

Факультет **КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ**

“ _____ ” (підпис) _____ (підп) 2026р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання

д.т.н., професор _____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН

(науковий ступінь, (підпис) (ПІБ)

вчене звання)

“17” грудня 2024 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Потапенку Олександр

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133- Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи **ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ
РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА ПРИ РОБОТІ З ТОКАРНИМ ВЕРСТАТОМ**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “16” грудня 2024р. № 2268“С”

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 04.05.2026
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи Технологічна схема застосування
робота-маніпулятора при роботі з токарним верстатом продуктивність,
вантажопідйомність, технічні характеристики механізмів.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій роботів-маніпуляторів, що застосовуються при роботі з верстатами з ЧПК.
2. Провести аналіз динамічних досліджень та досліджень присвячених оптимізації роботів-маніпуляторів
3. Побудувати динамічну та математичну модель роботи механізму робота-маніпулятора
4. Оптимізувати режим роботи робота-маніпулятора
5. Розглянути питання охорони праці та економічної ефективності використання робота-маніпулятора

Дата видачі завдання “17 грудня 2024 р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

_____ Вячеслав Сергійович ЛОВЕЙКІН
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ Іван Олександрович КАДИКАЛО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Олександр Анатолійович ПОТАПЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота на тему: «Оптимізація режиму руху робота-маніпулятора при роботі з токарним верстатом».

У роботі проведено дослідження режимів руху робота-маніпулятора, що використовується для обслуговування токарного верстата з числовим програмним керуванням. Основна увага приділена аналізу динамічних характеристик механізму повороту маніпулятора та оптимізації режимів його пуску з метою підвищення ефективності та надійності роботи автоматизованої виробничої системи.

У першому розділі розглянуто технічні характеристики, будову та класифікацію сучасних роботів-маніпуляторів, що застосовуються для обслуговування верстатів з ЧПК. Проведено аналіз наукових досліджень, присвячених динаміці руху роботів та оптимізації їхніх робочих режимів.

У другому розділі виконано динамічний аналіз механізму повороту робота-маніпулятора. Побудовано динамічну та математичну моделі механізму, що дозволяють визначити основні параметри руху та навантаження, які виникають у процесі роботи.

У третьому розділі здійснено оптимізацію режиму пуску механізму повороту робота. Обґрунтовано критерій оптимізації та визначено раціональний режим пуску, що забезпечує зменшення динамічних навантажень і підвищення стабільності роботи маніпулятора.

У роботі також розглянуто питання охорони праці при експлуатації роботизованих систем у машинобудівному виробництві та проведено оцінку економічної ефективності впровадження оптимізованого режиму роботи маніпулятора.

Ключові слова: робот-маніпулятор, токарний верстат, динамічний аналіз, оптимізація, механізм повороту, режим пуску, автоматизація виробництва.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	3
ЗМІСТ.....	4
ВСТУП.....	5
Розділ 1. ОГЛЯД ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ, КОНСТРУКЦІЙ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ ТА АНАЛІЗ ЇХ ДИНАМІЧНИХ ТА ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	8
1.1 Технічні характеристики, будова та класифікація роботів-маніпуляторів при роботі з верстатами ЧПК.....	8
1.2 Дослідження динаміки руху роботів-маніпуляторів.....	18
1.3 Оптимізаційні режимів руху роботів-маніпуляторів.....	22
Розділ 2. ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПОВОРOTУ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА.....	26
2.1 Побудова динамічної моделі робота-маніпулятора	26
2.2 Побудова математичної моделі.....	32
2.3 Результати динамічного аналізу механізму повороту робота	34
Розділ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ МЕХАНІЗМУ ПОВОРOTУ РОБОТА	40
3.1 Обґрунтування критерію оптимізації.....	40
3.2 Визначення оптимального режиму пуску робота-маніпулятора.....	42
Розділ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	51
Розділ 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.....	55
5.1 Загальні положення економічної ефективності.....	55
5.2 Визначення основних параметрів економічної ефективності.....	56
5.3 Порівняльний аналіз техніко-економічних показників.....	57
ВИСНОВОК	61
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ.....	63
ДОДАТКИ.....	70

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування та автоматизованих виробничих систем супроводжується активним впровадженням робототехнічних комплексів, що забезпечують підвищення продуктивності праці, точності виконання технологічних операцій і стабільності виробничих процесів. Роботи-маніпулятори широко застосовуються для автоматизації операцій завантаження та розвантаження деталей, їх транспортування та обслуговування верстатів з числовим програмним керуванням.

Ефективність роботи роботизованих систем значною мірою залежить від режимів руху механізмів маніпулятора. Від параметрів руху залежать швидкість виконання операцій, точність позиціонування, енергоспоживання та довговічність механічних елементів. Одним із важливих вузлів робота-маніпулятора є механізм повороту, який забезпечує переміщення робочого органа між технологічними позиціями. Під час його роботи виникають динамічні навантаження, особливо в моменти пуску та гальмування, що може впливати на надійність і ефективність роботи системи.

Актуальність теми полягає у необхідності оптимізації режимів руху робота-маніпулятора при роботі з токарним верстатом з метою зменшення динамічних навантажень, підвищення точності переміщення та зниження енергетичних витрат.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження та оптимізація режиму руху робота-маніпулятора при роботі з токарним верстатом для підвищення ефективності його роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз конструкцій роботів-маніпуляторів, що застосовуються для обслуговування верстатів з ЧПК.
2. Дослідити динамічні процеси руху роботів-маніпуляторів.
3. Побудувати динамічну та математичну модель механізму повороту робота.

4. Виконати динамічний аналіз механізму повороту.
5. Визначити оптимальний режим пуску механізму повороту.
6. Розглянути питання охорони праці та економічної ефективності використання робота-маніпулятора.

Об'єкт дослідження - процес руху робота-маніпулятора при роботі з токарним верстатом.

Предмет дослідження - динамічні характеристики механізму повороту робота-маніпулятора та параметри його руху.

Методи дослідження - аналітичне та математичне моделювання, динамічний аналіз і методи оптимізації.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для підвищення ефективності роботів-маніпуляторів які використовуються при роботі та обслуговуванні верстатів з ЧПК.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ, КОНСТРУКЦІЙ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ ТА АНАЛІЗ ЇХ ДИНАМІЧНИХ ТА ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Технічні характеристики, будова та класифікація роботів-маніпуляторів при роботі з верстатами ЧПК

Сучасне промислове виробництво перебуває на рівні глибокої трансформації, де головний фактор відіграє автоматизація складних технологічних процесів за допомогою роботів-маніпуляторів. Промисловий робот за своєю складовою є багатофункціональним автоматичним апаратом, що володіє декількома ступенями вільності та здатний переміщувати робочий інструмент або об'єкти маніпулювання у просторі для виконання широкого спектра виробничих завдань. Конструктивна будова таких систем визначає їхню здатність витримувати динамічні навантаження, забезпечувати високу точність позиціонування та надійно функціонувати протягом тривалих експлуатаційних періодів без значного зносу основних механічних вузлів. Основою кожного промислового маніпулятора є його механічна система, що включає несучі конструкції, приводи та передавальні механізми, які у сукупності формують кінематичний ланцюг пристрою [1]

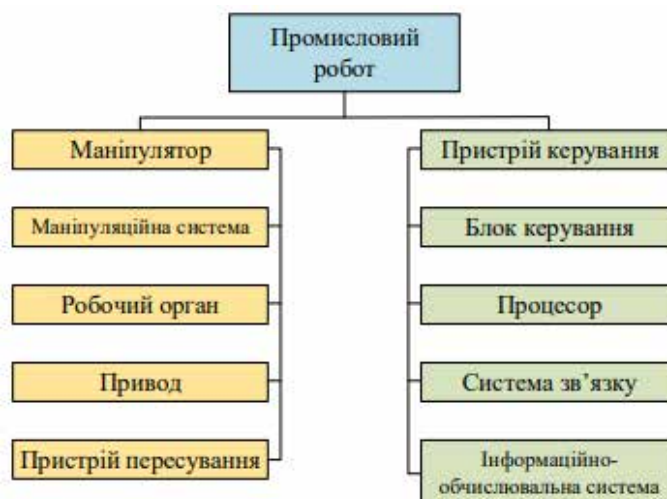


Рисунок 1.1. Загальна будова промислового робота.

Зазвичай механічна структура промислового робота є комбінацією декількох ланок, з'єднаних через суглоби, утворюючи кінематичні пари. Налаштовуючи ці пари, робот може працювати в межах певної системи координат. Традиційне розрізнення маніпуляторів було визначено на основі геометрії їх робочих зон, що безпосередньо впливає на їх застосування в машинобудуванні. Перш за все, важливо врахувати, що декартовий маніпулятор слідує прямокутній системі координат. У конструкції присутні три лінійні рухи (X , Y , Z), щоб забезпечити високу структурну жорсткість і рівномірну точність систем по всій робочій зоні. Ці системи зазвичай є порталними роботами для обслуговування великих площ і перенесення важких деталей.[2]

Циліндричні маніпулятори мають конструкцію, яка поєднує обертання навколо вертикальної осі з двома лінійними рухами. Це дає роботу можливість обслуговувати область, подібну до циліндра. Навпаки, сферичні маніпулятори використовують один лінійний і два обертальні рухи, що дозволяє роботу працювати в об'ємі сфери або її частини. Хоча такі конструкції були поширені на початку розвитку робототехніки, сучасна інженерія віддає перевагу антропоморфним роботам, а також системам SCARA. Антропоморфні маніпулятори, також відомі як вертикально артикуляційні, складаються виключно з обертальних з'єднань. Структурно це нагадує людську руку, що робить робота надзвичайно гнучким, здатним досягати точок під будь-яким кутом. Серія KUKA KR QUANTEC є прикладом такої конструкції, яка часто використовується для палетування та зварювання. [3]

Системи SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) належать до зовсім іншого сегмента. Їхня назва означає, що вибіркова відповідність конструкції базується на певних критеріях: вони мають високу жорсткість у вертикальному напрямку та певну гнучкість у горизонтальній площині. Це досягається завдяки наявності двох паралельних обертових з'єднань, що працюють у горизонтальній площині, та одного вертикального лінійного вузла.

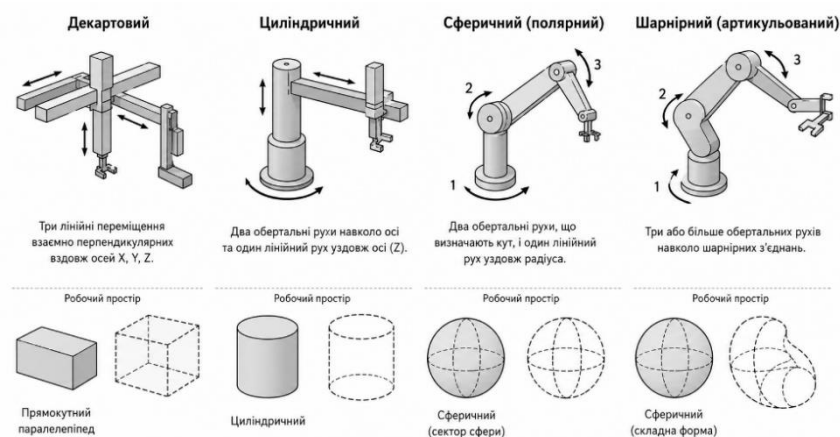


Рисунок 1.2. Класифікація роботів-маніпуляторів за типом кінематичної структури та формою робочого простору

Маніпулятори SCARA призначені для швидкого складання дрібних деталей для складальних операцій, переміщення речей на короткі відстані з високою циклічністю. [4]

Таблиця 1.1. Кінематична структура роботів-маніпуляторів

Тип маніпулятора	Ступені вільності	Геометрія робочої зони	Основна перевага
Декартів	3 лінійні	Прямокутна	Висока жорсткість та простота керування
Циліндричний	1 оберт., 2 лінійні	Циліндрична	Зручність обслуговування кругових зон
SCARA	2 оберт., 1 лінійний	Плоско-циліндрична	Висока швидкість у горизонтальній площині
Антропоморфний	5-7 обертальних	Сферична (складна)	Максимальна маневреність та універсальність

Кількість ступенів вільності визначає складність кінематики робота. Для більшості завдань у машинобудуванні достатньо шести ступенів вільності, що дозволяє встановити робочий орган у будь-яку точку простору з будь-якою орієнтацією. Проте існують і семикоординатні роботи, як-от серія Yaskawa Motoman SIA, які мають додатковий суглоб для уникнення сингулярностей та роботи у вкрай обмеженому просторі [5]

Ланки маніпулятора є основними підтримуючими компонентами, які передають силу від приводів до робочого інструмента. Вибір матеріалу для ланок є важливим питанням при проектуванні, оскільки необхідно збалансувати власну

вагу конструкції та її жорсткість. У промисловості литі алюмінієві сплави використовуються переважно для середніх навантажень, а важкі роботи в основному будуються з високоміцної сталі. Тенденцією останніх років стало використання вуглецевого волокна в конструкціях дельта-роботів для мінімізації інерції та досягнення надвисоких швидкостей руху.[6]

З'єднання в роботі з'єднують ланки і забезпечують їх рух у пропорції. Кожне з'єднання є складним вузлом, що включає опору підшипника, систему ущільнення для захисту від пилу та вологи, а також вбудовані датчики положення. Хрестові роликові підшипники часто використовуються у високоточних маніпуляторах, оскільки вони можуть витримувати значні радіальні та осеві навантаження, зберігаючи при цьому невеликі розміри. Жорсткість з'єднання безпосередньо впливає на точність позиціонування; це головним чином обумовлено тим, що будь-яка еластична деформація у вузлі призводить до відхилення кінцевого ефектора від заданої траєкторії. [7]

Головним елементом механічної будови є кінематичні пари. У робототехніці найчастіше використовуються пари п'ятого класу – обертальні (циліндричні шарніри) та поступальні (призматичні напрямні). Комбінація цих пар визначає кінематичну схему робота. Наприклад, антропоморфні роботи FANUC серії R-2000iC мають послідовну структуру обертальних пар, що забезпечує велику зону досяжності при компактній основі [8]



Рисунок 1.3. Антропоморфні промисловий робот FANUC R-2000iC

Електромеханічні приводи є найпопулярнішими в промисловій робототехніці, оскільки вони забезпечують високу точність, чистоту та можуть легко інтегруватися в систему мікропроцесорного управління. Одним з основних елементів приводу є сервомотор – електрична машина з вбудованим зворотним зв'язком. Роботи працюють за допомогою сервомотора, наприклад, цей ABB IRB 6700, який функціонує на основі синхронних машин з постійними магнітами. Вони можуть виробляти високий крутний момент на низькій швидкості та виконувати швидке прискорення і гальмування. [9]



Рисунок 4. Промисловий робот-маніпулятор ABB IRB 6700

З іншого боку, сервомотор недостатньо потужний, щоб приводити в рух великі ланки робота, і редуктор є фундаментальною частиною в них. У робототехніці редуктори дуже вимогливі: мінімальний люфт, висока крутильна жорсткість і компактність. Деякі з найпоширеніших включають гармонічні приводи та циклоїдальні редуктори. Гармонічні приводи покладаються на деформацію гнучкого зубчастого кільця, що забезпечує нульовий люфт і високі передаточні числа в одному ступені. Вони підходять для зап'ясть роботів, вага яких має важливе значення. [10]

Циклоїдальні редуктори, однак, застосовуються на перших, найбільш навантажених осях робота. Їх конструкція передбачає прокатування роликів по циклоїдальному профілю диска, що забезпечує велику контактну площу та

виняткову стійкість до ударних навантажень. Cone Drive пропонує циклоїдальні рішення для роботів, які потребують високої динамічної жорсткості при роботі з важкими заготовками. [11]

Окрім електричних, у деяких галузях досі використовуються гідравлічні та пневматичні приводи. Гідравліка застосовується в надважких завданнях для виробництва ковальських виробів, де зусилля вимірюються в тоннах, але їхні недоліки включають складність обслуговування та ризик витoku робочої рідини. Пневматичні приводи частіше зустрічаються в простих маніпуляторах для операцій «взяти-покласти» або як допоміжні елементи в захоплюючих пристроях.[12]

Кінцевою ланкою будь-якого маніпулятора є робочий орган, який визначає функціональне призначення робота. Це включає захоплювальні пристрої, необхідні для виконання завдань завантаження та розвантаження на токарних верстатах з ЧПУ. Їх конструкція повинна забезпечувати надійне утримання деталі та її точне позиціонування в патроні верстата. Захоплювачі працюють за принципом дії та поділяються на механічні, вакуумні та магнітні захоплювачі. Механічні захоплювачі з щелепами є найбільш універсальним типом; вони можуть бути дво- або трипальцевими. Трипальцеві центруючі захоплювачі (наприклад, Schunk PZN-plus) забезпечують автоматичне вирівнювання осі деталі з віссю шпинделя верстата, що є критично важливим для токарних операцій.[13]

Сучасні захоплювальні пристрої оснащені датчиками сили та крутного моменту. Це дозволяє роботу «відчувати» опір при вставлянні деталі у фіксатор і таким чином запобігає пошкодженню обладнання у випадку неправильної орієнтації заготовки. Крім того, використання систем машинного зору дозволяє захоплювати неорієнтовані деталі безпосередньо з купи в контейнері, що спрощує логістику в майстерні. [14]

Встановлення захоплювального пристрою на робота здійснюється через механічний інтерфейс, регульований відповідно до стандарту ISO 9409-1. Наприклад, роботи Universal Robots UR10e мають фланець діаметром 50 мм і

