



# **ОСНОВИ РОБОТОТЕХНІКИ**

---

**Андрій ТРЕТ'ЯК, Андрій КЛЬОН**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

**ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

---

**2024**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

**ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**Андрій ТРЕТ'ЯК, Андрій КЛЬОН**

# **ОСНОВИ РОБОТОТЕХНІКИ**

**Навчальний посібник**

Полтава – Краматорськ, 2024

**Рецензенти:**

*Олександр ШЕФЕР,*

доктор технічних наук, професор кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

*Олександр ГАВРЮКОВ,*

доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації технологічних процесів Київського  
національного університету будівництва і архітектури

В навчальному посібнику висвітлені загальні питання класифікації, будови, проектування та використання роботів у різних сферах людської діяльності. Посібник призначений для студентів технічних спеціальностей, які вивчають робототехніку. Також буде в нагоді усім, хто цікавиться даною тематикою.

**Трет'як А.В.**

Основи робототехніки: навчальний посібник для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А.В. Трет'як, А.М. Кльон. – Полтава, видавництво національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 135 с.

© А.В. Трет'як, А.М. Кльон, 2024

© Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024

© Донбаська національна академія будівництва і архітектури, 2024

## Зміст

Вступ .....	5
1. Історія робототехніки .....	7
1.1 Передісторія.....	7
1.2 Поява та становлення сучасної робототехніки .....	13
1.3 Напрями подальшого розвитку.....	18
1.4 Вплив роботів на суспільство .....	20
2. Визначення та класифікація роботів.....	23
2.1 Термінологія .....	23
2.2 Покоління роботів .....	24
2.3 Класифікація.....	25
3. Будова роботів.....	32
3.1 Загальна структура .....	32
3.2 Етапи проектування.....	33
3.3 Схеми робота.....	37
4. Система керування .....	45
4.1 Загальні принципи побудови.....	45
4.2 Класифікація.....	47
4.3 Конструктивне виконання .....	52
4.4 Програмне забезпечення .....	58
5. Інформаційно-вимірювальна система .....	64
5.1 Загальна характеристика.....	64
5.2 Датчики: будова, вимоги, класифікація .....	64
6. Система зв'язку.....	76
6.1 Загальний опис.....	76
6.2 Пристрої введення інформації.....	79
7. Виконавча система .....	81
7.1 Загальний опис.....	81
7.2. Приводи.....	82
7.2.1 Загальна характеристика.....	82
7.2.2 Керування приводом .....	89
7.2.3 Передавальні механізми приводів .....	94
7.3 Маніпуляційний механізм .....	101
7.3.1 Загальна характеристика.....	101

7.3.2 Типові схеми маніпуляторів.....	106
7.3.3 Особливості проектування маніпуляторів.....	109
7.3.4 Робочі органи маніпуляторів.....	113
7.3.5 Класифікація та проектування захватних пристроїв.....	113
7.4. Механізм пересування.....	120
8. Навчальні набори з робототехніки.....	128
8.1 Загальний огляд.....	128
8.2 Онлайн-симулятори.....	131
Література.....	134

*Скоро у всі будинки прийдуть роботи,  
А тим, хто не хоче відкривати, виламають двері...*

*(з просторів Інтернету)*

Робототехніка – це прикладна наука, присвячена питанням створення роботів – автоматичних пристроїв, призначених для виконання різноманітних робіт, які зазвичай виконувала людина. І хоча перші праобрази роботів з'явилися ще у давні часи, як самостійна та важлива з практичної точки зору наука робототехніка оформилась лише у середині ХХ століття, із широким запровадженням роботів у промислове виробництво. Цьому сприяли два основні чинники. По-перше, на цей час повністю сформувалась теоретична база робототехніки, яка складається з цілої низки наукових дисциплін, таких як механіка, електротехніка, електроніка, кібернетика та інформатика. Причому деякі з цих дисциплін, такі як кібернетика чи електроніка, як окремі наукові напрями оформились відносно нещодавно, і їх історія розвитку не перевищує ста років. По-друге, саме у другій половині ХХ століття намітилась тенденція переходу від масового до дрібносерійного та індивідуального виробництва. А це, своєю чергою, поставило завдання у створенні засобів механізації та автоматизації нового типу: із гнучким та швидким переналаштуванням на випуск нової продукції.

Сьогодні роботи використовуються практично у всіх сферах людської діяльності: промислового виробництва, наукових дослідженнях (особливо тих, що обмежені у доступі або небезпечні для людини – космос, глибокі шари океану, атомна енергетика), транспорті, медицині, сільському господарстві тощо. Вже буденними речами стали досягнення науки та техніки, про які лише мріяли фантасти минулого: «залізні працівники» на промислових підприємствах, роботопомічники та дослідники, автоматизовані платформи для доставки вантажів та системи керування пасажирським транспортом...

Розвиток технологій штучного інтелекту вже в досяжному майбутньому дозволить створити роботів четвертого покоління із досі нечуваними можливостями, які вражають та одночасно бентежать людство (дослідження в цьому напрямку тривають).

Сучасну технічну освіту вже неможливо уявити без хоча б базових знань з робототехніки, адже кваліфікованим інженерам у своїй професійній діяльності з високою долею ймовірності доведеться зіштовхнутись з тими чи іншими роботами або роботизованими платформами: будівельникам – при проєктуванні «розумного будинку», енергетикам – при виконанні небезпечних робіт, промисловцям – при розгортанні виробничих ліній, транспортникам – при розробці логістичних ланцюгів...

Цей посібник призначений для студентів, технічних фахівців та інших зацікавлених осіб, які лише приступають до вивчення робототехніки. Тому наголос в ньому зроблено на системне та цілісне представлення матеріалу, із висвітленням основних питань класифікації, будови, проектування та використання роботів у різних сферах людської діяльності. У подальшому, за потреби, отримані з цього посібнику знання можуть бути розвинені та поглиблені читачем за допомогою додаткової спеціалізованої літератури.

Автори будуть дуже вдячні за усі зауваження, виявлені помилки та неточності, пропозиції щодо покращення змісту цього посібника, які можна надіслати на електронну пошту, вказану на останній сторінці обкладинки.

# 1. Історія робототехніки

## 1.1 Передісторія

Процес створення та розвитку механічних пристроїв (праобразів сучасних роботів), які за своєю зовнішністю та діями схожі на живих істот, охоплює тривалий історичний період від давніх часів до сучасності. Цей період можна умовно поділити на чотири етапи [28, 31].

*Перший етап* – давні часи – характеризується розповсюдженням міфів та легенд про механічних істот. Так, у давньогрецькій міфології згадується бронзовий велетень Талос, створений Гефестом для охорони острова Крит від ворожої навали. Одним з персонажів давньоєврейської міфології є Голем – людиноподібна істота, штучно створена із неживої матерії (зазвичай глини або бруду). «Механічні слуги» згадуються в «Іліаді» Гомера.

Паралельно в цей період створюються перші людиноподібні автомати – андроїди (автоматони), призначені головним чином для культових та видовищних заходів. У відомому «Трактаті про пневматику» давньогрецький механік Герон Олександрійський (I ст. до Різдва Христового) описав безліч автоматів у вигляді фігур, які приводились у дію за допомогою складної системи зубчастих коліс, блоків та важелів. Успіхи у створенні механічних істот стали можливими завдяки працям видатних давньогрецьких вчених (Платона, Аристотеля, Архімеда та інших), які у період з V століття до Різдва Христового по I століття розробили основи геометрії, алгебри, логіки, механіки та гідравліки.

Є відомості про створення складних механічних пристроїв і в інших давніх цивілізаціях, зокрема у стародавньому Китаї.

На *другому етапі* – середньовіччя – механічні автомати досягли своєї найбільшої досконалості та стали еталоном найвищої майстерності і втіленням передових науково-технічних досягнень свого часу.

У 1500 році Леонардо да Вінчі змайстрував механічного лева (рис. 1.1), який при в'їзді у місто Мілан французького короля демонстрував герб Франції. У своїх роботах Леонардо да Вінчі описав й інших механічних істот, зокрема андроїда, здатного рухати руками та повертати голову.

У період XVI – XVII століть в Західній Європі низкою майстрів були створені механічні пристрої у вигляді людини, тварин та комах: андроїд Ганса Бульмана (Hans Bullmann, 1525 р.); залізна муха та штучний орел Йоганна Мюллера (Johann Muller, 1533 р.); андроїд у вигляді жінки, що грає на лютні, Джианелло Торіані (Giannello Torriani, 1540 р.) (рис. 1.2); дерев'яний літаючий жук Джона Ді (John Dee, 1543 р.) та інші.



Рис. 1.1 – Механічний лев Леонардо да Вінчі (репродукція)



Рис. 1.2 – Андроїд Джианелло Торіані

Одним з найвідоміших творців механічних фігур середньовіччя був французький механік Жак де Вокансон (Jacques de Vaucanson). Його «Качка, що пурхає» (1737) (рис. 1.3), яка зберіглася до наших днів, витягає шию, аби взяти зерно з руки, проковтує та «перетравлює» його, п'є, борсається у воді та крикає. Серед інших відомих моделей Вокансона – «Піаніст», який грає на фортепіано, підіймає голову та імітує дихання, а також «Гравець на флейті», який також співає, акомпанує собі та відбиває такт ногою.

Високого рівня у створенні андроїдів досягли швейцарські годинникирі П'єр Жаке-Дроз (Pierre Jaquet-Droz) та його син Анрі. Їх андроїд «Переписувач» (1768-1774) (рис. 1.4) сидить за столом та акуратним почерком виписує літери та слова, плавно похитує головою та опускає повіки у такт руху руки. «Переписувач» може бути запрограмований на написання будь-якого тексту до 40 літер. Серед інших відомих моделей майстрів – «Дівчина, що грає на клавесині» (1780-ті рр.), яка грає, ворушить губами, дивиться на клавіші та в ноти, а іноді кидає погляд на публіку; а також «Малювальник» (1780-ті рр.), який малює олівцем на аркуші, час від часу зупиняється, споглядає намальоване, а потім дмухає на папір, щоб видалити з нього смітинки.

Механічні істоти створювались також в Азії, зокрема, в Японії.

Поряд зі створенням різних автоматичних пристроїв, у XV – XVIII століттях отримали свій подальший розвиток наукові дослідження, що відбувались у рамках механістичної картини світу, яка домінувала у науковому середовищі того часу. Схожість функціонування людського організму з механізмами можна знайти у працях Леонардо да Вінчі (Leonardo di ser Piero da Vinci), Рене Декарта (Rene Descartes), Дж. А. Бореллі (Giovanni Alfonso Borelli), Леонарда Ейлера (Leonhard Euler), Даніїла Бернуллі (Daniel Bernoulli) та інших вчених.



Рис. 1.3 – Механічна качка  
Жака де Вокансона



Рис. 1.4 – Переписувач П'єра та Анрі Жакє-Дрозе

У XVII – XVIII століттях були закладені основи обчислювальної техніки. У Франції Блез Паскаль (Blaise Pascal) у 1642 р. описав механічну машину для підсумовування та віднімання чисел, яку у 1694 р. вдосконалив Лейбніц (Gottfried Wilhelm Leibniz), додавши в неї можливість множення та ділення.

*Третій етап* почався у другій половині XVIII століття та продовжувався до початку XX століття. Він характеризується зосередженням творчих зусиль винахідників та вчених на створенні нових машин та технологій для промисловості, що пов'язано із промисловою революцією, яка розпочалася у другій половині XVIII століття та полягала у переході від ручного до машинного виробництва.

На початку XVIII ст. Безіл Бушон (Basile Bouchon) з французького Ліона спроектував ткацькі верстати для виробництва шовкової тканини з рисунком, які частково керувались за допомогою пластин із отворами. У 1728 році Жан-Баптист Фалькон (Jean-Baptiste Falcon) вдосконалив винахід Бушона, замінивши перфоровану стрічку картками, з'єднаними в ланцюжок. Це дозволило легко замінювати фрагменти «програми». У 1801 році Жозеф Марі Жаккард (Joseph-Marie Jacquard) створив автоматичний ткацький верстат, керований за допомогою перфокарт. Верстат Жаккарда був першим масовим промисловим пристроєм, який працював автоматично та дозволяв створювати рисунок тканин за заданою програмою.

На розвиток науки та техніки в цей період вплинула низка важливих винаходів: Джеймс Уатт (James Watt) створив паровий двигун (1765 р.); Алессандро Вольта (Alessandro Volta) – електричні батареї (1800 р.); Майкл Фарадей (Michael Faraday) – перші моделі електродвигунів (1821 р.); Джозеф Генрі (Joseph Henry) – перше електрореле (1835 р.). Генріх Герц (Heinrich Hertz) у 1887 р. відкрив ефект фотоелектронної емісії, а у 1888 р. експериментував з передачею електромагнітних хвиль, згодом названих радіохвилями.

На рубежі XVIII та XIX століть на працях Л. Карно (Nicolas Léonard Sadi Carnot), Г. Монжа (Gaspard Monge), Х. Ленца (Heinrich Friedrich Emil Lenz) та А. Бетанкура (Agustín José Pedro del Carmen Domingo de Candelaria de Betancourt), П. Чебишева, Р. Вілліса (Robert Willis) та інших почала формуватися наука про машини.

Стрімкий розвиток отримала теорія обчислювальної техніки. У 1822 р. видатний англійський математик, економіст та механік Чарльз Беббідж (Charles Babbage) продемонстрував прототип своєї «Машини з обчислення різниці» («Difference Engine»). А у 1833 р. він розробив принципи «Аналітичної машини» («Analytical Engine») – механічного прототипу ЕОМ, що з'явилися лише через століття. У проєкті Беббіджа були передбачені всі основні компоненти, які є в сучасному комп'ютері: пристрій зберігання цифрової інформації (пам'ять); пристрій для виконання операцій над числами (арифметичний пристрій); пристрій для керування обробкою (пристрій керування); пристрої введення з перфокарт, з яких зчитувалися програма та дані, що підлягають обробці.

У 1847 р. ірландський математик Джордж Буль (George Boole) у книзі «The Mathematical Analysis of Logic» заклав основи математичної логіки – Булеву алгебру, що стала основою реалізації усіх логічних операцій, виконуваних на сучасних ЕОМ.

*Четвертий етап* – кінець XIX – перша половина XX століття – характерний підвищеною увагою суспільства до автоматизованих пристроїв та механічних істот, яка зрештою призвела до появи терміну «робот», а також бурхливим розвитком наукових основ сучасної робототехніки, перш за все кібернетики та обчислювальної техніки.

В цей період тема людиноподібних істот набула широкої популярності в літературі та мистецтві: з'явилось багато науково-фантастичних літературних творів, коміксів та кінофільмів, в яких андроїди, роботи, фантоми та інші творіння людської уяви відігравали провідні ролі.

У 1921 р. в Празькому національному театрі відбулася прем'єрна постановка п'єси відомого чеського письменника Карела Чапека (Karel Čapek) «Россумові універсальні роботи» (рис. 1.5), від якої набув розповсюдження термін «робот». Значне місце тема робототехніки посіла у творчості американського письменника-фантаста Айзека Азімова (Isaac Asimov). У 1927 р. Фріц Ланг (Fritz Lang) зняв фільм «Metropolis», в якому з'явився робот Марія (рис. 1.6) – перший робот у кінематографі.



Рис. 1.5 – Роботи у п'єсі Карела Чапека  
«Россумові універсальні роботи»

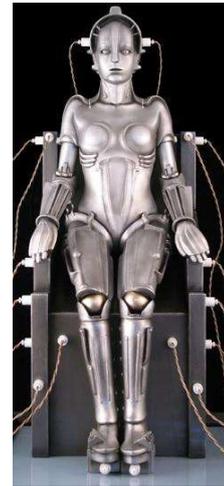


Рис. 1.6 – Робот Марія  
у фільмі «Metropolis»  
(1927)

Завдяки загальному інтересу до роботів винахідникам та талановитим майстрам вдалося знайти фінансування на створення оригінальних конструкцій андроїдів. Так, американський інженер Рой Уенслі (Roy Wensley) у 1927 р. сконструював робота «Herbert Televox» (рис. 1.7), який був схожий на людину та міг виконувати елементарні рухи за командою, поданою голосом. Цей робот був експонатом Всесвітньої виставки у Нью-Йорку. У 1928 р. виставку Британської асоціації інженерів з моделювання відкрив робот «Eric», який звернувся до присутніх з невеликою промовою (рис. 1.8). Творцем цього роботу був англійський інженер Уільям Річардс (William Richards).

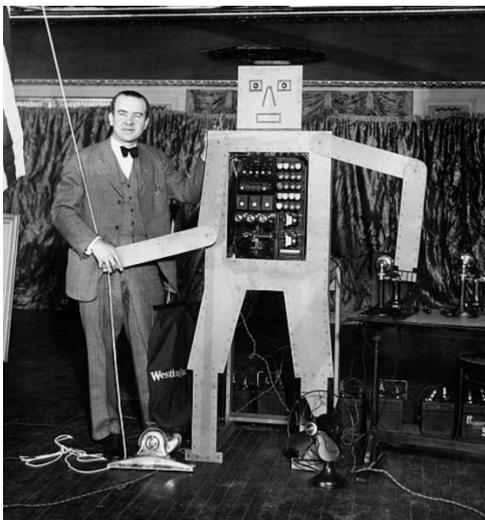


Рис. 1.7 – Робот Herbert Televox  
Роя Уенслі



Рис. 1.8 – Робот Eric Уільяма Річардса  
(репродукція)

Однак всі ці оригінальні пристрої хоч і були проривом у сфері нової техніки та демонстрацією творчих можливостей винахідників, все-таки мали вкрай обмежене практичне застосування.

Одночасно зі створенням андроїдів продовжився розвиток науково-практичних дисциплін, зокрема обчислювальної техніки. У 1890 р. Герман Холлеріт (Herman Hollerith) поєднав ідеї Жаккарда та Беббіджа в патенті на «Електромеханічну інформаційну машину» (Tabulating Machine), яка використовувала перфокарти. Його розробка виграла змагання, оголошені комітетом із перепису населення США. Так вперше електромеханіка була використана у великому проєкті з обробки даних. У 1900 р. Герман Холлеріт застосував автоматичне завантаження перфокарт, а через рік винайшов першу клавіатуру для роботи з перфокартами. В тому ж році професор Алан Маркванд (Allan Marquand) у Принстоні розробив машину, здатну вирішувати дуже прості логічні завдання.

У 1925 році американський інженер Ванневар Буш (Vannevar Bush) та його колеги розробили першу аналогову ЕОМ «Differential Analyzer» для вирішення диференціальних рівнянь. Побудована в 1930 році, вона використовувалася для артилерійських обчислень протягом Другої світової війни.

У 1936-1937 рр. англійський математик Алан Мотісон Тюрінг (Alan Turing), ґрунтуючись на роботах Бертрана Рассела (Bertrand Russell) та Чарльза Беббіджа (Charles Babbage), ввів концепцію «абстрактної обчислювальної машини», названу згодом «Машиною Тюрінга» (Turing Machine). Ця машина була здатна за допомогою найпростіших операцій зчитування та зсуву виконувати обчислення довільної складності та стала праобразом універсальних обчислювальних машин, які з'явилися у 1940-х роках.

У 1944 р. Говард Айкен (Howard Aiken) на основі праці Беббіджа створив перший американський програмований комп'ютер «Mark I», програмуванням якого займався Грейс Хоппер (Grace Hopper).

У 1946 р. Джоном Мошлі (John Mauchly) та Джоном Преспером Екертом (John Presper Eckert) на електротехнічному факультеті Пенсільванського університету (США) запущено електронно-обчислювальну машину «ENIAC». Побудована на 18 тис. електронних ламп, вона займала близько 200 квадратних метрів, важила 30 тон і вимагала 175 кіловат енергії. Швидкодія машини складала 0,1 MIPS (Million Instructions Per Second). В ЕОМ «ENIAC» була вперше реалізована ідея американського вченого Дж. фон Неймана (John von Neumann) зі збереження програми в пам'яті обчислювальної машини.

В першій половині ХХ століття на роботах Норберта Вінера (Norbert Wiener) та Воррена Маккалоха (Warren Sturgis McCulloch) зародилася кібернетика – наука про загальні закономірності отримання, зберігання, перетворення та передачі інформації в складних керуючих системах, чи то машини, чи живі організми або суспільство.

Свій подальший розвиток кібернетика отримала в роботах низки талановитих вчених Дж. фон Неймана (John von Neumann), Грея Уолтера (William Grey Walter), Вільяма Росса Ешбі (William Ross Ashby), Клода Елвуда Шеннона

(Claude Elwood Shannon) та інших, які на основі вивчення аналогій між нервовою системою людини, обчислювальними машинами та системами автоматичного регулювання запропонували теорію алгоритмів.

У 1950-х роках новий імпульс розвитку отримала електроніка, яка зародилася на початку ХХ століття з винаходу лампового діода (Дж. А. Флемінг (John Ambrose Fleming), 1904) та триелектродної лампи — триод-пентода (Лі де Форест (Lee De Forest), 1906). Дослідження американських вчених Уільяма Бредфорда Шоклі (William Bradford Shockley), Джона Бардіна (John Bardeen) та Волтера Хаузера Браттейна (Walter Houser Brattain) призвели до появи у цей період транзисторів, завдяки яким обчислювальна техніка, яка широко використовується в системах керування роботами, вийшла на новий рівень, в сотні разів зменшивши свої габарити, масу та вартість, одночасно з цим збільшивши обчислювальну потужність.

## 1.2 Поява та становлення сучасної робототехніки

Історія сучасної робототехніки розпочалася в середині ХХ століття, коли виникла необхідність в інтенсифікації технологічних процесів на основі нових, більш гнучких підходів, а також дослідженні нових просторів та сфер людської діяльності, опанування яких традиційними засобами за участю людини було не ефективним або взагалі неможливим.

Довгий час інтенсифікація промислового виробництва полягала в його механізації та автоматизації. Використання автоматизованого обладнання (верстатів з числовим програмним керуванням, спеціалізованих автоматів та автоматичних систем) дозволило значно підвищити продуктивність праці та якість виробленої продукції. Проте таке обладнання було орієнтоване на масове виробництво та не дозволяло в короткі терміни та з мінімальними зусиллями переналагодити його на випуск нових видів продукції малими серіями. Інакше кажучи, йому бракувало гнучкості. Однак сучасний ринок, орієнтований на запит споживача, вимагав від промисловості пристосування до коливань попиту та частих змін номенклатури продукції, що виробляється.

Окрім того, при відносно високому рівні автоматизації основних технологічних процесів значна частина допоміжних операцій, пов'язаних, як правило, з завантаженням-розвантаженням, переміщенням та складуванням, продовжувала виконуватись вручну через неможливість їх автоматизації у рамках традиційних підходів жорсткої регламентації.

Початком становлення сучасної робототехніки вважається період 1940-1950-х років, коли у США, Франції та ФРН почали активно розвиватись та

впроваджуватись у виробничий процес конструкції маніпуляторів, які отримали назву промислових роботів.

У 1955-1958 рр. американська фірма «Planet Corp» виготовила одну з перших моделей механізованого пристрою-маніпулятора для завантаження та розвантаження верстатів, яка називалася «Planobot» (рис. 1.9) [13].



Рис. 1.9 – Робот Planobot (1956)



Рис. 1.10 – Перший в світі робот-екзоскелет Hardiman (1961)

У 1961 р. компанії «General Electric» та «United States military» презентували екзоскелет «Hardiman» (аббревіатура проєкту «Human Augmentation Research and Development Investigation» та MAN – похідне від MANipulator), який міг підняти та переносити вантаж до 450 кг (рис. 1.10) [8].

Американські інженери Джордж Девол (George Devol) та Джозеф Ф. Енгельбергер (Joseph Engelberger) у 1962 р. заснували першу в світі робототехнічну компанію «Unimation» (Universal Automation – універсальна автоматизація).

На початку 1960-х років перші промислові роботи з торгівельними марками «Unimate» (рис. 1.11) та «Versatran» (рис. 1.12), створені американськими компаніями «Unimation» і «American Machine and Foundry (AMF)» та призначені для обслуговування технологічних процесів, потрапили на промисловий ринок та мали комерційний успіх. Витрати на їх закупівлю окупалися протягом 1,5...2,5 років. Роботи представляли собою вже достатньо досконалі системи зі зворотнім зв'язком та контрольованою траєкторією руху, мали числове програмне керування та пам'ять як у ЕОМ.

У 1970-х роках з'явилися роботи, керовані ЕОМ. Перший міні-комп'ютер, призначений для керування роботом, був випущений у 1974 р. фірмою «Cincinnati Milacron», однією з провідних фірм-виробників роботів у США. В кінці 1971 р. американською фірмою «Intel» був створений перший мікропроцесор, а декількома роками пізніше з'явилися роботи з мікропроцесорним керуванням, що обумовило істотне підвищення їх якості при одночасному зниженні вартості.

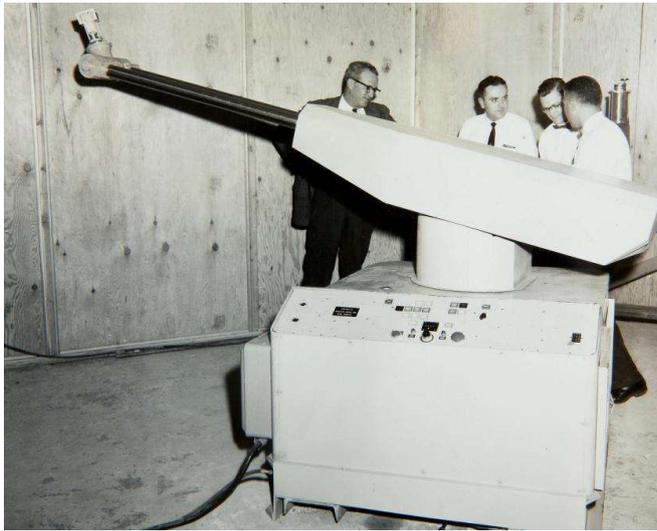


Рис. 1.11 – Робот Unimate (1961)

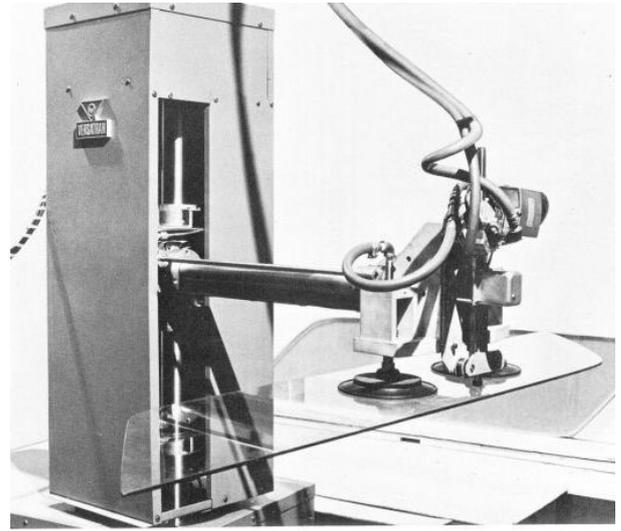


Рис. 1.12 – Робот Versatran (1958-1962)

У подальші роки після створення та виходу на промисловий ринок роботів у всьому світі почався стрімкий розвиток робототехніки. Обсяги виробництва промислових роботів у розвинених країнах світу значно збільшились, також розширився перелік галузей промисловості, в яких стала впроваджуватись робототехніка. Змінився і сам принцип використання промислових роботів – від одного до комплексного. Із розвитком робототехніки з'явилися гнучкі виробничі системи, які забезпечують повну автоматизацію технологічного циклу.

Поряд із необхідністю модернізації традиційних виробництв у другій половині ХХ століття у людства з'явилась потреба в інтенсивному освоєнні нових технологій та просторів (техніка високих температур та тисків, атомна енергетика, космос, океанські глибини, підземні надра тощо). Тому саме в цей період з'явилося багато роботів та спеціалізованих робототехнічних комплексів для дослідження космічного простору, глибоких надр та морських глибин.

До космічних роботів можна віднести керовані космічні апарати, виведені на орбіту, а також апарати, що досліджують поверхню супутників планет та інші планети. Одним з перших таких апаратів був радянський «Луноход-1» (рис. 1.13), який у 1970 р. провів дослідження поверхні ґрунту Місяця. Іншим прикладом автоматично керованого космічного робота є американський апарат «Вікінг 1» («Viking 1»), який був доставлений на поверхню Марса у 1976 р. Прикладом космічного робота є також маніпулятор космічного комплексу багаторазового користування «Шаттл» (Space Shuttle).

Усі підводні апарати зазвичай розділяються дві групи – пілотовані та безпілотні. Безпілотні, у свою чергу, поділяються на буксировані, самохідні та керовані апарати, що плавають у товщі води. До останньої групи належить створений у США у 1960-х роках маніпулятор «RUM I-II» (Remote Underwater Manipulator) на гусеничному шасі (рис. 1.14). У 1974-1976 рр. США та ФРН створили підводного мобільного робота «Tramp», що представляє шестиколісний

керований по кабелю апарат з маніпулятором. У Великобританії 1977 р. був створений 4-х колісний підводний робототехнічний комплекс «Seabug», який міг працювати на глибині 300 м і пересуватися зі швидкістю до 1м/с [34].



Рис. 1.13 – Дистанційно керований апарат «Луноход-1» (1970) (репродукція)



Рис. 1.14 – Підводний маніпулятор дистанційного керування RUM I-II (1958)

У 1970-1980-х рр. в провідних країнах світу почали з'являтися асоціації та товариства, які курують дослідження та розробки в галузі створення та використання промислових роботів. Зокрема, у 1972 р. створено Японську асоціацію промислової робототехніки (JIRA), у 1974 р. – Інститут робототехніки США (RIA) та асоціацію роботів Великобританії (BRA), у 1975 р. – Італійське товариство робототехніки (SIRI), у 1978 р. – Французьку (AFRI), у 1980 р. – Шведську (SWIRA), у 1981 р. – Австралійську (ARA), у 1982 р. – Датську (DRA) та Сінгапурську (SRA) асоціації роботів.

У 1987 р. засновано Міжнародну федерацію робототехніки (International Federation of Robotics) — професійну некомерційну організацію, яка піклується питаннями просування, зміцнення та захисту індустрії робототехніки в усьому світі. За даними цієї організації, у 2020 році кількість промислових роботів по всьому світу склала більше 3 млн одиниць, збільшившись у 3 рази порівняно з 2010 роком [9].

У 2022 році частка роботизації виробничих операцій була найбільшою у Південній Кореї (1012 на 10 тис. працівників) та Сінгапурі (730 на 10 тис. працівників). Також висока частка роботизації спостерігається в Німеччині, Японії, Китаї, Швеції та Гонг-Конгу (рис. 1.15).

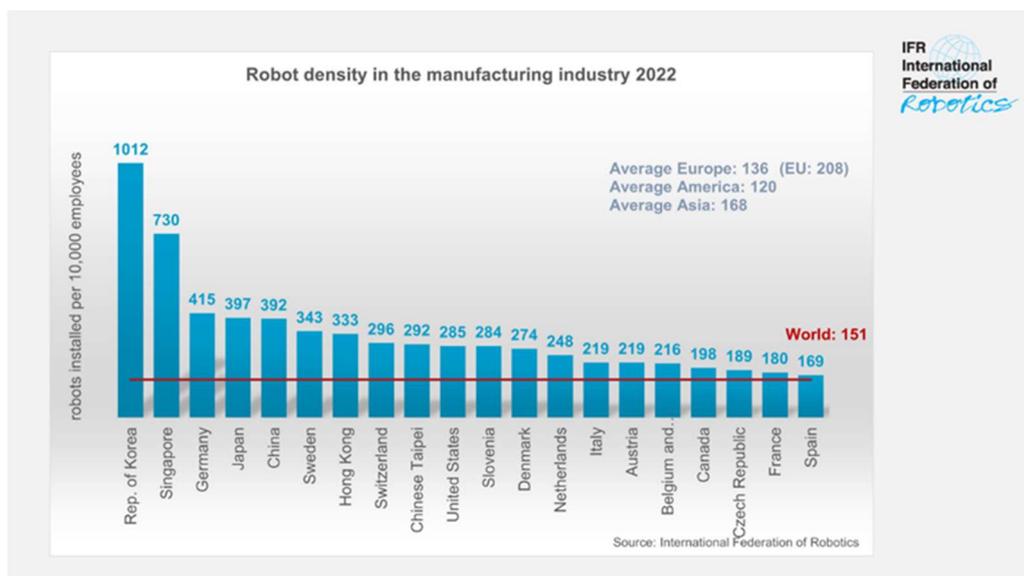


Рис. 1.15 – Частка роботизації виробничих операцій в провідних країнах світу [9]

Найбільшим в світі ринком роботехніки в абсолютних одиницях на сьогодні є Китай. У 2022 році в цій країні було встановлено 290 258 нових роботів, що більше ніж у 2021 році на 5%. Велика кількість нових роботів закуповується в Японії, США, Південній Кореї та Німеччині (рис. 1.16).

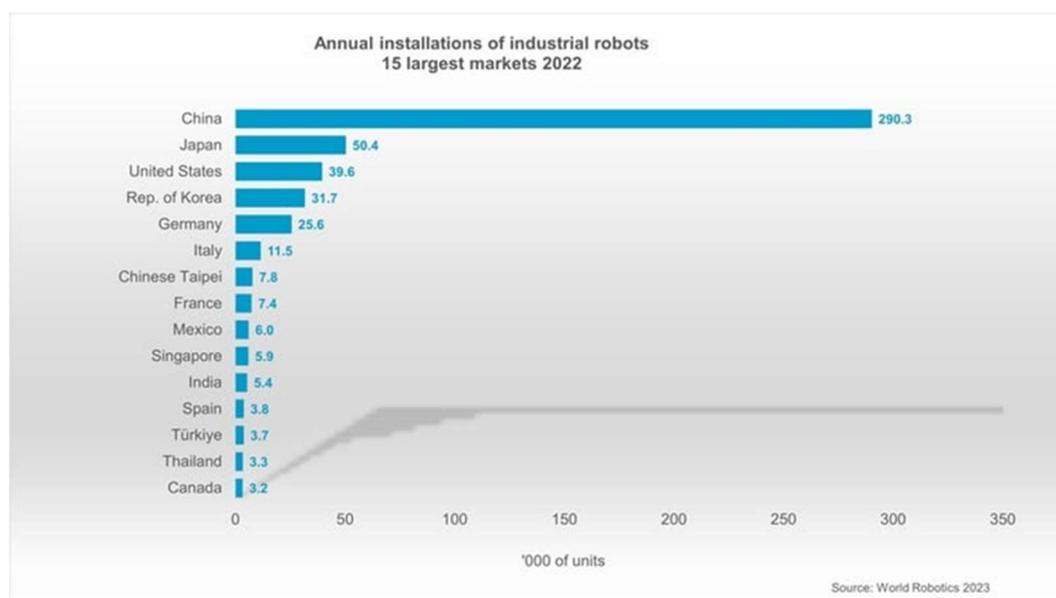


Рис. 1.16 – Найбільші країни-покупці промислової робототехніки [9]

Світове лідерство у виробництві промислових роботів посідає Японія, якій належить близько 45% цього ринку. Більшість японських роботів іде на експорт. З великим відривом у виробництві роботів слідом за Японією ідуть Китай та Німеччина.

Бурхливому розвитку робототехніки, який спостерігається протягом останніх десятиліть, значною мірою сприяють досягнення науки та техніки – механіки, електроніки, інформатики, кібернетики та інших. Особливу роль в цьому процесі відіграє молода наука – мехатроніка, заснована на синергетичному поєднанні вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними та комп'ютерними компонентами. Застосування принципів мехатроніки забезпечує проєктування та виробництво якісно нових модулів, систем та машин з інтелектуальним керуванням та функціональними рухами.

Слід зазначити, що темпи розвитку робототехніки не є постійними. В роботизації, перш за все промислового виробництва, виникають періодичні кризи, які пов'язані із невідповідністю між витратами сил та коштів, з одного боку, та реальною віддачою – з іншого. Є кілька причин цього.

По-перше, становлення нового науково-технічного напрямку зазвичай супроводжується певними труднощами: так, на етапі широкого впровадження у виробництво промислові роботи мали не тільки переваги, а й недоліки – високу собівартість, недостатню надійність, функціональну обмеженість тощо. Крім того, роботизація викликала низку «побічних» проблем: зростання безробіття та необхідність перекваліфікації працівників, травмонебезпечність через присутність персоналу в зоні роботи роботів тощо.

По-друге, завищені очікування від роботів призводять до великих капітало вкладень у розвиток роботизації, які згодом не окупаються та розчаровують власників виробничих компаній.

### 1.3 Напрями подальшого розвитку

Розвиток та впровадження робототехніки, в першу чергу у промислове виробництво, дозволило вирішити комплекс важливих техніко-економічних задач, основними з яких є:

- автоматизація серійного, дрібносерійного та часто переналагоджувального виробництва;
- автоматизація допоміжних технологічних операцій, а також складних технологічних процесів, які не мають жорсткої регламентації;
- підвищення продуктивності праці, яке виходить за межі можливостей працівника-людини стосовно навантажень, швидкостей, тривалості безперервної роботи;
- створення гнучких автоматизованих та автоматичних виробництв, які обслуговуються роботами, керованими єдиною ЕОМ;
- інтенсивне освоєння нових технологій та просторів (техніка високих температур та тисків, атомна енергетика, космос, океанські глибини, підземні надра тощо);

- забезпечення стабільної якості продукції, без впливу суб'єктивних факторів, притаманних людині;
- вивільнення робочої сили;
- більш повне використання технологічного обладнання;
- зниження витрат на створення комфортних умов праці (освітлення, кондиціонування повітря), а також послуг реабілітації та страхування.

