

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

**Підвищення точності позиціонування промислових
роботів у технологіях інкрементального формоутворення**

**Improving the positioning accuracy of industrial robots in
incremental forming technologies**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури групи ПМ-24М-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Віталій ГУР'ЄВСЬКИЙ

Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент
_____ Віталій МАЖАРА

Рецензент:
канд. техн. наук, доцент
_____ Олег БЕВЗ

Завідувач кафедри ММР
канд. техн. наук, доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА

Кропивницький 2025

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри машинобудування,
мехатроніки і робототехніки

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

Завдання на кваліфікаційну роботу за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

Гур'євському Віталію Васильовичу

Тема роботи:

Підвищення точності позиціонування промислових роботів у технологіях інкрементального формоутворення

Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент Віталій МАЖАРА

Затверджено наказом ЦНТУ від 22 серпня 2025 року № 48-13.

Строк подання роботи до захисту:

20 грудня 2025 р.

Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є розробка підходів до підвищення точності позиціонування роботів-маніпуляторів у технологічних задачах інкрементального формоутворення.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- систематизація джерел похибок, що детермінують зниження точності позиціонування промислових роботів у контексті технології інкрементального формоутворення;
- аналітичний огляд прямих та непрямих методів вимірювання геометричних похибок, що стосуються лінійних та обертальних компонентів кінематичних ланок;
- проектування ПІД-алгоритму корекції позиціонування з урахуванням дискретності циклу обміну даними та нелінійностей кінематичної схеми, а також чисельна оцінка його динамічної поведінки за типовими сценаріями інкрементального формоутворення.

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічна частина	канд. екон. наук, доцент Ірина ЖУРИЛО		

Календарний план

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання роботи	Примітка
1	Опрацювання літератури по тематиці роботи	07.10.2025 р.	
2	Виконання першого розділу	16.10.2025 р.	
3	Виконання другого розділу	31.10.2025 р.	
3	Виконання третього розділу	11.11.2025 р.	
4	Виконання економічного розділу	30.11.2025 р.	
5	Виконання графічної частини роботи	06.12.2025 р.	
6	Перевірка роботи на академічний плагіат	10.12.2025 р.	
7	Рецензування роботи	12.12.2025 р.	

Дата видачі завдання

01 вересня 2025 р.

Здобувач вищої освіти

Віталій ГУР'ЄВСЬКИЙ

Керівник роботи

Віталій МАЖАРА

АНОТАЦІЯ

Гур'євський В. В. Підвищення точності позиціонування промислових роботів у технологіях інкрементального формоутворення : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 131 «Прикладна механіка» ОПП «Прикладна механіка» / наук. кер. В. А. Мажара. Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. - 74 с.

Графічна частина – 9 аркушів.

Актуальність роботи. Актуальність дослідження обумовлена стійкою тенденцією до зростання вимог до метрологічної точності позиціонування виконавчих механізмів при застосуванні промислових роботів у високотехнологічних процесах, зокрема в технологіях інкрементального формоутворення. Швидка еволюція багатофункціональних верстатів з ЧПУ та роботизованих комплексів, впровадження п'ятиосьових кінематичних схем та підвищення якісних параметрів кінцевих виробів вимагають розробки системного підходу до ідентифікації, моделювання та адаптивної компенсації джерел похибок.

Мета роботи. Метою роботи є формалізація інтегрованих підходів до підвищення точності позиціонування роботів-маніпуляторів у технологічних задачах інкрементального формоутворення шляхом синергетичного поєднання високоточної метрологічної реєстрації, кінематичної ідентифікації похибок та розробки алгоритмів адаптивної програмної компенсації в реальному часі.

Наукова новизна. Наукова новизна дослідження полягає в розробці інтегрованого методологічного комплексу, який вперше поєднує:

- метрологічну реєстрацію положень із застосуванням мультилатерації для підвищення достовірності просторових даних;
- кінематичну ідентифікацію похибок на основі отриманих метрологічних даних;
- адаптивну програмну компенсацію, реалізовану через модифікований ПІД-регулятор, що функціонує з урахуванням критично малих затримок циклу обміну даними (на рівні 4 мс) та пристосований до складних траєкторій інкрементального формоутворення.

інкрементальне формоутворення, точність позиціонування, робот-маніпулятор, заготовка

ANNOTATION

Hurievskyi V. V. Improving the positioning accuracy of industrial robots in incremental forming technologies : qualification work for the educational level "Master's" : specialty 131 "Applied Mechanics" EPP "Applied Mechanics" / scientific director V. A. Mazhara. Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi: CUNTU, 2025. - 74 p.

Graphic part - 9 sheets.

Relevance of the work. The relevance of the research is due to the steady trend towards increasing requirements for the metrological accuracy of positioning of executive mechanisms when using industrial robots in high-tech processes, in particular in incremental forming technologies. The rapid evolution of multifunctional CNC machines and robotic complexes, the introduction of five-axis kinematic schemes, and the improvement of the quality parameters of end products require the development of a systematic approach to the identification, modeling, and adaptive compensation of error sources.

Purpose of the work. The purpose of the work is to formalize integrated approaches to improving the positioning accuracy of robotic manipulators in technological tasks of incremental shaping through the synergistic combination of high-precision metrological registration, kinematic error identification, and the development of algorithms for adaptive software compensation in real time.

Scientific novelty. The scientific novelty of the research lies in the development of an integrated methodological complex, which for the first time combines:

- metrological registration of positions using multilateration to improve the reliability of spatial data;
- kinematic identification of errors based on the obtained metrological data;
- adaptive software compensation implemented through a modified PID controller that operates with critically small data exchange cycle delays (at the level of 4 ms) and is adapted to complex trajectories of incremental shape formation.

incremental forming, positioning accuracy, robot manipulator, workpiece

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ	10
1.1 Джерела похибок та їх класифікація	10
1.2 Геометричні похибки та механізми їх компенсації в кінематичних ланцюгах промислових роботів	11
1.3 Теплові похибки та архітектура інтегральної компенсації в системі керування промисловими роботами	15
1.4 Динамічні похибки та архітектура високочастотної онлайнової компенсації	17
1.5 Похибки, пов'язані з навантаженням, та їхній вплив на точність позиціонування	20
1.6 Похибки системи керування та принципи їх мінімізації	23
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ІНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ	28
2.1 Принцип інкрементального формоутворення	28
2.2 Обладнання для інкрементального формоутворення	32
2.3 Математична модель величини сигналу на виході пропорційно – інтегрально - диференціюючого регулятора	35
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПЕРЕМІЩЕНЬ РОБОТА У ПРОЦЕСІ ІНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ	43
3.1 Концепція двоетапної компенсації при забезпеченні точності переміщень роботів-маніпуляторів	43
3.2 Аналіз пропорційної дії у забезпеченні швидкодії та точності позиціонування	46
3.3 Аналіз ролі похідної дії у стабілізації та демпфуванні системи	50
3.4 Аналіз інтегральної дії у зменшенні залишкової похибки та впливі на стійкість	53

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ НА ОПЕРАЦІЯХ ІНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ	
4.1 Загальні вихідні дані	
4.2 Розрахунок технологічної собівартості виготовлення деталі	60
4.2.1 Розрахунок змінних витрат	60
4.2.2 Розрахунок постійних витрат	64
4.2.3 Розрахунок технологічної собівартості	66
4.2.4 Розрахунок показників економічної ефективності проектного варіанту технологічного процесу	67
ВИСНОВКИ	69
ЛІТЕРАТУРА	71

ВСТУП

Актуальність дослідження обумовлена стійкою тенденцією до зростання вимог до метрологічної точності позиціювання виконавчих механізмів при застосуванні промислових роботів (ПР) у високотехнологічних процесах, зокрема в технологіях інкрементального формоутворення (ІФ). Швидка еволюція багатофункціональних верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ) та роботизованих комплексів, експансія п'ятиосьових кінематичних схем та підвищення якісних параметрів кінцевих виробів імперативно вимагають розробки системного підходу до ідентифікації, моделювання та адаптивної компенсації джерел похибок. Цілеспрямоване впровадження інтелектуальних методів калібрування та програмної корекції траєкторій роботів є необхідною умовою для мінімізації впливу геометричних, термічних, динамічних та навантажувальних похибок, що, в свою чергу, забезпечує високу конгруентність фактичної геометрії деталі її ідеалізованій САМ-моделі.

Метою роботи є формалізація інтегрованих підходів до підвищення точності позиціювання роботів-маніпуляторів у технологічних задачах інкрементального формоутворення шляхом синергетичного поєднання високоточної метрологічної реєстрації (із застосуванням лазерного трекара), кінематичної ідентифікації похибок та розробки алгоритмів адаптивної програмної компенсації в реальному часі.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Систематизація джерел похибок, що детермінують зниження точності позиціювання промислових роботів у контексті технології ІФ.
2. Аналітичний огляд прямих та непрямих методів вимірювання геометричних похибок, що стосуються лінійних та обертальних компонентів кінематичних ланок.
3. Розробка верифікованої моделі вимірювальної підсистеми на основі лазерного трекара для прецизійного контролю Робочої Точки Інструмента (ТСР)

робота та визначення матриць гомогенного перетворення (НТМ) між системою координат трекара і робота.

4. Проектування ПІД-алгоритму корекції позиціонування з урахуванням дискретності циклу обміну даними (RSI) та нелінійностей кінематичної схеми, а також чисельна оцінка його динамічної поведінки за типовими сценаріями ІФ.

5. Експериментальна валідація розробленої методики калібрування, емпіричне підтвердження ефективності розробленої методики кінематичного калібрування, що використовує принципи мультилатерації та інтеграцію даних високоточної зовнішньої метрології.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці інтегрованого методологічного комплексу, який вперше поєднує:

1. Метрологічну реєстрацію положень із застосуванням мультилатерації для підвищення достовірності просторових даних;
2. Кінематичну ідентифікацію похибок (PDGE/PIGE) на основі отриманих метрологічних даних;
3. Адаптивну програмну компенсацію, реалізовану через модифікований ПІД-регулятор, що функціонує з урахуванням критично малих затримок циклу обміну даними (на рівні 4 мс) та пристосований до складних траєкторій ІФ.

В роботі застосовано методи аналітичного моделювання кінематичної структури робота, матричної алгебри для побудови НТМ, чисельної симуляції для аналізу впливу параметрів ПІД-регулятора на перехідні процеси, а також експериментальні методи з використанням високоточного лазерного трекара для верифікації моделі та алгоритмів.

1 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

1.1 Джерела похибок та їх класифікація

Промислові роботи, завдяки різноманітності моделей, доступній вартості та широким технічним можливостям, успішно використовуються для автоматизації процесів зварювання, різання, фарбування та інших операцій.

Постійна еволюція промислових роботів сприяє збільшенню їхньої точності та повторюваності. Однак роботи не завжди володіють необхідною жорсткістю та наразі не можуть гарантувати мікронну точність та надвисоке позиціонування. Практичний досвід свідчить, що в окремих випадках застосування традиційних роботизованих комплексів є малоефективним для виконання важливих практичних завдань. До таких завдань належить, наприклад, фінішна обробка поверхонь з високими вимогами до якості, де робот може бути використаний як частина верстата.

Виробництво, в тому числі обробка металів, зазнало значних технологічних змін за останні два десятиліття. Верстати з числовим програмним управлінням (ЧПУ) перетворилися з простих пристроїв на складні комп'ютеризовані машини. Сьогодні майже будь-яку тривимірну поверхню можна ефективно запрограмувати та обробити за допомогою п'ятиосьової технології. Згідно з останнім дослідженням World Machine Tool Survey, світова галузь верстатобудування, попри наслідки COVID-19, демонструє зростання загального споживання верстатів: з 59,2 млрд євро у 2020 році до 70,9 млрд євро у 2021 році.

Похибки позиціонування робота класифікують за їх походженням. Серед основних джерел виділяють:

1. Геометричні похибки: Це найбільш значні похибки, що виникають через неідеальність механічних елементів, наприклад, валів. Вони можуть бути статичними (постійні) або динамічними (змінюються під час руху). До них належать:

- a. Похибки позиціонування: Відхилення фактичного положення ланки від заданого.
- b. Похибки прямолінійності: Відхилення траєкторії руху від прямої лінії.
- c. Кутові похибки: Наприклад, похибки нахилу, тангажу та крену.
- d. Також важливими є похибки прямокутності між осями, які виникають через неточність їх взаємного розташування.

1.2 Геометричні похибки та механізми їх компенсації в кінематичних ланцюгах промислових роботів

Геометричні похибки (ГП) є систематичним класом похибок, що виникають внаслідок відхилення фактичних параметрів кінематичного ланцюга промислового робота (ПР) від його ідеалізованої CAD-моделі. Ці похибки детерміновані виробничими допусками, неточністю монтажу елементів, таких як вали, підшипники та редуктори, і становлять домінуючу складову загальної статичної та квазістатичної похибки позиціонування Робочої Точки Інструмента (ТСР). З огляду на вимоги до точності в технологіях інкрементального формоутворення (ІФ), обов'язковим є не тільки прецизійна ідентифікація ГП, але й їх інтеграція в алгоритми програмної компенсації.

ГП класифікуються на дві основні групи. Похибки, незалежні від положення, є константними (наприклад, похибки прямокутності між осями або постійне зміщення початку координат), тоді як похибки, залежні від положення змінюються як функція від конфігурації маніпулятора (наприклад, похибки кроку гвинта чи прямолінійності).

Компенсація геометричних похибок здійснюється на кінематичному рівні шляхом внесення коригувальних даних у математичну модель керування ПР. Цей процес вимагає високоточної метрологічної реєстрації та подальшої ідентифікації параметрів похибки.

1. Похибки позиціонування . Сутність похибки: Похибка позиціонування описує різницю між заданим номінальним переміщенням вздовж осі X та

фактично досягнутим переміщенням. Для обертальних осей це еквівалентно похибці кута повороту. Це, по суті, похибка відтворення заданої координати.

Для вимірювання застосовується лазерний трекер або лазерний інтерферометр. Ці прилади фіксують фактичну послідовність положень рефлектора (закріпленого на рухомій ланці) у різних точках робочого діапазону осі. Порівняння вимірних значень з даними енкодера приводу дозволяє визначити функціональну залежність похибки від номінального положення.

На основі ідентифікованих даних формується таблиця корекцій або будується поліноміальна апроксимація, що описує залежність. Далі ця функція інтегрується безпосередньо в кінематичну модель контролера. Компенсація здійснюється шляхом передкалькуляції команди: номінальна цільова координата програмно коригується на потрібну величину перед відправленням сигналу на виконавчий механізм. Таким чином, задаюче значення для приводу вже містить зміщення, що нівелює систематичну похибку.

2. Похибки прямолінійності

Похибки прямолінійності являють собою небажані зміщення ланки в поперечних напрямках (Y і Z) під час номінального руху вздовж осі X . Вони безпосередньо впливають на точність ТСР у робочому просторі.

Вимірювання виконується лазерним трекером у режимі прямолінійності. Рефлектор, закріплений на рухомій каретці, дозволяє трекеру фіксувати поперечне відхилення.

Отримані залежності інтегруються в диференціальну матрицю похибки. Ця матриця, що є розширенням гомогенних матриць перетворення (НТМ), описує мікрозміщення та мікрообертання для кожної ланки кінематичного ланцюга. Кінцеве кориговане положення ТСР обчислюється шляхом послідовного множення матриць:

Цей програмний підхід гарантує, що номінальна траєкторія коригується для забезпечення фактичної прямолінійності.

3. Кутові похибки

Кутові похибки (крен, тангаж, нахил) є небажаними обертаннями ланки навколо її номінальних осей, які також залежать від положення. Вони особливо критичні, оскільки їхній вплив на ТСР збільшується лінійно зі зростанням відстані від осі обертання до кінця маніпулятора.

Вимірювання вимагає застосування лазерного трекера зі спеціальними відбивачами, що дозволяють одночасно фіксувати лінійне положення та кутову орієнтацію.

Аналогічно похибкам прямолінійності, кутові похибки моделюються як залежні від положення функції і вносяться у відповідні елементи диференціальної матриці похибки, як малі кутові зсуви. Контролер робота, використовуючи ці дані, модифікує команди на приводи для передбачення та компенсації небажаного обертання, забезпечуючи коректну орієнтацію ТСР.

4. Похибки прямокутності

Це класичні RIGЕ-похибки, що відображають відхилення кута між номінально ортогональними осями від 90° . Ця похибка має перманентний вплив на точність усього робочого об'єму.

Визначається шляхом високоточного вимірювання кута між фактичними векторами руху двох осей за допомогою лазерного трекера або двочастотних лазерних інтерферометрів.

Оскільки похибка є статичною, вона моделюється як постійний кутовий зсув і вноситься в базову матрицю перетворення (НТМ) між відповідними ланками. Після одноразового визначення та фіксації, ця похибка стає інтегрованою частиною кінематичної моделі робота і не вимагає динамічної корекції під час руху.

