

М. В. Аніщенко

ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

М. В. Аніщенко

ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ

Навчальний посібник
для студентів освітньої програми
«Електропривод, мехатроніка та робототехніка»
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХП»,
протокол № 1 від 13.02.2025 р.

Харків
НТУ «ХП»
2025

УДК 621.865
А67

Рецензенти:

Б. І. Кузнєцов, д-р техн. наук, проф.,
Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України;

С. І. Яцько, канд. техн. наук, доц.,
Український державний університет залізничного транспорту

Аніщенко М. В.

А67 Промислові роботи : навч. посібн. для студентів освітньої програми «Електропривод, мехатроніка та робототехніка» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти / М. В. Аніщенко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – 464 с.

У навчальному посібнику розглянуто тенденції розвитку і питання соціально-економічної ефективності застосування засобів робототехніки, подано основні поняття, визначення і класифікацію робототехніки, розглянуто кінематичні схеми і їх математичний опис, основні елементи і вузли промислових роботів, способи і мови програмування, алгоритми програмного, адаптивного та інтелектуального керування, наведено особливості проєктування засобів робототехніки, висвітлено питання застосування засобів робототехніки в промисловості, в немашинобудівних і в непромислових галузях і питання техніки безпеки в робототехніці.

Призначено для студентів освітньої програми «Електропривод, мехатроніка та робототехніка» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та інших технічних спеціальностей.

УДК 621.865

© М. В. Аніщенко, 2025
© НТУ «ХПІ», 2025

ЗМІСТ

Перелік основних скорочень	7
Вступ	9
РОЗДІЛ 1. Історія та соціально-економічні аспекти розвитку робототехніки	11
1.1. Історія розвитку робототехніки.....	11
1.1.1. Передісторія робототехніки.....	11
1.1.2. Виникнення і розвиток сучасної робототехніки	13
1.1.3. Тенденції розвитку робототехніки у світі	25
1.2. Соціально-економічна ефективність застосування засобів робототехніки	38
РОЗДІЛ 2. Структура, кінематичні схеми та конструкція промислових роботів	47
2.1. Предмет і визначення робототехніки.....	47
2.1.1. Предмет робототехніки... ..	47
2.1.2. Визначення робототехніки... ..	52
2.1.3. Структура, параметри і класифікація роботів	56
2.2. Кінематика маніпуляторів.....	64
2.2.1. Кінематичні схеми маніпуляторів.....	64
2.2.2. Математичний опис кінематичних схем	79
2.3. Конструктивне виконання промислових роботів	84
2.3.1. Конструкції маніпуляторів промислових роботів.....	84
2.3.2. Промислові роботи агрегатно-модульного типу	94
2.3.3. Робочі органи маніпуляторів	98
2.3.4. Транспортні та мобільні роботи	109
РОЗДІЛ 3. Склад промислових роботів.....	113
3.1. Приводи роботів.....	113
3.1.1. Класифікація приводів	113
3.1.2. Пневматичні приводи	119
3.1.3. Гідравлічні приводи.....	123
3.1.4. Електричні приводи.....	125
3.1.5. Мікроприводи.....	128
3.2. Інформаційне забезпечення роботів	132
3.2.1. Види інформаційних систем.....	132
3.2.2. Системи технічного зору	135

3.2.3. Локаційні системи	141
3.2.4. Силомоментні системи.....	144
3.2.5. Тактильні системи	148
3.3. Системи програмного керування роботами	154
3.3.1. Класифікація та особливості систем керування	154
3.3.2. Дискретні циклові системи програмного керування	161
3.3.3. Системи позиційного програмного керування	164
3.3.4. Системи безперервного програмного керування	168
3.4. Програмування промислових роботів	177
3.4.1. Способи програмування роботів.....	177
3.4.2. Структура програмного забезпечення систем керування роботами	186
3.4.3. Розвиток мов програмування роботів.....	190
3.4.4. Структура і короткий опис системи програмування VAL.....	194
РОЗДІЛ 4. Керування промисловими роботами	201
4.1. Математичний опис роботів	201
4.1.1. Основні принципи організації руху роботів	201
4.1.2. Математичний опис маніпуляторів і систем пересування роботів.....	204
4.1.3. Комп'ютерне моделювання робототехнічних систем ..	223
4.2. Алгоритми програмного керування роботами.....	225
4.2.1. Алгоритм циклового програмного керування	225
4.2.2. Алгоритм дискретного позиційного керування	228
4.2.3. Алгоритм безперервного позиційного керування.....	235
4.2.4. Системи керування маніпулятором спільно за положенням та силою	244
4.3. Адаптивне та інтелектуальне керування роботами.....	245
4.3.1. Функціональна схема системи сенсорного керування роботами	245
4.3.2. Принципи побудови адаптивного керування роботами	246
4.3.3. Системи адаптивного керування.....	249
4.3.4. Реалізація адаптивного керування	252
4.3.5. Системи інтелектуального керування	256
4.3.6. Сучасні пристрої керування роботами і тенденції їх	