чотири отвори М6 для полегшення інтеграції захоплювача для користувачів від різноманітних виробників.[15]



Рисунок 1.5. Роботи Universal Robots UR10e

Для інженера-конструктора точність робота можна розділити на дві частини: абсолютна точність позиціонування та повторюваність. Повторюваність визначає здатність робота повертатися до раніше навченої точки. Повторюваність більшості сучасних промислових роботів знаходиться в межах 0,02...0,06 мм, що є цілком достатнім для розміщення деталей у машинах. З іншого боку, абсолютна точність - здатність досягати точки за координатами без попереднього навчання - зазвичай набагато гірша - вона може варіюватися від 0,5...1,5 мм через помилки кінематичної моделі та еластичні деформації.[16]

При роботі з динамічними навантаженнями структура маніпулятора, швидше за все, буде жорсткою. Швидкісний рух робота викликає значні інерційні сили на частині секції, що призводить до коливань у ланках. Виробники вирішують це за допомогою алгоритмів компенсації вібрацій і, нарешті, проектують ланки з високим моментом інерції поперечного перерізу, щоб мінімізувати цей ефект. Ефект люфту редуктора є ще одним важливим фактором. Навіть мікроскопічний зазор у першому шарнірі робота з 3-метровим подовженням руки призводить до значного відхилення на кінці маніпулятора. Ось чому в задачах високої точності використовуються безлюфтові гармонічні приводи або циклоїдальні редуктори з попереднім натягом. [17]

Різке гальмування та прискорення викликають динамічні навантаження, які створюють значні напруження в зварних і болтових з'єднаннях ланок. Металева втома в цих вузлах призводить до поступової втрати точності. Щоб уникнути цієї проблеми, конструкції роботів KUKA використовують ідею порожнистих валів, які не тільки полегшують конструкцію, але й дозволяють прокладати кабелі всередині, захищаючи їх від стирання та зовнішніх впливів. [18]

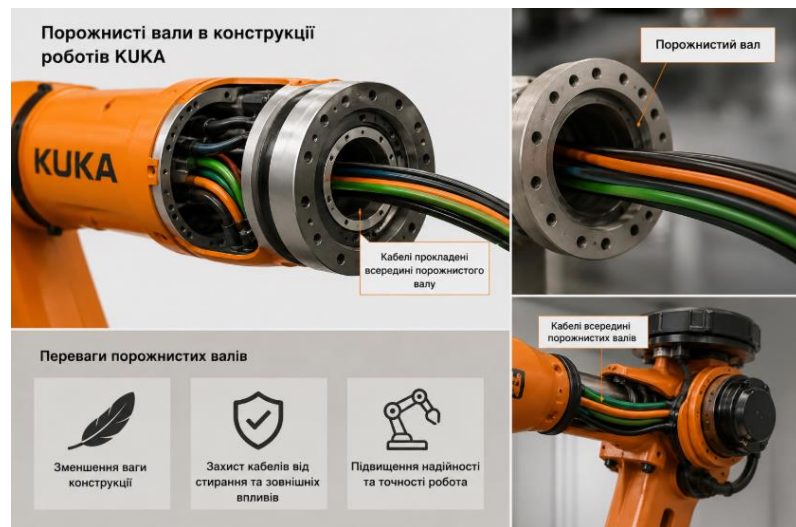


Рисунок 1.6. Конструкції роботів KUKA

Умови обертання та автоматизації накладають певні обмеження на структуру конструкції робота.

Маніпулятор повинен бути достатньо малим, щоб зручно розміщуватися в робочій зоні машини - простір може бути обмежений головою револьвера та задньою бабкою. Роботи серії FANUC M-20iD розроблені для цього: зап'ястя має лише невеликий радіус повороту, тому воно може маніпулювати деталями в патроні, не зачіпаючи головку з кришками машини.[19]



Рисунок 1.7. Роботи серії FANUC M-20iD

Синхронізація системи управління також важлива. Робот і машина повинні спілкуватися, використовуючи промислові протоколи щодо сигналів готовності. ПЛК машини повідомляє: "Цикл завершено, патрон відпущено", і робот входить у зону. Затримки передачі сигналу або збій синхронізації можуть призвести до аварії. Саме тому сучасні роботизовані осередки покладаються на високошвидкісні мережі реального часу. [20]

Двосторонні захоплювальні пристрої часто використовуються для автоматизації завантаження заготовок. Робот бере нову заготовку з накопичувача, підходить до машини, знімає готову деталь вільним захопленням, повертає зап'ястя на 180 градусів і встановлює нову заготовку. Це дозволяє зменшити час простою машини до кількох секунд. Позиціонування деталей у патроні токарного верстата часто вимагає додаткової сили затиску, щоб забезпечити щільне прилягання заготовки до кінців кулачків. Робот повинен мати достатню вантажопідйомність і жорсткість, щоб забезпечити цю силу без втрати точності орієнтації. [19]

У серійному виробництві роботи не працюють як окремі частини; вони об'єднуються в роботизовані технологічні осередки. Такий осередок складається з одного або більше роботів, верстатів з ЧПУ, системи накопичення та подачі деталей, а також поста контролю якості. Роботизовані комплекси ABB

OmniVance є прикладами стандартизованих рішень, де маніпулятор інтегрований із системою безпеки та ПЛК-контролем усієї лінії. [4]

Використання роботів для серійного виробництва підтримує концепцію "безлюдного виробництва", де лінія працює протягом тривалого часу самостійно. Це означає, що дизайн робота має бути надзвичайно надійним. Наприклад, середній час між відмовами роботів FANUC перевищує 80 000 годин, що досягається завдяки використанню високоякісних мастил та системи моніторингу стану приводу в реальному часі. [3]

Сучасні роботи також розроблені з урахуванням ергономіки обслуговування. Точки змащування зазвичай розташовані в зручних місцях, а редуктори мають порти для аналізу стану масла без необхідності повного розбирання агрегату. У деяких моделях, таких як KUKA KR IONTEC, конструкція дозволяє замінювати окремі модулі (наприклад, вузол зап'ястя) без потреби в повній перекалібровці робота, що значно скорочує час ремонту. [8]



Рисунок 1.8. Ергономіка обслуговування промислового робота KUKA KR IONTEC

Комплексна характеристика структурних компонентів підшипників і кабельних систем. Ефективність роботи маніпулятора значною мірою залежить від допоміжних елементів, які часто залишаються непоміченими. З'єднання підшипників повинні не лише забезпечувати легкість обертання, але й гарантувати відсутність радіального биття, яке може спричинити знос зубців

шестерні протягом тривалого часу. Конструкції роботів Yaskawa використовують спеціалізовані підшипники з дуже низьким моментом тертя для зменшення споживання енергії та генерації тепла в з'єднаннях. [18]

Найбільш вразлива частина кабельної системи робота (dress pack). Кабелі постійно згинаються і скручуються під час руху, що призводить до їх зносу. Цю проблему вирішують шляхом введення кабелів у литі конструкції ланок, розроблені конструкторами роботів Kawasaki. Порожнисті зап'ястя забезпечують можливість подачі пневматичних ліній у захват через центральний отвір останнього з'єднання, що усуває ризик зачеплення шлангів за обладнання верстата. [16]

Інша система - це системи балансування. Гідропневматичні або пружинні компенсатори ваги використовуються у важких роботах, таких як KUKA KR titan. Вони створюють протидіючу силу, яка компенсує вагу другого і третього з'єднань, що дозволяє використовувати менш потужні сервомотори і зменшувати навантаження на редуктори. Це не тільки допомагає з енергоефективністю, але й покращує динамічні характеристики робота. [11]

Промислові роботи працюють у суворих умовах, таких як металевий пил, а також зі сплесками мастильно-охолоджувальної рідини (MOP), з значними коливаннями температури. Таким чином, конструкція корпусу повинна відповідати високому класу захисту, зазвичай IP65 або IP67. Деякі ливарні роботи мають спеціальні покриття для додаткової стійкості до корозії та високих температур, а їхні з'єднання захищені посиленими ущільненнями. [6]

Теплові деформації також можуть впливати на точність роботи. Коли ланки нагріваються, вони подовжуються, що вводить помилку в позиціонування кінцевого ефектора. Сучасні системи управління використовують алгоритми корекції температури на основі даних з вбудованих температурних датчиків з'єднань для перерахунку кінематичної моделі робота в реальному часі з метою компенсації цього ефекту. [29]

Аналіз структурних конструкцій промислових роботів-маніпуляторів свідчить про те, що галузь прагне об'єднати механіку, електроніку та програмне

забезпечення в єдиний, високонадійний комплекс. Використання нових матеріалів, прецизійних редукторів без люфту та потужних сервоприводів дозволяє роботам виконувати завдання, які раніше були обмежені спеціалізованими машинами. Розуміння механічної складової робота є ключем до успішного впровадження автоматизованих систем на підприємстві. Лише правильний вибір кінематичної схеми, вантажопідйомності та жорсткості маніпулятора може гарантувати економічну ефективність роботизованого комплексу.[11]

1.2. Дослідження динаміки руху роботів-маніпуляторів

Сучасні виробничі процеси ставлять перед роботами-маніпуляторами значно жорсткіші вимоги щодо швидкодії та точності виконання операцій. Якщо ще декілька років тому невеликі затримки або похибки у русі вважалися допустимими, то нині ефективність кожного переміщення безпосередньо впливає на продуктивність усього виробництва. Саме тому впродовж останнього десятиліття особлива увага приділяється дослідженню динаміки руху роботизованих систем. Науковці намагаються визначити, яким чином інерційні сили та сили тертя впливають на точність позиціонування виконавчих органів. Для математичного опису руху й надалі широко використовуються рівняння Ейлера–Лагранжа, за допомогою яких визначають енергетичні параметри окремих ланок маніпулятора. Аналіз показує, що при роботі на високих швидкостях виникають додаткові динамічні ефекти, зокрема сили Коріоліса, здатні викликати небажані коливання конструкції. Під час дослідження шестиступеневих роботів типу P-Rob було встановлено, що точність відпрацювання траєкторії суттєво залежить від правильності врахування маси приводів та редукторів. Неточність математичної моделі часто призводить до появи вібрацій, що є критичним під час монтажу мікродеталей або автоматизованого пакування продукції. Для компенсації подібних впливів

застосовують спеціальні спостерігачі збурень, здатні в режимі реального часу визначати небажані сили та коригувати роботу системи керування [22, 24].

Однією з актуальних проблем сучасної робототехніки є також гнучкість ланок маніпулятора. Зменшення маси конструкції, яке необхідне для підвищення швидкодії, водночас призводить до зниження жорсткості механізму. У результаті окремі елементи маніпулятора можуть деформуватися під дією навантаження [27]. Для опису таких процесів зазвичай використовують теорію Ейлера–Бернуллі, відповідно до якої ланки розглядаються як пружні балки [32]. Дослідження свідчать, що навіть незначна зміна маси вантажу помітно впливає на власні частоти коливань системи. Традиційні регулятори часто не забезпечують необхідної точності, тому дедалі частіше використовуються каскадні системи керування та активне демпфування. Подібні системи здатні швидко реагувати на появу вібрацій і змінювати параметри приводів для стабілізації руху маніпулятора [28]. Українські дослідники також приділяють значну увагу аналізу поведінки роботів із жорсткими та еластичними елементами під час виконання інтенсивних переміщень, що дозволяє зменшити похибки у кінцевих точках траєкторії [28].

Останніми роками значного поширення набув підхід, заснований на використанні оператора Купмана. Його застосування дає можливість замінити складні нелінійні рівняння динаміки простішими математичними моделями, які легше обробляються комп'ютерними системами. Це особливо актуально у випадках, коли робот працює зі змінними навантаженнями або коли характеристики тертя змінюються внаслідок зношування механізмів. Завдяки такому підходу маніпулятор може автоматично адаптуватися до нових умов без необхідності повторного програмування. Практичні експерименти підтверджують, що використання подібних моделей забезпечує значно вищу точність руху, особливо під час проходження складних просторових траєкторій [22].

Важливою сферою застосування промислових маніпуляторів є механічна обробка матеріалів – фрезерування, шліфування та інші технологічні операції. У

багатьох випадках роботи вже замінюють традиційні верстати з числовим програмним керуванням, однак недостатня жорсткість конструкції все ще залишається суттєвим недоліком [35]. Під час різання або шліфування інструмент зазнає дії значних сил, через що маніпулятор може змінювати своє положення відносно заготовки. Такі явища описують як позиційно-залежну динаміку. Для зменшення похибок використовуються алгоритми прогнозування деформацій, які заздалегідь обчислюють можливий прогин та автоматично вносять корекції у траєкторію інструмента [35]. Це дозволяє підвищити точність обробки й скоротити тривалість виробничого циклу. Водночас правильний вибір конфігурації маніпулятора також суттєво впливає на стабільність роботи системи [27, 30, 35].

Помітний внесок у розвиток спеціалізованих маніпуляторів зробили українські науковці, зокрема у сфері створення роботизованих систем для пожежогасіння [23]. Керування пожежними моніторами супроводжується значними реактивними навантаженнями, що потребує високої стійкості конструкції. Розроблені у Львівській політехніці п'ятиланкові маніпулятори проходять комплексний аналіз у середовищах SolidWorks та Mathematica, що дозволяє оцінити поведінку системи ще на етапі проектування [23]. Крім того, у таких роботах активно досліджується використання пневматичних приводів та нечітких регуляторів, які забезпечують компенсацію нелінійних властивостей стисненого повітря [37].

Не менш актуальною залишається проблема надлишкових ступенів вільності маніпулятора [30]. У таких системах робот може досягати однієї й тієї ж точки різними способами, що відкриває можливості для оптимізації траєкторій руху. Сучасні методи дозволяють обирати варіант переміщення з мінімальними енергетичними витратами та плавнішими переходами між положеннями. Замість традиційних громіздких обчислень дедалі частіше використовуються геометричні підходи та спеціальні поверхні конфігурацій, які допомагають уникати небезпечних або нестійких положень механізму [30]. Для м'яких роботизованих систем, які нагадують щупальця та не мають жорсткої структури,

створюються спеціальні віртуальні моделі руху, необхідні, зокрема, у медичних роботах та хірургічних комплексах [25, 40].

Активно розвиваються й методи навчання роботів через демонстрацію [26]. У цьому випадку оператор не програмує маніпулятор вручну, а просто показує йому необхідну траєкторію руху. Після цього система за допомогою алгоритмів ітераційного навчання коригує похибки, пов'язані з інерцією, швидкістю та динамікою вантажу [29]. Подібний підхід особливо корисний під час роботи з крихкими або малорозмірними деталями [46]. Окрему роль відіграє використання великих мовних моделей, які дозволяють роботам аналізувати голосові команди та автоматично формувати послідовність дій відповідно до умов навколишнього середовища [36].

Питання енергоефективності також набуває дедалі більшого значення [31]. Сучасні підходи до керування розглядають маніпулятор як систему обміну енергією із зовнішнім середовищем. Це дає можливість створювати стійкі алгоритми керування навіть для високошвидкісних режимів роботи [31]. Крім того, перед впровадженням на виробництво роботизовані системи часто проходять навчання у віртуальному середовищі. Хоча комп'ютерне моделювання ще не здатне повністю відтворити реальні фізичні умови, використання адаптивних механізмів дозволяє значно скоротити різницю між симуляцією та практикою [33].

Маніпулятор повинен не лише точно виконувати завдання, а й швидко реагувати на непередбачувані дії оператора або появу перешкод. Для цього створюються системи, здатні враховувати невизначеність положення людини та оперативно змінювати траєкторію руху без зупинки технологічного процесу. Значну увагу також приділяють автоматичному калібруванню роботів за допомогою систем технічного зору, які компенсують похибки, пов'язані зі зношуванням механізмів або нагріванням приводів [42, 34].

Підсумовуючи, можна зазначити, що сучасні дослідження динаміки роботів-маніпуляторів спрямовані на створення адаптивних, енергоефективних і високоточних систем [22, 34]. За останні роки робототехніка перейшла від

простих алгоритмів повторення руху до інтелектуальних систем, здатних самонавчатися, компенсувати вібрації та ефективно взаємодіяти з людиною [26, 28, 34]. Значний внесок у розвиток цієї галузі роблять і українські вчені, особливо у сфері мобільних та спеціалізованих робототехнічних комплексів [23, 37]. У подальшому очікується поява ще більш автономних маніпуляторів, здатних працювати у складних умовах практично без участі людини [34].

1.3. Оптимізація режимів руху роботів-маніпуляторів

На сучасному етапі розвитку промислових технологій роботизовані системи стали одним із базових елементів автоматизованого виробництва, забезпечуючи виконання широкого спектра технологічних операцій у машинобудуванні, електронній промисловості, логістичних комплексах та аграрному секторі. Використання роботів-маніпуляторів дозволяє суттєво підвищити продуктивність виробничих процесів, зменшити кількість технологічних помилок та мінімізувати вплив людського фактора [47]. Водночас розширення сфер застосування таких систем супроводжується зростанням вимог до їх швидкодії, точності позиціонування, надійності та енергоефективності, що безпосередньо визначає актуальність задачі оптимізації режимів руху сучасних робототехнічних комплексів [48].

Роботи-маніпулятори являють собою складні багатоланкові електромеханічні системи, у яких усі елементи взаємопов'язані як кінематично, так і динамічно. Під час їх функціонування виникають інерційні сили, моменти Коріоліса, гравітаційні навантаження та пружні деформації, що істотно впливають на точність руху та стабільність роботи системи [49]. Особливо критичними ці ефекти стають у високошвидкісних режимах, де навіть незначні відхилення у керуванні можуть спричиняти вібрації, перевантаження приводів або втрату точності позиціонування [50]. У таких умовах класичні моделі керування вже не забезпечують достатнього рівня якості, оскільки не враховують повною мірою нелінійний характер динаміки багатоланкових систем [51].