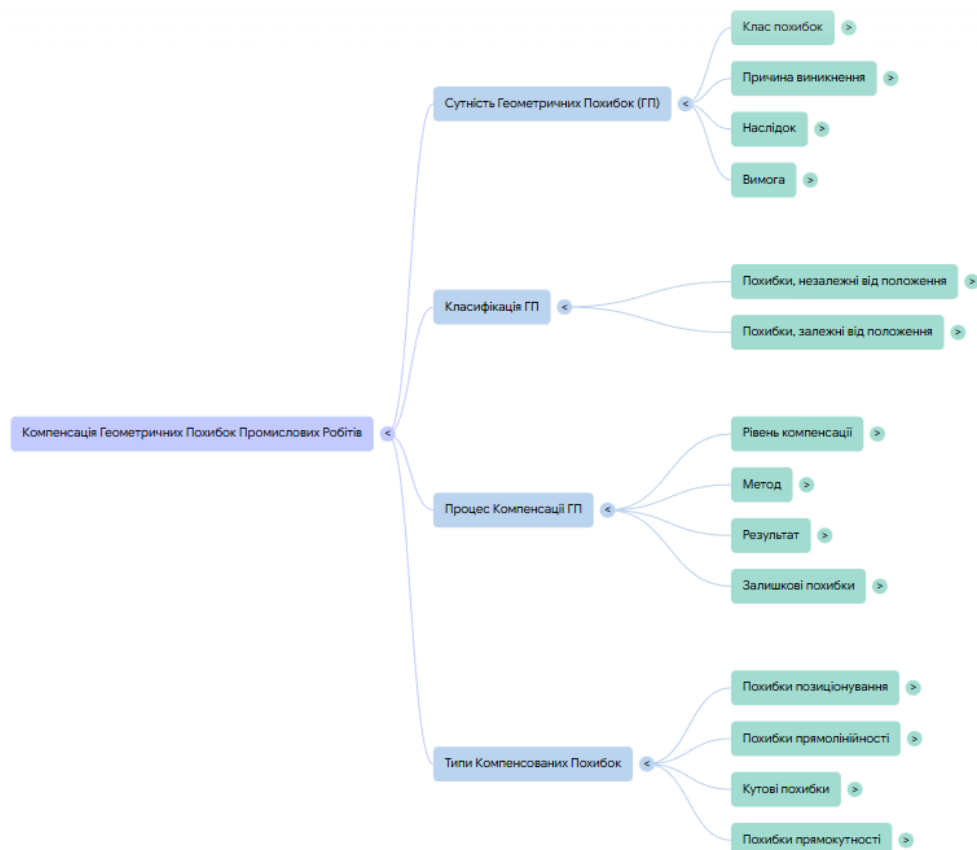


Рисунок 1.1 – Компенсация геометрических похибок промышленных роботов

Геометричні похибки компенсуються на кінематичному рівні за допомогою офлайнного калібрування. Результатом цього процесу є оновлена (коригована) кінематична модель, яка зменшує систематичну складову похибки до мінімально можливого рівня. Залишкові похибки, які включають динамічні ефекти, нелінійності та похибки відстеження траєкторії, стають об'єктом онлайнної адаптивної компенсації через ПІД-регулятор, що є центральною темою даного дослідження.

1.3 Теплові похибки та архітектура інтегральної компенсації в системі керування промисловими роботами

На відміну від геометричних похибок, що є систематичними та статичними або квазістатичними, теплові похибки (ТП) є динамічними та часозалежними, представляючи собою другу за значущістю категорію систематичних відхилень у позиціонуванні промислових роботів (ПР). Сутність ТП полягає у термічному розширенні та подальшій деформації конструктивних елементів маніпулятора, детермінованій виділенням внутрішнього тепла приводами, тертям у механізмах, а також коливаннями температури навколишнього середовища. Їхня значущість зростає пропорційно вимогам до довготривалої стабільності точності, що є критичним для тривалих циклів інкрементального формоутворення (ІФ).

Теплові похибки класифікуються за джерелом генерації:

Внутрішні джерела ТП:

1. Електроприводи та редуктори: Це основне внутрішнє джерело, де генерація тепла відбувається внаслідок електричних втрат (омічні втрати) та механічного тертя у високоточних редукторах. Локальний нагрів у місцях з'єднань ланок призводить до термічного розширення валів, корпусів та опорних конструкцій. Цей вплив є найбільш небезпечним, оскільки нагрівання є нерівномірним і залежить від робочого циклу (швидкості, навантаження, часу роботи), що спричиняє викривлення ланок.

2. Тертя в напрямних та підшипниках: При активному русі робота тепло, що виділяється тертям в напрямних та підшипниках, викликає додаткове зміщення, яке корелює з динамікою руху, що ускладнює його моделювання.

Зовнішні джерела ТП:

1. Температура середовища: Коливання температури виробничого цеху викликають загальну зміну розмірів масивних елементів робота (наприклад, основи або першої ланки).

2. Технологічний процес (ІФ): У процесі формоутворення тепло, яке генерується в зоні контакту пуансона та заготовки, може передаватися на кінцевий

ефектор (ТСР) та наступні ланки, що призводить до локального термічного дрейфу, який прямо впливає на точність обробки.

Зміна температури елемента викликає лінійне розширення. Однак, оскільки розподіл температур усередині маніпулятора є нестационарним та нерівномірним, виникають градієнти температур. Ці градієнти призводять не просто до зміщення, а до складної просторової деформації ланок (викривлення), що трансформується у похибки у всіх шести ступенях свободи ТСР: три лінійні зміщення та три кутові орієнтаційні похибки. Термічний дрейф є особливо помітним у перехідному режимі (перші 2-4 години роботи) до моменту досягнення квазістабільного теплового стану.

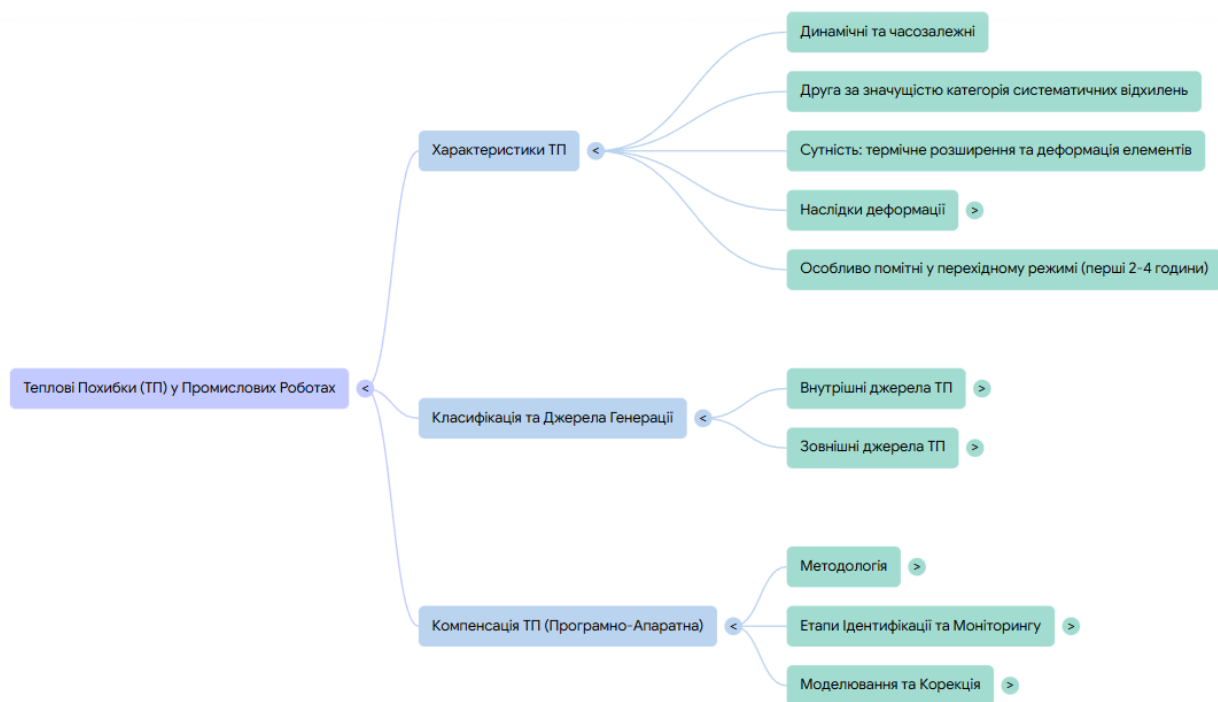


Рисунок 1.2 - Теплові похибки у промислових роботах

Елімінація ТП через апаратні засоби є ресурсномісткою та часто непрактичною. Тому основним напрямком підвищення точності є програмно-апаратна компенсація, що узгоджується із загальною методологією компенсації систематичних похибок, прийнятою в даній роботі. Ідентифікація ТП полягає у встановленні функціональної залежності між профілем температур ключових

вузлів та вектором просторового зміщення ТСР. Встановлюється мережа прецизійних температурних сенсорів (термопар або RTD-датчиків) на критично важливих тепловиділяючих елементах (корпуси двигунів, редуктори, основи ланок). Зібрані дані формують вектор температурного стану який безперервно моніториться системою керування.

На основі експериментальних даних (фактичне зміщення ТСР, виміряне лазерним трекером, при відомих будується регресійна модель. Модель дозволяє системі керування обчислювати похибку прогнозовано в реальному часі, незалежно від фактичного вимірювання. Інтеграція та корекція здійснюється на основі внесення розрахованого вектора у загальну кінематичну модель робота. Розрахований вектор зміщення інтегрується як додатковий низькочастотний коригувальний зсув у загальний алгоритм компенсації систематичних похибок, доповнюючи корекцію геометричних похибок, визначену в розділі 1.2: Корекція ТП здійснюється з нижчою частотою (через інерційність теплових процесів), забезпечуючи довготривалу стабільність геометричного калібрування. Це створює надійну платформу для подальшої високочастотної корекції динамічних похибок, що реалізується через ПІД-регулятор.

1.4 Динамічні похибки та архітектура високочастотної онлайнної компенсації

Динамічні похибки (ДП) формують клас несистематичних, частотно-залежних похибок, які є невід'ємним наслідком кінематичного та динамічного відгуку промислового робота на керуючі сигнали. На відміну від статичних (геометричних) і квазістатичних (теплових) похибок, ДП виникають виключно під час руху маніпулятора, і їхня амплітуда прямо корелює з профілем швидкості, прискорення та зовнішнім навантаженням. Мінімізація ДП є критичною для забезпечення точного відстеження складної траєкторії в умовах високошвидкісних технологій, зокрема інкрементального формоутворення (ІФ).

Виникнення динамічних похибок зумовлене фізичними обмеженнями механічної системи та системи керування:

1. Похибки відстеження: Це основний прояв ДП, що відображає різницю між заданою (ідеальною) та фактичною траєкторією ТСР. Вони виникають через обмежену пропускну здатність контуру керування та інерційність приводних систем, що призводить до динамічного відставання при високих прискореннях, особливо під час проходження кутових сегментів траєкторії.

2. Інерційні сили та ефекти: Кожна ланка робота має певну масу та момент інерції, які прискорення та гальмування трансформують у значні інерційні сили. Ці сили спричиняють тимчасову динамічну деформацію елементів конструкції, що проявляється у формі перерегулювання при гальмуванні та тимчасового зміщення ТСР, які залежать від орієнтації робота.

3. Вібрації та резонансні явища: Навіть при наявності демпфування, механічна система має власні частоти коливань. Якщо частота керуючого сигналу або робочих процесів (як у випадку циклічного навантаження в ІФ) збігається з однією з власних частот системи, амплітуда коливань різко зростає. Це призводить до значних неконтрольованих відхилень ТСР і може спричинити динамічну нестабільність процесу.

4. Нелінійне тертя: Хоча частина тертя, що генерує тепло, розглядається як систематична похибка (розділ 1.3), динамічні компоненти тертя (наприклад, тертя Кулона) є нелінійними і ускладнюють завдання для регулятора. Ці ефекти можуть спричинити небажані затримки або ривки на старті руху, тим самим збільшуючи загальну похибку відстеження.

Механізм впливу ДП є високочастотним і вимагає постійної корекції. Ці похибки, які не можуть бути повністю усунені офлайнним калібруванням, накладаються на вже скомпенсовану кінематичну модель.

З огляду на їхню часову та частотну залежність, динамічні похибки вимагають високочастотної онлайнної корекції безпосередньо в контурі керування робота.

Ідентифікація ДП передбачає визначення динамічних параметрів робота (маси, інерції, жорсткості) та побудову динамічної моделі, яка описує його відгук на керуючу дію.



Рисунок 1.3 – Динамічні похибки промислових роботів та онлайн компенсація

Для технічної реалізації використовуються інструменти інкрементального вимірювання (як-от лазерний трекер або внутрішні енкодери) для фіксації відгуку ТСР на тестові траєкторії. На основі цих вимірів будується передавальна функція або просторова модель станів, що забезпечує прогноз динамічної поведінки ПР.

Забезпечення швидкого та точного відстеження заданої траєкторії, мінімізуючи динамічну похибку у реальному часі.

Для реалізації високочастотної корекції застосовується архітектура Пропорційно-Інтегрально-Диференційного (ПІД) регулятора. Встановлення цього регулятора в контур керування дозволяє обробляти поточну похибку відстеження та генерувати коригуючий момент для привідних систем. Цей коригуючий момент спрямований на те, щоб:

1. Підвищити швидкість реакції системи для зменшення відставання.
2. Забезпечити демпфування механічних коливань та знизити інерційні перерегулювання.
3. Усунути будь-яку залишкову статичну похибку, що виникає внаслідок некомпенсованих нелінійних ефектів.

1.5 Похибки, пов'язані з навантаженням, та їхній вплив на точність позиціонування

Похибки, пов'язані з навантаженням, відомі як похибки пружної деформації, являють собою систематичні відхилення Робочої Точки Інструмента (ТСР), що виникають внаслідок дії статичних і динамічних сил, зокрема сили тяжіння інструменту та вантажу, а також технологічних сил (наприклад, сили формоутворення в ІФ). Ці похибки, хоча і є статичними/квазістатичними за своєю природою, змінюються залежно від конфігурації робота та величини прикладеного навантаження.

Кожна ланка промислового робота (ПР) має кінцеву жорсткість. Під дією зовнішніх та внутрішніх сил ланки зазнають пружної деформації, що призводить до зміщення ТСР. Це зміщення є систематичним, оскільки для даної конфігурації робота і заданого навантаження його величина є передбачуваною.

1. Гравітаційне навантаження: Вага самого маніпулятора (зокрема, останніх ланок), маса інструменту (пуансона для ІФ) та маса оброблюваної деталі. Ця сила є постійною та залежить лише від кутів повороту осей.

2. Технологічне навантаження: Це сили, що виникають безпосередньо в процесі обробки. У технології ІФ це значна сила формоутворення, яка діє між

інструментом і заготовкою. Ця сила може бути великою і часто змінюється залежно від траєкторії та швидкості подачі.

Деформація під навантаженням відбувається згідно із законом Гука. Зміщення x у ТСП є результатом інтегрування деформації вздовж усього кінематичного ланцюга. Для шарнірних роботів найбільший внесок вносять кутові деформації в місцях з'єднання ланок (редуктори, підшипники), а не лінійне стиснення самих ланок. Це призводить до складного дрейфу позиції та орієнтації ТСП.

Похибки навантаження повинні компенсуватися як частина загальної систематичної корекції, що узгоджується з підходами до компенсації геометричних похибок (Розділ 1.2).

Ідентифікація похибок навантаження полягає у створенні моделі жорсткості яка кількісно описує залежність зміщення ТСП від прикладеної сили F та конфігурації q (кутів осей).

- Пряме вимірювання: Вимірювання зміщення ТСП за допомогою лазерного трекера або динамометра при фіксованій конфігурації, але з різними тестовими навантаженнями.

- Аналітичне моделювання: Побудова моделі з використанням методу скінченних елементів (FEM) або підходу Матриці Жорсткості Декарта Зміщення обчислюється як:

-

$$\Delta X_{Load} = K^{-1}(q) \cdot F, \quad (1.1)$$

де $K^{-1}(q)$ - матриця гнучкості, що залежить від конфігурації робота.

Динамічне коригування цільової позиції ТСП на величину, прогнозовану моделлю жорсткості.

Оскільки похибка навантаження є передбачуваною (для заданого вантажу та конфігурації), вона може бути компенсована програмним шляхом.

Для гравітаційного навантаження вектор зміщення розраховується на основі моделі жорсткості для поточних кутів осей. Ця корекція інтегрується в кінематичну модель аналогічно геометричній компенсації.

Якщо технологічна сила може бути виміряна або точно змодельована в реальному часі, її вплив також може бути динамічно врахований у керуючому сигналі. Команда на приводи коригується таким чином, щоб робот свідомо "перекомпенсовував" очікувану деформацію.

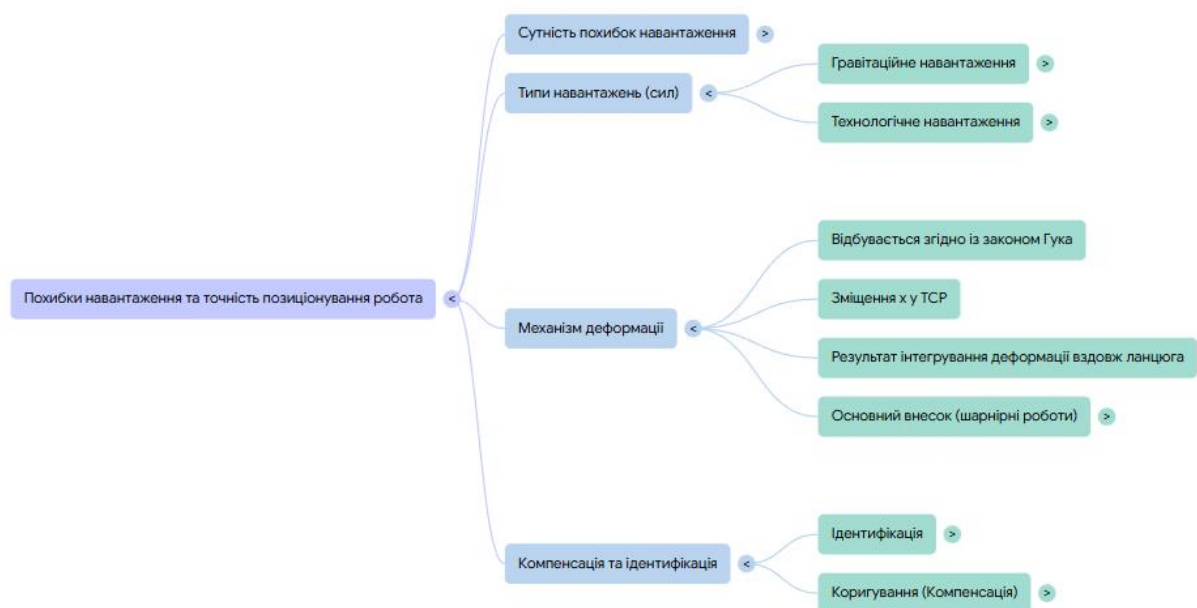


Рисунок 1.4 – Помилки навантаження та точність позиціонування робота

Таким чином, у загальній архітектурі компенсації, помилки навантаження вносяться як додатковий систематичний вектор корекції до кінематичної моделі, забезпечуючи стійкість позиціонування ТСР під час технологічних операцій.

1.6 Похибки системи керування та принципи їх мінімізації

Похибки, що походять від системи керування є внутрішнім джерелом неточності, яке безпосередньо впливає на здатність промислового робота (ПР) точно відтворювати задану траєкторію. Ці похибки не пов'язані з фізичною геометрією чи тепловим станом, а детерміновані якістю роботи електронних компонентів, алгоритмів та виконавчих механізмів.