Подальший розвиток промислової робототехніки відбувається в наступних напрямках:

- підвищення частки адаптивних роботів, здатних пристосовуватись до змін технологічного середовища;
- об'єднання окремих роботизованих ділянок виробництва в єдину виробничу систему, здатну виконувати різні замовлення на єдиній технологічній лінії;
- вдосконалення існуючих та розробка нових моделей промислових роботів зі зменшеними габаритами, підвищеною вантажопідйомністю на одиницю власної ваги, модульною конструкцією, підвищеними термінами експлуатації та надійністю в роботі, спрощеною механікою, простим програмним забезпеченням та універсальним захватним пристроєм;
- розробка нових комплектуючих пристроїв та елементів, які дозволяють розширити сферу застосування роботів, головним чином для складальних та монтажних операцій;
- розширення переліку галузей, де використовуються роботи (сільське господарство, риболовля, гірничодобувна промисловість, комунальне господарство, дослідження космосу, використання морських ресурсів тощо).

За даними Міжнародної федерації робототехніки, у 2024 році спостерігались наступні тренди розвитку робототехніки загалом (рис. 1.17) [19]:

- використання штучного інтелекту (Artificial Intelligence – AI) та машинного навчання (Machine Learning). Ця підмножина штучного інтелекту спеціалізується на створенні чогось нового з речей, отриманих під час навчання, і була популяризована такими інструментами, як ChatGPT;
- співпраця людини і робота. Швидкий прогрес датчиків, технологій технічного зору та розумних захватів дозволяє роботам в режимі реального часу реагувати на зміни в навколишньому середовищі й, таким чином, безпечно працювати разом із працівниками-людьми;
- створення універсальних мобільних маніпуляторів (так званих «MoMas»), які автоматизують завдання обробки матеріалів у таких галузях, як автомобільна, логістична чи авіакосмічна. Вони поєднують у собі мобільність роботизованих платформ і спритність рук маніпулятора. Це дозволяє їм орієнтуватися в складних середовищах і маніпулювати об'єктами, що є вкрай важливим для застосування у виробництві;

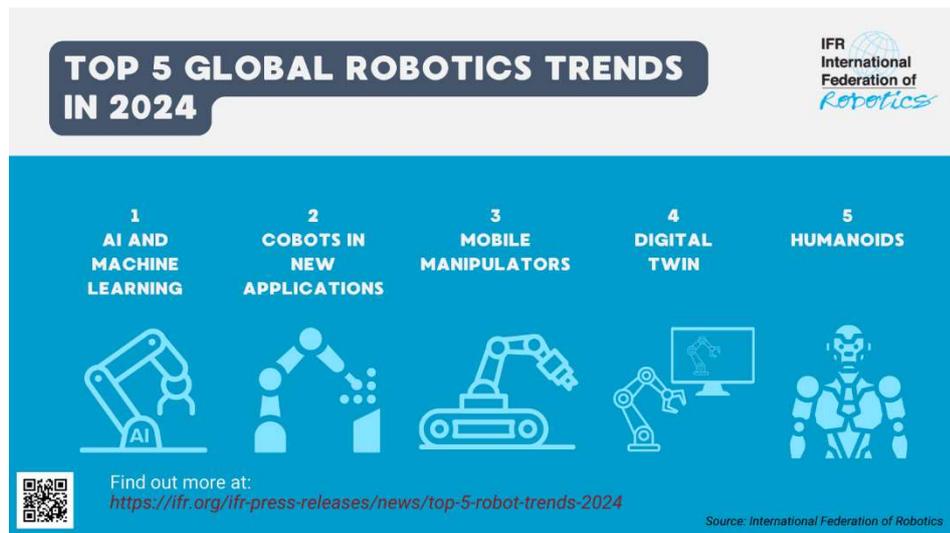


Рис. 1.17 – Тенденції розвитку робототехніки у 2024 році за даними Міжнародної федерації робототехніки [19]

- розвиток технології «Digital Twin» (цифрові близнюки). Технологія цифрового близнюка все частіше використовується як інструмент для оптимізації продуктивності фізичної системи шляхом створення її віртуальної копії. Оскільки роботи все більше й більше інтегруються на підприємствах, цифрові близнюки можуть використовувати робочі дані реального світу для моделювання та прогнозування ймовірних результатів. Оскільки близнюк існує виключно як комп'ютерна модель, його можна протестувати та модифікувати без наслідків для безпеки, заощаджуючи кошти. Усі експерименти можна перевірити до того, як буде створено фізичну модель робота. Цифрові близнюки долають розрив між цифровим та фізичним світами;

- створення гуманоїдних роботів, призначених для виконання широкого спектру завдань у різних середовищах. Людиноподібна конструкція з двома руками та двома ногами дозволяє гнучко використовувати робота в робочих середовищах, які насправді створені для людей. Тому його можна легко інтегрувати, наприклад, в існуючі складські процеси та інфраструктуру.

#### 1.4 Вплив роботів на суспільство

Творці роботів, як от у п'єсі Карела Чапека, мали благородну мету вивільнення людини від небезпечних, шкідливих, важких та монотонних робіт. Але поява реальних «механічних людей» викликала у суспільстві певні занепокоєння та стурбованість, пов'язані з декількома причинами.

По-перше, впровадження роботів у виробництво призвело до вивільнення деякої кількості робочих місць. У суспільстві існують побоювання, що масове впровадження роботів у виробництво знизить потребу у робочій силі, що призведе до зростання безробіття. З цього приводу Ентоні Конноул, який обіймав посаду президента профспілки робочих автопромисловості США, зауважив: «... роботам не потрібно перерви на чашку кави, вони не вступають у профспілки, ніколи не жаліються і протягом тривалого часу можуть працювати без втоми та не вимагаючи заробітної плати. Але не менш вірно й те, що вони нічого не купують» [36]. Отже, проста заміна працівників на роботів може у підсумку призвести до негативного економічного ефекту, адже відсутність покупців на продукцію позбавляє сенсу будь-яке виробництво.

Оскільки уникнути подальшої роботизації не вдасться, потрібно заздалегідь розробляти програми, спрямовані на життя людей в нових умовах. Завдяки збільшенню вільного часу люди можуть більше уваги приділяти розвитку своїх творчих здібностей та навчанню, більше спілкуватись один з одним.

По-друге, у суспільстві є побоювання, що роботи, наділені штучним інтелектом, колись можуть повстати проти людей. Власне кажучи, саме такий сценарій описується в багатьох творах літератури та мистецтва: від «Россумових універсальних роботів» Карела Чапека до «Термінатора» – американського фантастичного кінофільму про війну людей та машин, знятого режисером Джеймсом Кемероном (James Francis Cameron) у 1984 році.

Відомий американський письменник-фантаст Айзек Азімов (Isaac Asimov) в одному зі своїх оповідань, опублікованих у 1942 р., сформулював три закони робототехніки:

1. Робот не може нашкодити людині або через свою бездіяльність допустити, щоб людині було завдано шкоди.
2. Робот мусить підкорятися наказам людини, коли ці накази не суперечать Першому закону.
3. Робот повинен дбати про свою безпеку доти, поки це не суперечить Першому і Другому законам.

Ці три закони є «морально-етичним кодексом» роботів, який використовується і сьогодні.

Зараз важко передбачити наслідки застосування штучного інтелекту у робототехніці, але випадки нещасних випадків, пов'язаних з роботами, траплялись.

Основними причинами травматизму при роботі промислових роботів були:

- неочікувані дії робота в процесі його навчання та роботи;
- помилки при ремонті та налагодженні робота;

- знаходження оператора в робочій зоні при автоматичній роботі робота;
- несправність або відключення захисних пристроїв.

Більшість випадків травматизму обумовлена несправностями пристрою керування та помилками програмування.

Основним засобом забезпечення безпеки роботів першого покоління, які не можуть аналізувати зовнішнє середовище, є запобігання знаходженню людини в їхній робочій зоні. Роботи другого покоління, здатні виявляти присутність сторонніх об'єктів, мають захисні пристрої, які зупиняють рух будь-яких елементів таких роботів у тих випадках, коли людина раптово опинилася у межах робочої зони. Сучасні роботи третього покоління мають систему взаємодії з працівниками-людьми, яка постійно вдосконалюється.

## 2. Визначення та класифікація роботів

### 2.1 Термінологія

Приступаючи до вивчення робототехніки, слід, перш за все, дати визначення основним поняттям цієї науково-практичної дисципліни – що ж таке «робот» та які саме питання вивчає робототехніка.

Вперше термін «робот» (від чеського «робітник») використав чеський письменник Карел Чапек у 1920 р. у п'єсі «Россумові універсальні роботи». Дія п'єси розгортається на фабриці, де виробляють «штучних людей» — роботів, створених із вирощених тканин і органів. Спочатку все іде за задумом – роботи працюють на людей, а на планеті панує мир та достаток. Але згодом роботи повстають проти своїх творців та повністю знищують людство. Проте у фіналі п'єси стає зрозуміло, що внаслідок еволюції у роботів з'являються людські емоції-почуття, і вони фактично стають новими «людьми».

На сьогодні немає єдиного чіткого визначення поняттю «робот». Аналізуючи визначення терміну «робот», які наводяться різними міжнародними організаціями (Американською асоціацією промислової робототехніки, Японською організацією промислових роботів, Міжнародною організацією зі стандартизації, провідними технічними університетами світу), можна запропонувати наступне узагальнене визначення:

*Робот* представляє собою багатофункціональний механічний пристрій, який має зовнішню та функціональну схожість з живими організмами та здатний виконувати певні типи робіт за вбудованою програмою функціонування, яка може змінюватись. Характерними ознаками роботів є їхня автономність та адаптивність, тобто неповна залежність від дій оператора та можливість самостійного приймання рішень на основі інформації, отриманої від системи датчиків зовнішнього середовища та стану роботу, спираючись на вбудовані програмні алгоритми (штучний інтелект).

До роботів не можуть бути віднесені маніпулятори з повним керуванням від людини, навіть якщо керування ведеться на відстані. До роботів також не можуть бути віднесені автооператори, які є маніпуляторами без перепрограмування рухів.

Існує також функціональне визначення, згідно з яким робот – це механічний пристрій, який задовольняє трьом вимогам:

- 1) SENSE – сприймає зовнішнє середовище за допомогою системи сенсорів;
- 2) THINK – аналізує зовнішнє середовище та може адаптуватись під нього;

3) АСТ – тим чи іншим чином впливає на зовнішнє середовище, реалізуючи покладені на нього функції.

*Робототехніка* – це наука та практика проєктування, виробництва та застосування роботів.

Сучасна робототехніка виникла на основі синтезу механіки та кібернетики. Механіка забезпечує роботу багатоланкових механізмів маніпуляторів або мобільних платформ, а кібернетика – керування цими механізмами. Згодом до механічних пристроїв все ширше почали додаватись електротехнічні та електронні, а інтелектуальне керування реалізовуватись за допомогою програмного забезпечення.

Синергетичне об'єднання вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними та комп'ютерними компонентами, що забезпечують проєктування та виробництво якісно нових механізмів, машин та систем з інтелектуальним керуванням їх функціональними рухами, породило нову науку – мехатроніку (рис. 2.1). Робот є типовим прикладом мехатронної системи.



Рис. 2.1 – Структурні складові мехатроніки

## 2.2 Покоління роботів

В історії розвитку роботів можна виділити їх три покоління, кожне з яких за функціональними можливостями та досконалістю значно переважає попереднє. При цьому, однак, слід зазначити, що роботи різних поколінь не замінюють один одного, а доповнюють та працюють там, де це найбільш доцільно.

Роботи *першого покоління*, які з'явилися у 1960-х рр., мають програмне керування, звідси – і їх назва – «програмні». Такі роботи можуть виконувати набір

заздалегідь визначених програмою дій при фіксованому стані зовнішнього середовища. За рахунок зміни керуючої програми можна змінити набір виконуваних операцій, що забезпечує роботам першого покоління певну гнучкість. Проте умови, в яких працюють такі роботи, мають залишатися незмінними, будь-які відхилення призводять до збою та зупинки.

Прикладами технологічних операцій, з якими успішно пораються програмні роботи – допоміжні операції подачі деталей (установка/зняття), транспортування за простими траєкторіями, зварювання, лиття, фарбування та інші.

Роботи *другого покоління*, які з'явилися у 1980-х рр., відрізняються можливістю реагування (адаптації) на умови зовнішнього середовища, тому називаються «адаптивними». Програмний алгоритм таких роботів є нелінійним, набір виконуваних дій залежить від параметрів зовнішнього середовища, які аналізуються системою керування через інформацію від датчиків.

Роботи другого покоління мають істотно більші функціональні можливості та можуть виконувати більш складні технологічні операції. Такі, наприклад, як складання, монтаж, транспортування по складних траєкторіях з урахуванням оточення та взаємодією з іншими роботами.

У 1990-х роках (хоча дослідження в цьому напрямку проводилися значно раніше) з'явилися роботи *третього покоління*, які мають елементи штучного інтелекту. Такі роботи отримали назву «інтелектуальних». Інтелектуальні роботи в процесі свого функціонування формують модель зовнішнього середовища, для якої самостійно розробляють план дій. Для цього використовуються складні програмні алгоритми (штучний інтелект). Характерними ознаками роботів третього покоління є наявність самонавчання, а також найвищий ступінь автономності, тобто можливість функціонування без стороннього керування.

Останнім часом у зв'язку зі швидким розвитком нейрокомп'ютерів та нейромережевих систем з'явилася можливість створення роботів *четвертого покоління* – з нейронними системами керування. Принципи нейронного керування значною мірою подібні до принципів роботи мозку та нервової системи людини. Такі системи не програмуються заздалегідь. Вони навчаються та самоорганізуються на вирішення різних рухливих, інформаційних та інтелектуальних задач.

### 2.3 Класифікація

На сьогодні існує декілька класифікацій роботів, в залежності від тих чи інших їх ознак. Найбільш загальними є наступні класифікації: за основною функцією, за призначенням, за особливостями керування та за конструктивними ознаками.

**За основною функцією** роботів можна поділити на дві групи: мобільні платформи та маніпулятори [15].

Характерною ознакою мобільних платформ є їхнє пересування з метою виконання покладених на них задач: переміщення вантажів, дослідження навколишнього середовища або прибирання підлоги в будинку.

Основна функція маніпуляторів – виконання маніпуляційних дій над об'єктом, який знаходиться в межах певної робочої зони. Типовим прикладом маніпуляторів є промислові роботи, які виконують виробничі операції, такі як фарбування, зварювання, подача/зняття деталей тощо. Більшість маніпуляторів встановлюється стаціонарно, але є моделі, розташовані на мобільних платформах. В цьому разі роботи відносяться до комбінованого типу, адже мають функціональність, притаманну одночасно мобільним платформам та маніпуляторам.

**За призначенням** роботів можна також розділити на дві великі групи – виробничі, призначені для полегшення фізичної праці людини, та дослідницькі, метою яких є проведення наукових досліджень (рис. 2.2) [28].

До виробничих роботів відносяться, зокрема, промислові та будівельні, транспортні, сільськогосподарські, побутові, медичні, військові та спеціальні. Враховуючи, що кількість сфер використання робототехніки постійно зростає, класифікацію роботів за призначенням можна вважати незавершеною, «еволюційною». Слід очікувати, що з часом до неї будуть додані нові підгрупи.

*Промислові роботи* (рис. 2.3), створені для автоматизації виробничих процесів у різних галузях промисловості, отримали найбільше розповсюдження. За технологічними ознаками ці роботи підрозділяються на 3 групи: технологічні, призначені для виконання основних виробничих операцій; допоміжні, які використовуються для допоміжних операцій типу подачі та транспортування; універсальні, які можуть бути задіяні для виконання як основних, так і допоміжних технологічних операцій.

До промислових можна віднести також будівельних роботів, оскільки будівництво за технологічними ознаками близьке до промислового. Останнім часом для будівельної галузі створено низку роботів, які в автоматичному режимі здійснюють укладання цегли та блоків (рис. 2.4), бетонування, транспортування будівельних матеріалів тощо.

*Транспортні роботи* призначені для автоматизованого транспортування вантажів, а також для керування різними транспортними системами. При цьому виділяються чотири принципово різні типи роботів – наземні, повітряні, водні та підземні.

Найбільший розвиток отримали наземні та повітряні роботи. Наземні колісні та гусеничні роботи широко використовуються в автоматизованих

транспортно-складських системах у вигляді автоматизованих кранів-маніпуляторів, керованих візків, робочарів тощо (рис. 2.5). Останнім часом в різних країнах світу тестуються роботи-кур'єри для доставки на невеликі відстані (до 5 км) їжі та інших малогабаритних вантажів (рис. 2.6). Для доставки на більші відстані використовуються повітряні роботи.

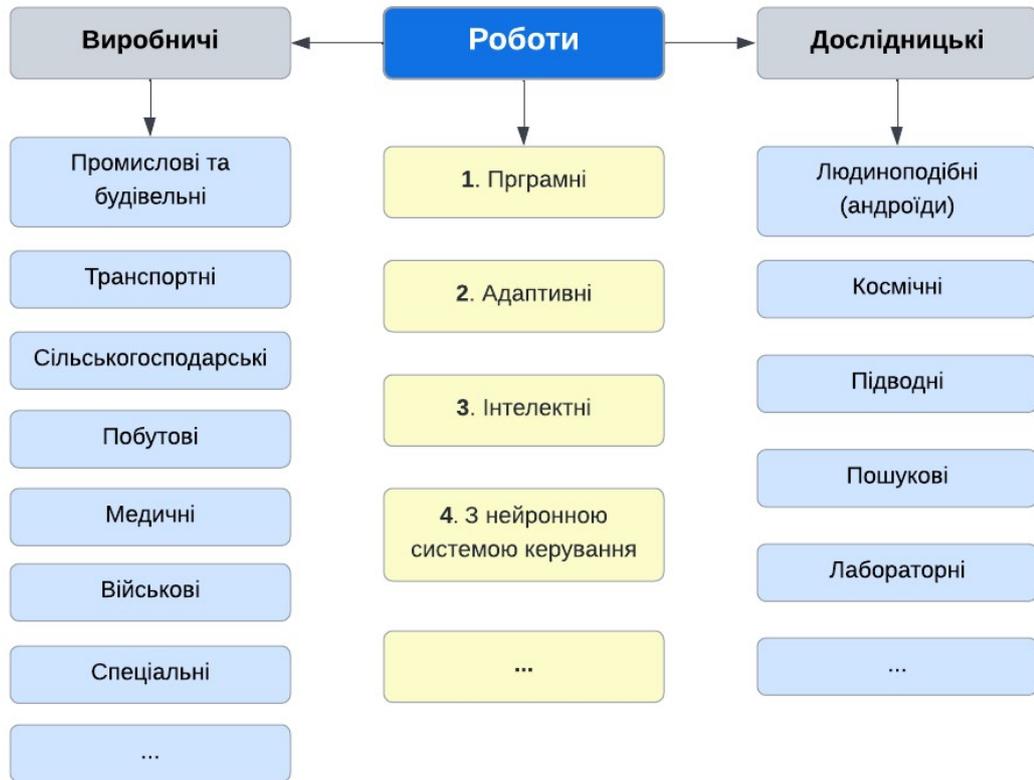


Рис. 2.2 – Еволюційна класифікація роботів



Рис. 2.3 – Маніпуляційний робот YuM для промисловості від ABB Robotics (2011)



Рис. 2.4 – Робот для укладання цегли Nadrian X від Fastbrick Robotics (2020)



Рис. 2.5 – Робо-платформа Husky від Clearpath Robotics (2011)



Рис. 2.6 – Робот-кур'єр від Starship Technologies (2018)

*Сільськогосподарські роботи* призначені для автоматизації трудомістких та монотонних процесів у сільськогосподарському виробництві. Створюються транспортно-технологічні засоби (трактори, сіялки), які без водіїв використовуються для посіву, оранки, внесення добрив, обприскування посівів, обрізання зайвих побігів тощо (рис. 2.7) [32]. Є роботи, що відлякують птиць від полів та садів із врожаєм.

Також розроблені моделі роботів для догляду за тваринами. Подібні роботи слідкують за випасом скота, забезпечують доїння корів, за розкладом напоюють годівниці, здійснюють стрижку вівець тощо.



Рис. 2.7 – Сільськогосподарський робот-помічник Ladybird від University of Sydney (2020)



Рис. 2.8 – Робот-пилосос Roomba від iRobot (2002)

*Побутові роботи* призначені для виконання побутових робіт та сприяють вивільненню часу людини для духовного розвитку та життя. Такі роботи можуть в автономному режимі прибиратись, готувати їжу, прати та прасувати білизну, виконувати роботи на присадибній ділянці тощо (рис. 2.8). Крім того, побутові роботи можуть бути включені до автоматизованих систем з охорони будинку.

Перспективним напрямом є створення роботів для виконання соціальної роботи – нагляду за дітьми, допомоги людям із обмеженими фізичними можливостями, хворим. Так, вже сьогодні створені роботи-поводирі, які допомагають незрячим людям орієнтуватися в просторі із урахуванням поточного зовнішнього середовища, а також роботи-доглядачі, які слідкують за станом хворого та у разі необхідності викликають на допомогу лікаря.

Обширна область застосування відкривається перед робототехнікою в галузі охорони здоров'я та медицини. *Медичні роботи* призначені для виконання медичних маніпуляцій, фізіотерапії, хірургії, протезування. Розробляються мікроскопічні роботи, які можуть самостійно пересуватися по внутрішніх каналах людського організму та виконувати складні операції.

*Військові роботи* призначені для виконання бойових завдань: проведення розвідки, нанесення ураження військовій техніці та живій силі противника, евакуації поранених з поля бою тощо (рис. 2.9). Такі роботи повинні бути захищеними від виявлення та придушення засобами радіоелектронної боротьби, мати високу маневреність, точність та автономність.



Рис. 2.9 – Повітряний робот спостереження Global Hawk від Northrop Grumman (2001)



Рис. 2.10 – Робот-пожежник COLOSSUS від Shark Robotics (2018)

*Спеціальні роботи* призначені для виконання відновлювальних та рятувальних робіт при ліквідації аварій та стихійних лих (рис 2.10). На сьогодні створені роботи для гасіння пожеж, розбирання завалів, виявлення та знешкодження небезпечних предметів та речовин. Також ці роботи можуть виконувати функції з охорони правопорядку, обстежуючи «ввірену» їм територію та повідомляючи про виникнення нештатних ситуацій.

Роботи другої групи – дослідницькі – призначені для пошуку, збирання, переробки та передачі інформації про досліджувані об'єкти. Такими об'єктами можуть бути важкодоступні або недоступні для людини середовища – космічний простір, океанські глибини, надра Землі, екстремальні лабораторні умови тощо.

Окремим напрямом у створенні дослідницьких роботів є андроїди, або гуманоїди – людиноподібні роботи, які за своїми функціональними та інтелектуальними можливостями наближені до людини (рис. 2.11). Існує також багато дослідницьких роботів, які імітують поведінку тварин та комах, наприклад, собак (рис. 2.12).



Рис. 2.11 – Космічний робот-гуманоїд Valkyrie від NASA (2013)



Рис.2.12 – Дослідницька робо-платформа CyberDog 2 від Xiaomi (2023)

**За особливостями керування** роботи підрозділяються на три групи: біотехнічні, інтерактивні та автоматичні.

*Біотехнічні роботи* функціонують лише за безпосередньої участі людини, яка керує рухами виконавчих органів. При цьому, однак, слід зауважити, що таке керування має бути епізодичним, лише при виконанні деяких операцій, які неможливо автоматизувати. Інакше робот втрачає свою основну ознаку – автоматичність – і по суті перестає бути роботом. До біотехнічних роботів, зокрема, відносять екзоскелети (екзоскелетони) – антропоморфні конструкції, які «надягаються» на тіло людини та надають їй додаткові можливості (рухливі, силові, функціональні) (рис. 2.13).

*Інтерактивні роботи* відрізняються від біотехнічних наявністю пам'яті, в яку записуються окремі рухи. Такі роботи також можуть керуватися людиною, але можуть працювати і в автономному режимі. Наприклад, інтерактивними є роботи, які можуть керуватися за допомогою голосу. Людина вимовляє команду, а робот приймає цю команду та виконує відповідні дії (рис. 2.14).

*Роботи з автоматичним керуванням* можуть функціонувати самостійно, без участі людини, за заданою програмою.



Рис. 2.13 – Робот-екзоскелет Guardian XO від Sarcos (2020)



Рис. 2.14 – Інтерактивний робот AT-Robot

**За конструктивними ознаками** роботи можуть бути розділені на пристрої з електричним, гідравлічним, пневматичним чи комбінованим приводом; маніпуляційні та без маніпуляторів; у нормальному та захисному виконанні тощо.

Слід також зазначити, що окремі групи роботів за призначенням мають низку своїх, притаманних тільки ним, класифікаційних ознак. Наприклад, промислові роботи класифікуються не тільки за характером виконуваних операцій (основні, допоміжні, універсальні), про що згадувалось раніше, а також за вантажопідйомністю; кількістю ступенів рухливості; типом виробництва, для якого призначений робот (ливарне, зварювальне, складальне, пресове та ін.) тощо.

### 3. Будова роботів

#### 3.1 Загальна структура

Сучасний робот, який активно взаємодіє із зовнішнім середовищем, має наступні основні системи: систему керування, інформаційно-вимірвальну систему, систему зв'язку та виконавчу систему (рис. 3.1). Кожна з цих систем відповідає аналогічним функціям людини.

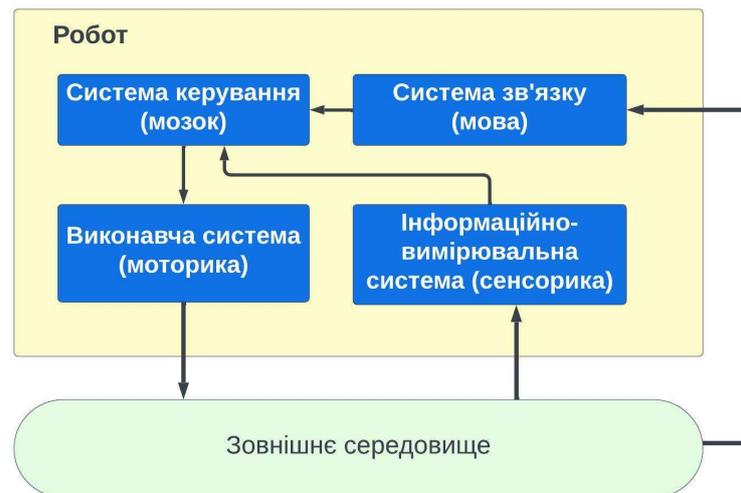


Рис. 3.1 – Структурна схема робота

«Мозком» роботу є *система керування*. Її головна задача – аналіз вхідної інформації, яка поступає від інформаційно-вимірвальної системи, та вироблення відповідних дій для виконавчої системи на основі закладених алгоритмів роботи. Крім того, система керування пов'язана із системою зв'язку, завдяки чому забезпечується «спілкування» робота з людиною та взаємодіючими пристроями.

Найпростіші системи керування реалізуються на базі пневматичних або електричних логічних елементів, найбільш досконалі – на основі ЕОМ, побудованих на базі мікропроцесора або мікроконтролера.

Інтелектуальні та адаптивні можливості робота визначаються головним чином алгоритмічним (програмним) забезпеченням системи керування.

*Інформаційно-вимірвальна (сенсорна) система* – це «органи почуттів» робота, призначені для сприйняття та перетворення інформації про стан зовнішнього середовища та самого робота. В якості елементів сенсорної системи використовуються датчики різного типу, а також пристрої для фіксації аудіо, фото та відеоінформації.

*Система зв'язку* («мова») призначена для взаємодії робота із оператором, а також іншими технічними пристроями. Ця взаємодія може відбуватись через пульт керування (найчастіший випадок) або за допомогою голосових команд. Завдяки системі зв'язку оператор формує завдання роботу, а також отримує інформацію про стан окремих його систем.

Інформація, яка надходить від робота, в найпростішому випадку представляє собою світлові та звукові сигнали, в більш досконалому – виводиться на цифрові індикатори та дисплеї у зручній для оператора формі.

*Виконавча система* («моторика») – це набір пристроїв (механізмів), призначених для безпосереднього впливу на об'єкти навколишнього середовища або взаємодії з ними у відповідності до керуючих сигналів. Елементами моторної системи є приводи (двигуни); передавальні пристрої (передачі); механічні руки (маніпулятори); різні технологічні інструменти; візки з колісним, гусеничним або іншим шасі тощо.

Сукупність інформаційно-вимірювальної системи, а також систем керування та зв'язку утворює *інформаційно-керуючу систему* робота, яка забезпечує обробку та передачу інформації та безпосереднє керування приводами та механізмами виконавчої системи з метою організації активної взаємодії робота з навколишнім середовищем та виконання задач, сформульованих оператором [28].

При проектуванні виконавчої системи використовуються принципи механіки та електромеханіки, а інформаційно-керуючої системи – електроніки, кібернетики та інформатики.

### 3.2 Етапи проектування

Проектування в техніці – це комплекс заходів із пошуку технічних рішень, що задовольняють заданим вимогам, з подальшою їх оптимізацією та реалізацією у вигляді технічної документації та дослідних зразків.

Проектування передбачає виконання комплексу робіт дослідницького, розрахункового та конструкторського характеру.

Будь-який сучасний технічний виріб, зокрема, робот, є результатом застосування комплексного знання з різних дисциплін, і потребує системного підходу, який полягає у розгляді окремих частин складної системи з урахуванням їх взаємодії. Методи системного підходу в техніці розглядає спеціальна дисципліна – системотехніка.

Проектування роботів вимагає від розробників знання механіки, електроніки та програмування. Тож, як правило, над розробкою та виробництвом роботів працює ціла команда спеціалістів різного профілю.

*Механіка* у загальному розумінні – це наука проектування машин. Предметом досліджень механіки є рух матеріальних тіл та взаємодія між ними. За допомогою принципів механіки створюється виконавча система, яка безпосередньо виконує основні задачі, покладені на робота. Виконавча система може складатися з декількох механізмів. Наприклад, робот може мати маніпуляційний механізм та механізм пересування.

*Електроніка* – галузь науки та техніки, присвячена проблемам створення електричних пристроїв, робота яких основана на зміні концентрації та переміщенні заряджених часток (електронів) в різних фізичних тілах. В робототехніці електроніка використовується для створення електричних схем систем керування, зв'язку та інформаційно-вимірювальної системи.

*Програмування* – процес написання команд, які має виконувати комп'ютер при вирішенні покладених на нього завдань. В робототехніці програмування використовується для створення моделі поведінки робота, закладену в систему керування.

Повний цикл проектування включає два основних етапи: науково-дослідницькі та дослідно-конструкторські роботи (Research & Development, R&D).

На етапі науково-дослідницьких робіт (НДР) визначається можливість та доцільність створення нового виробу. Для цього проводиться детальний аналіз об'єкту досліджень: його функціональності, властивостей, сфер застосування, економічності тощо. На основі існуючих рішень, теорій, методів розрахунку пропонуються варіанти створення нової продукції та ресурсів, які для цього знадобляться. Підсумками проведення науково-дослідницьких робіт є розробка технічного завдання або звіт про недоцільність подальших робіт в обраному напрямку.

В разі позитивних висновків НДР переходять до другого етапу – дослідно-конструкторських робіт (ДКР). Головна мета цього етапу – створення комплексу технічної документації для виробництва нової продукції. Основними стадіями ДКР є:

- 1) уточнення, узгодження з виконавцем та затвердження замовником технічного завдання;
- 2) формування технічної пропозиції – виявлення додаткових або уточнення вимог до виробу;
- 3) ескізне проектування – обґрунтування принципових технічних рішень (розробка структурних та функціональних схем, вибір елементної бази);

4) технічне проектування – розробка остаточних технічних рішень, які надають повне уявлення про конструкцію виробу. Може виконуватись методом «знизу вгору» – шляхом розробки окремих складових виробу з подальшим їх поєднанням в одне ціле та «згори вниз», коли спочатку розробляються загальні схеми виробу, а потім – окремі його частини;

5) розробка робочої документації – повного комплексу креслень та розрахунків для виготовлення дослідного зразка;

6) випробування та доведення – перевірка дослідного зразка на відповідність вимогам технічного завдання, в разі необхідності – уточнення робочої документації.

Після виконання останньої стадії робоча документація передається замовнику для подальшого використання у серійному виробництві.

Стосовно проектування робіт основні узагальнені етапи ДКР можна представити в наступному вигляді:

- формування технічного завдання – на цьому етапі визначаються основні функції, які має виконувати робот. У подальшому технічне завдання може бути уточнене та доповнене;
- складання загальної структури робота. В залежності від виконуваних функцій створюється структурна схема робота, визначається склад його основних систем: керування, зв'язку, інформаційно-вимірювальної та виконавчої;
- конкретизація схем, підбір стандартних та проектування нестандартних компонентів;
- розробка керуючого програмного забезпечення;
- збирання окремих систем та механізмів, тестування їх функціональності окремо від інших частин робота;
- складання всіх систем в одне ціле – робота;
- комплексне тестування всіх систем робота, усунення виявлених недоліків.

В процесі проектування необхідно дотримуватись загальних принципів:

1) Послідовність та ітераційність – полягає у виконанні робіт у визначеній послідовності, з можливістю корегування результатів, отриманих на попередньому етапі (ітерації).

2) Модульний принцип – можливість розділити виріб на окремі частини, кожна з яких має автономність, тобто може бути створена та протестована незалежно від інших.

3) Уніфікація – застосування однотипних складальних одиниць в різних виробках;

4) Відповідність – вибір номенклатури та значень вихідних характеристик у відповідності до призначення проєктованого виробу;

5) Принцип компромісів – прийняття збалансованих рішень, коли оптимальність виробу в цілому визначається компромісними (не екстремальними) значеннями окремих параметрів;

6) Принцип наступності – застосування вже відомих та добре опрацьованих елементів та вузлів.

Сучасна розробка проводиться із широким залученням комп'ютерних систем автоматизованого проєктування – САПР (CAD). Застосування САПР в процесі розробки нових виробів дозволяє вирішити наступні задачі:

- скоротити час розробки;
- знизити трудомісткість процесу проєктування;
- підвищити точність розрахунків та якість проєктування;
- зменшити витрати на проєктування;
- зменшити трудомісткість та витрати на супровід та модернізацію виробу;
- зменшити витрати на фізичне моделювання та тестування дослідних зразків.

За цільовим призначенням САПР підрозділяються на наступні групи:

- засоби проєктування CAD (Computer Aided Design);
- засоби інженерного аналізу CAE (Computer Aided Engineering);
- засоби підготовки автоматизованого виробництва CAM (Computer Aided Manufacturing);
- засоби планування технологічних процесів CAPP (Computer Aided Process Planning);
- засоби управління документообігом PDM (Product Document Management);
- геоінформаційні системи GIS (Geoinformatics Systems).

У свою чергу, CAD-рішення прийнято розділяти за галузевим призначенням:

- машинобудівні CAD – MCAD (Mechanical Computer Aided Design);
- САПР електронних пристроїв, EDA (Electronic Design Automation);
- архітектурно-будівельні САПР, AEC (Architecture Engineering and Construction).

Продукти CAE поділяються на системи:

- розрахунків на міцність (в основному засобами МКЕ – методу кінцевих елементів);
- теплових розрахунків;
- обчислювальної гідроаеродинаміки (CFD, Computational Fluid Dynamics);

- кінематичного аналізу;
- механічної симуляції (MES, Mechanical Event Simulation);
- симуляції процесів лиття та обробки тиском;
- електромагнітних та електродинамічних розрахунків;
- оптимізаційні.

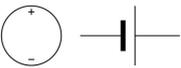
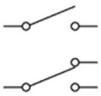
Системи САПР дозволяють створювати моделі проєктованого об'єкту. При цьому розрізняють аналітичне (математичне) та фізичне моделювання. При аналітичному моделюванні створюється математична модель об'єкту, а при фізичному – фізична, як правило, виконана у зменшеному та спрощеному вигляді. Моделі дозволяють отримати візуалізацію, виконати розрахунки та оптимізацію проєктованого об'єкту.

### 3.3 Схеми робота

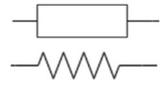
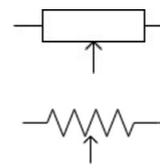
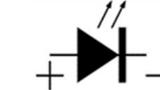
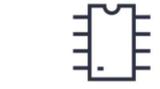
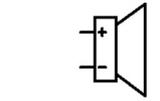
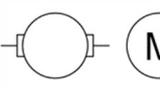
Оскільки робот є мехатронною системою, побудованою на принципах механіки та електроніки, при його проєктуванні необхідно вміти читати та складати механічні та електричні схеми, конкретне наповнення яких залежить від конструкції та функціональних можливостей робота.

В таблиці 3.1 наведені типові елементи, з яких складаються електричні схеми інформаційно-керуючих систем робота [25]. Приклад простої електричної схеми підключення двигуна постійного струму до плати керування Arduino<sup>1</sup> наведений на рис. 3.2. Ця схема містить двигун М, випрямний діод 1N4007, біполярний транзистор BC548 та резистор постійного опору 10кОм. Електричний ланцюг схеми має три точки підключення до виводів плати Arduino: живлення 5V, заземлення GND та вихід D3. Питання побудови та роботи електричних схем вивчаються в курсах «Електротехніка», «Електроніка та мікропроцесорна техніка».

