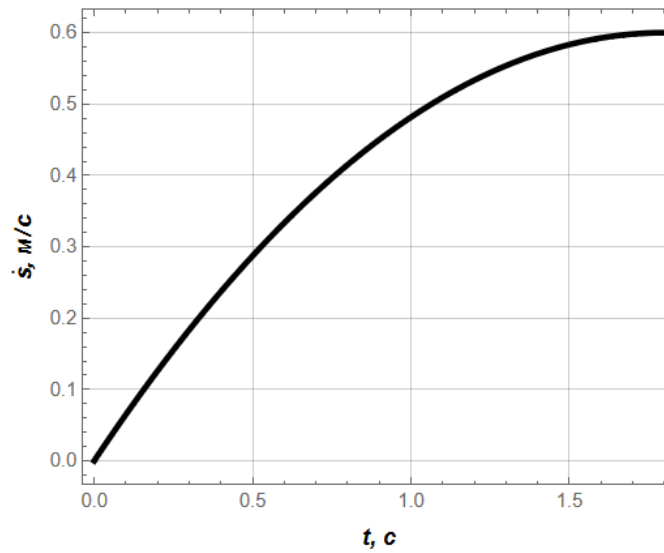


Рис. 3.3.4. Графік швидкості руки робота-маніпулятора

З графіка на рис.3.3.4 видно плавну зміну швидкості руки робота-маніпулятора протягом 1,8 секунди і вихід на задану швидкість 0,6 м/с в кінцевій точці.

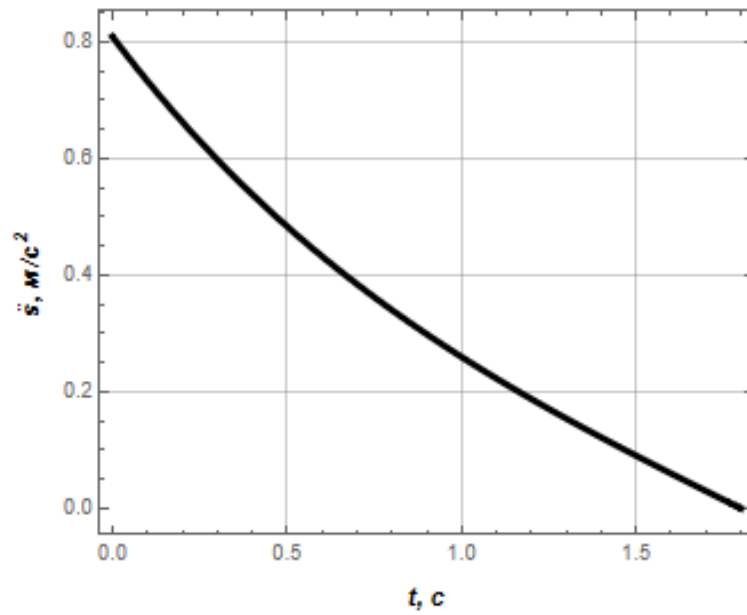


Рис. 3.3.5. Графік пришвидшення руки робота-маніпулятора

З графіку на рис.3.3.5 видно, що спочатку пришвидшення приймає значення $0,68 \text{ м/с}^2$ та за параболічною залежністю спадає до нуля у кінцевій точці.

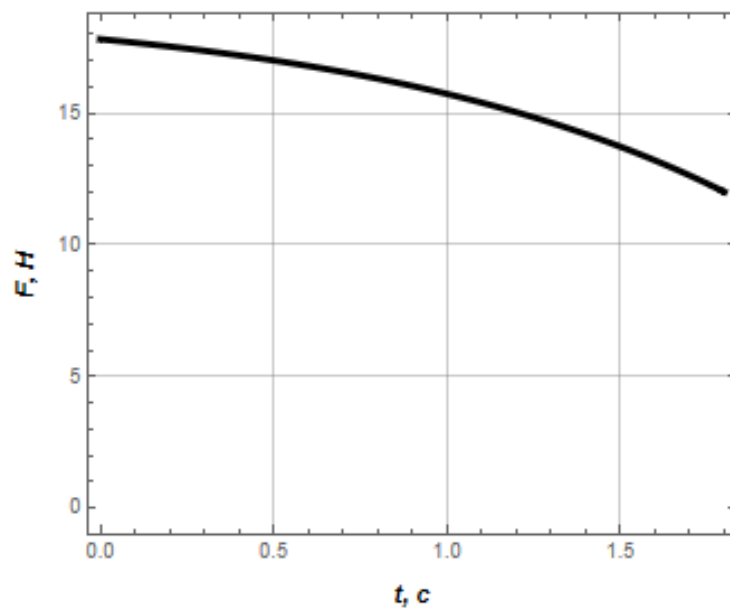


Рис. 3.3.6. Графік рушійної сили приводу механізму висування руки робота- маніпулятора

З графіку видно, що спочатку рушійна сила приймає значення 18 Н та за параболічним законом спадає до 12 Н у кінці пуску.

