

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

**О.О. Черно**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*з дисципліни*

**"СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МАНІПУЛЯЦІЙНИХ РОБОТІВ"**

Миколаїв 2020

## ЗМІСТ

Лекція 1. Основні поняття, предмет і задачі робототехніки .....	3
Лекція 2. Класифікація роботів .....	8
Лекція 3. Побудова промислових роботів .....	14
Лекція 4. Математичний опис руху ланок. Матриці повороту.....	16
Лекція 5. Матриці перетворення .....	18
Лекція 6. Пряма задача кінематики .....	19
Лекція 7. Зворотна задача кінематики .....	22
Лекція 8. Планування траєкторії маніпулятора.....	25
Лекція 9. Структурна схема системи управління ланкою маніпулятора .....	30
Лекція 10. Система керування електроприводами руху ланок маніпулятора з компенсацією моментної складової помилки.....	32
Лекція 11. Системи очутливлення роботів .....	35
Лекція 12. Ієрархічна структура системи управління маніпуляційним роботом .....	42
ЛІТЕРАТУРА .....	43

## Лекція 1. Основні поняття, предмет і задачі робототехніки

Еволюція сучасного суспільства й виробництва обумовила виникнення й розвиток нового класу машин – роботів – і відповідного наукового напрямку – робототехніки. Робототехніка – науково-технічна дисципліна, що інтенсивно розвивається, вивчаючи не тільки теорію, методи розрахунку й конструювання роботів, їхніх систем і елементів, але й проблеми комплексної автоматизації виробництва й наукових досліджень із застосуванням роботів. Варто помітити, що термін "робототехніка" використовується й в іншому контексті, означаючи сукупність техніки (машин, устаткування, агрегатів і ін.), оснащеної робототехнічними пристроями або функціонуючої разом з роботами в єдиному технологічному процесі.

За всіх часів наукова й виробнича діяльність людини визначалася, з одного боку, потребою розвитку й удосконалення суспільного виробництва як бази для досягнення економічної могутності, з іншого боку – необхідністю дослідження й освоєння нових нетрадиційних просторів і сфер діяльності.

Історія наукових і науково-технічних досягнень, весь розвиток техніки є прекрасною ілюстрацією етапів цього безперервного процесу. Виникнення й розвиток роботів і робототехніки – яскравий приклад реалізації суспільної потреби в корінному підвищенні ефективності виробництва, освоєнні нових просторів і сфер діяльності.

Одним з вирішальних факторів прискореного руху в економіці стає інтенсифікація промислового виробництва, основою якого на сучасному етапі науково-технічного й соціального розвитку суспільства є комплексна механізація й автоматизація. У цьому напрямку за останні роки в країні пророблена чимала робота: створені автоматизовані системи управління виробництвом (АСУП), оснащені ЕОМ, металорізальні верстати із програмним управлінням, що обробляють центри, спеціалізовані автомати й автоматичні системи, роторні й роторно-конвеєрні лінії й ін.

Подальша інтенсифікація виробництва й підвищення продуктивності праці вимагають якісно нового підходу. Так звана тверда автоматизація, тридцятилітній основу сучасного виробництва й базована на спеціальному автоматизованому устаткуванні, поточкових і автоматичних лініях, орієнтована на багатосерійне й масове виробництво й непридатне для умов серійного, а тим більше дрібносерійного через високу вартість, складності й тривалості переналагодження на випуск нових видів продукції, тобто не має властивість гнучкості.

Сучасний світовий ринок, орієнтований винятково на запити споживача, диктує промисловості необхідність пристосування до коливань попиту, частоті зміни номенклатури випускається продукції, тобто вимагає виробів, вироблених малими партіями й більшою мірою задовольняючим індивідуальним потребам на основі виробництв, що перебудовуються гнучко. Так, зараз не менш 70% світової машинобудівної продукції становлять вироби, що

випускаються дрібними й середніми серіями. Однак вимоги малої серійності й високої продуктивності праці практично несумісні в традиційному машинобудівному виробництві, тому що найбільш гнучкі виробництва, що володіють необмеженими можливостями перебудови на випуск будь-якої продукції, що базуються на універсальному технологічному встаткуванні й керуванні вручну, вимагають застосування дефіцитного й усе більшого здорожчання висококваліфікованої праці робітників і практично вичерпали можливості подальшої інтенсифікації й росту продуктивності праці. Таким чином, зложилося протиріччя, що не вирішуються в рамках традиційних науково-технічних принципів автоматизації. Крім того, нових підходів вимагає й ряд інших немаловажних факторів комплексної автоматизації виробництва. Так, навіть при порівняно високому рівні автоматизації основних технологічних процесів сучасного виробництва значна частина допоміжних операцій, як правило, монотонних і стомлюючих, а найчастіше й травмонебезпечних, пов'язаних із завантаженням і розвантаженням устаткування, переміщенням і складуванням деталей і т.п., практично не піддається автоматизації традиційними засобами, продовжує виконуватися вручну, гальмує подальше вдосконалювання технологій.

Операції, а саме виготовлення типової деталі на верстаті займає лише 2-3% часу. А це величезні резерви. Нарешті, за допомогою традиційних методів твердої автоматизації вкрай важко або дуже дорого, а найчастіше просто неможливо автоматизувати складальні, зварювальні, фарбувальні й інші операції, що не піддаються твердої регламентації процесу.

І останнє: тепер людство підійшло до рубежу, коли його подальший прогресивний розвиток немислимо без інтенсивного дослідження нових просторів і сфер діяльності – космосу, океанських глибин, найглибших земних надр, а також розробки новітніх технологій, освоєння яких звичайними методами при особистій участі людини неефективно, а в багатьох випадках взагалі неможливо.

Таким чином, у наявності гострі протиріччя сучасного суспільства й виробництва між досконалістю промислової техніки й характером праці при її використанні, вимогами інтенсифікації виробництва й традиційних методів її досягнення, потребою в трудових ресурсах і їхній пропозиції, необхідністю освоєння нових просторів, технологій і обмежених психофізіологічних можливостей людини. У повній відповідності із законами діалектики ці протиріччя, що стримують подальший розвиток виробництва й суспільства, а також сучасні досягнення науки й техніки – механіки, електроніки, інформатики, кібернетики й інших – привели до виникнення й інтенсивного розвитку роботів і робототехніки.

Уже найближчим часом очікується інтенсифікація впровадження робототехніки в промислове виробництво, причому як найбільше багатообіцяюча область додатка адаптивних роботів нових поколінь розглядаються складальні технології, а критичне осмислення досвіду тимчасових невдач і розчару-

вань допоможе не повторити помилок минулого, виробити більше зважені й ефективні підходи й науково-технічні напрямки роботизації. Так, професором Л.И. Волчкевичем рекомендовані загальні принципи технічної політики при роботизації промислового виробництва.

Перший принцип – принцип досягнення кінцевих результатів – говорить, що засобу роботизації повинні не просто імітувати або заміщати людини, а виконувати виробничі функції швидше, надійніше й краще людини, лише тоді вони по-справжньому будуть ефективними.

Другий принцип – принцип комплексності підходу – диктує необхідність розгляду й ув'язування в єдиному комплексі всіх найважливіших компонентів виробничого процесу: об'єктів виробництва (виробів), технології, основного й допоміжного устаткування, системи управління й обслуговування, кадрового забезпечення, взаємодії із зовнішніми структурами й ін.

Третій принцип – принцип необхідності – визначає застосування засобів роботизації, нехай найсучасніший і перспективних, не там, де їх можна пристосувати, а лише там, де без них не можна обійтися.

Четвертий принцип – принцип своєчасності, – не допускає впровадження й тиражування недостатньо дозрілих і відпрацьованих технічних рішень і конструкцій. Впровадження дорогих, малонадійних і непродуктивних роботів і інших засобів автоматизації може привести лише до їхньої дискредитації.

Для визначення основного поняття "робот" варто усвідомити головні критерії оцінки його можливостей, тому що робот за своєю концепцією виник як пристрій, покликаний замінити праця людини в найрізноманітніших видах і сферах, додатка, оцінка його можливостей повинна виходити із трьох категорій здатностей, властивій живій істоті, зокрема людині, – фізичних, функціональних і інтелектуальних. Робот – це тривимірна машина, що має три виміри, що відповідають простору живої істоти. Обчислювальні й інші інформаційні машини, а також машини вантажопідйомного, будівельного, транспортного виду двомірні. Стаціонарні машини загального застосування, що існували дотепер, можна вважати одномірними, що мають тільки фізичні можливості. Як же визначається поняття "робот"?

У широкому розумінні робот може бути визначений як технічна система, здатна заміщати людини або допомагати йому у виконанні різних завдань. Однак і дотепер відсутній стругаючи й загальноприйняте формулювання. Різні джерела дають різне тлумачення цього поняття. Від інших систем, призначених для обробки вступних ззовні інформації й одержання керуючих впливів (наприклад, систем автоматичного управління технологічними процесами), роботів відрізняє антропоморфізм ...".

Професор Токійського університету, доктор Сигэру Ватаата пропонує вважати роботом пристрій, здатний самостійно переміщатися в просторі, справлятися із завданнями аналізу сцен і розпізнавання образів, що володіє числом ступенів рухливості, що вміє аналізувати обстановку за допомогою

зворотного зв'язку, а також прогнозувати ситуації, опираючись на власний досвід і доступну інформацію.

Професор Токійського технологічного інституту доктор Сэйко Мори вважає, що роботом може бути названий пристрій за умови, що він володіє універсальністю, мобільністю, являє собою одне фізичне тіло, працює автоматично, повністю підкоряється людині, а також здатне до елементарної інтелектуальної діяльності. При цьому універсальність, мобільність, індивідуальність і автоматизм – всі ці якості є невід'ємними ознаками всіх роботів без винятку.

Відомий французький фахівець Пилип Куафе нагадує, що робот – це керована машина, що володіє наступними двома властивостями: 1) універсальними можливостями, тобто здатністю виконувати різні механічні дії в реальному просторі, для чого роботіві необхідно мати механічну структуру зі змінюваною геометрією ланок, і 2) адаптивністю до зовнішнього середовища, тобто здатністю самостійно змінювати своє поведіння залежно від змін її стану.

Ще далі по шляху конкретизації поняття йде професор М. Щпрингер з Університету Куин Мері, відповідно до визначення якого пристрій, щоб називатися роботом, повинен мати мінімальний набір властивостей і можливостей, таких як 1) наявність механічної руки й захоплення; 2) уміння самостійно пересуватися й самостійно управляти своїми діями; 3) наявність виконавчої системи й системи управління, які в сукупності забезпечують реалізацію попередніх властивостей; 4) наявність комп'ютера, здатного запам'ятовувати програми управління відпрацьовуванням вступників ззовні наказів, а також програм, що реалізують рішення, які приймає сам робот, виходячи з набору деяких заздалегідь певних альтернатив; 5) наявність пристроїв і датчиків, здатних визначати торкання роботом яких-небудь зовнішніх предметів, вимірювати ступінь гладкості поверхні, твердість матеріалу, місце розташування заданого предмета, його масу, теплопровідність, температуру, ступінь близькості цього предмета, визначати його форму й розміри, характерні зовнішні ознаки, колір, відстань, захід, знаходити місце розташування "рук і ніг" робота, а також аналізувати звукові сигнали.

Варто привести ще одне визначення поняття "робот", отримане шляхом статистичного аналізу відповіді на питання: "Що таке робот, чим він відрізняється від машин і автоматичних систем?", що задавався 156 експертам, що спеціалізуються в різних галузях науки й техніки. Результатом експертизи з'явилося наступне визначення: "Робот являє собою рухливу компактну систему, відмітними ознаками якої є чутливі елементи, маніпулятори й, саме головне, деяка ступінь штучного інтелекту. При цьому штучний інтелект отожднюється головним чином зі здатністю до навчання й відповідно до зміни поведінки".

При всій численності й розмаїтості формулювань спробуємо виділити закладені в них найбільш характерні відмітні ознаки роботів, до яких, мабуть, варто віднести:

1) автономність, під якою розуміється здатність самостійного виконання дій або виробничих операцій, відповідно лише із програмним алгоритмом або із цілевказуючою командою й умовами, що змінюються, зовнішнього середовища;

2) універсальність, що розуміється як здатність виконувати всілякі дії або виробничі операції й легко переходити з одного виду дій на інший;

3) автоматичність, тобто здатність виконувати досить складні й завершені дії або виробничі цикли без безпосереднього втручання людини-оператора;

4) антропоморфізм, що розуміється в широкому змісті як наділення робота здатностями, властивій людині: фізичними (силовими), функціональними (руховими) і інтелектуальними (подібність робота з людиною, що зовсім необов'язково й може використовуватися лише в спеціальних цілях;

5) адаптивність, тобто здатність до цілеспрямованої зміни свого поведіння під впливом змін зовнішніх умов і до навчання в процесі взаємодії із зовнішнім середовищем (гнучкість). Здатність до адаптації й навчання реалізується шляхом наділення робота тими або іншими засобами зворотного зв'язку: дотиком, зором, слухом, нюхом, запам'ятовуванням і т.п. Виділені в найбільш загальному виді без зайвої деталізації ці п'ять відмітних ознак досить повно визначають здатності й можливості робота як технічної системи. При цьому три перших є зовсім невід'ємними ознаками будь-якого робота, а два наступних – четвертий і п'ятий – тією чи іншою мірою можуть бути властиві найбільш складним роботам. Таким чином, може бути дане досить загальне й стисле визначення класу машин, іменованих роботами.

*Робот* – це автономно функціонуюча універсальна автоматична машина, призначена для відтворення фізичних, рухових і розумових функцій людини, наділена здатністю до адаптації й навчання в процесі активної взаємодії з навколишнім середовищем.

Робот – гарний приклад того, як сума раніше відомих складових частин (маніпуляторів, ЕОМ, сенсорики) дає нову якість – принципово новий тип технічного пристрою, що володіє в досить розвиненому варіанті штучним інтелектом, штучними органами почуттів (сенсорика), здатністю сприймати навколишнє середовище й активно впливати на неї, навчаючись і вдосконалюючись у ході цього процесу. Роботів, а тим більше промислових, повністю відповідному вищенаведеному визначенню, поки ще немає; широко застосовувані роботи не мають пристрої типу органів почуттів людини й здатністю мислити, а подібні розробки поки не вийшли зі стін наукових лабораторій і не одержали широкого застосування. Однак наука й техніка роблять упевнені кроки по шляху рішення однієї з фундаментальних проблем робототехніки – створення що відчувають і мислять роботів.

## Лекція 2. Класифікація робіт

### 1. Промислові роботи.

Промислові роботи, у свою чергу, підрозділяються на три групи по своїх ознаках: виробничі, або технологічні (ВПР), що виконують основні операції технологічних процесів; підйомно-транспортні промислові роботи, або допоміжні (ПТПР), що виконують допоміжні дії типу "взяти – перенести – покласти"; універсальні (УПР), що виконують різні (і основні, і допоміжні) операції.

По спеціалізації промислові роботи підрозділяються на спеціальні, виконуючі строго певні технологічні операції або обслуговуючі конкретні моделі технологічного встаткування; спеціалізовані, або цільові, призначені для виконання технологічних операцій одного виду (зварювання, складання, фарбування й т.п.) або для обслуговування певної групи моделей технологічного встаткування, об'єднаних спільністю маніпуляційних дій; універсальні, або багатоцільові, призначені для виконання як основних, так і допоміжних технологічних операцій різних видів і з різними групами моделей технологічного встаткування.

Тому що сучасне будівництво по ступені й стилю механізації наближається до промисловості, будівельні роботи можуть бути включені в цю групу. Вони призначені для автоматизації будівельного виробництва, якому органічно властиве величезна кількість ручних операцій, як допоміжних, так і основних.

У наш час у будівельному виробництві знаходять застосування різні маніпулятори з управлінням оператором, а також промислові роботи для виробництва будівельних матеріалів. Створення роботів для виконання основних будівельних операцій, наприклад, монтажу будинків і споруджень – справа майбутнього й вимагає, очевидно, кардинального перегляду будівельних технологій. У всякому разі при розробці й створенні таких роботів прийде перебороти ряд труднощів, зокрема, вирішити проблеми забезпечення більших вантажепідйомностей і оснащення роботів зробленими системами адаптації й адаптації в умовах украй неорганізованого середовища їхнього функціонування.

### 2. Сільськогосподарські роботи.

Сільськогосподарські роботи призначені для автоматизації трудомістких і монотонних процесів у сільськогосподарському виробництві, що традиційно вимагає значних витрат праці. Крім операції доїння, найбільш автоматизованої в останні роки, стає можливим створення спеціальних транспортно-технологічних засобів, наприклад, тракторів, керованих без водіїв і використовуваних для сівби, оранки, внесення добрив, обприскування посівів, обрізання зайвих втеч і т.д.