Табл. 3.1 – Типові елементи електричних схем

№ з/п	Назва	Позначення на схемі	Приклад	Головні параметри	Типове застосування
1	Джерело живлення			Напруга (В); тип (постійного, змінного струму)	Живлення електричних ланцюгів
2	Перемикач			Тип	З'єднання/роз'єднання електричних ланцюгів

<sup>1</sup> Більш детальну інформацію про платформу Arduino наведено у розділі 4

3	Резистор			Опір (Ом)	Зменшення електричного струму
4	Змінний резистор (потенціометр)			Діапазон опору (Ом)	Налаштування параметрів залежно від опору
5	Конденсатор			Ємність (Фарад)	Накопичення електричної енергії, згладжування напруги, фільтрація сигналів
6	Котушка індуктивності			Індуктивність (Генрі)	Зменшення перешкод в електричних ланцюгах, згладжування струму, двигуни змінного струму, безконтактні датчики
7	Трансформатор			Коефіцієнт трансформації	Трансформація напруги
8	Діод			Максимальна зворотна напруга (В), номінальний струм (А)	Випрямлення змінного струму, підтримка постійної напруги, захист від перенавантажень, створення логічних вентилів
9	Світлодіод			Номінальний струм (А)	Випромінювання енергії у вигляді світла
10	Транзистор			Вольт-амперні характеристики	Комутація електричних ланцюгів, посилення електричних сигналів
11	Інтегральні мікросхеми			Відповідно до паспорту окремої мікросхеми	Виконання складних логічних операцій та обчислень
12	Мікрофон			Чутливість, частотна характеристика	Перетворення звукових коливань в електричні сигнали
13	Динамік			Частотна характеристика	Перетворення електричних сигналів у звукові коливання
14	Електродвигун			Потужність (Вт), номінальна частота обертання (об/хв)	Перетворення електричної енергії в механічну

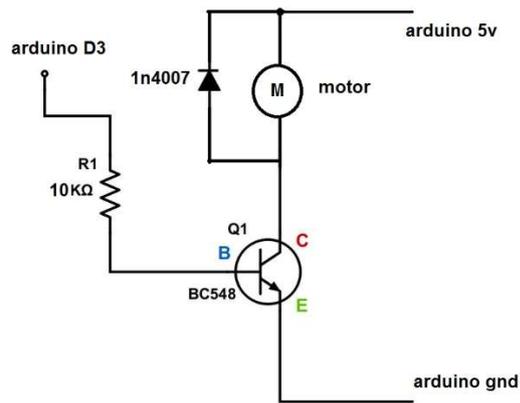


Рис. 3.2 – Електрична схема підключення двигуна постійного струму до плати керування Arduino (приклад)

Проектування виконавчого механізму, призначеного для захвату та переміщення об'єктів (маніпулятора), потребує розробки відповідної кінематичної схеми. Типові елементи кінематичних схем маніпуляторів наведені в табл. 3.2.

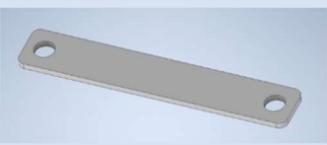
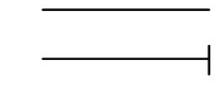
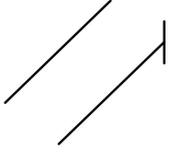
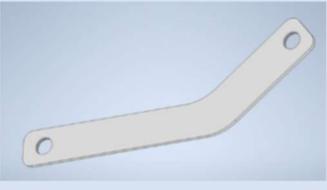
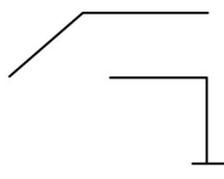
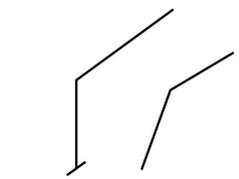
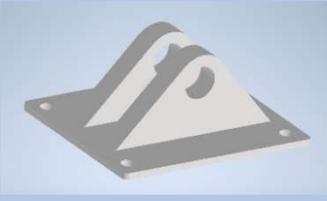
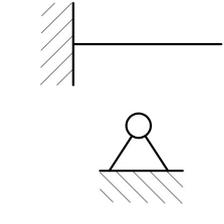
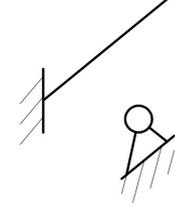
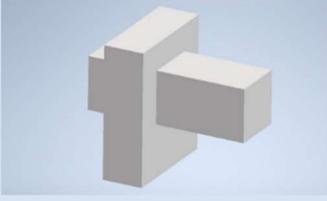
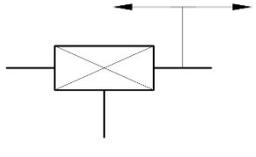
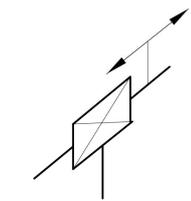
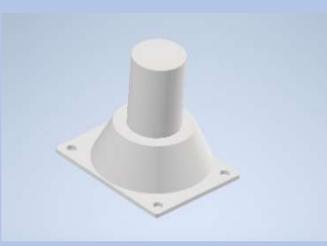
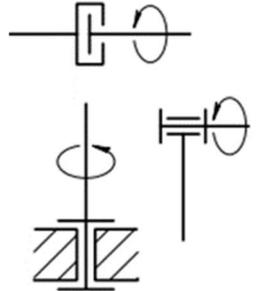
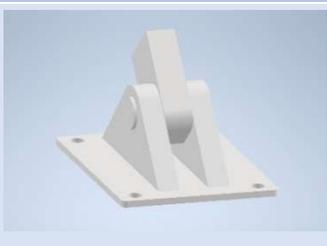
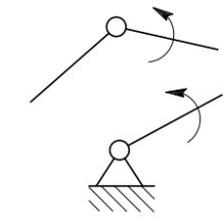
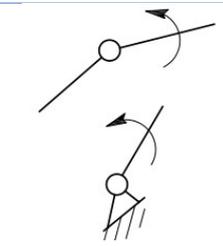
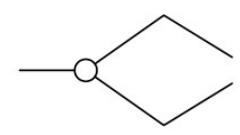
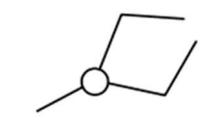
На рис. 3.3 наведений приклад загального вигляду простого маніпулятора та його кінематичної схеми. Маніпулятор складається з нерухомої стійки 0, рухомих ланок 1 – 3 та захватного пристрою. Рухомі ланки маніпулятора поєднані між собою однією обертальною парою ротаційного типу та двома поступальними парами. Питання побудови та розрахунку кінематичних схем маніпуляторів розглядаються в курсі «Теорія механізмів і машин». Розрахунок конструктивних елементів маніпуляторів здійснюється методами навчального курсу «Деталі машин».

В разі використання комбінованого приводу механізмів робота – електрогідравлічного, електропневматичного або електромеханічного – додається гідравлічна, пневматична або кінематична схема відповідно.

Типові елементи гідравлічних та пневматичних схем приводів наведені у табл. 3.3. На рис. 3.4 зображено приклад гідравлічної схеми приводу ланки маніпулятора. Схема складається з регульованого насоса, гідроциліндру (або гідромотору), розподільника, запобіжного клапану та гідробаку. Питання проектування гідравлічних та пневматичних приводів розглядає дисципліна «Гідравліка, гідро- та пневмопривод».

Типові елементи кінематичних схем механічних приводів наведені в табл. 3.4. В цих приводах для передачі та трансформації руху від двигуна до виконавчого органу використовуються механічні передачі різного типу: зубчасті, хвильові, пасові та інші.

Табл. 3.2 – Типові елементи кінематичних схем маніпуляторів

Назва	Приклад	Позначення на схемі	
		плоскій	просторовий
Ланка рухома: прямолінійна  складної форми			
			
Ланка нерухома (стійка, основа)			
Поступальна кінематична пара			
Обертальна кінематична пара – ротація			
Обертальна кінема- тична пара – згинання			
Захватний пристрій			

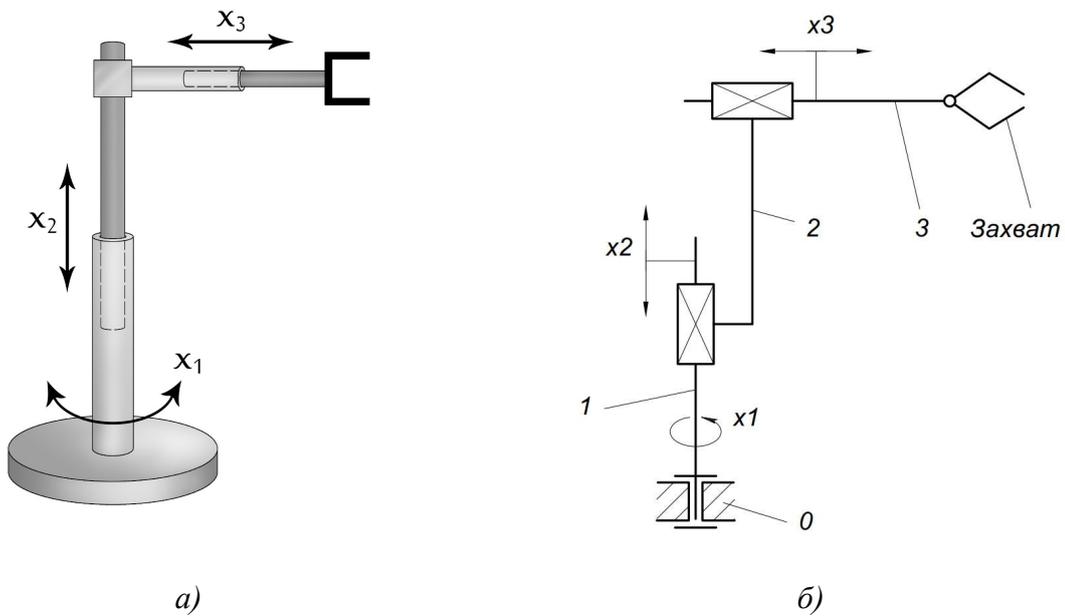
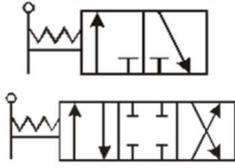
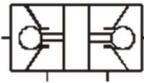
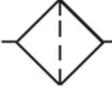
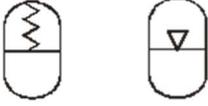


Рис. 3.3 – Приклад загального вигляду простого маніпулятора (а) та його кінематичної схеми (б)

Табл. 3.3 – Типові елементи гідравлічних та пневматичних схем

Назва	Приклад	Позначення на схемі	Головні параметри
Гідро/пневмо циліндр однієї дії			Зусилля на штоці (Н)
Гідро/пневмо циліндр двох дії			Зусилля на штоці (Н)
Гідронасос / компресор			Подача (л/с)
Гідро/пневмомотор			Потужність (Вт), крутний момент (Нм), частота обертання (об/хв)
Клапан запобіжний			Витрата рідини (л/с)
Клапан зворотний			Витрата рідини (л/с)
Дросель			Витрата рідини (л/с)

<b>Розподільник</b>			Кількість позицій, витрата рідини (л/с)
<b>Замок</b>			Витрата рідини (л/с)
<b>Фільтр</b>			Тонкість очищення (мк), пропускна здатність (л/с)
<b>Акумулятор</b>			Тип
<b>Гідралічний бак</b>			Ємність (л)

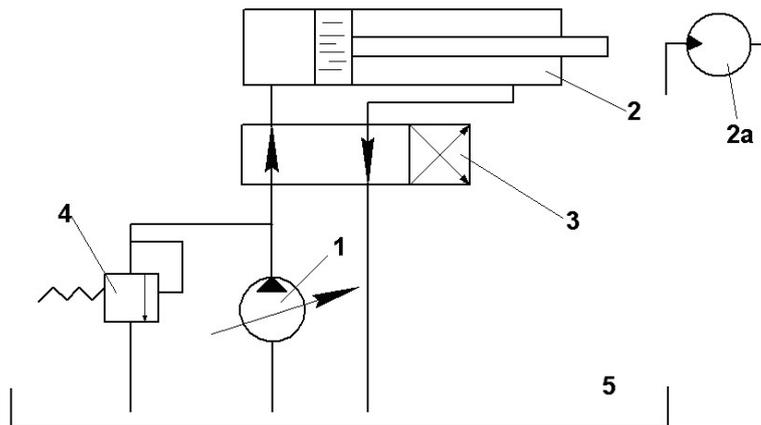


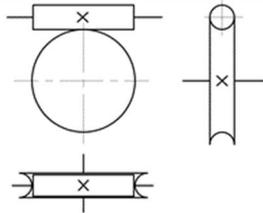
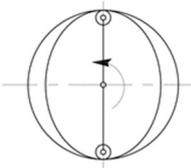
Рис. 3.4 – Схема гідралічного приводу ланки маніпулятора:  
 1 – регульований насос, 2 – гідроциліндр (2а – гідромотор), 3 – розподільник, 4 – запобіжний клапан, 5 – гідробак

На рис. 3.5 наведений приклад механічного приводу механізму пересування робота, який складається з двигуна, муфти, гальм, зубчастої передачі та виконавчого органу у вигляді коліс.

Питання проектування та розрахунку механічних приводів розглядаються в навчальних курсах «Теорія механізмів і машин», «Деталі машин».

Табл. 3.4 – Типові елементи кінематичних схем механічних приводів

Назва	Приклад	Позначення на схемі	Призначення
Нерухома ланка (основа)			Основа для приєднання рухомих ланок
Вал (ось)			Утримання насаджених деталей та передача навантажень на опори
Підшипник			Підтримка валів та осей
Муфта			Поєднання валів
Двигун			Привод механізмів
Гальма			Зупинка та зниження швидкостей ланок механізмів
Пасова передача			Передача руху із трансформацією гнучким елементом
Ланцюгова передача			Передача руху із трансформацією ланцюгом
Зубчаста конічна передача			Передача руху із трансформацією кінчними зубчастими колесами
Зубчаста циліндрична передача			Передача руху із трансформацією циліндричними зубчастими колесами

Черв'ячна передача			Передача руху із трансформацією парною «черв'як – зубчасте колесо»
Хвильова передача			Передача руху із трансформацією руху хвильовою деформацією

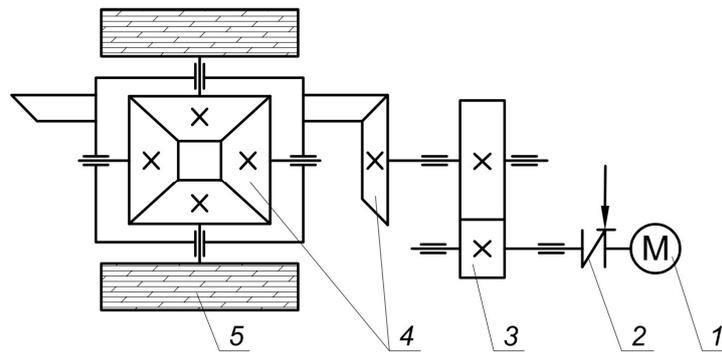


Рис. 3.5 – Кінематична схема механічного приводу пересування робота (приклад)  
 1 – двигун; 2 – муфта із гальмівним шківом; 3 – циліндрична зубчаста передача;  
 4 – конічні зубчасті передачі; 5 – колесо

## 4. Система керування

### 4.1 Загальні принципи побудови

Система керування сучасного робота повинна мати:

- здатність до навчання, яка полягає у вмінні аналізувати зовнішнє середовище та адаптуватись до нього;
- ієрархічну організацію, яка дозволяє розділити загальне вирішення задачі між різними рівнями;
- модульну структуру, в якій кожний модуль відповідає за вирішення тієї чи іншої конкретної задачі, але всі модулі пов'язані між собою принципом синергії.

Загальну структурно-функціональну схему адаптивної системи керування ієрархічного типу можна представити у вигляді, зображеному на рис. 4.1. Згідно з нею, процес керування здійснюється на трьох рівнях: стратегічному, тактичному та виконавчому [24].

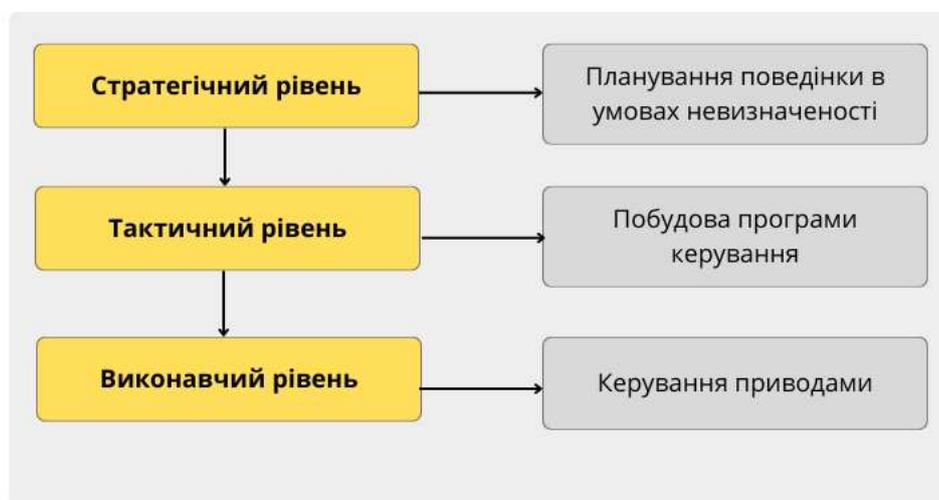


Рис. 4.1 – Загальна структурно-функціональна схема адаптивної системи керування

*Стратегічний рівень* призначений для планування дій робота в умовах неповної інформації про зовнішнє середовище та об'єкт керування.

*Тактичний рівень* виконує перетворення команд керування, що в узагальненому вигляді надходять зі стратегічного рівня, на програму конкретних дій.

На *виконавчому рівні* виконуються розрахунки та видача керуючих сигналів, які безпосередньо приводять в рух механізми робота.

В міру просування від вищих до нижчих рівнів керування знижується інтелектуальність системи (складність програмного забезпечення та алгоритмів), але підвищується її точність (принцип IPDI – Increasing Precision with Decreasing Intelligence).

Схему рис. 4.1 можна деталізувати (рис. 4.2), представивши шістьма підсистемами різних рівнів [28]:

1. Спілкування робота з оператором – верхній рівень ієрархії системи, на якому здійснюється прийом завдань у загальній формі.
2. Планування поведінки та прийняття рішень – рівень, на якому отримане від оператора завдання переробляється в алгоритм конкретних дій з урахуванням сигналів від інформаційно-вимірювальної системи.
3. Розпізнавання та аналіз ситуації – на цьому рівні відбувається аналіз інформації, що надходить від вимірювально-інформаційної системи.
4. Формування понять та моделі зовнішнього середовища – рівень, на якому виконується опис зовнішнього середовища та стану самого робота на підставі поточної інформації та накопиченого роботом досвіду. На цьому рівні реалізується принцип навчання.
5. Побудова програмних рухів – рівень, на якому формуються програмні рухи виконавчих органів у відповідності до плану дій, необхідних для досягнення поставленої мети з урахуванням стану зовнішнього середовища та самого робота.
6. Керування приводами – нижчий рівень ієрархії пристрою керування, який безпосередньо керує приводами для реалізації програмних дій виконавчих органів механізмів робота.

Перша, третя та четверта підсистеми утворюють стратегічний рівень, друга та п'ята – тактичний, а шоста – виконавчий.

Усі перелічені рівні функціонально пов'язані між собою через систему координації їх роботи. Рівні ієрархії, вихідні сигнали яких є входами для більш низьких рівнів, називаються ведучими по відношенню до нижчих – відомих.

В процесі функціонування пристрою керування робота не всі рівні ієрархії працюють одночасно: ведучі (високі) рівні рідше, ніж відомі (низькі).

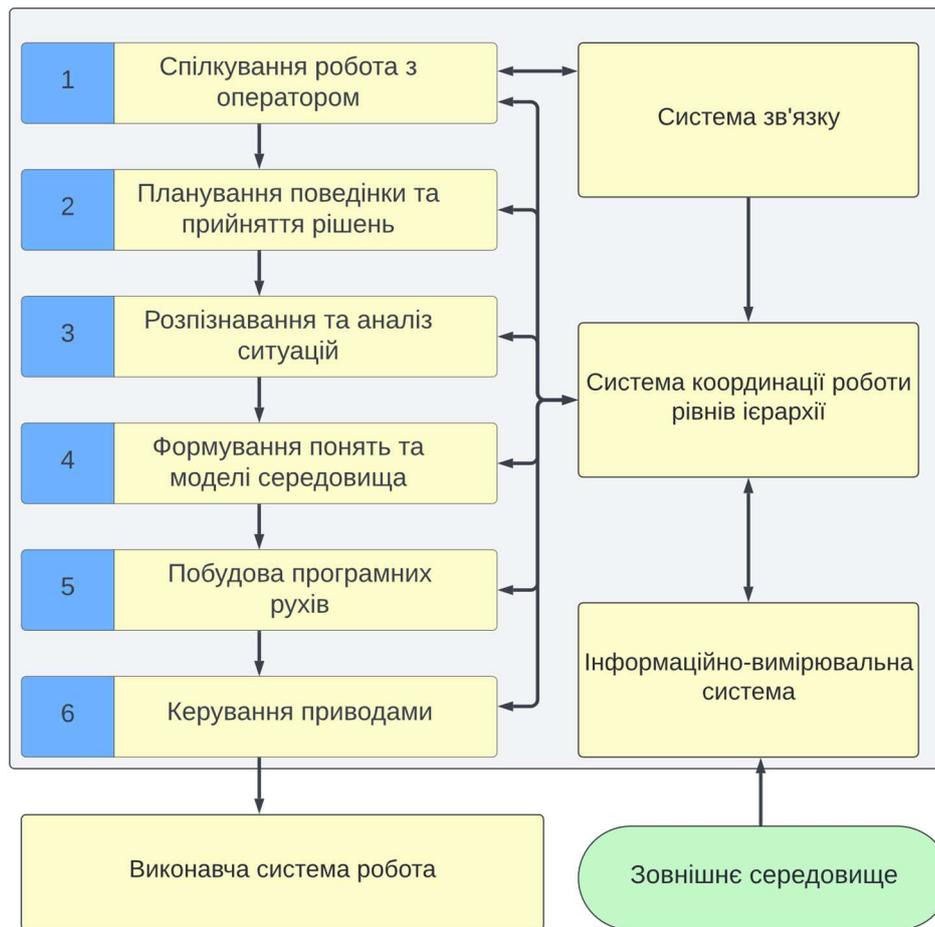


Рис. 4.2 – Деталізована схема адаптивної системи керування ієрархічного типу

## 4.2 Класифікація

Системи керування роботів класифікуються за ступенем безпосередньої участі людини-оператора в керуванні, принципом та способом керування, способом позиціонування, способом представлення командної інформації, способом програмування та за деякими іншими ознаками [28].

**За ступенем безпосередньої участі в керуванні людини-оператора** розрізняють автоматизовані та автоматичні системи керування. В автоматизованих системах частина функцій керування виконується людиною-оператором (біотехнічні та інтерактивні роботи). Автоматичні системи забезпечують керування без безпосередньої участі людини-оператора (автономні роботи).

В залежності від покоління в роботах може бути реалізований один з трьох **принципів керування**: програмний, адаптивний та інтелектний.

Системи з програмним керуванням послідовно виконують задану програму, і не реагують на зміни у зовнішньому середовищі. Тож для нормального функціонування роботів з програмним керуванням зовнішнє середовище повинно бути чітко організованим, тобто всі предмети, інструменти та об'єкти, з якими взаємодіє робот в процесі виконання робочих операцій, повинні знаходитись у визначених місцях та мати строго визначену просторову орієнтацію.

Системи адаптивного керування можуть змінювати алгоритм дій робота залежно від стану зовнішнього середовища, інформація про який надходить від датчиків інформаційно-вимірювальної системи. Це покращує якість керування та розширює можливості робота.

Системи інтелектного керування є найбільш довершеними, і окрім адаптації до зовнішнього середовища можуть самонавчатися, використовуючи складні алгоритми (штучний інтелект).

За **способом керування** розрізняють розімкнені та замкнені системи. В розімкнених системах керування відсутній зворотний зв'язок про стан зовнішнього середовища та самого робота. В замкнених системах такий зв'язок є, що значно підвищує точність позиціонування, якість та надійність керування.

В залежності від **змісту командної інформації**, що керує рухом виконавчих ланок робота, системи керування підрозділяються на чотири типи: циклові, позиційні, контурні та комбіновані.

*Цикловий тип* системи керування (рис. 4.3) є найпростішим та забезпечує позиціювання по двох точках, які є крайніми положеннями ланки виконавчого механізму, обмеженими упорами. Командна інформація в цьому разі містить ознаку ланки та напрямок її руху.



Рис. 4.3 – Позиції виконавчої ланки при цикловому керуванні



Рис. 4.4 – Позиції виконавчої ланки при позиційному керуванні

В *позиційній системі* керування (рис. 4.4) командна інформація додатково до ознаки ланки виконавчого механізму та напрямку її руху містить також третій параметр – величину переміщення. Таким чином забезпечується позиціювання

по декількох точках. Якщо таких точок небагато, позиційні системи позначаються як ptp (point-to-point) (рис. 4.5), якщо ж набір фіксованих точок достатньо великий, в позначенні позиційних систем використовується аббревіатура mp (multi point). Позиційне керування роботів є більш складним, але має більші технологічні можливості та універсальність.

Коли робот рухається через набір заданих точок, він зупиняється в кожній з них, а потім починає рух до наступної точки. Постійні уповільнення та прискорення призводять до значних навантажень на механіку робота. Щоб уникнути цієї проблеми, траєкторія рухів апроксимується (рис. 4.6). Замість того, щоб зупинитися на точних координатах точки, робот змінює свій шлях, не досягнувши проміжної точки, і починає рух до наступної точки заданої послідовності [20].

Рівень наближення руху до заданих точок можна запрограмувати шляхом визначення відстані між заданими точками та дійсною апроксимованою траєкторією переміщення.

*Контурна система* керування є найбільш універсальною, має розширені технологічні можливості за рахунок переміщення ланок виконавчого механізму по безперервній траєкторії (контур). В цьому разі командна інформація містить окрім ознаки ланки, напрямку та величини переміщення ще параметри траєкторії, за якою здійснюється рух. Контурні системи позначаються як cp (continuous path). Найбільш часто використовують контури типу «пряма» (лінія) (рис. 4.5) та «дуга» кола (рис. 4.6).



Рис. 4.5 – Рух маніпулятора по двох точках (point-to-point)

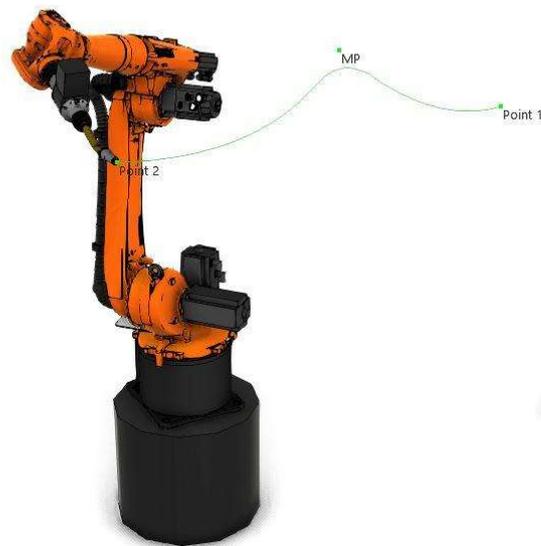


Рис. 4.6 – Рух маніпулятора по багатьох точках (multi point) з апроксимацією

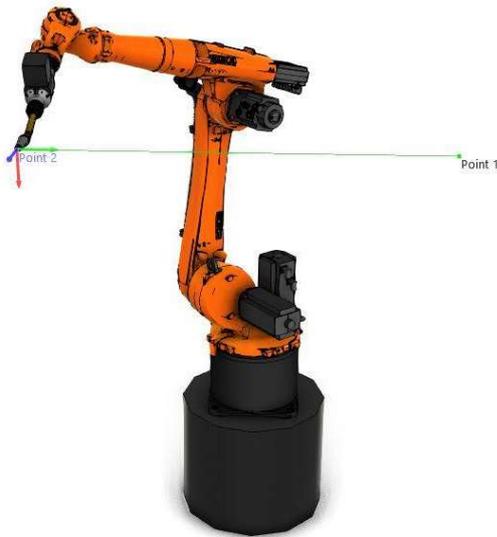


Рис. 4.7 – Рух маніпулятора по контуру «пряма» (Linear)

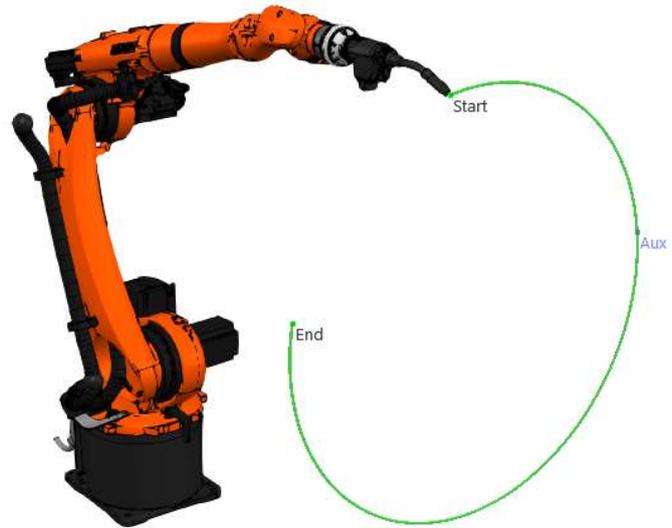


Рис. 4.8 – Рух маніпулятора по контуру «дуга» (CIRC або ARC)

В конструкціях роботів використовуються також *комбіновані системи* керування, в яких поєднуються цикловий, позиційний та контурний типи керування.

За **способом представлення командної інформації** системи керування роботів розділяються на електромеханічні, циклові, аналогові, числові та гібридні.

В *електромеханічних системах керування* геометрична інформація представлена у вигляді фізичного аналога – певного положення упору, кулачка або копіру тощо. Електромеханічні системи керування прості та дешеві, але їх функціональні можливості обмежені.

В *системах циклового програмного керування* геометрична інформація задається упорами та відповідними перемикачами, а команди циклу – у вигляді цифр. Перебудова програми зводиться до установки упорів та перемикачів у визначені положення, а при використанні перфострічки – до її установки у пристрій зчитування. Системи циклового керування мають невеликі габаритні розміри та вартість та використовуються для керування роботами з малою кількістю точок позиціонування.

В *аналогових системах керування* інформація задається та зберігається у вигляді потенціалів, а в якості елементної бази використовуються вирішуючі та операційні посилювачі постійного струму. Системи аналогового керування за своєю простотою, вартістю та функціональними можливостями близькі до циклових.

В *системах числового програмного керування* (ЧПК) вся інформація задається у числовому вигляді та зберігається на програмних носіях (перфострічках,

дисках тощо). Системи ЧПК більш складні, але забезпечують найбільші функціональні можливості роботів та добре взаємодіють з ЕОМ.

*У гібридних системах* керування використовуються поєднання способів представлення інформації з метою досягнення тих чи інших оптимальних характеристик системи керування робота.

За **способом програмування інформації**, яка забезпечує задані дії робота, розрізняють три основних методи – аналітичне програмування, методи навчання та самонавчання.

*Аналітичне програмування* забезпечує підготовку керуючої програми для роботів з позиційним та контурним керуванням. Визначення параметрів переміщення ланок робота здійснюється математичними методами з використанням ЕОМ або за допомогою пристрою керування робота.

*Програмування навчанням*, яке застосовується для циклових, позиційних та контурних систем керування, підрозділяється на ручне, напівавтоматичне та автоматичне.

Ручний спосіб навчання передбачає безпосередню участь оператора на всіх етапах програмування – при формуванні програми, перетворенні та введенні інформації. Спосіб простий, але трудомісткий та застосовується в основному для промислових роботів з цикловим керуванням.

Напівавтоматичний спосіб навчання характеризується участю оператора у формуванні програми та перетворенні інформації. Введення інформації забезпечує пристрій керування за сигналом оператора, а фіксацію інформації – конструкція пристрою пам'яті. Напівавтоматичне навчання здійснюється з пульта керування або шляхом механічного еталонного переміщення виконавчого органу безпосередньо оператором.

Автоматичне навчання виконується повністю пристроєм керування із застосуванням ЕОМ. Оператор при цьому складає лише узагальнену програму та за допомогою мови програмування видає вихідні дані пристрою керування.

*Програмування самонавчанням* можливе для інтелектуальних роботів з розвиненим сенсорним апаратом та адаптивним керуванням, здійснюється з частковим або повним самонавчанням.

### 4.3 Конструктивне виконання

У загальному вигляді адаптивна система керування роботів складається з наступних пристроїв (рис. 4.9):

- *система введення* – призначена для прийому та обробки вхідної інформації від пульта керування, пристроїв зв'язку, датчиків інформаційно-вимірювальної системи, носіїв з програмним забезпеченням тощо;
- *пристрій зберігання* – забезпечує зберігання програмного забезпечення робота; як правило, складається з двох частин: оперативної пам'яті для тимчасового зберігання поточних даних, необхідних для роботи керуючої програми, та енергонезалежної пам'яті, в якій постійно зберігається сама керуюча програма, а також додаткові дані;
- *пристрій обробки інформації* (процесор) – забезпечує обробку вхідної інформації та вироблення рішень відповідно до сформульованого завдання на основі алгоритмів, закладених у програму керування, з урахуванням зовнішнього середовища та стану самого робота;
- *система виведення* – призначена для відправки керуючих сигналів на зовнішні пристрої: приводи виконавчих механізмів, індикатори, інформаційні дисплеї тощо.



Рис. 4.9 – Структурна схема адаптивної системи керування

Загальна схема роботи системи адаптивного керування має наступний вигляд:

- за допомогою пульта керування або інших пристроїв зв'язку на пристрій зберігання інформації завантажується вже готова програма

- керування (при аналітичному програмуванні) або допоміжне програмне забезпечення (при використанні методів навчання та самонавчання);
- роботу формується завдання – це робиться оператором або взаємодіючим технологічним обладнанням через пульт керування або інші пристрої зв'язку;
  - робот починає виконувати поставлене завдання відповідно до програми керування з урахуванням сигналів зворотного зв'язку, що надходять від датчиків інформаційно-вимірювальної системи;
  - при виконанні завдання система керування задіює різні пристрої та канали передачі інформації;
  - оператор за допомогою пульта керування може контролювати хід виконання роботом поставленої задачі, а також проводити діагностику різних систем робота.

Елементи база та комплектуючі вироби систем керування роботів достатньо різноманітні. В системах керування роботів застосовують усі види пневматичних, електромеханічних та електронних елементів та комплектуючих виробів, розроблених для пристроїв керування загального призначення.

Основою будь-якої системи керування роботом є її частина, яка забезпечує обробку інформації.

Системи керування найбільш простих роботів першого покоління реалізовані, як правило, на базі пневматичних логічних елементів, які забезпечують, окрім порівняної простоти, також пожежо- та вибухонебезпечність, збереження працездатності за наявності електромагнітних та радіаційних полів.

В основу роботи пневматичних (струменевих) логічних елементів керування покладені три аеродинамічні ефекти: співударяння струменів, властивості газу змінювати напрямок через прилипання до розташованої поблизу твердої стінки (ефект Коанда) та турбулізації ламінарного потоку в результаті зовнішніх впливів. Поєднання різних струменевих елементів дозволяє створювати логічні пристрої керування.

В сучасних роботах другого та третього поколінь реалізовані більш складні системи керування, які використовують електромеханічні та напівпровідникові логічні елементи.

Електромеханічні логічні елементи, якими є реле різного типу, використовують зазвичай в простих пристроях керування циклового типу. При відносно простих системах керування та невеликій кількості реле такі пристрої найбільше економічно виправдані. Однак їх можливості обмежені кількістю спрацьовувань до 500 на годину (не більше 2 млн циклів на рік); при більш інтенсивному завантаженні доцільно використовувати безконтактні напівпровідникові елементи.

Напівпровідникові електронні логічні елементи використовуються в системах керування сучасних роботів найбільш широко. За конструктивно-технологічною ознакою вони можуть бути розбиті на дві групи – дискретні напівпровідникові елементи та напівпровідникові інтегральні мікросхеми.

Дискретні напівпровідникові елементи, побудовані з окремо взятих компонентів (активних – транзисторів, діодів, тиристорів тощо та пасивних – резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності), використовуються у пристроях керування з підвищеним обсягом логічних операцій та простими арифметичними операціями типу складання (порівняння двох величин).

При зростанні складності керуючих пристроїв роботів та збільшенні кількості виконуваних функцій більш доцільною стає реалізація пристроїв обробки інформації на інтегральних мікросхемах, що мають хороші логічні та функціональні можливості, малі габаритні розміри та масу, високу надійність та швидкодію, перешкодостійкість. Це зумовило широке використання інтегральних мікросхем в системах керування сучасних роботів.

В системах керування універсальних роботів з багатоточковим позиціонуванням та контурним керуванням для обробки інформації застосовують переважно мікроЕОМ (мікрокомп'ютери), що дозволяє вирішувати більш складні задачі керування та легко програмувати систему.

МікроЕОМ містить мікропроцесор, напівпровідникову пам'ять, інтерфейси (пристрої вводу-виводу), таймери, лічильники та деякі інші електронні пристрої.

Мікрокомп'ютери побудовані на базі однієї або декількох мікросхем та мають наступні особливості:

- мініатюрна конструкція, розрахована на встановлення в малогабаритний корпус;
- низьке споживання енергії, що дозволяє тримати комп'ютер постійно увімкненим або заживлювати його від невеликого акумулятора;
- архітектура ARM, яка в порівнянні з «десктопною» x86 має набагато ефективніші режими енергозбереження;
- пасивне охолодження (без використання вентиляторів) завдяки низькому енергоспоживанню;
- низька ціна всієї системи порівняно із системним блоком ПК;
- легковажна операційна система (ОС) (як правило, заснована на ядрі Linux) або її відсутність;
- стандартні роз'єми для комп'ютерної периферії: USB, Secure Digital, eSATA, Ethernet, HDMI (сумісний із DVI, також є можливість підключення до роз'єму VGA через спеціальні перехідники).

Основою мікроЕОМ можуть бути мікроконтролери, системи на чипі (SoC) або мікропроцесори.

*Мікроконтролер* (Micro Controller Unit, MCU) – комп'ютер на одній інтегральній схемі, який забезпечує лише мінімальну потужність обробки даних. Виготовляється у вигляді єдиного кристала з функціями ядра мікропроцесора, шин команд та даних, периферійних пристроїв, оперативного та постійного запам'ятовуючих пристроїв.

*Система на чипі* (System-on-a-chip, SoC), або система на кристалі, як правило, є інкапсуляцією одного або кількох процесорів, пам'яті, мікроконтролерів, цифрового сигнального процесору DSP, прискорювачів та допоміжного обладнання; призначена для додатків із надто складними вимогами для обробки одним мікроконтролером.

Відмінності між мікроконтролером та системою на чипі наведені в табл. 4.1 [6].