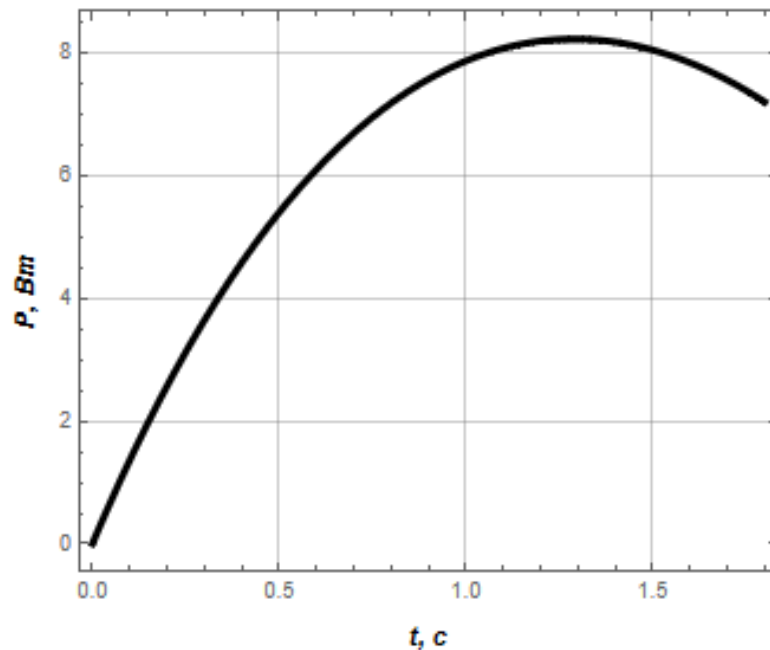


Рис. 3.3.7. Графік потужності приводу механізму висування руки робота-маніпулятора

З графіку потужності можна спостерігати, що протягом часу виходу на задану швидкість, вона спочатку зростає до максимального значення 8,5 Вт в найвищій точці, а потім наближається до 7,0 Вт у кінці руху.

З наведених графічних залежностей можна зробити висновок, що кінематичні, силові та енергетичні характеристики руху руки робота маніпулятора при оптимальному силовому режимі пуску змінюються плавно без коливань.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Для забезпечення безпеки праці на сучасних виробництвах, де активно використовуються автоматизовані й роботизовані системи, необхідно приділяти особливу увагу аналізу можливих ризиків та впровадженню надійних методів їхньої мінімізації. Інтеграція роботів у робочі процеси створює нові виклики для охорони праці, адже такі системи можуть генерувати додаткові фізичні, ергономічні та психологічні ризики для працівників.

Сучасні тенденції в автоматизації праці передбачають активну роботу людей пліч-о-пліч із роботами, що підвищує ризик небезпечних інцидентів. За даними Міжнародної організації праці, наявність надійних систем охорони праці сприяє не лише захисту працівників, але й зниженню витрат, пов'язаних із нещасними випадками, підвищенню продуктивності, а також зміцненню репутації підприємства як роботодавця, який турбується про добробут своїх співробітників.

Зокрема, питання охорони праці набувають особливої важливості в контексті роботизованих систем, оскільки ці технології можуть завдавати фізичної шкоди під час виконання задач, пов'язаних із високими швидкостями руху чи великою силою впливу. До того ж, працівники можуть зазнавати додаткового стресу, оскільки контроль за роботами часто вимагає швидкого реагування та концентрації уваги. Відповідно, виникає потреба в розробці чітких стандартів та регламентів, які б враховували специфіку роботизованих операцій.

Таким чином, забезпечення належного рівня безпеки на робочих місцях в умовах автоматизації та роботизації вимагає комплексного підходу, який охоплює три основні аспекти: захист персоналу, зниження ризиків, пов'язаних із роботизованими системами, а також дотримання відповідних нормативних вимог.[31]

4.1. Типи інтерактивної взаємодії роботів з людиною в умовах забезпечення безпеки

Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) визначає стандарти безпеки для використання промислових роботів. Зокрема, стандарт ISO 10218–1:2011 фокусується на роботах і роботизованих пристроях та відповідних вимогах безпеки для промислового використання. Він визначає основні небезпеки, а також містить вимоги для усунення або зниження ризиків як для людей, так і для роботів.[32]