Додаткову складність становить той факт, що параметри роботів-маніпуляторів можуть змінюватися під час роботи через зміну навантаження, зношування механічних елементів або зовнішні збурення. Це призводить до того, що традиційні ПД-регулятори часто втрачають ефективність у складних динамічних режимах [52]. Саме тому сучасні дослідження все більше орієнтуються на адаптивні та інтелектуальні методи керування, які здатні автоматично підлаштовуватися під змінні умови роботи системи та забезпечувати стабільність руху [53].

Важливий напрям розвитку пов'язаний із застосуванням біоінспірованих алгоритмів оптимізації, серед яких особливе місце займають методи рою частинок та еволюційні підходи. Вони дозволяють ефективно розв'язувати складні багатокритеріальні задачі без необхідності побудови точних аналітичних моделей [57]. Подібні методи забезпечують покращення якості перехідних процесів, зменшення перерегулювання та підвищення стійкості до зовнішніх збурень, що є особливо важливим для робототехнічних систем із високими вимогами до точності [58].

Значний внесок у розвиток напрямку оптимізації роботизованих систем зробили українські науковці, зокрема В. Ловейкін та Ю. Ромасевич, які досліджували проблеми зниження динамічних навантажень у маніпуляційних і кранових системах. Запропоновані ними підходи дозволяють ефективніше керувати перехідними процесами та мінімізувати пікові навантаження на приводи [53]. Подальший розвиток цих ідей призвів до створення модифікованих алгоритмів рою частинок, які забезпечують уникнення локальних мінімумів та підвищують стабільність збіжності оптимізаційних процедур [54]. Це, у свою чергу, сприяє зменшенню енергоспоживання та підвищенню ефективності роботи роботизованих систем у реальних виробничих умовах [55]. Особливо це є актуальним для систем зі змінним навантаженням, де динаміка роботи суттєво залежить від маси об'єкта та характеру руху [56].

Окрему увагу в сучасній робототехніці приділяють системам ковзного режиму керування, які характеризуються високою робастністю до

параметричних невизначеностей і зовнішніх збурень [59]. Такі системи здатні забезпечувати стабільність навіть у складних умовах експлуатації, проте їх основним недоліком є явище високочастотних коливань керуючого сигналу, відоме як *chattering*, яке може негативно впливати на механічні елементи системи [60]. Для усунення цього ефекту застосовуються комбіновані підходи, зокрема структури PID-SMC, які поєднують плавність класичного ПІД-регулювання з високою стійкістю ковзного режиму [61].

Не менш важливим напрямом досліджень є формування оптимальних траєкторій руху роботів-маніпуляторів. Традиційні трапецієподібні профілі швидкості часто призводять до різких змін прискорення, що викликає ривки у механічній системі та підвищує зношування конструктивних елементів [62]. Для усунення цих недоліків застосовуються S-подібні профілі швидкості, які забезпечують більш плавні перехідні процеси та безперервність вищих похідних координат руху [63]. Такі підходи дозволяють значно зменшити динамічні навантаження та підвищити загальну стабільність функціонування роботизованих систем [64].

У складних виробничих середовищах, де роботам доводиться працювати в умовах наявності перешкод та змінної конфігурації простору, застосовуються методи планування траєкторій на основі потенціальних полів та топологічної оптимізації. У таких моделях цільові точки розглядаються як області притягання, тоді як перешкоди формують відштовхувальні поля, що дозволяє автоматично формувати безпечні маршрути руху [65]. Подібні підходи забезпечують адаптивність системи та дозволяють оперативно реагувати на зміну зовнішнього середовища, що є критично важливим для сучасних автоматизованих виробництв [62].

У рамках концепції Індустрії 5.0 особливого значення набувають колаборативні робототехнічні системи, які передбачають безпосередню взаємодію людини та робота в єдиному робочому просторі [66]. У таких умовах система повинна не лише виконувати задані траєкторії, але й адаптуватися до дій оператора в режимі реального часу. Для цього застосовуються технології *sensor*

fusion, що об'єднують дані з різних сенсорних систем у єдину модель середовища, а також алгоритми машинного навчання, які дозволяють прогнозувати поведінку людини та відповідно коригувати рух робота [63]. Це підвищує безпеку взаємодії та дозволяє скоротити час виконання спільних виробничих операцій [66].

Енергоефективність роботизованих систем є ще одним ключовим аспектом їх оптимізації, оскільки енергоспоживання безпосередньо впливає на економічну ефективність виробничих процесів. Раціональний вибір законів керування дозволяє зменшити пікові навантаження на приводи та оптимізувати використання енергетичних ресурсів [57]. Це особливо важливо для великих виробничих комплексів, де одночасно функціонує значна кількість роботизованого обладнання [58].

Подальший розвиток робототехнічних систем пов'язаний із впровадженням методів штучного інтелекту, адаптивного керування та інтелектуальних матеріалів. Очікується, що майбутні системи зможуть самостійно аналізувати свій технічний стан, прогнозувати виникнення нестабільних режимів та автоматично коригувати параметри руху залежно від умов експлуатації [65]. Такі підходи формують основу для створення нового покоління роботизованих комплексів, здатних працювати автономно та максимально ефективно [66].

Таким чином, оптимізація режимів руху роботів-маніпуляторів є складною міждисциплінарною задачею, яка поєднує методи теорії керування, динаміки механічних систем, математичної оптимізації та штучного інтелекту. Її вирішення дозволяє суттєво підвищити точність, надійність та енергоефективність сучасних виробничих систем і формує основу для подальшого розвитку інтелектуальної робототехніки нового покоління [66].

РОЗДІЛ 2

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПОВОРОТУ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

2.1. Побудова динамічної моделі робота-маніпулятора

Механізм повороту робота при роботі на ділянках перехідних процесів характеризуються наявністю динамічних навантажень, що виникають в елементах приводного механізму і в поворотній частині робота. Тому є потреба у виявленні та дослідженні цих навантажень. Вони негативно впливають на елементи конструкції, і призводять до руйнування механізму, підвищення енергозатрат, погіршення роботи робота. Для проведення досліджень динаміки повороту робота необхідно побудувати його динамічну модель, яка враховує основні його динамічні властивості і нехтує другорядні властивості, що не мають суттєвого впливу на динаміку поворотного механізму.

При переході від реальної конструкції механізму повороту робота до його динамічної моделі нехтуємо масами валів, паса пасової передачі, але враховуємо їхню жорсткість. При побудові динамічної моделі механізму повороту робота враховуємо зосереджені маси ротора електродвигуна, шківів пасової передачі, черв'яка та черв'ячного колеса черв'ячної передачі та поворотну частину робота. Також враховуємо залежності рушійного моменту приводного електродвигуна від частоти обертання його ротора, моменту сил опору повороту робота і т. д. У кожному конкретному випадку одні фактори є головними, а інші – другорядними. Модель не повинна бути громіздкою, повинна відображати основні елементи механізму повороту робота і їхні властивості, бути нескладною для полегшення розрахунків.

На рис 2.1 зображена кінематична схема механізму повороту робота. Розділимо її на дві частини, перша з яких буде включати ротор електродвигуна та приводний шків пасової передачі, а в другу частину ввійдуть черв'як з черв'ячним колосом та поворотна частина робота. Між першою та другою

частинами розміщений пружний елемент, який моделює пружні властивості паса пасової передачі. Всі елементи поворотного механізму робота-маніпулятора зведені до осі повороту веденого шківів пасової передачі.

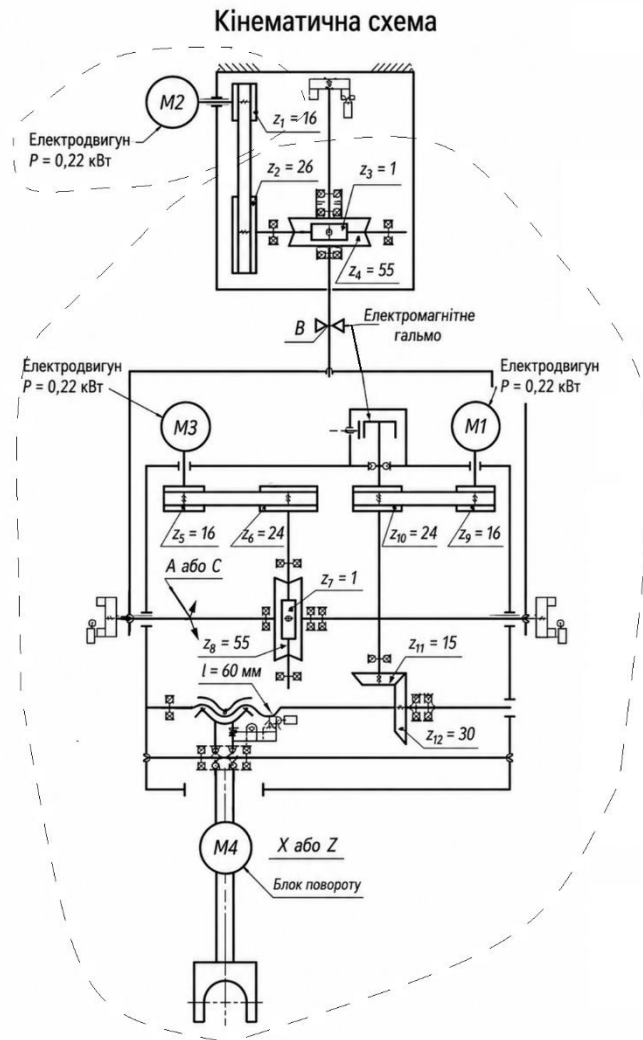


Рис. 2.1 – Кінематична схема механізму повороту робота

Розрахунок основних параметрів приводу механізму повороту робота, необхідні для побудови динамічної моделі. $\lambda = M_{\max}/M_{\text{ном}} = 10,0$ - відношення максимального моменту до мінімального. Момент інерції ротора електродвигуна – $J_1 = 0,0028 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції ведучого шківів $J_2 = 0,0015 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції веденого шківів $J_3 = 0,0048 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції черв'яка $J_4 = 0,0026 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції черв'ячного колеса $J_5 = 0,72 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції поворотної частини робота $J_6 = 44,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Всі інші параметри механізму повороту були розраховані або взяті з бакалаврської роботи. Наведено

характеристику приводного електродвигуна постійного струму потужністю $P_n = 0,22$ кВт з номінальною частотою обертання $n_n = 2000$ об/хв.

Визначимо номінальну кутову швидкість ротора електродвигуна

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 * 2000}{30} = 209,3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Визначимо також номінальний момент на валу електродвигуна

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{220}{209,3} = 1,05 \text{ Нм}.$$

Визначимо пусковий момент на валу електродвигуна

$$M_p = \lambda * M_n = 10 * 1,05 = 10,5 \text{ Нм}.$$

За розрахованими параметрами побудуємо механічну характеристику двигуна постійного струму. Оскільки механічна характеристика двигуна постійного струму має лінійну залежність між рушійним моментом і кутовою швидкістю валу двигуна, то вона буде мати вигляд, показаний на рис.2.2.

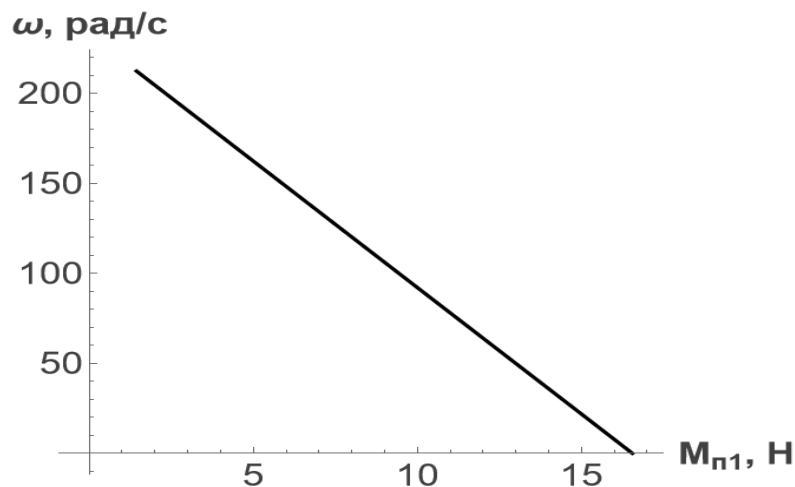


Рис. 2.2. – Механічна характеристика електродвигуна постійного струму 4ДПУ

На основі кінематичної схеми механізму повороту робота (рис.2.1) побудовано його динамічну модель (рис.2.3). В динамічній моделі врахуємо основний рух приводного електродвигуна та пружну деформацію паса пасової передачі. В результаті чого динамічна модель поворотного механізму робота буде мати два ступені свободи. Тоді динамічну модель механізму повороту робота зводимо до двомасової динамічної моделі (рис.2.3).

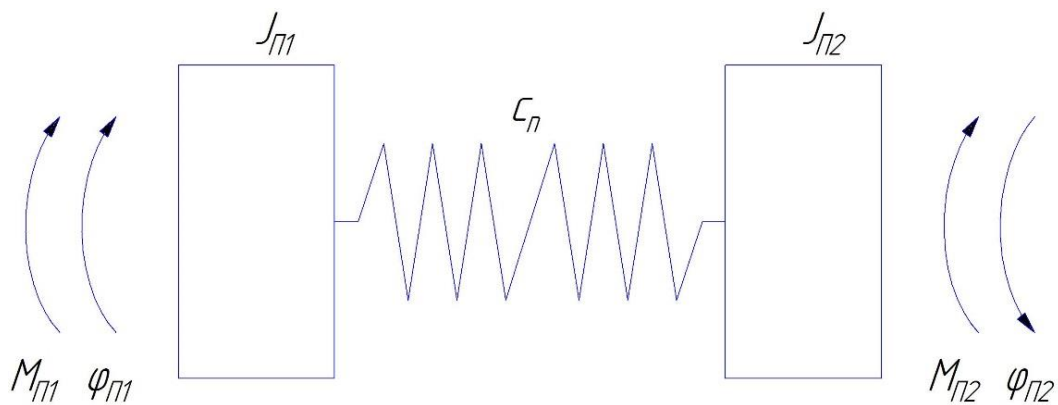


Рис. 2.3.— Динамічна модель механізму повороту робота

Тут $J_{П1}$ та $J_{П2}$ – зведені моменти інерції першої та другої частин механізму повороту робота; C_n – коефіцієнт жорсткості пружного елементу, що з'єднує зведені маси; $M_{П1}$ та $M_{П2}$ – зведені рушійний момент першої частини механізму та момент сил опору другої частин механізму повороту робота; $\varphi_{П1}$ – кутова координата повороту першої маси динамічної моделі механізму повороту робота; $\varphi_{П2}$ – кутова координата повороту другої маси динамічної моделі механізму повороту робота. Зведені маси динамічної моделі зведемо до осі повороту веденого шків пасової передачі.

До першої частини моделі входять електродвигун та ведучий шків пасової передачі. До другої частини моделі входять ведений шків пасової передачі, черв'як, черв'ячне колесо та поворотна частина робота. Визначимо параметри динамічної моделі механізму повороту робота: першу та другу зведені маси- m_{p1}, m_{p2} ; зведені моменти- M_{p1}, M_{p2} та коефіцієнт жорсткості пасової передачі- c_p .

Визначимо зведену масу першої частини механізму m_{p1} . Для цього прирівнюємо кінетичну енергію першої частини реальної системи (T_{p1}) до кінетичної енергії першої маси моделі (T_{m1})

$$T_{p1} = T_{m1}. \quad (2.1)$$

Кінетична енергія першої частини механізму повороту робота виражається наступною залежністю

$$T_{p1} = \frac{1}{2} (J_1 + J_2) u_1^2 \dot{\phi}_3^2. \quad (2.2)$$

Кінетична енергія першої маси динамічної моделі механізму повороту робота виражається наступною залежністю:

$$T_{m1} = \frac{1}{2} J_{p1} \dot{\phi}_3^2. \quad (2.3)$$

Після підстановки виразів (2.2) і (2.3) у рівність (2.1) отримуємо приведений момент інерції першої маси динамічної моделі механізму повороту робота

$$J_{p1} = (J_1 + J_2) u_1^2 = (0,0028 + 0,0015) * 2,64 = 0,0114 \text{ кг} * \text{м}^2, \quad (2.4)$$

де J_1 - момент інерції ротора електродвигуна; J_2 - момент інерції ведучого шківів пасової передачі; u_1 — передаточне число пасової передачі.

Кінетична енергія другої частини системи механізму повороту робота виражається наступною залежністю

$$T_{p2} = \frac{1}{2} [J_3 + J_4 + (J_5 + J_6)/u_2^2] \dot{\phi}_3^2. \quad (2.5)$$

Кінетична енергія другої маси динамічної моделі механізму повороту робота виражається наступною залежністю

$$T_{m2} = \frac{1}{2} J_{p2} \dot{\phi}_3^2. \quad (2.6)$$

З рівності залежностей (2.5) і (2.6) знаходимо зведений момент інерції другої зведеної маси динамічної моделі механізму повороту робота, яка має вигляд:

$$J_{p2} = J_3 + J_4 + (J_5 + J_6)/u_2^2 = 0,0048 + 0,0026 + (0,72 + 44,8)/3025 = 0,0224 \text{ кг*м}^2, \quad (2.7)$$

де J_3 – момент інерції веденого шківів пасової передачі;

J_4, J_5 – моменти інерції черв'яка та черв'ячного колеса відносно власних осей обертання;

J_6 – момент інерції поворотної частини робота відносно осі повороту;

u_2 – передаточне число черв'ячної передачі.