Цей клас похибок можна розділити на три основні групи, що відповідають функціональним елементам системи керування:

1. Похибки серводвигунів та приводів

1.1. Неточність роботи двигунів: Виникає через нелінійність у роботі сервоприводів, таких як пульсація моменту, особливо помітна в двигунах постійного струму або синхронних двигунах. Це спричиняє небажані мікроколивання швидкості.

1.2. Люфт: хоча це механічний ефект, його прояв є критичним для керування. Люфт у редукторах або механізмах передачі спричиняє "мертву зону", в якій рух двигуна не призводить до руху ланки, що генерує значну похибку відстеження при зміні напрямку руху.

1.3. Обмежена пропускна здатність: Сервопідсилювачі та контури струму/швидкості мають обмежену швидкість реакції. Це призводить до інерційного відставання приводу від команди, що є прямим джерелом динамічної похибки.

Похибки датчиків положення (Енкодерів):

1. Дискретність датчика: Всі цифрові енкодери (абсолютні або інкрементальні) мають кінцеву роздільну здатність. Фактичне положення ланки завжди округлюється до найближчого значення, що призводить до похибки квантування. Хоча ця похибка зазвичай мала, вона може бути значущою у високоточних задачах.

2. Шум та дрейф: Електронний шум в сигналі енкодера, а також температурний дрейф у вимірювальних компонентах вносять випадкові або систематичні помилки у зворотний зв'язок щодо положення.

3. Похибки монтажу: Неточне центрування енкодера або неідеальна геометрія вимірювальної шкали призводять до систематичної синусоїдальної похибки в межах одного оберту осі.

Недосконалість програмного забезпечення та алгоритмів:

Похибки інтерполяції: Програмне забезпечення контролера (наприклад, у циклі RSI) має перетворювати дискретні точки траєкторії на плавний рух. Недосконалість алгоритмів інтерполяції або недостатня частота її обчислення призводить до нерівномірного руху та відхилень від ідеальної траєкторії.

Неадекватність моделі: Якщо в контролері використовується спрощена кінематична або динамічна модель робота (наприклад, ігнорування гравітаційних або коріолісових сил), це призводить до систематичної неточності керування.

Затримка обчислення: Час, необхідний контролеру для зчитування даних із датчиків, обчислення керуючого сигналу та його видачі на приводи. Наявність цієї затримки є прямим чинником, що обмежує пропускну здатність системи і генерує динамічну похибку відстеження.

Похибки системи керування є багатоаспектними, і їх мінімізація вимагає як апаратного, так і програмного вдосконалення.

1. Мінімізація апаратних похибок

1.1. Високоточні компоненти: Використання енкодерів з високою роздільною здатністю (наприклад, 24-бітних) та сервопідсилювачів із швидкою реакцією.

1.2. Компенсація люфту: Апаратне попереднє натягування механізмів або використання програмної компенсації люфту, при якій контролер подає додатковий імпульс моменту при зміні напрямку руху.

Для корекції цих похибок застосовується високочастотний контур керування, який є центральним елементом даного дослідження.

Для компенсації інерційних сил та гравітаційного навантаження (що є передбачуваними) у керуючий сигнал вноситься модельна корекція до того, як виникне похибка. Це значно зменшує навантаження на основний регулятор.

Як детально описано в розділі 1.4, ПІД-регулятор є основним інструментом для онлайнної корекції. Він працює з високою частотою і постійно генерує коригуючий момент, необхідний для нівелювання похибки відстеження, спричиненої неідеальністю приводів, затримками та нелінійним тертям. Таким чином, він динамічно долає неточності, які не вдалося усунути ні апаратним, ні офлайнним кінематичним калібруванням.

Застосування інтелектуальних методів, таких як фільтр Калмана, для очищення сигналу зворотного зв'язку від шуму датчиків, що підвищує достовірність даних для регулятора.

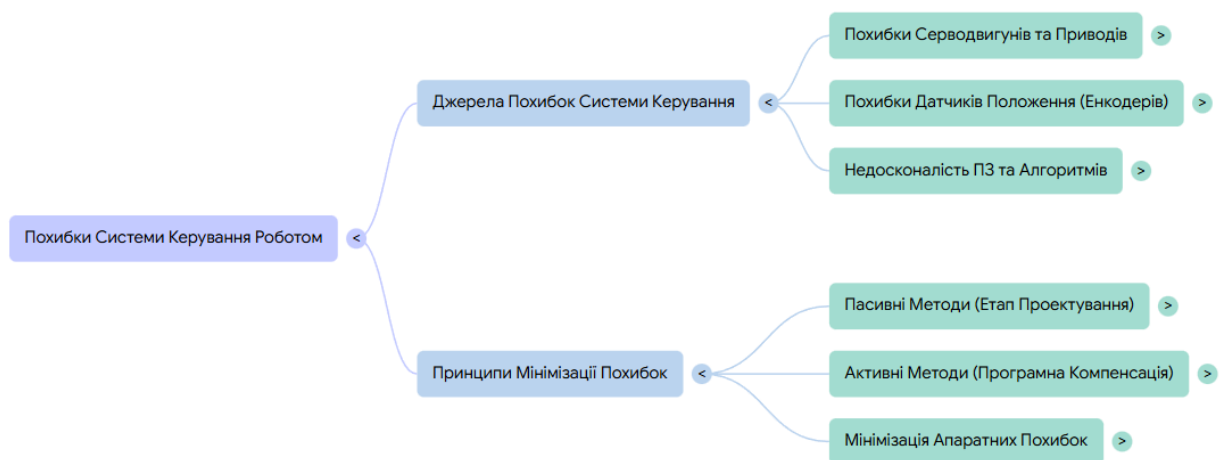


Рисунок 1.5 – Похибки системи керування роботом

Отже, похибки системи керування усуваються шляхом вдосконалення апаратної бази, а їхній залишковий динамічний вплив ефективно компенсується оптимізованим ПІД-регулятором, що є необхідною умовою для досягнення точності, необхідної для ІФ.

Проблема підвищення точності вирішується двома основними способами: пасивним та активним.

- Пасивні методи: Зменшення похибок досягається на етапі проектування та виготовлення. До них належать підвищення жорсткості конструкції, використання точніших компонентів та покращення якості збирання.

- Активні методи: Компенсація похибок відбувається за допомогою програмних засобів. Найпоширенішим є калібрування, що включає:

1. Вимірювання фактичних похибок робота за допомогою високоточних приладів (наприклад, лазерного інтерферометра або лазерного трекара).

2. Побудова математичної моделі цих похибок.

3. Програмна корекція траєкторії руху з урахуванням виявлених неточностей.

Програмна компенсація є найефективнішим методом. Вона дозволяє значно покращити точність позиціонування без внесення змін до механічної конструкції. Цей метод включає:

1. Корекцію похибок в реальному часі: Система керування постійно відстежує положення робота і коригує його траєкторію на основі даних з датчиків.

2. Застосування вимірювальних пристроїв: Для калібрування використовуються високоточні прилади. Лазерний інтерферометр, наприклад, вимірює лінійні та кутові відхилення, що дозволяє точно визначити похибки позиціонування, прямолінійності та кутів.

Загалом, використання лазерних систем для калібрування дозволяє виміряти всі 21 геометричну похибку промислового робота (6 для кожної осі плюс 3 похибки прямокутності) та створити повну об'ємну модель похибок.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що точність позиціонування промислових роботів визначається комплексом систематичних та динамічних похибок, серед яких домінують геометричні, теплові та інерційні відхилення. Їхня ідентифікація та компенсація потребують інтегрованого підходу, що поєднує високоточну метрологічну реєстрацію, кінематичне моделювання та програмно-апаратні методи корекції. Запропонована архітектура компенсації дозволяє знизити абсолютну похибку до рівня повторюваності робота, забезпечуючи необхідний фундамент для реалізації високоточних технологічних процесів,

зокрема інкрементального формоутворення. Таким чином, системне врахування джерел похибок та їх багаторівнева компенсація є ключовою умовою підвищення ефективності та конкурентоспроможності сучасних роботизованих виробничих комплексів.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ІНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ

2.1 Принцип інкрементального формоутворення

Інкрементальне формоутворення – процес обробки листового матеріалу, в якому заготовка локально деформується пуансоном зі сферичним торцем шляхом переміщення одного або декількох інструментів уздовж заданого напрямку (рис. 2.1, 2.2). Кінцеві частини заготовки при цьому жорстко фіксуються між нижньою плитою і притиском. Крім переміщення вздовж заданого шляху для зниження впливу сил контактної тертя пуансон обертається навколо своєї осі. Технологія дозволяє обробляти конструкційні, корозійностійкі, високоміцні та оцинковані сталі, кольорові метали, титан та інші матеріали. Основна відмінність від традиційних технологій полягає в тому, що не потрібно виготовлення дорогого інструменту, що змінює форму, і використання потужного пресового обладнання, тобто зміна форми виконується не за рахунок заповнення порожнини шляхом суміщення нижньої і верхньої гравюр штампа, а за рахунок реалізації переміщень інструменту по заданому контуру за заздалегідь розрахованими траєкторіями [11].

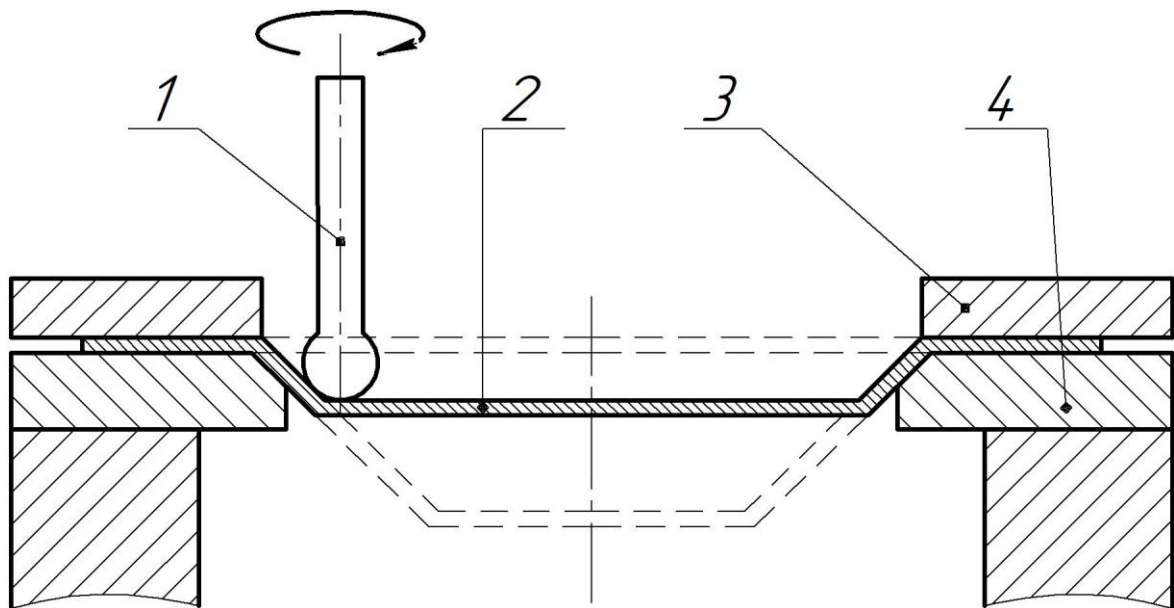


Рисунок 2.1 – Принципова схема інкрементального формоутворення

1- пуансон, 2 – заготовка, 3 – притиск, 4 – нижня плита

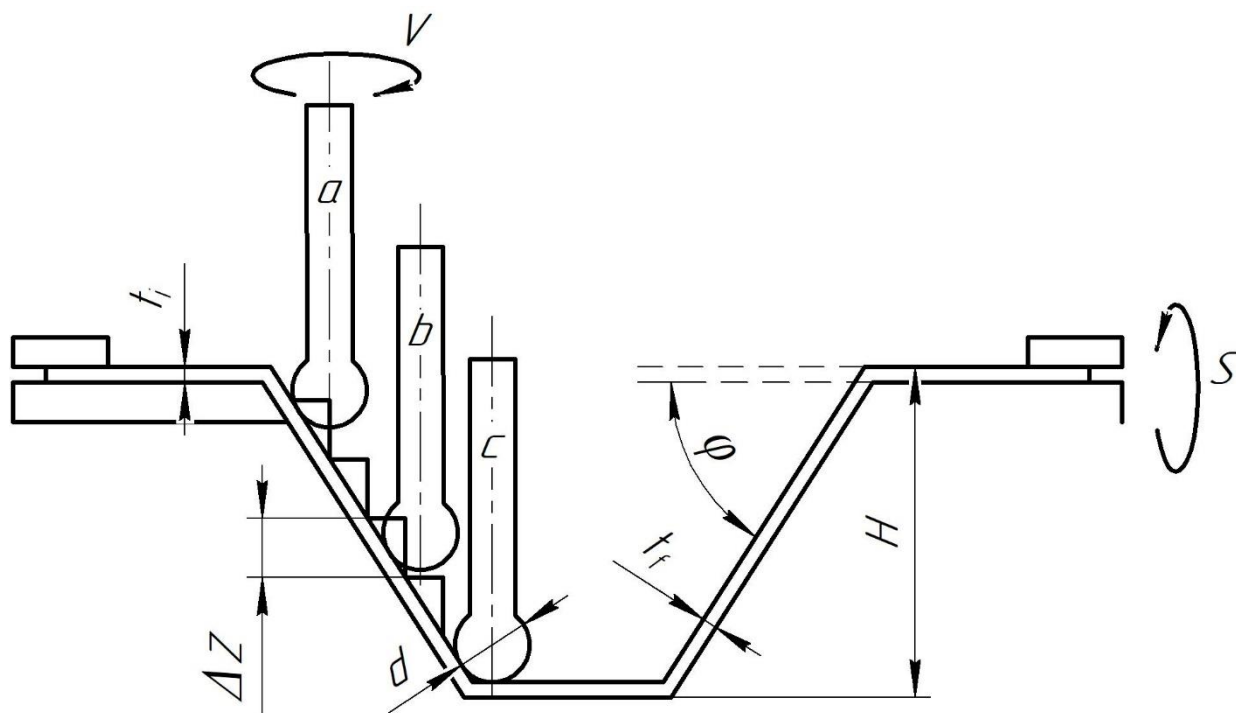


Рисунок 2.2 – Процес інкрементального формоутворення:

D – діаметр заготовки, V – швидкість обертання пуансона, t_i – початкова товщина заготовки, Δz – величина приросту, d – діаметр пуансона, t_f – кінцева товщина заготовки, ϕ – кут формування, H – глибина, S – швидкість переміщення пуансона.

Для підвищення точності одержуваних виробів і розширення технологічних можливостей використовують різні схеми формозміни [5]. Типові схеми процесу інкрементального формоутворення представлені на рис.2.3

На даний момент технології інкрементального формоутворення знаходять все більше застосування у всіх галузях промисловості завдяки своїй універсальності, гнучкості та швидкості отримання виробів. Тому необхідно далі досліджувати цю тему і вдосконалити точність відповідності САМ (Computer-Aided Manufacturing) моделі її готовому виробу за допомогою лазерного трекера шляхом підвищення точності позиціонування промислового робота-маніпулятора. Переміщення пуансона може відбуватися за рахунок верстата з числовим програмним управлінням, але в такому випадку розмір деталі буде обмежуватися розміром координатного столу верстата. Більш доцільним буде використання

робота-маніпулятора. Сучасні роботи-маніпулятори характеризуються високою повторюваністю переміщень, проте їх точність недостатня для багатьох технологічних операцій [12]. Для підвищення точності їх переміщень застосовуються калібрування за допомогою лазерного трекера, а також коригування в процесі виконання технологічної операції, що також здійснюється і застосуванням лазерного трекера.

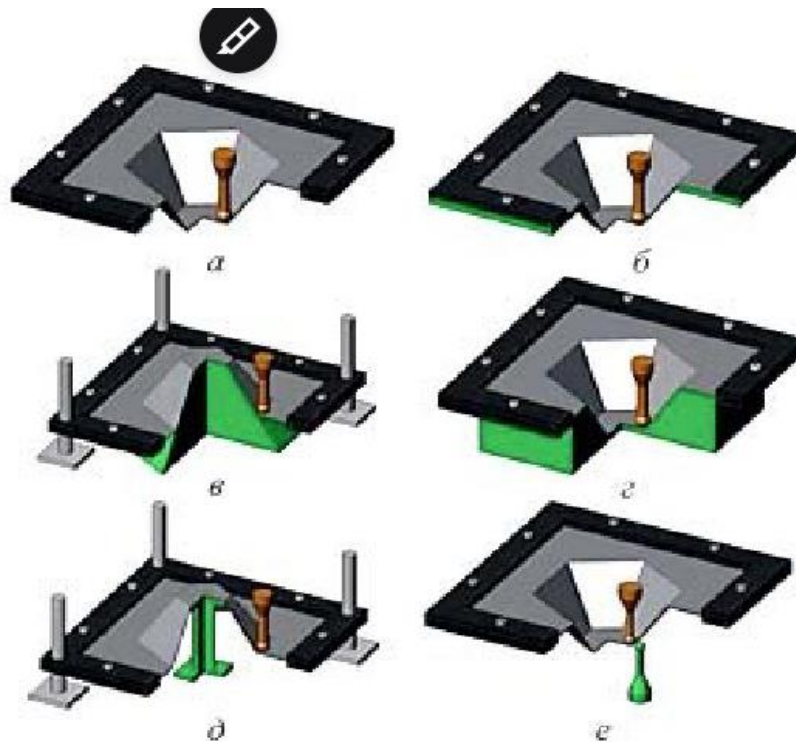


Рисунок 2.3 – Типові схеми інкрементального формоутворення:

а – з одним пуансоном, б – з пуансоном та опорною плитою під заготовку, в,г – з опорною матрицею, д – з нижнім підпором, е – з контр – пуансоном.