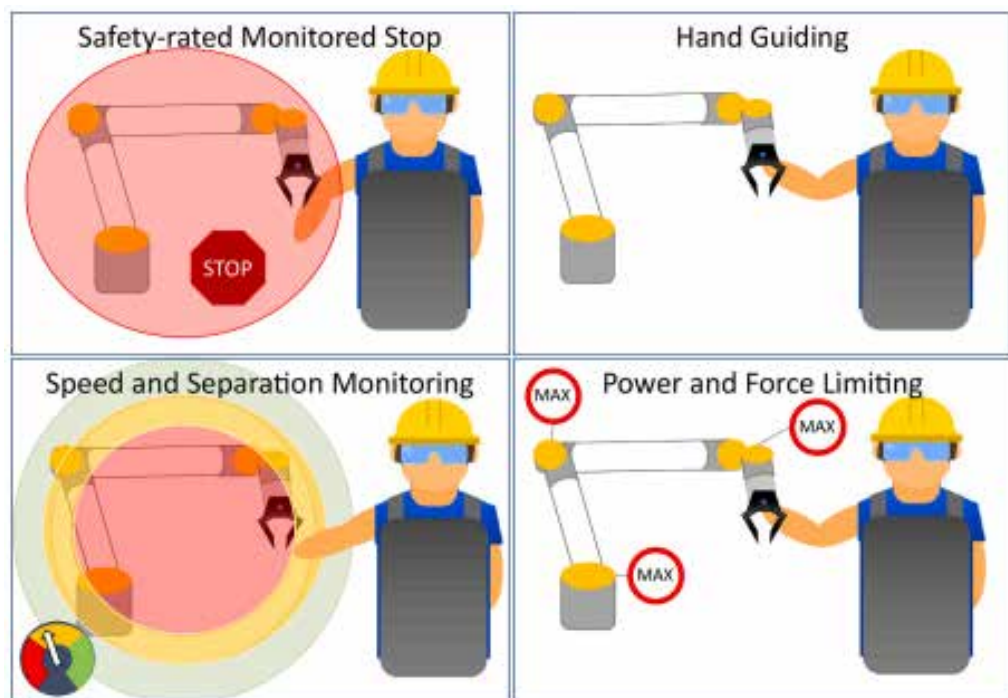


Рис.4.1 Чотири типи спільних операцій на основі ISO 10,218–1/2:2011.

Як показано на (рис. 4.1), визначено чотири типи колаборативних операцій:

Безпека з моніторингом зупинки (Safety-Related Monitored Stop, SRMS0). Це найпростіший тип, де рух робота зупиняється негайно, коли оператор входить у робочу зону. Для цього робот чи роботизована осередок

має бути обладнана системою сенсорів, що виявляє проникнення людини. Оскільки робот зупиняється, оператор і робот не можуть працювати одночасно в осередку. Цей тип операцій підходить для завдань, де робот працює на високих швидкостях або з великим крутним моментом, або виконує потенційно небезпечні для здоров'я людини дії. Оператор може заходити в осередок, наприклад, для зміни інструмента, перевірки якості або завантаження/розвантаження деталей. Після виходу оператора робот автоматично продовжує програму. Хоча SRMS0 вважається колаборативною операцією, зупинка робота під час входу людини зазвичай вважається такою, що не відповідає справжньому колаборативному середовищу.

Ручне керування (Hand guiding). Використовується для навчання робота новому завданню. Під час навчання сили й крутний момент робота знижуються для легшого руху, а робот має бути оснащений механізмами контролю для забезпечення стабільності при обмежених силах і крутному моменті. В деяких випадках ручне керування застосовується для допомоги роботу в позиціюванні при підйомі важких компонентів. Це дозволяє інтуїтивну взаємодію з роботом, наприклад, під час навчання. Проте після відтворення програми обмеження на сили та крутний момент знімаються, і тому для забезпечення безпеки можуть знадобитися інші операції (наприклад, SRMS).

Моніторинг швидкості та відстані (Speed and Separation Monitoring). Цей метод полягає у контролі швидкості та відстані між роботом та оператором. Робот знижує свою швидкість або зупиняється, якщо оператор підходить занадто близько, щоб забезпечити безпечну дистанцію між людиною та машиною. Такі системи потребують високої точності сенсорів і швидкого реагування для виявлення присутності оператора в зоні роботи. Це дозволяє оператору та роботу працювати одночасно в межах однієї зони, але на безпечній відстані один від одного. Даний тип операцій ідеально підходить для ситуацій, коли потрібне часте втручання людини в процес, але з дотриманням певних обмежень безпеки.

Обмеження потужності та сили (Power and Force Limiting). Цей тип передбачає обмеження потужності та сили робота, щоб уникнути травм у разі контакту з оператором. Робот обмежує свою силу до безпечного рівня, навіть при прямому контакті з людиною. Це дозволяє роботу та оператору працювати одночасно, навіть у безпосередній близькості. Такі роботи оснащені сенсорами, які відстежують контакт із людиною, і обмежують потужність у випадку виявлення такого контакту. Цей метод ідеальний для використання в операціях, де робот та людина повинні взаємодіяти в обмеженому просторі та з високою частотою.

Ці стандарти й методи роботи з роботами спрямовані на зменшення ризиків для працівників, забезпечуючи оптимальні умови для безпечної взаємодії з роботизованими системами в промислових умовах.