*Мікропроцесор* – це програмно-керований пристрій, який здійснює процес обробки цифрової інформації та керування цим процесом та побудований на базі однієї чи декількох мікросхем. Мікропроцесор зазвичай не має інтегрованих у мікросхему пристроїв введення-виведення, таймерів та інших периферійних пристроїв, чим відрізняється від мікроконтролера та системи на чипі.

Структура мікроконтролерів та систем на чипі, наведена на рис. 4.10, 4.11, повністю відповідає структурі адаптивної системи керування (рис. 4.9)

Переваги систем керування на базі мікроЕОМ – широкі функціональні можливості, підвищена якість керування, надійність керуючого пристрою, зменшення кількості елементів в електронних схемах, невисока вартість та простота в обслуговуванні.

На сьогодні системи керування універсальних роботів, призначених для виконання широко кола задач та навчання, побудовані на таких популярних програмно-апаратних платформах, як Arduino (на базі мікроконтролерів Atmel) (рис. 4.12) та Raspberry Pi (на базі SoC Broadcom BCM27XX) (рис. 4.13).

Arduino – апаратна обчислювальна платформа для аматорського конструювання вартістю \$10...\$15, основними компонентами якої є плата мікроконтролера з елементами вводу/виводу та середовище розробки Processing/Wiring на мові програмування, що є спрощеною підмножиною C/C++ [1, 2, 3].

Raspberry Pi – одноплатний мікрокомп'ютер вартістю \$30...\$60, розроблений британським фондом Raspberry Pi Foundation для освітніх цілей. Має інтерфейс GPIO (General-purpose Input/Output), який містить входи (Input) та виходи (Output) «загального призначення» (General Purpose), до яких можна підключати

різноманітні виконавчі пристрої, датчики, дисплеї, контролери, різні модулі та периферію [14].

Табл. 4.1 – Особливості мікроконтролерів та систем на чипі

Параметр	Мікроконтролери (MCU)	Система на чипі (SOC)
Мікросхема	одна, з неспецифічними периферійними пристроями	одна, з більш специфічними периферійними пристроями
Порівняна кількість інкапсульованих периферійних пристроїв	менша кількість	більша кількість
Призначення	невеликі програми керування з низькою складністю	додатки з більшими вимогами та вищою складністю
Порівняна вартість	дешевше, ніж система на кристалі	дорожче, ніж мікроконтролери
Наявність операційної системи	без операційної системи (ОС)	операційна система (ОС) включена
Порівняне енергоспоживання	низьке	більше споживання електроенергії
Порівняна вартість	мінімальна вартість, але «скромні» можливості	більш висока вартість, але розширена функціональність
Об'єм внутрішньої пам'яті	мінімальний, часто вимірюється в кілобайтах (КБ)	великий, може бути у мегабайтах (МБ) або гігабайтах (ГБ)
Об'єм зовнішньої пам'яті	варіюється від КБ до МБ через Flash або EEPROM	варіюється від МБ до ТБ через Flash, SSD або HDD
Ширина обчислення	4-біт, 8-біт, 16-біт і 32-біт	16-біт, 32-біт, 64-біт
Сфери застосування	програмовані термостати, побутова техніка та промислові прилади	смартфони, мережеві маршрутизатори та емулятори ігрових консолей
Приклади виробів	Microchip Technology PIC, 8051, мікроконтролери Atmel	Cypress PSoC, Qualcomm Snapdragon, Broadcom BCM2712

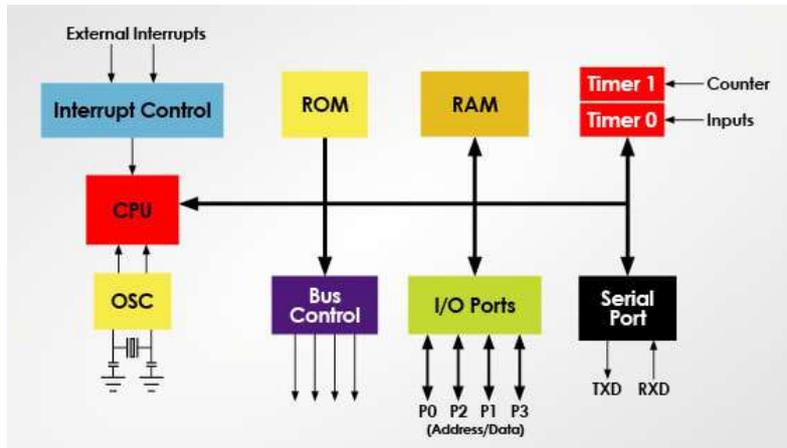


Рис. 4.10 – Структура мікроконтролера

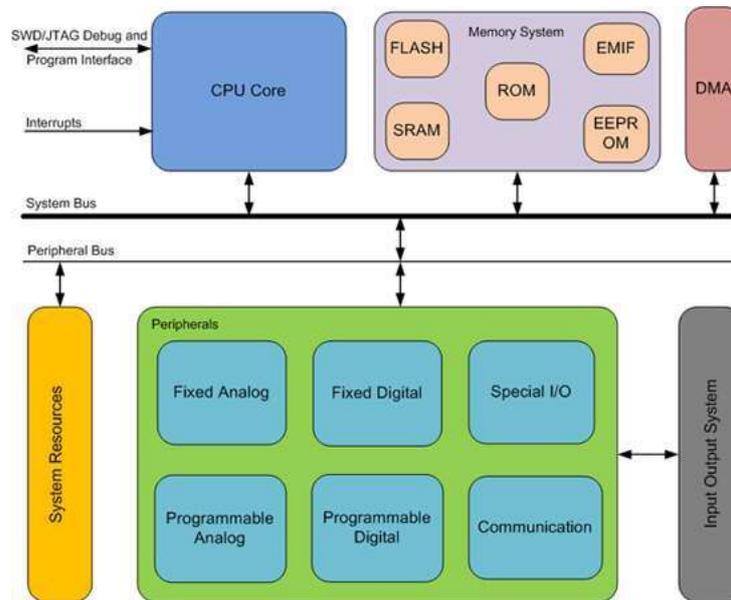


Рис. 4.11 – Структура SoC (System-on-a-chip)

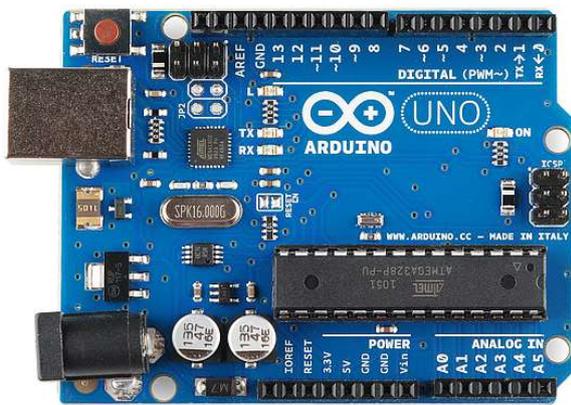


Рис. 4.12 – Електронна плата Arduino UNO R3 на базі мікроконтролера ATmega328



Рис. 4.13 – Електронна плата Raspberry Pi 4 на базі SoC Broadcom BCM27XX

#### 4.4 Програмне забезпечення

Конструктивне втілення інформаційно-керуючої системи залишиться лише оболонкою, якщо не вкласти в неї внутрішній зміст – алгоритмічне чи програмне забезпечення, яке забезпечить виконання роботом поставлених задач.

Як зазначалось раніше, програмування робота може бути аналітичним – шляхом написання та завантаження в пам'ять керуючої програми, або за допомогою навчання та самонавчання.

Для написання програми керування (*аналітичний спосіб*) застосовуються різні мови програмування. При цьому на різних ієрархічних рівнях можуть використовуватись різні мови програмування: низькорівневі (наближені до машинного коду, зрозумілого для процесора) чи високорівневі (наближені до мови людини).

У загальному випадку можна виділити чотири рівні мови програмування роботів, відповідних вирішуваним задачам керування – виконавчих приводів, механізмів, операцій та завдання.

Мова виконавчих приводів належить до найнижчого рівня та використовується для програмування рухів по окремих ступенях рухливості у вигляді визначених значень лінійних або кутових переміщень ланок виконавчої системи.

Мова рівня механізмів дозволяє керувати їх сукупними рухами в робочому просторі відносно довільної системи координат, не замислюючись про переміщення окремих ланок та координацію цих переміщень.

Мова рівня операцій дозволяє формувати робочу програму шляхом вказівки лише послідовності операцій, які має здійснити робот.

Мова вищого рівня завдань – це програма дій робота, яка складається в узагальнених термінах, які відповідають на питання «що зробити» (а не «як зробити»), без деталізації (декларативний стиль).

На сьогоднішній день для програмування роботів використовується близько десятка високорівневих мов програмування. Найбільш популярними з них є C / C++ / C#, Python, Java, LISP та Prolog [30]. Усі перелічені мови є універсальними, тобто використовуються у багатьох галузях. Для вирішення специфічних задач робототехніки для цих мов написані додаткові бібліотеки.

Універсальні мови програмування засновані на одній чи декількох парадигмах, які визначають стиль написання коду. Найбільше розповсюдження отримали чотири парадигми програмування: імперативна (процедурна), функціональна, логічна та об'єктно-орієнтована [24].

*Імперативне програмування* описує процес отримання результатів як послідовність інструкцій зміни стану програми. Імперативний стиль підтримує більшість мов програмування: LISP, C / C ++/ C #, Python, Java та інші.

*Логічне програмування* базується на використанні логіки для опису проблем і пошуку їх рішень. Найвідомішою мовою логічного програмування є Prolog.

*Функціональне програмування* розглядає програму як обчислення математичних функцій та уникає станів та змінних даних. Функціональний стиль написання коду реалізований у LISP та Python.

*Об'єктно-орієнтоване програмування* (ООП) розглядає програму як множину «об'єктів», що взаємодіють між собою. Об'єктно-орієнтованими мовами програмування є C ++/ C #, Python та Java.

Окрім мов програмування з текстовим лістингом, для програмування любителських роботів та у навчальних цілях використовується програмне забезпечення з графічним інтерфейсом. Найбільш відомим прикладом такого підходу є Scratch – середовище та інтерпретована динамічна візуальна мова програмування від MIT Media<sup>2</sup>, у якій код створюється шляхом маніпулювання графічними блоками.

На рис. 4.14 наведено приклад найпростішої програми миготіння світлодіодом, набраній в графічному середовищі Scratch, а на рис. 4.15 – код тієї ж програми, записаний на мові C / C ++ у середовищі Arduino IDE.

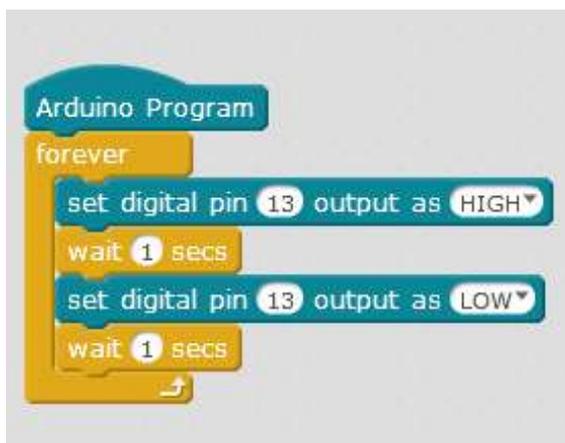


Рис. 4.14 – Візуальний редактор програмування Scratch



Рис. 4.15 – Середовище програмування Arduino IDE (різновид мови C/C++)

Крім універсальних, виробники промислових роботів використовують власні мови програмування. Так, «FANUC», один із чотирьох провідних виробників

<sup>2</sup> MIT Media – лабораторія Массачусетського технологічного інституту (Massachusetts Institute of Technology)

роботів, пропонує не одну, а дві різні мови програмування: Teach Pendant (або TP) та Karel. Мова TP має обмежену функціональність та подібна до асемблеру (інтерпретатору команд у машинний код). Karel розроблена на основі універсальної мови програмування Pascal.

Роботи «Motoman» програмуються за допомогою мови програмування INFORM. «Motoman» також пропонує MotoCom для всіх своїх роботів: добре документовану бібліотеку, що дозволяє програмувати робота за допомогою C++, C# або Visual Basic.

Програмування роботів «ABB» засноване на мові програмування RAPID, яка чимось схожа на Visual Basic.

Для роботів «KUKA» потрібні програми SRC, написані мовою програмування KRL. Однак робот «KUKA LBR iiwa» використовує контролер «KUKA Sunrise» та програмується мовою Java.

Велике різноманіття мов програмування, як універсальних, так і специфічних, призводить до збільшення витрат, пов'язаних з розгортанням складних робототехнічних комплексів, в яких роботи від різних виробників мають взаємодіяти один з одним. Для вирішення цієї проблеми протягом останніх десятиліть прикладаються зусилля з уніфікації способів програмування. Одним з практичних результатів цих зусиль стала поява у 2007 році Операційної системи роботів (Robot Operating System, ROS) – набору програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом для написання програм для робототехніки. ROS пропонує стандартну програмну платформу для розробників у різних галузях, яка допомагає їм від дослідження та створення прототипів до розгортання та виробництва.

*Програмування навчанням* може здійснюватися оператором у ручному, а також у напіваавтоматичному або автоматичному режимах та розділяється на два види: online та offline-програмування.

Online-програмування здійснюється на місці установки робота за допомогою двох методик: Teach-In та Playback.

Перша методика (Teach-In, скорочено Teachen) полягає у програмуванні рухів робота через пульт керування за допомогою джойстику чи кнопок. Роботу задаються робочі положення, в кожному з яких завжди відомі розташування у просторі та орієнтація всіх осей його виконавчого механізму. Контролер робота запам'ятовує задані місцезнаходження, які повторюються при виконанні технологічного процесу. Комплекс таких місцеположень визначає траєкторію руху виконавчого механізму.

Другий метод – Playback. Спочатку робот вручну проводиться потрібним шляхом руху, а потім він точно повторює задану траєкторію.

Недоліками online-програмування є неможливість в цей час вести виробничий процес, відносно невисока точність позиціонування, а також ускладнене внесення змін до програми.

Для програмування роботів offline-способом використовується спеціалізоване автономне програмне забезпечення – Offline Robot Programming, OLRP або OLP (рис. 4.16). При автономному програмуванні роботизований комплекс представлений у симуляторі за допомогою графічної 3D-моделі. OLP надає програмістам роботів можливість створювати, тестувати та змінювати програми або завдання робота у зручному віртуальному середовищі програмування на ПК до того, як вони будуть реалізовані на фізичному рівні.

Автономне програмування (OLP) може здійснюватися за допомогою програмних платформ, специфічних для безпосередніх виробників обладнання (ОЕМ), або за допомогою універсальних рішень.

Сучасні інтелектуальні роботи здатні до *самонавчання* завдяки використанню складних програмних алгоритмів, які складають основу штучного інтелекту.

Під штучним інтелектом (ШІ) (artificial intelligence, AI) найчастіше розуміється спеціалізоване програмне забезпечення, здатне «мислити» як людський мозок. Це досягається шляхом вивчення закономірностей роботи людського мозку та аналізу когнітивних процесів [35].

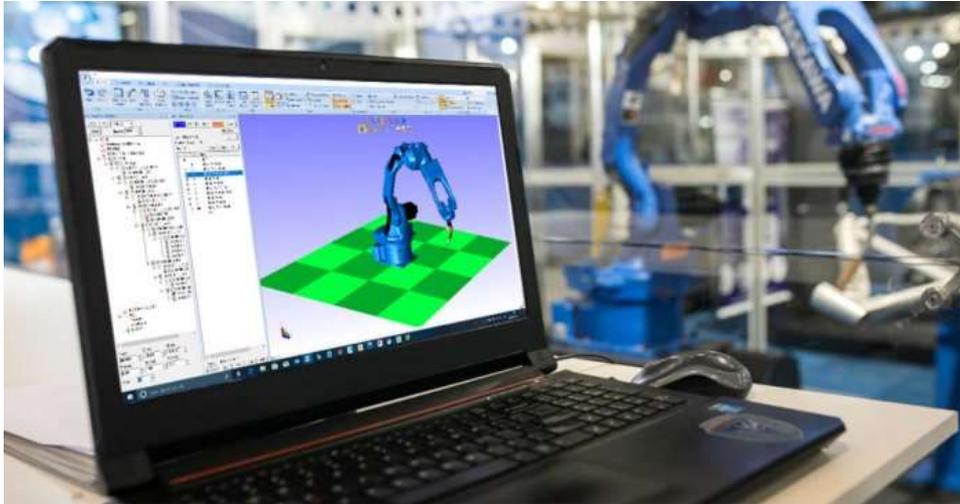


Рис. 4.16 – Програмування робота за допомогою OLRP (Offline Robot Programming)

Системи штучного інтелекту працюють, поєднуючи великі обсяги даних з інтелектуальними ітеративними алгоритмами обробки. Таке поєднання дозволяє їм вчитися на основі шаблонів і особливостей аналізованих даних.

В залежності від типу вирішуваних задач виділяють кілька основних напрямів штучного інтелекту:

- машинне мислення (machine reasoning) – охоплює процеси планування, представлення знань і міркування, пошук та оптимізацію;

- машинне навчання (machine learning, ML), яке умовно поділяється на глибоке навчання (deep learning) та навчання з підкріпленням (reinforcement learning) – зосереджене на розробці та вивченні статистичних алгоритмів, здатних навчатися з наявних даних та узагальнювати їх, й відтак виконувати завдання без явних інструкцій;

- робототехніка – передбачає інтеграцію штучного інтелекту, датчиків і механічних систем, щоб роботи могли сприймати навколишнє середовище, ухвалювати рішення та виконувати дії.

Не зважаючи на наведену класифікацію, окрім третього напрямку, який безпосередньо стосується особливостей інтеграції програмного забезпечення з системами сприйняття навколишнього середовища, в робототехніці застосовуються також і перші два, особливо машинне навчання.

На сьогодні можна виділити чотири підходи до створення систем штучного інтелекту:

- 1) *Логічний підхід*, в основі якого лежить алгебра логіки, що вивчає систему логічних операцій над висловлюваннями. В алгебрі логіки значенням змінних є відповідність істинності: істина або хиба, які зазвичай визначаються як 1 і 0 відповідно. Свого подальшого розвитку алгебра логіки отримала у вигляді числення предикатів (predicate calculus), в якому вона розширена за рахунок введення предметних символів та відношень між ними; а також нечіткої логіки (fuzzy logic), яка є узагальненням класичної логіки і теорії множин. В нечіткій логіці істинність може приймати значення в інтервалі  $[0, 1]$ , а не тільки 0 або 1.
- 2) *Структурний підхід*, який полягає в моделюванні структури людського мозку. Головною моделюючою структурною одиницею в математичних моделях сприйняття інформації мозком (перцептронах) є нейрон. Пізніше виникли й інші моделі, відомі під назвою нейронних мереж (НМ) (artificial neural network, або neural networks), які відрізняються за будовою окремих нейронів, за топологією зв'язків між ними та алгоритмами навчання.
- 3) *Еволюційний підхід*, в якому основну увагу зосереджують на побудові початкової моделі і правилах, за якими вона може змінюватися (еволюціонувати). Причому модель може бути створено за найрізноманітнішими методами, це може бути і нейромережа, і набір логічних правил, і будь-яка інша модель. Після цього ЕОМ на основі перевірки моделей відбирає найкращі з них, і за цими моделями за найрізноманітнішими правилами генеруються нові моделі, серед яких знов обираються найкращі і т.д.

4) *Імітаційний підхід* є класичним для кібернетики. Об'єкт, поведінка якого імітується, представляється у вигляді «чорного ящика». Не важливо, які моделі у нього всередині і як він діє, головне – аби модель в аналогічних ситуаціях поводи́ла себе однаково. В даному випадку моделюється здатність людини копіювати те, що роблять інші, без поділу на елементарні операції та формального опису дій.

Об'єднати різні підходи намагаються у рамках гібридних інтелектуальних систем.

## 5. Інформаційно-вимірювальна система

### 5.1 Загальна характеристика

Здатність пристосовуватись до змінних умов зовнішнього середовища, притаманна адаптивним та інтелектним роботам, значно збільшує їх технологічні можливості та підвищує ступінь універсальності. Таку здатність забезпечує інформаційно-вимірювальна система, яка представляє собою «органи почуттів» робота.

Інформаційно-вимірювальна, або сенсорна система призначена для автоматичного сприйняття, первинної обробки та передачі в систему керування інформації про внутрішній стан робота та зовнішнього середовища.

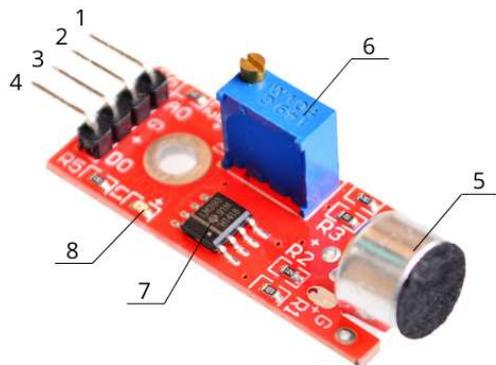
Основними завданнями інформаційно-вимірювальної системи є:

- 1) контроль параметрів стану робота (положень, швидкостей та прискорень елементів механізмів, зусиль в елементах), діагностика та прогнозування його ресурсу;
- 2) сприйняття та аналіз інформації про зовнішнє середовище (тактильної, візуальної, локаційної тощо);
- 3) забезпечення техніки безпеки (реєстрація просторового положення самого робота та його окремих частин, визначення місцезнаходження обслуговуючого персоналу та обладнання в робочій зоні, аварійне блокування).

У загальному вигляді інформаційно-вимірювальна система має пристрої зворотного зв'язку (сенсори), пристрої перетворення та первинної обробки інформації, а також лінії зв'язку.

### 5.2 Датчики: будова, вимоги, класифікація

В сучасній робототехніці пристрої зворотного зв'язку, перетворення та первинної обробки інформації об'єднуються в один модуль – датчик («інтелектуальний» датчик). Так, наприклад, датчик звуку (рис. 5.1) містить сенсор (мікрофон), електричні та електронні компоненти для перетворення звукового сигналу в напругу та регулювання рівня чутливості сигналу, вхідні лінії для підключення живлення, а також вихідні лінії (аналогові або/та цифрові), по яких сигнал надходить до системи керування.



Поз.	Найменування
1	аналоговий вихід
2	вхід заземлення (GND)
3	вхід напруги живлення (VCC)
4	цифровий вихід
5	звуковий сенсор (мікрофон)
6	регулятор чутливості
7	компаратор LM393
8	індикатор живлення
9	індикатор роботи датчика (з протилежного боку від поз. 8, не показаний)

Рис. 5.1 – Датчик звуку (модульне виконання)

Отже, датчик є первинним вимірювальним пристроєм, що перетворює механічні параметри в електричні сигнали, які зручні для дротового або дистанційного передавання, обробки та використання у системах керування.

До датчиків висуваються наступні вимоги:

- а) малогабаритність та простота конструкції;
- б) висока надійність та перешкодостійкість, яка дозволяє зокрема експлуатацію в умовах електромагнітних перешкод, коливань напруги та частоти живлення;
- в) стійкість до механічних впливів (ударів, вібрації) та до зміни параметрів навколишнього середовища (температури, вологості);
- г) незалежність (розв'язка) вхідних та вихідних ланцюгів;
- д) простота регулювання та обслуговування;
- е) наявність абсолютного відліку переміщень;
- є) низька вартість.

Датчики класифікуються за багатьма ознаками, зокрема:

*за призначенням* датчики можна поділити на два класи: пристрої для контролю внутрішнього стану робота (внутрішньої інформації) та пристрої для сприйняття параметрів зовнішнього середовища (зовнішньої інформації);

*за принципом дії* датчики підрозділяються на волоконно-оптичні, оптичні (фотоелектричні датчики), магнітоелектричні (на основі ефекту Холла), п'єзоелектричні, тензометричні, ємнісні, потенціометричні, індуктивні тощо (табл. 5.1);

*за вимірювальним параметром* бувають датчики тиску, витрати, рівня, температури, вологості, радіоактивності, переміщення, швидкості, прискорення, кута нахилу, сили, моменту сили, вібрації тощо (табл. 5.1);

Табл. 5.1 – Типи датчиків за принципом дії та вимірюваним параметром [24]

Вимірювана величина	Тип датчика за принципом дії											
	потенціометричні	тензометричні	індуктивні	терморезисторні	ємнісні	фоторезисторні	електронні	індукційні	п'єзоелектричні	термоелектричні	датчики Холла	фотоелектричні
Переміщення	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+
Рівень	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Швидкість	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+
Прискорення	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
Сила	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	-
Тиск	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Момент сили	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+
Вологість	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-
Температура	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+
Витрата речовини	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-
Вібрація	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-

«+» – застосовується, «-» – не застосовується

за видом вихідного сигналу датчики розділяються на безперервні (аналогові) та дискретні (цифрові). В аналогових датчиках вихідний сигнал формується у вигляді безперервно змінюваних значень напруги (рідше – струму або фази напруги змінного струму). В цифрових датчиках вихідний сигнал представлений цифровим кодом (кодові датчики), рідше – у вигляді серії імпульсів (імпульсні датчики) чи релейного сигналу;

за взаємодією із джерелами інформації: контактні та безконтактні (дистанційної дії) датчики;

за принципом ідентифікації значення вимірювального параметру датчики підрозділяють на датчики з абсолютним та неабсолютним відліком. Наприклад, сигнал датчика переміщення з абсолютним відліком однозначно відповідає величині переміщення, у датчиків з неабсолютним відліком така однозначність відсутня;

за кількістю вхідних величин: одновимірні та багатовимірні датчики.

Датчик підбирається в залежності від його призначення (вимірюваного параметру) та основних характеристик.

Основними характеристиками датчику є:

- діапазон зміни вимірюваного параметру;
- чутливість (коефіцієнт перетворення) – відношення вихідної величини до вхідної:  $k = y / x$ ;
- межа чутливості (роздільна здатність) – величина мінімальної зміни вхідного сигналу, що призводить до появи мінімальної зміни вихідного сигналу;
- статична характеристика – залежність вихідної величини від вхідної  $y = f(x)$ ;
- похибка: абсолютна – різниця між дійсним значенням вихідної величини та розрахунковим значенням ( $\Delta y = y' - y$ ); відносна –  $\delta = \Delta y \cdot 100\%/y$ ;
- параметри живлення (величина напруги та струму);
- габарити та вага.

При виборі датчику окрім його призначення та основних характеристик слід також звернути увагу на особливості конструкції та враховувати питання забезпечення живлення та зв'язку з керуючим пристроєм.

Вимірювання тієї ж самої величини може здійснюватися датчиками з різним принципом дії.

Для контролю **внутрішнього стану** робота використовуються датчики, які вимірюють положення (переміщення), швидкості, прискорення, сили (моменти сил), а також нахил ланок механізмів.

В якості датчиків положення можуть використовуватись потенціометри, індуктивні (сельсини, обертальні трансформатори) та оптоелектронні (енкодери) пристрої. Останні отримали найбільше розповсюдження в конструкціях сучасних роботів.

Енкодери видають у кожний момент часу повну інформацію про вимірюване переміщення та мають високу роздільну здатність. Такий датчик для вимірювання кутових (або лінійних) переміщень містить диск (або рейку), який обертається (або рухається лінійно) разом із вимірюваним об'єктом та містить прозорі та непрозорі зони (растр, або кодову маску), що чергуються. Паралельний пучок світла, який пропускається через прозорі та непрозорі зони, утворює на виході муарову, або кодову картину, що сприймається фотоелектронним зчитувальним пристроєм (рис. 5.2).

Для вимірювання швидкості використовуються датчики у формі тахогенераторів та енкодери.

Датчики прискорення (акселерометри), які застосовуються в конструкціях роботів, за типом можуть бути ємнісними, п'єзоелектричними та п'єзорезистивними. Акселерометр вимірює силу прискорення в одиницях прискорення вільного падіння (g) в одній, двох або трьох площинах. Зараз найчастіше

використовуються трьохосьові акселерометри, конструкція яких складається з системи трьох акселерометрів, кожен з них вимірює прискорення в своєму напрямку – X, Y і Z (рис. 5.3).

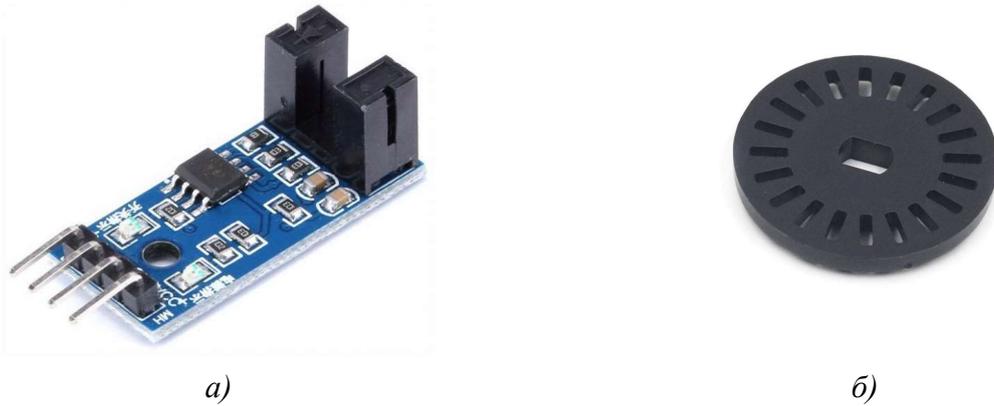


Рис. 5.2 – Оптичний датчик FC-03 (а) та диск з прорізами до нього (б) для вимірювання кутового переміщення та швидкості

Приблизні значення прискорень ланок механізмів робота в кожний момент часу можуть бути отримані також у вигляді другої похідної від переміщення за допомогою кінцевих різниць другого порядку за сигналом положення, що використовується в низці випадків.

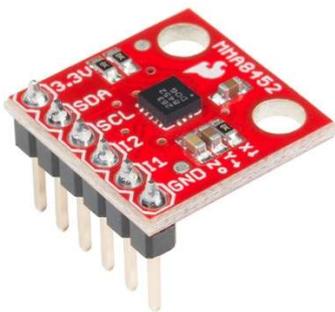


Рис. 5.3 – Ємнісний трьохосьовий акселерометр MMA8452Q



Рис. 5.4 – Ємнісний датчик дотику TTP223B

Датчики зусиль використовуються для забезпечення безпечної роботи та захисту конструкцій робота від перенавантажень, а також для обмеження зусиль, діючих на об'єкти маніпулювання з боку робочих органів робота. Принцип дії датчиків зусиль полягає переважно у вимірюванні деформацій в елементах з відомими механічними властивостями під дією робочих навантажень, для чого зазвичай застосовують тензометричні датчики опору (тензометри). Крім того, в якості чутливих елементів використовуються напівпровідникові, п'єзокерамічні або п'єзокварцеві перетворювачі, мініатюрні диференціальні трансформатори та

інші пристрої. В роботах з електричним приводом знаходять застосування схеми вимірювання навантажень за струмом якорю електродвигуна.

*За характером зовнішньої інформації*, яка сприймається роботом, усі датчики можна поділити на чотири основні види: слуху, дотику, нюху та зору. Сигнали, які отримуються за допомогою цих пристроїв, представляють собою інформацію, відповідну певному образу. В результаті її обробки можна виявити ті чи інші особливості об'єкту та навколишнього середовища. Найбільш емну та важливу інформацію про зовнішнє середовище забезпечують зорові сенсорні пристрої.

*За типом виявлюваних властивостей* датчики зовнішньої інформації розподіляються на три групи: виявлення геометричних, фізичних або хімічних властивостей об'єктів.

*За відстанню сприйняття інформації* сенсорні пристрої робота підрозділяються на чотири групи: надблизькі (контактні), ближні (в межах робочої зони), дальні (в робочій зоні) та наддалекі (поза робочою зоною).

*За способом взаємодії з об'єктом* датчики зовнішньої інформації роботів можна поділити на контактні та безконтактні.

Своєю чергою, *за принципом отримання інформації* контактні сенсорні пристрої включають тактильні та силомоментні системи, безконтактні – локаційні та системи технічного зору [28].

**Тактильні сенсорні засоби**, які імітують дотичну здатність людини, були створені у конструкціях роботів одними з перших, завдяки своїй простоті та доступності, та використовуються в робототехніці для отримання зовнішньої інформації про контакт маніпулятора з об'єктом.

Сучасні тактильні сенсорні системи забезпечують вирішення широкого кола задач: виявлення контакту з об'єктом; визначення координат та площі контактної плями; вимірювання сили затискання захватного пристрою; реєстрація розподілу силової дії за площею пальців (губок); визначення орієнтації об'єкту, затисненого в захваті; виявлення проковзування об'єкта в захватному пристрої, визначення його напрямку та величини; визначення механічних властивостей об'єктів за ступенем їх деформації; розпізнавання об'єктів визначеного класу за їх тактильним образом.

Тактильними датчиками оснащуються ланки роботів, які безпосередньо взаємодіють з об'єктами маніпулювання або з технологічним обладнанням – це захватні пристрої або технологічні інструменти.

За видом вихідного сигналу тактильні датчики підрозділяються на дискретні (визначають лише наявність або відсутність об'єкта в захватному пристрої) та аналогові (утворюють сигнал, пропорційний зусиллю, що прикладається).

За характером вимірювальних параметрів взаємодії захватного пристрою з об'єктом тактильні датчики підрозділяються на три групи: дотику, контактного тиску та проковзування.

Датчики дотику (рис. 5.4) та тиску по суті контролюють одну й ту саму фізичну величину – діючу силу. Різниця в тому, що перші мають поріг спрацювання та є дискретними датчиками, які налаштовуються на визначене значення контрольованого параметру та фіксують лише його досягнення. Другі є датчиками безперервного типу та дозволяють контролювати величину контактної тиску в процесі взаємодії з об'єктом. Ті та інші можуть виконуватись у вигляді окремих елементів або у вигляді матриці з високою щільністю розміщення окремих чутливих елементів.

Датчики проковзування надають інформацію про переміщення об'єкту, що утримується, відносно губок захватного пристрою, імітуючи властивості шкіряного покриву пальців людини виявляти проковзування захопленого предмету. У сукупності з іншими тактильними сенсорами (дотику та тиску) датчики проковзування дозволяють регулювати силу затискання в межах, необхідних для надійного утримання об'єкта і в той же час безпечних з точки зору його можливого руйнування. Це особливо важливо при маніпулюванні крихкими об'єктами або предметами з легко пошкоджуваною поверхнею.

Датчики проковзування можуть виконуватись контактними або безконтактними. Перші містять елементи, які безпосередньо контактують із захопленою деталлю, другі реєструють зміщення відносно певних базових елементів конструкції.

При створенні датчиків проковзування зазвичай використовують три типи їх побудови: вимірювання вібрацій, невідворотно виникаючих при проковзуванні; безпосереднє вимірювання тангенціального переміщення об'єкта, утримуваного губками захватного пристрою; визначення градієнта вимірювання тиску між об'єктом та губками захватного пристрою.

Найбільш перспективним є створення тактильних пристроїв, в яких поєднуються різні види чутливості – дотику, тиску та проковзування, тобто максимально наближеного до здатності шкіряного покриву людини. В таких пристроях при істотному ускладненні конструкції значно розширюється об'єм отримуваної інформації аж до можливості визначення типу затисненої деталі, її конфігурації та ваги, розташування та орієнтації, тобто до отримання так званого тактильного образу об'єкта.

Останніми роками створюються захватні пристрої роботів, здатні відчувати об'єкти маніпулювання. Принцип побудови таких систем полягає у створенні гнучких плівок або підкладок з багатьма вбудованими датчиками (рецепторами), електричний опір яких змінюється в залежності від величини діючого навантаження. В таких матрицях або решітках, які називаються штучною

шкірою, тиск від об'єкта, який викликає відповідні деформації, змінює опір точок-електродів та легко перетворюється в електричні сигнали, амплітуди яких пропорційні силами, діючим на відповідні точки.

У сучасних системах дотику використовуються також п'єзоелектричні матеріали, які генерують при деформації електричні сигнали.

**Силомоментні сенсорні системи** – це пристрої, призначені для вимірювання компонент головного вектору сил та моментів, діючих на виконавчий механізм, в проекції на пов'язану з пристроєм систему координат.

Силомоментні сенсорні пристрої використовуються в роботах головним чином для визначення реактивних сил та моментів, виникаючих при механічному складанні. Вони розміщуються безпосередньо в губках хватних пристроїв або в з'єднанні останньої ланки з хватом маніпулятора (кисть, зап'ястя), а також за необхідності – в інших з'єднаннях маніпуляційної системи.

Перетворення діючих навантажень в електричні сигнали в силомоментних пристроях здійснюється зазвичай двома способами. Перший з них полягає у безпосередньому вимірюванні пружних деформацій чутливих елементів за допомогою тензорезисторних, п'єзоелектричних або магнітопружних датчиків. Другий спосіб заснований на вимірюванні величин мікропереміщень каліброваних пружин датчика, які деформуються під дією зовнішніх навантажень в процесі взаємодії робота з об'єктом.

Для ефективного функціонування силомоментних пристроїв до них висувається низка вимог: висока жорсткість, яка зменшує похибку при позиціонуванні; компактність конструкції, яка полегшує рухи виконавчого механізму та покращує його маневреність; лінійність характеристик датчиків, яка спрощує процес калібрування пристроїв та визначення діючих сил та моментів; малі величини внутрішнього тертя, що підвищує точність вимірювань.

**Локаційні сенсорні системи** відносяться до безконтактних та призначені для виявлення рухомих та нерухомих об'єктів, визначення їх місця розташування, розмірів та швидкостей руху, а також для забезпечення точного наведення та захоплення цих об'єктів. Безумовною перевагою таких пристроїв є можливість безконтактного функціонування, тобто на відстані від об'єкта, часто достатньо великої.

При створенні локаційних сенсорів використовуються принципи як пасивної, так і активної локації. Пасивна локація полягає в уловленні та обробці власного випромінювання об'єктів (наприклад, температурного). При активній локації у бік передбачуваного місцезнаходження об'єкта спрямовується відповідний зондуючий потік сигналів (акустичних, світлових, магнітних тощо), а відображене випромінювання потім уловлюється та реєструється датчиками-приймачами.