У даній роботі розглядалися наступні умови технологічного процесу інкрементального формоутворення:

- матеріал заготовки: алюміній Д16Т товщиною 0,5 мм;
- розмір заготовки: 200×200 мм по периметру, 200 мм глибина формоутворення;
- швидкість переміщення пуансона: від 0,5 м/хв до 10 м/хв;

- спосіб інкрементального формоутворення: по контуру (рис. 4) без обертання пуансона;
- фактори, що діють у технологічному процесі: процес виконується за кімнатних умов;
- точність позиціонування інструменту: 0,06 мм

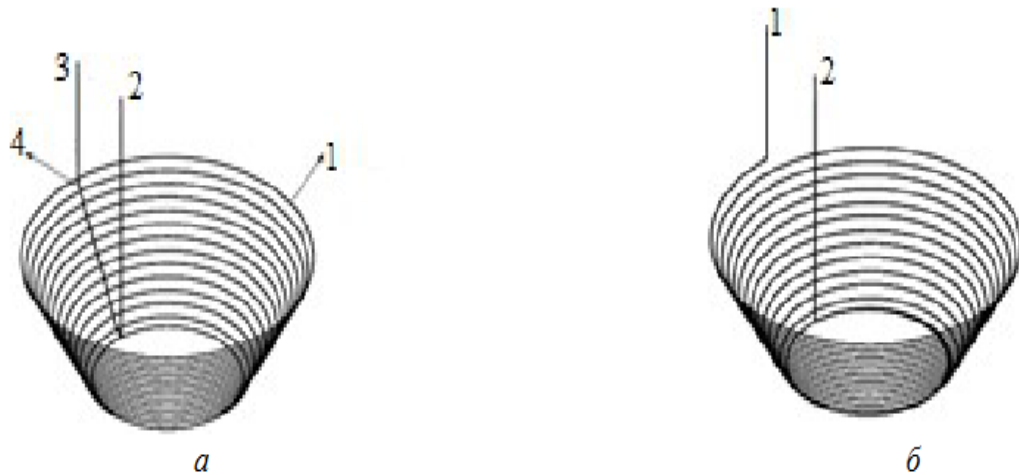


Рисунок 2.4 – Траєкторії руху інкрементального формоутворення:

а – по контуру; б – по спіралі;

1 – контур руху пуансона, 2 – глибина формування,

3 – поверхня формування, 4 – крок проходу пуансона.

Існує два способи інкрементального формування – по контуру і по спіралі. При русі по контуру пуансон, прикріплений через адаптер до робота (рис. 2.4), описує коло заданого радіуса, далі відбувається перехід на коло іншого радіуса і так, поки не будуть пройдено всі контури. При іншому способі пуансон постійно рухається по спіралі. При такому способі формування менше шорсткість отриманої поверхні в порівнянні з формоутворенням по контуру.

2.2 Обладнання для інкрементального формоутворення

Автоматизований промисловий комплекс для інкрементального формоутворення (рис. 2.5) складається з робота-маніпулятора KUKAKR 160 R1570 (далі – робот) [13], лазерного трекара і оптичних елементів вимірювальної системи – відбивачів, а також комп'ютера з програмою управління.

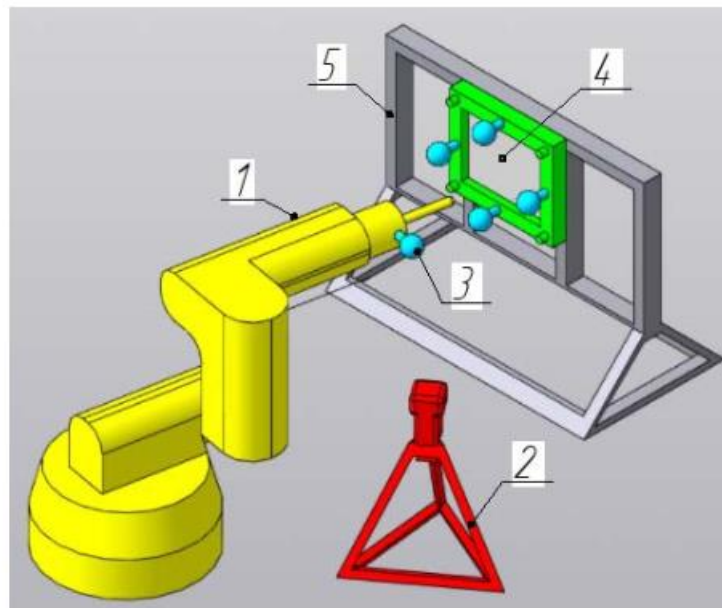


Рисунок 2.5 – Автоматизований комплекс для інкрементального формоутворення: 1 – робот - маніпулятор, 2 – лазерний трекер, 3 – відбивач, 4 – заготовка, 5 – оснащення для заготовки.

Комп'ютер з'єднаний з лазерним трекером і контролером робота (рис. 2.6). Завдання комп'ютерної керуючої програми (рис. 2.7) – порівняння поточних координат TCP (Tool Center Point) робота, отриманих в результаті вимірювання за допомогою трекара, з координатами, заданими в CAD (Computer-Aided Technologies) моделі і відправка коригуючої інформації до робота-маніпулятора в режимі реального часу [14, 23].

Оскільки цикл обробки (цикл спілкування) Robot System Interface (RSI) робота становить 4 мс, а у зовнішньої системи він жорстко не визначений, було

прийнято рішення надсилати дані із зовнішньої системи до системи управління робота кожні 4 мс. Для цього на роботі створювалася окрема під мережа, через яку він за протоколом UDP спілкувався тільки із зовнішньою системою. Формат спілкування при цьому задавався однаковим в системі управління робота (через *.xml файл) і в зовнішній системі. Робоча частота обміну даними становила 250 Гц.

За результатами вимірювань визначається, наскільки точно виконується переміщення, тобто чи не перевищує різниця дійсного і необхідного значення розміру допустиму величину. Якщо перевищення немає, то керуюча програма не буде здійснювати корекцію [20, 21].

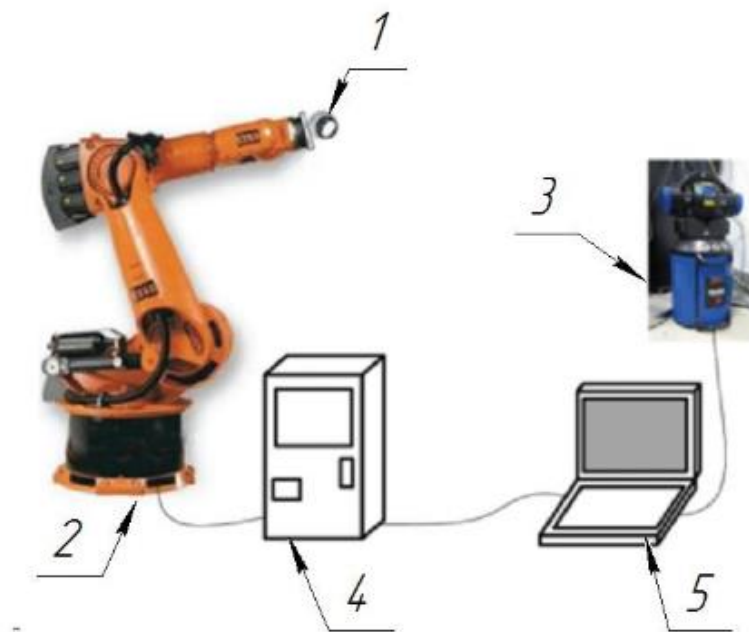


Рисунок 2.6 – Склад і зв'язок компонентів автоматизованого комплексу:

1 – відбивач, 2 – робот-маніпулятор, 3 – лазерний трекер, 4 – контролер робота,
5 – комп'ютер з керуючою програмою.

Робот-маніпулятор має шість ступенів свободи і використовується для переміщення пуансона. Він розвиває необхідну для деформації силу, передаючи її на заготовку через пуансон. Робот дозволяє переміщати пуансон і здійснювати тривимірне деформування, тим самим створюючи з плоскої заготовки об'ємну

деталь, заздалегідь спроектовану в спеціальному пакеті CAD програм (SolidWorks, Компас, Solid-Edge, GibbCam).

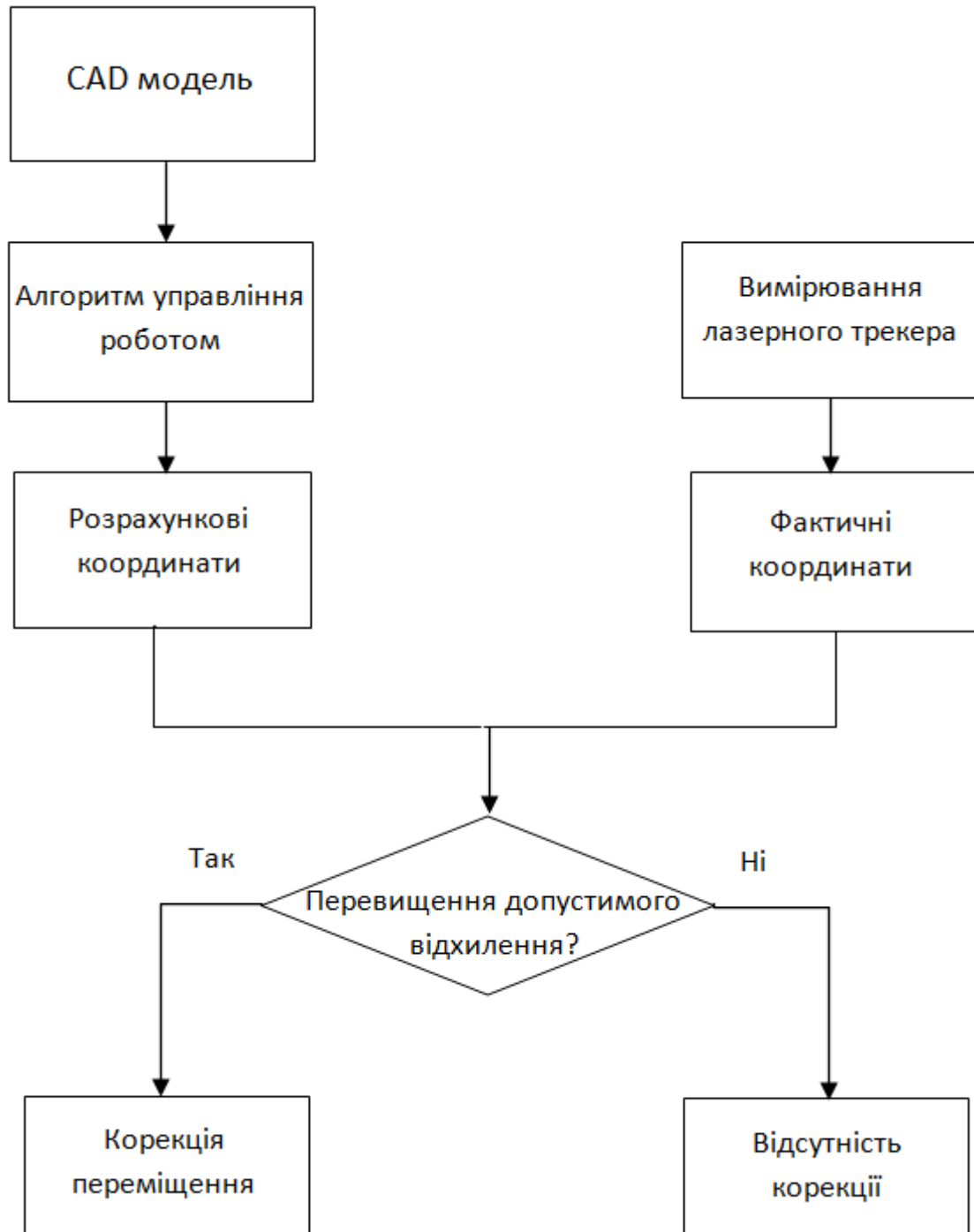


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритму компенсації переміщень робота в процесі інкрементального формоутворення

Лазерний трекер необхідний для контролю за точністю переміщення робота - маніпулятора. Вимірювання координат інструментального центру робота трекером дозволяє відстежувати реальне положення пуансона в просторі і порівнювати його з теоретичним, яке розраховував контролер робота, і якщо ці координати відрізняються на величину, що перевищує допустиму, то отримані від трекера дані використовуються для формування коригувального впливу на робота і дозволяють підвищити точність технологічного процесу інкрементального формоутворення. У складі автоматизованого комплексу може використовуватися робот KUKAKR 160 R1570, який відноситься до промислових роботів середньої вантажопідйомності, до класу маніпуляторів. Такі типи роботів широко застосовуються у виробництві, оскільки можуть виконувати велику кількість різних технологічних операцій [25, 26].

2.3 Математична модель величини сигналу на виході пропорційно – інтегрально - диференціюючого регулятора

Щоб визначити очікувану загальну похибку вимірювань, спочатку слід побудувати математичну модель системи вимірювань автоматизованого комплексу, що відображає вплив параметрів вимірювальної системи і лазерного трекера на точність визначення геометричних параметрів переміщень інструментального центру робота. Оскільки вимірювання проводяться в полярній системі координат (рис. 2.8), то результати вимірювань складаються із значення відстані (S), вертикального кута (V) горизонтального кута (Hz). Ці три значення є сферичними координатами вимірюваної точки. Декартові координати точки P потім обчислюються з використанням рівнянь

$$X=SSin(V)Cos(Hz) \quad (2.1)$$

$$Y=SSin(V)sin(Hz) \quad (2.2)$$

$$Z=SCos(V) \quad (2.3)$$

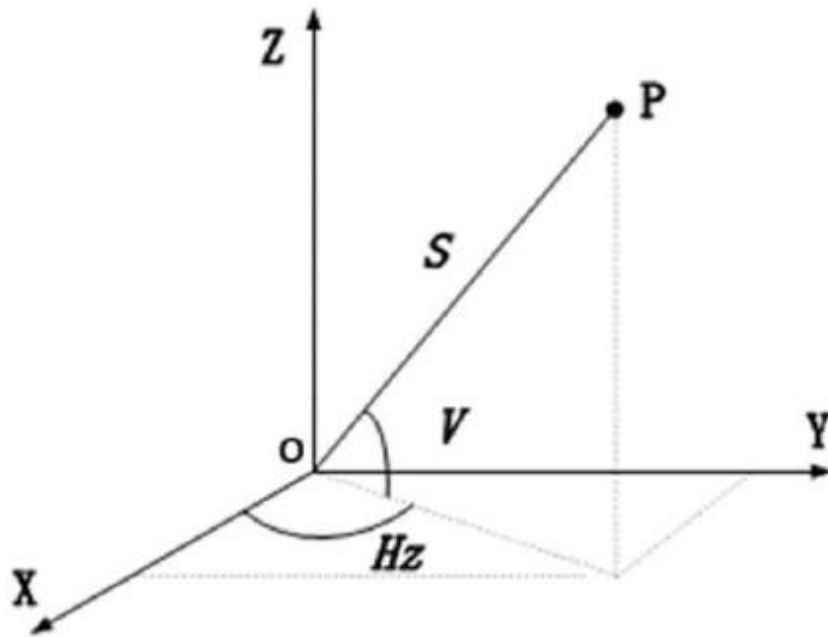


Рисунок 2.8 – Полярна система вимірювань лазерного трекера:
 S відстань до точки, V – вертикальний кут, H_z – горизонтальний кут,
 P – точка в просторі.

Нижче наведено опис моделі переміщення пуансона по криволінійній траєкторії.

Розглянута траєкторія лежить у вертикальній площині, перпендикулярно осі пуансона. У процесі інкрементального формоутворення заготовка обробляється пуансоном, який переміщається по дузі кола заданого радіуса. Дана траєкторія обумовлюється частотою її використання при виготовленні деталей, що отримуються саме круговими рухами пуансона під час виробничого процесу формоутворення [15; 16]. У моделі визначаються значення координат переміщення робота, потім вони переводяться в систему координат робота. Переміщення в у пуансона відбувається у в площині XOZ , при цьому переміщення по осі Y (рис. 2.9) немає. Знаючи три точки на описуваній кола $C1 (x_1, y_1, z_1)$, $C2 (x_2, y_2, z_2)$, $C3 (x_3, y_3, z_3)$ (точка початку кола, проміжна і кінцева, відповідно) можна обчислити координата центру цієї кола $C0 (x_0, y_0, z_0)$,

оскільки ця точка лежить у тій же площині (рис.2.9). Переміщення відбувається в площині XOZ , тому складова $Y = \text{const}$, (вісь Y спрямована вздовж осі виробу)

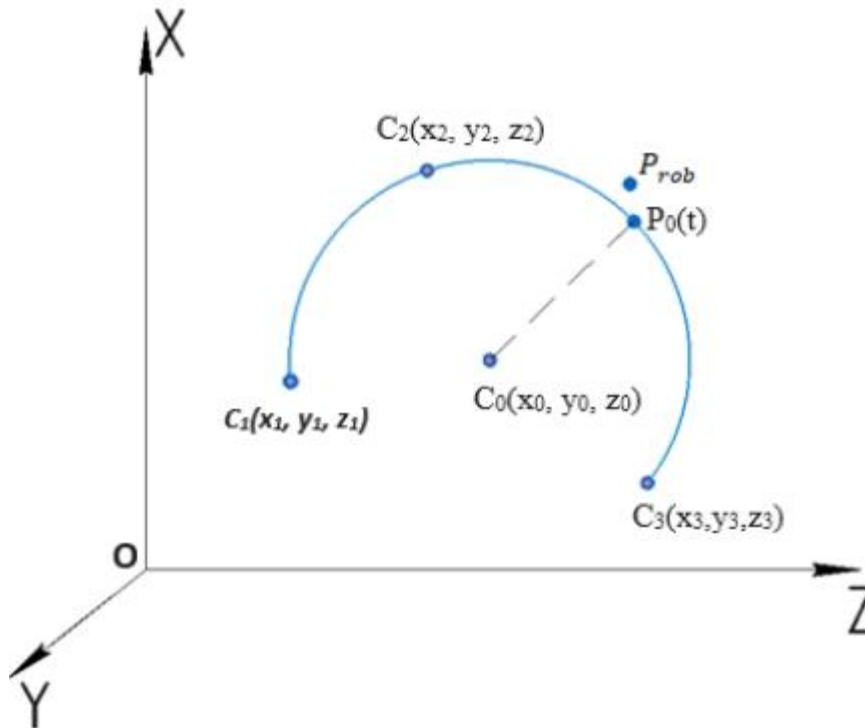


Рисунок 2.9 – Схема переміщення пуансона по колу в процесі інкрементального формоутворення

Параметри кола, що створюється пуансоном, описуються рівняннями:

$$\begin{bmatrix} x_0 - x_1 & z_0 - z_1 \\ x_2 - x_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & z_3 - z_1 \end{bmatrix} = 0, \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} x_1 - x_0^2 + (z_1 - z_0)^2 = R^2, \\ (x_2 - x_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 = R^2, \\ (x_3 - x_0)^2 + (z_3 - z_0)^2 = R^2, \end{cases} \quad (2.5)$$

де R – радіус кола.