4.2. Три основні підходи до безпеки праці в роботизованих середовищах

Захист працівників від ризиків, пов'язаних з автоматизацією, охоплює різні аспекти — від фізичних бар'єрів до навчання персоналу і відповідності роботизованих систем стандартам безпеки. Зважаючи на те, що будь-яка помилка може призвести до травм чи навіть летальних випадків, кожен з цих аспектів набуває особливої важливості.[33]

Розглянемо три основних аспекти, які мають велике значення для безпеки на робочому місці:

Безпека на робочому місці

Сучасні робочі місця стають все більш автоматизованими, що значно підвищує ризики, пов'язані з безпекою працівників. Зокрема, використання роботизованих систем на виробництвах вимагає серйозної уваги до питань охорони праці. Важливо розглядати не лише фізичні ризики, пов'язані з

роботами, а й психоемоційні та ергономічні аспекти. У цьому контексті необхідно вжити низку заходів для забезпечення безпеки працівників.

Захист працівників є основним пріоритетом. Системи автоматизації, такі як промислові роботи, можуть мати високий рівень небезпеки для людей, що працюють поряд. Для цього важливо забезпечити наявність захисних засобів, таких як:

Огорожі та бар'єри. Встановлення фізичних бар'єрів може запобігти потраплянню працівників у зони ризику. Це важливо для зменшення випадкових травм.

Датчики присутності. Використання технологій, які автоматично зупиняють роботи у разі виявлення людини в небезпечній зоні, може знизити ризик нещасних випадків. За даними дослідження, використання таких систем може зменшити травматизм на 30% автоматичні зупинки: Роботи повинні бути обладнані механізмами, які миттєво зупиняють їхню роботу у разі виникнення небезпечних ситуацій. Це забезпечує негайну реакцію на можливі загрози.

Навчання працівників. Якісна підготовка співробітників, які працюють з роботами, є критично важливою. Без знання про можливі ризики та навичок правильного використання автоматизованих систем, працівники можуть стати жертвами нещасних випадків. Основні аспекти навчання включають:

Регулярні тренінги. Працівники повинні проходити навчання з питань безпеки, яке охоплює не тільки правила безпеки, а й процедури у разі надзвичайних ситуацій.

Практичні заняття. Важливо, щоб навчання включало практичні елементи, які дозволяють співробітникам відпрацювати навички у реальних умовах.

Психологічна підготовка. Стрес та тиск, пов'язані з контролем робіт, можуть негативно вплинути на психічне здоров'я працівників.

Тренінги з управління стресом можуть допомогти зменшити рівень тривожності .

Перевірка обладнання. Регулярні огляди та технічне обслуговування роботів допомагають виявити потенційні проблеми до того, як вони стануть причиною нещасного випадку. Старіння обладнання може призводити до зниження його безпеки, тому регулярний моніторинг є ключовим аспектом безпечного експлуатаційного середовища. Згідно з дослідженням, яке аналізує вплив регулярного обслуговування на безпеку, підприємства, які проводять перевірки хоча б раз на місяць, знижують ризик нещасних випадків на 40% .

Регулярні огляди та технічне обслуговування роботизованих систем допомагають виявити потенційні проблеми до того, як вони стануть причиною нещасного випадку. Це включає:

Планове обслуговування. Важливо мати чіткий графік обслуговування, який включає перевірку всіх компонентів роботів.

Моніторинг стану обладнання. Системи моніторингу можуть виявляти аномалії у роботі обладнання, що дозволяє вчасно реагувати на проблеми .

Аналіз історії. Вивчення історії ремонту та збоїв допомагає виявити слабкі місця у системах і запобігти повторенню подібних інцидентів.

1. Ризики, пов'язані з використанням роботів

Використання роботизованих систем у промисловості та інших сферах діяльності значно підвищує продуктивність, але також пов'язане з рядом ризиків для працівників. Ці ризики можна класифікувати на фізичні, ергономічні та психологічні. Вони можуть виникати внаслідок:

Ударів і перекидань. Роботи, які виконують швидкі або важкі маніпуляції, можуть випадково вдарити працівника або перекинутися, завдаючи травми. Наприклад, згідно з дослідженням, близько 30% нещасних випадків на виробництві пов'язані з фізичним контактом з автоматизованими

системами зачеплень. Вузькі простори або неправильно спроектовані робочі місця можуть призвести до зачеплення працівників з частинами роботизованих систем. У деяких випадках це може викликати серйозні травми, якщо не буде реалізовано адекватних систем безпеки .

Ергономічні ризики. Хоча роботи можуть зменшити фізичні навантаження на працівників, неправильне проектування робочих місць може призвести до ергономічних проблем, таких як:

Неправильні позиції тіла. Тривале перебування в одному положенні або робота в незручних позах можуть викликати біль у спині та інші проблеми з опорно-руховим апаратом. Відповідно до дослідження, ергономічні ризики в середовищі автоматизації можуть зростати до 20% при недостатньому проектуванні робочих місць .

Втома. Робота може бути стресовою, якщо працівники не мають належних перерв для відновлення сил. Тривале фізичне або психічне навантаження може призвести до хронічної втоми та зниження продуктивності .