розвитку.....	263
4.4. Групове керування в робототехнічних системах	265
4.4.1. Завдання групового керування.....	265
4.4.2. Принципи групового керування роботами	270
4.5. Керування засобами робототехніки людиною-оператором ..	279
4.5.1. Класифікація систем керування засобами робототехніки людиною-оператором	279
4.5.2. Системи керування з людиною-оператором.....	282
РОЗДІЛ 5. Проектування засобів робототехніки.....	289
5.1. Особливості та методи проектування засобів робототехніки	289
5.2. Проектування промислових роботів агрегатно-модульного типу	297
5.3. Принципи проектування промислових роботів.....	302
5.4. Проектування електроприводів роботів	310
5.4.1. Постановка завдання та основні етапи проектування...	310
5.4.2. Розрахунок енергетичних параметрів приводу	313
5.4.3. Вибір електродвигуна приводу	323
5.4.4. Визначення передатного відношення приводу.....	326
РОЗДІЛ 6. Застосування засобів робототехніки	329
6.1. Застосування засобів робототехніки в промисловості.....	329
6.1.1. Класифікація технологічних комплексів із застосуванням роботів	329
6.1.2. Компонування та керування технологічними комплексами з роботами	334
6.1.3. Етапи проектування технологічних комплексів.....	340
6.1.4. Особливості роботизації технологічних комплексів в ді- ючому виробництві	343
6.1.5. Гнучкі виробничі системи	345
6.2. Промислові роботи на основних технологічних операціях ..	354
6.2.1. Складальні робототехнічні комплекси	354
6.2.2. Зварювальні робототехнічні комплекси.....	367
6.2.3. Робототехнічні комплекси для нанесення покриттів....	374
6.2.4. Робототехнічні комплекси для обробки різанням.....	379
6.3. Промислові роботи на допоміжних операціях.....	383
6.3.1. Організація взаємодії обладнання РТК	383

6.3.2. Роботизовані технологічні комплекси механообробки	388
6.3.3. Роботизовані технологічні комплекси холодного штампування.....	394
6.3.4. Роботизовані технологічні комплекси гарячого об'ємного штампування	397
6.3.5. Роботизовані технологічні комплекси в ливарному виробництві.....	400
6.3.6. Роботи для палетування і пакування	406
6.4. Особливості застосування засобів робототехніки в немаши- нобудівних і в непромислових галузях.....	410
6.4.1. Особливості застосування засобів робототехніки в немашинобудівних галузях промисловості.....	410
6.4.2. Робототехніка в непромислових галузях	421
6.5. Екстремальна робототехніка	428
6.5.1. Екстремальна робототехніка в промисловості	428
6.5.2. Космічна робототехніка	433
6.5.3. Підводна робототехніка	438
6.5.4. Військова робототехніка	439
6.5.5. Мікроробототехніка.....	441
6.6. Техніка безпеки в робототехніці	443
6.7. Перспективи розвитку робототехніки	450
Список джерел інформації	462

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРМ	— автоматизоване робоче місце
АСК	— автоматизована система керування
АСТПВ	— автоматизована система технологічної підготовки виробництва
АСУ	— автоматизована система управління
АСУВ	— автоматизована система управління виробництвом
АСУТП	— автоматизована система управління технологічним процесом
ВП	— виконавчий пристрій
Г АВ	— гнучке автоматизоване виробництво
Г АД	— гнучка автоматизована ділянка
Г АЛ	— гнучка автоматизована лінія
Г АЦ	— гнучкий автоматизований цех
Г ВМ	— гнучкий виробничий модуль
Г ВС	— гнучка виробнича система
ЕП	— електропривод
ЕОМ	— електронна обчислювальна машина
З	— затискач
ІММ	— інтелектуальний мехатронний модуль
КП	— керуюча програма
ММР	— мехатронний модуль руху
МПА	— мікропрограмний автомат
ПЗ	— програмне забезпечення
ПЗЗ	— прилади із зарядним зв'язком
ПД	— пропорційно-інтегрально-диференціальний
ПК	— персональний комп'ютер
ПЛК	— програмовний логічний контролер
ПР	— промисловий робот
РО	— робочий орган
РТК	— роботизований технологічний комплекс
РТС	— робототехнічна система
САК	— система автоматичного керування
САПР	— система автоматизованого проєктування
СТЗ	— система технічного зору
СУБД	— система управління базами даних
ТД	— технологічна ділянка