При створенні локаційних сенсорних пристроїв використовується широкий спектр різних фізичних методів: акустичних, магнітних, оптичних, радіохвильових, теплових, електричних, електромагнітних, пневматичних, на основі яких розроблена та знаходить використання низка конструктивних різновидів локаційних датчиків: п'єзоелектричних, ферозондових, індукційних, електронно-оптичних, напівпровідникових, волоконно-оптичних, ємнісних, струменевих, вакуумних тощо. Наприклад, на рис. 5.5 представлений ультразвуковий датчик відстані, здатний розпізнавати об'єкти на відстані до 1,5м, а на рис. 5.6 – лазерний далекомір з відстанню вимірювань до 40м.



Рис. 5.5 – Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04



Рис. 5.6 – Лазерний далекомір Garmin LIDAR-Lite V3HP

Усі локаційні сенсорні пристрої роботів за своїм призначенням можуть бути розділені на: інформаційні, призначені для забезпечення автоматичного керування роботом та визначення просторового положення об'єктів, та більш прості пристрої безпеки, що використовуються для захисту маніпулятора, оточуючих об'єктів та обслуговуючого персоналу від можливих зіткнень в процесі роботи. Найбільш широке застосування в локаційних системах роботів отримало використання випромінювання та прийому відображених акустичних або електромагнітних хвиль.

Локаційна акустична (наприклад, ультразвукова) сенсорна система реалізується зазвичай на основі використання двох методів: ехометоду (уловлювання запізненого відображеного сигналу) та ефекту Доплера (уловлювання зміни довжини хвилі або частоти відображеного від рухомого об'єкта сигналу) та діє наступним чином. Синусоїдальні звукові коливання високої частоти (40-100 кГц), які формуються спеціальним генератором хвиль та модулюються прямокутними імпульсами, випромінюються дискретно в напрямку об'єкта. Одночасно з цим за допомогою генераторів лічильних імпульсів запускається своєрідний годинник локаційної системи – лічильник імпульсів.

Спрямований ультразвуковий сигнал, відобразившись від об'єкта, повертається у відображеному вигляді в приймач, де посилюється, очищується від перешкод та перетворюється з акустичної в електричну форму. Одночасно з нього виділяється модулююча складова, яка за допомогою порогового (відсікаючого)

пристрою представляється у вигляді прямокутних імпульсів, спрямованих на лічильник та зупиняючих процес розрахунку, тобто фіксується кількість імпульсів за час проходження сигналу до об'єкта та у зворотному напрямку.

Оскільки прийняті сигнали запізнюються по відношенню до початкових – зондуючих – на величину часу їх проходження до об'єкта та зворотно, то кількість імпульсів, накопичених в лічильнику за цей період, пропорційна подвоєній відстані від об'єкта при розташуванні випромінювача та приймача у безпосередній близькості один від одного. Для цього зазвичай використовують ультразвукові датчики-перетворювачі, які вміщують в одному корпусі випромінювач та приймач.

Локаційні сенсорні пристрої в поєднанні з тактильними та силомоментними сенсорними системами дозволяють створювати адаптивні захватні пристрої роботів, що забезпечують автоматизацію складних технологічних операцій (наприклад, складальних), які звичайними методами автоматизувати неможливо або економічно недоцільно.

**Системами технічного (машинного) зору (СТЗ)** називають сенсорні пристрої, які забезпечують отримання зображень робочих сцен та об'єктів, їх перетворення, обробку та інтерпретацію за допомогою ЕОМ, а також передачу результатів пристрою керування робота. Серед різних сенсорних систем роботів СТЗ має найвищу інформативну ємність, забезпечуючи 80% ...90% усієї необхідної для успішного функціонування робота інформації.

На рис. 5.7 наведено приклад використання системи машинного зору на конвеєрній лінії, що може працювати на виробництві, у логістичних центрах та сфері роздрібної торгівлі. СТЗ в цьому разі дозволяє вирішити відразу кілька складних завдань:

- розпізнавання штрих-кодів на упаковці/тарі;
- захист від випадкових зіткнень вантажів на стрічці конвеєра;
- розпізнавання кольорів упаковки;
- позиціонування вантажу у просторі;
- оцінка якості, виявлення дефектів продукції.

Технічний зір реалізує складний процес виділення, ідентифікації та перетворення відеоінформації, який містить шість основних етапів: отримання (сприйняття) інформації; попередня обробка; сегментація; опис; розпізнавання; інтерпретація.



Рис. 5. 7 – Схема застосування СТЗ

Після сприйняття інформації у вигляді візуального зображення виконується її попередня обробка з метою зменшення сторонніх перешкод, покращення видимості окремих елементів об'єкта або сцени. Далі зображення підлягає сегментації, яка полягає в розділенні сцени на окремі складові або елементи для виділення важливих об'єктів. Подальший опис масиву інформації представляє собою визначення характерних параметрів, необхідних для виділення визначених об'єктів або елементів сцени та подальшого їх розпізнавання за допомогою ідентифікації у відповідності до програмного набору інформації. Нарешті, за допомогою інтерпретації остаточно встановлюється приналежність об'єкту, що розглядається, до групи розпізнавальних.

Візуальна інформація в системах технічного зору сприймається і перетворюється в електричні сигнали за допомогою оптоелектронних перетворювачів або відеодатчиків СТЗ, які є первинними перетворювачами випромінювання в електричні сигнали та складаються з приймальної оптичної камери, чутливого елемента, пристроїв сканування, зчитування та посилення.

Обробка інформації в СТЗ здійснюється ієрархічно, для чого попередньо на першому рівні з метою зниження перешкод (фільтрації) та покращення зображень використовуються відеопроектори. Як правило, в якості основної характеристики плоского зображення використовується його контур. Відеопроектор за відфільтрованою інформацією від відеодатчика визначає координати точок контуру та вводить цю інформацію на другий рівень, який формує керуючу інформацію для роботи. Обробку інформації, як правило, виконує ЕОМ, яка входить до складу СТЗ.

Приєднання відеодатчиків до основної апаратури СТЗ здійснюється за допомогою спеціальних кабелів, які дозволяють передавати інформацію з малими

втратами та великою частотою сигналів (зокрема, використовується світло-волоконна оптика).

Сенсорні елементи відеодатчиків можуть бути точковими, одномірними та двомірними. В першому випадку сенсорний елемент сприймає випромінювання від малої частини об'єкта, а для отримання повного зображення необхідне сканування по площині зображення. При цьому зображення виходить у вигляді растру. Більш складні одномірні сенсорні елементи відповідають лінійці точкових елементів. Для отримання зображення в цьому випадку необхідне одномірне сканування, тобто переміщення елемента відносно об'єкта в напрямку, перпендикулярному до його лінійного розміру, або аналогічне переміщення об'єкта. Двомірні чутливі елементи замінюють матрицю точкових елементів, розташованих з певною дискретністю, та не потребують сканування.

На сенсорний елемент зображення проєктується за допомогою оптичної системи, яка визначає розміри охоплюваного відеодатчиком поля зображення робочої зони. Вона представляє собою лінзовий об'єктив з можливістю діафрагмування з метою регулювання інтенсивності світлового потоку та фокусування для забезпечення чіткості зображення при зміні відстані до об'єкта.

В якості відеодатчиків використовуються різні оптико-електронні пристрої. Переважне застосування в системах СТЗ знайшли цифрові фото- та відеокамери (раніше з цією метою використовувались телевізійні камери та твердотільні перетворювачі).

Для використання в адаптивних та інтелектуальних роботах проводяться дослідження зі створення СТЗ, здатних працювати з тривимірними зображеннями та складними об'єктами при підвищених вимогах до точності вимірювань, вірогідності розпізнавання об'єктів та швидкості обробки інформації. Науково-технічний пошук спрямований на вдосконалення технічних засобів та програмно-алгоритмичного забезпечення, створення спеціалізованих ЕОМ, а також розробку принципово нових систем технічного зору. Не дивлячись на складність та високу вартість СТЗ, їх застосування в робототехніці постійно розширюється.

## 6. Система зв'язку

### 6.1 Загальний опис

Система зв'язку призначена для забезпечення обміну інформацією (комунікації) між роботом та оператором або іншими роботами та технологічними пристроями [11, 16].

Комунікація необхідна для виконання багатьох роботизованих завдань і програм, таких як навігація, координація, ідентифікація, співпраця, навчання та самоорганізація. «Спілкуючись», роботи можуть ділитися даними датчиків, своїми діями та відгуками, а також покращувати свою продуктивність і адаптивність. Комунікація також може забезпечити взаємодію людини з роботом, дистанційне керування та моніторинг.

«Спілкування» між роботом та оператором або іншими технічними пристроями може бути реалізованим за схемою «один-до-одного», «один-до-багатьох» або «багато-до-багатьох».

Прикладом реалізації схеми «один-до-одного» є взаємодія оператора з роботом. За схемою «один-до-багатьох» відбувається, наприклад, взаємодія інтелектуального робота з більш простими роботами. Інтелектуальний робот може контролювати виконання складних завдань та в певний час спонукати інших виконувати простіші дії. Така координація може забезпечити набагато більший результат, ніж можна було б досягти роботами, які працюють ізольовано. Спілкування за схемою «багато-до-багатьох» відбувається в разі, коли кожен робот виконує певні завдання на основі свого програмування, але координує свої дії з іншими. Завдяки координації діяльності роботи можуть працювати як частина цілісної системи, оптимізуючи робочі процеси та підвищуючи їх ефективність.

Зміст і частота «спілкування» залежать від мети та контексту роботизованого завдання. Наприклад, якщо роботам потрібно співпрацювати для досягнення спільної мети, їм може знадобитися часто повідомляти про свої ролі, плани та статус. В разі, коли роботам для виконання завдання необхідно уникнути зіткнень, їм потрібно періодично повідомляти свої позиції та швидкості. Якщо роботам потрібно вчитися один у одного, їм достатньо лише час від часу повідомляти про свій досвід і відгуки. Комунікація має бути актуальною, короткою та послідовною, щоб уникнути плутанини та перевантаження.

Комунікація передбачає надсилання та отримання повідомлень між роботом та оператором або іншими роботами та технічними пристроями. Повідомлення можуть бути закодовані в різних форматах, таких як двійковий, текстовий або звуковий, і вони можуть містити різні типи інформації, наприклад команди, дані або сигнали. Щоб спілкуватися, роботам потрібно використовувати протокол зв'язку, який визначає правила та стандарти структурування, передачі та

інтерпретації повідомлень. Деякі поширені комунікаційні протоколи для робототехніки: TCP/IP, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, MQTT та ROS.

Комунікація здійснюється за допомогою каналу зв'язку – сукупності технічних засобів та середовища розповсюдження, що забезпечує передавання повідомлень від джерела до отримувача. Структурна схема каналу зв'язку представлена на рис. 6.1. Інформаційний сигнал від джерела проходить кодування (перетворення сигналу з форми, зручної для безпосереднього використання, у форму, зручну для передачі), модуляцію (процес зміни одного або декількох параметрів високочастотного коливання за законом низькочастотного інформаційного сигналу) та потрапляє до передавача. Далі через середовище розповсюдження сигнал передається від передавача до приймача. Після цього відбувається зворотне перетворення сигналу – його демодуляція та декодування. В результаті цього отримувачу надходить інформаційний сигнал, який був надісланий йому джерелом.



Рис. 6.1 – Структурна схема каналу зв'язку

За середовищем розповсюдження сигналу канали зв'язку розподіляються на оптичні та електричні. Своєю чергою, електричні канали зв'язку можуть бути дротовими (електричні дроти та кабелі) та бездротовими, які передають сигнал електромагнітними хвилями, що ширяться в ефірі.

Вибір середовища залежить від таких факторів, як відстань, пропускна здатність, перешкоди, безпека та вартість. Наприклад, радіохвилі можуть покривати великі відстані, але схильні до перешкод, тоді як оптичне волокно може запропонувати високу пропускну здатність, але є дорогим і крихким.

В залежності від використовуваного діапазону частот пристрої бездротового зв'язку поділяються на IR (використовують інфрачервоні хвилі), Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, GSM/GPRS, 4G / 5G та інші (табл. 6.1).

Для зручного підключення різних комунікаційних пристроїв до єдиної мережі використовуються стандартні інтерфейси, найбільш популярними та

універсальними з яких є USB, RS-232, Ethernet, UART, SPI, I2C та інші. Існують також більш специфічні інтерфейси, орієнтовані на автоматизацію промислових підприємств – такі як Fieldbus, Profibus та інші. Ці ж інтерфейси дозволяють роботам взаємодіяти з різними периферійними пристроями, такими як принтери, сканери, датчики, сервери тощо.

Табл. 6.1 – Характеристики бездротових мереж

Стандарт	Версії стандарту	Рік прийняття	Максимальна швидкість з'єднання (Мбіт/с)	Смуги радіочастот (ГГц)	Відстань дії, м
Bluetooth	1.0	1999	0,7	2,4	10
	2.0	2004	2,1	2,4	30
	3.0	2009	24	2,4	30
	4.0	2009	1 (LE) / 3 (EDR)	2,4	60
	5.0	2016	2 (LE) / 50 (EDR)	2,4	240
Wi-Fi	802.11b	1999	11	2,4	35 / 118 *
	802.11g	2003	54	2,4	38 / 140*
	802.11n	2009	300	2,4; 5; 6	70 / 250*
ZigBee	IEEE 802.15.4	2003	0,25	2,4	100
GSM/GPRS	GSM/GPRS	1997	0,17	0,9; 1,8	35000
4G	LTE	2012	700	0,9; 1,8; 2,6	2500...13500
5G	5G NR	2017	1000	0,6...6; 24-100	600

\* всередині / зовні приміщень

За формою сигналу, що підлягає передачі / прийманню, канали зв'язку поділяють на аналогові та цифрові.

Цифрові, або двійкові сигнали – це фактично прості сигнали вмикання/вимкнення, які функціонують як входи чи виходи, наприклад, для підтвердження наявності деталі або ввімкнення чи вимкнення допоміжного обладнання. Цифровий сигнал не є безперервним і використовується для певної одноразової операції, такої як відключення.

Аналогові сигнали можуть використовуватися роботами для визначення значення у вигляді напруги, яка потім може бути перетворена в число. Крім того, вони можуть надсилати напругу, яка перетворюється та використовується допоміжним обладнанням для встановлення або зміни одного чи кількох параметрів. Аналогові сигнали є безперервними і можуть бути сигналами змінного (AC) або постійного (DC) струму.

Обмін інформацією може бути синхронним (передача та прийом здійснюються одночасно) або асинхронним (прийом та передача – у різні проміжки часу).

Комунікація між роботами може відбуватись контактним та безконтактним способом. При контактному способі (рукостисканні – Handshaking) два роботи використовують цифрові входи та виходи для спілкування один з одним. У такому випадку цифровий вихід одного робота буде підключений до цифрового входу другого робота і навпаки.

Безконтактний спосіб забезпечується бездротовими мережами. Крім того, якщо необхідність в передачі даних виникає лише в разі близького розташування двох роботів один від одного, використовуються технології бездротового зв'язку на малих відстанях – такі як RFID (Radio frequency identification) та NFC (Near-Field Communication). В цьому разі зчитування даних здійснюється спеціальним модулем, який реагує на потрапляння в зону до 10 см носіїв інформації – міток, виконаних зазвичай у вигляді карток або брелків (рис. 6.2).

Технології RFID та NFC широко використовуються в системах контролю доступу, розпізнавання, відстеження тощо.



Рис. 6.2 – RFID модуль RC522 з двома мітками: у вигляді картки та брелку



Рис. 6.2 – Набір для інфрачервоного керування (пульт, приймач) для Arduino

## 6.2 Пристрої введення інформації

При взаємодії з роботом оператора виникає необхідність у введенні комунікаційної інформації. Іноді команди можуть подаватися голосом (інтерактивні роботи). Проте в більшості випадків для введення інформаційних повідомлень використовуються пристрої введення.

Пристроями введення інформації можуть бути пульти дистанційного керування (рис. 6.2), джойстики (рис. 6.3), клавіатури (рис. 6.4), сенсорні панелі тощо.



Рис. 6.3 – Джойстик керування для Arduino



Рис. 6.4 – 16-ти кнопкова мембранна клавіатура для Arduino

## 7. Виконавча система

### 7.1 Загальний опис

Як зазначалося раніше, за основною функцією роботів можна поділити на дві групи: мобільні платформи та маніпулятори. У відповідності до цього, виконавча система мобільних роботів представляє собою механізм пересування (мобільне шасі), а маніпуляторів – маніпуляційний механізм, або просто маніпулятор. Роботи комбінованого типу мають обидва механізми одразу – маніпулятор та мобільне шасі.

Основна сфера застосування роботів-маніпуляторів – автоматизація технологічних процесів на промислових підприємствах, тому часто таких роботів називають промисловими.

Типовий приклад механізму пересування мобільного робота наведений на рис. 7.1. По суті він представляє собою мобільне шасі (колісного, гусеничного, рейкового або крокуючого типу), що приводиться у рух за допомогою приводу (у більшості випадків – електричного типу), який містить двигун та трансмісію (передавальні механізми).

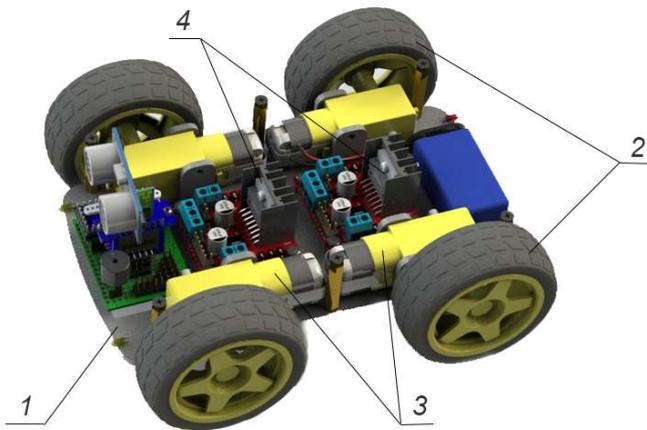


Рис. 7.1 – Механізм пересування мобільного робота  
мобільне шасі: 1 – каркас, 2 – колеса; привод: 3 – мотор-редуктори; 4 – драйвери двигунів

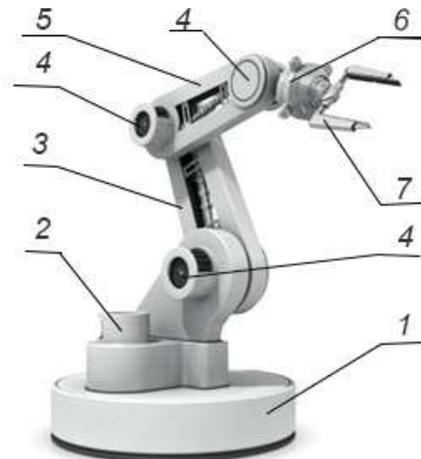


Рис. 7.2 – Механізм маніпулятора  
1 – опора; 2 – привод; маніпуляційна система («рука»): 3 – «плече», 5 – «передпліччя», 6 – «кисть»; 4 – шарніри; 7 – захватний пристрій

На рис. 7.2 наведено типовий приклад маніпулятора, який складається з опори, маніпуляційної системи, захватного пристрою та приводу. В маніпуляційній системі зазвичай виділяють «руку», яка забезпечує переміщення в робочій зоні об'єкта маніпулювання, а також кисть, яка здійснює його позиціонування. До кисті кріпиться захватний пристрій, що безпосередньо захоплює об'єкт маніпулювання.

Привод, який мають основні механізми роботів обох типів, розглядається в п. 7.2, а особливості маніпуляційного механізму та механізму пересування – у п. 7.3 та п. 7.4 відповідно.

## 7.2. Приводи

### 7.2.1 Загальна характеристика

Привод необхідний для перетворення енергії від джерела живлення в механічний рух виконавчих ланок робота відповідно до командних сигналів, які надходять від системи керування. В загальному вигляді привод містить двигун та трансмісію, яка складається з передавальних механізмів (рис. 7.3).

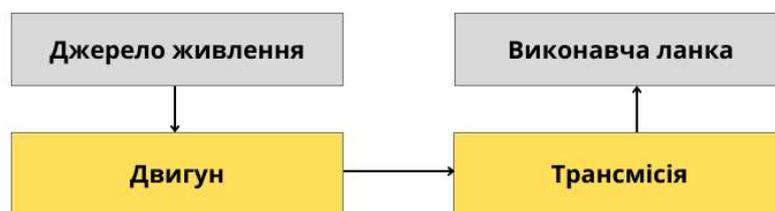


Рис. 7.3 – Загальна схема приводу

Тип приводу визначається видом енергоносія. В конструкціях роботів застосовують пневматичні, гідравлічні, електричні та комбіновані приводи. На початкових етапах розвитку робототехніки більшість роботів мала пневматичний або гідравлічний привод, проте останнім часом переважно використовується електропривод.

Вибір типу приводу обумовлений функціональним призначенням робота, технологічними вимогами, що висувуються до нього, особливостями виробництва та умовами експлуатації, а також вартістю, складністю обслуговування, експлуатаційними витратами.

В маніпуляторах використовуються усі типи приводу, в той час як механізми пересування побудовані на електричному, і набагато рідше – комбінованому приводі.

*Пневматичний привод* характеризується конструктивною простотою та дешевизною, високою швидкістю переміщення ланок виконавчої системи, простою обслуговування, високою надійністю та пожежною безпекою. До його недоліків слід віднести: складність реалізації слідкуючого приводу<sup>3</sup>, неможливість

<sup>3</sup> Поняття «слідкуючого приводу» розглядається в п. 7.2.2

точного позиціонування ланок виконавчої системи, значні розміри двигунів через обмеження тиску енергоносія, необхідність в спеціальних гальмівних пристроях для зупинки ланок в заданих точках з припустимими прискореннями, відносно низький ККД (0,15...0,2).

Енергоносієм в пневматичному приводі є стиснене повітря, яке створюється компресорами, що обслуговують індивідуальні пневмоустановки або усе підприємство (централізована мережа стисненого повітря). Тиск в централізованих мережах зазвичай складає 0,5...0,6 МПа, індивідуальному приводі – до 5,0 МПа та вище.

В якості двигунів в пневматичних приводах використовують силові пневмоциліндри зі зворотно-поступальним рухом штока, а також поворотні та ротаційні пневмомотори. Найбільше поширення отримали пневмоциліндри, які можуть безпосередньо з'єднуватися з ланками виконавчої системи без допомоги передавальних механізмів, що спрощує конструкцію робота.

Роботи з пневматичними приводами мають відносно невеликі (до 20...30 кг) вантажопідйомності, високі (до 2 м/с) швидкості руху ланок і можуть експлуатуватися у важких умовах навколишнього середовища (при високій запиленості та загазованості, пожежо- та вибухонебезпечності). Найбільш доцільним є застосування пневмоприводу в роботах при споживаній потужності 60 ... 800 Вт.

*Гідравлічний привод* відрізняють компактність і швидкодія, мала маса виконавчих двигунів, жорсткі статичні та високі динамічні характеристики, простота налаштування точних значень швидкостей ланок та їх надійної фіксації в поточних положеннях, практично необмежені потужність та вантажопідйомність. Завдяки високим точнісним характеристикам гідропривод забезпечує складні технологічні рухи ланок виконавчої системи за необхідним контуром. У порівнянні з пневматичним гідропривод має більш високий ККД (0,3 – при дросельній схемі регулювання, 0,6...0,7 – при об'ємній).

До недоліків гідроприводу відносяться:

- 1) необхідність у власних енергоустановках для перетворення енергії (гідростанціях);
- 2) відносно мала швидкість передачі гідравлічного імпульсу при великій довжині трубопроводів (більше 2 м), що знижує швидкодію;
- 3) залежність витрати робочої рідини від впливу зовнішніх умов навколишнього середовища (насамперед температури), що призводить до коливань швидкості ланок виконавчого механізму;
- 4) конструктивна складність і високі вимоги до виконання елементів гідросистеми (регулюючої апаратури, гідроперемикачів, стабілізуючих та диференціюючих пристроїв, які забезпечують автоматичне регулювання), що знижує надійність та довговічність гідроприводів;
- 5) менша, ніж у електропривода, гнучкість проводки;

б) більш високі трудомісткість та вартість виготовлення та обслуговування трубопроводів;

7) можливість витoku робочої рідини, що підвищує пожежо- та вибухонебезпечність, погіршує умови експлуатації;

8) підвищені вимоги до обслуговування при експлуатації.

Енергоносієм в гідравлічному приводі є рідина (як правило, спеціальне мастило), яка під тиском, створюваним насосом, подається в гідравлічні двигуни. Останні приводять в рух ланки виконавчої системи робота. Тиск в системах гідроприводу може досягати 20 МПа та більше.

Гідродвигуни, розподільча та допоміжна апаратура в гідроприводах за своєю конструкцією та принципом дії аналогічні тим, що використовуються в пневмоприводі. Зокрема, в якості двигунів в гідравлічних приводах використовують силові гідроциліндри зі зворотно-поступальним рухом штоку (рис. 7.4), а також моменти гідроциліндри та гідромотори, які здійснюють безперервне обертання. Гідромотори належать до різних типів: пластинчасті (рис. 7.5), шестеренні, аксіально-поршневі, радіально-поршневі.

Як і в пневматичних приводах, силові гідроциліндри та низькооборотні двигуни можна безпосередньо з'єднувати з ланками маніпулятора без допомоги передач, що значно спрощує виконавчу систему.



Рис. 7.4 – Гідравлічний циліндр



Рис. 7.5 – Пластинчастий гідромотор

Гідравлічний привод виконується у вигляді слідкуючого приводу з вантажопідйомністю до 20 кг і вище. У роботах меншої вантажопідйомності він застосовується замість пневматичного приводу в разі, якщо потрібний слідкуючий привод.

На рис. 7.6 наведена спрощена модель робота-маніпулятора з гідравлічним приводом. Маніпуляційний механізм робота складається з захвату 1, руки (2 – зап'ястя; 3 – передпліччя; 4 – плече) та основи 5. Гідравлічний привод складається з циліндрів 6, блоку керування 7 та з'єднувальних гнучких трубок. Блок управління має п'ять важелів та одну обертальну рукоятку. Повертаючи їх,

переміщуються поршні циліндрів блоку керування, які в даному випадку відіграють роль насосів. Робоча рідина під тиском подається в гідроциліндри 6, які приводять в рух ланки маніпуляційної системи та захвату.

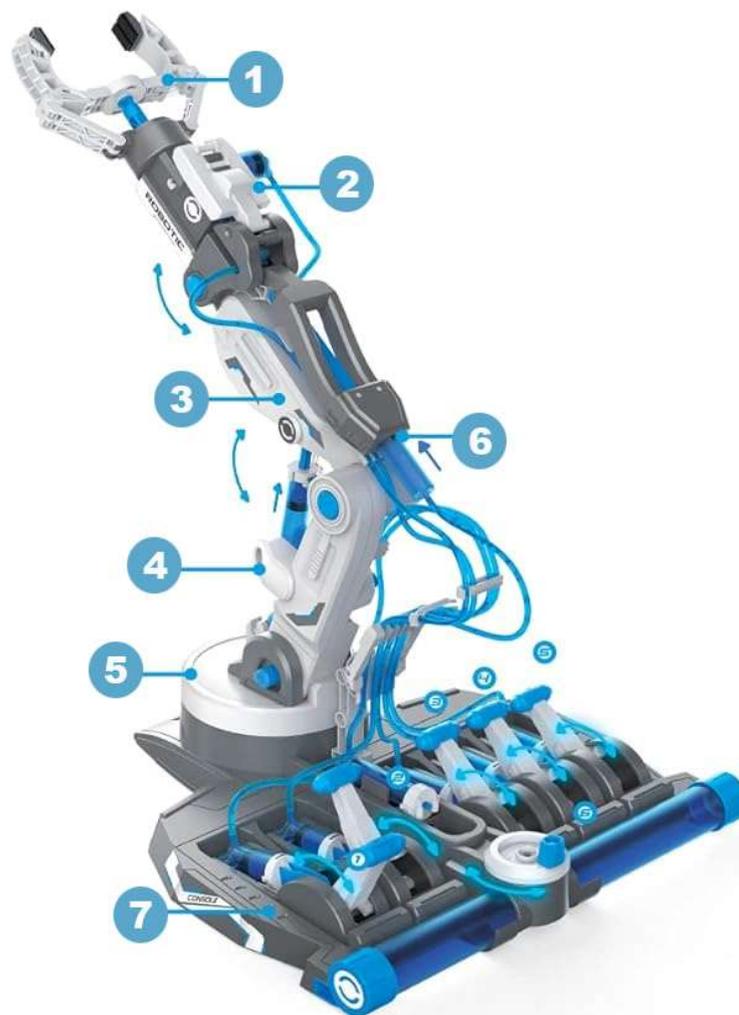


Рис. 7.6 – Модель гідравлічного робота-маніпулятора Hydrobot arm kit від Elenco:  
1 – захват; 2 – зап'ястя; 3 – передпліччя; 4 – плече; 5 – основа; 6 – гідравлічний циліндр; 7 – блок керування

*Електричний привод* відрізняється доступністю енергоносія, легкістю регулювання, простотою монтажу та налагодження, а також обслуговування при експлуатації, досить високими показниками надійності, високим ККД і низьким рівнем шуму при роботі.

До недоліків електроприводу відносяться: порівняно високі оберти електродвигунів, що вимагає застосування складних передавальних механізмів або додаткового електронного керування; інерційність, що викликає необхідність введення механізмів фіксації положень ланок типу фрикційних гальм або самогальмівних передач; менші швидкості ланок порівняно з пневматичним приводом; недостатньо високі показники питомої потужності.

Більшість електродвигунів має ротаційний тип. Головний вал у таких двигунах обертається. Але є і лінійні двигуни, які мають каретку, що рухається поступально (вперед і назад) уздовж доріжки.

Класифікація електродвигунів ротаційного типу наведена на рис. 7.7. У роботах знайшли застосування в основному наступні конструктивні різновиди електродвигунів: постійного струму з аналоговим або цифровим керуванням; асинхронні змінного струму нерегульовані (з цикловим керуванням) і регульовані (з частотним керуванням); крокові.

Дія усіх варіантів електродвигуна заснована на магнетизмі.

Двигун постійного струму має найпростішу конструкцію (рис. 7.8, а) і складається з нерухомого статора з постійним магнітом і обмоткою, по якій протікає струм збудження  $I_b$ , званий індуктивним; а також якоря, що обертається, з обмотками, по яких протікає струм  $I_a$ . Останній створює основне магнітне поле. Виводи від обмоток якоря приєднані до розташованого на його валу колектору [5, 28].



Рис. 7.7 – Класифікація електродвигунів ротаційного типу

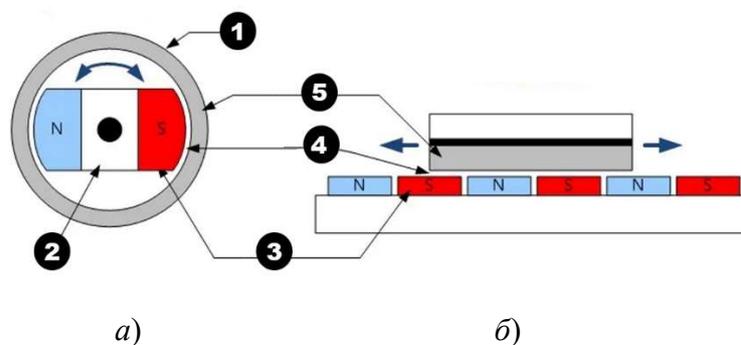


Рис. 7.8 – Схема електродвигунів: а) ротаційного типу; б) лінійного  
1 – статор; 2 – ротор; 3 – постійний магніт; 4 – повітряний зазор;  
5 – обмотка [12]

Взаємодія магнітних полів полюсів статора та обмоток якоря при їх своєчасному перемиканні за допомогою колекторних щіток забезпечує постійно спрямований обертаючий момент. Керування швидкістю здійснюється зміною напруги, що подається на обмотки: чим вона вище, тим швидше обертається якор. Аналогічно крутий момент залежить від зміни величини струму. Отже, необхідне регулювання швидкостей рухів і моментів у широкому діапазоні здійснюється досить просто шляхом зміни напруги якоря  $Uя$  або струму збудження  $Iв$ . Зміна напрямку обертання проводиться зміною полюсів у вигляді перемикачів. Електромагнітне збудження може бути незалежним, паралельним, послідовним або змішаним.

Електродвигуни постійного струму широко використовуються в електроприводах роботів завдяки їхній хорошій керованості.

Вдосконалення методів керування швидкістю та реверсом електродвигунів постійного струму наприкінці ХХ століття призвело до широкого використання тиристорного керування за допомогою вентильних (тиристорних) перетворювачів, що має перевагу перед іншими способами керування. Використання тиристорів – керованих напівпровідникових діодів – дозволило створити безконтактні (безколекторні) електродвигуни постійного струму.

На початку ХХІ століття тиристорні приводи почали замінювати на транзисторні з ШІМ<sup>4</sup> керуванням. Сучасні транзисторні (IGBT) приводи мають купу переваг перед тиристорними: гнучкість керування; збільшений ККД; значно більшу надійність; можливість працювати як зі змінним, так і з постійним вхідним струмом, тоді як тиристорні приводи можуть працювати тільки зі змінним струмом живлення.

*Асинхронні двигуни змінного струму* (одно- та трифазні) отримали дуже широке застосування в промисловості завдяки багатьом перевагам: простоті та надійності, низькій вартості, значно меншій масі та габаритним розмірам у порівнянні з двигунами постійного струму.

В асинхронних електродвигунах змінного струму швидкість обертання ротора не дорівнює швидкості обертання магнітного поля статора (асинхронна). Розрізняють однофазні і трифазні, з фазним або короткозамкненим ротором асинхронні двигуни.

Статор однофазного асинхронного двигуна має дві обмотки, зміщені одна відносно одної на кут  $90^0$ , статор трифазного – три обмотки, зміщені на кут  $120^0$ , що живляться змінним струмом. В результаті створюється магнітне поле, що обертається, майже з тією ж швидкістю і захоплює за собою ротор, оснащений короткозамкненою або фазною обмоткою. У таких двигунах зміна напруги не впливає на швидкість обертання, а найбільш простим способом їх регулювання

---

<sup>4</sup> ШІМ - широтно-імпульсна модуляція

є зміна частоти змінного струму живлення. Зміну напрямку обертання таких двигунів можна отримати шляхом зміни чергування фаз живлення, наприклад, змінивши місцями два з трьох провідників живлення для трифазного двигуна або два провідника однієї з котушок статора – для однофазного двигуна.

*Крокові електродвигуни* дуже зручні для застосування у приводах роботів, оскільки не вимагають датчиків зворотного зв'язку для регулювання положень ланок. Такі двигуни дозволяють з високою точністю перетворювати цифрові електричні сигнали безпосередньо в дискретні кутові переміщення (кроки) ротора.

За принципом дії кроковий двигун відноситься до двигунів синхронного типу: у ньому існує зв'язок між сигналом живлення та положенням ротора. Завдяки періодичним перемиканням обмоток статора, його магніторушійне поле, повертаючись на певний кут (крок), здійснює поворот на такий же визначений кут ротора двигуна, що є постійним магнітом чи змінним магнітним опором. Таким чином можна змусити обертатися вал з високою швидкістю, будь-якої миті знаючи його положення. У складних моделях вихідний вал може обертатися і фіксуватися в будь-якому з двохсот різних кутових положень за оберт, тобто менше двох градусів за крок.

Це робить крокові двигуни ідеальними для навчання роботів. До недоліків крокових електродвигунів відносяться нестійкість обертання при прискоренні та гальмуванні, відносно висока вартість та мала потужність.

Електропривод, як правило, вимагає застосування тих чи інших передавальних механізмів для передачі та узгодження швидкостей руху та силових характеристик валів електродвигунів та ланок виконавчого механізму.

Завдяки розробці в останні роки перспективних електродвигунів з покращеними параметрами та характеристиками (електродвигунів з плоскими та гладкими роторами, що дозволяють підвищувати швидкодію та зменшувати інерційність; малоінерційних високомоментних електродвигунів, що значно підвищують показники питомої потужності, лінійних тощо) все помітніше відчувається тенденція до більш широкого застосування електричних приводів в промислових роботах, особливо призначених для таких складних технологічних процесів, як контурне зварювання та складання.

Перспективні для застосування у конструкціях роботів *лінійні електродвигуни* (рис. 78, б), які на відміну від традиційних електромоторів створюють безпосередньо лінійний рух. Вони можуть розглядатися як двигуни змінного струму, у яких «розрізали», а потім «розгорнули» на площині статорний бік. Керуючи полярністю обмотки, можна змусити сердечник ковзати уздовж шляху з високою якістю керування. Лінійні двигуни мають високі динамічні характеристики, дуже швидко набирають прискорення та можуть пересуватися зі швидкістю близько 1 м/с.

*Комбінований привод*, який складається з декількох типів приводу, поки що застосовується обмежено, що пояснюється ускладненням конструкції та обслуговуванням робота, а також зниженням надійності його роботи.

Порівняльна характеристика різних типів приводів наведена в табл. 7.1 [28].

Важливим чинником, здатним вплинути на вибір конкретного приводу, є прийняті при проектуванні компонувальні рішення. Так, виділяють три основні варіанти компонування приводів з виконавчим механізмом:

- 1) привод розташований на ланці виконавчого механізму та забезпечує безпосередній вплив на ланку, що рухається;
- 2) привод розташований на нерухомій підставі та пов'язаний з ланками через передавальні механізми;
- 3) комбінований спосіб компонування, коли частину приводних пристроїв розміщують безпосередньо на ланках виконавчого механізму, а частину – на нерухомій основі.

У маніпуляторах найбільш поширеним є перший варіант компонування завдяки простоті кінематичних зв'язків між ланками та зручності керування маніпуляційною системою. Однак його реалізація призводить до збільшення маси та габаритних розмірів ланок маніпулятора, зниження вантажопідйомності та погіршення динамічних характеристик. У разі жорстких обмежень на масу і габаритні розміри ланок маніпулятора кращим є другий варіант, хоча він вимагає довгих і складних кінематичних ланцюгів для передачі руху.