Психологічні ризики

Заслуговують на увагу, оскільки робота з автоматизованими системами може впливати на психічне здоров'я працівників. Це може включати:

Стрес. Оператори роботів можуть відчувати стрес через необхідність контролювати роботи та виконувати завдання в стислі терміни. Стрес може впливати на концентрацію та продуктивність, що в свою чергу підвищує ризик нещасних випадків .

Соціальна ізоляція. У серее роботи виконують багато завдань, працівники можуть почуватися ізольованими або відокремленими від колег, що також може негативно вплинути на їх психічний стан .

Тиск від термінів. Оператори, які працюють під тиском, щоб забезпечити продуктивність роботи роботів, можуть відчувати додатковий стрес, що негативно впливає на їхнє психічне здоров'я.

2. Нормативні вимоги

Існує ряд нормативних вимог, які покликані забезпечити безпечну експлуатацію та обслуговування роботів на робочому місці. Дотримання цих вимог є критично важливим для зменшення ризиків і забезпечення безпеки працівників. Наприклад:

ISO 10218. Цей міжнародний стандарт визначає вимоги до безпеки промислових роботів. Він охоплює проектування, виробництво, установку, експлуатацію та обслуговування роботів. Основна мета стандарту — зменшити ризики, пов'язані з роботами, та забезпечити захист працівників, які працюють у безпосередній близькості до роботизованих систем^{66**}: Цей стандарт стосується співпраці між людьми і роботами, особливо в контексті колаборативних роботів. Він встановлює вимоги до безпечного дизайну та взаємодії роботів з людьми, визначаючи допустимі рівні сили та швидкості, які можуть бути застосовані без шкоди для працівників .

EN 13489. Цей європейський стандарт також зосереджується на безпеці роботів, зокрема, на вимогах до розробки, експлуатації та обслуговування роботизованих систем. Він пропонує специфікації для оцінки ризиків і запобігання можливим небезпекам, що виникають під час взаємодії роботів з людьми та іншими машинами.

ISO/TS 15066. Це технічний стандарт, що спеціально розроблений для колаборативних роботів. Він описує вимоги до безпеки під час роботи разом з людьми, зокрема, аспекти, пов'язані з фізичними взаємодіями, і надає рекомендації щодо зменшення ризиків у цих ситуаціях. Стандарт охоплює методи оцінки ризиків та визначає безпечні межі для взаємодії.

Важливість дотримання норм не лише сприяє зменшенню ризиків травмування працівників, а й підвищує ефективність виробництва. Наприклад, системи автоматичного контролю, що впроваджуються відповідно до стандартів безпеки, можуть знизити ймовірність нещасних

випадків на 30% завдяки впровадженню заходів попередження та реагування на небезпечні ситуації.

Крім того, відповідність нормативним вимогам організаціями уникнути юридичних наслідків, пов'язаних з нещасними випадками на виробництві, а також підвищити їх репутацію на ринку. Це стає особливо важливим у сучасному світі, де безпека на робочому місці стає ключовим критерієм для вибору постачальника послуг та продуктів.

У сучасному виробничому середовищі, де активно впроваджуються автоматизовані системи та роботи, питання охорони праці набуває особливого значення. Забезпечення безпеки на робочому місці стає критично важливим для захисту працівників від потенційних ризиків, пов'язаних з роботизованими технологіями. Основні аспекти безпеки включають захист персоналу, навчання працівників та регулярну перевірку обладнання, що здатні суттєво знизити ймовірність нещасних випадків.

Також, дотримання нормативних вимог, таких як ISO 10218, ISO/TS 15066 та інших стандартів, є необхідною умовою для забезпечення безпеки роботизованих систем. Ці стандарти визначають критерії, які повинні виконуватись для зменшення ризиків на робочому місці, що включають регулярне технічне обслуговування та відповідні протоколи безпеки.

Таким чином, успішне впровадження заходів з охорони праці у сфері робототехніки є ключовим фактором для забезпечення здоров'я працівників і підвищення ефективності виробництва. Залучення всіх учасників процесу — від керівництва до операторів — до створення безпечного робочого середовища є важливим кроком у запобіганні нещасним випадкам та підтримці високих стандартів безпеки на підприємствах.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Для ефективної роботи будь-якого виробничого процесу надзвичайно важливим є мінімізація браку продукції, що може виникати через людський фактор. Впровадження роботизованих систем дозволяє зменшити ці ризики завдяки їхній високій точності та стабільності роботи. Роботи здатні виконувати завдання з точністю, яка часто перевершує можливості людини, знижуючи відсоток браку і витрати на усунення помилок.[34]

5.1. Розрахунок економічної вигоди від впровадження роботизації

Проаналізуємо економічну вигоду від впровадження роботизованих систем через порівняння рівня браку до і після автоматизації. Розглянемо умовні дані для виробництва, яке виготовляє 1000 одиниць продукції щомісяця і яке стикається зі значним рівнем браку через людські помилки.

Початкові дані

До впровадження роботів середній рівень браку становить 5%, що означає 50 одиниць браку з 1000 виготовлених одиниць на місяць.