ТЛ	– технологічна лінія
ТО	– технологічне обладнання
ТОс	– технологічний осередок
ТП	– технологічний процес
ЧПК	– числове програмне керування
ШП	– широтно-імпульсний перетворювач
CAD	– Computer Aided Design
CAE	– Computer Aided Engineering
CAM	– Computer Aided Manufacturing
CNC	– Computer Numerical Control
IFR	– International Federation of Robotics
ISO	– International Organization for Standardization
PLC	– Programmable Logic Controller
USB	– Universal Serial Bus

ВСТУП

Розвиток науково-технічного прогресу на сучасному етапі, дозволив створити гнучке автоматизоване та комп'ютерно-інтегроване виробництво. Комплексна автоматизація промислового виробництва припускає функціонування численних взаємозалежних технічних засобів об'єктів виробництва (металорізальних верстатів, промислових роботів) на основі комп'ютерної техніки, потужного спеціального програмного забезпечення, числового програмного керування (ЧПК), автоматизованих приводів.

Впровадження комп'ютерних систем керування та обробки інформації значно зменшує строки підготовки виробництва, скорочує строки освоєння і випуску нової продукції, підвищує її якість та знижує собівартість. Сучасне обладнання з ЧПК дозволяє забезпечити автоматичне керування обробкою деталей, автоматизоване програмування різних видів обробки.

Сучасний рівень гнучкого автоматизованого виробництва став можливим завдяки швидкому розвитку робототехніки. Робототехніка – галузь техніки, що займається проєктуванням, конструюванням, експлуатацією та застосуванням роботів, в тому числі промислових, комп'ютерних систем обробки інформації і керування ними. Роботи – це автоматизовані машини, які можуть замінювати людей у небезпечних середовищах чи виробничих процесах або нагадувати людей за зовнішнім виглядом і поведінкою.

Навчальний посібник написаний відповідно до робочої програми освітнього компонента «Промислові роботи» і складається з шести розділів.

У першому розділі розглянуті історія і тенденції розвитку робототехніки, питання соціально-економічної ефективності застосування засобів робототехніки.

У другому розділі розглянуто предмет, визначення і класифікацію робототехніки, наведено функціональну схему роботів, розглянуто кінема-

тичні схеми маніпуляторів, математичний опис кінематичних схем та особливості конструкції промислових роботів.

У третьому розділі розглянуті основні елементи і вузли промислових роботів (ПР): приводи, різноманітні сенсори і системи програмного керування роботами. Проведено огляд способів і мов програмування роботів.

Принципи керування промисловими роботами розглянуті у четвертому розділі. Наведений математичний опис маніпуляторів промислових роботів. Розглянуті алгоритми циклового, дискретного позиційного і безперервного програмного керування. Розглянуто особливості реалізації систем адаптивного та інтелектуального керування. Розглянуті принципи групового керування роботами і керування засобами робототехніки людиною-оператором.

Особливості проєктування засобів робототехніки наведені у п'ятому розділі. Розглянуті етапи проєктування електроприводів роботів, наведений розрахунок енергетичних параметрів приводу і вибір електродвигунів за потужністю.

Питанням застосування засобів робототехніки в промисловості, в машинобудівних і в непромислових галузях присвячено шостий розділ. Розглянуто компонування роботизованих технологічних комплексів, використання роботів на основних і допоміжних технологічних операціях в промисловості та приклади використання в деяких інших областях. Тут також розглянуті питання техніки безпеки в робототехніці.

Автор висловлює щирі подяки рецензентам професору Б. І. Кузнецову, доценту С. І. Яцько за корисні поради, надані під час підготовки навчального посібника.

Розділ 1

Історія та соціально-економічні аспекти розвитку робототехніки

1.1. Історія розвитку робототехніки

1.1.1. Передісторія робототехніки

Коріння робототехніки сягають глибокої давнини. Вже тоді вперше виникли ідеї та були зроблені перші спроби створення людиноподібних технічних пристроїв, рухомих культових статуй, механічних слуг тощо. Статуї богів з рухомими частинами тіла (руки, голова) з'явилися ще у Стародавньому Єгипті, Вавилоні, Китаї. В «Іліаді» Гомера божественний коваль Гефест виконує механічних служниць. Аристотель згадує про ляльок-маріонеток що приводились до руху за допомогою ниток. З них створювалися цілі механічні театри. У книгах Герона Олександрійського (І століття н.е.) описані подібні та багато інших автоматів давнини. Як джерело енергії в них використовувалися вода, пара, гравітація (гирі).