З урахуванням (2.5) значення координат центру і радіуса кола можна представити в матричній формі

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

де A_1, B_1, C_1 – параметри, які можна описати як:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = 0 \\ B_1 = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1) \\ C_1 = 0 \\ D_1 = -A_1x_1 - B_1y_1 - C_1z_1 \\ A_2 = 2(x_2 - x_1) \\ B_2 = 0 \\ C_2 = 2(z_2 - z_1) \\ D_2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ A_3 = 2(x_3 - x_1) \\ B_3 = 0 \\ C_3 = 2(z_3 - z_1) \\ D_3 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \end{array} \right. \quad (2.7)$$

У розглянутому випадку $y_0 = y_1 = y_2 = y_3 = y_0$, тому A_1, B_2, B_3, C_1 – це нормальні вектори до площини. Позиція пуансона в кожен момент часу описується як $P(t)$ і може бути розрахована за формулами:

$$A_1(x(t) - x_1) + B_1(y(t) - y_1) + C_1(z(t) - z_1) = 0 \quad (2.8)$$

Проекцію кривої на площину XOZ можна описати як:

$$\begin{bmatrix} x_{rab}(t) \\ y_{rab}(t) \\ z_{rab}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ B_1 & -A_1 & 0 \\ C_1 & 0 & -A_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1x_1 + B_1y_1 \\ B_1x(t) - A_1y_1 \\ C_1x(t) - A_1z(t) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$(x_0(t) - x_0)^2 + (z_0(t) - z_0)^2 = R^2 \quad (2.10)$$

$$\frac{x_0(t) - x_0}{x_p(t) - x_0} = \frac{z_0(t) - z_0}{z_p(t) - z_0} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} x_0(t) = \sqrt{\frac{R}{1 + \left(\frac{z_0(t) - z_0}{x_0(t) - x_0}\right)^2}} \\ z_0(t) = \frac{(x_0(t) - x_0)(z(t) - z_0)}{x(t) - x_0} + z_0 \\ \sqrt{(x_0(t) - x(t))^2 + (z(t) - z_0(t))^2} < R \end{cases} \quad (2.12)$$

Отже, теоретичне положення під час переміщення по дузі навколо в початковий момент часу, а саме $P_0(t)$, може бути описана як: Матриця однорідного перетворення між базовою системою координат робота і системою координат лазерного трекера:

$${}^t_bT = \begin{bmatrix} n_x & o_x a_x & p_x \\ n_y & o_y a_y & p_y \\ n_z & o_z a_z & p_z \\ 0 & 00 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

де n – нормальний вектор; o – вектор напрямку; a – вектор наближення, який представляє відношення обертання між базовою системою координат робота і системою координат лазерного трекера.

Вектор p показує співвідношення між системами координат лазерного трекера і робота:

$${}^t_bT \cdot P_{rob} = P_{tracker} \quad (2.14)$$

де P_{rob} – положення в системі координат робота; $P_{tracker}$ – положення в системі координат лазерного трекера.

Положення в системі координат лазерного трекера можна перетворити в базову систему координат робота за допомогою наступного рівняння:

$$P_{rob} = {}^bT \cdot P_{tracker} \quad (2.15)$$

Отже, помилки в кожен момент шляху в системі координат лазерного трекера можуть бути перетворені в помилки в базовій системі координат робота за допомогою наступного рівняння

$$\Delta P_{rob}(t) = \begin{bmatrix} \Delta x_{rob}(t) \\ \Delta y_{rob}(t) \\ \Delta z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} = {}^bT^{-1} P_{tracker}(t) = {}^bT^{-1} \begin{bmatrix} x_0 - \Delta x_{rob}(t) \\ y_0 - \Delta y_{rob}(t) \\ z_0 - \Delta z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

де $\Delta x_{rob}(t)$, $\Delta y_{rob}(t)$, $\Delta z_{rob}(t)$ – помилки позиціонування по осях у реальному часі.

У процесі роботи алгоритму компенсації може виникнути статична помилка регулювання, також помилка може накопичуватися, що в результаті призведе до неправильної праці алгоритму. Для компенсації цих помилок доцільно використовувати ПД-регулятор (рис. 2.10).

Вихідне значення керуючого впливу ПД-регулятора можна описати рівнянням:

$$u(t) = K_p \times {}^bT^{-1} \begin{bmatrix} x_0(t) - x_{rob}(t) \\ y_0(t) - y_{rob}(t) \\ z_0(t) - z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} + K_i \times {}^bT^{-1} \sum \begin{bmatrix} x_0(t) - x_{rob}(t) \\ y_0(t) - y_{rob}(t) \\ z_0(t) - z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} K_D \times {}^bT^{-1} \begin{bmatrix} x_0(t) - x_0(t-1) - x_{rob}(t) + x_{rob}(t-1) \\ y_0(t) - y_0(t-1) - y_{rob}(t) + y_{rob}(t-1) \\ z_0(t) - z_0(t-1) - z_{rob}(t) + z_{rob}(t-1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad 2.17$$

де $u(t)$ – вихідне значення керуючого впливу ПД-регулятора; K_p – пропорційний коефіцієнт; K_i – інтегральний коефіцієнт, K_D – диференціальний коефіцієнт.

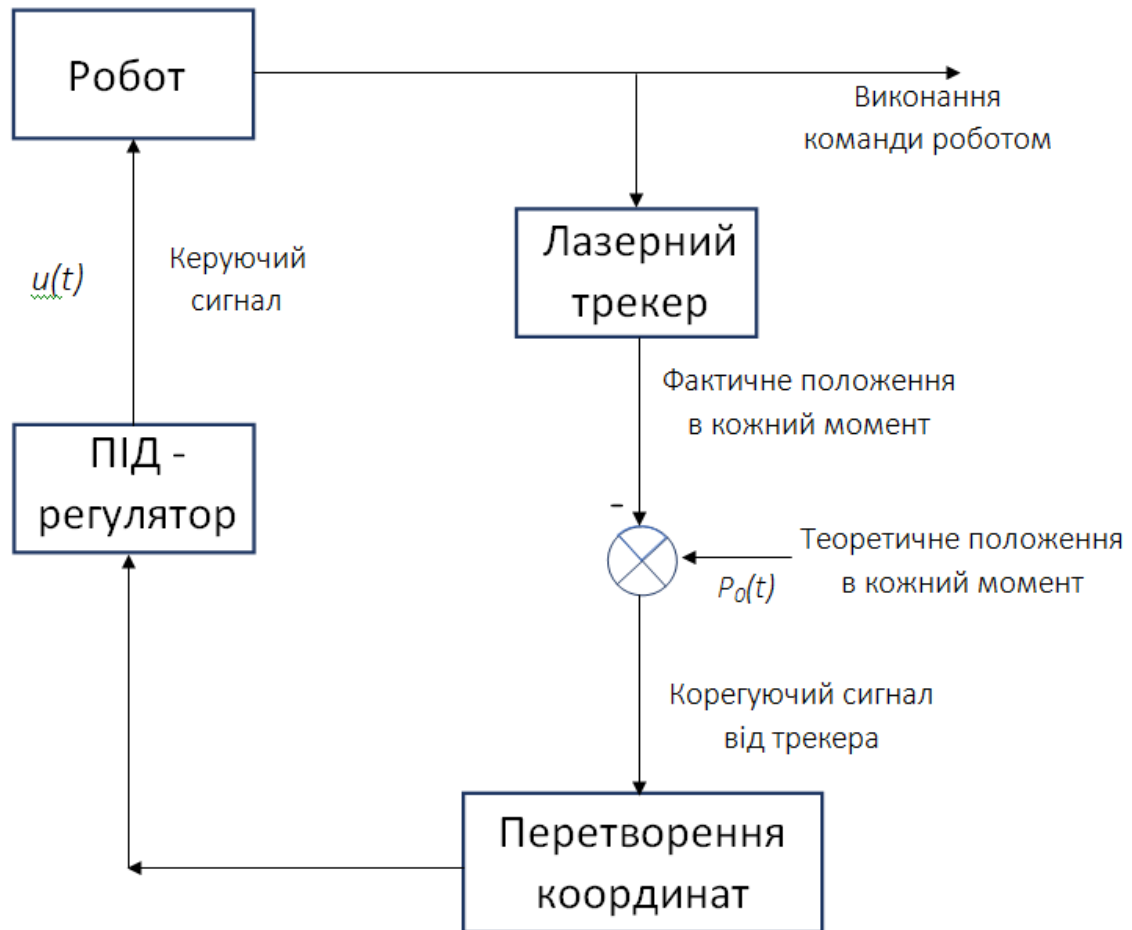


Рисунок 2.10 – Схема автоматизованого комплексу з використанням ПД-регулятора

У ході дослідження процесу інкрементального формоутворення встановлено, що застосування промислових роботів-маніпуляторів у поєднанні з високоточною зовнішньою метрологією, зокрема лазерним трекером, дозволяє суттєво підвищити точність позиціонування інструментального центру. Досліджена математична модель переміщення пуансона та інтеграція алгоритмів компенсації на основі ПД-регулятора забезпечують можливість корекції як систематичних, так і динамічних похибок у реальному часі. Це створює

передумови для досягнення високої відповідності фактичної геометрії виробу його CAD/CAM-моделі та розширює технологічні можливості інкрементального формоутворення у сучасних автоматизованих виробничих комплексах.

Таким чином, сформована методологічна база доводить, що для досягнення цільової точності в умовах високошвидкісного ІФ необхідне подальше дослідження динамічних властивостей системи та розробка адаптивного алгоритму компенсації, який долає структурні обмеження статичного ПІД-регулятора. Це потребує дослідження шляхом моделювання динамічної поведінки системи та аналізу впливу параметрів регулятора — пропорційного коефіцієнта K_p , інтегрального коефіцієнта K_i та диференціального коефіцієнта K_d , а також дослідженню їхнього впливу на швидкість реакції, величину перерегулювання та стабільність системи.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПЕРЕМІЩЕНЬ РОБОТА У ПРОЦЕСІ ІНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ

3.1 Концепція двоетапної компенсації при забезпеченні точності переміщень роботів-маніпуляторів

У сучасних умовах в області обробки металів тиском зростають вимоги до гнучкості виробництва і можливості швидко реагувати на вимоги замовника. Великі можливості відкривають сучасні інформаційні технології, що реалізуються за допомогою автоматизованих технологічних комплексів. Одним з найбільш перспективних напрямків є інкрементальне формоутворення з використанням промислових роботів-маніпуляторів. Такий підхід дозволяє відмовитися від традиційного штампового оснащення і оперативно пере налаштовувати виробництво при освоєнні нових виробів. Номенклатура виробів може бути досить широкою, завдяки обробці за допомогою роботів-маніпуляторів, які забезпечують переміщення інструменту в широкому діапазоні розмірів по траєкторіях різної складності [1; 2]. Разом з тим для успішного впровадження технології інкрементального формоутворення необхідно забезпечити необхідну точність виконання розмірів виробів. виконання розмірів виробів. Сучасні роботи-маніпулятори характеризуються високою повторюваністю переміщень, проте точність переміщень не завжди є достатньою. Вирішити цю проблему дозволяє включення до складу автоматизованого комплексу лазерного трекера. Для підвищення точності переміщень робота-маніпулятора може проводитися його калібрування перед початком виконання роботи, а також застосовується компенсація переміщень робота в процесі виконання технологічної операції [3 – 5].

Вимоги до точності виготовлення та умови контролю стають специфічними в умовах цифрової економіки [6]. Проведення контролю точності переміщень промислового робота - маніпулятора з використанням сучасних вимірювальних засобів дозволяє знизити витрати на кінцевий продукт, підвищити цілісність і

ефективність процесу, оптимізувати метрологічні процеси, зменшити надмірність інструментів і підвищити якість продукції та відповідність специфікації, проводити контроль з урахуванням специфіки технологічного процесу і впливу навколишнього середовища [7 – 9].

Лазерний трекер являє собою тріангуляційну вимірювальну систему стеження, що працює в реальному масштабі часу [1; 10]. Для забезпечення необхідної точності вимірювання необхідно вибрати схему вимірювань, що відповідає умовам даного технологічного процесу, і визначити вплив параметрів вимірювальної системи на результати оцінки переміщень робота.

В контексті інтенсивного розвитку обробки металів тиском, сучасне виробництво імперативно вимагає якнайбільшої гнучкості технологічних процесів та здатності до швидкої адаптації. У цьому аспекті інкрементальне формоутворення (ІФ) [1; 2], реалізоване на базі промислових роботів-маніпуляторів (ПР), набуває стратегічного значення, дозволяючи відмовитися від капіталомісткого штампового оснащення та оперативно переналаштовувати виробничі цикли.

Незважаючи на високу повторюваність (тобто низьке розсіювання), характерну для сучасних ПР, їхня абсолютна точність позиціонування часто залишається незадовільною. Для технології ІФ, де кожен прохід інструмента накопичує похибку, необхідна точність має сягати десятих та сотих часток міліметра. Це критично високі вимоги, які не можуть бути забезпечені стандартною внутрішньою системою керування. Розрив між бажаною та фактичною точністю зумовлений систематичними похибками, прихованими від внутрішніх енкодерів робота.

Подолання цього обмеження вимагає застосування комплексного підходу, що включає інтеграцію високоточної зовнішньої метрології, зокрема лазерного трекера, який функціонує як тріангуляційна вимірювальна система стеження в реальному масштабі часу [1; 10]. Це дозволяє перейти до двоетапної архітектури компенсації, що охоплює офлайнове коригування систематичних похибок та онлайнове нівелювання динамічних відхилень [3–5].

Кінематичне калібрування є первинним і найбільш значущим етапом, спрямованим на усунення систематичних та детермінованих похибок, які складають основну частку загальної абсолютної похибки ПР.

Головною метою є уточнення кінематичної моделі робота. Офлайнова компенсація орієнтована на ідентифікацію та усунення:

- Геометричних похибок: Всі відхилення фактичних розмірів ланок, кутів між осями та нульових положень від номінальних значень, закладених у заводській моделі.
- Квazістатичних похибок: Термічний дрейф, спричинений внутрішнім нагрівом, та пружна деформація конструкції під постійною вагою інструменту та кінцевого ефектора.

Офлайнова компенсація відбувається наступним чином: використовуючи лазерний трекер, фіксується фактичне положення ТСП у великій кількості контрольних точок робочого об'єму. Ця інформація дозволяє кількісно визначити розбіжності між виміряними координатами та координатами, обчисленими контролером. На основі зібраних даних будується уточнена кінематична модель. Ця модель містить точні поправки до кожного параметру, які описують геометричні та квазістатичні похибки. Уточнені параметри вносяться безпосередньо у програмне забезпечення контролера. Наступна передкалькуляція керуючого сигналу здійснюється таким чином, що для досягнення цільової точки робота свідомо прямує до скоригованої точки, компенсуючи очікуване систематичне зміщення. Успішне калібрування знижує абсолютну похибку з міліметрів до рівня, близького до повторюваності робота, що створює необхідний фундамент точності для подальших технологічних операцій [29-31].

Онлайнова компенсація є високочастотним механізмом, що динамічно виправляє несистематичні відхилення, які виникають у процесі руху і не можуть бути усунені офлайновим калібруванням.

Головною метою є забезпечення точності відстеження. Адаптивне керування спрямоване на нівелювання:

- Відставання через інерцію, а також вібрації та резонансні явища, що виникають при високих прискореннях.
- Нелінійні ефекти тертя, люфти та затримки в контурі керування, що призводять до неідеального збігу фактичної та заданої траєкторії.

Онлайнове адаптивне керування здійснюється наступним чином: У внутрішньому контурі керування здійснюється високочастотне порівняння заданого положення (від скоригованої кінематичної моделі) із фактичним положенням, зафіксованим внутрішніми енкодерами, що дає поточну похибку відстеження. Для динамічного виправлення цієї похибки використовується Пропорційно-Інтегрально-Диференціальний (ПІД) регулятор. Цей регулятор працює з максимально можливою частотою і генерує коригуючий момент, який подається безпосередньо на приводи, змінюючи їхній номінальний керуючий сигнал. Корегуючий момент виконує функцію активного демпфування та компенсації: він швидко реагує на миттєву похибку, забезпечує стабілізацію системи проти вібрацій та усуває будь-яку залишкову статичну похибку.

Онлайнова корекція дозволяє утримувати ТСП на заданій траєкторії в реальному часі, що є критично важливим для забезпечення якості обробки при ІФ на робочих швидкостях.

Таким чином, лише синергетичне поєднання офлайнового калібрування для усунення систематичних похибок та онлайнового адаптивного керування для нівелювання динамічних відхилень дозволяє трансформувати стандартний промисловий робот у прецизійний технологічний комплекс, необхідний для успішного впровадження технології інкрементального формоутворення.

3.2 Аналіз пропорційної дії у забезпеченні швидкодії та точності позиціонування

Керуюча дія пропорційна сигналу похибки $e(t)$. Внутрішньо пропорційна дія множить сигнал похибки на константу K_p , яка визначає величину пропорційної дії, яку матиме контролер, рівняння 2.17.

Ця керуюча дія намагається мінімізувати системну помилку. Коли помилка велика, керуюча дія також велика і прагне мінімізувати цю помилку.

Збільшення пропорційної дії K_p має такі наслідки:

1. Збільшує швидкість реакції системи.
2. Зменшує системну похибку в постійному режимі.
3. Збільшує нестабільність системи.

Перші два ефекти є позитивними та бажаними. Останній ефект є негативним, і вам потрібно спробувати його зменшити. Збільшуючи пропорційну дію, досягається точка балансу, де досягається достатня швидкість реагування системи та зменшення помилок, без того, щоб система була надто нестабільною. Збільшення пропорційної дії після цієї точки призведе до небажаної нестабільності. Зменшення пропорційної дії зменшить швидкість реагування системи та збільшить її постійну помилку. На графіках 3.1. можна побачити ефект поступового збільшення пропорційної дії в регулюванні положення.