Визначимо залежність рушійного моменту приводного електродвигуна від кутової швидкості його ротора

$$M = M_p - (M_p - M_n) \omega / \omega_n, \quad (2.8)$$

M_p, M_n – пусковий та номінальний моменти на валу електродвигуна;
 ω, ω_n – кутова швидкість валу двигуна та її номінальне значення.

Приведений рушійний момент першої частини системи динамічної моделі механізму підйому виражається наступною залежністю

$$M_{p1} = M u_1 \eta_1, \quad (2.9)$$

η_1 – к.к.д. пасової передачі.

Приведений момент сил опору другої частини системи динамічної моделі механізму повороту робота

$$M_{p2} = \frac{m_2 g r_2}{u_2 \eta_2} = \frac{17,6 * 9,81 * 0,345}{55 * 0,75} = 1,443 \text{ Нм}, \quad (2.10)$$

m_2, r_2 – маса поворотної частини робота та зміщення її центру мас відносно осі повороту; g – прискорення вільного падіння; η_2 – к.к.д. черв'ячної передачі.

Коефіцієнт жорсткості паса пасової передачі визначається за наступною формулою

$$c_{p1} = \frac{E_p A_p}{l}, \quad (2.11)$$

Де E_p – модуль пружності матеріалу паса; A_p, l – площа поперечного перерізу паса та його активна довжина, тобто довжина, через яку передається зусилля від двигуна.

Після цього знайдемо катову жорсткість пасової передачі зведену до осі веденого шківа

$$c_p = \frac{c_{p1} d_2^2}{4} = 1,45 * 10^5 \text{ Нм/рад}. \quad (2.12)$$

2.2. Побудова математичної моделі

На основі побудованої динамічної моделі механізму повороту робота (рис.2.3) побудуємо математичну модель. Математичну модель механізму повороту робота побудуємо шляхом використання принципу динамічної рівноваги (принципу Даламбера), представляє собою систему диференціальних рівнянь руху.

На рис 2.4 і рис. 2.5 зображені відокремлені приведені маси динамічної моделі механізму повороту робота з діючими силами. Шляхом складання умов динамічної рівноваги кожної з мас отримаємо систему рівноваги моментів, що діють на кожну з цих мас

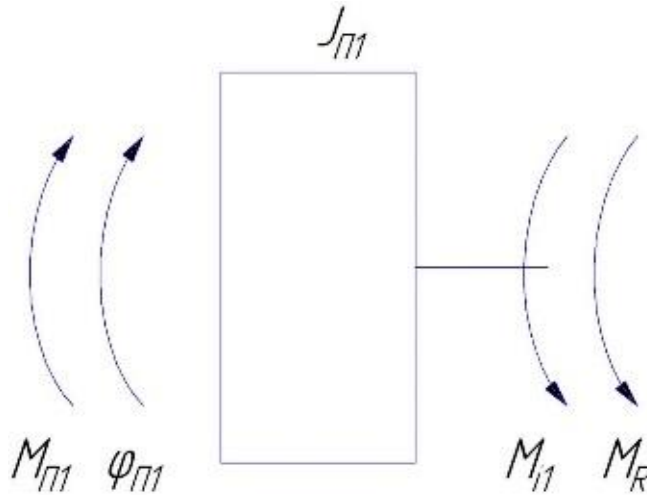


Рис. 2.4 – Перша зведена маса

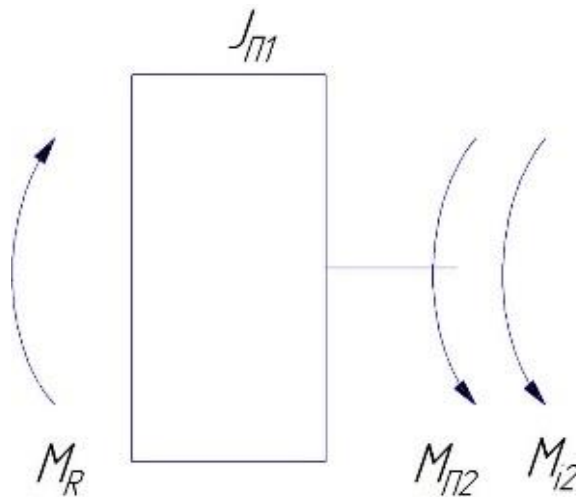


Рис. 2.5 – Друга зведена маса

$$\begin{cases} M_{П1} - M_{i1} - M_R = 0; \\ M_R - M_{П2} - M_{i2} = 0. \end{cases} \quad (2.13)$$

де M_{i1} – момент сил інерції першої зведеної маси динамічної моделі; M_{i2} – момент сил інерції другої зведеної маси динамічної моделі; M_R – момент реакції

пружного елемента, що з'єднує першу та другу зведені маси динамічної моделі. Ці моменти сил визначаються за наступними формулами:

$$M_{i1} = J_{\Pi 1} \cdot \ddot{\varphi}_1. \quad (2.14)$$

$$M_{i2} = J_{\Pi 2} \cdot \ddot{\varphi}_2. \quad (2.15)$$

$$M_R = C_{\Pi} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (2.16)$$

де C_{Π} – жорсткість пружного елемента динамічної моделі,

Підставивши всі знайдені залежності в систему рівнянь (2.13), отримаємо систему диференціальних рівнянь руху механізму повороту робота.

$$\omega = \dot{\varphi}_1 * U1$$

$$\begin{cases} J_{\Pi 1} \cdot \ddot{\varphi}_1 = M_{\Pi 1} - C_n(\varphi_1 - \varphi_2) \\ J_{\Pi 2} \cdot \ddot{\varphi}_2 = -M_{\Pi 2} + C_n(\varphi_1 - \varphi_2) \end{cases} \quad (2.17)$$

Розв'язок системи рівнянь (2.17) та побудову графіків, що описують рух механізму повороту робота виконуємо за допомогою розробленої програми

2.3.Результати динамічного аналізу механізму повороту робота

В результаті розрахунку математичної моделі динаміки руху механізму повороту робота з параметрами: $J_{p1} = 0,0114 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_{p2} = 0,0224 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $M_{p2} = 1,443 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $c_p = 1,45 \cdot 10^5 \text{ Нм/рад}$; $M_n = 1,05 \text{ Нм}$; $M_p = 10,5 \text{ Нм}$; $\omega_n = 209,3 \text{ рад/с}$; $u_1 = 1,625$; $\eta_1 = 0,97$ побудовані графічні залежності кінематичних (рис.2.6 - рис.2.8), силових (рис.2.9) та енергетичних (рис.2.10) характеристик механізму повороту робота.

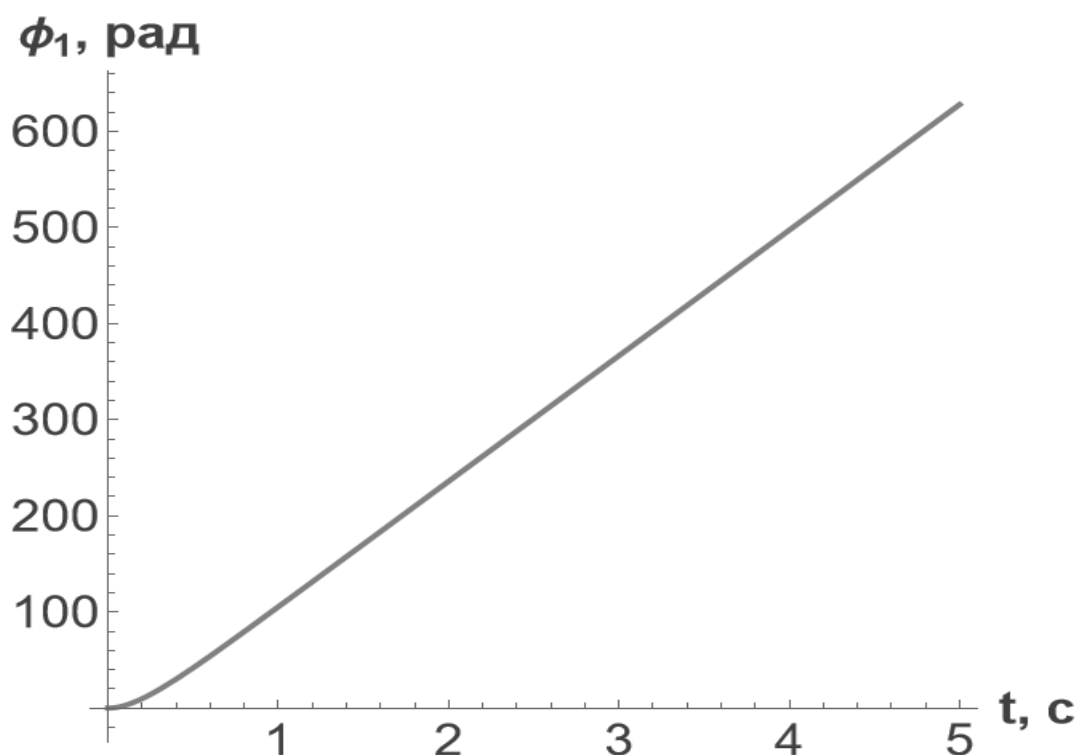


Рис.2.6. Кутова координата першої зведеної маси динамічної моделі

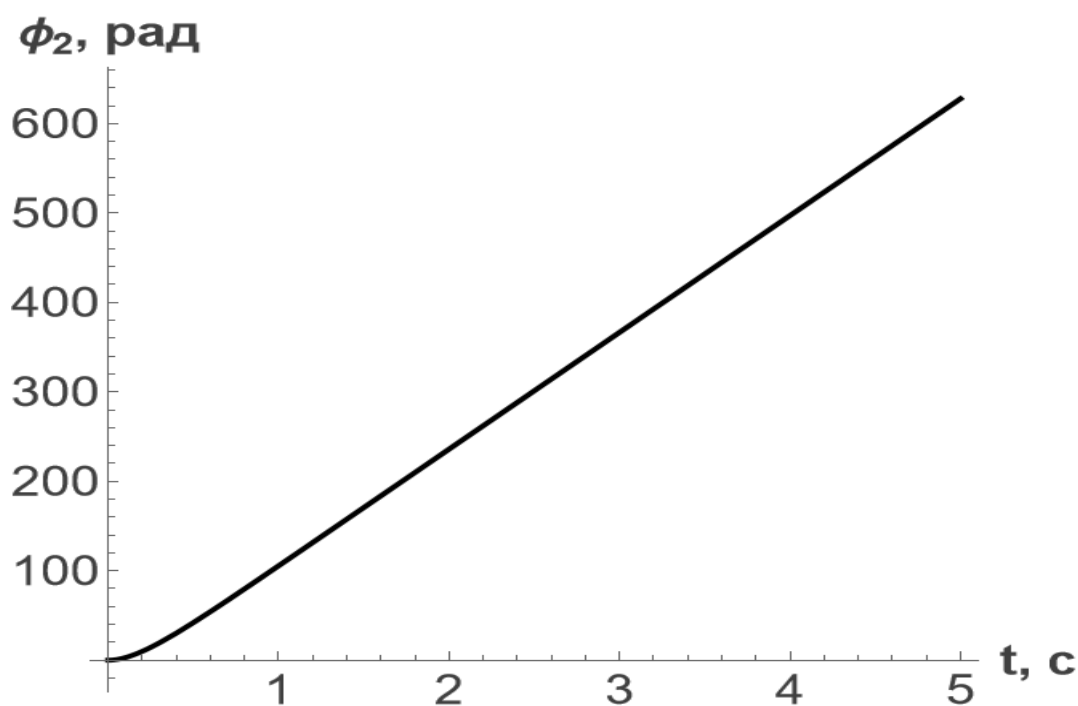


Рис.2.7. Кутова координата другої зведеної маси динамічної моделі

Кутові координати першої та другої зведених мас динамічної моделі (рис.2.6, 2.7) змінюються плавно за законами близькими до лінійних.

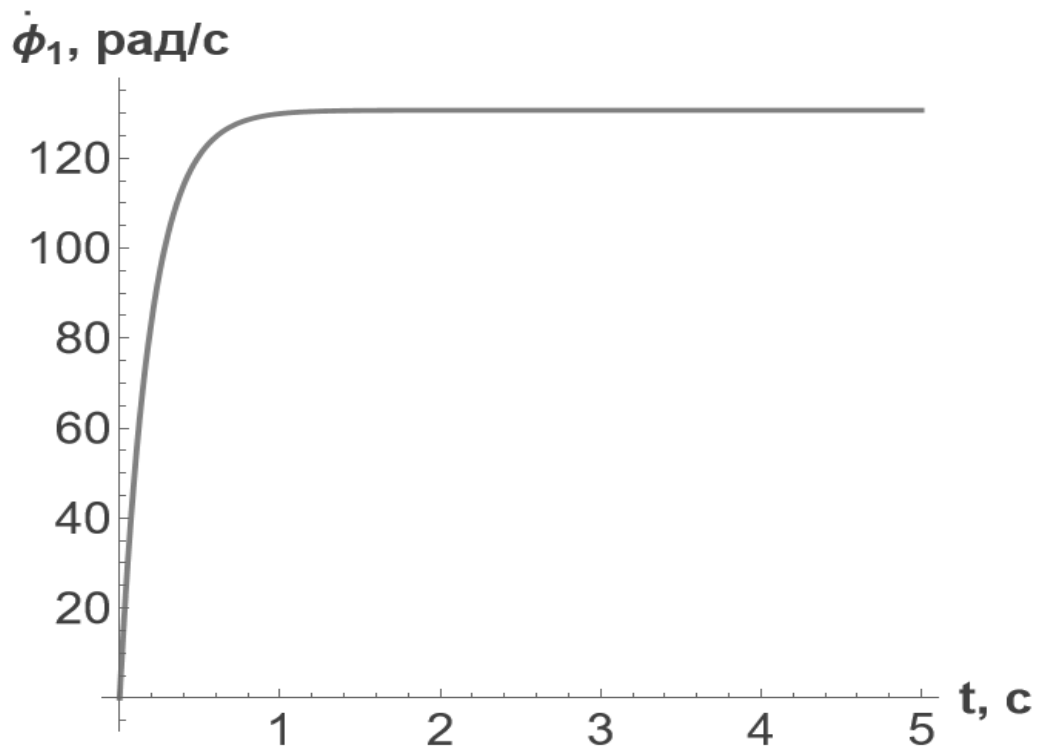


Рис.2.8. Кутова швидкість першої зведеної маси динамічної моделі

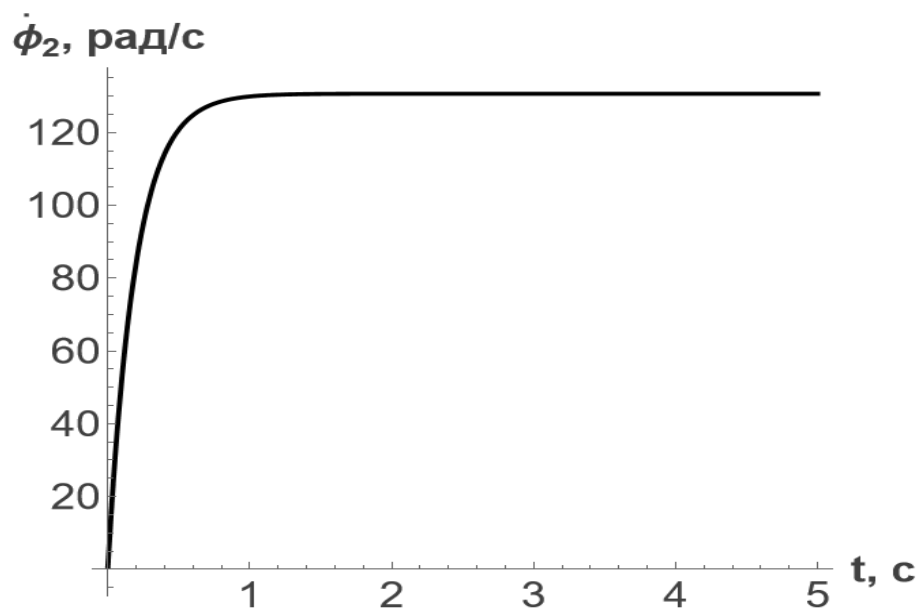


Рис.2.9. Кутова швидкість другої зведеної маси динамічної моделі

Кутові швидкості першої та другої зведених мас (рис.2.8, 2.9) змінюються плавно без коливань. На ділянці пуску ці зміни близькі до параболічних законів, а на ділянці усталеного руху приймають постійні значення.