У середні віки великою популярністю користувалися різноманітні автомати, засновані на використанні годинникових механізмів. Були створені всілякі годинники з фігурами людей, ангелів, що рухаються. До цього періоду відносяться відомості про створення перших рухливих людиноподібних механічних фігур – андроїдів. Так, андроїд алхіміка Альберта Великого (1193–1280) був лялькою в зріст людини, яка, коли стукали у двері, відчиняла і закривала їх, кланяючись при цьому тому хто входив.

Роботи зі створення андроїдів досягли найбільшого розвитку у 18 ст. одночасно з розквітом годинникової майстерності. Механіками годинникарями були створені андроїди-музиканти, рисувальники, переписувачі. До них належить, наприклад, «флейтист» французького механіка Жака Вокансона (1709–1789) – постать у зріст людини (рис. 1.1). За допомогою рухливих пальців флейтист виконував закладені в його програму 11 мелодій.

Ціла низка людиноподібних автоматів була створена швейцарськими годинникарями П'єром-Жаком Дро (1721–1790) та його сином Анрі Дро

(1752–1791). Від імені останнього пізніше було утворено слово «андроїд». Ці людиноподібні іграшки являли собою багатопрограмні автомати з програмами, що оперативно змінюються. Програми задавалися за допомогою змінних кулачків, які встановлюються на барабані, що обертається, та інших подібних механічних пристроях. Привод здійснювався від годинникового механізму (рис. 1.2, рис. 1.3).



Рисунок 1.1 – Механічний флейтист



Рисунок 1.2 – Механічний писець Анрі Дро



а – писець



б – музикант



в – кресляр

Рисунок 1.3 – Автомати П'єра-Жака Дро

Ідеї створення «механічних» людей, які почали згасати разом з ослабленням ролі годинникової справи в подальшому розвитку техніки, знову відродилися в 20 ст. на основі електроніки та електротехніки. Американський

інженер Уенслі побудував керований на відстані за допомогою свистка автомат «Телевокс», який міг не тільки виконувати ряд елементарних операцій, а й вимовляти за допомогою звукозаписувальної апаратури кілька фраз.

Англієць Гаррі Мей в 1932 р. створив людиноподібний автомат «Альфа», який за командами, що подаються голосом, сідав, вставав, рухав руками, говорив. Декілька подібних автоматів було побудовано в Австрії Августом Губером. Вони мали керування по радіо, могли ходити, говорити, виконувати різні маніпуляції. В основному подібні пристрої створювали з рекламною метою, хоча були спроби використовувати їх для різних практичних цілей.

Термін «робот» запровадив чеський письменник К. Чапек у 1920 р. у фантастичній п'єсі «R.U.R.» («Росумовські універсальні роботи»), де так названо механічних робітників, призначених для заміни людей на важких фізичних роботах. Назва «робот» утворена від чеського слова *robota*, що означає панщина, каторжна праця.

У 1937 р. на Всесвітній виставці в Парижі демонструвався радіокерований рухомий робот. На той час вже остаточно «прижився» термін «робот», а ідеї робототехніки дедалі енергійніше використовувалися у науково-фантастичній літературі.

1.1.2. Виникнення і розвиток сучасної робототехніки

Сучасна робототехніка виникла у другій половині ХХ століття, коли в ході розвитку виробництва з'явилася реальна потреба в універсальних маніпуляційних машинах-автоматах, подібних до «механічних людей», описаних К. Чапеком, і одночасно виникли необхідні для їх створення науково-технічні передумови: насамперед це розвиток кібернетики та обчислювальної техніки.

Сучасними попередниками роботів були різного роду пристрої для маніпулювання на відстані об'єктами, безпосередній контакт людини з якими небезпечний або неможливий. Це маніпулятори з ручним та автоматизованим керуванням. Перші були пасивними, тобто, механізмами без приводів, і служили для повторення на певній відстані рухів руки людини цілком за допомогою його м'язової сили. Потім були створені маніпулятори з приводами і різними варіантами керування аж до біоелектричного.

Перші такі маніпулятори було створено 1940–1950 р.р. для атомних

досліджень, а потім для атомної промисловості (рис. 1.4, рис. 1.5). Подібні маніпулятори отримали також застосування в глибоководній техніці, металургії та інших галузях промисловості.