- При малій пропорційній дії $K_p=2$ система працює повільно, їй потрібно 20 секунд, щоб досягти потрібного положення, а похибка положення велика, 50 міліметрів. Зі збільшенням пропорційної дії похибка зменшується, а швидкість реакції зростає.

- З пропорційним коефіцієнтом підсилення $K_p=20$ система працює швидше, встановлюючи постійне положення за 12 секунд. Аналогічно, похибка зменшена до десятої частини, лише до 5 міліметрів. Також можна побачити перевищення у відгуку та початок певної нестабільності.

- З більшими коефіцієнтами підсилення постійну похибку можна ще більше зменшити, але швидкість відгуку не збільшується, оскільки система стає настільки нестабільною, що позиція потребує багато часу, щоб встановити свій кінцевий стан.

У цьому прикладі пропорційна дія була масштабована таким чином, що її значення знаходяться в діапазоні від 0 до 100.

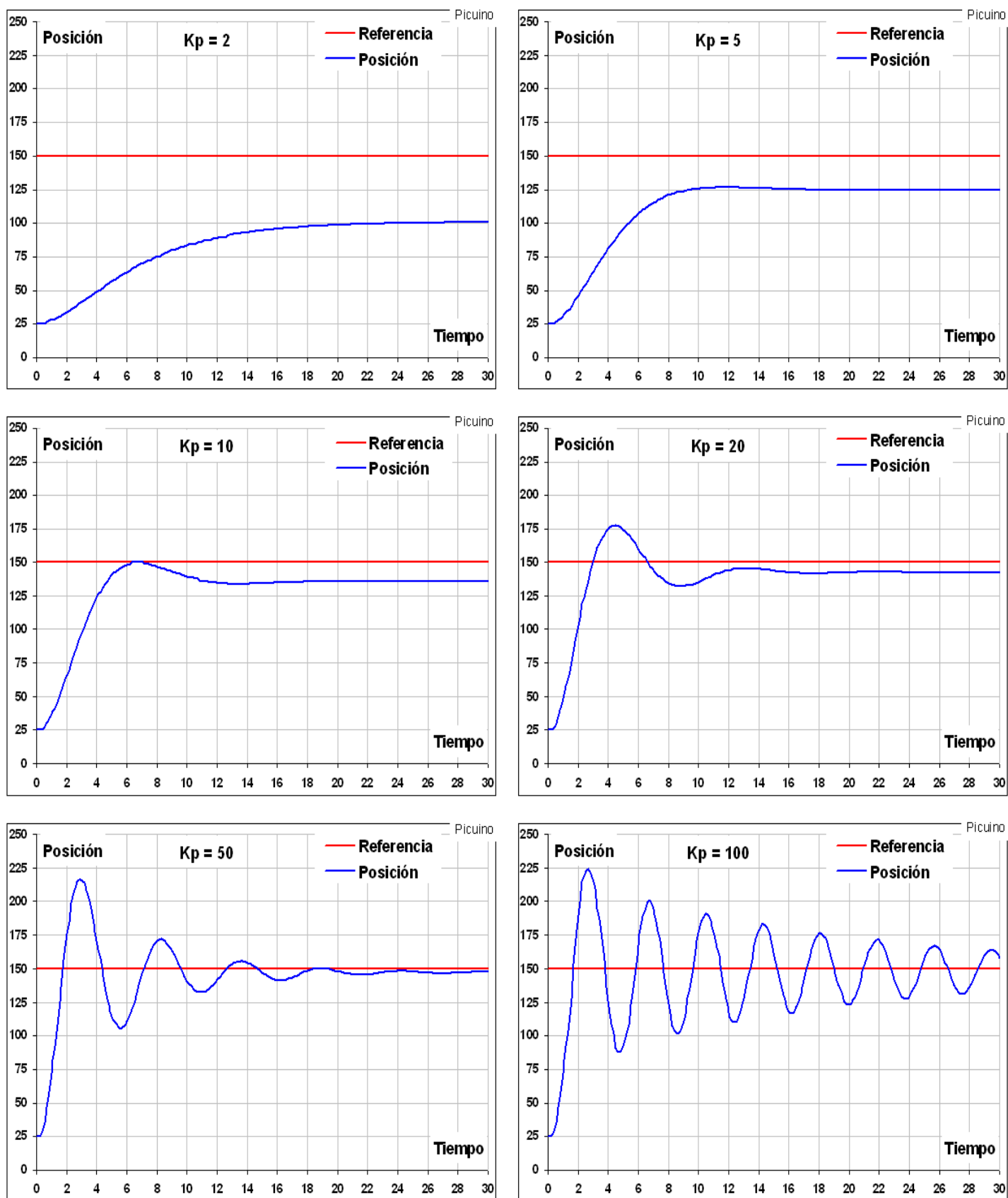


Рисунок 3.1 – Порівняння реакцій системи на одиничний стрибок при змінному K_p

На цьому етапі (рис 3.1) видно, що пропорційна дія не може додатково покращити реакцію системи. Найкращий варіант з $K_p=20$ забезпечує перевищення імпульсу близько 30 міліметрів та постійну похибку 5 міліметрів. Якщо ви хочете покращити цю реакцію, необхідно включити інший тип керування. Саме тут похідне керування може допомогти покращити реакцію системи.

Таблиця 3.1 – Порівняння реакції системи при змінному K_p : швидкодія, похибка, стабільність

Крива (K_p value)	Швидкість реакції (час встановлення)	Стала похибка (mm)	Стабільність	Візуальний ефект
Низька K_p ($K_p=2$)	Повільна (20 с)	Велика (50 мм)	Висока	Плавна крива, що повільно підіймається, не доходячи до цільового значення.
Середня K_p ($K_p=20$)	Швидша (12 с)	Мала (5 мм)	Середня	Крива швидше підіймається, але з'являється перевищення імпульсу близько 30 мм і невеликі коливання.
Висока K_p ($K_p=50$)	Не збільшується	Дуже мала	Низька	Система стає нестабільною, сильні коливання навколо цільової точки, що збільшує час встановлення.

3.3 Аналіз ролі похідної дії у стабілізації та демпфуванні системи

Керуюча дія пропорційна похідній сигналу похибки $e(t)$, помножений на константу K_d , рівняння 2.17. Похідна похибки – це ще один спосіб назвати «швидкість» похибки. Нижче буде видно, чому так важливо розрахувати цю швидкість. На наведених вище графіках, коли положення нижче 150 мм, пропорційна керуюча дія завжди намагається збільшити положення. Проблема виникає при врахуванні інерції. Коли система рухається з високою швидкістю до опорної точки, вона пройде повз неї через свою інерцію. Це призводить до перерегулювання та коливань навколо опорної точки. Щоб уникнути цієї проблеми, контролер повинен розпізнавати швидкість, з якою система наближається до опорної точки, щоб він міг заздалегідь уповільнити її, коли вона наближається до бажаного опорного значення, та запобігти його перевищенню.

Збільшення константи похідного керування K_d має такі наслідки:

1. Підвищує стабільність керованої системи.
2. Це трохи уповільнює роботу системи.
3. Похибка стаціонарного стану залишиться незмінною.

Таким чином, ця керуюча дія слугуватиме для стабілізації реакції, яка занадто сильно коливається.

На графіках (рис.3.2.) видно, як, збільшуючи похідну K_d , можна зменшити коливання до такої міри, що вони зникають при $K_d=50$. Також видно, як реакція трохи сповільнюється зі збільшенням константи похідної. При $K_d=0$ системі потрібно 1,8 секунди, щоб досягти опорного значення. При $K_d=20$ системі потрібно 2 секунди, щоб досягти опорного значення. У цьому прикладі похідна була масштабована таким чином, що її значення знаходяться в діапазоні від 0 до 100.

Одна з проблем керування похідною полягає в тому, що воно підсилює швидкозмінні сигнали, такі як високочастотний шум. Через цей ефект шум сигналу помилки здається посиленням у приводі установки. Щоб зменшити цей ефект, необхідно зменшити шум сигналу помилки за допомогою фільтра низьких

частот, перш ніж застосовувати його до члена похідної. За допомогою цього фільтра дія похідної обмежена, тому бажано зменшити шум сигналу помилки іншими засобами, перш ніж вдаватися до фільтра низьких частот.

На цьому етапі система працює швидко та стабільно, але все ще має невелику похибку усталеного стану. Це означає, що фактичне положення системи не зовсім відповідає бажаному положенню. Щоб зменшити цю похибку, використовується третя дія ПД-регулятора – інтегральне керування.

Таблиця 3.2. Порівняльна характеристика дій ПД-регулятора у системі позиційного керування

Характеристика	K_p (пропорційна дія)	K_i (інтегральна дія)	K_d (похідна дія)
Швидкість реакції (час наростання)	↑ Збільшується	↓ Зменшується (уповільнює)	↓ Зменшується (трохи уповільнює)
Стала Похибка (в сталому режимі)	↓ Зменшується, але не усувається повністю.	↓ Усувається (досягає нуля).	Не змінюється (залишається незмінною).
Перерегулювання (Overshoot)	↑ Збільшується.	↑ Збільшується.	↓ Зменшується (демпфування).
Стабільність системи / Коливання	↓ Зменшується (зростає нестабільність).	↓ Зменшується (зростає нестабільність/Wind-Up).	↑ Підвищується (стабілізація).
Вплив на Шум	Не значний.	Не значний.	↑ Посилюється (реагує на швидкі зміни).

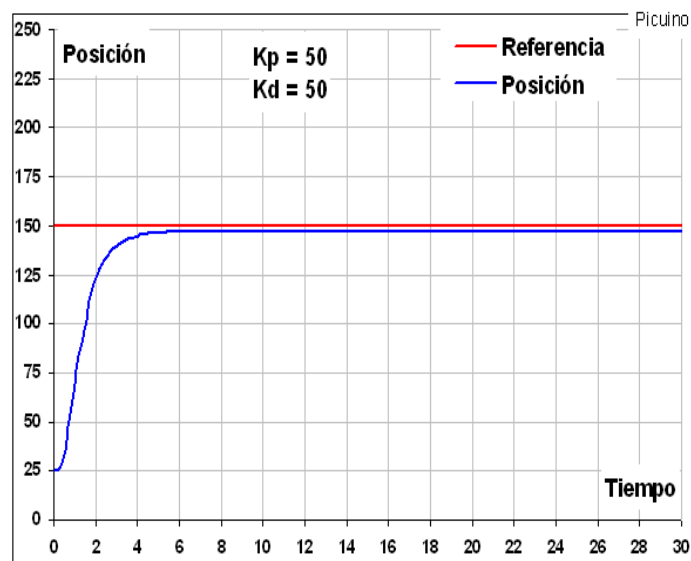
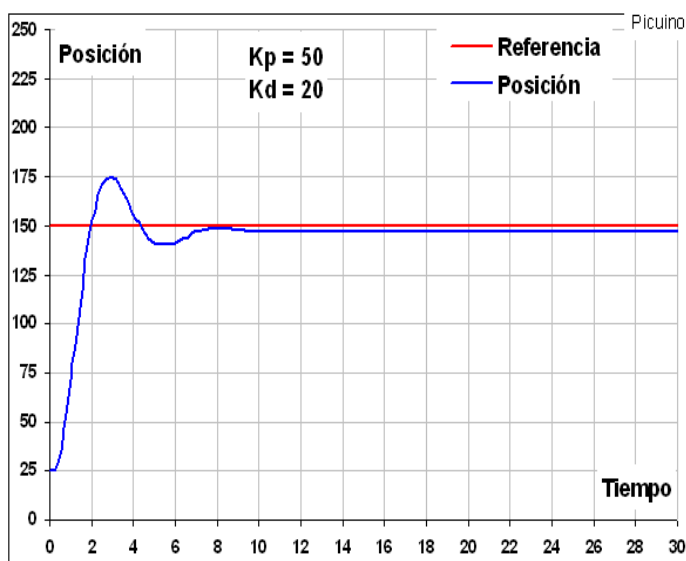
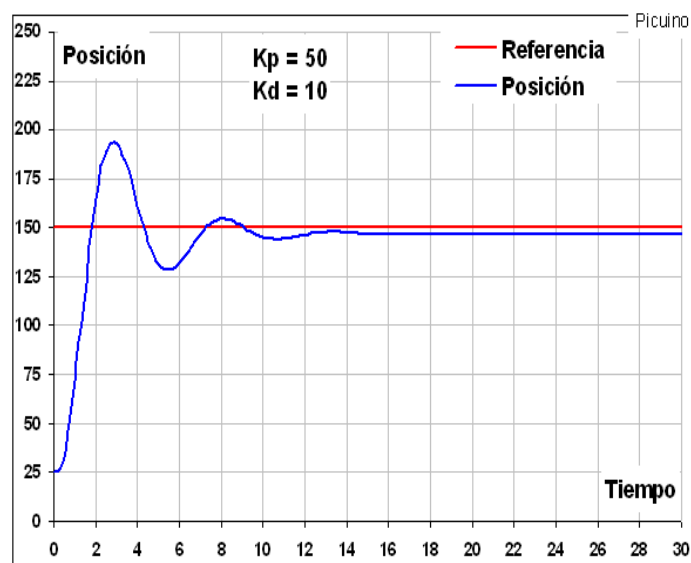
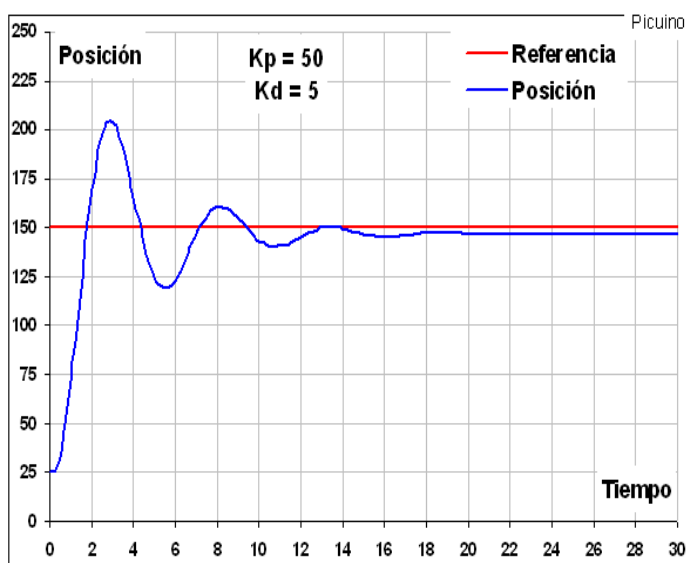
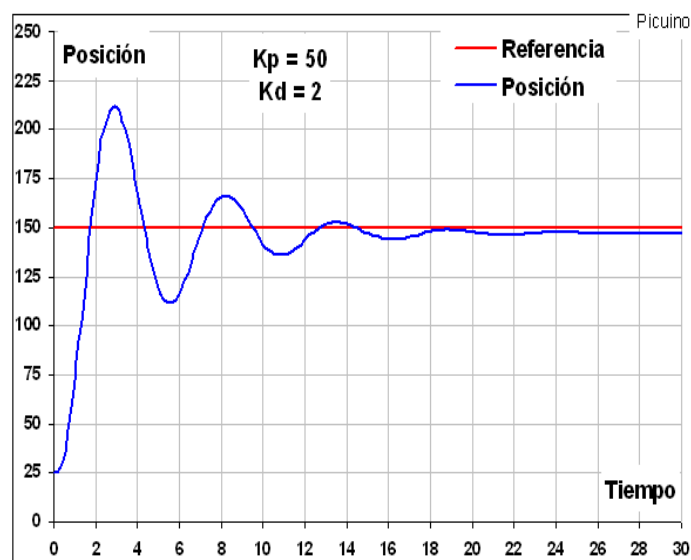
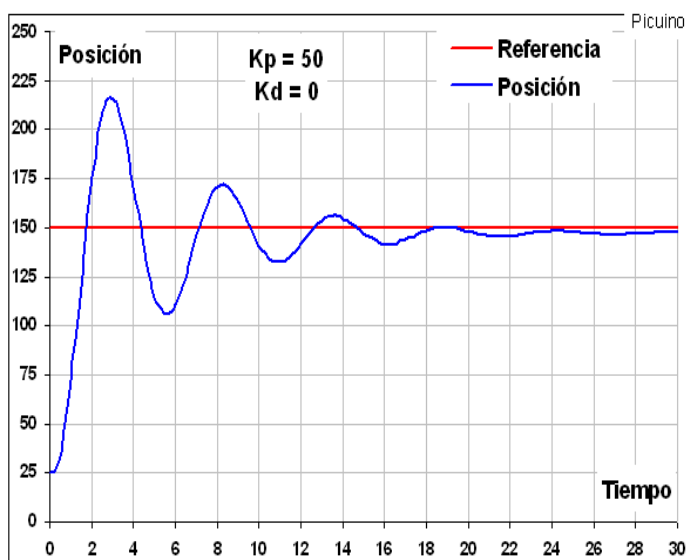


Рисунок 3.2 – Порівняння динамічних характеристик системи при змінному коефіцієнті K_d

3.4 Аналіз інтегральної дії у зменшенні залишкової похибки та впливі на стійкість

Керуюча дія, як випливає з назви, обчислює інтеграл сигналу похибки $e(t)$ та множить його на константу K_i . Інтеграл можна розглядати як суму або накопичення сигналу похибки, рівняння 2.17. З плином часу невеликі похибки додаються, що робить інтегральну дію все більшою та більшою. Завдяки цьому можна зменшити похибку системи в постійному режимі. Недоліком використання інтегральної дії є те, що вона додає певної інерції до системи і, отже, робить її більш нестабільною.

Збільшення інтегральної дії K_i має такі наслідки:

1. Зменшує системну похибку в постійному режимі.
2. Збільшує нестабільність системи.
3. Це трохи збільшує швидкість роботи системи.

Ця керуюча дія слугуватиме для зменшення похибки в сталому режимі.

До наведених нище графіків (рис.3.3) додано збільшений сигнал похибки, пофарбований у зелений колір, щоб краще зрозуміти, як похибка зменшується зі збільшенням інтегральної дії. Іншим видимим ефектом є збільшення нестабільності системи зі збільшенням K_i . З цієї причини інтегральне керування часто поєднується з похідним керуванням, щоб уникнути коливань системи.