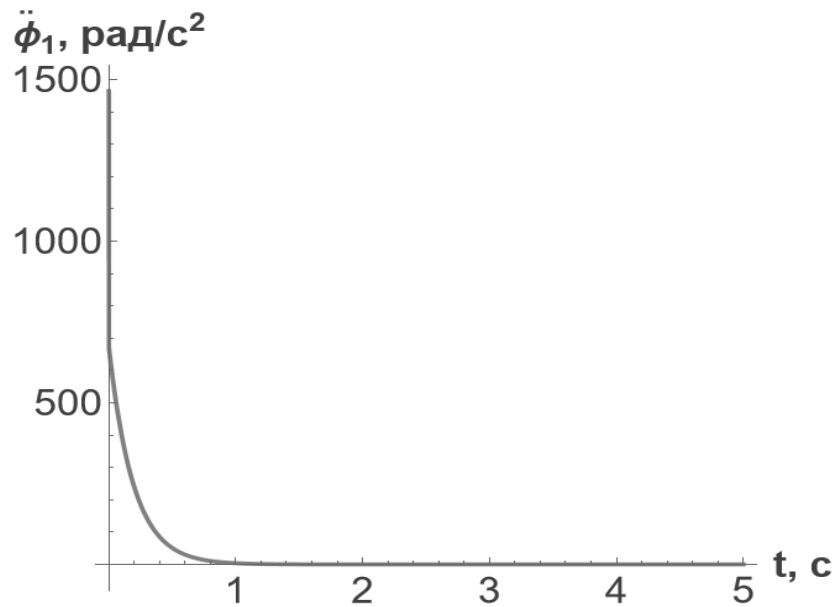


Рис.2.10. Кутове прискорення першої зведеної маси динамічної моделі

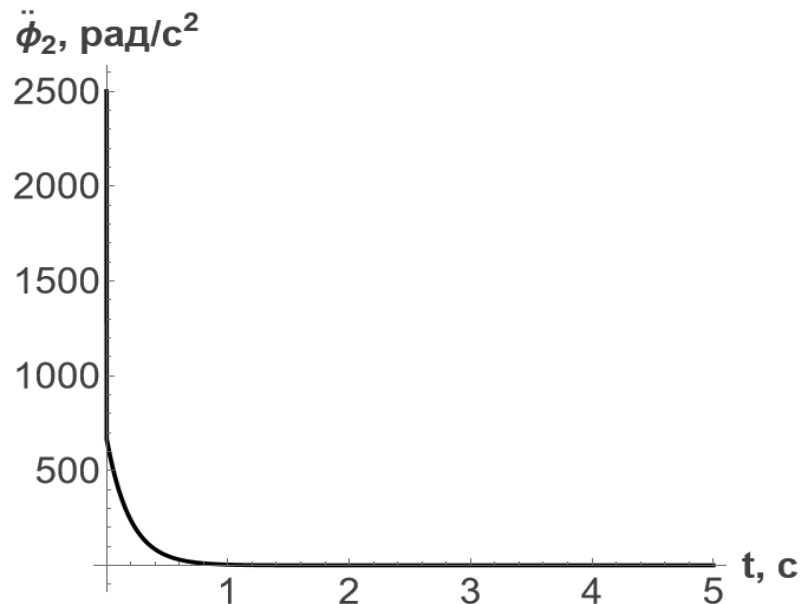


Рис.2.11. Кутове прискорення другої зведеної маси динамічної моделі

Кутові прискорення першої та другої зведених мас (рис.2.10, рис.2.11) змінюються плавно без коливань. На ділянці пуску ці зміни близькі до

параболічних законів, де прискорення плавно спадає до нульового значення а на ділянці усталеного руху приймають нульові значення.

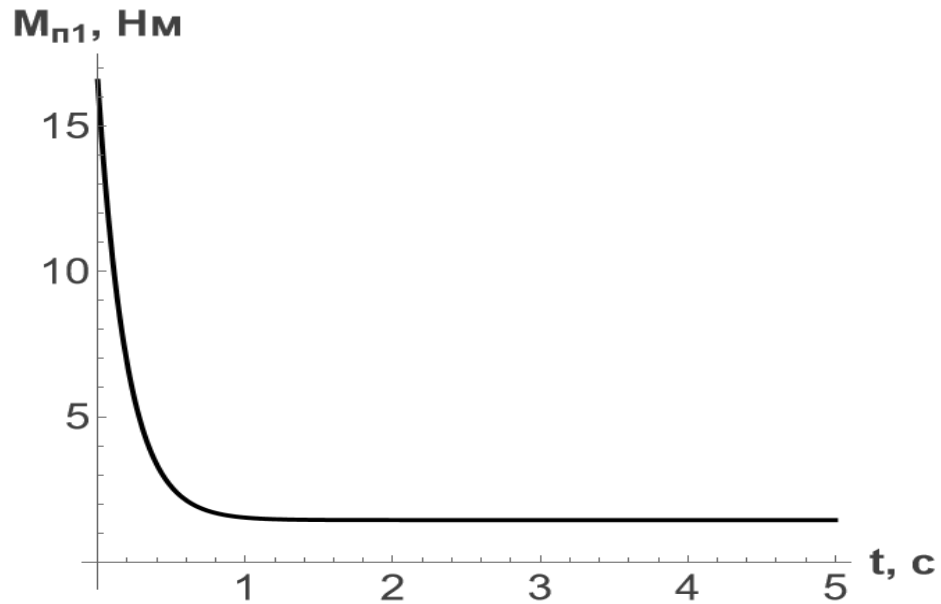


Рис.2.12. Рушійний момент на валу електродвигуна, зведений до осі веденого шківa пасової передачі

Рушійний момент (рис.2.12) змінюється плавно від максимального (16,8 Нм) до усталеного значення (1,5 Нм) за параболічним законом.

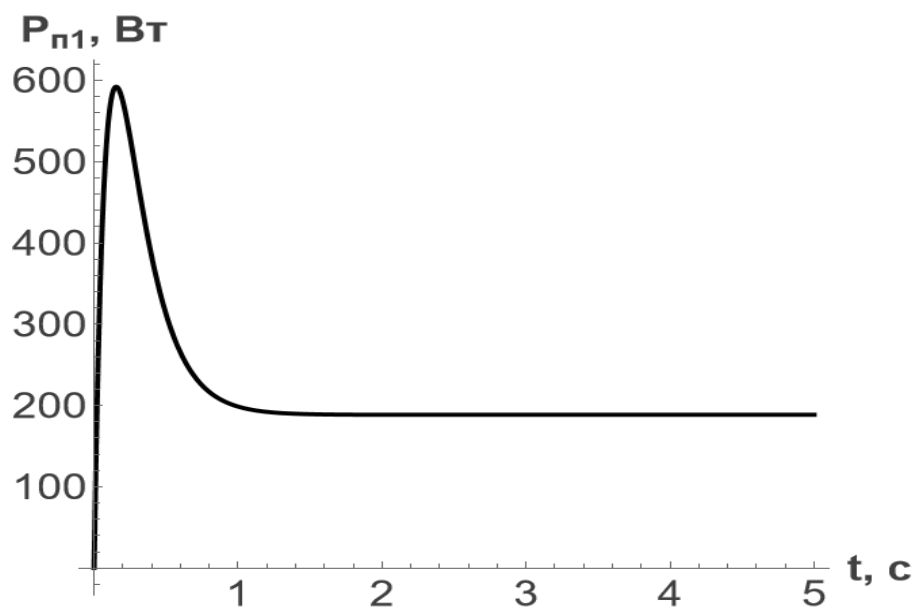


Рис.2.13. Зміна потужності приводного електродвигуна

Потужність (рис.2.13) різко зростає від нульового значення до максимального 0,6 кВт протягом 0,12 с. Після цього потужність плавно спадає до усталеного значення 0,22 кВт.

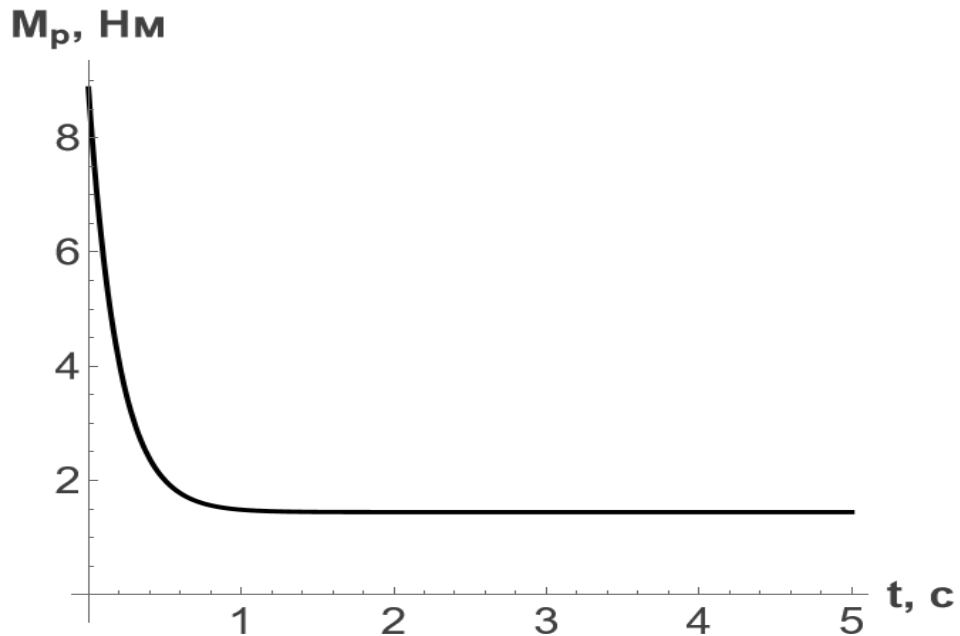


Рис. 2.14. Зміна моменту в пружному елементі приводу

Момент в пружному елементі приводу (рис.2.14) змінюється плавно без коливань від максимального (8,27 Нм) до усталеного значення (1,75 Нм) за параболічним законом.

РОЗДІЛ 3.

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ РОБОТА

3.1. Обґрунтування критерію оптимізації

Динамічний аналіз механізму повороту робота виявив в елементах приводного механізму та поворотного органу наявність коливань, які негативно впливають на процес роботи робота. Ці коливання приводять до коливань елементів конструкції робота і знижують його надійність. Особливо небезпечними ці коливання стають, коли здійснюється процес пуску механізму повороту. Необхідно відзначити, що всі небажані явища мають місце на ділянці перехідного процесу гальмування. Тому виникає потреба в значному зменшенні цих коливань при повороті робота. Досягнути цього можна шляхом оптимізації режиму пуску механізму повороту робота. Оптимізацію можна здійснити при наявності критерію оцінки режиму руху механізму повороту робота. Для проведення оптимізації режиму пуску механізму повороту робота необхідно обрати критерій, який би відображав динамічні процеси, які проходять в процесі пуску.

Для мінімізації динамічних навантажень і усунення коливань ланок приводного механізму виникає потреба в оптимізації режиму пуску приводного механізму повороту робота, оскільки саме на цій ділянці руху поворотного механізму виникають найбільші динамічні навантаження коливального характеру. Усунення цих навантажень забезпечує рівномірний рух під час руху. Крім того, зменшення динамічних навантажень приводить до підвищення надійності рамної конструкції, приводу та поворотного механізму. Саме на ділянці пуску виникають найбільші динамічні навантаження в передавальних елементах приводного механізму. При цьому знижується надійність та

довговічність роботи поворотного механізму робота, а також зростають енергетичні витрати приводу. З представленого аналізу можна зробити висновок, що критерій оптимізації режиму руху поворотного механізму робота має враховувати пружні характеристики приводу протягом всього процесу пуску. Оскільки критерій має відображати динамічні навантаження протягом усього процесу пуску, то він повинен бути інтегральним за формулю. Він також повинен відображати основні параметри та характеристики механізму повороту робота, тому має ґрунтуватись на його математичній моделі динаміки руху і відображати усі динамічні процеси протягом процесу пуску. Тому критерій оптимізації повинен мати інтегральну форму, тобто динамічні процеси поворотного механізму повинні відображатись інтегралом за часом протягом всього пуску.

Тому з за критерій оптимізації режиму пуску механізму повороту робота доцільно використати інтегральний критерій з підінтегральною функцією у вигляді енергії ривків, бо саме усунення ривків дасть можливість усунути або зменшити коливання виконавчих органів в процесі пуску. Такий критерій оптимізації має вигляд визначеного інтегралу за часом протягом процесу пуску

$$I_w = \int_0^{t_1} W dt \quad (3.1)$$

Тут t , t_1 – координата часу та тривалість процесу пуску механізму повороту робота; W – енергія ривків механізму повороту робота.

Наведений критерій оптимізації є інтегральним за формулю і виражається конкретним числом за час пуску, яке відображає енергію ривків другої зведеної маси динамічної моделі механізму повороту робота. Для другої маси динамічної моделі механізму повороту робота енергія ривків визначається наступною залежністю

$$W = J_{p2} \ddot{\varphi}_{p2}^2 / 2. \quad (3.2)$$

де J_{p2} – зведений до веденого шківa момент інерції другої частини механізму;
 $\ddot{\varphi}_2$ – кутове прискорення другої маси механізму повороту робота.

Оскільки критерій (3.1) з підінтегральною функцією (3.2) відображає небажані властивості механізму повороту робота (витрати енергії в одиницю часу), тому його необхідно мінімізувати. Умовою мінімуму критерію (3.1) є рівняння Пуассона

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi_2} - \frac{d}{dt} \frac{\partial W}{\partial \dot{\varphi}_2} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial W}{\partial \ddot{\varphi}_2} + \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial W}{\partial \ddot{\varphi}_2} = 0, k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.3)$$

3.2. Визначення оптимального режиму пуску робота-маніпулятора

Динамічний аналіз механізму повороту робота здійснено з використанням його двомасової динамічної моделі, яка описується системою двох диференціальних рівнянь другого порядку (2.17). Для механізму повороту робота важливою є мінімізація коливань поворотної частини та зменшення енергії приводу для надання йому усталеної швидкості в процесі руху. Тому визначимо оптимальний режим пуску саме другої маси динамічної моделі, бо вона відображає рух поворотної частини робота. Після цього визначимо закон руху першої маси динамічної моделі через закон руху другої маси з використанням другого рівняння математичної моделі механізму повороту робота (2.17).

Визначимо необхідні похідні від виразу (3.2) для рівняння (3.3)

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi_2} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial \dot{\varphi}_2} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial \ddot{\varphi}_2} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial \ddot{\varphi}_2} = J_{p2} \ddot{\varphi}_2;$$

$$\frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial W}{\partial \ddot{\varphi}_2} = J_{p2} \varphi_2^{VI}. \quad (3.4)$$

Після підстановки виразу (3.4) в рівняння (3.3), будемо мати умову мінімуму критерію (3.1) з підінтегральною функцією (3.2)

$$\varphi_2^{VI} = 0. \quad (3.5)$$

Взявши послідовно інтеграли по часу від правої та лівої частин рівняння (3.5), отримаємо

$$\varphi_2^V = C_1;$$

$$\varphi_2^{IV} = C_1 t + C_2;$$

$$\ddot{\varphi}_2 = \frac{1}{2} C_1 t^2 + C_2 t + C_3;$$

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{1}{6} C_1 t^3 + \frac{1}{2} C_2 t^2 + C_3 t + C_4,$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{24} C_1 t^4 + \frac{1}{6} C_2 t^3 + \frac{1}{2} C_3 t^2 + C_4 t + C_5; \quad (3.6)$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{120} C_1 t^5 + \frac{1}{24} C_2 t^4 + \frac{1}{6} C_3 t^3 + \frac{1}{2} C_4 t^2 + C_5 t + C_6,$$

Де $C_1, \dots, C_6$ – постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов руху другої маси динамічної моделі робота маніпулятора:

$$t = 0: \varphi_2 = 0, \quad \dot{\varphi}_2 = 0; \quad \ddot{\varphi}_2 = 0; \quad t = t_1: \quad \varphi_2 = \omega, \quad \dot{\varphi}_2 = 0, \quad \ddot{\varphi}_2 = 0. \quad (3.7)$$

Де t_1 – тривалість пуску механізму повороту робота.

Підставимо крайові умови руху (3.7) в систему залежностей (3.6), після чого будемо мати:

$$C_4 = 0; \quad C_5 = 0; \quad C_6 = 0; \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{24}C_1t_1^4 + \frac{1}{6}C_2t_1^3 + \frac{1}{2}C_3t_1^2 = \omega; \\ \frac{1}{6}C_1t_1^3 + \frac{1}{2}C_2t_1^2 + C_3t_1 = 0; \\ \frac{1}{2}C_1t_1^2 + C_2t_1 + C_3 = 0. \end{cases} \quad (3.9)$$

В результаті розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь (3.9) отримуємо:

$$C_1 = \frac{72\omega}{t_1^4}; \quad C_2 = -\frac{48\omega}{t_1^3}; \quad C_3 = \frac{12\omega}{t_1^2}. \quad (3.10)$$

Після підстановки виразів (3.8), (3.10) в залежності (3.6) будемо мати:

$$\varphi_2 = \frac{\omega t^3}{t_1^2} \left(\frac{3}{5} \frac{t^2}{t_1^2} - 2 \frac{t}{t_1} + 2 \right);$$

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{\omega t^2}{t_1^2} \left(3 \frac{t^2}{t_1^2} - 8 \frac{t}{t_1} + 6 \right);$$

$$\ddot{\varphi}_2 = 12 \frac{\omega t}{t_1^2} \left(\frac{t^2}{t_1^2} - 2 \frac{t}{t_1} + 1 \right);$$

$$\ddot{\ddot{\varphi}}_2 = \frac{12\omega t}{t_1^3} \left(3 \frac{t}{t_1} - 4 \right);$$

$$\varphi_2^{IV} = 24 \frac{v}{t_1^3} \left(\frac{3t}{t_1} - 2 \right). \quad (3.11)$$

Підставивши вирази (3.11) в друге рівняння системи (2.17), отримаємо кінематичні характеристики першої маси динамічної моделі механізму повороту робота при оптимальному режимі пуску:

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \frac{(J_{p2}\ddot{\varphi}_2 + M_{p2})}{c_p};$$

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 + \frac{J_2\ddot{\varphi}_2}{c_p}; \quad (3.12)$$

$$\ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}_2 + \frac{J_{p2}}{c_p}\varphi_2^{IV}.$$

З першого рівняння системи (3.11) визначимо зведений до осі веденого шків пасової передачі рушійний момент приводного механізму при оптимальному режимі пуску

$$M_{p1} = J_{p1}\ddot{\varphi}_1 + J_{p2}\ddot{\varphi}_2 + M_{p2}. \quad (3.13)$$

Визначимо також зусилля в пасі

$$M_k = c_p(\varphi_1 - \varphi_2) = J_{p2}\ddot{\varphi}_2 + M_{p2}. \quad (3.14)$$

Характер зміни потужності приводного механізму визначається з наступного виразу

$$P = M_{p1}\dot{\varphi}_1. \quad (3.15)$$

Побудуємо графічні залежності кінематичних, динамічних та енергетичних характеристик механізму повороту робота при оптимальному режимі пуску за наступних значень параметрів: $J_{p1} = 0,0114 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_{p2} = 0,0224 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $\omega = 128,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $c_p = 1,45 \cdot 10^5 \frac{\text{Нм}}{\text{рад}}$, $M_{p2} = 1,443 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $t_1 = 2 \text{ с}$.