Останнім часом все більшого поширення набуває комбінований спосіб; при цьому в основу побудови конструкції маніпулятора закладається перший варіант компонування, а окремі приводні пристрої ланок маніпуляційної системи встановлюються на нерухомій основі робота.

### 7.2.2 Керування приводом

Програмоване та цілеспрямоване функціонування виконавчих механізмів роботів було б практично неможливим без керування приводами.

За типом керування приводи можуть бути розімкненими з позиціонуванням за упорами, розімкненими з цифровим керуванням та застосуванням в якості двигунів крокових електромоторів або складових циліндрів (позиціонерів), замкненими (слідкуючими) зі зворотними зв'язками за положенням або деякими іншими параметрами (швидкістю, силою тощо).

Табл. 7.1. Порівняльна характеристика приводів роботів

Характеристика	Тип привода			
	пневматичний	гідравлічний	електричний	комбінований
Вартість	середня	висока	порівняно низька	порівняно висока
Потужність	обмежена	не обмежена	обмежена	обмежена, але вища ніж у пневмоприводу
Швидкодія	дуже висока	висока	висока	висока
ККД	0,15..0,20	0,3 – при дросельному, 0,6 – при об'ємному регулюванні	0,5	0,2...0,3
Конструктивність	Конструктивний: виконавчі двигуни можуть використовуватись як несучі конструкції; в багатьох випадках не вимагає передачі; найбільше уніфікується та піддається агрегатно-модульному виконанню	Конструктивний: виконавчі двигуни можуть використовуватись як несучі конструкції; в багатьох випадках не потребує передачі; легко уніфікується	Конструктивний: може використовуватись без застосування передачі, легко уніфікується	Менш конструктивний, ніж пневматичний та гідравлічний окремо; уніфікація обмежена
Зручність регулювання	Конструктивно прості регулятори швидкості та розподільні елементи; вимагає спеціальних гальмівних пристроїв; налаштування точних значень швидкості дуже ускладнена	Конструктивно прості регулятори швидкості, розподільні елементи та гальмівні пристрої; налаштування точних значень швидкості можлива	Конструктивно прості способи регулювання; велика гнучкість керування	Конструктивно прості регулятори швидкості, розподільні механізми та гальмівні пристрої
Вимоги до монтажу	Відносно невисокі; витоки енергоносія практично не впливають на роботу приводу	Підвищені; витоки робочої рідини впливають на роботу приводу	Від порівняно невисоких до підвищених в залежності від виконання приводу	Підвищені; витоки робочої рідини впливають на роботу приводу
Вимоги до обслуговування	Середні; потребує періодичної профілактики при середній кваліфікації обслуговуючого персоналу	Високі; потребує періодичної профілактики при високій кваліфікації обслуговуючого персоналу	Середні; потребує періодичних оглядів при середній кваліфікації обслуговуючого персоналу	Високі; потребує періодичної профілактики при високій кваліфікації обслуговуючого персоналу
Безпека	Вибухобезпечний у звичайному виконанні; при тиску 1МПа та більше - вибухонебезпечний	Вибухобезпечний, але деякою мірою пожежонебезпечний	Вибухонебезпечний у звичайному середовищі	Вибухонебезпечний у звичайному виконанні; при тиску повітря 1МПа та більше вибухонебезпечний; певною мірою пожежонебезпечний

Найбільше використання в конструкціях роботів знайшли слідкуючі приводи на базі гідравлічного та електричного приводів, які називають *сервоприводами*.

Сервоприводом називається такий привод, в якому для автоматичного керування використовують ті чи інші сервомеханізми. Своєю чергою, сервомеханізмами (від лат *servo* – допоміжний, залежний) є пристрої, здатні переміщатися у суворій відповідності до команд, що надходять ззовні. Вперше сервомеханізм був створений Джеймсом Уаттом у 1788 р. і являв собою пристрій, призначений для керування роботою парової машини з використанням відцентрового регулятора швидкості.

Відповідно до японського промислового стандарту JIS, сервомеханізм – це «система автоматичного керування, в якій вхідний керуючий сигнал перетворюється на механічне лінійне чи кутове переміщення керованого об'єкта».

Для сервоприводів, що застосовуються у виконавчих системах роботів, об'єктом керування найчастіше є позиція ланок виконавчого механізму (позиційний принцип керування) включно з їх орієнтацією. Значно рідше до об'єктів керування відносяться швидкість переміщення ланок виконавчої системи та зусилля, що прикладається ними до зовнішніх об'єктів. Однак у цих випадках керування здійснюється побічно, через зміну позицій ланок. Отже, основним базовим об'єктом керування для систем керування роботами є позиції ланок виконавчого механізму.

Сервомеханізми у приводах виконавчих систем роботів реалізують один із видів автоматичного керування, в результаті якого відбувається переміщення необхідної ланки робота точно в задане положення. При цьому потужність вихідного сигналу, що безпосередньо впливає на виконавчий механізм, як правило, у багато разів перевищує потужність вхідного керуючого впливу, тому потрібне підведення ззовні додаткової енергії. В якості пристроїв, які виробляють посилений вихідний вплив, застосовують ті чи інші двигуни, найчастіше – електродвигуни, гідроциліндри та гідромотори. Більшість з них, вирізняючись гарною керованістю, самі по собі мають властивості сервомеханізмів (сервомотори).

Досягнення необхідної вихідної дії в сервоприводах може здійснюватись по-різному. Як згадувалося вище, за типом керування всі приводні механізми можна розділити на розімкнені (з відкритим контуром керування) та замкнені (із закритим контуром керування). У системах першого типу керуючий сигнал задає необхідне положення керованого механізму, а сервопривод виробляє вплив, що забезпечує його реальне переміщення в задане положення. У замкнених серво-системах, крім керуючого сигналу, на вхід у процесі функціонування передається інформація про поточне значення вихідного впливу (зворотний зв'язок), здійснюється зіставлення сигналів, а результуюча дія через пристрій керування надходить на вхід виконавчого механізму. Такі сервосистеми прийнято називати двобічними на відміну від систем першого типу, які називаються одnobічними.

Розімкнені системи керування приводами простіші в реалізації та значно дешевші. Більш складні та дорогі – замкнені двобічні сервосистеми – мають такі переваги, як висока точність керування, швидка реакція на зовнішній керуючий вплив, а також висока завадостійкість. Замкнені системи автоматичного керування приводами широко застосовуються у робототехніці та продовжують удосконалюватися у зв'язку зі створенням адаптивних та інтелектних роботів.

Класифікація сервоприводів здійснюється за низкою ознак. За типом виконавчих пристроїв сервоприводи поділяються на електричні, гідравлічні та пневматичні. Їхні порівняльні характеристики наведені в табл. 7.2 [28].

За способом обробки інформації розрізняють аналогові та цифрові сервоприводи в залежності від того, в аналоговій або цифровій формі здійснюється обробка вхідних сигналів та керуючої інформації.

Табл. 7.2 Порівняльна характеристика сервоприводів різного типу

Тип сервоприводу	Конструкція	Вартість	Потужність	Експлуатаційні особливості
Електричний	Проста	Мала	Невисока	Відсутність забруднення робочого місця
Гідравлічний	Складна	Висока	Висока вихідного сигналу	Забруднення мастилом
Пневматичний	Складна	Порівняно висока	Середня вихідного сигналу	Відсутність забруднення робочого місця

При створенні найсучасніших моделей промислових роботів перевага все частіше віддається електричним сервосистемам, які, хоч і поступаються гідравлічним за потужністю вихідного впливу, але мають такі важливі переваги, як простота конструкції, висока надійність, низький рівень шуму, порівняно мала вартість, а також відсутність забруднення робочих приміщень. Виконавчими елементами електричних сервоприводів служать, як правило, електродвигуни постійного струму, що мають хорошу керованість та дозволяють порівняно легко досягти високої точності роботи сервосистеми.

На рис. 7.9 як приклад наведено структурну схему електричної сервосистеми керування приводом маніпулятора. Величина  $\varphi_1$ , яка задається на вході як необхідний кут повороту виконавчої ланки маніпулятора, перетворюється у відповідну за величиною електричну напругу  $U_1$ . Ця напруга подається в сервопідсилювач, що є зовнішнім контуром двигуна (сервомотора) постійного струму.

Посилений сигнал надходить у сервомотор, що формує відповідний вихідний механічний вплив, який через редуктор повертає виконавчу ланку

маніпулятора на кут  $\varphi_2$ , близький за величиною до заданого ( $\varphi_2 \cong \varphi_1$ ). Завдяки вихідному датчику (потенціометру) в процесі руху виконавчої ланки формується сигнал зворотного зв'язку, що надходить до компаратору у вигляді електричної напруги  $U_2$ , відповідної за знаком і величиною реальному куту повороту виконавчої ланки маніпулятора  $\varphi_2$ . Різниця напруги  $U_1 - U_2$  в посиленому вигляді подається в обмотки сервомотора, забезпечуючи відповідне коригування швидкості його обертання. Таким чином, поточне значення кута повороту виконавчої ланки маніпулятора  $\varphi_2$  достатньо швидко досягає рівності цільовому значенню  $\varphi_1$ , заданому на вході.

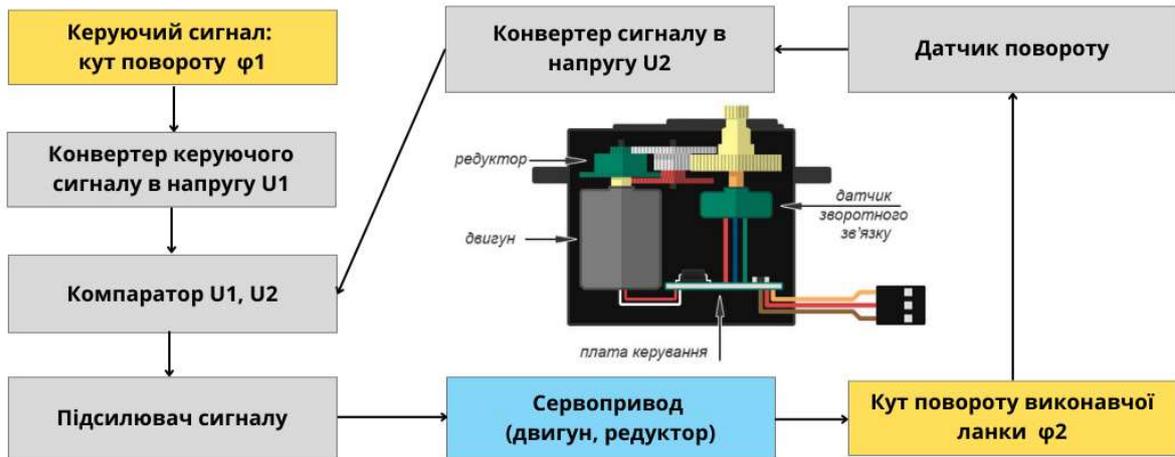
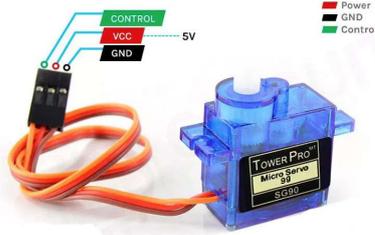


Рис. 7.9 – Схема електричної сервосистеми

Вихідний сигнал  $U_1$  надходить на вхід сервоприводу від керуючого пристрою (комп'ютера), винесеного безпосередньо з контуру керування приводом. У багатьох випадках в електричних сервосистемах зворотний позиційний зв'язок (наприклад, за кутом повороту) подається на вхід комп'ютера, а на сервопідсилювач надходить додатковий сигнал за швидкістю обертання вихідної ланки у вигляді електричної напруги від тахогенератора, встановленого на виході. Система з таким подвійним зворотним зв'язком забезпечує більш плавне наближення виконавчої ланки до заданої позиції та отримала назву системи з м'яким, чи плавним керуванням. На відміну від неї система з одним контуром позиційного зворотного зв'язку має назву жорсткого керування.

Відмінності між системами розімкненого (кроковий двигун) та замкненого (сервопривод) типу наведені в табл. 7.3.

Табл. 7.3 – Порівняльна характеристика крокових двигунів та сервоприводів [18]

Характеристика	Кроковий двигун	Сервопривод
		
Призначення	Позиціонування вихідної ланки в залежності від керуючого сигналу	
Особливості	Розімкнений контур (без зворотного зв'язку)	Замкнений контур за рахунок системи зворотного зв'язку
Точність позиціонування	середня	висока
Переваги	Менша вартість; простота керування; більш висока надійність; постійний крутний момент на низьких швидкостях	Висока точність; ефективне енергоспоживання; постійний крутний момент на різних швидкостях; відносно тиха робота
Недоліки	Генерує більше тепла; відсутність зворотного зв'язку; зниження крутного моменту на високій швидкості; відносно шумна робота	Більш висока ціна; складна конструкція; більш високі витрати на експлуатацію
Типові сфери застосування	3D-принтери; верстати з ЧПК; сканери; цифрові фотоапарати	Робототехніка (маніпулятори, дрони); обладнання з ЧПК; приводи конвеєрів

### 7.2.3 Передавальні механізми приводів

Передавальні механізми приводів роботів служать сполучними ланками між двигунами та виконавчими органами та призначені для виконання наступних функцій: перетворення виду руху (обертального – в поступальне і навпаки), узгодження параметрів руху (швидкості та крутного моменту), а також осей двигунів та виконавчого органу. В якості передавальних механізмів використовуються різні види передач: гвинтові, кульковинтові та роликвинтові; рейкові, зубчасті та черв'ячні; фрикційні, ремінні та тросові; важільні та ланцюгові; планетарні і хвильові.

Конкретне призначення передавальних механізмів за різних поєднань типів двигунів та видів переміщень виконавчих ланок наведено в табл. 7.4 [28], з якої видно, що в поєднаннях В2 та П1 передавальні механізми взагалі можуть

бути відсутніми, оскільки двигуни в цих випадках можуть безпосередньо впливати на виконавчі ланки чи самі виконувати їх функції. Цей варіант найбільш переважний, хоча не завжди є здійсненим, оскільки в деяких випадках з міркувань компоновання, технологічності або зручності обслуговування двигун не може бути розташований співвісно з виконавчою ланкою, а тому для узгодження осей необхідне застосування тих чи інших передач, що використовуються також для узгодження швидкостей та силових характеристик. Поєднання В1 та П2 вимагають використання передач для перетворення виду руху (поступального до обертального і навпаки). У поєднаннях В3 та П3 необхідні передачі з великими передавальними числами, для чого використовують, як правило, різні редуктори – зубчасті, черв'ячні, планетарні або хвильові, які для перетворення виду руху (П3) можуть поєднуватися із зубчастою рейковою або гвинтовою передачами.

Таблиця 7.4 – Призначення передавальних механізмів в промислових роботах

№	Тип двигуна	Вид переміщення виконавчого органу	
		обертальне (В)	поступальне (П)
1	Поступальні лінійні (гідро- та пневмоциліндри, лінійні електродвигуни)	Передачі для перетворення поступального руху в обертальний	Передачі відсутні або присутні для узгодження осей двигуна та виконавчої ланки
2	Обертальні низькооборотні (поворотні гідро- та пневмоциліндри)	Передачі відсутні або присутні для узгодження осей двигуна та виконавчої ланки	Передачі для перетворення обертального руху в поступальний
3	Обертальні високооборотні (гідро- та пневмомотори, електродвигуни)	Передачі з великим передавальним числом для узгодження швидкостей та крутних моментів двигуна та виконавчої ланки	Передачі для перетворення обертального руху в поступальний з великими передавальними числами

Найважливішою характеристикою передавального механізму є його передавальне відношення, що обчислюється як відношення швидкостей руху ведучої ланки (валу, штока і т.д.) до веденої. Вирази для передавальних відношень модулів руху роботів мають різний вид залежно від поєднань перетворюваних рухів:

для узгодження параметрів обертального руху двигуна в обертальний рух виконавчої ланки (В3)

$$i = \frac{\omega_d}{\omega}, \quad (7.1)$$

або

$$i = \frac{M}{M_d \eta} \quad (7.2)$$

де  $\omega_d$  – кутова швидкість валу двигуна,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\omega$  – кутова швидкість обертання виконавчої ланки,  $\text{с}^{-1}$ ;  $M$  – момент на виконавчій ланці, Нм;  $M_d$  – номінальний момент на валу двигуна, Нм;  $\eta$  – ККД передавального механізму;

для перетворення обертального руху двигуна в поступальний рух виконавчої ланки (ПЗ):

$$i = \frac{\omega_d}{v}, \quad (7.3)$$

або

$$i = \frac{P}{M_d \eta} \quad (7.4)$$

де  $v$  – лінійна швидкість переміщення виконавчої ланки,  $\text{мс}^{-1}$ ;  $P$  – сила на виконавчій ланці, Н;

для узгодження параметрів поступального руху двигуна в поступальний рух виконавчої ланки (П1):

$$i = \frac{v_d}{v}, \quad (7.5)$$

або

$$i = \frac{P}{P_d \eta} \quad (7.6)$$

де  $v_d$  – лінійна швидкість переміщення штоку двигуна,  $\text{мс}^{-1}$ ;  $P_d$  – номінальна сила на штоці двигуна, Н;

для перетворення поступального руху двигуна в обертальний рух виконавчої ланки (В1), м:

$$i = \frac{v_d}{\omega}, \quad (7.7)$$

або

$$i = \frac{M}{P_d \eta}. \quad (7.8)$$

Як випливає з наведених співвідношень, при узгодженні параметрів руху одного виду передавальне відношення є безрозмірним, однак у разі перетворення виду руху (обертального в поступальний і навпаки) воно стає розмірною величиною. Оскільки в розрахунковій практиці зручніше оперувати з передавальним відношенням у вигляді безрозмірного числа, його можна обчислювати, використовуючи приведення рухів на вході та виході до одного виду (обертального або поступального). В цьому випадку, як і при узгодженні параметрів руху одного виду, говорять про передавальне число  $u$  механізму, що є безрозмірною величиною.

Крім передавального відношення (передавального числа), для вибору того чи іншого передавального механізму найбільш важливими оціночними

показниками є мертвий хід, або люфт, передачі; жорсткість, величина ККД, властивості самогальмування або зворотності, габаритні розміри та маса, зручність компонування, рівень шуму при роботі, довговічність, складність, технологічність виготовлення та вартість.

*Зубчасті циліндричні редуктори* (рис. 7.10) мають високу жорсткість і довговічність, технологічні у виробництві. Високі значення ККД дозволяють без великих втрат потужності застосувати спеціальні методи усунення люфтів. Прийнятний рівень шуму досягається досить високим ступенем точності виготовлення. Недоліком зубчастих передач для застосування в механічних системах роботів є їх висока інерційність. *Зубчасті конічні передачі* (рис. 7.11), крім того, потребують більш точного регулювання при складанні та мають підвищений шум при роботі.



Рис. 7.10 – Циліндричний зубчастий редуктор



Рис. 7.11 – Конічний зубчастий редуктор

Перевагою *планетарних зубчастих передач* (рис. 7.12) є їх висока компактність при високих значеннях передавального числа, проте вони менш технологічні у виробництві, вимагають підвищеної точності виготовлення та збирання.

*Рейкова зубчаста передача* (рис. 7.13) складається з шестерні і зубчастої рейки і може розглядатися як окремий випадок циліндричної зубчастої передачі, у якій колесо звернене в рейку. Рейкова зубчаста передача служить для перетворення обертального руху шестерні в поступальний – рейки і, навпаки, поступального руху рейки у обертальний — шестерні. Вона проста за конструкцією та у виготовленні, компактна та відрізняється високою надійністю. Недоліком рейкової передачі є відсутність виграшу в силі, тому що її передавальне число дорівнює одиниці.

*Черв'ячні редуктори* (рис. 7.14) відрізняються великою жорсткістю, меншою інерційністю, відносно простою конструкцією та можливістю самогальмування, що дуже важливо для реалізації слідкуючого приводу. Недоліком черв'ячних передач є знижений ККД (до 0,4...0,5 в однозахідних передачах), високий нагрів.



Рис. 7.12 – Планетарна зубчаста передача



Рис. 7.13 – Рейкова зубчаста передача

Комплекс важливих якостей мають *хвильові передачі* (рис. 7.15), що визначило перспективу їх широкого застосування в робототехніці. Хвильові передачі служать для передачі обертального руху, а також можуть бути використані для перетворення обертального руху в поступальний (хвильова різьбова передача) з великими передавальними числами. Вони відрізняються порівняно простотою конструкції, можливістю реалізації великих передавальних чисел в одному ступені, малими габаритними розмірами і масою при високій здатності навантаження, практично безлюфтовістю (багатопарне зачеплення) і досить високим ККД (до 0,85). До недоліків хвильових передач відносяться знижена жорсткість, відносна складність виготовлення та досягнення достатньої довговічності.



Рис. 7.14 – Черв'ячна передача



Рис. 7.15 – Хвильова передача

*Хвильові зубчасті передачі* (ХЗП) знайшли широке застосування в електромеханічних приводах кращих промислових роботів.

Класична конструкція хвильової зубчастої передачі включає три основні елементи (рис. 7.16): генератор хвилі, гнучке кільце (колесо) та жорстке кільце (колесо). Конструктивно генератор хвилі є тонкостінним шарикопідшипником, який напресований на еліптичну втулку. Гнучке кільце є тонкостінним зубчастим колесом із зачепленням на зовнішньому контурі. Під час складання генератор хвилі встановлюється всередину гнучкого колеса, останнє при цьому

деформується, приймаючи форму генератора. Жорстке колесо – це зубчасте кільце з внутрішнім зачепленням. Кількість зубців жорсткого колеса переважно на два більше, ніж у гнучкого колеса (рідше виготовляють кільця з різницею в чотири зубці). При складанні хвильового редуктора гнучке колесо, встановлене на генератор хвилі, розміщується всередині жорсткого колеса. Зачеплення жорсткого колеса з гнучким здійснюється у двох зонах, розташованих на великій півосі генератора хвилі.

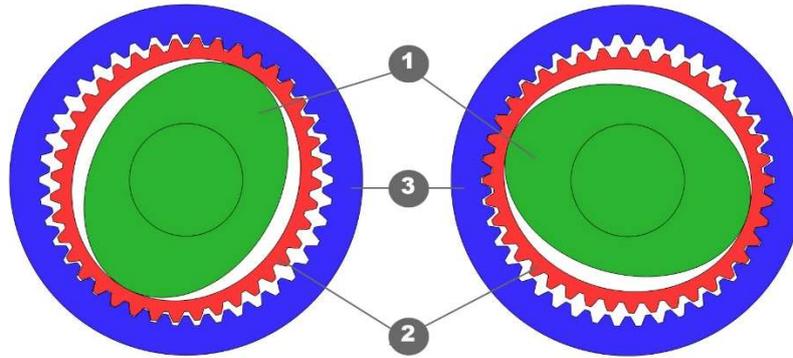


Рис. 7.16 – Схема хвильової зубчастої передачі:  
1 – генератор хвилі, 2 – гнучке колесо; 3 – жорстке колесо

У міру повороту генератора хвилі зони зачеплення зубців зміщуються відносно кола жорсткого колеса. Через відмінність у числі зубців на гнучкому і жорсткому колесі при повороті генератора хвилі на  $360^\circ$  гнучке колесо зміщується відносно жорсткого, при цьому величина зсуву відповідає різниці в числі зубців обох коліс.

*Передача гвинт-гайка* ковзання (рис. 7.17) служить для перетворення обертального руху в поступальний, але іноді застосовується і для перетворення поступального руху на обертальний. Вона проста за конструкцією та у виготовленні, компактна, відрізняється високою надійністю, плавністю та безшумністю, можливістю забезпечення повільних переміщень з великою точністю, дає значний виграш у силі. До недоліків гвинтових передач слід віднести підвищений знос різьблення внаслідок інтенсивного тертя, низький ККД, наявність люфтів.

Розрізняють два типи гвинтових передач: передача з тертям ковзання (передача гвинт-гайка), і передача з тертям кочення (кульково-гвинтова передача). Кулькова гвинтова передача (КГП) – це високоефективний метод перетворення обертального руху в лінійний за допомогою використання механізму циркулюючої кульки між ходовим гвинтом і гайкою. Порівняно з традиційною гвинтовою передачею (гвинт-гайка) крутний момент для КГП зменшується втричі і більше, що робить її оптимальною для економії потужності електродвигуна.



а) б) в)  
Рис. 7.17 – Гвинтова (а, б) та кульково-гвинтова (в) передача

*Пасові (ремінні) та тросові (або канатні) передачі* призначені для передачі обертального руху на деякі відстані і можуть використовуватися для перетворення обертального руху на поступальний і навпаки. Вони прості за конструкцією, порівняно дешеві, дозволяють передавати рух на відстані, плавно працюють. До їх недоліків відноситься непостійність передавальних чисел через ковзання в передачі, підвищені навантаження на опори через необхідність натягу гілок ремня (троса) та знижена точність.

Пасова або тросова передача обертального руху складається з ведучого шківів, паса (троса) та веденого шківів. Необхідною умовою роботи передачі є попередній натяг обох гілок ремня (троса), що має бути суттєво більшим передавальної окружної сили, для чого застосовують різні натяжні пристрої.



Рис. 7.18 – Зубчаторемінна передача



Рис. 7.19 – Ланцюгова передача

*Передача зубчастим ремнем* служить для передачі обертального руху на деяку відстань. При відносно малих габаритних розмірах вона відрізняється високою навантажувальною здатністю, плавністю та безшумністю в роботі, можливістю реалізації порівняно великих передавальних чисел, відсутністю ковзання і постійністю передавального числа, високим ККД та малими навантаженнями на вали та опори. До недоліків передачі слід віднести високі вимоги до

технології та якості виготовлення, а також можливість старіння ремня в процесі експлуатації.

Зубчасторемінна передача (рис. 7.18) складається з ведучого шківів, зубчастого ремня та веденого шківів. На поверхні шківів нарізані трапецеїдальні зубці, що входять у відповідні западини ремня. Таким чином, передача аналогічна ланцюговим і працює за принципом зачеплення, а до пасових відноситься за назвою і конструкцією тягового органу.

Схожим чином працює *ланцюгова передача* (рис. 7.19) – механізм у вигляді замкненого ланцюга, що рухається по зубчастих колесах (зірочках), закріплених на паралельних валах, передаючи обертовий рух між цими валами. Іноді застосовуються передачі з декількома веденими зірочками.

Ланцюгові передачі універсальні, прості та економічні. Порівняно із зубчастими передачами вони менш чутливі до неточностей розташування валів, ударних навантажень, допускають практично необмежені міжцентрові відстані, забезпечують більш просте компонування, більшу рухливість валів один щодо одного. Ланцюгова передача може бути зроблена майже безшумною в роботі, при набагато більшій технологічній простоті в порівнянні з безшумними косозубими шестернями. У порівнянні з ремінними передачами вони характеризуються такими перевагами: відсутність прослизання і сталість середнього передавального відношення; відсутність попереднього натягу та пов'язаних з ним додаткових навантажень на вали та підшипники; передача великої потужності як за високих, так і за низьких швидкостей; збереження задовільної працездатності при високих та низьких температурах; пристосування до будь-яких змін конструкції видаленням або додаванням ланок.

Розрахунок енергетичних параметрів приводу здійснюють у наступній послідовності: орієнтовний розрахунок потужності двигуна, попередній вибір двигуна, розрахунок оптимальних за швидкістю передавальних чисел для кожного модулю руху, остаточний вибір двигуна за умов оптимального часу відпрацювання циклу переміщення та найбільш компактної конструкції.

## 7.3 Маніпуляційний механізм

### 7.3.1 Загальна характеристика

Маніпулятор робота представляє собою багатоланковий просторовий механізм із розімкненим кінематичним ланцюгом, перша ланка якого (стійка) є основою робота, а остання несе робочий орган, який безпосередньо взаємодіє з

об'єктом маніпулювання. Система ланок маніпулятора структурно пов'язана в кінематичний ланцюг за допомогою обертальних чи поступальних кінематичних пар.

Під ланкою механізму розуміють деталь (або сукупність деталей із загальним законом руху), яка в процесі руху та взаємодії з іншими ланками залишається жорсткою, не змінюючи своїх розмірів та форми. Нерухома ланка механізму називається стійкою, або основою. З'єднання двох дотичних ланок, що допускає їх певний відносний рух, називають кінематичною парою, або, скорочено, парою. Якщо одна з крайніх ланок багатоланкового механізму закріплена до основи, а інша вільна, то такий механізм відносять до групи механізмів з відкритим, або розімкненим, кінематичним ланцюгом. Вивчати такі механізми зручно, коли вони представлені у вигляді схеми – структурної чи кінематичної.

Під структурною схемою механізму розуміють його графічне зображення із застосуванням умовних позначень ланок. Структурна схема містить інформацію про взаємне розташування ланок та тип утворених ними кінематичних пар. На відміну від структурної, кінематична схема містить додаткову інформацію про розміри ланок та величини взаємних переміщень, що необхідно для кінематичного аналізу та розрахунку механізму. Кінематична схема може бути виконана в плоскому зображенні або, для складних маніпуляторів, – в аксонометричному (див. табл. 3.2). Структурний та кінематичний аналіз маніпуляторів детально розглядається в навчальному курсі «Теорія механізмів і машин».

Основними характеристиками маніпуляторів є номінальна вантажопідйомність, кількість ступенів рухливості, величини та швидкості переміщення за ступенями рухливості, форма та розміри робочої зони, похибка позиціонування або обробки траєкторії.

*Вантажопідйомність робота* – найбільше значення маси об'єктів маніпулювання включно з масою робочого органу, які можуть переміщуватись «рукою» маніпулятора при заданих умовах. Для багаторукового робота вантажопідйомність визначають як суму вантажопідйомності усіх його «рук». Для деяких промислових роботів важливим показником є зусилля (або крутний момент), що розвивається виконавчим механізмом. До числа таких показників можна віднести зусилля затискання об'єкта маніпулювання захватним пристроєм, робоче зусилля «руки» робота уздовж її поздовжньої осі, крутний момент при ротації захватного пристрою.

За величиною вантажопідйомності роботи-маніпулятори розділяються на надлегкі (до 1 кг), легкі (1...10 кг), середні (20...200 кг), важкі (200...1000 кг), надважкі (вище 1000 кг). В даний час більшість промислових роботів-маніпуляторів має вантажопідйомність 5...80 кг.

Однією з найважливіших характеристик маніпулятора є *кількість ступенів рухливості*. Під ступенями рухливості (або ступенями вільності) розуміють

узагальнені координати, що однозначно визначають положення ланок маніпулятора у просторі. Кількість ступенів рухливості визначається кількістю рухливих ланок маніпулятора, а також кількістю та типом кінематичних пар, утворених цими ланками.

Ступені рухливості маніпулятора залежно від призначення та характеру рухів поділяють на переносні, орієнтуючі та координатні. Переносні, або регіональні ступені рухливості забезпечують переміщення робочого органу чи об'єкта маніпулювання в задане місце робочої зони; орієнтуючі, чи локальні, – їх орієнтацію; координатні, або глобальні, – переміщення робочого органу або об'єкта маніпулювання за межі робочої зони шляхом переміщення самого робота.

На рис. 7.20 наведений робот-маніпулятор з шістьма ступенями рухливості. При цьому ступені 1 – 3 є переносними, а ступені 4 – 6 – локальними. Координатних ступенів рухливості в наведеного робота немає, оскільки він встановлюється стаціонарно і не переміщується за межі робочої зони. Також можна зазначити, що ступені рухливості 1, 4 та 6 утворені обертальними кінематичними парами ротаційного типу (забезпечують повний оберт навколо своєї осі), а ступені 2, 3 та 5 – обертальними кінематичними парами типу згинання (неповний оберт).

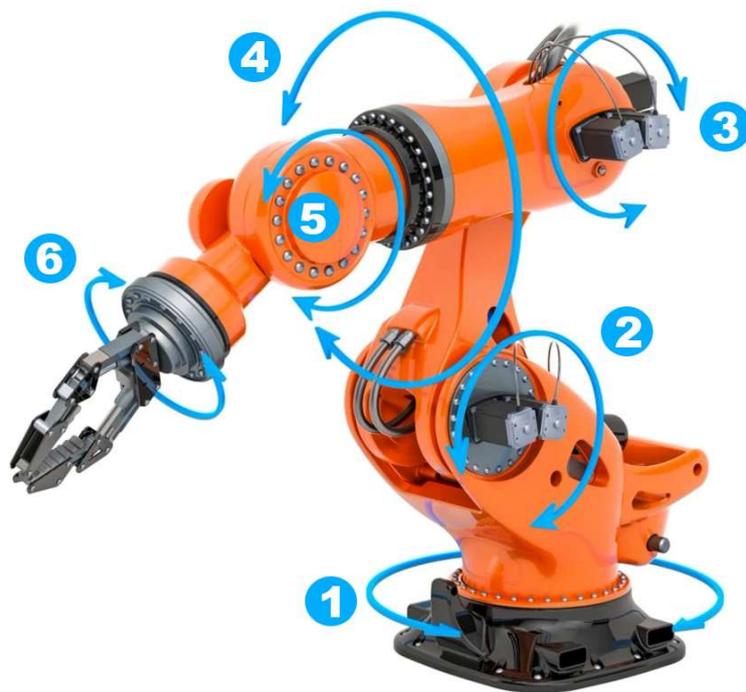


Рис. 7.20 – Робот-маніпулятор з шістьма ступенями рухливості

Число ступенів рухливості маніпулятора, тобто, сумарна кількість переносних, орієнтуючих та координатних ступенів рухливості дозволяє судити про технологічні можливості робота, його універсальність та конструктивну складність. Для обслуговування об'ємної робочої зони маніпулятор повинен мати не

менше трьох ступенів рухливості; при двох ступенях об'ємна робоча зона вироджується в поверхневу (плоску, циліндричну або сферичну); при одній – у лінійну (у вигляді прямої або дуги окружності).

Більшість моделей маніпуляторів мають по два-три переносних і по одному-три орієнтуючих ступеня рухливості.

Збільшення числа ступенів рухливості ускладнює маніпулятор та його керуючу систему, але покращує технологічні можливості робота, його універсальність, підвищує маневреність маніпулятора.

*Маневреність маніпулятора*, під якою розуміють число ступенів рухливості маніпуляційної системи при фіксованому положенні робочого органу, є важливою характеристикою, яка визначає можливість обходу «рукою» робота перешкод у робочій зоні та здатність маніпулятора до виконання складних операцій.

Неможливість чи обмеженість підходу робочого органу до об'єкту, що обслуговується (захопленої деталі, фарбованої поверхні тощо) з різних напрямків часто виключає або обмежує застосування роботів для виконання тих чи інших технологічних процесів, особливо за наявності перешкод у робочій зоні, тому у багатьох випадках вводять від одного до трьох додаткових орієнтуючих ступенів рухливості, підвищуючи маневреність маніпулятора.

Величини переміщення робочого органу за кожним ступенем рухливості характеризують *геометрію робочого простору* промислового робота, а також особливості руху та орієнтації переміщуваного об'єкту та визначаються механікою маніпулятора та можливостями привода. Величини переміщень по лінійних координатах задаються в метрах, по кутових – в градусах або радіанах. За величиною лінійного переміщення, або ходу робочого органу, розрізняють роботи-маніпулятори з малим (до 300 мм), середнім (300...1000 мм) та великим ходом (більше 1000 мм).

*Швидкості переміщень ланок* маніпулятора характеризують важливу якість роботів – швидкодію, від якої залежить час обслуговування технологічного обладнання. Зазвичай швидкості лінійних переміщень робочих органів маніпуляторів не перевищують 1,0...1,5 м/с, хоча є роботи зі швидкостями до 9 м/с. Швидкості кутових переміщень робочих органів переважно знаходяться в межах від 15 до 360 град/с (від 0,25 до 6,3 рад/с).

Для попереднього вибору роботів швидкодію можна оцінювати швидкістю основних лінійних переміщень робочих органів, при цьому розрізняють маніпулятори з малою (лінійна швидкість до 0,5 м/с), середньою (0,5...1,5 м/с) та високою швидкістю (більше 1 м/с).

*Робоча зона робота-маніпулятора* – це простір, в якому може знаходитись робочий орган при його функціонуванні. Вона характеризується своїми формою та об'ємом.

Форма, або вид робочої зони – просторова фігура, яка описується робочим органом робота при проходженні ним гранично досяжних положень. Вид робочої зони обумовлений призначенням робота та визначається кількістю ступенів рухливості маніпулятора, типом та взаємною орієнтацією кінематичних пар в просторі, відносними розмірами ланок маніпуляційної системи.

Об'єм робочої зони (або робочий об'єм) – це об'єм простору, в межах якого може переміщуватись робочий орган промислового робота при його функціонуванні, вимірюється в  $\text{м}^3$  та дозволяє судити про масштаб робочого простору, доступного роботу. За величиною обслуговуючого робочого об'єму всі роботи можна розділити на 5 класів: мікро-роботи (з робочим об'ємом до  $0,01 \text{ м}^3$ ), міні-роботи ( $0,01 \dots 0,1 \text{ м}^3$ ), малі ( $0,1 \dots 1 \text{ м}^3$ ), середні ( $1,0 \dots 10 \text{ м}^3$ ) та крупні (більше  $10 \text{ м}^3$ ) роботи.

Для мобільних роботів-маніпуляторів окрім робочої зони в якості характеристики розглядається також робочий простір, в якому може знаходитись виконавчий пристрій робота при його функціонуванні. Він визначається без врахування габаритних розмірів об'єкта маніпулювання. Іншою характеристикою простору функціонування робота є зона обслуговування, в якій робочий орган виконує свої функції у відповідності до призначення та встановленими значеннями його характеристик.

*Похибка позиціонування, або обробки траєкторії* – це відхилення фактичного положення (або траєкторії) робочого органу робота від заданого програмою при багатократному позиціонуванні (повторенні рухів), яке оцінюється в лінійних або кутових одиницях. Похибка позиціонування, або відпрацювання, траєкторії може розглядатися як в цілому для робочого органу (сумарна), так і окремих виконавчих механізмів робота.