Зниження браку після роботизації

За рахунок автоматизації рівень браку можна знизити до 1%, що становить 10 одиниць на місяць, завдяки стабільності та точності виконання завдань роботами.

Економічна вигода

Якщо вартість виготовлення однієї одиниці продукції становить 1000 гривень, то скорочення браку з 50 до 10 одиниць на місяць дозволяє заощадити:

$$(50-10) \times 1000 = 40000 \text{ гривень на місяць} \quad (4.1)$$

Окупність інвестицій

Припустимо, що впровадження роботизованої системи коштує 600.000 гривень. За місячної економії в 40.000 гривень інвестиція окупиться за:

$$600.000/40.000=15 \text{ місяців} \quad (4.2)$$

Довгострокова вигода

Після окупності інвестицій протягом першого року компанія може заощадити ще:

$$40.000 \times 12 = 480.000 \text{ гривень на рік} \quad (4.3)$$

Отже, впровадження роботизованих систем дозволяє суттєво знизити відсоток браку, зменшити витрати на виробництво, підвищити якість продукції і, таким чином, покращити економічну ефективність підприємства. Подібні розрахунки демонструють значні фінансові вигоди від автоматизації, що робить роботизацію привабливим інструментом для оптимізації виробничих процесів.

5.2. Розрахунок економії на заробітній платі

У сучасних виробничих процесах впровадження роботизованих систем сприяє зниженню витрат на робочу силу, що є важливим економічним чинником для підприємств. Розглянемо, як роботизація допомагає зменшити витрати на оплату праці та як ці економії можна обґрунтувати кількісно.

Приклад розрахунку економії на заробітній платі

Визначення основних витрат на працівників:

1. Заробітна плата (наприклад, щомісячна або погодинна).
2. Витрати на соціальні відрахування, медичне страхування, відпустки, лікарняні, тощо.

3. Вартість навчання та підвищення кваліфікації для роботи з обладнанням.

Оцінка загальних витрат на працівників для певної операції

Припустимо, що для виконання певного процесу зазвичай потрібні три працівники із середньою зарплатою 10.000 гривень на місяць. Додатково на соціальні відрахування йде близько 20%, що дає сумарні витрати в розмірі:

$$10.000 \text{ гривень} \times 3 \text{ працівники} \times 1.2 = 36.000 \text{ гривень на місяць} \quad (4.4)$$

Визначення витрат на роботизовану систему:

Вартість закупівлі та інсталяції роботизованої установки, наприклад, 500.000 гривень.

Витрати на обслуговування, яке може складати приблизно 10% від початкової вартості на рік, тобто 50.000 гривень.

Енергоспоживання та інші змінні витрати (наприклад, 5000 гривень на місяць).

Розрахунок річної економії на заробітній платі:

Витрати на персонал: $36000 \div 12 = 432.000$ гривень на рік.

Витрати на робота: $5000 \times 2 + 50.000 = 110.000$ гривень на рік.

Річна економія:

$$432.000 - 110.000 = 322.000 \text{ гривень} \quad (4.5)$$

Період окупності інвестицій, якщо вартість впровадження робота склала 500.000 гривень, а річна економія становить 322.000 гривень, то період окупності розраховується як:

$$500.000 / 322.000 \approx 1.55 \text{ роки} \quad (4.6)$$

Це означає, що інвестиції в роботизацію окупляться менше ніж за два роки, після чого підприємство зможе продовжувати отримувати економію на заробітній платі.

5.3. Витрати на навчання та перекваліфікацію персоналу

Для впровадження нових роботизованих технологій на підприємстві важливо забезпечити відповідне навчання і перекваліфікацію персоналу. Це необхідно для оптимального використання нової техніки, підвищення ефективності роботи та забезпечення безпечних умов праці. Розрахунок витрат на навчання включає кілька основних компонентів: витрати на сам процес навчання, заробітну плату працівників під час навчання та потенційні додаткові витрати.[35]

1. Основні витрати на навчання

Основні витрати включають оплату послуг навчальних центрів, оплату тренерів або спеціалістів, які проводять курси, а також придбання необхідних навчальних матеріалів. Наприклад, якщо на підприємстві потребують навчання 10 працівників, і вартість навчання одного працівника становить 1,000 доларів, то загальні витрати на основне навчання можна розрахувати так:

Основні витрати на навчання= $N \times C = 10 \times 10.000 = 100.000$ гривень

де:

N — кількість працівників, які потребують навчання;

C — вартість навчання одного працівника.

2. Додаткові витрати на заробітну плату під час навчання

Під час навчання працівники продовжують отримувати заробітну плату. Це особливо важливо врахувати, оскільки в цей період вони не виконують свої основні виробничі обов'язки, що потенційно знижує загальну продуктивність. Припустимо, що:

Час навчання (Т) для одного працівника становить 40 годин,

Середня погодинна заробітна плата (P) — 150 гривень /год.