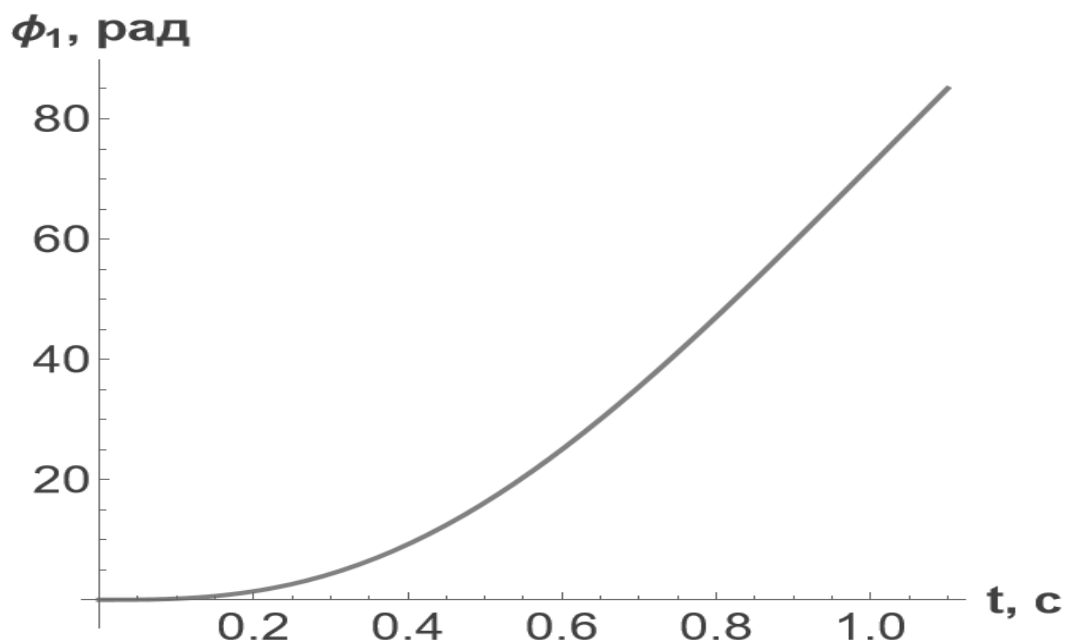


Рис.3.1. Графік кутової координати першої зведеної маси

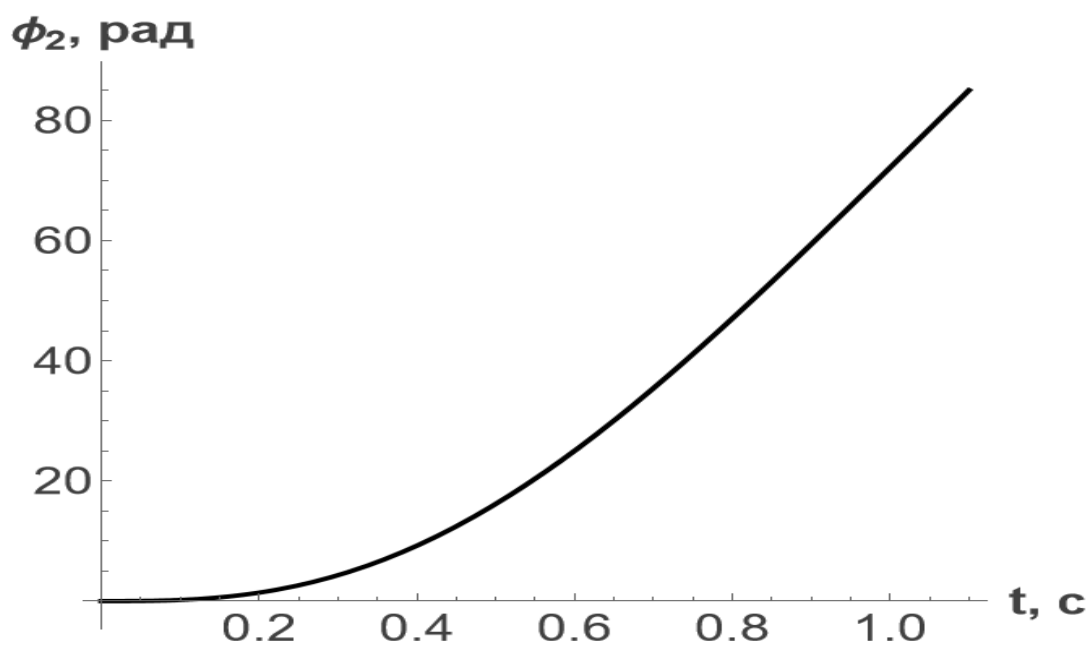


Рис.3.2. Графік кутової координати другої зведеної маси

Кутові координати першої та другої зведених мас динамічної моделі (рис.3.1, 3.2) змінюються на ділянці пуску плавно за параболічними законами.

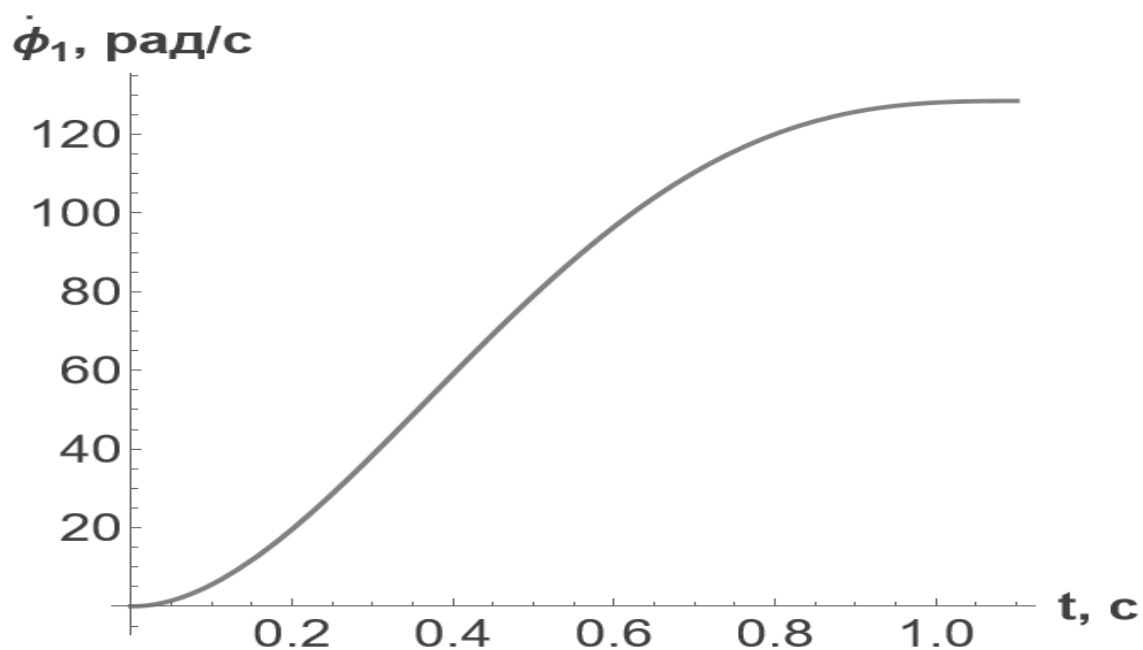


Рис.3.3. Графік кутової швидкості першої зведеної маси

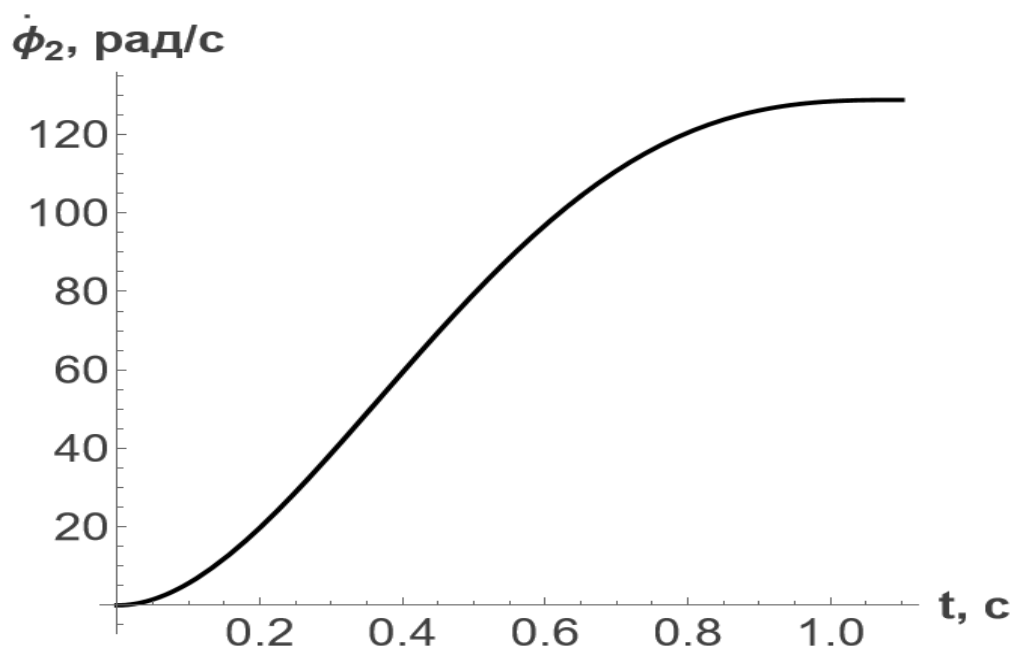


Рис.3.4. Графік кутової швидкості другої зведеної маси

Кутові швидкості першої та другої зведених мас (рис.3.3, 3.4) змінюються плавно без коливань за S-подібними законами від нульового значення до усталених значень 120 рад/с.

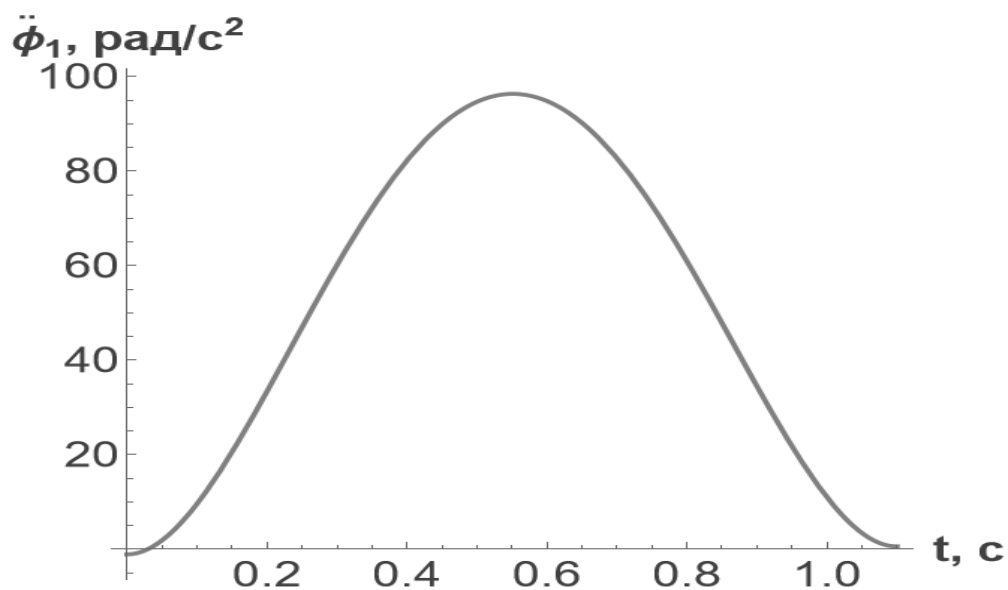


Рис.3.5. Графік кутового прискорення першої зведеної маси

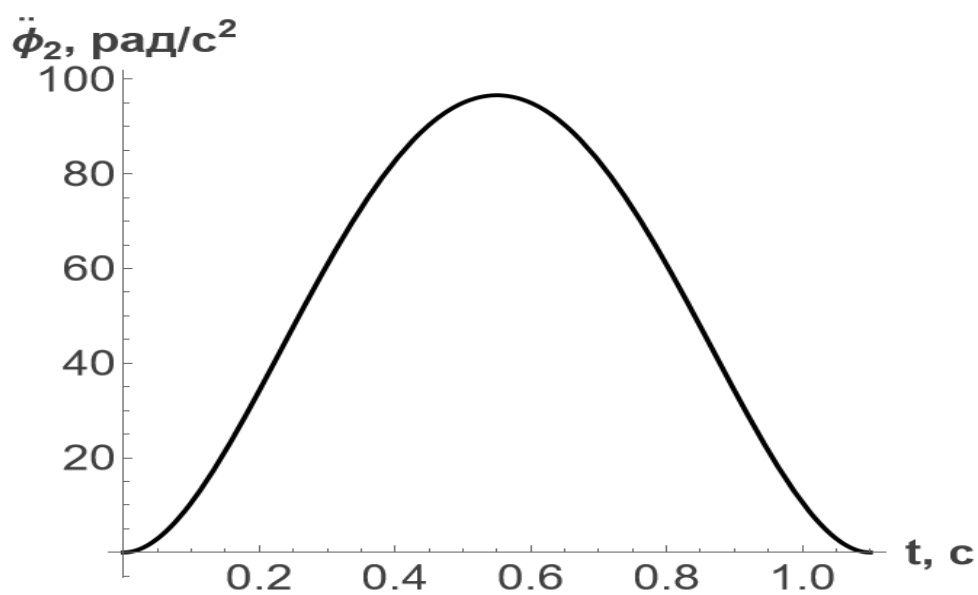


Рис.3.6. Графік кутового прискорення другої зведеної маси

Прискорення першої та другої зведених мас (рис.3.5, 3.6) змінюються плавно без коливань за поліноміальними законами. При цьому на початку і в кінці пуску прискорення приймають нульові значення.

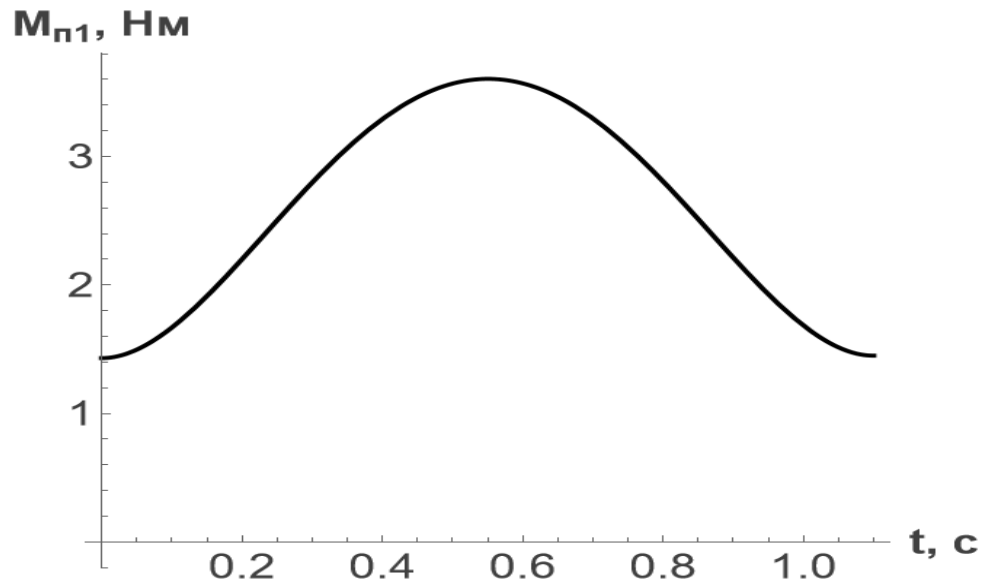


Рис.3.7. Графік зміни рушійного моменту приводу (рис.3.7), зведений до осі веденого шківa пасової передачі

Рушійний момент приводу (рис.3.7) зростає плавно без коливань за S-подібним законом від початкового значення 1,4 Нм до максимального значення 3,5 Нм, а після цього за таким же S-подібним законом плавно спадає до кінцевого значення 1,4 Нм.