В характеристиках промислових роботів точність позиціонування вказується в абсолютних одиницях, однак для порівняльної оцінки різних роботів та визначення їх типів з точки зору ступеня їх точності такий показник неприйнятний, оскільки не пов'язаний з геометричними параметрами робочої зони. Тому в основу визначення типу промислового робота за показником точності покладена відносна похибка позиціонування або обробки траєкторії.

Відносна похибка позиціонування – величина, яка характеризує точність роботів з цикловим та позиційним керуванням та дорівнює відношенню абсолютної похибки позиціонування до максимальної відстані від осі найближчої до основи робота кінематичної пари до границі робочої зони, виражається у відсотках.

Відносна похибка відпрацювання траєкторії – величина, яка характеризує точність роботів з контурним керуванням та дорівнює відношенню абсолютної похибки переміщення виконавчого механізму за траєкторією в межах робочої зони до максимальної відстані від осі найближчої до основи робота кінематичної пари до межі робочої зони, виражається у відсотках.

За відносною точністю позиціонування або відпрацювання траєкторії розрізняють чотири класи точності промислових роботів-маніпуляторів (табл. 7.5)

Табл. 7.5 – Класи точності промислових роботів-маніпуляторів

Відносна похибка позиціонування, або відпрацювання траєкторії, %	Клас точності
До 0,01	0
Від 0,01 до 0,05	1
Від 0,05 до 0,1	2
Більше 0,1	3

Окрім основних характеристик, які надають загальну характеристику роботів-маніпуляторів, розглядається ще низка додаткових, які дозволяють більш повно уявити їх можливості та властивості – кількість «рук», мобільність, об'єм пам'яті, спосіб програмування (метод навчання), кількість зовнішніх команд, габаритні розміри, займана площа, маса робота, виконання в залежності від умов зовнішнього середовища, час безвідмовної роботи, розрахунковий термін служби тощо.

### 7.3.2 Типові схеми маніпуляторів

Ступені рухливості ланок маніпулятора, що забезпечують перенесення об'єкта маніпулювання в просторі, реалізуються у вигляді поступальних або обертальних рухів відносно осей відповідних кінематичних пар. Величини переміщення ланок (координати їх положень) визначаються по відношенню до цих осей і вимірюються в лінійних (м) або кутових (рад., град.) одиницях. Таким чином, осі кінематичних пар маніпулятора є осями координат, за якими реалізуються (програмуються) рухи його ланок. У сукупності ці осі утворюють так звану базову систему координат, в якій доцільно описувати переносні рухи ланок маніпулятора.

Види кінематичних пар (поступальні або обертальні), використані в маніпуляторі, послідовність їх розташування по кінематичному ланцюгу та взаємне розташування осей сусідніх пар у просторі (перпендикулярне, паралельне або під довільним кутом) однозначно визначають базову систему координат і відповідну

їй структурну схему маніпулятора. У свою чергу, від виду базової системи координат залежать не тільки форма та обсяг робочої зони, а й можливості маніпуляційної системи робота.

Для короткого опису структурних схем маніпулятора, що характеризують базові системи координат, прийняті такі умовні позначення, які визначають вигляд і взаємне розташування у просторі кінематичних пар ланок: П, В – поступальна та обертальна кінематичні пари відповідно;  $\perp$ ,  $\parallel$  – перпендикулярне та паралельне взаємні розташування осей сусідніх кінематичних пар.

Для більшості роботів застосовують маніпуляційну систему з трьома переносними ступенями рухливості, утвореними трьома кінематичними парами. Структурні схеми таких маніпуляторів мають забезпечувати роботу об'ємну робочу зону. При використанні будь-якої комбінації видів пар ППП, ВПП, ВВП, ВВВ – така вимога виконується, проте за умови певного взаємного розташування осей пар.

З-поміж багатьох можливих структурних схем маніпуляторів широкое практичне застосування в конструкціях сучасних роботів знайшли п'ять схем (рис. 7.21) [28]:

1) Схема  $\text{П} \perp \text{П} \perp \text{П}$  (рис. 7.21, а) забезпечує реалізацію трьох поступальних ступенів рухливості у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Положення захватного пристрою в просторі визначається лінійними координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , що відповідає прямокутній, або декартовій, базовій системі координат. Форма робочої зони – паралелепіпед. Основні переваги схеми – простота програмування та можливість точного позиціонування робочого органу, що обумовлює застосування роботів з такими маніпуляційними системами для високоточних процесів збирання та обробки виробів. До недоліку слід віднести великий простір, що займає робот при відносно малому обсязі робочої зони.

2) Схема  $\text{В} \parallel \text{П} \perp \text{П}$  (рис. 7.21, б) реалізує одну обертальну та дві поступальні ступені рухливості. Положення захватного органу визначається кутовою координатою  $\alpha$  та двома лінійними –  $\rho$  та  $z$ , що утворюють базову циліндричну систему координат. Відповідна форма робочої зони – пустотілий циліндр або частина його. Порівняно з попередньою, схема з циліндричною базовою системою координат забезпечує значно більший обсяг робочої зони при однаковій величині поступальних переміщень. Недолік, властивий й попередній схемі, – у суттєвому збільшенні розмірів робота по вертикалі робочої зони, що при великих розмірах останньої призводить до збільшення ваги маніпулятора.

3) Схема  $\text{В} \perp \text{В} \perp \text{П}$  (рис. 7.21, в) забезпечує переміщення ланок по двох обертальних ступенях рухливості (ротація щодо вертикальної осі та згинання у вертикальній площині) і одній поступальній. Положення робочого органу у просторі визначається двома кутовими координатами  $\alpha$  і  $\beta$  і однією лінійною –  $\rho$ , що в сукупності утворюють сферичну, або полярну, базову систему координат.

Форма робочої зони – частина порожньої кулі. Істотна перевага схеми в тому, що при відносно малій висоті колони (перша ланка, що обертається у напрямку координати  $\alpha$ ) може бути реалізована значна висота робочої зони. Це значною мірою визначає універсальність застосування роботів з такою структурною схемою маніпуляційної системи.

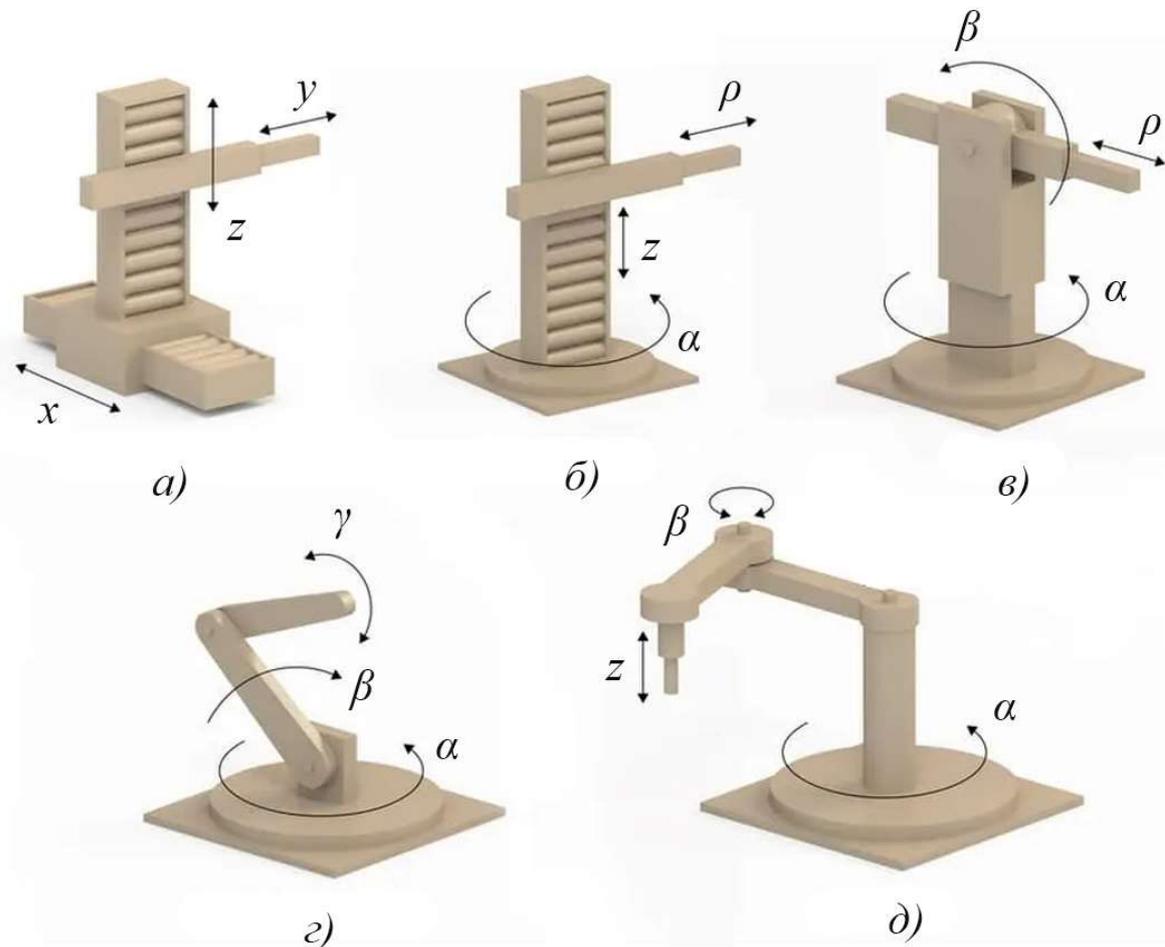


Рис. 7.21 – Типові схеми маніпуляторів [21]

4) Схема  $V \perp V \parallel V$  (рис. 7.21, г) реалізує лише обертальні ступені рухливості: одну, що створює ротацію першої ланки щодо вертикальної осі, і дві, що здійснюють згинання наступних ланок у вертикальній площині щодо двох паралельних горизонтальних осей. Положення робочого органу визначається трьома кутовими координатами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Система таких координат називається кутковою, або ангулярною сферичною, або складною сферичною, оскільки складна об'ємна фігура робочої зони може бути поділена на окремі елементи сферичних поверхонь з різними радіусами. Перевага схеми у великій компактності, недолік – у складності керування та реалізації конструкції маніпулятора через необхідність використання складних приводів, установки врівноважувальних пристроїв та ін.

5) Схема В || В || П (рис. 7.21, д) включає три кінематичні пари з паралельними осями, які реалізують дві обертальні (згинання в горизонтальній площині) і один поступальний ступені рухливості. Положення робочого органу визначають дві кутові координати  $\alpha$  і  $\beta$  та лінійна координата  $z$ . Система з таких координат, за якої складна об'ємна фігура робочої зони складається з окремих циліндричних елементів, називається ангулярною циліндричною, або складною циліндричною, базовою системою координат. Таку схему називають SCARA. Її перевага – в компактності та можливості точного позиціонування захватного пристрою в необхідних положеннях.

### 7.3.3 Особливості проєктування маніпуляторів

Проєктування маніпулятора потребує дослідження руху його ланок та багато в чому базується на методичних підходах теорії механізмів та машин. Проте складність та специфічність завдань, обумовлених особливостями функціонування роботів, призвели до відокремлення механіки маніпуляторів в окремий науково-технічний напрям.

Для вирішення задач механіки маніпуляторів застосовується складний та різноманітний математичний апарат (лінійна алгебра, векторне обчислення, теорія матриць, диференціальне обчислення тощо), а також електронно-обчислювальна техніка.

За традицією, яка встановилася в теорії механізмів і машин, механіку маніпуляторів можна розділити на статику, кінематику та динаміку. Кожен із цих розділів охоплює своє коло завдань та їх методику вирішення [28].

Статика маніпуляторів вивчає поведінку маніпуляційної системи при дії на неї статичних сил (головним чином, сил тяжіння). Методи статички використовуються також і при кінетостатичному розрахунку відповідно до принципу Даламбера, коли до сил тяжіння додаються сили інерції. Так, наприклад, проводиться силовий розрахунок елементів (модулів) маніпулятора, в результаті якого оцінюється міцність ланок, кінематичних пар, елементів передач та ін. Методи статички базуються на відомих з теоретичної механіки умовах рівноваги механічних систем.

До основних завдань статички маніпуляторів належать: знаходження величин реакцій у кінематичних парах, оцінка ступеня врівноваженості маніпулятора, наприклад, при підборі противаг та пружин з метою створення маніпулятора із зниженими навантаженнями на його приводи; визначення статичної податливості (або зворотної їй величини – жорсткості) ланок, залежної від рівня їх пружних деформацій під статичним навантаженням. Податливість маніпулятора

безпосередньо впливає на точність позиціонування робочого органу, що надає важливого значення вирішенню цього завдання.

Кінематика маніпуляторів розглядає геометричну сторону руху, коли об'єктом дослідження є величини переміщень ланок та окремих точок маніпуляційної системи, а також залежності цих переміщень від часу, тобто швидкості та прискорення. При кінематичному аналізі не враховуються маси елементів, що переміщуються, і характер діючих сил.

Як вихідна база для кінематичного аналізу служить кінематична схема маніпулятора. Методами кінематики визначаються координати положення ланок в одній системі координат при завданні їх в іншій системі, величини переміщення точок або ланок в результаті переміщень інших ланок, кутові швидкості та прискорення ланок або лінійні швидкості та прискорення точок за відомими законами переміщення частини ланок.

Постановка та вирішення проблем кінематики здійснюється у вигляді прямої та зворотної задач, для з'ясування сутності яких слід подати маніпулятор як сукупність, з одного боку, кількох ведучих ланок, з іншого – одного веденого елемента – робочого органу, закріпленого на кінцевій ланці. При цьому між ними існує певна функціональна залежність. Положення, швидкість та прискорення робочого органу у кожний момент часу визначаються взаємним положенням ланок, а також законами їх переміщення у часі та за ступенями рухливості.

Пряма задача кінематики може мати такі формулювання: за заданими положеннями ланок визначити положення робочого органу; за заданими характеристиками переміщення ланок за ступенями рухливості визначити характер руху робочого органу.

Зворотна задача кінематики формулюється протилежним чином: за заданим положенням робочого органу знайти відповідні положення ланок; для заданого характеру руху робочого органу встановити відповідні закони переміщення ланок за ступенями рухливості.

Іншими словами, при вирішенні прямої задачі за відомими кінематичними характеристиками приводів оцінюється поведінка робочого органу, при вирішенні зворотної – для заданої кінематики робочого органу розраховується кінематика приводів.

Динаміка маніпуляторів вивчає рух ланок з урахуванням величин їх мас і діючих на них сил. Основне завдання динаміки – встановлення законів цього руху, які виражаються системою диференціальних рівнянь, що пов'язують активно діючі сили приводів ланок із силами інерції та деякими іншими силами (тяжіння, тертя), прикладеними до ланок. Такі рівняння прийнято називати рівняннями руху або рівняннями динаміки маніпуляторів.

Оскільки до рівнянь руху входять усі основні параметри (розміри ланок, їх маси, навантаження та ін.), що характеризують маніпулятор, рівняння є математичною моделлю маніпуляційної системи. Розробка таких моделей має велике значення, оскільки за допомогою ЕОМ вони можуть бути вивчені в різних умовах функціонування, що виключає коштовні дослідження на фізичних моделях або натурних зразках маніпуляторів.

Дослідження динаміки маніпуляційної системи має особливе значення для проєктування маніпулятора, розробки керуючої системи та здійснюється у вигляді розв'язання прямої та зворотної задач динаміки, за своєю постановкою аналогічних відповідним задачам кінематики.

При вирішенні прямої задачі динаміки за заданими законами руху ланок встановлюються відповідні закони зміни в часі сил приводів, при вирішенні зворотної задачі за відомими (заданими) законами дії сил приводів визначається характер руху ланок. Метою динамічного аналізу може бути визначення величин динамічних сил, необхідних для здійснення розрахунків на міцність елементів маніпуляторів.

Детальні методики механіки маніпуляторів наведені у спеціалізованих навчальних посібниках та монографіях (див., наприклад, [29, 33]).

Після загального схематичного розрахунку маніпулятора переходять до другого етапу – його конструктивного виконання. Якщо на етапі аналізу схем маніпулятора використовувалось поняття «ланки» як жорсткого елемента, що не змінює своїх розмірів та форми в процесі руху та взаємодії з іншими ланками, на етапі конструювання оперують поняттям «вузлів» маніпулятора. Такі вузли відповідають ланкам, але можуть мати досить складну будову та містити, окрім жорстких несучих елементів, низку інших компонентів реальної конструкції: частини приводів, складові елементів кінематичних пар; гальмівні та демпфуючі пристрої тощо. Для конструктивного втілення маніпулятора використовуються методи деталей машин, а також гідро-, пневмо- та електроприводу.

Конкретна будова маніпулятора визначається великою кількістю факторів: вантажопідйомністю, швидкістю та величиною переміщень, типом приводу, вимогами та умовами експлуатації та іншими, але перш за все – прийнятою конфігурацією маніпуляційної системи, тобто, його базовою системою координат. Конструктивний вигляд маніпулятора залежить також від особливостей компоновальних рішень та конструкцій основних складових частин (вузлів) маніпулятора.

У загальному вигляді до складу маніпулятора входять:

а) несучі елементи, що забезпечують конструктивні жорсткість та міцність та служать базою розміщення на них інших складових вузла;

- б) сукупність деталей, що утворюють кінематичні пари (цапфи, осі, підшипники, напрямні тощо);
- в) пристрої, що забезпечують рух за ступенями рухливості та включають елементи приводів маніпулятора (двигуни, трансмісії, лінії підведення енергоносія тощо);
- г) елементи, що обмежують та регулюють величини та швидкості переміщень (упори, амортизатори, гальмівні пристрої тощо);
- д) пристрої (датчики) зворотного зв'язку;
- е) інші пристрої – запобіжні, захисні, мастильні та ін.

У промисловому роботобудуванні вузли маніпуляторів часто оформляються у вигляді окремих агрегатно-складальних одиниць, що мають уніфіковані приєднувальні місця для стикування з іншими вузлами маніпулятора. Такі автономні універсальні агрегатні блоки, що дозволяють шляхом відповідного їх поєднання та компоновки збирати широкий діапазон різних конструкцій промислових роботів відповідно до вимог техпроцесів, прийнято називати модулями, а маніпулятори, складені з них, – маніпуляторами модульного виконання.

Залежно від функціонального призначення, а також від виду реалізованого руху можна виділити такі основні різновиди вузлів (див. рис. 7.2):

*«Рука»* – один із найскладніших вузлів, подібний до своїх функцій та структури з рукою людини. За структурою «руки» бувають одно- та багатоланкові. Перші мають один (поступальний) або два (поступальний та обертальний) ступеня рухливості. Другі мають кілька ступенів рухливості та містять ланки, що забезпечують переносні рухи («плече», «передпліччя», «лікоть»), орієнтуючий пристрій («зап'ястя») та робочий орган («кисть», яка може мати «долоню» та «пальці») у вигляді захватного пристрою або технологічного інструменту. Переважно багатоланкові «руки» виконуються у вигляді дволанкових з двома переносними обертальними (згини) ступенями рухливості.

*Каретка* – вузол, що переміщається прямолінійно у вертикальному або горизонтальному напрямку по жорстким напрямним суміжного з ним вузла – основи, колони, іншої каретки.

*Колона або платформа* – вузли, що забезпечують обертальний рух щодо вертикальної осі приєднаних до них інших вузлів маніпулятора.

*Блок кутового переміщення, або хитання* (каретка обертального руху), – вузол, що забезпечує обертальний, як правило, неповноповоротний рух щодо будь-якої осі (зазвичай горизонтальної) приєданого до нього іншого вузла маніпулятора (наприклад, «руки» щодо колони чи каретки).

*Основа* – опорна конструкція, на якій розміщуються вузли та системи маніпулятора, може бути нерухомою або рухомою. В останньому випадку основа

оснащується пристроєм пересування, що реалізує одну або дві (дуже рідко – три) координатні ступені рухливості маніпулятора.

#### 7.3.4 Робочі органи маніпуляторів

Робочий орган робота – це складова частина маніпулятора, призначена для безпосереднього захвату та утримання об'єктів, що переміщуються, у просторі, а також виконання різноманітних технологічних, спеціальних та досліджуваних операцій. Робочі органи є важливими елементами роботів, які багато в чому визначають їх універсальність та технологічні можливості. До них відносяться захватні пристрої, технологічні інструменти та спеціальні пристрої.

В залежності від призначення робота, вирішуваного ним класу задач та особливостей виконуваного технологічного процесу маніпулятори обладнують тими чи іншими робочими органами.

**Захватні пристрої**, які називають також захватами, призначені для захвату об'єктів маніпулювання, надійного їх утримання в процесі зміни просторового положення, а також забезпечення їх установки із заданою точністю відносно базових поверхонь.

**Технологічні інструменти** встановлюються на маніпулятори роботів для безпосереднього виконання ними різноманітних технологічних операцій – контактного та електродугового зварювання, нанесення покриттів та фарби, складання та розбирання, паяння та клепки, виробництва друкованих плат тощо. В якості технологічних інструментів зазвичай використовують відомі технологічні пристрої, додатково оснащені системами автоматизації процесів та елементами кріплення до «руки» або «кисті» робота.

#### 7.3.5 Класифікація та проектування захватних пристроїв

Принцип дії захватних пристроїв та їх конструктивне виконання досить різноманітні та обумовлені формою, видом, маркою матеріалу, масою, розмірами та фізичними властивостями переміщуваних об'єктів, а також типом обслуговуючого технологічного обладнання.

Застосовуються як універсальні захватні пристрої, призначені для утримання різних за розмірами, конфігурацією та масою об'єктів, так і спеціальні, призначені для утримання визначеного типу деталей.

Незалежно від конструктивного виконання до захватних пристроїв висувається низка загальних вимог: вони мають забезпечити надійність захоплення та утримання об'єктів, швидкодію, стабільність базування, мати достатні міцність та жорсткість при мінімальних розмірах та масі, не повинні допускати руйнування або пошкодження поверхні об'єктів маніпулювання.

Особливу увагу при проектуванні слід звертати на кріплення захватного пристрою до «руки» робота, яке має бути зручним, надійним, а за необхідності – і швидкозмінним. Як правило, роботи, особливо промислові, укомплектовані набором змінних захватних пристроїв, які можна замінювати в залежності від конкретних технологічних умов, а також встановлювати на типові захватні пристрої змінні елементи (губки, присоси, підхвати тощо), при цьому їх заміна в обґрунтованих випадках виконується автоматично за допомогою самого робота.

У зв'язку із різноманітністю ознак, які характеризують конструктивні різновиди захватних пристроїв та технологічні особливості їх застосування, побудувати єдину класифікацію за ієрархічним принципом неможливо. Тому захватні пристрої підрозділяються у відповідності із окремими класифікаційними ознаками: за характером захвату вантажу, принципом дії, характером базування, кількістю робочих позицій, видом керування, характером кріплення до «руки» маніпулятора тощо [28].

*За характером взаємодії з об'єктом* захватні пристрої підрозділяються на п'ять груп:

1. Підтримуючі, які підхоплюють об'єкт за нижню поверхню, виступи або отвори без його затиснення. До них відносяться гаки, вили, петлі, штирі та інші подібні пристрої.

2. Утримуючі, які представляють собою ємності типу ковшів або совка та призначені для утримання та переміщення в них дрібних насипних деталей, сипучих та рідких матеріалів. Зазвичай утримуючі захватні пристрої неприводні, а завантаження їх матеріалом відбувається насипкою або заливкою.

3. Притягувальні, які утримують об'єкт завдяки використанню різних фізичних ефектів, наприклад, магнітного або вакуумного притягування. До цієї групи відносяться вакуумні та магнітні захватні пристрої, а також пристрої, які використовують електростатичне притягування, ефект адгезії тощо.

4. Затискні, які захоплюють та утримують об'єкт кінематичним впливом робочих елементів (губок, кліщів, пальців тощо) за рахунок сил тертя або комбінації сил тертя та запираючих зусиль. Затискні, або схоплюючі захватні пристрої, які зазвичай називаються схватами, відносять до пристроїв активного типу, які можуть бути як механічними, так і з еластичними камерами.

5. Зачерпуючі, які захоплюють насипні, штучні або сипучі матеріали та утримують їх в ємності, що утворена щелепами, які замикаються. Такі пристрої зазвичай називають грейферами.

*За принципом дії* захватні пристрої підрозділяють на п'ять груп:

1. Механічні, які захоплюють та утримують об'єкт за допомогою підтримуючих, утримуючих, затискних або зачерпуючих механічних пристроїв та, в свою чергу, підрозділяються на неприводні (рис. 7.22) та приводні (рис. 7.23). В промислових роботах переважно застосовують приводні механічні захватні пристрої, в яких використовуються пневмо-, гідро- та електроприводи.

За конструктивними особливостями найбільш розповсюджені затискні захватні пристрої, або схвати, які розділяються на низку груп – з пружними силовими елементами та стопорними механізмами (неприводні), з пружними губками, плоскопаралельним та обертальним рухами губок (приводні).

В залежності від кількості губок, якими охоплюється об'єкт маніпулювання, механічні захватні пристрої поділяються на дво- та багатопальцеві (рис. 7.24).



Рис. 7.22 – Неприводний механічний захват



Рис. 7.23 – Механічний захват важільного типу з електроприводом

2. З еластичними камерами (рис. 7.25), які утримують об'єкт за допомогою камер різної конструкції зміною їх форми та розмірів за допомогою подачі у внутрішні порожнини стисненого повітря або рідини під тиском або використання інших фізичних ефектів.



Рис. 7.24 – Трипальцевий механічний адаптивний захват



Рис. 7.25 – Захват з пневматичними губками-пальцями

3. Вакуумні (рис. 7.26), які притягують та утримують об'єкт силою атмосферного тиску повітря за рахунок створення розрідження у вакуумній камері, що притискається до поверхні об'єкту.

Вакуумні захватні пристрої використовуються переважно для перенесення деталей з плоскими рівними поверхнями та конструктивно виконуються у вигляді камер-присосів, в яких створюється розрідження. Як правило, для захоплення об'єктів застосовують вакуумні захватні пристрої з декількома камерами на рамі. Захват та утримання об'єктів забезпечуються силою атмосферного тиску за рахунок створення в камері, притиснутій до поверхні деталі, вакууму.



Рис. 7.26 – Вакуумний захват



Рис. 7.27 – Електромагнітний захват

До переваг вакуумних захватних пристроїв слід віднести зручність захоплення та вивільнення деталей, збереження точних та добре оброблених поверхонь, а також універсальність у порівнянні з магнітними захватними пристроями, тобто можливість утримання об'єктів з матеріалів з будь-якими фізичними властивостями.

До недоліків відносять обмежену підйомну силу, знижену точність базування через еластичність камер, інерційність, пов'язану з деякою тривалістю забезпечення необхідного вакууму, доволі складну конструкцію для вакуумування, необхідність забезпечення герметичності з'єднань та самого захватного пристрою.

За способом створення вакууму в системі вакуумні захватні пристрої поділяють на безнасосні, насосні та ежекторні.

Безнасосні вакуумні захватні пристрої застосовують для захвату деталей невеликої маси при невисокій точності їх установки. Вони прості за конструкцією, не потребують спеціальних систем вакуумування та керуючих сигналів, але мають знижені вантажопідйомність та надійність утримання об'єкту. Крім того, вони потребують прикладання зусиль для вивільнення вантажу, який переноситься. Вакуум в камері таких захватних пристроїв створюється за рахунок зміни внутрішнього об'єму при їх деформуванні.

Насосні захватні пристрої мають підвищену надійність та підйомне зусилля та використовуються для захвату деталей великої маси та розмірів. Вони більш складні, потребують спеціальних вакуумуючих та керуючих пристроїв, мають інерційність у зв'язку із необхідністю відкачування достатньо великих об'ємів повітря вакуумної системи. Для створення вакууму в насосних захватних пристроях необхідне спеціальне доволі складне обладнання – вакуумні насоси, апаратура керування тощо, тому насосні захватні пристрої нечасто використовуються в промислових роботах.

Доволі широке застосування в промислових роботах знайшли прості за конструкцією та зручні в експлуатації ежекторні захватні пристрої, які не потребують спеціального вакуумного обладнання. Розрідження в таких захватних пристроях створюється спеціальним ежекторним пристроєм, який використовує енергію стисненого повітря. При цьому може використовуватися пневмомережа тиском 0,5 ... 0,6 МПа.

4. Магнітні (рис. 7.27), які притягують об'єкт завдяки феромагнітним властивостям деяких матеріалів (наприклад, сталі, чавуну), тобто їх здатності притягуватись до магнітів.

Захват та утримання об'єктів забезпечуються електромагнітним зусиллям, яке створюється постійними або електричними магнітами. Такі пристрої мають велику силу притягання на одиницю площі, високу точність позиціонування за рахунок жорсткого сердечника, швидкість захоплення та вивільнення деталей, просту конструкцію. До недоліків магнітних захватних пристроїв відносять обмеженість матеріалів деталей, з якими вони можуть працювати, нагрівання конструкцій від котушок, наявність залишкового магнетизму, що призводить до забруднення поверхні деталі та захватного пристрою, а також створює складнощі при вивільненні деталі.

В конструкціях магнітних захватних пристроїв переважно застосовують електромагніти; використання постійних магнітів спрощує конструкцію, однак потребує оснащення пристроями для фіксації деталі на позиції розвантаження або спеціальними скидачами.

5. Комбіновані, які утримують об'єкт за рахунок використання в конструкції двох або більше принципів дії. До цієї групи відносять, зокрема, магніто-вакуумні, вакуумно-механічні, магнітно-механічні та інші.

*За видом керування* захватні пристрої розділяють на чотири групи:

1. Некеровані, які захоплюють об'єкт без впливу керуючих сигналів. До цих пристроїв відносять постійні магніти або вакуумні захватні пристрої без примусового відкачування повітря. Для зняття об'єкту в цьому випадку необхідне прикладання додаткового зусилля, більшого, ніж зусилля утримання.

2. Командні, які керуються лише командами на захоплення або відпускання об'єкту. До цієї групи відносять захвати зі стопорними пристроями та губками, які розтискаються та затискаються при взаємодії з об'єктами маніпулювання або елементами зовнішнього обладнання.

3. Жорстко програмовані, які керуються системою програмного керування промислового робота. Величина переміщення губок, взаємне розташування елементів та зусилля захвату в таких пристроях змінюються у відповідності до програми.

4. Адаптивні, гнучко програмовані захватні пристрої, оснащені інформаційно-вимірювальними системами, які дозволяють захватним пристроям пристосовуватись до виду та розташування об'єкта маніпулювання.

*За характером базування об'єкта* захватні пристрої розділяють на п'ять груп:

1. Які не забезпечують базування або фіксації об'єкта та застосовуються рідко.

2. Фіксуючі, які зберігають положення деталі в момент захвату.

3. Базуючі, які забезпечують визначене положення базових поверхонь захоплюваного об'єкта відносно захватного пристрою, що характерно для захоплюючих та підтримуючих пристроїв.

4. Центруючі, при яких створюється визначене положення осі або площини симетрії захоплюваного об'єкта відносно захватного пристрою. До них відносяться механічні пристрої, оснащені кінематично пов'язаними робочими елементами, наприклад, губками у вигляді призм та ін., а також деякі пристрої з еластичними камерами.

5. Здатні до перетворення, які дозволяють змінювати положення утримуючої деталі завдяки керованим рухам робочих елементів захватного пристрою.

*За кількістю робочих позицій* захватні пристрої підрозділяються на дві групи:

1. Однопозиційні, які дозволяють обслуговувати лише одну позицію технологічного обладнання;
2. Багатопозиційні, які забезпечують обслуговування одночасно декількох позицій технологічного обладнання.

*За характером кріплення до «руки» маніпулятора* захватні пристрої підрозділяють на чотири групи:

1. Незмінні, які є невід'ємною частиною конструкції маніпулятора.
2. Змінні, виконані у вигляді самостійних вузлів, що мають базові поверхні для установки їх на промислових роботах та кріплення яких може здійснюватись різними з'єднаннями (фланцевим, болтовим, гвинтовим), не передбачають швидкої заміни.
3. Швидкозмінні, які дозволяють здійснювати їх швидке зняття або встановлення, кріплення яких здійснюється за допомогою байонетного, кулачкового або клинового з'єднання.
4. Автоматично змінювані, які забезпечують можливість автоматичного зняття та установки захватного пристрою зазвичай самим роботом.

*Механічні захватні пристрої*, які найбільш часто використовуються в промислових роботах, мають різноманітні конструктивні виконання. В загальному вигляді розрахунок механічних захватних пристроїв при проєктуванні має наступну послідовність:

- встановлення та аналіз вихідних даних до розрахунку;
- вибір принципу дії або виду захватного пристрою;
- складання розрахункової схеми;
- кінематичний аналіз схеми та визначення сил, діючих на елементи захватного пристрою;
- встановлення основних розмірів захватного пристрою (компонування);
- визначення активних сил приводу, які забезпечують надійне захоплення та утримання об'єкту;
- вибір та розрахунок приводу;
- побудова профілю центруючих поверхонь губок або інших центруючих пристроїв (за необхідності);

- виконання перевірочних розрахунків на міцність елементів захватного пристрою;
- перевірка на відсутність пошкоджень поверхонь губок захватного пристрою та об'єкту.

Вихідними даними для виконання розрахунку є сфера застосування захватного пристрою, характеристика базового промислового робота, продуктивність, швидкість маніпулювання, точність зупинки об'єкта, характеристики захоплюваного об'єкту (розміри, форма, маса, матеріал тощо), спеціальні вимоги, які необхідно виконати при захопленні, утриманні та вивільненні об'єкту.

Умовою надійного утримання об'єкта *захватними пристроями притягувального типу* (вакуумного та електромагнітного) є співвідношення:

$$P = kN$$

де  $P$  – підйомна сила (сила тяжіння) вакуумного або електромагнітного захватного пристрою;  $N$  – сила впливу на захватний пристрій об'єкта, яка зазвичай дорівнює силі тяжіння захоплюваного об'єкту;  $k$  – коефіцієнт запасу утримання об'єкту, який приймається в діапазоні 1,5...2,0.

Значення підйомної сили  $P$  для вакуумного або електромагнітного захватного пристрою визначаються відомими формулами в залежності від їх конструктивних параметрів. Значення цієї сили прямо пропорційне площі вакуумних камер для вакуумних захватних пристроїв та зворотно пропорційне площі дотику об'єкту з полюсами електромагніту для електромагнітних захватних пристроїв.

Для притягувальних захватних пристроїв (вакуумних та електромагнітних) необхідна перевірка на можливість утримання об'єкту маніпулювання при зміні його просторового положення.

#### 7.4. Механізм пересування

Механізм пересування є основним в мобільних роботах та може бути додатковим – в роботах-маніпуляторах.

В залежності від типу опорних елементів механізми пересування можуть бути розділені на колісні, гусеничні, крокуючі, на електромагнітній, рідинній або повітряній подушках (рис. 7.28).

Надання роботам-маніпуляторам мобільності за рахунок додаткових координатних ступенів рухливості збільшує їх робочу зону, підвищує універсальність, розширює технологічні можливості. Такі роботи можуть обслуговувати кілька технологічних машин, виконуючи, крім маніпулювання об'єктами, їх

транспортування. Це сприяє підвищенню ефективності роботів-маніпуляторів, але при цьому ускладнюється конструкція їх механічної частини та пристроїв керування, підвищується їх загальна вартість.

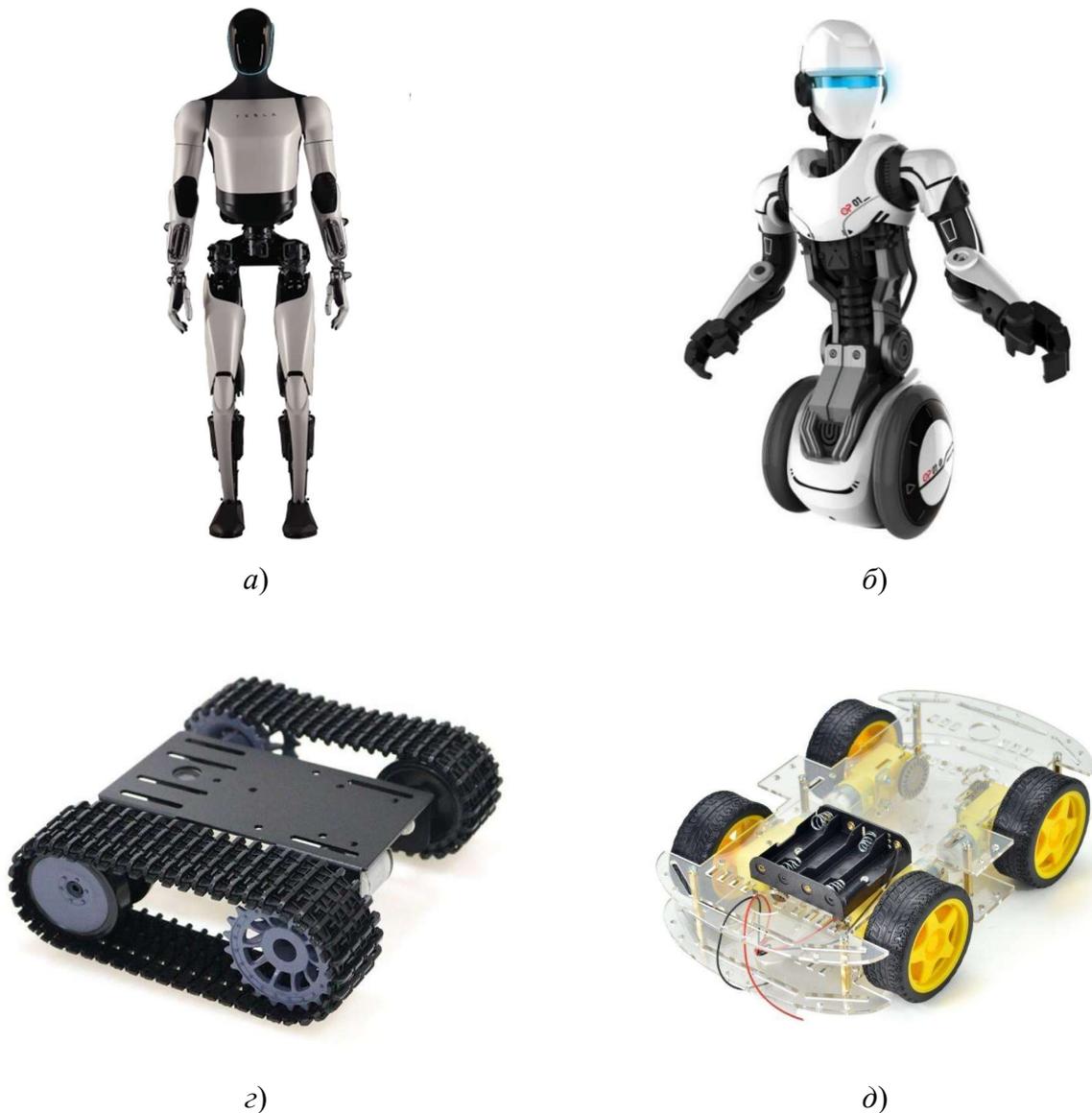


Рис. 7.28 – Варіанти механізмів пересування в залежності від типу опорних елементів:  
а) крокуючий (робот-андроїд на двох ногах Tesla Optimus);  
б) двоколісний (робот-андроїд Silverlit YCOO O.P. One);  
в) гусеничне шасі; г) чотириколісне шасі

Переміщення *роботів-маніпуляторів* у більшості випадків здійснюється по одному напрямку за прямолінійною траєкторією. Для цього робот-маніпулятор встановлюється на спеціальну каретку або візок, що переміщується по напрямних.