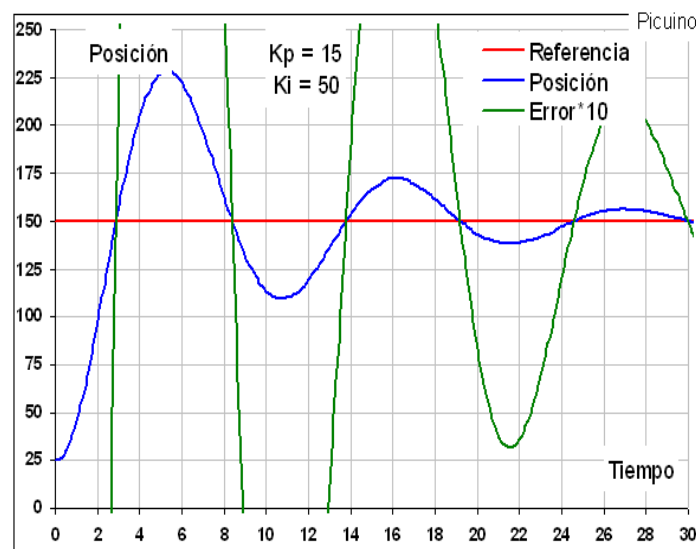
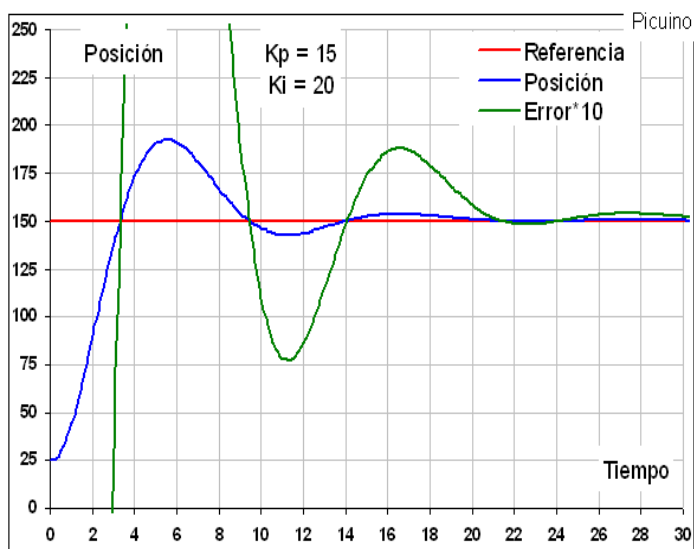
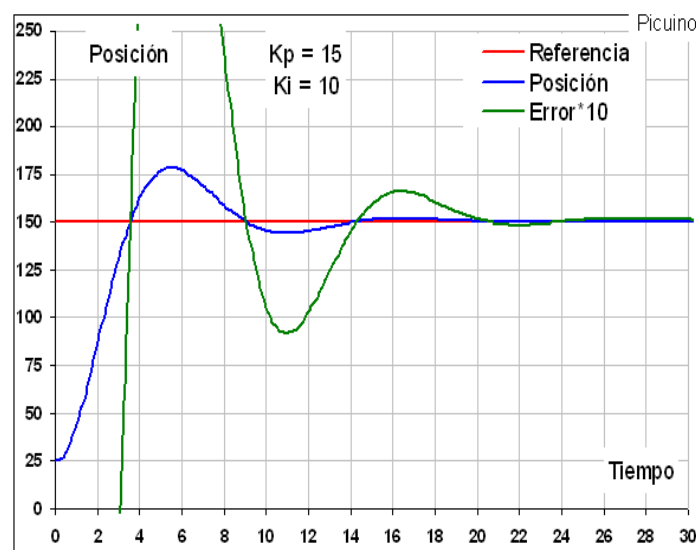
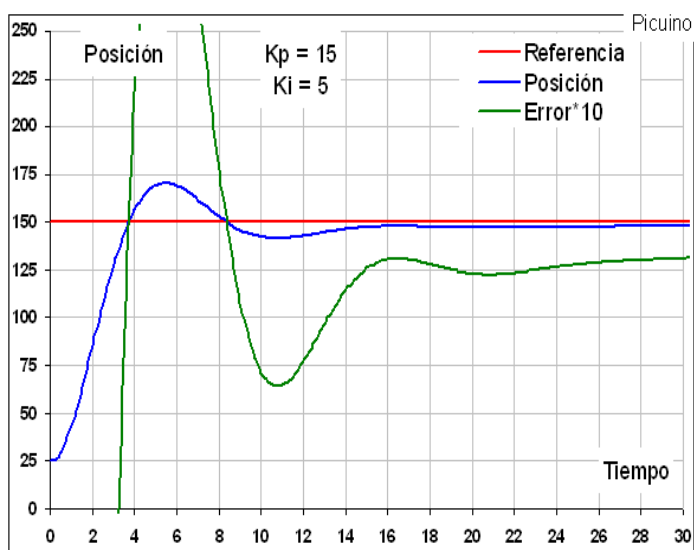
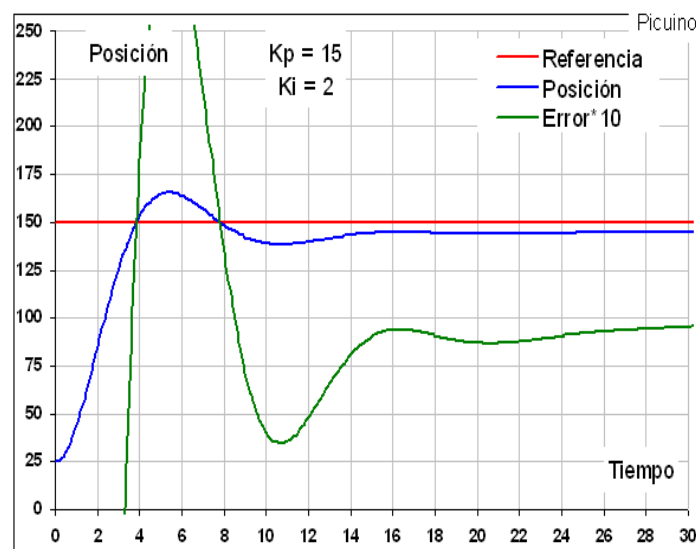
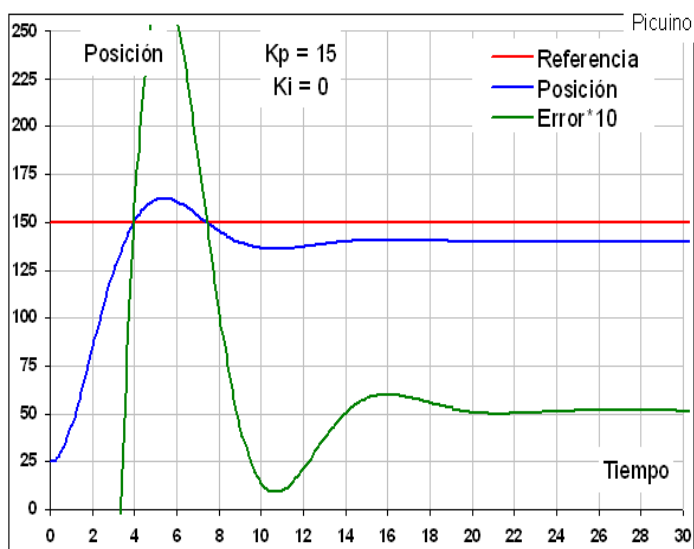


Рисунок 3.4 – Порівняння реакцій системи при змінних K_p і K_i

Таблиця 3.3 – Порівняльний аналіз ефектів пропорційної, інтегральної та похідної дій

Характеристика	K_p (пропорційна дія)	K_i (інтегральна дія)	K_d (похідна дія)
Час наростання (Швидкість реакції)	↓ Зменшується (прискорює)	↓ Зменшується (трохи уповільнює)	↓ Зменшується (майже не впливає / незначно уповільнює)
Стала Похибка (в сталому режимі)	↓ Зменшується, але не усувається повністю	↓ Усувається (зводиться до нуля)	Не змінюється (залишається незмінною)
Перерегулювання (Overshoot)	↑ Збільшується	↑ Збільшується	↓ Зменшується (забезпечує демпфування)
Час встановлення (Settling Time)	Незначно ↓ або ↑ (залежно від коливань)	↑ Збільшується (через коливання)	↓ Зменшується (за рахунок демпфування)
Стабільність системи	↓ Зменшується (зростає нестабільність)	↓ Зменшується (ризик інтегрального насичення)	↑ Підвищується (стабілізація, гасіння коливань)
Чутливість до шуму	Середня	Низька	↑ Збільшується (реагує на швидкі зміни, що можуть бути шумом)

Після ознайомлення з різними пропорційними, інтегральними та похідними діями ПД-регулятора, можна застосувати деякі прості правила для ручного налаштування цього контролера.

1-й – Пропорційна дія. Пропорційна дія поступово збільшується для зменшення похибки (різниці між бажаним і досягнутим станом) та збільшення швидкості реагування. Якщо досягнуто бажаної швидкості та реакції на похибку, ПІД-регулятор вже налаштовано. Якщо система стає нестабільною до досягнення бажаної реакції, похідну слід збільшити.

2-й – Похідна дія. Якщо система занадто нестабільна, константа похідної K_d буде поступово збільшуватися, щоб знову досягти стійкості відгуку.

3-й – Комплексні дії. У випадку, якщо системна похибка більша за бажану, інтегральна константа K_i буде збільшуватися доти, доки похибка не буде мінімізована з бажаною швидкістю. Якщо система стає нестабільною до досягнення бажаної реакції, похідну слід збільшити.

За допомогою цих простих правил легко поступово налаштовувати ПІД-регулятор, доки не буде досягнуто бажаної реакції.

У сучасних умовах розвитку технологій інкрементального формоутворення (ІФ) точність позиціонування промислових роботів-маніпуляторів є критично важливим фактором. Вибір алгоритму компенсації похибок визначає не лише якість кінцевого виробу, але й ефективність усього виробничого процесу. Традиційно для стабілізації руху та зменшення похибок застосовується ПІД регулятор. Його перевага полягає у простоті реалізації та здатності забезпечувати базову стабільність системи. Пропорційна складова (K_p) дозволяє швидко реагувати на похибку, інтегральна (K_i) усуває залишкову статичну похибку, а диференціальна (K_d) зменшує коливання та перерегулювання. Проведений аналіз впливу параметрів ПІД-регулятора на динамічні характеристики системи показав, що класичний підхід є ефективним для базових сценаріїв, проте у випадках високошвидкісних процесів інкрементального формоутворення його можливості виявляються обмеженими. Статичне налаштування коефіцієнтів K_p , K_i , K_d не завжди дозволяє забезпечити необхідну адаптацію до змінних умов роботи, таких як варіації навантаження, температурні впливи чи складні траєкторії руху.

У цьому контексті перспективним напрямком є дослідження та впровадження альтернативних алгоритмів компенсації похибок, здатних забезпечити більш високу гнучкість та адаптивність:

- Модельно - орієнтоване керування, що базується на прогнозуванні майбутнього стану системи та оптимізації керуючих сигналів з урахуванням обмежень і нелінійних ефектів.
- Нейромережеве адаптивне керування, яке дозволяє системі навчатися на основі попередніх траєкторій і похибок, забезпечуючи самонавчання та адаптацію без ручного налаштування параметрів.
- Керування на основі нечіткої логіки, що дає можливість компенсувати невизначеності та нелінійності завдяки використанню лінгвістичних правил, які імітують експертні рішення.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку гібридних систем керування, які поєднують переваги класичного ПД - регулятора з інтелектуальними методами. Зокрема, інтеграція ПД - регулятора з МРС або використання нечіткої логіки у складі адаптивного алгоритму може забезпечити баланс між швидкістю реакції, точністю та стабільністю системи.

Таким чином, перспективи розвитку полягають у створенні адаптивних алгоритмів компенсації, здатних долати структурні обмеження статичного ПД - регулятора та забезпечувати високу точність позиціонування у складних і високошвидкісних процесах інкрементального формоутворення.

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ НА ОПЕРАЦІЯХ ІНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ

4.1 Загальні вихідні дані

Для визначення показників економічної ефективності застосування промислових роботів-маніпуляторів у процесі інкрементального формування, в якості бази для порівняння приймемо кривошипний прес моделі JE23-63, який є представником лінійки сучасних прогресивних, високопродуктивних і надійних вітчизняних пресів, широко використовуваних на формуютьючих операціях. Проте, не зважаючи на свою універсальність, це обладнання здатне забезпечити високу ефективність лише при масовому та великосерійному виробництві продукції. В умовах одиничного типу виробництва кривошипний прес втрачає гнучкість, оскільки в якості робочого органу на ньому використовується спеціальне оснащення – штамп (прес-форма), який складається з матриці і пуансону, виготовлених відповідно до конфігурації конкретної деталі.

Проектування і виготовлення такого штампу займає близько одного місяця, а встановлення на пресі разом з контрольним штампуванням 3-4-х деталей становить приблизно 0,5 год.

Застосування процесу інкрементального формування на базі промислового робота-маніпулятора дозволить відмовитися від капіталомісткого і дорогого штампового оснащення й оперативно переналаштовувати виробничі цикли, забезпечуючи належну точність і чистоту обробки в умовах різноманітності та складності виробничих завдань.

Розрахунки проведемо на основі умовно прийнятих показників номенклатури, обсягу виробництва продукції та штучного часу виконання операції.

Загальні техніко-економічні показники базових та проектного варіантів зведено до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Загальні вихідні техніко-економічні показники

№	Показник	Одиниця	Варіанти	
			Базовий	Проект
1.	Умовна річна програма випуску продукції кожного найменування	шт./рік	1000	1000
2.	Умовна номенклатура продукції	позиції	4	4
3.	Потреба в обладнанні: - кривошипний прес JE23-63 - робот-маніпулятор	шт./рік	1	1
4.	Штучний час виконання операцій	хв.	0,02	30
5.	Потужність електродвигунів	кВт	4,0	0,75
6.	Площа в плані, яку займає обладнання	м ²	1,84	0,04
7.	Маса обладнання	т	2,8	0,015
8.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частини обладнання	УРО	18/15	8/20
9.	Оптова ціна: - кривошипного преса JE23-63 - штампа - робота-маніпулятора	грн грн грн	596750 200000	165000

4.2 Розрахунок технологічної собівартості виготовлення деталі

Для того, щоб визначити доцільність застосування інкрементального формування на базі робота-маніпулятора, необхідно зробити його економічний аналіз. Цей аналіз здійснюється шляхом визначення та порівняння технологічної собівартості виготовлення деталі по кожному з альтернативних варіантів (базовому і проектному):

$$C_{tex} = V \cdot N_z + P, \quad (4.1)$$

де V – змінні витрати у технологічній собівартості, величина яких змінюється пропорційно зміні обсягу випуску продукції, грн./рік.

P – постійні витрати, величина яких не змінюється або змінюється неістотно в залежності від зміни річного випуску продукції грн./рік.

4.2.1 Розрахунок змінних витрат

За поелементним методом розрахунку змінні витрати визначаються за формулою:

$$V = M_o + Z_{одв} + E_c + B_p + B_{мд} + B_{ін.ун} + B_{пр.ун} + B_{ам.у} + B_{ен}, \quad (4.2)$$

де M_o – вартість основних матеріалів (не змінюються у порівнюваних варіантах техпроцесу, тому не розраховуються), грн.;

$Z_{одв}$ – заробітна плата виробничих робітників основна, додаткова з урахуванням єдиного соціального внеску, грн.;

E_c – витрати на електроенергію силову, грн.;

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

$B_{мд}$ – витрати на матеріали допоміжні, грн.;

$B_{ам.у}$ – витрати на амортизацію універсального обладнання, грн.;

$V_{\text{еп}}$ – витрати на експлуатацію приміщень, грн.

Витрати на заробітну плату робітника основну, додаткову з урахуванням єдиного соціального внеску:

$$Z_{\text{одв}} = C_{z(i)} \frac{t_{\text{ум}(i)}}{60} (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (4.3)$$

де $C_{\Gamma(i)}$ – годинна тарифна ставка відповідного розряду i -тої операції техпроцесу, грн./год.;

$t_{\text{шт}(i)}$ - штучний час i -тої операції, хв.;

K_d, K_c – коефіцієнти, які враховують відповідно додаткову заробітну плату та відрахування на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок).

В базовому варіанті:

$$Z_{\text{одв.баз}} = \frac{92,015 \cdot 0,02}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 0,0412 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті робітник витрачає час (2 хв.) лише на початку запуску кожної чергової партії деталей, тому його заробітну плату слід включити до складу постійних витрат.