Як повідомлялося, у Франції був розроблений мобільний робот, призначений для автоматичного видалення зайвих пагонів виноградної лози, а



японська фірма "Toshiba" уже випускає незвичайного робота-садівника, що може саджати молоді дерева, підрізати гілки й т.д. Двома "пальцями" він схоплює рослину, а спеціальні присоси виключають поломку гілок. Японські вчені, однак, вважають "садівника" ще недостатньо зробленим, а тому нове покоління роботів-садівників повністю виключить втручання людини в такі процеси, як підрізування дерев і чагарників, пересадження й навіть запилення квітів.

Досить актуальним, хоча на перший погляд і фантастичним, є завдання створення роботів для догляду за тваринами, пасіння худоби й т.п. Наприклад, Австралійська вовняна корпорація в умовах твердої конкуренції прийняла довгострокову програму пошуку ефективних засобів стрижки овець і після глибокого вивчення проблеми дійшла висновку, що найбільш обіцяючими є застосування роботів. Дослідження із програми автоматизованої стрижки привели до розробки в Мельбурнському університеті техніки для автоматичного вилову овець, розміщення й утримання їх у колисці, подачі в робототехнічну машину для стрижки; багатьма науковими колективами ведуться подальші роботи з удосконалювання системи адаптації й адаптації.

Несподіваний додаток ідеї роботизації сільськогосподарського виробництва знайшла одна з японських фірм, створивши роботизоване лякало "Тегаку" для захисту садів і ягідників від птахів у період дозрівання й збирання врожаю. Робот-Пугало, ростом 175 див з "руками", "ногами" і "головою", за допомогою відеокамери фіксує наближення зграї або окремих птахів, включає магнітофонний запис із лементами хижих птахів і тривожних лементів їхніх пернатих жертв. Одночасно робот починає розмахувати "руками" із прикріпленими до них прапорцями й рухатися по доріжках, автоматично зупиняючись після зникнення птахів. Лякало працює автоматично, енергія надходить від убудованих сонячних батарей.

### 3. Транспортні роботи

Транспортні роботи призначені для автоматизованого транспортування об'єктів, а також для управління різними транспортними системами. Дослідження й розробки по створенню транспортних роботів інтенсивно ведуться в усьому світі. При цьому виділяються чотири принципово різних типи – наземні, повітряноплаваючі, водоплавні й підземні. Теорія й практика трьох останніх типів не досягли ще в цілому того рівня, щоб говорити про їх сьогодні як про загальну реальність. Практичний розвиток одержали нині наземні транспортні роботи, які можуть бути колісними, крокуючими й гусеничними.

Найбільший розвиток і поширення в цей час одержали колісні транспортні роботи, використовувані досить широко в промислових автоматизованих транспортно-складських системах і гнучких автоматизованих виробництвах у вигляді мобільних автоматичних кранів, автоматичних керованих візків (АУТ), робочарів і ін., що оснащуються в багатьох випадках різними маніпуляційними пристроями. У найпростішому виді такі роботи впливають по рейках або по маршруті над кабелем, прокладеним під поверхнею пі-

длоги. Генератор частоти, подаючи струм по кабелю, створює магнітне поле, що вловлюється двома датчиками прийомного пристрою візка, що направляють її по необхідному маршруті. Навіть такі 58 прості системи АУТ дозволяє включати маршрути з декількома галузями й петлями за допомогою використання різних частот для кожного шляху. У більше складному варіанті візок обладнається автономної керуючої ЕОМ і засобами адаптації.

У рамках програми по створенню транспортних адаптивних роботів в університеті "Carnegie-Mellon" (США) створений робот "Террегейт" (землепрохідник), призначений для автономного пересування поза приміщеннями на значні відстані, оснащений бортовий ЕОМ і потужним сенсорним апаратом, у тому числі й системою технічного зору.

Каліфорнійська фірма "Odetics" створила керований на відстані мобільний автономний шестиногий робот "Odex-1", названий фірмою "функціоноїдом" і здатний, крокуючи по місцевості, переборювати уступи до 1 м, а за допомогою маніпуляторів піднімати вантаж, масою до 1 т, і транспортувати його. Варто помітити, що "функціоноїд", розробка якого обійшлася в 1 млн. дол., призначений для військових цілей – знешкодження бомб, несення вартової служби, мінування й розмінування місцевості, а також різних дій на полі бою. Безсумнівно, що подібний мобільний робот може виявитися незамінним засобом для здійснення рятувальних робіт і ліквідації наслідків аварій у зонах і місцевостях, важкодоступних або небезпечних для людини через радіаційне або хімічне зараження, високих температур і ін.

#### 4. Роботи спеціального призначення.

Роботи спеціального призначення служать для виконання різного виду ремонтних, відбудовних і рятувальних робіт в екстремальних умовах і ситуаціях, а також попередження аварій, стихійних лих і ліквідації їхніх наслідків. Розробка таких роботів спрямована на рішення важливих проблем безпеки й схоронності людини й середовища його перебування, а тому є не тільки вкрай актуальною, але й шляхетним завданням.

Сфери конкретного застосування спеціальних роботів досить – різноманітні – це профілактичні, ремонтні й рятувальні роботи в екстремальних умовах (наприклад, на ядерних реакторах АЕС, надводних і підводних судів, підприємств); знезаражування приміщень, споруджень і місцевості від радіоактивних, хімічних, біологічних і інших викидів; знешкодження різних вибухових пристроїв; пошук і порятунок людей при аваріях і стихійних лихах; боротьба з пожежами, активний контроль і попередження людей про стихійні лиха й аварії, ліквідація їхніх наслідків; боротьба з тероризмом і організованою злочинністю; несення активної патрульної служби й багато чого іншого.

Відомо, що для ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС минулому розроблені й використані робототехнічні пристрої як у вигляді радіоуправляємих бульдозерів, так і спеціальних роботів для знезаражування прилягаючої місцевості, дахи й будинки аварійного блоку АЕС. І хоча терміно-

вість замовлення й стислі строки розробки не дозволили створити зроблені конструкції, проте роботи зіграли свою роль.

Розробка й створення більше зробленого робота для аварійних ситуацій на АЕС ведеться в співдружності між нашими і югославськими вченими з 1989 р. у лабораторії великого фахівця в області біомеханіки й робототехніки професора Миомира Вукобратовича. Крокуючий "багатоногий" робот оснащується спеціальним маніпулятором, системою технічного зору, сенсорикою і системою управління, що дозволяють йому ефективно функціонувати у вкрай нетипових ситуаціях.

Японські фахівці створили робота-пожежного, здатного за допомогою ультразвукових датчиків і лазерних сенсорів не тільки виявляти вогнища пожеж, але й "бачити" перешкоди, що зустрічаються на шляху, і боротися з вогнем за допомогою спеціальної рідини, що направляється під тиском із двох стовбурів. Спеціальне ізоляційне покриття дозволяє "пожежному" працювати протягом 3 хв при температурі 800° С.

Міністерство зовнішньої торгівлі й промисловості Японії проводить у життя програму по створенню спеціального робота для особливо небезпечних робіт – боротьби із сильними пожежами, усунення аварій на ядерних реакторах і операцій в океанських глибинах. Цей "супер робот", по зовнішньому вигляді віддалено, що нагадує кентавра, з парою потужних рук-маніпуляторів і невеликою "головою" із чутливими очима-телекамерами, посадженої на гнучку механічну "шию", здатний витримувати надвисокі температури й значний тиск. Стійкий зв'язок з апаратом підтримується за допомогою лазерної системи, а сам він наділяється штучним інтелектом, що дозволяє приймати самостійні рішення в екстремальних ситуаціях для найбільш ефективного виконання поставлених йому завдань.

Ще одна цікава розробка по створенню спеціального робота, здатного діяти при непередбачених обставинах у небезпечній для людини обстановці, ведеться в рамках програми "Еврика" рядом західноєвропейських країн. Учені з Італії, Франції й Іспанії розробляють модель автономного мобільного робота (АМР), призначену для дії в критичних ситуаціях – при технологічних катастрофах (наприклад, на АЕС), стихійних лихах, пожежах, при погрозі великих терористичних актів. У зараженій місцевості буде діяти АМР, захищений додатковим шаром штучної "шкіри", що згодом при знезаражуванні він самостійно ліквідує. Робот наділяється штучним інтелектом: він зможе легко пересуватися по території, що постраждала від стихійного лиха або аварії, за допомогою потужної інформаційно-керуючої системи сприймати навколишнє оточення й оцінювати її зміни. Найбільш зроблений варіант розробки буде складатися із двох взаємодіючих спільно роботів АМР-1 і АМР-2.

Несподівані області застосування спеціальних роботів відкриваються у зв'язку з винаходом японських учених, що дозволяють аналізувати й кодувати заходи. Під керівництвом професора Токійського інституту технології Тоесакі Морицумі створений робот, здатний розпізнавати заходи, що відкриває

багатообіцяючі можливості використання таких розробок у харчовій промисловості, косметичі, парфумерії, медицині, митній і розшукній справі.

Як бачимо, сфери застосування спеціальних роботів досить різноманітні, і науковий пошук у цьому напрямку триває досить інтенсивно.

### 5. Побутові роботи.

Побутові роботи призначені для автоматизації різних операцій як безпосередньо в побуті людини, так і в сфері обслуговування. Ці роботи покликані реалізувати найважливіше соціальне завдання суспільства – вивільнення часу людини для духовного життя. Створення побутових роботів – досить складне наукове й інженерне завдання, тому що тут необхідні гнучкі універсальні системи, тобто адаптивні роботи з елементами інтелекту, здатні самостійно виконувати різні на перший погляд прості роботи – готування їжі, миття посуду, прибирання приміщень, шиття й ремонт одягу, догляд за дітьми, навчання різним навичкам, розвага людей та ін., але зовсім що не піддаються твердій регламентації.

Усе більше розширюється застосування засобів робототехніки у виробництві предметів одягу й харчової індустрії. У Японії, наприклад, розроблені роботи для крою й пошиття одягу, на базі яких створюється безлюдне виробництво. Державним коледжем у Лондоні розробляються методи автоматичного оброблення м'яса. Робот, що заміняє людину, повинен спочатку визначити місце розташування різних костей за допомогою спеціального сенсорного пристрою, щоб потім за допомогою робочого органа у вигляді ріжучої петлі, розташованого на кінці руки-маніпулятора, почати відділення м'ясної маси.

Більшим попитом будуть користуватися домашні роботи. Навіть при зроблених науково-технічних можливостях розробка й створення адаптивних апаратів, які могли б допомагати людині в домашніх турботах, охороні будинку, роботі на присадибній ділянці й т.п., – цілком реальне завдання. Так, президент фірми "Unimation" Джозеф Енгельбергер повідомив про створення в рекламних цілях робота на ім'я "Айзек", що подає каву відвідувачам в офісі фірми. У Великобританії розроблений робот "Ровер", покликаний замінити сторожового собаку. Оснащений зробленими сенсориною і системою управління цей робот за допомогою датчиків чуйно "прислухається" до всіх зовнішніх шумів, а у випадку спроб проникнення сторонніх у будинок вибухне голосним гавкотом, одночасно зробивши повідомлення в найближчу поліцейську ділянку. "Ровер" виконує також функцію протипожежного пристрою, здійснюючи тривогу при перших ознаках витoku газу. У Франції, у вестибюлі станції паризького метро "Нотр-Дам", пройшли успішні випробування робота-чистильника, оснащеного системами сухого й вологого збирань. Бортовий комп'ютер і система ультразвукової локації дозволяють роботів під час роботи чомно обходити людей, не падати по шляху й навіть підніматися по ескалаторі. В останні роки все більше застосування знаходять робототехніческие пристрою для розваг і забави. З одного боку, вони мають чис-

то прикладне значення, користуючись всі зростаючим попитом не тільки в дітей, але й дорослих, з іншого боку – допомагають дослідникам виходити на нові рішення, вигострювати оригінальні розробки в ході створення різноманітних "забавних" моделей. Широку популярність одержали, наприклад, різні шахові автомати. Цікавий робот по ім'ю "Кубот", створений американським ученим Бэттлом для ігор у кубик Рубика. Визначивши, у якому стані перебувають грані куба, робот, використовуючи спеціальний алгоритм, закладений у його пам'ять, за допомогою рук-маніпуляторів виконує необхідні рухи до-ти, поки не поверне кожної грані один колір. При цьому навіть на самий заплутаний варіант він затрачає не більше 3 хвилин.

Формується перспективна концепція створення робототехнічних ігор, коли мікророботи, зібрані граючими за принципом відомої гри "Конструктор", змагаються між собою, наприклад, у проходженні лабіринту ("Мікромиша" Джона Білінгслі), перенесенню вантажів і навіть у грі в настільний теніс. Робототехнічні ігри, таким чином, можуть стати одним з багатообіцяючих напрямків розвитку побутових роботів.

Однією з найбільш привабливих і шляхетних сфер додатка побутових роботів є надання допомоги інвалідам. Прикладом такої розробки є дослідження, проведене в Токійському університеті, де створюють "дворукого" робота-няньку, здатного виконувати цілий набір завдань – від зняття слухавки до названня стола.

Інший японський проект, розроблювальний з 1977 р. у лабораторії механіки (м. Цукуба), ставить метою створення робота-поводиря для втративших зір. Колісний робот, що рухається, "Мелдог", посилаючи ультразвукові імпульси, виявляє й пізнає перешкоди на своєму шляху, а бортовий комп'ютер порівнює отриману інформацію із закладеної в пам'яті топографічною картою даного району. Таким чином, робот, одержуючи подання про те, що відбувається в найближчому оточенні, здатний помітити, наприклад, що рухається автомобіль або інший транспортний засіб поблизу перехрестя, що має намір перейти сліпий. Крім того, робот оснащений оптичним датчиком для збору інформації про орієнтири, що зустрічаються на його шляху, і передачі для аналізу в комп'ютер. "Мелдог" управляє власником через електричний сполучний шнур, а електричні імпульси, що посилаються роботом, надходять на електроди пульта управління, з якими контактують пальці людини. Імпульси посилають у відповідності зі спеціальним кодом, освоївши який сліпий треба правильним шляхом, уникаючи небезпечних зіткнень.

Велика область застосування відкривається перед робототехнікою в охороні здоров'я й медицині – це навчання фізичним вправам, фізіотерапія, хірургія, протезування й т.п. Незамінним помічником для тренерів гірськолижного спорту може стати розроблений професором з м. Нігата Мотиосі Міура "Роботаро" – електронний лижник, здатний по заданій програмі наочно демонструвати елементи руху й самих складних маневрів гірськолижників, визначати раціональну програму спуска.

У клініці університету японського міста Кобе як асистент лікаря-фізіотерапевта "трудиться" робот, допомагаючи здійснювати програму відновлення в пацієнтів функцій ушкоджених і хворих суглобів і м'язів. При проведенні лікувальної гімнастики для ушкодженої кінцівки робот використовує свою гнучку й рухливу "руку", за допомогою якої виконує спеціальні вправи суглоба й порівнює результати з попередньо закладеної в його пам'ять, програмою лікувального тренування, видаючи результати на екран дисплея. Особливо підкуповує хворих "товариськість" робота, що задає темп і веде лік вправам. На рішення, здавалося б, зовсім фантастичного завдання мобілізовані кращі сили ряду університетів Японії, а також потужних корпорацій "Hitachi", "Sumitomo Donki" і ін. по створенню мікроскопічного робота-хірурга, здатного самотійно пересуватися по внутрішніх каналах людського організму, що вміє відшукувати уражені ділянки, видаляти ракові клітки й робити інші складні операції. "Якщо такий мікроробот буде створений, те це може викликати справжню революцію в медицині", – вважає один з розроблювачів програми професор Токійського університету Івао Фудзимаса.

Подальше вдосконалювання й повсякденне використання побутових роботів перебувають у прямої залежності від успіхів в області розробки систем штучного інтелекту.

### **Лекція 3. Побудова промислових роботів**

Промисловий робот (ПР) визначається як автоматична машина, стаціонарна або рухлива, що складається з виконавчого пристрою у вигляді маніпулятора, що має кілька ступенів рухливості, і перепрограмувального пристрою програмного управління для виконання у виробничому процесі рухових і керуючих функцій. Крім офіційно прийнятого зложилося й часто використовується в практиці більше коротке визначення: ПР – перепрограмувальний автоматичний маніпулятор промислового застосування.

Під перепрограмувальністю у відповідності зі стандартом розуміється властивість промислового робота замінити керуючу програму автоматично або за допомогою людини-оператора. До перепрограмування відноситься зміна послідовності й (або) величин переміщень по ступені рухливості й керуючих функцій за допомогою засобів управління на пульті пристрою управління.