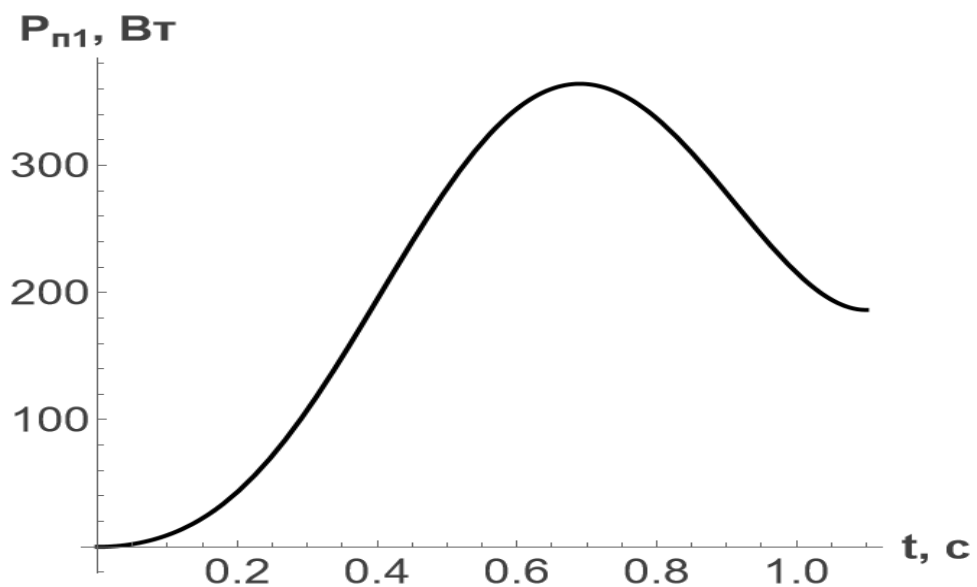


Рис.3.8. Зміна потужності приводного електродвигуна в процесі пуску

Потужність (рис. 3.8) на початку пуску плавно зростає за S-подібним законом від нульового значення до максимального значення 0,37 кВт, а потім плавно спадає за S-подібним законом до усталеного значення 0,22 кВт.

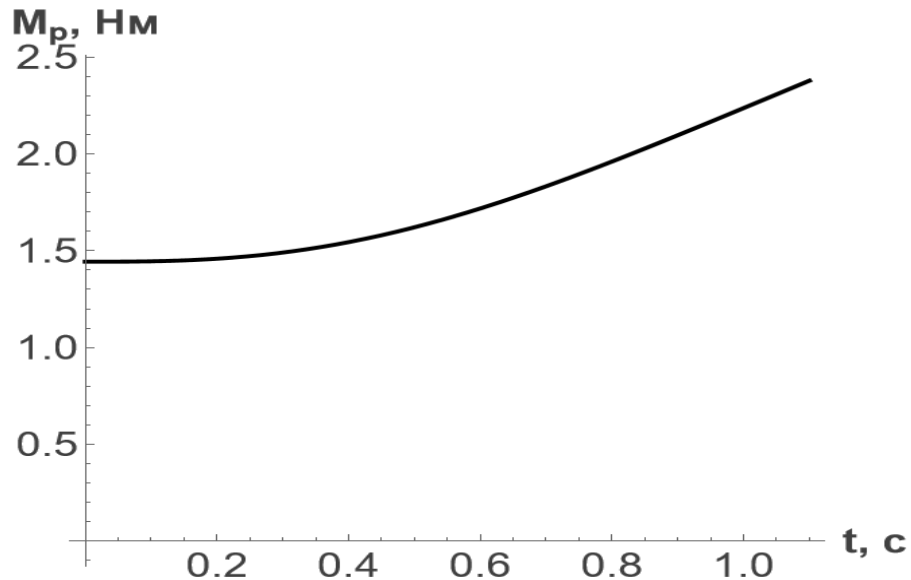


Рис.3.9. Зміна пружного моменту в пружному елементі в процесі пуску

Пружний момент (рис.3.9) в процесі пуску плавно зростає від початкового значення 1,5 Нм до максимального 2,4 Нм за параболічним законом.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Модернізація машинобудівних підприємств з активним впровадженням автоматизації та робототехніки, а також результативна система безпеки персоналу накладає якісно нові вимоги. Впровадження промислового робота-маніпулятора в технологічний цикл токарної обробки створює динамічне середовище перехресної небезпеки. Здобувач вищої освіти з кваліфікаційною роботою за спеціальністю «Промислова інженерія» повинен усвідомлювати, що роботизований комплекс (РТК) - це не просто окремих елемент обладнання індивідуальної промислової машини, а складна інтегрована система, в якій вихід з ладу або неправильна робота одного з елементів може призвести до серйозних наслідків для всієї виробничої ділянки. Враховуючи особливості токарної обробки, де присутні високі швидкості обертання шпинделя та значні сили різання, додавання маніпулятора з власними ступенями свободи та значною кінетичною енергією до цієї системи потребує впровадження комплексу заходів безпеки, визначених у нормативних документах ДСТУ EN ISO 12100:2016 та ДСТУ EN ISO 10218-2:2014 [70, 72]. Охорона праці на таких робочих місцях є обов'язком кожного працівника і суттєво знижує рівень виробничого травматизму та підвищує ефективність виробництва [67].

Комплексний аналіз можливих ризиків у системі «маніпулятор - верстат» показує, що робоча зона маніпулятора, яка обмежена довжиною його ланок та кутами повороту осей, часто може перекривати зони обслуговування верстата, включаючи отвір перед шпиндельною бабкою та зону каретки. Найбільш критичним моментом є передача заготовки в патрон верстата, коли маніпулятор входить у відкриту робочу зону, а захисне блокування верстата повинно бути тимчасово переведене у режим очікування сигналу від контролера робота. Небезпека полягає у можливості неконтрольованого спрацювання кулачків патрона або випадкового запуску шпинделя через порушення протоколу обміну

сигналами між системою ЧПК верстата та контролером маніпулятора, що може призвести до руйнування захоплювача або викиду деталі під дією відцентрових сил. Через значні маси рухомих ланок робота механічні навантаження можуть викликати сильні удари або травмування людини, оскільки швидкість руху маніпулятора перевищує швидкість реакції оператора [70, 72].

Організація робочого простору роботизованої ділянки машинобудівного цеху передбачає чітке розмежування території на робочу зону, зону технічного обслуговування та зону перебування оператора. Для забезпечення безпечних умов експлуатації встановлюються стаціонарні захисні огорожі висотою не менше 2000 мм, виконані з металевої сітки або ударостійкого прозорого матеріалу (наприклад, полікарбонату). Відстань від найбільш виступаючих рухомих частин обладнання до нерухомих елементів приміщення (стіни, колони, шафи керування) повинна бути не менше 500 мм, що дозволяє уникнути затискання людини між елементами обладнання. Важливим елементом організації простору є підлогове сигнальне маркування у вигляді жовто-чорних смуг під кутом 45° , яке визначає межі небезпечних зон відповідно до вимог ДСТУ ISO 3864-1:2005 [68].

Технічні засоби безпеки включають застосування багаторівневих сенсорних систем контролю доступу до небезпечної зони. До таких засобів належать фотоелектричні бар'єри безпеки 4 категорії за стандартом ІЕС 61496, які дозволяють виявляти проникнення об'єкта в небезпечну зону на відстані до 20 м із роздільною здатністю від 14 мм (для виявлення пальців) до 30 мм (для руки). Відповідно до вимог ДСТУ EN 60204-1:2015, у разі перетину світлового бар'єра повинна спрацювати система аварійної зупинки категорії 0, що забезпечує миттєве відключення приводів машини та робота [71]. Додатково застосовуються лазерні сканери безпеки, які реалізують принцип адаптивної безпеки: при наближенні людини швидкість руху маніпулятора автоматично зменшується до безпечного значення (до 250 мм/с), а при досягненні критичної відстані близько 1 м відбувається повна зупинка обладнання [70].

Особливу увагу необхідно приділяти системам захоплення заготовок маніпулятором. Захоплювальні пристрої повинні бути оснащені датчиками контролю тиску в пневматичній або гідравлічній системі. Якщо тиск падає нижче допустимого значення, система управління повинна негайно зупинити рух маніпулятора, щоб запобігти випадінню деталі. Манометри повинні відповідати вимогам ДСТУ OIML R 101:2013, а їх перевірка включає контроль стабільності показників протягом не менше трьох хвилин для виявлення можливих витоків або несправностей [73].

Значну роль у забезпеченні безпеки відіграє система електрозахисту роботизованого комплексу. Усі металеві неструмопровідні частини обладнання повинні бути надійно заземлені або занулені, при цьому опір заземлювального пристрою для мережі 380/220 В не повинен перевищувати 4 Ом. Відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ:2017), захисний провідник РЕ має бути безперервним по всій довжині електричного кола і не може використовувати як заземлювач водопровідні або газові труби [75]. Для захисту персоналу від ураження електричним струмом застосовуються пристрої захисного відключення (УЗО) з номінальним струмом спрацювання 30 мА [71].

Пожежна безпека на роботизованій ділянці має важливе значення через використання мастильно-охолоджувальних рідин та можливе утворення горючого металевого пилу під час обробки. Висока концентрація пилу у поєднанні з масляним аерозолем може створювати вибухонебезпечне середовище. Відповідно до вимог пожежної безпеки приміщення повинні регулярно очищатися від горючих матеріалів, а вентиляційна система має забезпечувати щонайменше триразовий повітрообмін. Для гасіння можливих загорянь у роботизованих ділянках доцільно застосовувати вуглекислотні вогнегасники, які ефективні для електроустановок під напругою та не пошкоджують електронні компоненти обладнання [69].

Важливим аспектом є забезпечення належних санітарно-гігієнічних та ергономічних умов праці. Робоче місце оператора повинно мати достатній рівень освітлення (не менше 500 лк), бути чистим і впорядкованим, а проходи -

вільними від сторонніх предметів. Працівники повинні використовувати засоби індивідуального захисту: захисні окуляри, спецодяг із щільно застібнутими манжетами та спеціальне взуття. Забороняється працювати в рукавицях під час обслуговування обертових частин токарного верстата, а видалення стружки допускається лише спеціальною щіткою після повної зупинки обладнання [74].

Персонал, який обслуговує роботизований токарний комплекс, повинен проходити первинний і періодичний інструктаж з охорони праці не рідше одного разу на шість місяців. До роботи допускаються особи віком від 18 років, які не мають медичних протипоказань і пройшли спеціальне навчання роботі з конкретним типом промислового робота. Під час налагодження маніпулятора обов'язково використовується навчальний пульт керування (teaching pendant) із трипозиційною кнопкою підтвердження типу Deadman switch, що забезпечує негайну зупинку руху при відпусканні або надмірному натисканні кнопки оператором [70].

Таким чином, забезпечення безпечних умов праці на роботизованих виробничих ділянках є комплексним інженерним завданням, що поєднує технічні засоби захисту та високий рівень виробничої дисципліни персоналу. При розробці розділу охорони праці в кваліфікаційній роботі необхідно керуватися концепцією «Safety by Design», яка передбачає врахування питань безпеки ще на етапі проектування обладнання та технологічних процесів. Використання національної нормативної бази, зокрема стандартів ДСТУ EN ISO та правил ПУЕ, забезпечує відповідність проектних рішень чинному законодавству та гарантує належний рівень захисту життя і здоров'я працівників [72, 77].

РОЗДІЛ 5.

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

5.1 Загальні положення економічної ефективності

Впровадження засобів роботизації та автоматизації в сучасне машинобудівне виробництво є ключовим фактором підвищення конкурентоспроможності підприємств. Умови функціонування промислового сектору України у 2026 році вимагають не просто заміни ручної праці на машинну, а глибокої оптимізації вже наявних автоматизованих процесів. Визначення економічної доцільності оптимізації режимів руху робота-маніпулятора, що працює в тандемі з токарним верстатом, є стратегічно важливим кроком для обґрунтування інвестицій.

Економічна оцінка дозволяє проаналізувати потенціал енергозбереження, підвищення продуктивності обладнання та зниження собівартості одиниці продукції. Головним критерієм оцінки є чистий річний економічний ефект (прибуток), який показує реальний фінансовий результат від впровадження оптимізованих траєкторій та режимів прискорень маніпулятора.

Стратегічна мета модернізації системи керування маніпулятором полягає у досягненні таких інженерно-економічних цілей таких як: максимізація тактності скорочення часу циклу «завантаження-розвантаження» деталі на токарному верстаті, зниження динамічних навантажень та мінімізація зносу механічних вузлів маніпулятора, що зменшує витрати на ремонти.

Також енергоефективність, ліквідація пікових пускових струмів та оптимізація споживання електроенергії приводами під час розгону/гальмування і оптимізація штату, вивільнення людського ресурсу з небезпечних або монотонних зон виробництва.

5.2 Визначення основних параметрів економічної ефективності

Для оцінки ефективності виготовлення та модернізації роботизованого комплексу (РТК) використовується комплекс взаємопов'язаних параметрів.

Ринкова вартість базового робота-маніпулятора (або витрати на його інтеграцію) становить $C = 120000$ грн. Основним типом продукції, що обробляється на токарному верстаті, є серійна деталь (шайба) із ціною реалізації $\Pi = 6,40$ грн за одиницю.

Річна віддача (дохід) від реалізації виготовленої продукції (O_t) розраховується за формулою:

$$O_t = N * \Pi \quad (5.1)$$

Де N - річний обсяг випуску деталей, шт.

Загальні експлуатаційні витрати на утримання та роботу РТК (P) складаються з витрат на електроенергію ($E_{ен}$), матеріали/заготовки (M_T), оплати праці обслуговчого персоналу (T_p), амортизацію (A_m) та витрати на поточний ремонт і ТО (O_6):

$$P = E_{ен} + M_T + T_p + A_m + O_6 \quad (5.2)$$

Рентабельність роботизованого комплексу (q) визначається як відношення річного доходу до сукупних витрат:

$$q = \frac{O_t}{P} \quad (5.3)$$

Річний економічний ефект (чистий прибуток від модернізації) (Q):

$$Q = O_t - P \quad (5.4)$$

Строк окупності інвестицій ($T_{ок}$):

$$T_{ок} = \frac{C}{Q} \quad (5.5)$$

5.3 Порівняльний аналіз техніко-економічних показників

До оптимізації режимів руху маніпулятор працював за стандартними траєкторіями з різкими змінами швидкості (трапецієподібний закон прискорення). Це призводило до: збільшеного часу циклу обслуговування верстата (15 секунд на одну деталь), високих пікових пускових витрат енергії через різкі розгони приводів, прискореного зносу редукторів та механічних з'єднань.

Оптимізація режиму руху (впровадження згладжених S-подібних траєкторій та мінімізація ривка jerk) дозволила скоротити час маніпуляцій до 10 секунд (економія 5 секунд на циклі). Загальний час обробки деталі разом із токарною операцією скоротився з 45 до 40 секунд.

Вплив на продуктивність та дохід РТК працює у 2 зміни (16 годин на добу), 250 робочих днів на рік. До оптимізації: продуктивність становила 80 деталей/годину.

Річний випуск

$$N_{\text{до}} = 80 * 16 * 250 = 320000 \text{ шт.}$$

Річний дохід

$$O_{t,\text{до}} = 320000 * 6.40 = 2048000 \text{ грн.}$$

Після оптимізації: продуктивність зросла до 90 деталей/годину.

Річний випуск :

$$N_{\text{після}} = 90 * 16 * 250 = 360000 \text{ шт.}$$

Річний дохід:

$$O_{t,\text{після}} = 360000 * 6.40 = 2304000 \text{ грн.}$$

Організація отримує додатковий прибуток виключно за рахунок збільшення кількості виготовлених деталей на 40 000 шт. при збереженні стабільної ринкової ціни (6,40 грн).

У 2026 році тарифи на електроенергію для промислових підприємств в Україні з урахуванням плати за пікову потужність є суттєвою статтею витрат. До оптимізації: через високі пікові струми середня споживана потужність системи становила 2,5 кВт. Річні витрати на електроенергію складали 95 000 грн. Після оптимізації: усунення динамічних ударів та оптимізація пускових режимів знизили середнє споживання до 1,9 кВт, що зменшило річні витрати на енергію до 71 250 грн (економія 25%). Зменшення вібрацій також знизило ризики аварійних зупинок та витрати на позаплановий ремонт обладнання з 30 000 грн до 18 000 грн на рік.

Впровадження та точне налаштування робота-маніпулятора дозволяє повністю звільнити токаря-оператора від рутинної роботи. Один оператор у 2026 році може обслуговувати одночасно до 3-х роботизованих токарних верстатів (контроль якості, заміна інструменту). Це знижує частку витрат на оплату праці, що припадає на один верстат, до 140 000 грн/рік (порівняно з утриманням повноцінного штату токарів для ручної роботи, яка коштувала б понад 450 000 грн/рік для двозмінного графіку).

Нижче наведено зведені техніко-економічні показники роботизованого комплексу до та після оптимізації режимів руху таблиця 5.1.

Проведені техніко-економічні розрахунки підтверджують високу фінансову доцільність оптимізації режимів руху маніпулятора при обслуговуванні токарного верстата.

Попри те, що загальні експлуатаційні витрати зросли на 5,90% (виключно за рахунок більшої кількості закупленої сировини для збільшеного обсягу виробництва), чистий річний економічний ефект (прибуток) зростає на 20,00% – з 959 000 грн до 1 150 750 грн.