Розрахуємо додаткові витрати на заробітну плату під час навчання:

Додаткові витрати на заробітну плату= $N \times T \times P = 10 \times 40 \times 150 = 60.000$

гривень

де:

T — час навчання одного працівника;

P — погодинна заробітна плата працівника.

3. Загальні витрати на навчання

Склавши основні та додаткові витрати, отримаємо загальну суму витрат на навчання персоналу:

Загальні витрати на навчання = $K + L = 100.000 + 60.000 = 160.000$

гривень де:

K — Основні витрати;

L — Додаткові витрати.

Переваги інвестицій у навчання

Хоча загальні витрати на навчання можуть виглядати значними, ці інвестиції мають довгострокові переваги. Навчений персонал може ефективніше взаємодіяти з роботизованими системами, що підвищує продуктивність і зменшує ризик простоїв. Крім того, навчання знижує ймовірність помилок та аварійних ситуацій, що позитивно впливає на безпеку на підприємстві.

Таким чином, загальні витрати на навчання в нашому прикладі складають 160.000 гривень, і це інвестиція в ефективне і безпечне майбутнє роботизованого виробництва на підприємстві.

Розрахунки показують, що автоматизація має значний потенціал для економії коштів на оплату праці, особливо на тривалу перспективу. Це також знижує ризики, пов'язані з людським фактором, такими як нещасні випадки на виробництві або продуктивні втрати. Відтак, впровадження роботів не

лише підвищує ефективність, але й допомагає підприємству суттєво зекономити на витратах.

ВИСНОВКИ

В представленій кваліфікаційній магістерській роботі проведено аналіз існуючих конструкцій роботів-маніпуляторів та режимів їхньої роботи. Розглянуто рух маніпулятора в площині зміни вильоту між двома заданими положеннями захватного пристрою з вантажем. За траєкторію руху захватного пристрою з вантажем прийнято пряму лінію, що з'єднує ці положення.

Проведено оптимізацію режиму руху захватного пристрою робота-маніпулятора за енергетичним, динамічним та комплексним критеріями, який складається з двох поступальних і однієї обертальної ланки. Для визначеного оптимального режиму руху захватного пристрою розв'язано зворотну задачу кінематики і визначені режими руху приводних механізмів, які реалізують оптимальний режим руху захвату.

Визначені оптимальні режими руху захватного пристрою з вантажем вздовж цієї траєкторії за критеріями енергетичних витрат та динамічної складової потужності на всій ділянці руху. За першим оптимальним режимом рух захвату повинен виконуватись на всій ділянці з постійною швидкістю, а за другим – швидкість повинна змінюватись за параболічним законом. Також розроблений комплексний оптимальний режим руху захватного пристрою, коли на ділянках пуску та гальмування швидкість змінюється за параболічним законом, а на ділянці усталеного руху є постійною.

Для отриманих оптимальних режимів руху захватного пристрою з вантажем визначені закони руху узагальнених координат, які дозволяють встановити характеристики приводних механізмів і систем їхнього керування. Також визначено оптимальний динамічний режим пуску руки робота-маніпулятора, який забезпечує мінімальну потужність приводу при достатньо плавному русі кінематичних, силових та енергетичних характеристик висувної ланки.

ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. Промисловий робот [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://www.evsint.com/uk/guide-to-industrial-robots/> (дата звернення 01.10.24)
2. 6-осьовий робот [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://www.robomotion.co.uk/the-many-uses-for-industrial-6-axis-robots/> (дата звернення 01.10.24)
3. Robot cartesiano del sistema de pórtico lineal de la mesa de posicionamiento multieje de la etapa XYZ [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://www.fuyumotion.com/uk/belt-driven-actuator-multi-axis-positioning-stage-linear-motion-gantry-robot-product/> (дата звернення 02.10.24)
4. Axis Scara Robot with Suction Gripper for Pick and Place [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://www.scic-robot.com/4-axis-scara-robot-with-suction-gripper-for-pick-and-place-product/> (дата звернення 02.10.24)
5. KR DELTA [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-delta-roboter> (дата звернення 04.10.24)
6. Автономні мобільні роботи (AMRs) [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://www.jungheinrich.ua/autonomous-mobile-robots-1303010> (дата звернення 04.10.24)
7. Тенденції робототехніки [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://robotics.ua/2024-zminyt-svit-nazavzhdy-10-trendiv-robototekhniky/> (дата звернення 04.10.24)
8. Craig, J.J. (2005) Introduction to Robotics Mechanics and Control. 3rd Edition, Pearson Prentice Hall Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

9. Liu, J., & Chen, Q. (2020). "Review of Dynamic Motion Planning in Industrial Robots," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(5), 2895-2904.