Побудова і конструктивне виконання сучасних ПР досить різноманітні й диктуються значним числом об'єктивних факторів (призначення, вид технологічного встаткування, що обслуговується, характер технологічного процесу, умови експлуатації й технічні вимоги й ін.). Проте до теперішнього часу зложилися досить певні структура й склад промислового робота, його технічні характеристики й своєрідний зовнішній вигляд.

**ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ** у цілому складається з виконавчого пристрою (маніпулятора) і пристрою програмного управління.

**МАНІПУЛЯТОР ПР** призначений для виконання всіх його рухових функцій і являє собою багатоланковий механізм із розімкнутим кінематичним ланцюгом, оснащений приводами й робочим органом, а також у загальному випадку – пристроєм пересування. Конструктивно маніпулятор складається з опорних (несучих) конструкцій, маніпуляційної системи, робочих органів, приводу й пристрою пересування. Пристрій управління ПР служить для формування й видачі керуючих впливів маніпулятору відповідно до керуючої програми й складається із властиво системи управління, інформаційно-вимірювальної системи із пристроями зворотного зв'язку й системи зв'язку.

**ОПОРНІ, АБО НЕСУЧІ, КОНСТРУКЦІЇ** призначені для розміщення всіх пристроїв і агрегатів ПР, а також забезпечення необхідної міцності й твердості маніпулятора. Опорні конструкції по своєму виконанню досить різноманітні й можуть виконуватися у вигляді підстав, корпусів, стійок, колон, металоконструкцій, рам візків, порталів і т.п.

**МАНІПУЛЯЦІЙНА СИСТЕМА** служить для переносу й орієнтації робочого органа або об'єкта маніпулювання в заданій крапці робочої зони й структурно являє собою звичайно багатоланковий просторовий механізм із розімкнутим кінематичним ланцюгом.

**РОБОЧИЙ ОРГАН МАНІПУЛЯТОРА ПР**, призначений для безпосереднього впливу на об'єкт маніпулювання при виконанні технологічних операцій або допоміжних переходів, являє собою захватний пристрій або робочий інструмент.

**ПРИВОД** необхідний для перетворення енергії, що підводиться, в механічний рух виконавчих ланок маніпулятора відповідно до командних сигналів, що надходять від системи управління, і в загальному виді містить енергоустановку, двигуни й передавальні механізми.

**ПРИСТРІЙ ПЕРЕСУВАННЯ** призначений для переміщення маніпулятора або ПР у цілому в необхідне місце робочого простору й конструктивно складається з ходової частини й приводних пристроїв.

**СИСТЕМА ПРОГРАМНОГО УПРАВЛІННЯ (СПК)** служить для безпосереднього формування й видачі керуючих сигналів і конструктивно складається з пульта управління, запам'ятовувального пристрою, обчислювального пристрою, блоків управління приводами маніпулятора й технологічного встаткування.

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА (ІВС)**, призначена для збору й первинної обробки інформації для системи управління про стан елементів і механізмів ПР і зовнішнього середовища, конструктивно входить до складу пристрою управління ПР і містить у собі пристрою зворотного зв'язку й порівняння сигналів, а також датчики зворотного зв'язку.

#### Лекція 4. Математичний опис руху ланок. Матриці повороту

Для опису обертального руху зв'язаної системи відліку відносно абсолютної використовується матриця повороту розмірністю  $3 \times 3$ . Вона визначається як матриця перетворення тривимірного вектора положення в евклідовому просторі, переводить його координати з поверненої (зв'язаної) системи відліку  $UVW$  в абсолютну систему координат  $XYZ$  [4].

$$\vec{P}_{UVW} = (p_U, p_V, p_W)^T$$

$$\vec{P}_{XYZ} = (p_X, p_Y, p_Z)^T$$

Необхідно визначити матрицю  $R$ , яка перетворює координати  $\vec{P}_{UVW}$  в координати  $\vec{P}_{XYZ}$  :

$$\vec{P}_{XYZ} = R \vec{P}_{UVW}$$

$$\vec{P}_{UVW} = p_U \vec{i}_U + p_V \vec{j}_V + p_W \vec{k}_W$$

Визначаємо проєкції вектора  $\vec{P}$  на осі  $X, Y$  і  $Z$  :

$$p_X = \vec{i}_X \cdot \vec{P} = \vec{i}_X \cdot \vec{i}_U \cdot p_U + \vec{i}_X \cdot \vec{j}_V \cdot p_V + \vec{i}_X \cdot \vec{k}_W \cdot p_W$$

$$p_Y = \vec{j}_Y \cdot \vec{P} = \vec{j}_Y \cdot \vec{i}_U \cdot p_U + \vec{j}_Y \cdot \vec{j}_V \cdot p_V + \vec{j}_Y \cdot \vec{k}_W \cdot p_W$$

$$p_Z = \vec{k}_Z \cdot \vec{P} = \vec{k}_Z \cdot \vec{i}_U \cdot p_U + \vec{k}_Z \cdot \vec{j}_V \cdot p_V + \vec{k}_Z \cdot \vec{k}_W \cdot p_W$$

Або в матричній формі :

$$\begin{bmatrix} p_X \\ p_Y \\ p_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{i}_X \cdot \vec{i}_U & \vec{i}_X \cdot \vec{j}_V & \vec{i}_X \cdot \vec{k}_W \\ \vec{j}_Y \cdot \vec{i}_U & \vec{j}_Y \cdot \vec{j}_V & \vec{j}_Y \cdot \vec{k}_W \\ \vec{k}_Z \cdot \vec{i}_U & \vec{k}_Z \cdot \vec{j}_V & \vec{k}_Z \cdot \vec{k}_W \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_U \\ p_V \\ p_W \end{bmatrix}$$

Таким чином,

$$R = \begin{bmatrix} \vec{i}_X \cdot \vec{i}_U & \vec{i}_X \cdot \vec{j}_V & \vec{i}_X \cdot \vec{k}_W \\ \vec{j}_Y \cdot \vec{i}_U & \vec{j}_Y \cdot \vec{j}_V & \vec{j}_Y \cdot \vec{k}_W \\ \vec{k}_Z \cdot \vec{i}_U & \vec{k}_Z \cdot \vec{j}_V & \vec{k}_Z \cdot \vec{k}_W \end{bmatrix}.$$

Особливий інтерес представляють матриці поворотів навколо координатних осей. Матриця повороту на кут  $\alpha$  навколо осі  $X$ :

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

Матриця повороту на кут  $\varphi$  навколо осі  $Y$ :

$$R_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}.$$

Матриця повороту на кут  $\theta$  навколо осі  $Z$ :



$$R_{z,\Theta} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матриці  $R_{x,\alpha}$ ,  $R_{y,\varphi}$ ,  $R_{z,\Theta}$  називаються матрицями елементарних поворотів.

Будь-який поворот у просторі можна представити послідовністю з 3-х поворотів навколо координатних осей, а матрицю повороту отримати шляхом перемноження матриць елементарних поворотів. Оскільки операція множення матриць не є комутативною, тут істотне значення має послідовність виконання поворотів. Результуюча матриця повороту може бути отримана з використанням наступних простих правил:

– якщо рухома система координат UVW робить поворот навколо однієї з осей системи XYZ, відповідну матрицю елементарного повороту потрібно помножити зліва на матрицю попереднього результуючого повороту;

– якщо рухома система координат UVW робить поворот навколо однієї зі своїх власних осей, відповідну матрицю елементарного повороту потрібно помножити справа на матрицю попереднього результуючого повороту.

### Приклад

Потрібно знайти матрицю повороту, що є результатом послідовного виконання поворотів спочатку на кут  $\varphi$  навколо осі OY, потім на кут  $\Theta$  навколо осі OW і потім на кут  $\alpha$  навколо осі OU.

Розв'язання:

$$\begin{aligned} R &= R_{y,\varphi} \cdot I_3 \cdot R_{W,\Theta} \cdot R_{U,\alpha} = R_{y,\varphi} \cdot R_{W,\Theta} \cdot R_{U,\alpha} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \sin \alpha - \cos \varphi \sin \Theta \cos \alpha & \cos \varphi \sin \Theta \sin \alpha + \sin \varphi \cos \alpha \\ \sin \Theta & \cos \Theta \cos \alpha & -\cos \Theta \sin \alpha \\ -\sin \varphi \cos \Theta & \sin \varphi \sin \Theta \cos \alpha + \cos \varphi \sin \alpha & \cos \varphi \cos \alpha - \sin \varphi \sin \Theta \sin \alpha \end{bmatrix} \end{aligned}$$

## Лекція 5. Матриці перетворення

Оскільки тривимірна матриця повороту не несе інформації про поступальні переміщення і масштаб, вектор координат  $\vec{P}_{XYZ} = (p_X, p_Y, p_Z)^T$  доповнюють четвертою компонентою так, що він приймає вид  $\vec{P}_{XYZ} = (wp_X, wp_Y, wp_Z, w)^T$ , де  $w$  – масштабуючий коефіцієнт. У цьому випадку говорять, що вектор виражений в однорідних координатах.

У робототехніці приймають  $w = 1$ , а в завданнях машинної графіки він може приймати будь-які позитивні значення. Однорідна матриця перетворення являє собою матрицю розмірністю  $4 \times 4$ , яка перетворить вектор, виражений в однорідних координатах, з однієї системи відліку в іншу:  $\vec{P}_{XYZ} = T \vec{P}_{UVW}$ .

Вона може бути розбита на 4 підматриці: поворот, зрушення, перетворення перспективи та масштабування.

Якщо зсув і перетворення перспективи відсутні, а  $w = 1$ , то матриця  $T$  являє собою однорідну матрицю повороту. Однорідні матриці елементарних поворотів:

$$T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{z,\Theta} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Однорідна матриця елементарного зрушення:

$$T_{cde} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ліва нижня підматриця однорідної матриці перетворення розмірністю  $1 \times 3$  визначає перетворення перспективи, що використовується в задачах машинного зору і при калібруванні зображень. У робототехніці елементи цієї підматриці зазвичай приймаються нульовими. Однорідна матриця композиції перетворень може бути отримана шляхом перемноження однорідних матриць елементарних поворотів і зсувів. При цьому використовуються наступні правила:

– якщо рухома система координат UVW робить поворот або поступальне переміщення відносно однієї з осей системи XYZ, відповідну матрицю елементарного повороту потрібно помножити зліва на матрицю попереднього результуючого повороту;

– якщо рухома система координат UVW робить поворот або поступальне переміщення відносно однієї зі своїх власних осей, відповідну матрицю елементарного повороту потрібно помножити справа на матрицю попереднього результуючого повороту.

### Приклад

Визначити однорідну матрицю перетворення, що задає наступну послідовність: поворот на кут  $\alpha$  навколо осі OX, зрушення на  $a$  одиниць вздовж осі OX, зрушення на  $d$  одиниць уздовж осі OZ і потім поворот на кут  $\Theta$  навколо осі OZ.

$$T = T_{z,\Theta} T_{z,d} T_{x,a} T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\cos \alpha \sin \Theta & \sin \alpha \sin \Theta & a \cos \Theta \\ \sin \Theta & \cos \alpha \cos \Theta & -\sin \alpha \cos \Theta & a \sin \Theta \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Якщо системи координат OUVW і OXYZ зв'язати з ланками маніпулятора, наприклад з  $i$ -ю та  $(i-1)$ -ю, то система координат  $(i-1)$ -ї ланки буде абсолютною системою, а  $i$ -ї – рухомою. Використовуючи матрицю  $T$ , ми за відомими координатами  $p_i$  нерухомої щодо  $i$ -ї ланки точки  $p$  в системі OUVW  $i$ -ї ланки можемо отримати координати цієї точки в системі координат OXYZ, пов'язаній з  $(i-1)$ -ю ланкою.

## Лекція 6. Пряма задача кінематики

Ланки роботів зазвичай з'єднані зчленуваннями з одним ступенем свободи: обертальними або поступальними. Для опису обертальних і поступальних зв'язків між суміжними ланками Денавіт і Хантенберг запропонували матричний метод послідовної побудови систем координат, пов'язаних з кожною ланкою кінематичного кола [4]. Сенса представлення Денавіта-Хартенберга полягає у формуванні однорідної матриці перетворення розмірністю  $4 \times 4$  і описує положення системи кожної ланки щодо системи ко-

ординат попередньої ланки. Це дає можливість послідовно перетворити координати робочого органа маніпулятора з системи відліку, пов'язаної з останньою ланкою, в базову систему відліку, яка є інерціальною системою координат.

Крім базової системи  $(x_0, y_0, z_0)$  для кожної ланки на осі її зчленування визначається система координат  $(x_i, y_i, z_i)$ , де  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – число ступенів свободи маніпулятора. Кожна система координат  $(x_i, y_i, z_i)$  відповідає  $(i+1)$ -у зчленуванню і пов'язана з  $i$ -ю ланкою. Кожна система координат формується на основі наступних правил:

1. Вісь  $Z_{i-1}$  спрямована вздовж осі  $i$ -го зчленування.
2. Вісь  $X_i$  перпендикулярна осі  $X_{i-1}$  і спрямована від неї.
3. Вісь  $Y_i$  доповнює осі  $X_i$  і  $Z_i$  до правої системи координат.

Нульова і  $n$ -а системи координат можуть бути обрані довільним чином, за умови, що вісь  $Z_0$  спрямована уздовж осі першого зчленування, а вісь  $X_n$  перпендикулярна осі  $Z_{n-1}$ .

На рис. 6.1 зображено розташування систем координат ланок трьохланкового маніпулятора.

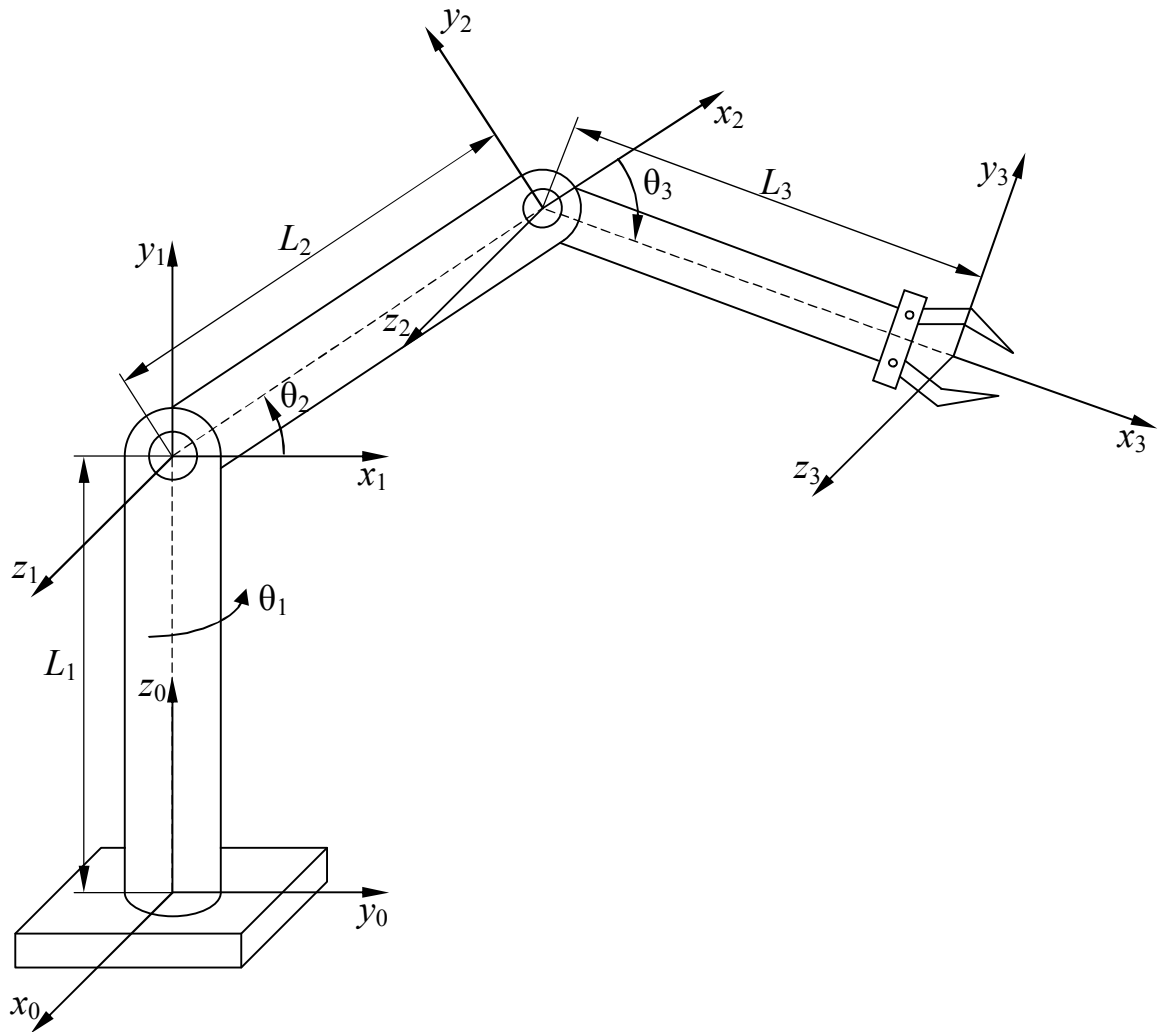


Рис. 6.1. Розташування систем координат ланок маніпулятора

Положення пов'язаних систем координат описується за допомогою чотирьох параметрів:  $a_i$  – найкоротша відстань між  $z_i$  і  $z_{i-1}$ ;  $\alpha_i$  – кут між  $z_i$  і  $z_{i-1}$  (навколо  $x_i$ );  $d_i$  – найкоротша відстань між  $x_i$  і  $x_{i-1}$ ;  $\theta_i$  – кут між  $x_i$  та  $x_{i-1}$  (навколо  $z_{i-1}$ ). Значення параметрів для маніпулятора, зображеного на рис. 1, наведені в таблиці 1.