Таблиця 5.1. Порівняльна характеристика ТЕП роботизованого комплексу

Показник	Символ	До оптимізації	Після оптимізації	Одиниці виміру	Зміна(%)
Вартість обладнання (комплексу)	C	120000,00	150000,00	грн	+25,00%
Річний обсяг виготовлення деталей	N	320000	360000	шт.	+12,50%
Ціна за одиницю	$Ц$	6,40	6,40	грн	0,00%
Річний дохід від реалізації	O_t	2048000,00	2304000,00	грн/рік	+12,50%
Витрати на заготовки та матеріали	M_T	800000,00	900000,00	грн/рік	+12,50%
Витрати на електроенергію	$E_{ен}$	95000,00	71250,00	грн/рік	-25,00%
Витрати на обслуговування та ремонт	$O_б$	30000,00	18000,00	грн/рік	-40,00%
Частка витрат на оплату праці оператора	T_p	140000,00	140000,00	грн/рік	0,00%
Амортизаційні відрахування (20%)	A_m	24000,00	24000,00	грн/рік	0,00%
Сукупні річні експлуатаційні витрати	P	1089000,00	1153250,00	грн/рік	+5,90%
Чистий річний економічний ефект	Q	959000,00	1150750,00	грн/рік	+20,00%
Коефіцієнт рентабельності комплексу	q	1,88	2,00	Коеф.	+6,38%
Термін окупності капіталовкладень	$T_{ок}$	0,125	0,104	роки	-16,80

Оптимізація закону руху дозволила: збільшити чистий дохід підприємства за рахунок зростання продуктивності на 12,5% (випуск додаткових 40 000 деталей на рік при тій самій вартості обладнання), знизити витрати на

енергоспоживання на 25% завдяки усуненню пікових пускових навантажень, Скоротити витрати на позапланові ремонти та ТО на 40% завдяки мінімізації механічних ударів і ривків.

Забезпечити надшвидкий термін окупності системи (близько 1,2 місяця з моменту запуску оптимізованого алгоритму), що робить дане проєктне рішення високоефективним та рекомендованим до впровадження на машинобудівних підприємствах України.

ВИСНОВОК

У магістерській кваліфікаційній роботі на тему «Оптимізація режиму руху робота-маніпулятора при роботі з токарним верстатом» було проведено комплексне дослідження динамічних характеристик робота-маніпулятора та визначено оптимальні режими його роботи в умовах автоматизованого виробництва.

Робота складається з п'яти розділів, у яких послідовно розглянуто теоретичні, аналітичні та практичні аспекти дослідження режимів руху робота-маніпулятора.

У першому розділі проведено огляд конструкцій, технічних характеристик та класифікації сучасних роботів-маніпуляторів, що використовуються при роботі з токарними верстатами з числовим програмним керуванням. Проаналізовано принципи їх роботи, типи приводів та особливості взаємодії з технологічним обладнанням. Також виконано аналіз сучасних наукових досліджень, представлених у наукометричних базах даних Scopus та Web of Science, присвячених динамічним процесам руху роботів-маніпуляторів та оптимізації режимів їх роботи.

У другому розділі виконано динамічний аналіз механізму повороту робота-маніпулятора. Побудовано динамічну та математичну моделі механізму, що дозволило визначити основні параметри руху, навантаження та закономірності зміни швидкостей і прискорень під час роботи маніпулятора.

У третьому розділі проведено оптимізацію режиму пуску механізму повороту робота-маніпулятора. Обґрунтовано критерій оптимізації та визначено раціональний закон зміни швидкості і прискорення, що забезпечує зменшення динамічних навантажень на елементи механізму та підвищення стабільності роботи системи.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці під час експлуатації роботизованих систем у виробничих умовах, визначено можливі небезпечні фактори та запропоновано заходи щодо підвищення безпеки праці.

Також в п'ятому розділі проведено оцінку економічної ефективності впровадження оптимізованого режиму роботи робота-маніпулятора.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування оптимізованих режимів руху робота-маніпулятора під час роботи з токарними верстатами. Запропоновані технічні рішення дозволяють зменшити динамічні навантаження на механізми, знизити енергоспоживання, підвищити надійність роботи привідних елементів та покращити ефективність функціонування роботизованих виробничих систем.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. ABB Robotics. Application cells [Electronic resource]. - ABB. - URL: <https://new.abb.com/products/robotics/nl/application-cells> (дата звернення: 13.02.2026).
2. Analog Devices. Synchronization of multi-axis motion control over real-time networks. - Analog Dialogue. - URL: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/synchronization-of-multi-axis-motion-control-over-real-time-networks.html> (дата звернення: 13.02.2026).
3. Borunte Robot. Parameters of industrial robots: Repetitive positioning accuracy. - Borunte. - URL: <https://www.borunte.net/news/parameters-of-industrial-robots-repetitive-p-85306812.html> (дата звернення: 13.02.2026).
4. Cone Drive. Cycloidal gears vs. harmonic gears. - Cone Drive. - URL: <https://conedrive.com/cycloidal-gears-vs-harmonic-gears/> (дата звернення: 17.02.2026).
5. Dexcraft. Aluminium vs. carbon fiber: Comparison of materials. - Dexcraft. - URL: <http://www.dexcraft.com/articles/carbon-fiber-composites/aluminium-vs-carbon-fiber-comparison-of-materials/> (дата звернення: 17.02.2026).
6. Fanuc America. Industrial robots product line. - Fanuc. - URL: <https://www.fanucamerica.com/products/robots> (дата звернення: 17.02.2026).
7. Fanuc Europe. M-20id series robots. - Fanuc. - URL: <https://www.fanuc.eu/en/robots/robot-filter-page/m-20id> (дата звернення: 17.02.2026).
8. Harmonic Drive LLC. General catalog [Electronic resource]. - URL: https://www.harmonicdrive.net/_hd/content/documents/general-catalog.pdf (дата звернення: 17.02.2026).
9. Inbolt. Precision vs. accuracy in robotics. - Inbolt Blog. - URL: <https://www.inbolt.com/resources/blog/precision-vs-accuracy-in-robotics/> (дата звернення: 23.02.2026).
10. Kawasaki Robotics. Machine tending applications. - Kawasaki. - URL: <https://kawasakirobotics.com/applications/machine-tending/> (дата звернення: 23.02.2026).

11. KUKA. KR IONTEC. - KUKA Robotics. - URL: <https://www.kuka.com/en-de/products/robotics-systems/industrial-robots/kr-iontec> (дата звернення: 23.02.2026).
12. KUKA. KR QUANTEC. - KUKA Robotics. - URL: <https://www.kuka.com/en-de/products/robotics-systems/industrial-robots/kr-quantec> (дата звернення: 24.02.2026).
13. KUKA. KUKA robot product portfolio [PDF brochure]. - URL: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/files/87f2706ce77c4318877932fb36f6002d/kuka_robot_product-portfolio_en_screen.pdf (дата звернення: 25.02.2026).
14. Schunk. Centric grippers. - Schunk Gripping Systems. - URL: https://schunk.com/de/en/gripping-systems/centric-grippers/c/PUB_8301 (дата звернення: 01.03.2026).
15. Universal Robots. UR10e e-Series datasheet [Data sheet]. - URL: https://www.universal-robots.com/media/1807466/ur10e_e-series_datasheets_web.pdf (дата звернення: 3.03.2026).
16. Yaskawa Global. Type of robotics. - Yaskawa. - URL: <https://www.yaskawa-global.com/product/robotics/type> (дата звернення: 3.03.2026).
17. Zimmer Group. Handling technology components. - Zimmer Group. - URL: <https://www.zimmer-group.com/en/products/components/handling-technology> (дата звернення: 7.03.2026).
18. Abplanalp. Промислові роботи: Що це, види та використання промислових роботів [Електронний ресурс]. - Abplanalp Україна. - URL: <https://abplanalp.ua/promyslovi-roboty-sho-ce-vydy-ta-vykorystannya-promyslovyh-robotiv> (дата звернення: 12.03.2026).
19. Сорокін М. М. Основи робототехніки: Конспект лекцій. - Суми: Сумський державний університет, 2024. - 120 с. - URL: <https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/Osnovy-robototekhniky-Konspekt-lektsij-Sorokin.pdf> (дата звернення: 16.03.2026).
20. Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, & Giuseppe Oriolo. (2009). *Robotics: Modelling, planning and control*. Springer.

21. PubMed Central (PMC). Наукова стаття з робототехніки / медицини. - PubMed Central; National Institutes of Health. - URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12568001/> (дата звернення: 16.03.2026).
22. Hancıoğlu O. K., Efe M. Ö. Koopman Explicit Model Following Control Framework for a Robotic Manipulator. - IEEE Access, Vol. 14, 2026. - P. 6229–6242. - DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.xxxxxxx>.
23. Korendiy V., Kachur O., Lanets O. Design and kinematic analysis of a robotic manipulator for controlling fire monitors. - Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science, Vol. 11, No. 2, 2025. - P. 10–26.
24. Zhang C., Wu Y. P-Rob six-degree-of-freedom robot manipulator dynamics modeling and anti-disturbance control. - IEEE Access, Vol. 9, 2021. - P. 141403–141416.
25. Wang C., Frazelle C. G., Walker I. D. Dynamic Control of Multisection Three-Dimensional Continuum Manipulators Based on Virtual Discrete-Jointed Robot Models. - IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 26, No. 2, 2021. - P. 777–789.
26. Senchuk Y., Matiko F. Analysis of methods for training robotic manipulators to perform complex motion trajectories. - Energy Engineering and Control Systems, Vol. 11, No. 1, 2025. - P. 53–61.
27. Liu C., et al. Accurate Simulation of Dynamic Milling Forces and Feedrate Scheduling Under the Influence of Pose-Dependent Robot Dynamics. - IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. PP, No. 99, 2026. - P. 1–12.
28. Gupta N., Pratiher B. Dynamic modeling and effective vibration reduction of dual-link flexible manipulators with two-stage cascade PID and active torque actuation. - Mechanism and Machine Theory, Vol. 205, 2025. - Article No. 105867.
29. Hsiao T., et al. Iterative learning control for industrial robot manipulators with nonlinear dynamics. - International Journal of Automation and Smart Technology, Vol. 15, No. 3, 2025. - 14 P.
30. Haug E. J. Redundant Serial Manipulator Inverse Position Kinematics and Dynamics. - ASME Journal of Mechanisms and Robotics, Vol. 16, No. 8, 2024. - Article No. 081008.

31. Lin Z., Wang J., Hu X. Energy-Based Trajectory Tracking Control of a Six-DOF Robotic Manipulator Using the Port-Hamiltonian Framework. - *Machines*, Vol. 14, No. 12, 2024. - P. 1198.
32. Zavrazhina T. V. Dynamics of robot manipulator with elastic links and drive mechanisms. - *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 37, 2020. - 15P.
33. Calderón-Cordova C., et al. DRL Framework for Control of Robotic Manipulators in Simulated Environments. - *IEEE Access*, Vol. 12, 2024. - P. 103138–103150.
34. Shao Z., Zhang F. Advances in Robotics and Autonomous Systems: Transitioning from Automation to Intelligent Collaboration. - *Applied Sciences*, Vol. 16, No. 4, 2026. - P. 1966.
35. Zhang Y., et al. Optimization of robotic machining through circular path error compensation. - *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 101, 2026. - Article No. 103280.
36. Wang Q., et al. ToolManip: A zero-shot robot tool manipulation framework for industrial environments based on modular VLM architecture. - *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 100, 2024. - 12 P.
37. Lozynskyy A., Demkiv L. Analysis of Fuzzy Controller Application Efficiency in Two-Mass Systems with Variable Moment of Inertia of Second Mass. - *Energy Engineering and Control Systems*, Vol. 2, No. 2, 2016. - P. 45–52.
38. Stasiuk O. Differential models integrated into strategies for optimization of information content of environments with randomness based on AI systems. - *Journal of Artificial Intelligence*, Vol. 30, No. 1, 2025. - P. 45–59.
39. Yin Y., et al. Design of a Flexible Passive Adaptive Suction Module for Wall-Climbing Robots. - *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 10, No. 12, 2025. - P. 12429–12436.
40. Koe K., et al. Learning-Based Position and Orientation Control of a Hybrid Rigid-Soft Arm Manipulator. - *ASME Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 17, No. 7, 2025. - Article No. 071010.
41. Qin H., et al. OM-Koop: Online Memorable Koopman Operator Learning for Marine Robots Steering Dynamics. - *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 22, 2025. - P. 20354–20365.

42. Bai H., et al. A dynamical systems-based peg-in-hole assembly method using temporal logic task planner. - International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 2024. - 10 P.
43. Lyu H., et al. A spectral-integral-formula-based method for fast and matrix exponentials free milling stability prediction. - Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 148, No. 1, 2026. - 15 P.
44. Chikrii A. A., et al. Countercontrol in game problems of dynamics. - Problems of Control and Informatics, Vol. 70, No. 4, 2025. - P. 12–25.
45. BoundPlanner. Online trajectory planning for robot manipulators in challenging scenarios [Preprint]. - ResearchGate, 2025. - 8 P.
46. Zhai B., et al. High Precision Trajectory Learning Method Based Improved Dynamic Movement Primitives for Robot Skill Learning. - ASME Journal of Mechanisms and Robotics, Vol. 16, No. 6, 2024. - 12 P.
47. Ahmadianfar I., Heidari A. A., Gandomi A. H., Chu X., Chen H. RUN beyond the metaphor: An efficient optimization algorithm based on Runge Kutta method. - Expert Systems with Applications, Vol. 181, 2021. - Article No. 115079. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115079>.
48. Baker J. H., Laariedh F., Ahmad M. A., Lyashenko V., Sotnik S., Mustafa S. K. Some interesting features of semantic model in Robotic Science. - SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol. 69, No. 7, 2021. - P. 38–44. - DOI: <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I7P206>.
49. Chen H., Cheng H. Online performance optimization for complex robotic assembly processes. - Journal of Manufacturing Processes, Vol. 72, 2021. - P. 544–552. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.046>.
50. Loveikin V. S., Romasevich Y. O., Loveikin A. V., Khoroshun A. S., Korobko M. M. Minimizing the Driving Torque of Tower Crane Slewing Mechanism During Steady Trolleying. - International Applied Mechanics, Vol. 59, No. 6, 2023. - P. 695–707.
51. Loveykin V., Romasevych Y., Złoto T., Diachenko O., Liashko A. Optimisation of start-up power mode of rotation mechanism of manipulator crane with a cylindrical articulated load suspension. - Machinery and Energetics, Vol. 13, No. 1, 2022. - P. 11–17.

52. Loveikin V., Romasevych Y., Mushtin D., Loveikin Y. Optimal control of simultaneous tower crane slewing and trolley movement. - Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 51, No. 4, 2021. - P. 421–436. - DOI: <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.51.4.421>.
53. Lysenko V., Bolbot I., Romasevych Y., Loveykin V., Voytiuk V. Algorithms of Robotic Electrotechnical Complex Control in Agricultural Production. - In: Control Systems: Theory and Applications, River Publishers, 2018. - P. 271–289.
54. Maksymova S., Matarneh R., Lyashenko V. V. Software for Voice Control Robot: Example of Implementation. - Open Access Library Journal, Vol. 4, No. 8, 2017. - P. 1–12. - DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1103834>.
55. Maksymova S., et al. Decision-Making Model for Controlling a Collaborative Robot-Manipulator Based on the Sensor Fusion Method and the Rules of Rule-Based Systems. - Multidisciplinary Journal of Science and Technology, Vol. 5, No. 6, 2025. - P. 526–538.
56. Onyshchenko S., Yanko A., Hlushko A. Improving the efficiency of diagnosing errors in computer devices for processing economic data functioning in the class of residuals. - Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 5, No. 4 (125), 2023. - P. 63–73. - DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288075>.
57. Romasevych Y., Loveikin V. PI-controller tuning optimization via PSO-based technique. - Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 95, No. 7, 2019. - P. 33–37. - DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2019.07.07>.
58. Romasevych Y., Loveikin V., Makarets V. Optimal constrained tuning of PI-controllers via a new PSO-based technique. - International Journal of Swarm Intelligence Research, Vol. 11, No. 4, 2020. - P. 87–105. - DOI: <https://doi.org/10.4018/IJSIR.2020100105>.
59. Romasevych Y., Kadykalo I. Optimization of the structural parameters of robust controllers for robotic systems. - Machinery and Energetics, Vol. 14, No. 3, 2023. - P. 75–85. - DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2023.75>.
60. Sotnik S., Mustafa S. K., Ahmad M. A., Lyashenko V., Zeleniy O. Some features of route planning as the basis in a mobile robot. - International Journal of Emerging

- Trends in Engineering Research, Vol. 8, No. 5, 2020. - P. 2074–2079. - DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/87852020>.
61. Vasquez J., Fajardo M., Guerrero J., Calle L. Smooth Trajectory Generation for Robotic Manipulators Using Adaptive Hyperbolic Tangent Functions. - Preprints, 2024. - 12 P. - DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202403.0412.v1>.
 62. Yevsieiev V., Abu-Jassar A., Maksymova S., Ababneh J. Topology optimization for the collaborative robots' motion in a production environment using the stochastic vector flow method and simulation based on dynamic influence fields. - Multidisciplinary Journal of Science and Technology, Vol. 5, No. 9, 2025. - P. 68–80.
 63. Yevsieiev V., et al. Data Fusion Research for Collaborative Robots-Manipulators within Industry 5.0. - ACUMEN: International Journal of Multidisciplinary Research, Vol. 1, No. 4, 2024. - P. 125–137.
 64. Yevsieiev V., et al. Human Operator Identification in a Collaborative Robot Workspace within the Industry 5.0 Concept. - Multidisciplinary Journal of Science and Technology, Vol. 4, No. 9, 2024. - P. 95–105.
 65. Zafar M. N., Mohanta J. C. Methodology for Path Planning and Optimization of Mobile Robots: A Review. - Procedia Computer Science, Vol. 133, 2018. - P. 141–152. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.018>.
 66. Zhou T., Wang Y., Zhu Q., Du J. Human hand motion prediction based on feature grouping and deep learning: Pipe skid maintenance example. - Automation in Construction, Vol. 138, 2022. - Article No. 104232. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104232>.

ДОДАТКИ