Вибір типу напрямних та виду приводного пристрою для каретки залежить насамперед від величин необхідних переміщень по координатних ступенях

рухливості, які підрозділяються на малі – до 0,2 м, середні – до 1-2 м та великі – до кількох десятків метрів.

В якості напрямних для великих переміщень найчастіше використовуються підлогові та підвісні (на висоті 2-3 м) рейки з різною формою поперечного перерізу (рис. 7.29). При цьому приводи ходових коліс від електро- та гідродвигунів встановлюються на каретку.



Рис. 7.29 – Робот-маніпулятор на візку, що переміщується по прямолінійних рейках

При малих та середніх величинах переміщень використовуються жорсткі, з добре обробленою поверхнею напрямні типу «ластівчин хвіст» (Dovetail Slide) (рис. 7.30), трубчастої форми, кулькові чи роликові, тобто такі, що знаходять застосування, наприклад, у металорізальних верстатах. Як приводні пристрої у цих випадках застосовуються силові пневмо- або гідроциліндри, у тому числі телескопічні, приводи з рейковими зубчастими (рис. 7.31) або гвинтовими парами, ланцюговою передачею. Для малих переміщень з високою необхідною кінематичною точністю можуть бути рекомендовані передавальні пристрої з хвильовими різьбовими передачами гвинт-гайка.



Рис. 7.30 – Напрямні типу «ластівчин хвіст»



Рис. 7.31 – Рейкова зубчаста передача для забезпечення поступального руху

При малих і середніх переміщеннях використовується компоновка з так званим зовнішнім розташуванням приводних пристроїв, коли основні елементи приводу (циліндр, двигун із редуктором) закріплюються на нерухомій основі поза кареткою, а до рами каретки приєднуються такі виконавчі елементи, як шток циліндра, рейка, гвинт, ведена зірочка та ін. При такому компонованні спрощується конструкція каретки, зменшуються її маса та габаритні розміри.

Напрямні мають бути досить жорсткими і точно розташованими по осі руху каретки, зазори між поверхнями напрямних та контактуючими з ними елементами каретки повинні бути мінімально можливими. Недотримання цих вимог знижує точність позиціонування захватного пристрою при переміщенні в робочому просторі, погіршує динамічні показники роботи.

В деяких випадках напрямні мають криволінійні траєкторії або складаються з декількох прямолінійних ділянок, з'єднаних одна з одною під деяким кутом (часто – 90 градусів). В цих випадках конструкція механізму пересування дещо ускладнюється за рахунок механізмів повороту опорних коліс.

*Мобільні роботи* у більшості випадків пересуваються по довільних траєкторіях та мають здатність огинання кутів і перешкод. Рухи по криволінійних траєкторіях вимагають наявності кермового механізму, що суттєво ускладнює конструкцію пристрою пересування. У таких випадках для забезпечення необхідної маневреності в колісних системах практично використовуються три групи методів.

Перша з них полягає в керуванні поворотом одного або двох передніх (іноді задніх) коліс, як це здійснюється в автомобілях, при цьому одне чи два інших колеса некеровані, а використовуються лише для руху платформи вперед або назад. Цей метод не забезпечує достатньої маневреності, особливо в умовах захищеності та обмеженості робочого простору, вважається важким для керування та застосовується досить рідко.

Друга група пристроїв пересування – з довільним незалежним керуванням поворотом кожного колеса ліворуч або праворуч – набула широкого поширення в сучасних роботах завдяки хорошій маневреності та відносно нескладній конструкції (рис. 7.32).

Пристрої пересування третьої групи мають високу маневреність та здатність переміщуватись у різних напрямках за рахунок незалежного приводу усіх коліс. Такі пристрої мають низку різновидів.

На рис. 7.33 наведено модифікацію з двома незалежними неповоротними колесами. При обертанні обох коліс в одному напрямку з однаковою швидкістю платформа здійснює прямолінійний рух. Обертання коліс з однаковими швидкостями, але у протилежних напрямках забезпечує обертання щодо центру, розташованому посередині між приводними колесами. Якщо ж колеса обертаються в одному напрямку, але з різними швидкостями, то платформа буде рухатися по

дузі кола, радіус якого залежить від співвідношення величин швидкостей коліс, убік колеса, яке обертається із меншою швидкістю. І, нарешті, при обертанні коліс у протилежних напрямках з різними швидкостями платформа повертається щодо будь-якої точки, розташованої на лінії між двома ведучими колесами.



Рис. 7.32 – Мобільні платформи з усіма поворотними колесами від Fdata Robot

На рис. 7.28, д наведено мобільну платформу с чотирма незалежними не-поворотними колесами, в якій поворот також здійснюється за рахунок різних швидкостей коліс.

На рис. 7.34 наведені модифікації такого пристрою пересування з трьома та чотирма незалежними колесами, на колі обода кожного з яких встановлені не-приводні ролики [10]. Колеса можуть обертатися у прямому чи зворотному напрямках щодо своєї осі, а поєднання напрямків їх обертання забезпечує маневрування платформи, при цьому наявність не-приводних роликів на колах коліс полегшує їх бічні (поперечні) переміщення, знижує втрати на тертя та знос. Можливі переміщення для триколісної системи наведені на рис. 7.35.

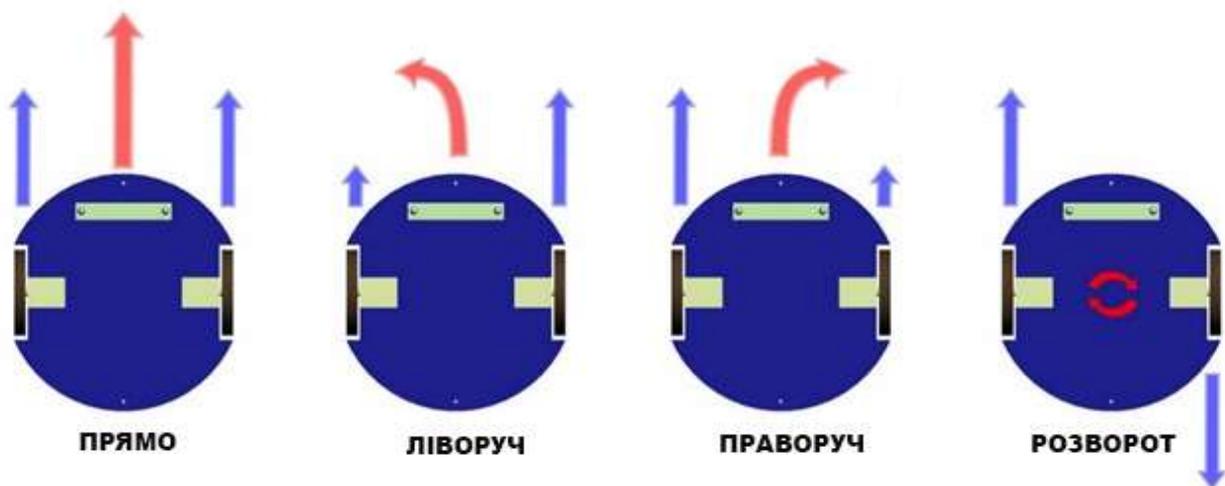


Рис. 7.33 – Пристрій пересування з двома незалежними колесами [7]

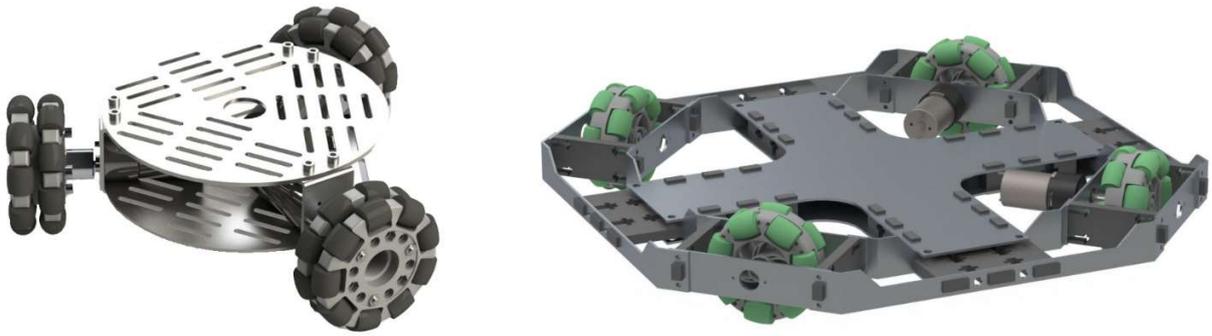


Рис. 7.34 – Пристрої пересування з трьома та чотирма незалежними колесами

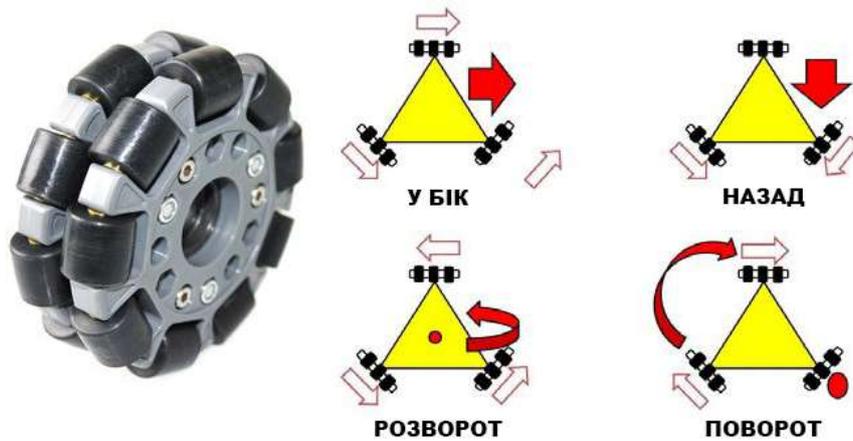


Рис. 7.35 – Можливі напрямки руху пристрою пересування з трьома незалежними колесами

Окремим напрямом є розробка мобільних шасі колісного типу, здатних переміщуватись по нерівній поверхні, такій як скеляста місцевість або сходи (рис. 7.36, 7.37).



Рис. 7.36 – Мобільний робот SunFounder GalaxyRVR Mars Rover



Рис. 7.37 – Мобільний робот MINDS-i 4X4 Robot

Колісний мобільний робот, наведений на рис. 7.37, складається з двох однакових секцій з парою коліс відносно великого діаметру. Візки поєднані один з одним за допомогою гнучкого зв'язку. При зустрічі з перешкодою, висота якої може бути більше діаметру коліс, візки послідовно, один за одним, видираються на уступ. Це відбувається наступним чином. Колеса першого візка, досягнувши уступу, упираються в нього та продовжують обертатися. За рахунок сили тертя коліс о вертикальну стінку уступу, а також під напором другої секції перший візок починає підійматися. В результаті перший візок підіймається все вище та зрештою досягає вершини уступу, після чого починає захоплювати за собою другий візок.

Окрім колісних візків, в мобільних роботах цього типу застосовують гусеничні, крокуючі апарати, а також візки з присосками.

Дуже складну науково-практичну задачу складає проектування крокуючих роботів (рис. 7.28, а). В процесі «ходьби» таких роботів кожна з ніг може знаходитись у двох станах: опорному положенні – коли нога торкається поверхні та слугує опорою для всього корпусу, та вільному положенні – коли нога знаходиться над поверхнею та «готується» до виконання опорних функцій на наступному кроці. В процесі ходьби ноги крокуючого робота поперемінно займають то одне, то інше положення. Послідовність чергувань ніг за один період називається циклом ходьби, а відстань, яку проходить робот за один цикл, – кроком.

Для збереження крокуючим роботом статичної стійкості необхідно, аби в кожний момент часу в одному положенні знаходилися не менше трьох ніг. Тому число шість є мінімальною кількістю ніг, за допомогою якої робот може підтримувати статичну стійкість без примусового зміщення центру ваги після підняття або опускання будь-якої ноги.

Для чотириногих роботів статична стійкість забезпечується тим, що в кожний момент часу лише одна нога знаходиться у повітрі, тобто у вільному положенні.

Реалізація прямоходячих роботів на двох ногах представляє собою найскладнішу задачу, яка вирішується за допомогою вивчення особливостей ходьби людини. При переміщенні на двох ногах необхідне виконання двох умов. По-перше, при ходьбі крокуючий робот має протягом певного часу спиратись лише на одну ногу, зберігаючи рівновагу та витримуючи повну вагу робота. По-друге, алгоритми керування стопою, колінним та стегновим суглобами мають забезпечувати не тільки рівновагу робота на одній нозі, а ще й енергійне виконання кроку. В результаті як крокуючий механізм робота, так і програма керування ним є дуже складними [26].

Конструктивне виконання, складність і точність позиціонування пристроїв пересування мобільних роботів значною мірою залежать від принципу керування, який може бути реалізований з використанням а) замкненого за положенням приводу з постійним контролем положення робота по всьому шляху його

пересування, б) розімкненого приводу зі ступінчастим регулюванням швидкості, в) комбінованого приводу, розімкненого між місцями зупинок та замкненого за положенням поблизу цих місць, г) розімкненого приводу з механізмами уточнення положення та фіксації.

Виконання пристрою пересування за першим принципом вимагає постійної інформації про поточний стан робота. Цей спосіб є найбільш універсальним, оскільки дозволяє розташувати мобільну платформу у будь-якій точці траси пересування, проте ускладнює конструкцію та підвищує вартість робота.

Пристрої пересування, виконані за другим принципом, менш складні і дорогі, але мають недостатню точність позиціонування. У цьому випадку використовується електричний привод, а вихід на задані позиції здійснюється за допомогою однієї або кількох команд на гальмування від пристроїв релейної дії, встановлених на шляху руху робота.

Третій принцип керування пересуванням мобільного робота представляє комбінацію першого та другого. В цьому випадку датчики положення підключаються тільки в районі безпосереднього обслуговування технологічного обладнання, висока точність та жорсткість напрямних елементів потрібні лише у цих місцях траси, а не на всьому її протязі. Недоліком способу є конструктивна складність здійснення кінематичного та електричного зв'язків з датчиками положення.

Четвертий принцип є модифікацією другого. З метою покращення точнісних характеристик пристроїв пересування додатково вводять різні механічні пристрої фіксації положення (упори, уловлювачі тощо), що забезпечують високу точність позиціонування.

Окрім розглянутих наземних механізмів пересування, існують також повітряні та плаваючі (надводні та підводні) системи (рис. 7.38, 7.39). При побудові таких систем слід використовувати спеціалізовані знання з проєктування літальних та водних апаратів.



Рис. 7.38 – Літаючий дрон Mavic 3



Рис. 7.39 – Український плаваючий бойовий дрон MAGURA V5

## 8. Навчальні набори з робототехніки

### 8.1 Загальний огляд

Масштаби та ефективність фундаментальних та прикладних наукових досліджень є одним з головних чинників, що визначають рівень конкурентоспроможності будь-якої країни. Проведення таких досліджень з метою розробки нових технологій та впровадження у різних галузях економіки передових інженерних рішень потребує великої кількості спеціалістів у галузях математики, природничих та технічних наук. Необхідність в підготовці науково-інженерних кадрів високої кваліфікації призвела до появи в багатьох країнах світу такого напрямку освіти, як STEM [27].

STEM – збірний термін, яким називають підходи до освітнього процесу, що полягають в отриманні теоретичних наукових знань у ході практичної діяльності та охоплюють природничі науки (Science), технології (Technology), технічну творчість (Engineering) та математику (Mathematics).

Посилення ролі STEM-освіти є одним із пріоритетів модернізації української освіти, складовою частиною державної політики з підвищення рівня конкурентоспроможності національної економіки та розвитку людського капіталу, одним з основних факторів інноваційної діяльності у сфері освіти, що відповідає запитам економіки та потребам суспільства.

Розвиток STEM-освіти у закладах освіти забезпечується на різних рівнях:

початковий – стимулювання допитливості та підтримка інтересу до навчання і пошуку знань, мотивація до самостійних досліджень, створення простих приладів, конструкцій, науково-технічна творчість;

базовий – формування стійкого інтересу до природничо-математичних предметів, оволодіння технологічною грамотністю та навичками розв'язання проблем, залучення до дослідництва, винахідництва, проєктної діяльності, що дасть змогу збільшити частку тих, хто прагне обрати науково-технічні, інженерні професії;

профільний – поглиблене оволодіння системою знань і умінь STEM-освіти методами наукових досліджень, реалізація інноваційних проєктів;

вищий/професійний – становлення фахівців різних науково-технічних, інженерних професій на базі закладів вищої освіти, а також підвищення професійної майстерності педагогічних працівників із впровадження нових методик викладання, відповідних курсів та реалізації інноваційних проєктів [17].

Одним з прикладів ефективного впровадження STEM-освіти є розробка науково-дослідних проєктів з використанням робототехніки [27]. Навчання основам робототехніки активно впроваджується як в державних, так і в приватних закладах освіти усіх рівнів: від школи до університету. Для цього створюються STEM-лабораторії, в яких учнівська та студентська молодь має змогу реалізувати свої технічні задуми: зібрати роботів з готових компонентів, навчитись програмувати, створювати 3D-моделі власних деталей із подальшим їх друком на 3D-принтері та багато чого іншого.

Типова STEM-лабораторія включає наступне обладнання: комп'ютери, 3D-принтер, інтерактивну дошку чи проектор та навчальні набори для конструювання (конструктори). В залежності від складності створюваних проєктів такі лабораторії можуть додатково оснащуватись спеціалізованими верстатами (лазерними, токарними, фрезерними тощо); пневматичними, гідравлічними, механічними та електричними компонентами; а також спеціалізованим програмним забезпеченням для 3D-моделювання, планування та обробки результатів експериментів.

Сьогодні багатьма виробниками пропонуються спеціалізовані освітні STEM-набори у вигляді конструкторів для створення механічних пристроїв різної конструкції та призначення, в тому числі роботів. На початковому та базовому рівнях STEM-освіти (зазвичай, шкільні та професійні заклади освіти) найбільшу популярність здобули освітні набори LEGO, ROBOTIS та TETRIX, візуальна мова програмування Scratch, а також онлайн-редактор зі створення 3D-моделей Autodesk Tinkercad. На профільному та вищому рівнях (коледжі та університети) використовуються більш «професійні» набори Arduino, Raspberry Pi, Micro:bit, ESP32; універсальні мови програмування Python, C/C++, Java та пакети для створення складних 3D-моделей SolidWorks та Autodesk Inventor.

На рис. 8.1 в якості прикладу наведено типовий базовий (стартовий) освітній набір для конструювання на базі однієї з найпопулярніших у світі програмно-апаратних платформ Arduino. До складу такого набору зазвичай входить плата на основі мікроконтролера ATmega328, макетна плата, набір радіодеталей (резистори, світлодіоди, конденсатори, транзистори), кнопки, датчики, дисплеї, двигуни та з'єднувальні дроти. Після складання фізичної моделі робота чи іншого пристрою для нього в спеціальному редакторі коду Arduino IDE розробляється керуюча програма, яка через порт USB завантажується на мікроконтролер плати Arduino.

В залежності від проєкту до базових компонентів набору додаються інші, які можна придбати окремо, як, наприклад, маніпулятор, мобільне шасі, драйвери двигунів тощо. Унікальні елементи, які не виробляються серійно, можна спроектувати в тривимірному редакторі та роздрукувати на 3D-принтері.

Виробники навчальних наборів для конструювання пропонують також готові проекти різноманітних електронних пристроїв, зокрема, роботів. Так, на рис. 8.2 наведений FPV-робот<sup>5</sup> Zeus Car, а на рис. 8.3 – робот PiDog зі штучним інтелектом, заснованим на технології ChatGPT-4.0 від виробника SunFounder.

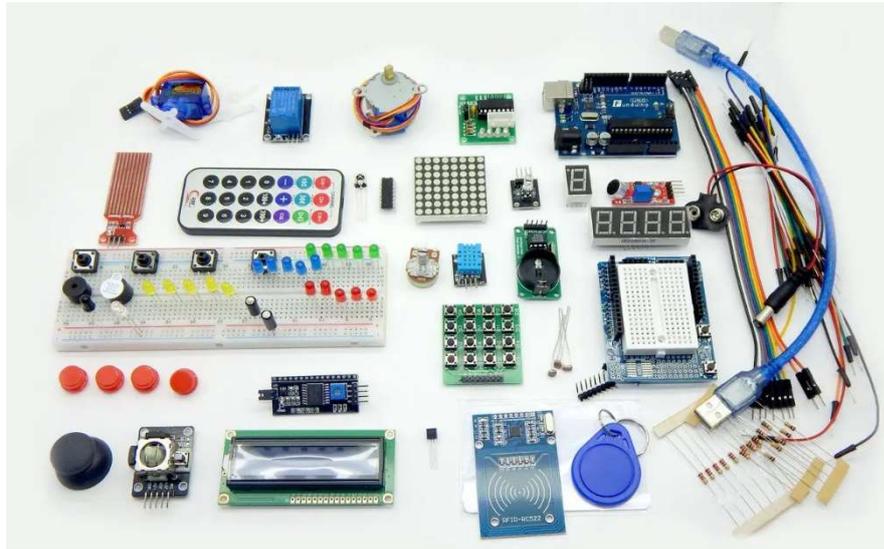


Рис. 8.1 – Типовий стартовий навчальний набір компонентів для конструювання на платформі Arduino

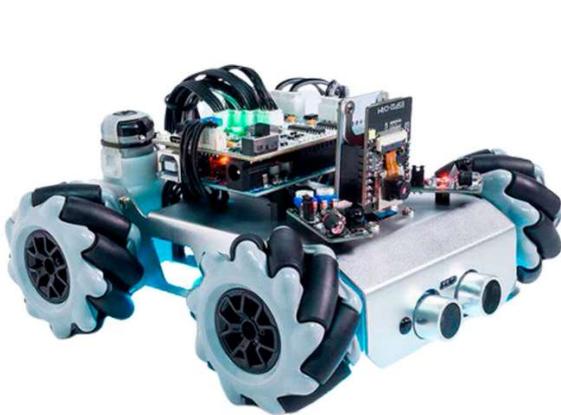


Рис. 8.2 – FPV-робот Zeus Car Arduino UNO від SunFounder



Рис. 8.3 – Робот SunFounder PiDog (ChatGPT-4o)

Стартові освітні набори для конструювання широко використовуються не тільки в сфері STEM-освіти. Великої популярності вони здобули в ентузіастів, які створюють власні DIY-проекти<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> FPV-робот (англ. First Person View – вид від першої особи) – робот, контрольований оператором у режимі реального часу

<sup>6</sup> DIY (англ. Do It Yourself – зроби це сам) – авторські проекти, створювані власноруч

## 8.2 Онлайн-симулятори

Популярність STEM-наборів для конструювання призвела до ідеї замінити фізичне моделювання віртуальною симуляцією. Так з'явилися комп'ютерні симулятори, які дозволяють створювати віртуальні проекти технічних пристроїв, зокрема роботів, тестувати їх, а вже потім, в разі необхідності, – втілювати у життя.

Симулятори можна умовно розділити на три групи: онлайн-симулятори, локальні програми та допоміжні тренажери. Найбільш зручними в користуванні є онлайн-симулятори, за допомогою яких можна створювати проекти безпосередньо у браузері з будь-якої точки світу. Це дозволяє організувати колективну роботу, зберігаючи проект у «хмарі». Локальні програми-симулятори встановлюються на індивідуальні комп'ютери користувачів, а допоміжні тренажери дозволяють автоматизувати процес проектування технічних пристроїв (наприклад, створювати електричні чи кінематичні схеми, розробляти власні механічні компоненти), проте не мають засобів для повноцінної симуляції.

На сьогодні найбільш популярними онлайн-симуляторами технічних проектів є Autodesk Tinkercad та WOKWI. Обидва рішення є безкоштовними.

Tinkercad – це онлайн-програма для 3D-моделювання від компанії Autodesk – відомого розробника систем комп'ютерної графіки, таких як AutoCAD та Inventor. Tinkercad дозволяє створювати тривимірні об'єкти та проектувати електричні схеми. Саме розділ «Схеми» Tinkercad (рис. 8.4) є симулятором електронних схем, який підтримує мікроконтролери Arduino Uno, плати Micro:bit та мікросхеми ATtiny. Програмний код керування можна створити за допомогою графічних блоків (технологія Scratch) або текстового редактору [4].

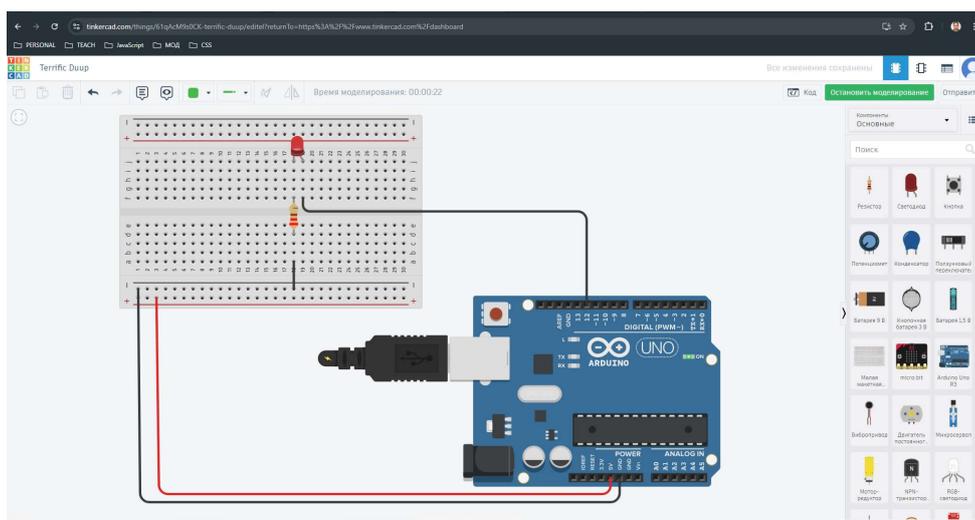


Рис. 8.4 – Інтерфейс симулятора Autodesk Tinkercad (розділ «Схеми»)

Онлайн-симулятор WOKWI, інтерфейс якого наведений на рис. 8.5, спрямований лише на створення електричних схем, підтримує платформи Arduino, ESP32, STM32 та Raspberry Pi. Вікно програми розділене на дві частини. В першій набирається програмний код керуючої програми, в другій створюється апаратна частина технічного пристрою. Натиснувши на кнопку «+», користувач може обрати компоненти, які необхідно додати в проєкт. Доступні різні версії керуючих плат, макетні плати, радіодеталі, кнопки, двигуни, датчики, дисплеї [22].

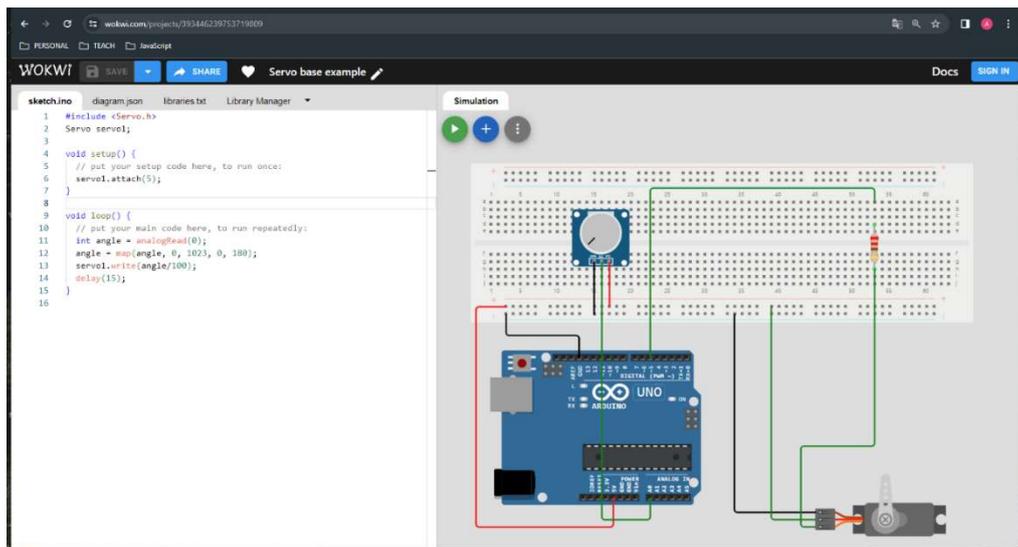


Рис. 8.5 – Інтерфейс симулятора WOKWI

Tinkercad та WOKWI дозволяють підключати сторонні бібліотеки, які значно спрощують написання коду для окремих компонентів, таких як двигуни або LCD-дисплеї. Після створення електричної схеми та набору коду в обох онлайн-сервісах запускається процес симуляції. В разі, якщо програмний код керування має помилки, вбудований редактор виведе вікно з попередженням, а її «завантаження» на мікроконтролер не розпочнеться. В разі успішної компіляції можна подивитись на працюючу симуляцію.

За допомогою онлайн-симуляторів можна реалізувати багато цікавих проєктів, однак їх можливості все-таки досить обмежені. По-перше, це пов'язано з тим, що в переліку доступних віртуальних компонентів немає багатьох типів датчиків, модулів та плат розширення – тих, які є для фізичної платформи Arduino та подібних до неї (хоча треба відзначити, що віртуальний каталог компонентів постійно поповнюється).

Іншим суттєвим недоліком віртуальних симуляцій є неможливість випробування створених технічних пристроїв, зокрема роботів, у реальному навколишньому середовищі. Наприклад, мобільний робот не має здатності пересуватись віртуальним простором, реагуючи на перешкоди або зміну кліматичних

факторів. В симуляторі можна лише побачити роботу двигунів у вигляді обертального руху їх валів, але сам робот нікуди не поїде. Датчику перешкод можна вручну задати відстань до уявного об'єкту, аби перевірити правильність реагування на це керуючої програми, проте неможливо перевірити дії робота на комбінацію факторів руху та зміни оточення.

Отже, до переваг онлайн-симуляторів технічних проєктів можна віднести:

- можливість створення та тестування апаратно-програмних рішень без закупівлі фізичних компонентів;
- захищеність віртуального обладнання симулятора від ушкоджень, пов'язаних з помилками при проєктуванні та збиранні технічних пристроїв;
- можливість спільної роботи в команді, члени якої розташовані у різних куточках світу.

Основними недоліками симуляторів є:

- обмежена номенклатура компонентів, які можна використовувати у проєктах;
- неможливість тестування технічних пристроїв в умовах реального або близького до нього віртуального навколишнього середовища, оскільки симуляція такого середовища (зі змінними параметрами рельєфу, перешкодами, температурою, вологістю тощо) – окрема складна задача;
- неможливість відпрацювання практичних навичок зі створення фізичних моделей роботів.

Таким чином, онлайн-симулятори дозволяють створити та протестувати технічні пристрої, але через обмежені можливості не можуть в повній мірі замінити собою фізичне моделювання [23].

## Література

1. Arduino. Open-source electronics platform. URL: <https://www.arduino.cc>.
2. Arduino Workshop, A Hands-On Introduction with 65 Projects, 2nd Edition / John Boxall. – No Starch Press, 2021. – 432 pp.
3. Arduino For Dummies, 2nd Edition / John Nussey. – John Wiley & Sons, Inc, 2018. – 386 pp.
4. AUTODESK Tinkercad. URL: <https://www.tinkercad.com/dashboard>.
5. Basics: Electric motor. URL: <https://www.baumueller.com/en/insights/basics/electric-motor>.
6. Difference between MCU and SoC. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-mcu-and-soc>.
7. Drive Mechanism. URL: [https://erc-bpgc.github.io/handbook/mechanical/drive\\_mechanism](https://erc-bpgc.github.io/handbook/mechanical/drive_mechanism).
8. G.E. Hardiman — первый в мире экзоскелет из 60-х годов прошлого века. URL: <https://habr.com/ru/articles/394801/>
9. Global Robotics Race: Korea, Singapore and Germany in the Lead. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robotics-race-korea-singapore-and-germany-in-the-lead>.
10. Holonomic Drive System. URL: <https://www.patcapulong.com/work/holonomic-drive>.
11. How do you create a communication system for multiple robots. URL: <https://www.linkedin.com/advice/3/how-do-you-create-communication-system-multiple-robots>.
12. Linear Motor. URL: <https://www.a-m-c.com/experience/technologies/motor-type/linear>.
13. PLANOBOT Pick-and-Place Industrial Robot – Joe B. Brown (Planet Corp., 1956). URL: <https://cyberneticzoo.com/early-industrial-robots/1956-planobot-pick-and-place-industrial-robot-joe-b-brown-planet-corp>.
14. Raspberry Pi. URL: <https://www.raspberrypi.com>.
15. Robot Builder's Cookbook: Build and Design Your Own Robots / Owen Bishop. – Elsevier Ltd, 2007. – 366 p.
16. Robot communication methods. URL: <https://www.automate-uk.com/our-associations/bara/expert-advice/robots-explained/robot-communication-methods>.
17. STEM-освіта. URL: <https://imzo.gov.ua/stem-osvita>
18. Stepper Motor vs. Servo Motor: A Comprehensive Comparison. URL: <https://lammotor.com/stepper-motor-vs-servo-motor>.
19. Top 5 Robot Trends 2024. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-5-robot-trends-2024>.
20. Understanding Industrial Robot Motion Types / Niall Henry. URL: <https://www.solisplc.com/tutorials/industrial-robot-motion-types>.
21. What are manipulator robots? Understanding their Design, Types, and Applications URL: <https://www.wevolver.com/article/robot-manipulator>.

22. WOKWI: Simulate IoT Projects in Your Browser. URL: <https://wokwi.com>.
23. Використання Arduino-симулятора WOKWI на лабораторних роботах з робототехніки / А.М. Кльон, А.С. Кондратовіч. – Збірник наукових праць Донбаської національної академії будівництва і архітектури, № 2– 2024 (33). – С. 79 – 83. (URL: <https://donnaba.edu.ua/journal/wp-content/uploads/2024/06/79-83.pdf>)
24. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Човнюк Ю.В. Мехатроніка. Навчальний посібник. – К., 2012. – 357 с.
25. Матвієнко М.П. Основи електротехніки та електроніки: Підручник. – К., Ліра-К, 2021. – 506 с.
26. Накано Э. Введение в робототехнику: Пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 334 с.
27. Основи робототехніки: навчальний посібник / Н.В. Морзе, Л.О. Варченко-Троценко, М.А. Гладун. – Кам'янець-Подільський : П.П. Буйницький О.А., 2016. – 184 с.
28. Основы робототехники / Н.В. Василенко, К.Д. Никитин, В.П. Пономарев, А.Ю. Смолин. Под общ. ред. К.Д. Никитина. – Томск: МГП "РАСКО", 1993. – 475 с.
29. Проектування промислових роботів та маніпуляторів: Навчальний посібник / С.О. Кошель, Ю.А. Ковальов, О. П. Манойленко. – К., Центр навчальної літератури, 2019. – 256 с.
30. Программирование для робототехники: на каких языках программируют роботов. URL: <https://electricalschool.info/robot/2505-programmirovanie-robotov.html>.
31. ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни «Основи мехатроніки» для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» («Колісні та гусеничні транспортні засоби») усіх форм навчання. Частина 1 - змістовий модуль 1. Промислова робототехніка / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 86 с.
32. Топ-10 автономных роботов для сельского хозяйства. URL: <https://app.agro-online.com/21615/details>.
33. Шахинпур М. Курс робототехники. Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
34. Шоланов К.С. Основы мехатроники и робототехники – Учебник для студентов технических специальностей вузов Казахстана. Алматы: издательство «ЭВЕРО», 2015. – 126с.
35. Штучний інтелект. URL: [https://uk.wikipedia.org/Штучний\\_інтелект](https://uk.wikipedia.org/Штучний_інтелект).
36. Янг Дж. Ф. Робототехника: Пер. с англ. / Ред. М.Б. Игнатъев. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 300 с.

# ПРО АВТОРІВ

---



## **Андрій ТРЕТ'ЯК**

*К.т.н., доцент кафедри автоматики,  
електроніки та телекомунікацій  
Національного університету «Полтавська  
політехніка імені Юрія Кондратюка»*

**Наукові інтереси:** Електроніка, електротехніка,  
електропривод, відновлювальні джерела  
енергії, робототехніка

[itm.Tretiak@nupp.edu.ua](mailto:itm.Tretiak@nupp.edu.ua)



## **Андрій КЛЬОН**

*К.т.н., доцент кафедри Машинобудування  
Донбаської національної академії будівництва  
і архітектури*

**Наукові інтереси:** Теорія механізмів та машин,  
деталі машин, програмування,  
робототехніка

[A.N.Klyon@donnaba.edu.ua](mailto:A.N.Klyon@donnaba.edu.ua)