Таблиця 6.1

Параметри трьохланкового маніпулятора

$i$	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$90^\circ$	$L_1$	$\theta_1$
2	$L_2$	0	0	$\theta_2$
3	$L_3$	0	0	$\theta_3$

Якщо ланки з'єднані обертальним зчленуванням, то кут  $\theta_i$  є змінною величиною. Якщо поступальним – то змінною є  $d_i$ .

Координати довільної точки в  $i$ -й системі координат можна перетворити в координати цієї ж точки в  $(i-1)$ -й системі, виконавши наступну послідовність операцій:

1. Поворот навколо осі  $z_{i-1}$  на кут  $\theta_i$ , щоб вісь  $x_{i-1}$  стала співспрямована з віссю  $x_i$ .
2. Зрушення уздовж осі  $z_{i-1}$  на відстань  $d_i$ , щоб поєднати  $x_{i-1}$  і  $x_i$ .
3. Зрушення уздовж осі  $x_i$  на відстань  $a_i$ , щоб поєднати початку координат.
4. Поворот навколо осі  $x_i$  на кут  $\alpha_i$ , в результаті якого досягається збіг систем координат.

Кожну з цих операцій можна представити однорідною матрицею елементарного повороту чи зсуву, а добуток таких матриць дасть однорідну матрицю складного перетворення для суміжних систем координат:

$${}^{i-1}A_i = T_{z,\theta} T_{z,d} T_{x,a} T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Однорідна матриця  ${}^0T_i$ , що визначає положення  $i$ -ї системи координат відносно базової являє собою добуток послідовності однорідних матриць перетворення:

$${}^0T_i = {}^0A^1 A^2 \dots A^{i-1} A_i = \prod_{j=1}^i {}^{j-1}A_j = \begin{bmatrix} {}^0R_i & {}^0P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де  ${}^0R_i$  – матриця, що визначає орієнтацію  $i$ -ї системи координат по відношенню до базової;  ${}^0P_i$  – вектор, що з'єднує початки базової та  $i$ -ї систем координат.

Пряма задача кінематики полягає у визначенні положення і орієнтації робочого органа (схвата) маніпулятора відносно абсолютної системи координат. Її розв'язання зводиться до визначення так званої «матриці маніпулятора» шляхом перемноження матриць перетворення систем координат суміжних ланок:

$$T = {}^0T_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} & & \\ & {}^0R_i & \\ & & \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} & & \\ & 0 & \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \\ \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix},$$

де  ${}^0R_i$  – матриця повороту, що описує орієнтацію схвата у просторі;  $x, y, z$  – координати схвата.

## Лекція 7. Зворотна задача кінематики

Зворотна задача кінематики полягає у визначенні приєднаних координат ланок маніпулятора, що забезпечують задане положення та орієнтацію схвата у просторі. Приєднаними координатами називають відносні кутові та лінійні переміщення ланок. Якщо ланки з'єднані між собою поворотним зчленуванням, приєднаною змінною є кут їх відносного повороту  $\theta_i$ , а якщо поступальним – їх відносне поступальне переміщення  $d_i$ . Початковими даними для зворотної задачі кінематики є:

- конфігурація маніпулятора;
- положення та орієнтація схвата у просторі;
- припустимі помилки положення та орієнтація схвата.

Розглянемо розв'язання зворотної задачі кінематики на прикладі трьохланкового маніпулятора (рис. 1). Оскільки маніпулятор має всього 3 ступеня вільності, його орієнтація повністю залежить від положення. Тому, в даному випадку початковими даними є: конфігурація маніпулятора, задана параметрами  $a_i, \alpha_i, d_i, i=1..n, n=3$ ; потрібні координати схвата  $x_r, y_r, z_r$  (від англ. "required" – потрібний); припустимі помилки положення схвата за координатами  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ .

Необхідно визначити кути повороту ланок  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , при яких координати схвата  $x, y, z$  відрізняються від заданих не більше, ніж на величини при-

пустимих помилок. Таким чином, вектор приєднаних координат  $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3)^T$  повинен задовольняти наступній умові:

$$(|x(\boldsymbol{\theta}) - x_r| < \varepsilon_x) \wedge (|y(\boldsymbol{\theta}) - y_r| < \varepsilon_y) \wedge (|z(\boldsymbol{\theta}) - z_r| < \varepsilon_z), \quad (7.1)$$

де координати схвата  $x(\boldsymbol{\theta})$ ,  $y(\boldsymbol{\theta})$  і  $z(\boldsymbol{\theta})$  визначаються в процесі розв'язання прямої задачі кінематики для кінематичної схеми (рис. 1):

$$x(\boldsymbol{\theta}) = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1; \quad (7.2)$$

$$y(\boldsymbol{\theta}) = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1; \quad (7.3)$$

$$z(\boldsymbol{\theta}) = L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3). \quad (7.4)$$

Для визначення необхідних кутів  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  і  $\theta_3$  найбільш зручно використовувати метод градієнтного спуску. Суть даного методу зводиться до пошуку мінімуму критерія оптимізації

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} ((x(\boldsymbol{\theta}) - x_t)^2 + (y(\boldsymbol{\theta}) - y_t)^2 + (z(\boldsymbol{\theta}) - z_t)^2) = \min \quad (7.5)$$

шляхом зміни координат вектора  $\boldsymbol{\theta}$  (кутів повороту ланок) у циклі за наступним алгоритмом:

$$\theta_i := \theta_i - \gamma_i \frac{\partial J}{\partial \theta_i}, \quad (7.6)$$

де  $i$  – номер ланки;  $\gamma_i$  – ітераційний коефіцієнт. Пошук мінімуму критерія  $J$  методом градієнтного спуску проілюстровано на рис. 7.1.

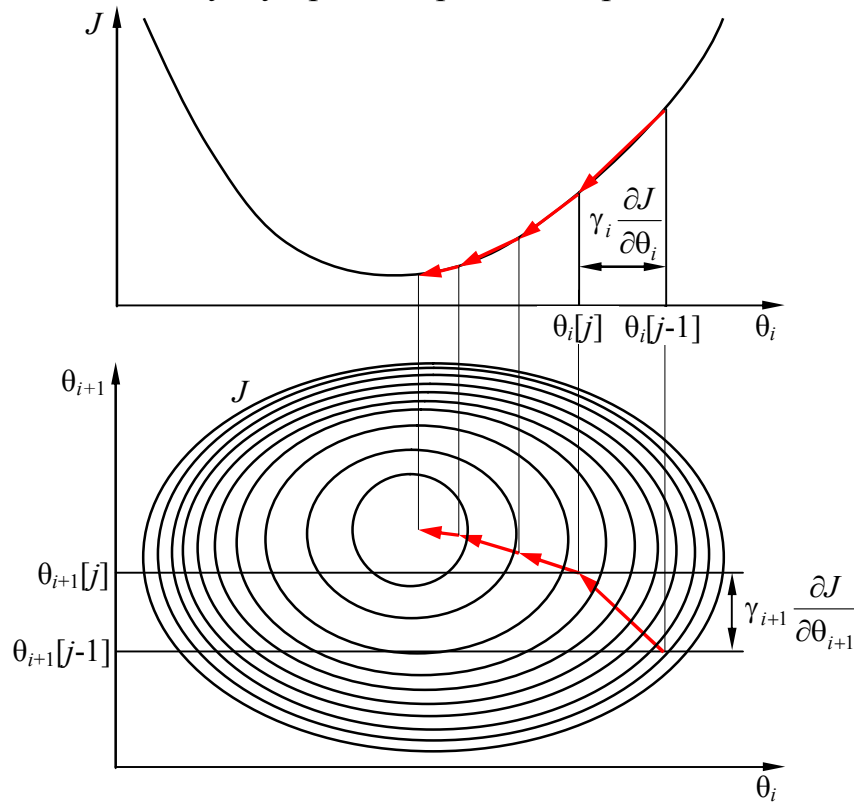


Рис. 7.1. Пошук мінімуму критерія оптимізації кутів повороту ланок

Враховуючи (2) – (6), алгоритм зміни кутів  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  і  $\theta_3$  для маніпулятора (рис. 6.1), визначається наступною послідовністю операцій присвоєння:

$$\theta_1 := \theta_1 - \gamma_1 \cdot \left( (x - x_r) \frac{\partial x}{\partial \theta_1} + (y - y_r) \frac{\partial y}{\partial \theta_1} + (z - z_r) \frac{\partial z}{\partial \theta_1} \right); \quad (7.7)$$

$$\theta_2 := \theta_2 - \gamma_2 \cdot \left( (x - x_r) \frac{\partial x}{\partial \theta_2} + (y - y_r) \frac{\partial y}{\partial \theta_2} + (z - z_r) \frac{\partial z}{\partial \theta_2} \right); \quad (7.8)$$

$$\theta_3 := \theta_3 - \gamma_3 \cdot \left( (x - x_r) \frac{\partial x}{\partial \theta_3} + (y - y_r) \frac{\partial y}{\partial \theta_3} + (z - z_r) \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \right), \quad (7.9)$$

де

$$\frac{\partial x}{\partial \theta_1} = -(L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1;$$

$$\frac{\partial x}{\partial \theta_2} = -(L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1; \quad \frac{\partial x}{\partial \theta_3} = -L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1;$$

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_1} = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1;$$

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_2} = -(L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1; \quad \frac{\partial y}{\partial \theta_3} = -L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1;$$

$$\frac{\partial z}{\partial \theta_1} = 0; \quad \frac{\partial z}{\partial \theta_2} = L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3); \quad \frac{\partial z}{\partial \theta_3} = L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3).$$

Таким чином, розв'язання зворотної задачі кінематики зводиться до наступного: спочатку кутам  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  і  $\theta_3$  присвоюються довільні значення, а потім вони змінюються в циклі за алгоритмом (7.7) – (7.9), доки не задовольняють умові (7.1). Ітераційні коефіцієнти  $\gamma_i$  впливають на швидкість та стійкість розрахунку. Якщо значення цих коефіцієнтів обрати занадто малими, процес розрахунку буде дуже довгим, а якщо великими – обчислювання буде розбіжним, і задачу взагалі не буде розв'язано (прикладі процесу, що збігається, та розбіжного процесу проілюстровано на рис. 7.2 а і б відповідно). Тому, для кожного окремого випадку ітераційні коефіцієнти треба підбирати індивідуально.

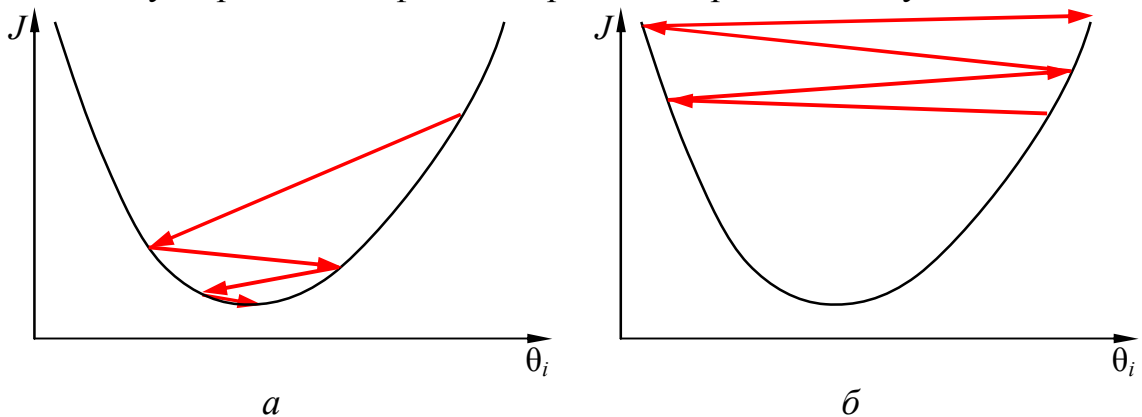


Рис. 7.2. Пошук мінімуму: а – процес, що збігається; б – розбіжний процес.



Як правило, рішення зворотної задачі кінематики не є однозначним: існують декілька комбінацій значень кутів  $\theta_1, \theta_2$  і  $\theta_3$ , при яких схват знаходиться в одній і тій самій точці (рис. 7.3).

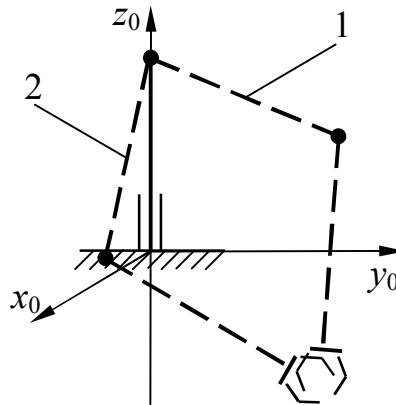


Рис. 7.3. Два варіанти розв'язання зворотної задачі кінематики для однієї точки траєкторії схвату

Але майже завжди один з варіантів є зайвим, оскільки він не задовольняє вимогам фізичної реалізації (на рис. 4 варіант 2). Для того, щоб уникнути зайвих рішень, необхідно на початку розв'язання задачі задавати довільні значення кутів  $\theta_1, \theta_2$  і  $\theta_3$  якомога ближчими до очікуваних результатів. Після отримання рішення необхідно накреслити кінематичну схему маніпулятора у відповідному положенні і перевірити, чи підходить дана комбінація кутів з точки зору фізичної реалізації.

## Лекція 8. Планування траєкторії маніпулятора

Задача планування траєкторії маніпулятора полягає у визначенні законів зміни у часі приєднаних змінних, що забезпечують задану траєкторію схвату.

Траєкторія схвату задається у вигляді координат контрольних точок, через які повинен пройти схват і моментів часу їх проходження. Звичайно задаються 4 точки: початкова точка, точка уходу, точка підходу і кінцева точка [3].

Існує два підходи до планування траєкторії маніпулятора: у декартових та у приєднаних координатах. Планування у декартових координатах полягає в тому, що спочатку виконується інтерполяція законів зміни у часі координат схвату  $x(t), y(t), z(t)$ , а потім, для кожного моменту часу визначаються приєднані координати  $q_i(t)$ ,  $i = 1..n$  шляхом розв'язання зворотної задачі кінематики (рис. 8.1, а).

При плануванні у приєднаних координатах спочатку здійснюється розв'язання зворотної задачі кінематики для контрольних точок траєкторії, в результаті чого визначаються 4 значення кожної приєднаної координати:

$q_i(t_0)$ ,  $q_i(t_1)$ ,  $q_i(t_2)$ ,  $q_i(t_3)$ , де  $t_0..t_3$  – моменти часу проходження контрольних точок. Потім, шляхом інтерполяції визначаються неперервні функції  $q_i(t)$ , що являють собою закони зміни у часі приєднаних координат маніпулятора (рис. 8, б).