Витрати на електроенергію силову:

$$E_c = \frac{N_e \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d \cdot K_W}{\eta_m} \cdot \frac{t_{\text{ум}}}{60} \cdot C_{\text{ел}}, \quad (4.4)$$

де N_B – встановлена потужність електродвигунів обладнання, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи двигунів, $K_o = 0,6 \dots 1,3$;

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для ДС та О $K_N = 0,5$);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за часом (для ДС та О $K_d = 0,6$);

K_W – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі (для ДС та О $K_W = 1,08$);

η_m – ККД електродвигунів, $\eta_m = 0,86 \dots 0,9$;

$\Pi_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт-год електроенергії без ПДВ, грн.

$$E_{\text{с.баз}} = \frac{4,0 \cdot 1,1 \cdot 0,5 \cdot 0,6 \cdot 1,08}{0,88} \cdot \frac{0,02}{60} \cdot 18,10 = 0,0098 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{с.пр}} = \frac{0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,4 \cdot 0,5 \cdot 1,08}{0,95} \cdot \frac{30}{60} \cdot 18,10 = 0,9260 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_p = \frac{W_m \cdot R_m + W_e \cdot R_e}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{t_{\text{ум}}}{60}, \quad (4.5)$$

де W_m , W_e – витрати на всі види ремонту та обслуговування за ремонтний цикл, які припадають на одиницю ремонтної складності, відповідно механічної та електричної частини обладнання, грн.;

R_m , R_e – категорія ремонтної складності відповідно механічної та електричної частин обладнання, УРО;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання (при двозмінному режимі роботи приймемо 3950 год.)

$$B_{p.\text{баз}} = \frac{(980 \cdot 18 + 750 \cdot 15) \cdot 0,02}{3950 \cdot 60} = 0,0024 \text{ грн.}$$

$$B_{p.\text{пр}} = \frac{(980 \cdot 8 + 750 \cdot 20) \cdot 30}{3950 \cdot 60} = 2,8911 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мд}} = \frac{M_{\text{сб}} \cdot R_m \cdot t_{\text{ум}}}{100 \cdot 60} \cdot K_6, \quad (4.6)$$

де $M_{ГВ}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали, коп.;

K_B – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для ДС та О $K_B = 0,85$).

$$B_{мд.баз} = \frac{78,5 \cdot 18 \cdot 0,02}{100 \cdot 60} \cdot 0,85 = 0,0040 \text{ грн.}$$

$$B_{мд.пр} = \frac{78,5 \cdot 8 \cdot 30,0}{100 \cdot 60} \cdot 0,85 = 2,6690 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію універсального обладнання:

$$B_{ам} = \frac{\Phi_{бал} \cdot H_a \cdot t_{ум}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot 100 \cdot \eta_{зн}}, \quad (4.7)$$

де $\Phi_{бал}$ – балансова вартість одиниці обладнання, грн.

$$\Phi_{бал} = C_{опт} \cdot K_{тмф}, \quad (4.8)$$

де $C_{опт}$ – оптова ціна обладнання, грн.;

$K_{тмф}$ – коефіцієнт, який враховує витрати на транспортування обладнання (0,05...0,1), його монтаж (0,04...0,06), улаштування фундаменту (0,02...0,08);

H_a – норма амортизації на реновацію, %;

$\eta_{зн}$ – нормативний коефіцієнт завантаження обладнання (для ДС та О $\eta_{зн} = 0,95$).

$$B_{ам.баз} = \frac{596750 \cdot 1,19 \cdot 20 \cdot 0,02}{3950 \cdot 60 \cdot 100 \cdot 0,95} = 0,0126 \text{ грн.}$$

$$B_{ам.пр} = \frac{165000 \cdot 1,19 \cdot 20 \cdot 30,0}{3950 \cdot 60 \cdot 100 \cdot 0,95} = 5,2325 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію приміщення:

$$B_{ен} = \frac{S_{од} \cdot k_f \cdot C}{F_{дрм} \cdot \eta_{зн}} \cdot \frac{t_{ум}}{60}, \quad (4.9)$$

де $S_{од}$ – площа в плані, яку займає одиниця обладнання, m^2 ;

k_f – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (проходи, проїзди, транспортно-складські приміщення) [19, табл. 4].

C – річні витрати, пов'язані з експлуатацією $1m^2$ виробничого приміщення, грн.

$$B_{en.баз} = \frac{1,84 \cdot 4,0 \cdot 580}{3950 \cdot 0,95} \cdot \frac{0,02}{60} = 0,0009 \text{ грн.}$$

$$B_{en.пр} = \frac{0,04 \cdot 4,0 \cdot 580}{3950 \cdot 0,95} \cdot \frac{30,0}{60} = 0,0124 \text{ грн.}$$

4.2.2 Розрахунок постійних витрат

За поелементним методом розрахунку постійні витрати включають:

$$P = B_{нал} + B_{сп.осн} + B_{ам.сп} + B_{пр}, \quad (4.10)$$

де $B_{нал}$ – витрати на налагодження обладнання, грн.;

$B_{сп.осн}$ – витрати на експлуатацію спеціального оснащення, грн.;

$B_{ам.сп}$ – витрати на амортизацію спеціального обладнання (у порівнюваних варіантах відсутнє), грн.;

$B_{пр}$ – витрати на створення програмного забезпечення робота-маніпулятора.

Витрати на налагодження обладнання:

$$B_{нал} = C_{гн} \cdot \frac{t_{п-з}}{60} \cdot (1 + K_{\delta}) \cdot (1 + K_c) \cdot A, \quad (4.11)$$

де $C_{гн}$ – годинна тарифна ставка наладчика відповідного розряду грн./год.;

$t_{п-з}$ – підготовчо-заключний час даної операції, хв.;

A – кількість партій, що відповідає кількості переналагоджень за рік.

$$B_{нал.баз} = 122,688 \cdot \frac{30}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) \cdot 4 = 329,29 \text{ грн.}$$

$$B_{нал.пр} = 122,688 \cdot \frac{2,0}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) \cdot 4 = 21,95 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію спеціального оснащення:

$$B_{осн.сп} = 0,6 \cdot \Phi_{бал.осн} \cdot K_{осн}, \quad (4.12)$$

де $\Phi_{бал.осн}$ – балансова вартість спеціального оснащення (визначається як добуток оптової ціни штампів на коефіцієнт, який враховує витрати на його транспортування і встановлення на кривошипному пресі), грн;

$K_{осн}$ – потреба в оснащенні (штампах) для прийнятих значень номенклатури та програми випуску продукції.

$$B_{осн.сп} = 0,6 \cdot 200000 \cdot 1,11 \cdot 4 = 532800 \text{ грн}$$

Витрати на створення програмного забезпечення:

$$B_{пр} = 0,6 \cdot T_{пр} \cdot Z_{год} \cdot K_{дс}, \quad (4.13)$$

де $T_{пр}$ – трудомісткість підготовки програмного забезпечення, год.;

$Z_{год}$ – середньогодинна заробітна плата інженерів з підготовки програмного забезпечення, грн./год.;

$K_{дс}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову заробітну плату та єдиний соціальний внесок.

$$B_{пр.пр} = 0,6 \cdot 2,8 \cdot 132,045 \cdot 1,342 = 298,37 \text{ грн.}$$

4.2.3 Розрахунок технологічної собівартості

Усі виконані розрахунки змінних та постійних витрат [27], а також розрахунок технологічної собівартості зведемо до табл. 4.2.

Технологічна собівартість:

$$C_{\text{тех.баз}} = 0,0779 \cdot 4000 + 533129,30 = 533441 \text{ грн.}$$

$$C_{\text{тех.пр}} = 11,7310 \cdot 4000 + 320,32 = 47244 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.2 – Розрахунок технологічної собівартості

№ з/п	Статті витрат	Витрати, грн.	
		Базовий	Проект
1.	<u>Змінні витрати V</u>		
1.1	Заробітна плата виробничих робітників основна, додаткова з єдиним соціальним внеском	0,0412	-
1.2	Електроенергія силова	0,0098	0,9260
1.3	Ремонт обладнання	0,0024	2,8911
1.4	Матеріали допоміжні	0,0040	2,6690
1.5	Амортизація універсального обладнання	0,0196	5,2325
1.6	Експлуатація приміщень	0,0009	0,0124
	Всього змінних витрат	0,0779	11,7310
2.	<u>Постійні витрати Р</u>		
2.1	Налагодження обладнання	329,29	21,95
2.2	Експлуатація спеціального оснащення	133200	-
2.3	Створення програмного забезпечення	-	298,37
	Всього постійних витрат	533129,30	320,32
	Технологічна собівартість річного випуску деталей $C_{\text{тех}}$	533441	47244

Таким чином, за критерієм мінімуму технологічної собівартості для умовної номенклатури деталей (4 позиції) та умовної річної програми запуску кожного виду деталей $N_z=1000$ шт. більш ефективним є інкрементальне формування на базі робота-маніпулятора.

4.2.4 Розрахунок показників економічної ефективності проектного варіанту технологічного процесу

Річний економічний ефект від застосування інкрементальне формування на базі робота-маніпулятора:

$$E_p = (C_{тех.баз} + E_n \cdot K_{баз}) - (C_{тех.пр} + E_n \cdot K_{пр}), \quad (4.14)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень;

$K_{баз}$, $K_{пр}$ – відповідно капітальні вкладення базового і проектного варіантів техпроцесу, грн.

Капітальні вкладення по кожному варіанту [28] складаються із вкладень в обладнання $\Phi_{бал}$, оснащення $B_{осн}$, а також у приміщення, яке це обладнання займає $K_{буд}$, скореговані на коефіцієнт завантаження обладнання у порівнюваних варіантах η_z :

$$K = (\Phi_{бал} + B_{осн} + K_{буд}) \cdot \eta_z, \quad (4.15)$$

$$\eta_{z(i)} = \frac{q_p}{q_{пр}}, \quad (4.16)$$

де q_p , $q_{пр}$ – відповідно розрахункова та прийнята (ціла) кількість обладнання на операції.

Визначимо розрахункову кількість обладнання за формулою:

$$q_{p(i)} = \frac{N_3 \cdot t_{um(i)}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot k_8}, \quad (4.17)$$

k_8 – нормативний коефіцієнт виконання норм часу (приймається у розмірі 1,0-1,1).

$$q_{p.баз} = \frac{4000 \cdot 0,02}{3950 \cdot 60 \cdot 1} = 0,0003; \quad q_{p.нр} = \frac{4000 \cdot 30,0}{3950 \cdot 60 \cdot 1} = 0,51.$$

$$\eta_{з.баз} = \frac{0,0003}{1} = 0,0003; \quad \eta_{з.нр} = \frac{0,51}{1} = 0,51$$

Капітальні вкладення в будівлі розраховуємо за формулою:

$$K_{б\gamma\delta} = S_{од} \cdot K_f \cdot q_{нр} \cdot h \cdot Ц_{б\gamma\delta}, \quad (4.18)$$

де h – висота приміщення цеху, м;

$Ц_{б\gamma\delta}$ – ціна 1м² виробничої площі висотою 8-10 м, грн./м³.

$$K_{б\gamma\delta.баз} = 1,84 \cdot 4,0 \cdot 8 \cdot 5500 = 323840 \text{ грн.}$$

$$K_{б\gamma\delta.нр} = 0,04 \cdot 4,0 \cdot 8 \cdot 5500 = 7040 \text{ грн.}$$

Балансова вартість обладнання і оснащення:

$$\Phi_{бал.баз} = 596750 \cdot 1,19 + 200000 \cdot 1,11 \cdot 4 = 1598133 \text{ грн.}$$

$$\Phi_{бал.нр} = 165000 \cdot 1,19 = 196350 \text{ грн.}$$

$$K_{баз} = (323840 + 1598133) \cdot 0,0003 = 577 \text{ грн.}$$

$$K_{нр} = (7040 + 196350) \cdot 0,51 = 103729 \text{ грн.}$$

$$E_p = (533441 + 0,16 \cdot 577) - (47244 + 0,16 \cdot 103729) = 469700 \text{ грн.}$$

Впровадження інкрементального формування на базі робота-маніпулятора дозволить отримати річний економічний ефект у розмірі 469700 грн.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного комплексного дослідження щодо підвищення точності позиціонування промислових роботів у процесах інкрементального формоутворення сформульовано наступні науково-практичні висновки:

1. Систематизація джерел похибок підтвердила, що для режимів ІФ ключове значення мають геометричні похибки (домінантні в статичних та квазістатичних режимах) та динамічні похибки (актуальні при високих швидкостях подач). Комплексна компенсація цих двох класів похибок є першочерговим завданням для забезпечення технологічної точності, що перевищує вимоги штатної паспортної повторюваності робота.

2. Метрологічне забезпечення роботизованого комплексу на базі лазерного трека є найбільш ефективним методом просторової реєстрації. Застосування алгоритмів мултилатерації та псевдо-мултилатерації дозволяє знизити невизначеність вимірювання, що є критичним для точної ідентифікації похибок у великому робочому об'ємі. Оптимізація конфігурації розташування трекерів підвищує достовірність вхідних даних для кінематичної моделі.

3. Кінематична ідентифікація похибок ланок у поєднанні з непрямыми вимірюваннями забезпечує повне відновлення об'ємної моделі похибок верстатно-роботизованого комплексу. Цей підхід є оптимальним з точки зору балансу між необхідною точністю моделювання та мінімізацією експлуатаційних витрат на метрологічні процедури.

4. Розроблений алгоритм програмної компенсації на основі ПІД-регулятора, інтегрований у високошвидкісний цикл обміну даними (RSI, 250 Гц), демонструє здатність до ефективного зменшення як пропорційної, так і інтегральної складових остаточної похибки. Параметри ПІД-регулятора демонструють наступний функціональний вплив:

- Кр: визначає швидкість реакції системи і зменшення статичної похибки до певного граничного рівня.

- K_d : підвищує демпфування та стійкість системи, мінімізуючи перерегулювання.
- K_i : є критичним параметром для остаточного усунення статичної похибки, проте вимагає прецизійного вибору для запобігання інтегральній нестабільності та осциляціям.

Перспективи подальших досліджень орієнтовані на розробку адаптивних алгоритмів вдосконалення ПД-параметрів з використанням методів машинного навчання, впровадженням фільтрації Калмана для зниження впливу стохастичного шуму вимірювальної ланки та інтеграцію компенсаційних моделей теплової деформації для довготривалої стабільності системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jahanpour, S., & Shokuhfar, A. (2018). Improving the Accuracy of Industrial Robots: A Review of Calibration and Compensation Methods. *Journal of Manufacturing Systems*, 46, 86-97.
2. Ghassemi, A., & Bahloul, S. (2021). Review of Single Point Incremental Forming and Robotics Integration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(7), 2133–2156.
3. Krishnan, A., & Gupta, S. (2019). Error Compensation in Robotic Systems Using Kinematic Modeling and Laser Tracker Measurements. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55, 24–35.
4. Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
5. Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
6. Афонин, С. М. (2018). *Теория автоматического управления: Учебное пособие*. СПб.: Университет ИТМО.
7. Schwenke, H., et al. (2018). Geometric Error Measurement and Compensation on Large Machine Tools and Industrial Robots. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 67(2), 649–672.
8. Маликов, М. В., & Морозов, В. П. (2020). *Метрологія та вимірювальна техніка*. Харків: ХНУРЕ.
9. Jeswiet, J., Young, S., & Ghassemi, A. (2005). Incremental sheet forming—an overview. In *International Conference on Incremental Sheet Forming (ICISF)*.
10. Кулик, В. А. (2019). *Технологічні основи гнучкого виробництва та обробки металів*. Київ: Експерт.
11. KUKA Roboter GmbH. (2017). *KUKA Robot Sensor Interface (RSI) Manual*.
12. Смирнов, А. В., & Петров, О. І. (2020). *Кінематика та динаміка промислових роботів*. Одеса: ОНПУ.

13. Павленко І.І. Промислові роботи та РТК. Монографія – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф. 2016. – 492 с.
14. Павленко І.І. Захватні пристрої роботів / І.І. Павленко, М.О. Годунко // Захватні пристрої роботів: монографія. – Кропивницький: «КОД», 2020. – 386 с.
15. Павленко, І. І., Мажара, В. А., & Скібінський, О. І. (2021). Методичні рекомендації до кваліфікаційної роботи. М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т., каф. машинобуд., механтроніки і робототехніки. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. - 42 с.
16. Мажара, В. А., & Годунко, М. О. (2018). Основи гнучкого автоматизованого виробництва. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентами спеціальності “Прикладна механіка”. Кропивницький. ЦНТУ. 2018. – 32 с.
17. Mazhara, V., Shcherbyna, K., Maniakin, S., & Filonenko, V. (2023). Efficiency of using turning machining centers. Global science: prospects and innovations : proceedings of IV international scientific and practical conference, Liverpool, 1-3 December, 2023. – Liverpool, United Kingdom : Cognum Publishing House, 2023. – P. 216-221.
18. Skibinskyi, O. I. A Novel Design of Cutting Tool for Efficient Finishing of G-Rotors / O. I. Skibinskyi, A. O. Hnatiuk // Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design / [editors : S. P. Radzevich, M. Storchak]. – Cham, Switzerland: Springer, 2022. – P. 181-203.
19. Журило І.В., Семікіна М.В. Дипломне проектування з економіки підприємства: особливості, методика та основні етапи: навчально-методичний посібник. 3-тє вид., переробл. і доповн. Кропивницький: ЦНТУ, 2016. 80 с.
20. Павленко І. І., Мажара В. А. Конструктивно–кінематична структура двозахватних пристроїв промислових роботів. – 2006. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. пр. – Краматорськ; Київ, 2006. – Вип. 19. – С. 104–109.

21. Павленко, І. І., & Мажара, В. А. (2006). Дослідження впливу використання двозахватних пристроїв на продуктивність роботи РТК. *Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе. В 5-ти томах.* – Донецьк: ДонНТУ, 2006. Т.5 – С. 282 – 287.
22. Павленко І. І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування //Кіровоград: КНТУ. – 2007.
23. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технологічні комплекси: Навчальний посібник. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 392 с.
24. Mazhara, V., Artiukhov, A., Moskalenko, V., & Tenenka, S. (2023). The research of conditions of changing grips positions in the working area of the machine tool. // *Topical aspects of modern scientific research : proceedings of II international scientific and practical conference, Tokyo, 26-28 October, 2023.* – Tokyo, Japan : CPN Publishing Group, 2023. – P. 222-228.
25. Мажара, В. А., Артюхов, А. М., & Тененика, С. А. (2024). Проектування затискних пристроїв та оснащення. Самостійна робота. М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. машинобудування, мехатроніки і робототехніки. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 44 с.
26. Мажара, В. А., Щербина, К. К., Артюхов, А. М., Тененика, С. А., & Шестаков, І. С. (2024). Система автоматизованого проектування технологічного оснащення. // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12-23.
27. Sybirtsev, V., Mazhara, V., & Moskalenko, V. (2020). Analysis of discriminant models in forecasting bankruptcy of enterprises. *Bulletin of the Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University. Economic Sciences*, (2).
28. MAZHARA V., MOSKALENKO V. Principal component analysis in the forecasting bankruptcy of enterprises // *Bulletin of the Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University. Economic Sciences.* – 2019. – №. 3.

29. Павленко, І. І. Структура продуктивності верстатних роботизованих комплексів / І. І. Павленко, В. А. Мажара // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – Вип. 17. – С. 131–137.

30. Shcherbyna K. Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks / K. Shcherbyna, A. Hrechka, V. Mazhara, T. Diachenko//Конструювання, виробництво та експлуатація 37 8 сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2020. – Вип.50. – С.159-164.

31. Мажара, В. А., Годунко, М. О., Кислун, О. А., & Ковальчук, С. В. (2014). Визначення кутів повороту ведучих ланок адаптивного захватного пристрою // Збірник наукових праць КНТУ / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип. 27 – Кіровоград: КНТУ, 2014. – С. 28 – 33.