10. Chander, S. A., Mukherjee, A., Shivling, V. D., and Singla, A. (June 24, 2024). "Enhanced Euler–Lagrange Formulation for Analyzing Human Gait With Moving Base Reference." ASME. *J. Mechanisms Robotics*. January 2025; 17(1): 011006. <https://doi.org/10.1115/1.4065520>
11. De La Melena, M., and Duan, S. (May 10, 2024). "New Design and Prototype of Two Degrees-of-Freedom Planar Parallel Manipulator for Use in Creating an Infinite 3D Printer." ASME. *J. Mechanisms Robotics*. September 2024; 16(9): 091012. <https://doi.org/10.1115/1.4065082>
12. Yang Shengli, Wu Zhigang, Meng Deshan, Li Qingjun, Shao Ke. Coupled dynamics and gait optimization of the spatial structure of robot walking assembly. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(7): 1548-1558. DOI: 10.6052/0459-1879-23-135
13. Chiu-Hung Chen, Li Chi-Kuang, and Fu-I Chou Multiobjective optimization of collaborative robotic task sequence assignment problems under collision-free constraints *Advances in Mechanical Engineering* 2024 1-17
14. Чен, Л. та ін. "Applications of rotary translational robots in manufacturing systems." *International Journal of Advanced Robotic Systems* (2022)
15. Кауфман, Т. "Robot Arms in Industrial Assembly: Precision and Speed." *Manufacturing Engineering Journal* (2023)
16. Бергер, С. "Optimization of Robotic Movements in Material Processing Tasks." *Journal of Robotics and Automation* (2021).
17. Промислові роботи KUKA [Електронний ресурс] – Режим доступа: URL: <https://mentamore.com/robototexnika/promyshlennye-roboty-kuka.html> (дата звернення 08.10.24)
18. Логістичні процеси, потрібно автоматизувати [Електронний ресурс] – Режим доступа: URL: <https://isitlab.com/blog/logistics-processes-that-can-and-should-be-automated> (дата звернення 08.10.24)

19. Роботизована універсальна платформа [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://sbrobotics.ua/uslugi/sortuvalni-sistemi/platforma/> (дата звернення 08.10.24)
20. Роботи служать у медичних цілях. Нанороботи, екзоскелети та роботизовані протези [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://robotics.ua/vashe-zdorove-medytsynskaia-robototekhnika-v-nashy-dny/> (дата звернення 09.10.24)
21. Festo представи рішення за лабораторна автоматизація и медицина техника на Medica 2017 [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://industryinfo.bg/article/20584-festo-predstavi-resheniia-za-laboratorna-avtomatizaciia-i-medicinska-tehnika-na-medica-2017> (дата звернення 09.10.24)
22. Зварювальний робот Kuka KR15 [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: https://www.eurobots.com.ua/kuka_used_welding_robot_kr15_ke_mppi_positioner-uk.html (дата звернення 10.10.24)
23. Data-driven process characterization and adaptive control in robotic arc welding Peng Wang, Joseph Kershaw, Matthew Russell, Jianjing Zhang, Yuming Zhang, Robert X. Gao CIRP Annals - Manufacturing Technology 2022
24. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Кадикало І.О., Каленіченко Б.В. – «Оптимізація режиму руху маніпулятора з двома поступальними та однією обертальною ланками у площині зміни вильоту» Вісник Сумського національного аграрного університету Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», випуск 1 (51), 2023
25. Оптимізація режиму повороту стрілового крана [Электронный ресурс] : монографія / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, І. О. Кадикало. - К. : ЦП "КОМПРИНТ", 2021.
26. Динаміка й оптимізація підйомно-транспортних машин [Электронный ресурс] : монографія / В. С. Ловейкін [та ін.]. - К. : КОМПРИНТ, 2019.

27. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017.
28. Кошель С. О. Проектування промислових роботів та маніпуляторів: посібник / С. О. Кошель, Ю. Ковалєв, О. П. Манойленко — К. : Центр навчальної літератури, 2019.
29. Рівнянням Ейлера — Пуассона [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://studfile.net/preview/5740224/page:4/> (дата звернення 12.10.24)
30. Wolfram Mathematica [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://www.wolfram.com/mathematica/index.php.ru?source=footer> (дата звернення 13.10.24)
31. Robotics Safety and Innovation in the Workplace May 6, 2024 [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://develop-llc.com/knowledge-base/innovation-in-robotics-and-safety/> (дата звернення 13.10.24)
32. Traverso, Silvio; Vatierno, Massimiliano; Zaninotto, Enrico (2021) : Robots and Labor Regulation: A Cross-Country/Cross-Industry Analysis, GLO Discussion Paper, No. 928, Global Labor Organization (GLO), Essen
33. Buerkle, A, Eaton, W, Al-Yacoub, A, Zimmer, M, Kinnell, P, Henshaw, M, Coombes, M, Chen, WH & Lohse, N 2023, 'Towards industrial robots as a service (IRaaS): Flexibility, usability, safety and business models', Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 81 102484. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102484>
34. Цифрова економіка : підручник / Т. І. Олешко, Н. В. Касьянова, С. Ф. Смерічевський та ін. – К. : НАУ, 2022. – 200 с.
35. Ерділ, А. (2021). Виробничо-виробничі системи та їх значення: Оцінка гнучких виробничих систем (FMS). Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi (29), 331-342. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1024198>

ДОДАТКИ