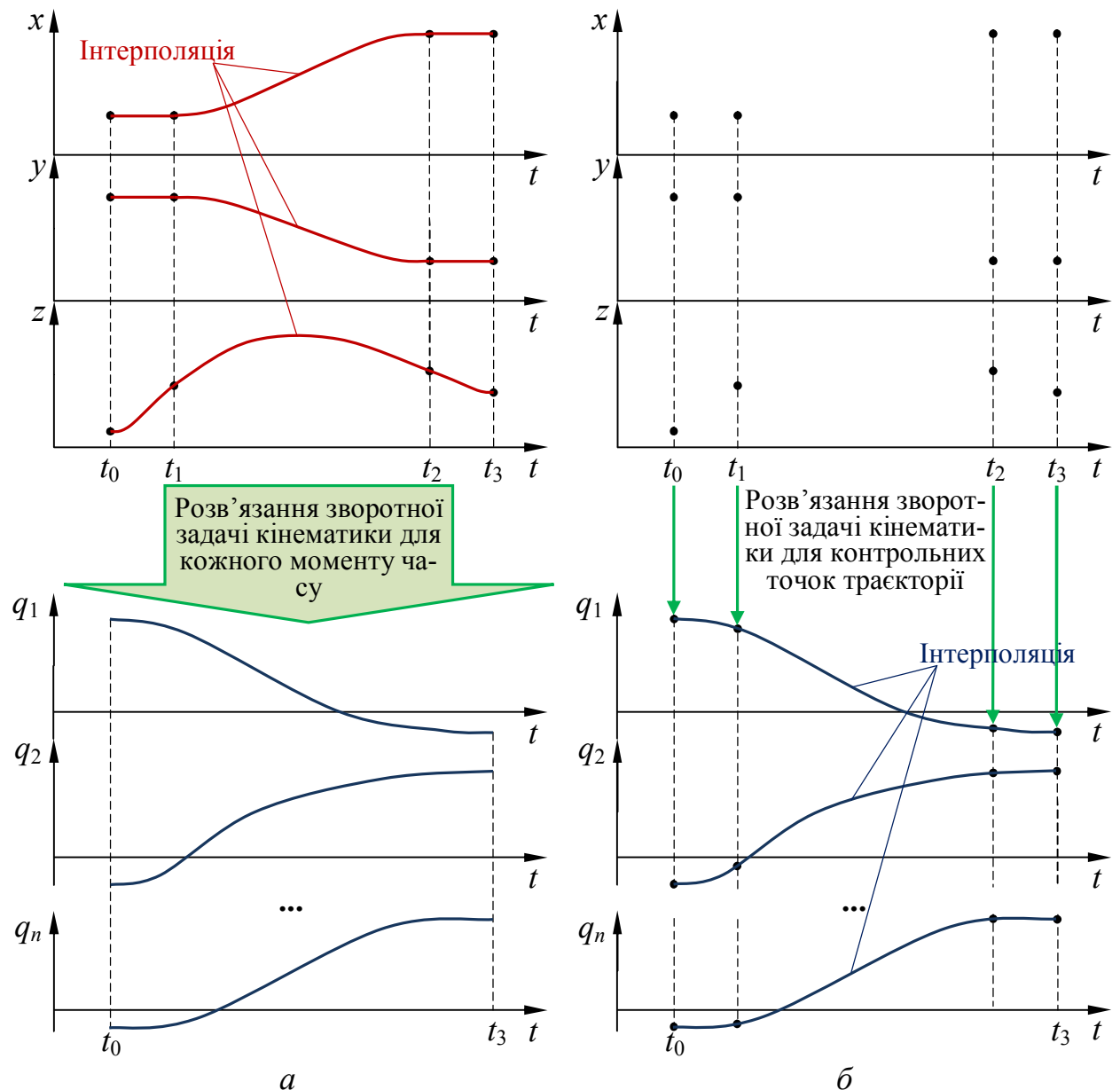


Рис. 8. Два підходи до планування траєкторії маніпулятора:  
а – в декартових координатах; б – у приєднаних координатах.

Перевагою другого підходу є те, що зворотна задача кінематики розв'язується всього 4 рази, тому процес планування траєкторії виконується швидко і може здійснюватись в режимі реального часу. Тому цей підхід є більш розповсюдженим.

Інтерполяція законів зміни у часі приєднаних координат здійснюється, виходячи з наступних міркувань. В моменти часу  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  приєднані координати повинні приймати значення, визначені в результаті розв'язання зво-

ротної задачі кінематики для контрольних точок траєкторії. Задані значення  $q_i(t_0)$ ,  $q_i(t_1)$ ,  $q_i(t_2)$ ,  $q_i(t_3)$  – це перші 4 умови, що висуваються до інтерполюючої функції. Оскільки розгін та гальмування ланок повинні здійснюватись плавно, їх швидкість та прискорення в початковій та кінцевій точках траєкторії повинні бути нульовими:

$$\dot{q}_i(t_0) = 0; \ddot{q}_i(t_0) = 0; \dot{q}_i(t_3) = 0; \ddot{q}_i(t_3) = 0. \quad (8.1) - (8.4)$$

Рівняння (8.1) – (8.4) є додатковими 4-ма умовами. Таким чином, інтерполююча функція повинна задовольняти 8 умовам.

Якщо для інтерполяції використовувати звичайний поліном, він повинен мати відповідно 8 коефіцієнтів, тобто ступінь полінома повинен бути 7. Але такий спосіб не використовується через виникнення "биття" інтерполюючої функції, обумовлене великим значенням ступеня поліному (рис. 8.2).

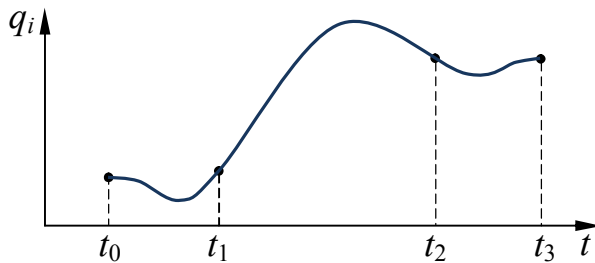


Рис. 8.2. "Биття" інтерполюючого поліному високого ступеня

Для інтерполяції залежностей, які задані великим числом точок, або для яких сформульовано багато додаткових умов (задані значення першої та другої похідних у точках), звичайно використовуються сплайн-функції [3]. Сплайн-функція представляє собою послідовність поліномів низького ступеня (поліноміальних сплайнів),

кожен з яких описує її поведінку на певному інтервалі значень аргументу.

Траєкторія маніпулятора містить 3 інтервали (між контрольними точками), тому інтерполююча функція повинна складатися з 3-х сплайнів (рис. 8.3). Для забезпечення плавності руху, швидкість та прискорення повинні бути неперервними. Тому, в точках спряження двох сусідніх сплайнів  $t_1$  і  $t_2$  повинна виконуватись умова неперервності першої та другої похідних:

$$\dot{q}_i(t_1^+) = \dot{q}_i(t_1^-); \ddot{q}_i(t_1^+) = \ddot{q}_i(t_1^-); \dot{q}_i(t_2^+) = \dot{q}_i(t_2^-); \ddot{q}_i(t_2^+) = \ddot{q}_i(t_2^-). \quad (8.5) - (8.8)$$

4 умови (8.5) – (8.8) додаються до попередніх умов, що висуваються до інтерполюючої функції. Крім того, задане значення  $q_i(t_1)$  утворює 2 умови, оскільки належить до двох сплайнів одночасно: кінець першого та початок другого. Так само,  $q_i(t_2)$  є одночасно кінцем другого та початком першого сплайнів. Таким чином, сплайн-функція повинна задовольняти 14 умовам: Задані значення крайніх точок 3-х сплайнів (6 умов), 4 умови нульових швидкостей та прискорень у початковій та кінцевій точках траєкторії (8.1) – (8.4) і 4 умови неперервності швидкостей та прискорень у проміжних точках (8.5) – (8.8).

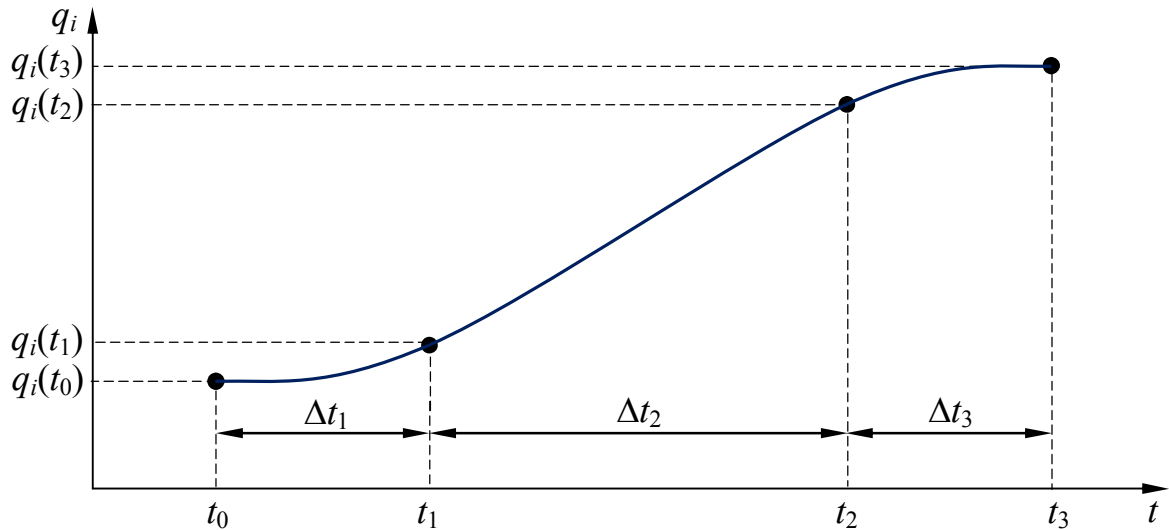


Рис. 8.3. Інтерполяція сплайн-функцією

Виходячи з цього, сплайн-функція повинна мати 14 коефіцієнтів. Цій умові відповідає функція "4 – 3 – 4", що складається з 2-х поліномів 4-го та одного поліному 3-го порядків:

$$q_i(t) = \begin{cases} a_{14_i} \cdot (t - t_0)^4 + a_{13_i} \cdot (t - t_0)^3 + a_{12_i} \cdot (t - t_0)^2 + \\ + a_{11_i} \cdot (t - t_0) + a_{10_i} \text{ при } t_0 \leq t \leq t_1; \\ a_{23_i} \cdot (t - t_1)^3 + a_{22_i} \cdot (t - t_1)^2 + a_{21_i} \cdot (t - t_1) + a_{20_i} \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2; \\ a_{34_i} \cdot (t - t_2)^4 + a_{33_i} \cdot (t - t_2)^3 + a_{32_i} \cdot (t - t_2)^2 + \\ + a_{31_i} \cdot (t - t_2) + a_{30_i} \text{ при } t_2 \leq t \leq t_3, \end{cases} \quad (8.9)$$

де  $a_{14_i} \dots a_{30_i}$  – коефіцієнти сплайн-функції (в індексі перша цифра – номер сплайна, друга – ступінь, при якій стоїть коефіцієнт).

Перша та друга похідні сплайн-функції:

$$\dot{q}_i(t) = \begin{cases} 4a_{14_i} \cdot (t - t_0)^3 + 3a_{13_i} \cdot (t - t_0)^2 + 2a_{12_i} \cdot (t - t_0) + a_{10_i} \text{ при } t_0 \leq t \leq t_1; \\ 3a_{23_i} \cdot (t - t_1)^2 + 2a_{22_i} \cdot (t - t_1) + a_{21_i} \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2; \\ 4a_{34_i} \cdot (t - t_2)^3 + 3a_{33_i} \cdot (t - t_2)^2 + 2a_{32_i} \cdot (t - t_2) + a_{31_i} \text{ при } t_2 \leq t \leq t_3; \end{cases} \quad (8.10)$$

$$\ddot{q}_i(t) = \begin{cases} 12a_{14_i} \cdot (t - t_0)^2 + 6a_{13_i} \cdot (t - t_0) + 2a_{12_i} \text{ при } t_0 \leq t \leq t_1; \\ 6a_{23_i} \cdot (t - t_1) + 2a_{22_i} \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2; \\ 12a_{34_i} \cdot (t - t_2)^2 + 6a_{33_i} \cdot (t - t_2) + 2a_{32_i} \text{ при } t_2 \leq t \leq t_3. \end{cases} \quad (8.11)$$

14 коефіцієнтів  $a_{14_i} \dots a_{30_i}$  визначаються шляхом розв'язання рівнянь, складених на основі зазначених вище 14 умов, що висувуються до сплайн-функції. Складемо ці рівняння.

Розглянемо початкову точку траєкторії. Підставляємо  $t = t_0$  у перший сплайн (8.9):

$$a_{10_i} = q_i(t_0).$$

Для цієї точки повинні також виконуватись умови нульових швидкостей та прискорень (8.1), (8.2). Підставляємо  $t = t_0$  у перший сплайн (8.10) та (8.11) і прирівнюємо їх до нуля. Звідси визначаємо:

$$a_{11_i} = 0; \quad a_{12_i} = 0.$$

Розглянемо точку відходу. Підставляємо  $t = t_1$  у перший сплайн (8.9), з урахуванням, що  $t_1 - t_0 = \Delta t_1$ :

$$a_{14_i} \Delta t_1^4 + a_{13_i} \Delta t_1^3 + a_{12_i} \Delta t_1^2 + a_{11_i} \Delta t_1 + a_{10_i} = q_i(t_1). \quad (8.12)$$

Ця точка належить також до другого сплайну, тому підставляємо  $t = t_1$  у другий сплайн (8.9):

$$a_{20_i} = q_i(t_1).$$

Для даної точки повинні виконуватись умови неперервності першої та другої похідної (8.5), (8.6). Прирівнюємо перший та другий сплайни (8.10), підставивши в них  $t = t_1$ :

$$4a_{14_i} \Delta t_1^3 + 3a_{13_i} \Delta t_1^2 + 2a_{12_i} \Delta t_1 + a_{11_i} = a_{21_i}. \quad (8.13)$$

Аналогічно, прирівнюємо перший та другий сплайни (8.11):

$$12a_{14_i} \Delta t_1^2 + 6a_{13_i} \Delta t_1 + 2a_{12_i} = 2a_{22_i}. \quad (8.14)$$

Виконуємо аналогічні дії для точки підходу. Підставляємо  $t = t_2$  у другий сплайн (8.9), з урахуванням, що  $t_2 - t_1 = \Delta t_2$ :

$$a_{23_i} \Delta t_2^3 + a_{22_i} \Delta t_2^2 + a_{21_i} \Delta t_2 + a_{20_i} = q_i(t_2). \quad (8.15)$$

Підставляємо  $t = t_2$  у третій сплайн (8.9):

$$a_{30_i} = q_i(t_2).$$

Прирівнюємо перший та другий сплайни (8.10) та (8.11), підставивши в них  $t = t_2$ :

$$3a_{23_i} \Delta t_2^2 + 2a_{22_i} \Delta t_2 + a_{21_i} = a_{31_i}; \quad (8.16)$$

$$6a_{23_i} \Delta t_2 + 2a_{22_i} = 2a_{32_i}. \quad (8.17)$$

Для кінцевої точки траєкторії виконуємо такі самі дії, що і для початкової, підставляючи  $t = t_3$  у третій сплайн (8.9) – (8.11):

$$a_{34_i} \Delta t_3^4 + a_{33_i} \Delta t_3^3 + a_{32_i} \Delta t_3^2 + a_{31_i} \Delta t_3 + a_{30_i} = q_i(t_3); \quad (8.18)$$

$$4a_{34_i} \Delta t_3^3 + 3a_{33_i} \Delta t_3^2 + 2a_{32_i} \Delta t_3 + a_{31_i} = 0; \quad (8.19)$$

$$12a_{34_i} \Delta t_3^2 + 6a_{33_i} \Delta t_3 + 2a_{32_i} = 0. \quad (8.20)$$

Таким чином, ми визначили коефіцієнти  $a_{10_i}$ ,  $a_{11_i}$ ,  $a_{12_i}$ ,  $a_{20_i}$ ,  $a_{30_i}$  і склали рівняння (8.12) – (8.20) для визначення останніх 9 коефіцієнтів. У цих

рівняннях переносимо вже відомі коефіцієнти до правої частини і записуємо отриману систему рівнянь у матричному вигляді:

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{B}, \quad (8.21)$$

де

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \Delta t_1^4 & \Delta t_1^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4\Delta t_1^3 & 3\Delta t_1^2 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12\Delta t_1^2 & 6\Delta t_1 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t_2^3 & \Delta t_2^2 & \Delta t_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\Delta t_2^2 & 2\Delta t_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 6\Delta t_2 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta t_3^4 & \Delta t_3^3 & \Delta t_3^2 & \Delta t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\Delta t_3^3 & 3\Delta t_3^2 & 2\Delta t_3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12\Delta t_3^2 & 6\Delta t_3 & 2 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = (a_{14_i} \quad a_{13_i} \quad a_{23_i} \quad a_{22_i} \quad a_{21_i} \quad a_{34_i} \quad a_{33_i} \quad a_{32_i} \quad a_{31_i})^T;$$

$$\mathbf{B} = ((q_i(t_1) - q_i(t_0)) \quad 0 \quad 0 \quad (q_i(t_2) - q_i(t_1)) \quad 0 \quad 0 \quad (q_i(t_3) - q_i(t_2)) \quad 0 \quad 0)^T.$$

Розв'язання системи (8.21) матричним методом:

$$\mathbf{A} = \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{B}.$$

Таким чином, планування траєкторії маніпулятора здійснюється шляхом розв'язання зворотної задачі кінематики та інтерполяції законів зміни приєднаних координат у часі. Визначені функції  $q_i(t)$  є сигналами завдання для керуючих приводів ланок маніпулятора.

## Лекція 9. Структурна схема системи управління ланкою маніпулятора

Оскільки ланки маніпулятора необхідно позиціювати з високою точністю, система керування їх рухом повинна бути побудована за принципом відхилення керованої величини. Для забезпечення необхідних показників якості керування доцільно окрім головного зворотного зв'язку використовувати також місцевий зворотний зв'язок за швидкістю [5]. Вимірювати кут повороту ланки можна за допомогою вбудованого у вентильний двигун датчика положення ротора, а кутову швидкість – визначати шляхом диференціювання кута за часом. Таким чином, складаємо функціональну схему системи автоматичного керування кутом повороту ланки маніпулятора (рис. 9.1).

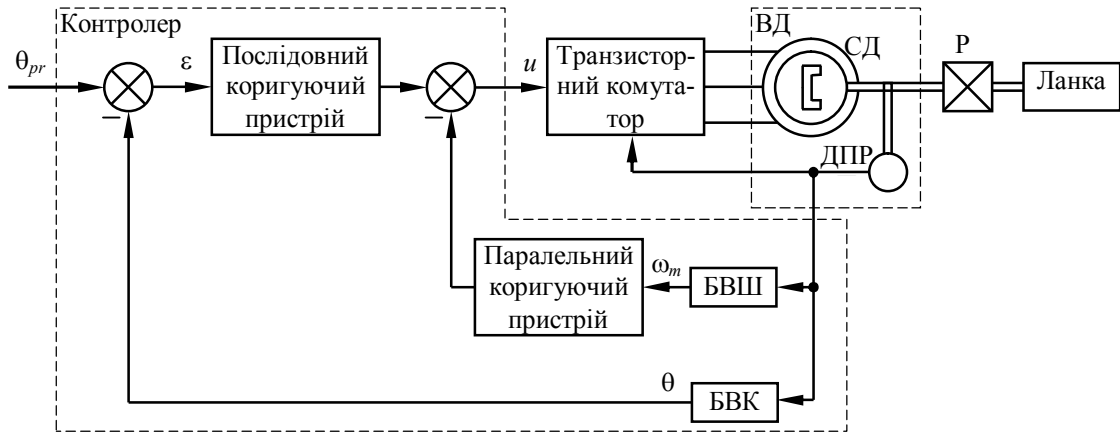


Рис. 9.1. Функціональна схема системи автоматичного керування кутом повороту ланки маніпулятора

На схемі прийнято наступні позначення: ВД – вентильний двигун, до складу якого входить синхронний двигун СД зі збудженням від постійних магнітів і датчик положення ротора ДПР; БВШ – блок визначення швидкості обертання двигуна  $\omega_m$ ; БВК – блок визначення повороту ланки  $\theta$ ; Р – редуктор;  $\theta_{pr}$  – програмне (приписане) значення кута повороту ланки;  $\epsilon$  – помилка;  $u$  – керуюче діяння (напруга), що подається на двигун.

Приписане значення кута повороту ланки  $\theta_{pr}$  у вигляді цифрового сигналу надходить до керуючого контролера за послідовним інтерфейсом зв'язку від тактичного рівня системи керування роботом. Сигнал датчика положення ротора також надходить до контролера за послідовним інтерфейсом (якщо як ДПР використовується енкодер), або на дискретний вхід через пристрій перетворення сигналу резольвера у сигнал енкодера (якщо як ДПР використовується резольвер). Він несе інформацію про миттєве значення кута повороту ротора двигуна (motor)  $\theta_m$ . В контролері це значення ділиться на передавальне число редуктора  $i_r$  і таким чином визначається кут повороту ланки:

$$\theta(kT) = \theta_m(kT) / i_r,$$

де  $k$  – номер відліку;  $T$  – період дискретизації.

Різниця між приписаним значенням кута повороту ланки та його дійсною величиною є сигналом помилки:

$$\epsilon(kT) = \theta_{pr}(kT) - \theta(kT).$$

Шляхом диференціювання кута повороту ротора двигуна визначається його кутова швидкість:

$$\omega_m(kT) = \frac{\theta_m(kT) - \theta_m((k-1)T)}{T}.$$

Коригуючі пристрої визначають закон керування, за яким в залежності від величини помилки  $\epsilon$  та кутової швидкості  $\omega$  формується керуюче діяння  $u$ , яке подається у вигляді напруги на електродвигун. Таким чином відтворюється заданий рух ланок, що забезпечує необхідну траєкторію схвата.

Особливість вентильного двигуна полягає в тому, що його можна описати такими самими передавальними функціями, що і двигун постійного струму [4]:

$$W_m(p) = \frac{k_m}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}; \quad W_t(p) = \frac{k_t \cdot (T_e p + 1)}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1},$$

де  $W_m(p)$  – передавальна функція двигуна за вхідною напругою;  $W_t(p)$  – передавальна функція двигуна за моментом.

Період дискретизації процесів обробки сигналів у контролері  $T$  як мінімум на порядок менший, ніж найменша з постійних часу двигуна. Тому ці процеси можна розглядати як неперервні, а цифрові коригуючі пристрої описувати звичайними передавальними функціями, що застосовуються для аналогових систем керування.

На підставі функціональної схеми (рис. 9.1) складаємо динамічну структурну схему системи автоматичного керування електроприводом повороту ланки маніпулятора (рис. 9.2).

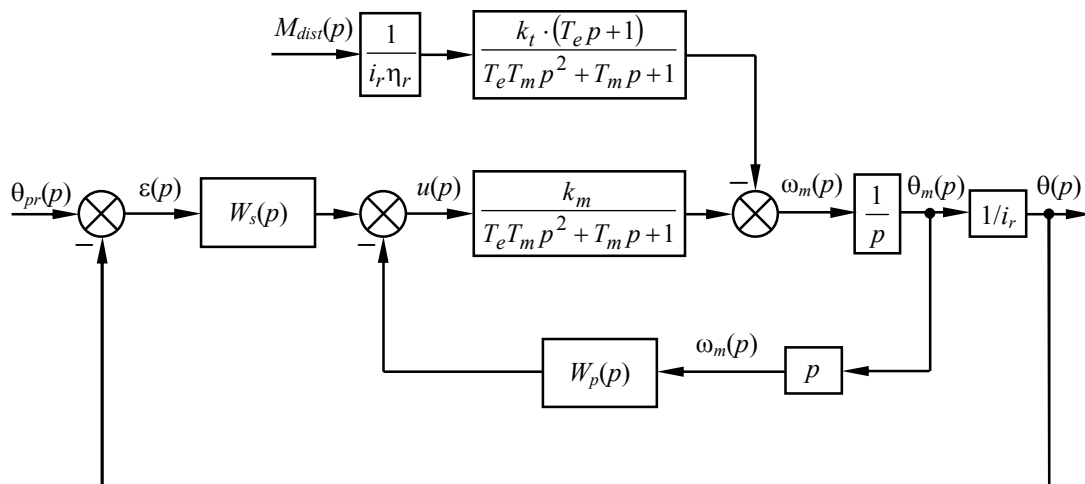


Рис. 9.2. Динамічна структурна схема системи автоматичного керування кутом повороту ланки маніпулятора

На схемі позначено:  $W_s(p)$  – передавальна функція послідовного (serial) коригуючого пристрою;  $W_p(p)$  – передавальна функція паралельного коригуючого пристрою;  $M_{dist}$  – збурюючий (disturbing) момент;  $\omega_m$  – кутова швидкість двигуна.

## Лекція 10. Система керування електроприводами руху ланок маніпулятора з компенсацією моментної складової помилки

На кожен ланку маніпулятора діють зовнішні сили, до яких належать сили ваги  $P$  і сили реакції інших ланок. Обумовлений ними збурюючий момент  $M_{dist}$  створює моментну складову помилки  $\varepsilon_M$  при керуванні перемі-



щенням ланки (рис. 10.1). Це призводить до помилок позиціювання схвата  $\Delta x_M$ ,  $\Delta y_M$ ,  $\Delta z_M$ .

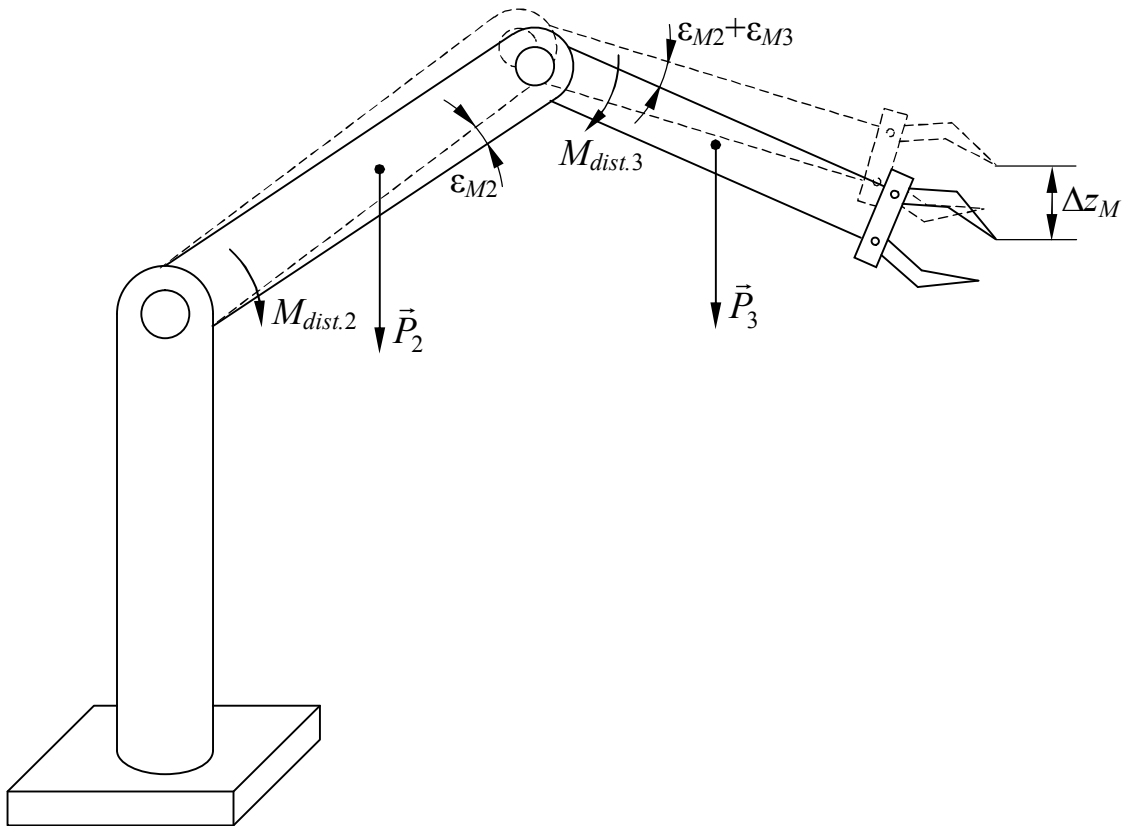


Рис. 10.1. Збурюючі моменти і моментні складові помилок

Зменшення моментної складової помилки можливе шляхом підвищення коефіцієнту підсилення, але при цьому знижується запас стійкості системи. Аналогічно – при підвищенні порядку астатизму. Тому, доцільно використовувати комбінований принцип керування з компенсацією моментної складової помилки, оскільки використання каналу компенсації не впливає на запас стійкості.

Функціональна схема комбінованої системи керування трьома електроприводами ланок маніпулятора наведена на рис. 10.2.

В контролері закладено модель маніпулятора, що дає змогу на підставі поточних значень кутів повороту ланок, їх кутових швидкостей та прискорень обчислити збурюючий момент  $M_{dist}$ , що діє на кожну ланку:

$$M_{dist_i} = f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3), \quad i = 1, 2, 3.$$

Згідно структурній схемі (рис. 9.2), для компенсації збурюючого моменту необхідно подавати на двигун привода додаткову (компенсуючу) напругу  $u_{comp}$ , що забезпечує рівність:

$$u_{comp}(p) \frac{k_m}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1} = M_{dist}(p) \frac{1}{i_r \eta_r} \frac{k_t \cdot (T_e p + 1)}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1},$$

звідки

$$u_{comp}(p) = M_{dist}(p) \frac{k_t}{k_m i_r \eta_r} (T_e p + 1).$$

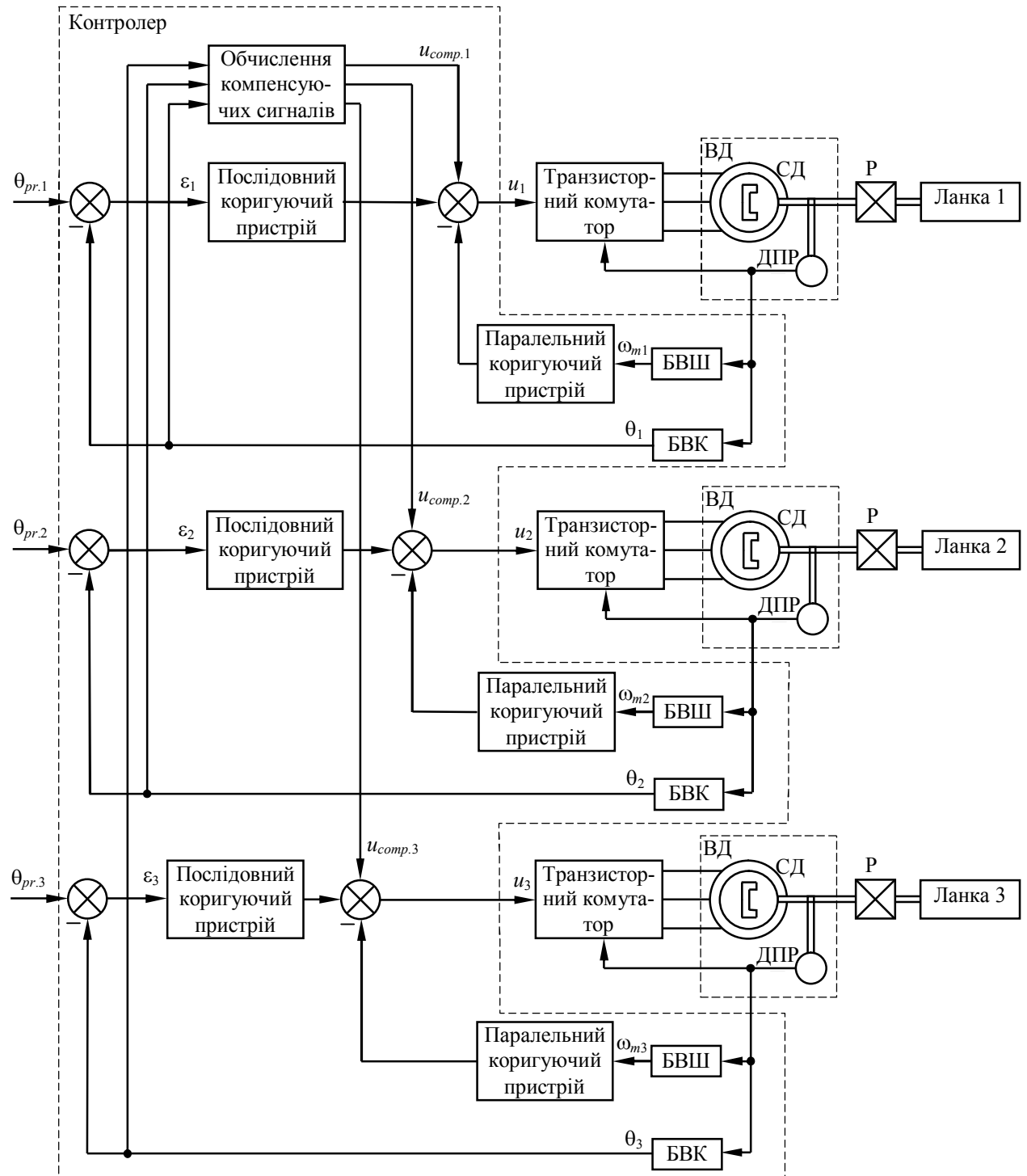


Рис. 10.2. Комбінована система керування ланками маніпулятора

Таким чином, визначення компенсуючого сигналу для кожного привода здійснюється за рівнянням:

$$u_{comp}(t) = \frac{k_t}{k_m i_r \eta_r} \left( T_e \frac{dM_{dist}}{dt} + M_{dist}(t) \right).$$

Динамічна структурна схема комбінованої системи керування електроприводом ланки маніпулятора наведена на рис. 10.3

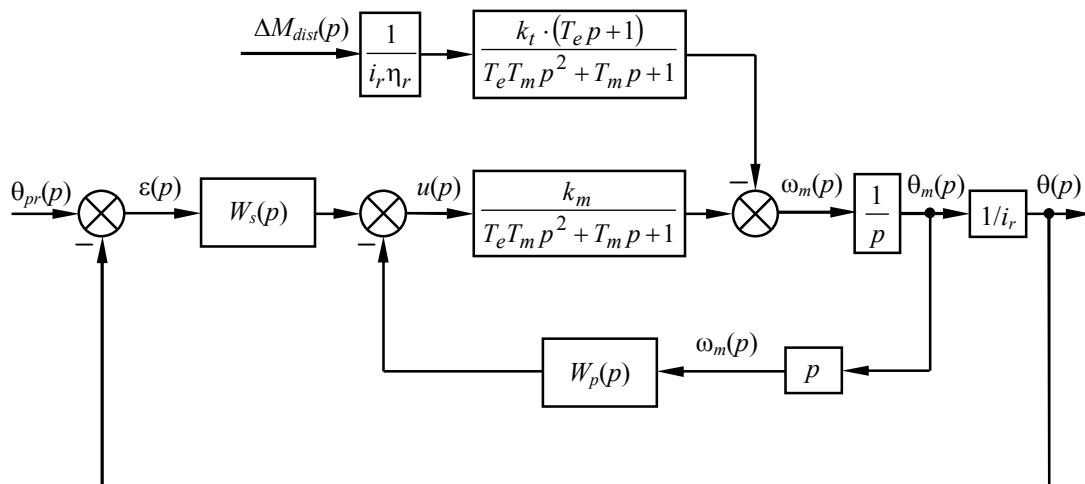


Рис. 10.3. Система автоматичного керування електроприводом повороту ланки маніпулятора з компенсацією збурюючого моменту

Оскільки розрахувати збурюючий момент з абсолютною точністю не вдається, залишається деяка величина моментної складової помилки, обумовлена некомпенсованою частиною збурюючого моменту  $\Delta M_{dist}$  (рис. 10.2). Але ця величина є на один-два порядки меншою в порівнянні з моментною складовою помилки без компенсації.

## Лекція 11. Системи очутливлення роботів

Система очутливлення робота – це інформаційно-вимірювальна система, що забезпечує його взаємодію з об'єктами маніпуляції та навколишнім середовищем. Вона складається з різноманітних датчиків і пристроїв збору, передачі та обробки інформації.

Датчики роботів поділяються на датчики внутрішнього та зовнішнього стану [3]. Датчики внутрішнього стану призначені для формування сигналів у колах зворотних зв'язків за положенням та швидкістю ланок маніпулятора. Зовнішнє очутливлення призначене для керування рухом робота, ідентифікації об'єктів та маніпулювання ними.

Датчики зовнішнього стану поділяються на 3 групи:

- датчики вимірювання в дальній зоні;
- датчики вимірювання в ближній зоні;
- тактильні датчики.

За допомогою **датчиків вимірювання в дальній зоні** визначається відстань від точки відліку до об'єкта, що потрібно для навігації робота і обходу перешкод. В сучасній робототехніці вимірювання відстані в дальній зоні зазвичай здійснюється за допомогою лідарних датчиків (лідарів). Принцип дії лідара полягає у випромінюванні на об'єкт світлових променів, уловлюванні відбитого світла та обчисленні відстані через часовий проміжок між моментами випромінювання та повернення променя.

Лідари поділяються на скануючі та нескануючі. Скануючі лазерні лідари застосовуються в основному для роботи на відносно великих відстанях (десятки – сотні метрів) і коли потрібно отримувати понорамне зображення <https://www.smprobotics.ru/technologies/sistema-upravleniya-dvizheniem-robota/>. До нескануючих лідарів відносяться часопролітні камери (ToF-камери). <https://habr.com/ru/post/224605/> [https://www.baslerweb.com/ru/produkty/kamery/3d-kamery/vremjaproletnaja-kamera/tof640-20gm\\_850nm/](https://www.baslerweb.com/ru/produkty/kamery/3d-kamery/vremjaproletnaja-kamera/tof640-20gm_850nm/)

ToF-камера містить матрицю фотодетекторів, що фіксують момент приходу відбитого світлового променя (рис. 11.1). Кожен фотодетектор має час спрацьовування порядку 0,1 нс. Час польоту променя від випромінювача (emitter) до детектора (detector), отриманий за допомогою таймера (timer) визначає глибину відповідного пікселя (відстань від камери до точки об'єкта, яка відповідає даному пікселю зображення).

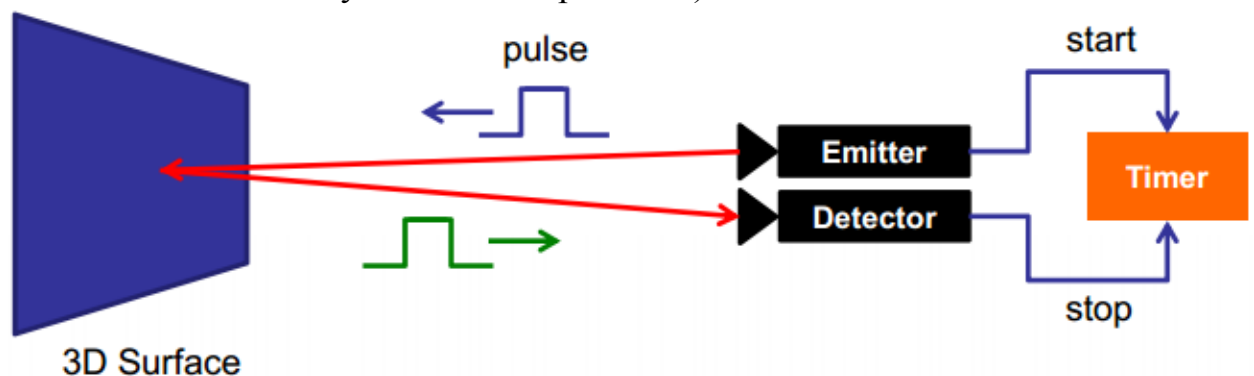


Рис. 11.1. Принцип дії часопролітної камери

Точність визначення відстані становить від кількох міліметрів до сантиметра. Вартість ToF-камери складає порядка 2-3 тис. доларів.

**Датчики вимірювання в ближній зоні** звичайно мають дискретний пороговий сигнал, що визначає наявність об'єкта в межах встановленого простору [3]. Типовим є використання таких датчиків у робототехніці для отримання інформації в ближній зоні при захваті об'єкта або при його обході.

Розповсюджені типи датчиків вимірювання в ближній зоні:

- датчики Хола;
- ємнісні;
- ультразвукові;
- оптичні.

Для реєстрації наближення до феромагнітних об'єктів використовуються датчики Хола (рис. 11.2).

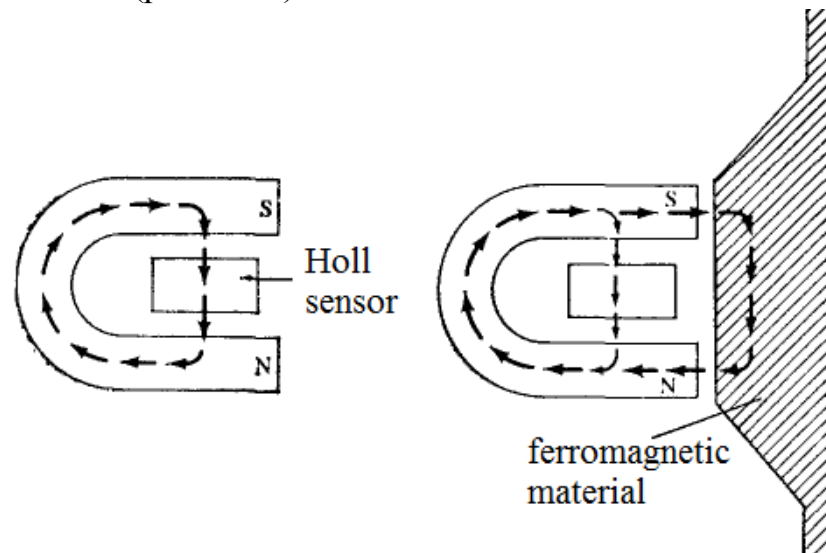


Рис. 11.2. Датчик наявності феромагнетика на основі датчика Хола

Ємнісні датчики, на відміну від датчиків Хола, здатні виявляти будь-які тверді та рідкі матеріали. Типова конструкція ємнісного датчика наведена на рис. 11.3.

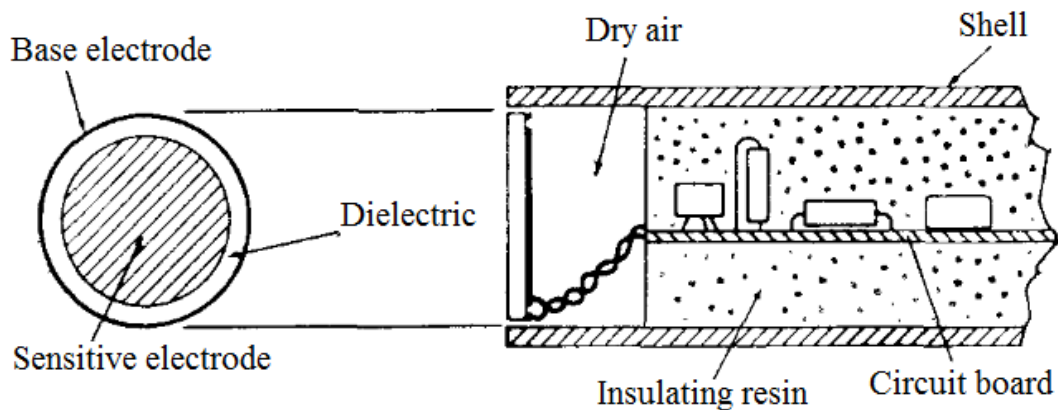


Рис. 11.3. Ємнісний датчик

Для перетворення ємності в напругу часто використовується схема з підсилювачем заряду (рис. 11.4).

[https://www.kit-e.ru/articles/sensor/2006\\_01\\_34.php](https://www.kit-e.ru/articles/sensor/2006_01_34.php)

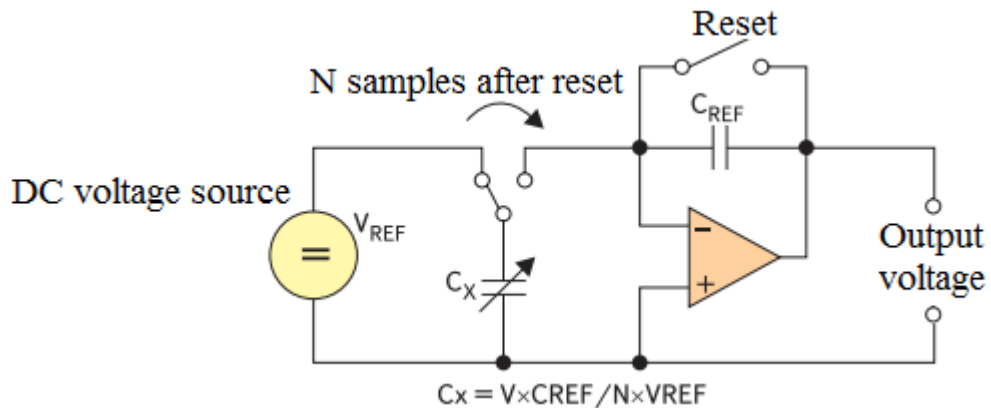


Рис. 11.4. Схема перетворення ємності на напругу

Оскільки різні матеріали мають різну магнітну проникність, чутливість ємнісного датчика залежить від матеріала об'єкта. Наприклад, наближення металевого предмета спричинить більше зростання ємності, ніж полімерного, що наблизився на таку саму відстань (рис. 11.5).

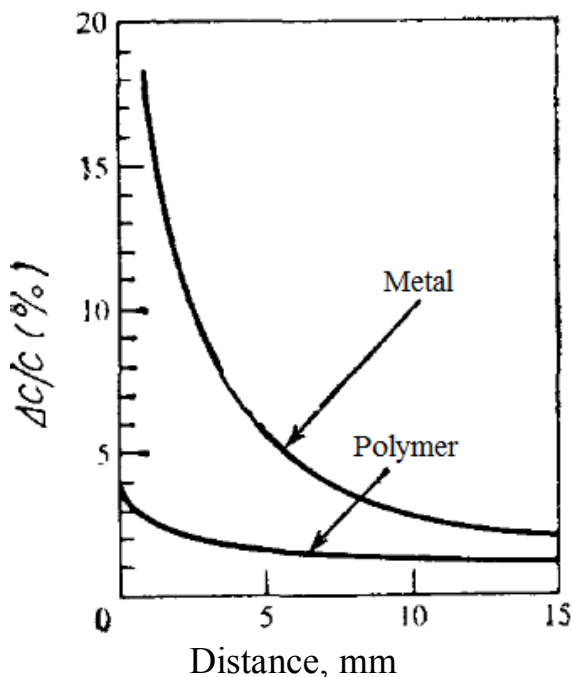


Рис. 11.5. Відносне збільшення ємності датчика в залежності від відстані до об'єкта

При цьому використовується спочатку зворотний, а потім прямий п'єзоефект. Прямий п'єзоефект полягає в тому, що при деформації п'єзокристала він виробляє ЕРС, а зворотний – при подачі на п'єзокристал електричної напруги, він деформується. В ультразвуковому датчику на

Оскільки збільшення відстані призводить до істотного зменшення чутливості, діапазон вимірювань ємнісних датчиків зазвичай становить кілька міліметрів.

Ультразвукові датчики мають значно більший діапазон вимірювання відстані і однаково реагують на об'єкти з різних матеріалів. Конструкція ультразвукового датчика наведена на рис. 11.6. Його головним елементом є п'єзокристал, який випромінює акустичну хвилю, а потім приймає її після відбиття від поверхні об'єкта.

п'єзокристал короткочасно подається змінна напруга ультразвукової частоти (рис. 11.7), і він вібрує з цією частотою, генеруючи акустичну хвилю (зворотний п'єзоефект). Відбита від об'єкта хвиля повертається до п'єзоелемента, викликаючи його вібрування, яке перетворюється ним на змінний електричний сигнал (прямий п'єзоефект). За часовим проміжком між посиленням та прийняттям звукової хвилі визначається відстань до об'єкта.

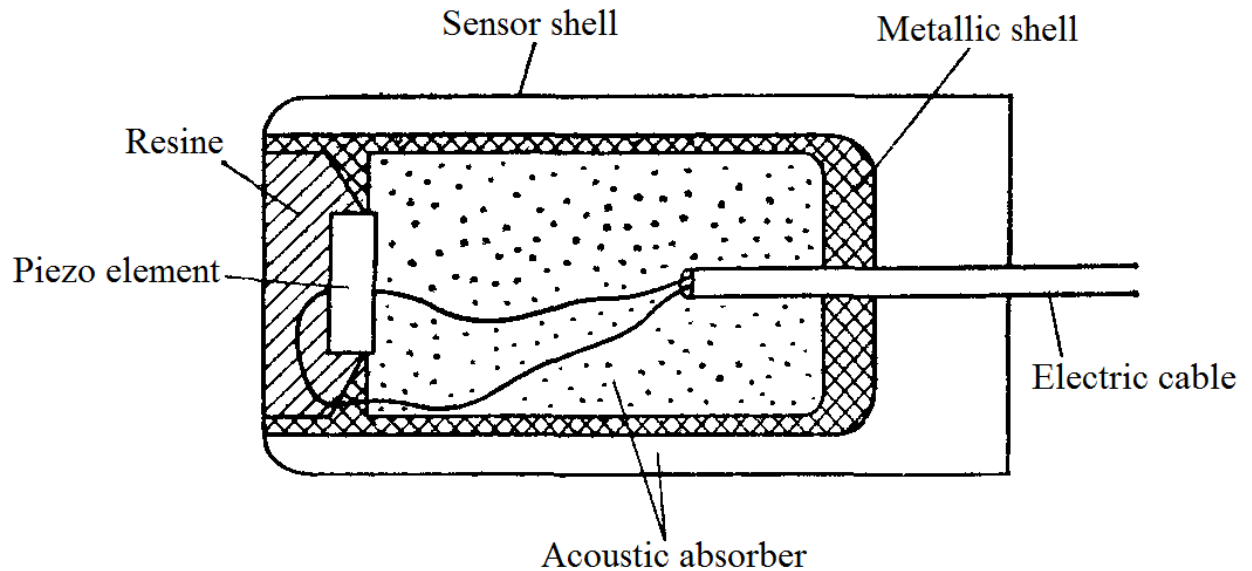


Рис. 11.6. Акустичний датчик

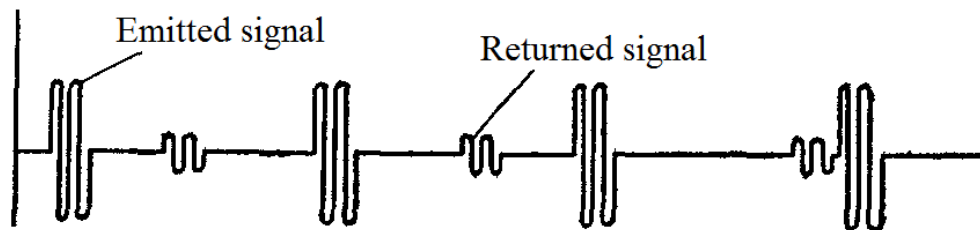


Рис. 11.7. Часові діаграми сигналів ультразвукового датчика

Оптичні датчики вимірювання в ближній зоні зазвичай не визначають відстань до об'єкта, а фіксують його наявність в заданій області. Одна з конструкцій такого оптичного датчика наведена на рис. 11.8. Він складається зі світлодіода, що є джерелом інфрачервоного випромінювання, та фотодіода, що використовується у світлоприймачі. Пучки світла, сформовані фокусними системами джерела та приймача перетинаються у витягнутій конусовидній зоні. Вона визначає робочий діапазон датчика, оскільки поверхня, що знаходиться в зоні, освітлюється джерелом і одночасно "проглядається" приймачем.

**Тактильні датчики** використовуються в робототехніці для отримання інформації про контакт маніпулятора з об'єктами. Вони поділяються на дискретні та аналогові.

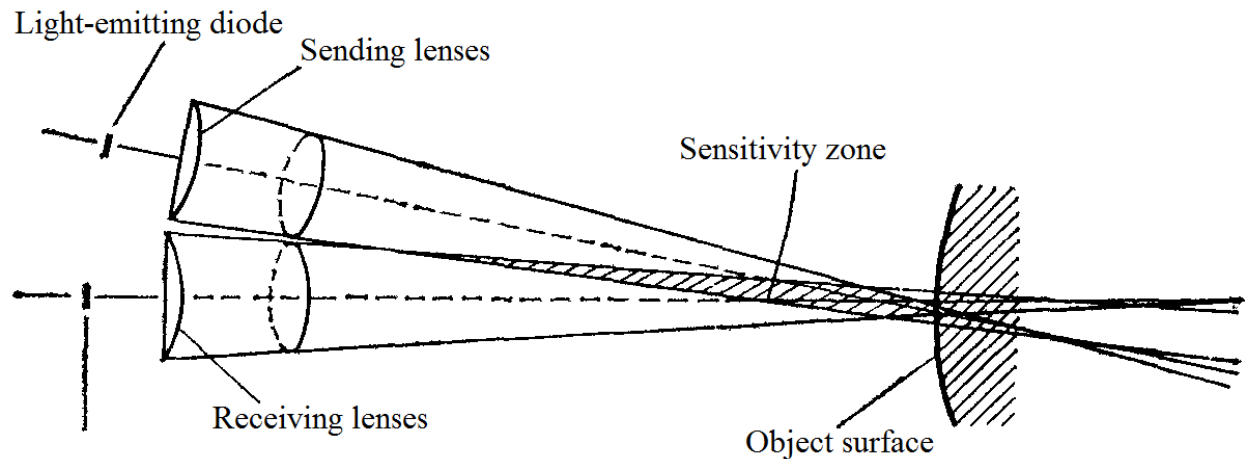


Рис. 11.8. Оптичний датчик вимірювання в ближній зоні

Дискретні тактильні датчики – це мікроперемикачі, встановлені на внутрішній поверхні кожного пальця схвата (рис. 11.9). Такий варіант очутливлення використовується для визначення наявності деталі між пальцями схвата.

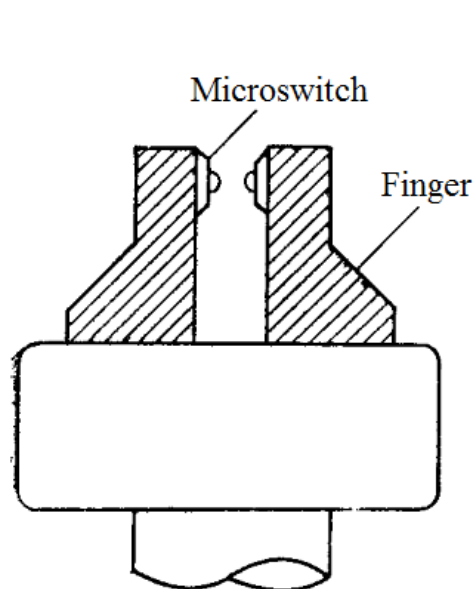


Рис. 11.9. Схват з дискретними тактильними датчиками

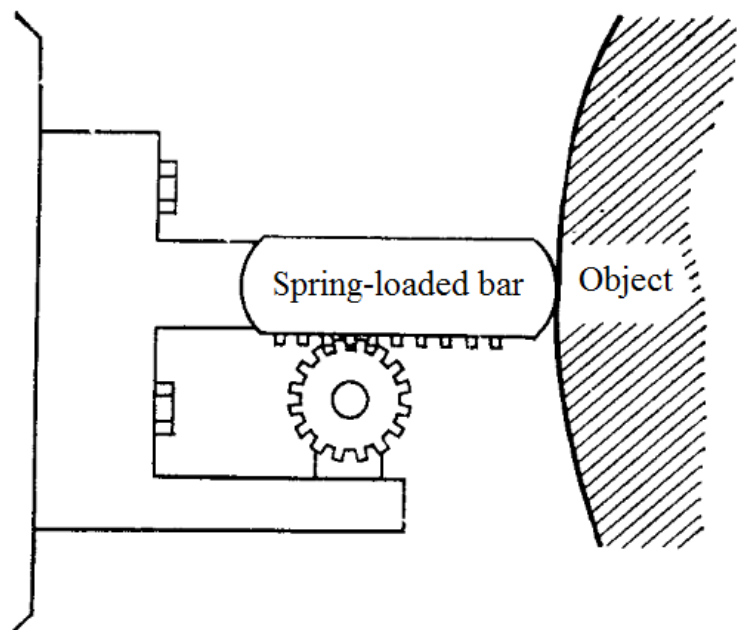


Рис. 11.10. Аналоговий тактильний датчик з підпружиненим стрижнем

Аналоговий тактильний датчик видає сигнал, пропорційний силі, що прикладається до об'єкта. Найпростіша конструкція такого датчика складається з підпружиненого стрижня (рис. 11.10), механічно зв'язаного з віссю датчика кута поворота (потенціометра або енкодера).

Оскільки об'єкти можуть мати різні форми, зокрема округлі, для отримання тактильної інформації часто використовують матриці тактильних датчиків, розташовані на робочих поверхнях схвата (рис. 11.11).



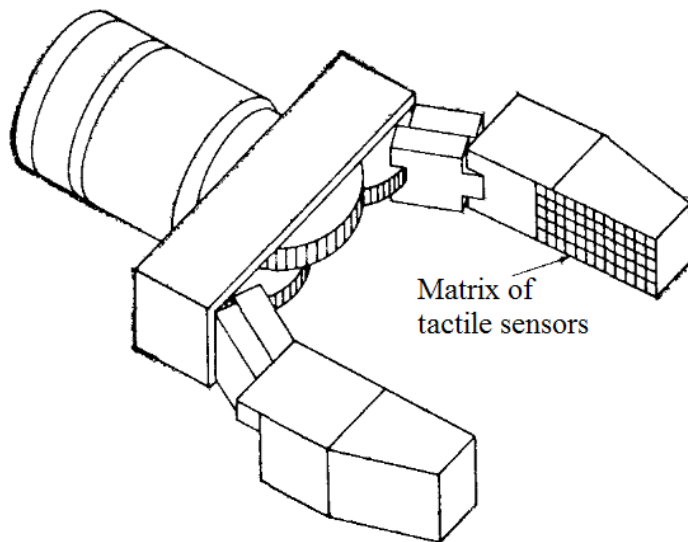


Рис. 11.11 Схват з матрицею тактильних датчиків

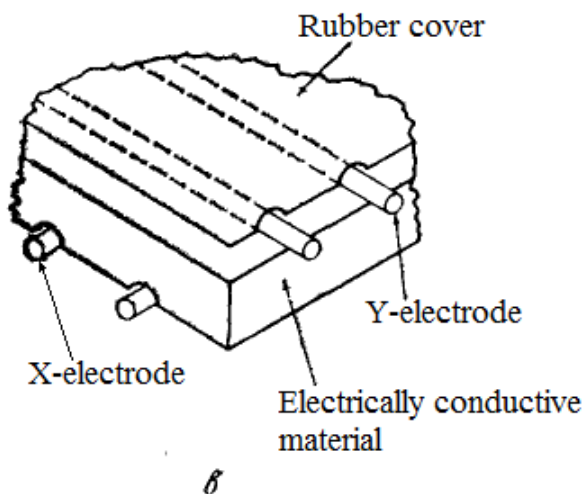
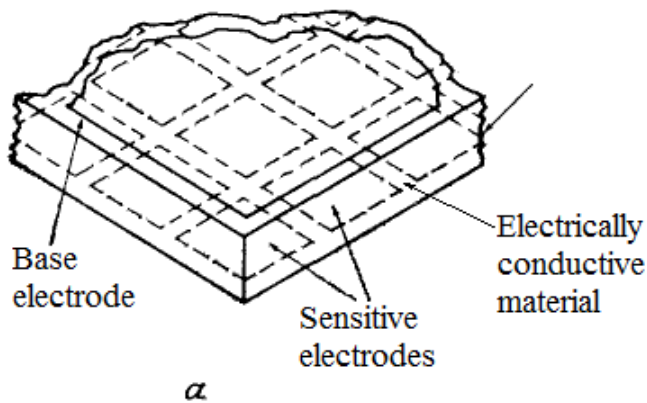


Рис. 11.12. Штучна шкіра

Для отримання інформації про розподіл сили стискання по поверхні об'єкта використовуються також пристрої, що називаються "штучною шкірою".

Два основних методи, що використовуються при створенні штучної шкіри проілюстровані на рис. 11.12. Конструкція, наведена на рис. 11.12, а, містить плоскі електроди, між якими знаходиться матеріал на графітійовій основі, який має властивість зменшення електричної провідності при стисканні. На зовнішній поверхні, що контактує з об'єктом, розташована матриця чутливих електродів. При стисканні об'єкта зменшується провідність між ними та базовим електродом, що знаходиться на протилежній (внутрішній) поверхні. Зміна провідності перетворюється на електричний сигнал, і, з урахуванням механічної жорсткості матеріала, обчислюється сила стискання кожного електрода.

Інша реалізація наведена на рис. 11.12, б. Матеріал, що проводить, розташований між двома взаємно перпендикулярними наборами тонких гнучких електродів. Кожен перетин між ними, розділений матеріалом,

що проводить, являє собою одну чутливу точку.

До тактильних датчиків відносяться також датчики просковзування. Вони видають сигнал про просковзування об'єкта, що знаходиться у схваті, для запобігання його втрати. Конструкція таких датчиків містить кулю із зубчастою або гумовою поверхнею, що притискається до об'єкта і обертається при його просковзуванні. Обертання кулі перетворюється на сигнал за допомогою двох енкодерів (подібно до кульового маніпулятора-миші).

## **Лекція 12. Ієрархічна структура системи управління маніпуляційним роботом**

Система управління роботом побудована за ієрархічним принципом і містить 3 керуючих рівня: стратегічний, тактичний і виконавчий (рис. 12.1).

На **стратегічному рівні** здійснюється сприйняття і розпізнавання інформації про робоче середовище відповідно до мети управління, яку задає оператор, або розробник. Будується модель середовища, приймаються рішення про майбутні дії, визначається їх послідовність і параметри: координати контрольних точок траєкторії, моменти часу їх проходження, моменти захоплення об'єктів та інші.

На **тактичному рівні** здійснюється планування траєкторії маніпулятора: на підставі необхідної траєкторії схвата визначаються закони зміни в часі приєднаних змінних  $q_{пр\ i}(t)$ , які є сигналами завдання для приводів ланок. З урахуванням сигналів датчиків вимірювання в ближній зоні і тактильних датчиків, формуються команди для приводів схвата.

**Виконавчий рівень** здійснює реалізацію заданих рухів. Він включає в себе приводи ланок маніпулятора і приводи схвата. Приводи ланок повинні забезпечувати високу точність їх позиціонування, тому вони використовують сигнали датчиків внутрішнього стану робота (на схемі не показані): датчиків переміщень ланок, їх швидкості, струму двигунів та ін. Приводи схвата можуть також використовувати сигнали тактильних датчиків для регулювання сили затиску об'єкта.

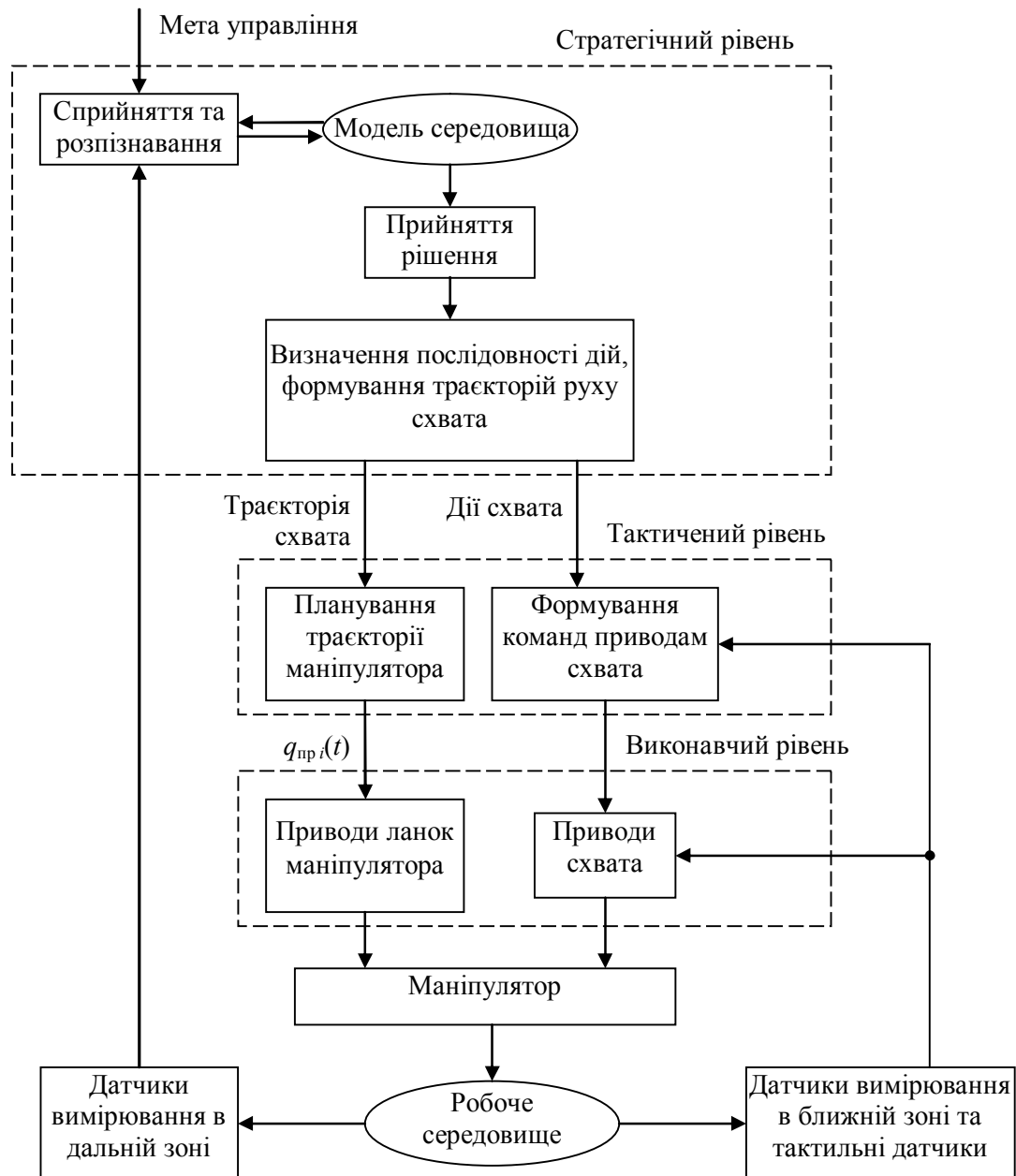


Рис. 12.1. Ієрархічна структура системи управління маніпуляційним роботом

## ЛІТЕРАТУРА

1. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. – 480 с.
2. Крутько П.Д. Управление исполнительными системами роботов. – М.: Наука, 1991. – 336 с.
3. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. – М.: Мир., 1989. – 624 с.

4. Шахинпур М. Курс робототехники: Пер. с англ. – М.: Мир., 1990. – 527 с.
5. Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов. – М.: Высш. шк., 1986. – 264 с.
6. Черноруцкий Г.С., Сибрин А.П., Жабреев В.С. Следящие системы автоматических манипуляторов / Под ред. Г.С. Черноруцкого. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
7. Юревич Е. И. Сенсорные системы в робототехнике : учеб. пособие / Е. И. Юревич. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 100 с.