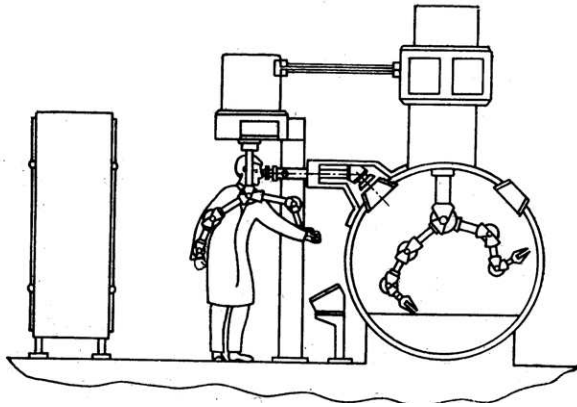


Рисунок 1.4 – Гаряча камера з копіювальним маніпулятором



Рисунок 1.5 – Копіювальний маніпулятор Маскот (Італія)

Винахід промислового робота (ПР) було оформлено у 1954 р., коли Джордж Девол подав у США патент на машину для переміщення деталей і заявив про базову концепцію навчання/відтворення для керування пристроєм (запрограмована передача виробів). Патент було видано у 1961 р. (рис. 1.6).

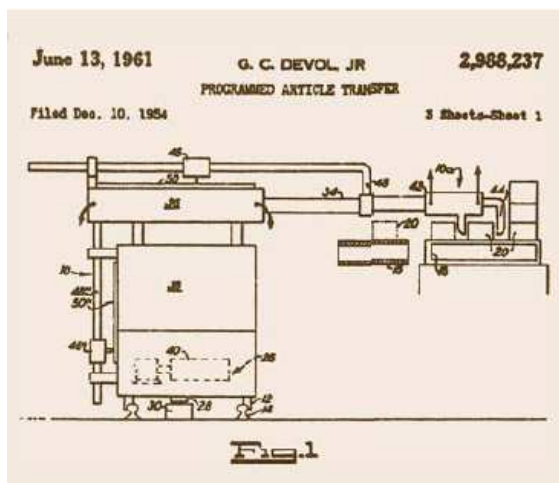


Рисунок 1.6 – Винахід на ПР



Рисунок 1.7 – Перший ПР Unimation

Цей патент став початком спільних зусиль Дж. Девола та Дж. Енгель-

бергера зі створення першої компанії з виробництва роботів Unimation, що є поєднанням слів «універсальний» і «автоматизація». Перший робот компанії Unimation (рис. 1.7) у 1961 році був введений в експлуатацію на заводі General Motors для вилучення деталей з машини для лиття під тиском. У наступні роки більшість роботів Unimate з гідравлічним приводом було продано для переміщення заготовок і точкового зварювання кузовів автомобілів.

Також у США в 1961 р. був розроблений керований від ЕОМ маніпулятор із зчутливленим, за допомогою контактних і фотоелектричних датчиків, пристроєм захоплення. Цей маніпулятор МН-1 отримав назву «рука Ернста» на прізвище його творця Г. Ернста. За сучасним визначенням, це був прообраз сенсорного робота другого покоління з адаптивним керуванням, що дозволяло йому, наприклад, знаходити і брати довільно розташовані предмети.

У 1962 р. на ринку США з'явилися перші роботи марки «Версатран», призначені для промислового застосування (рис. 1.8). Одночасно з'явився термін «промисловий робот».

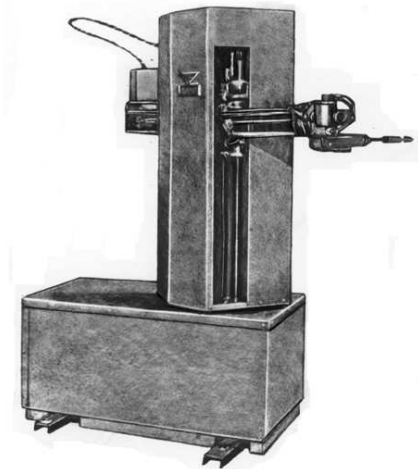


Рисунок 1.8 – Один з перших промислових роботів «Версатран»



Рисунок 1.9 – Один з перших промислових роботів «Unimate»

У той же час у США з'явилися роботи «Unimate-1900», які отримали перше застосування в автомобільній промисловості на заводах «Дженерал моторс», «Форд» та «Дженерал електрик» (рис. 1.9).

Хронологія розвитку виробництва роботів у світі: в 1967 р. розпочато випуск роботів в Англії за ліцензією США, в 1968 р. – у Швеції та Японії

(теж за ліцензіями США), у 1971 р. – у ФРН, в 1972 р. – у Франції, 1973 р. – в Італії. Перші промислові зразки сучасних промислових роботів з позиційним керуванням у СРСР були створені у 1971 р.

Маніпулятор Stanford Arm був розроблений як дослідницький прототип у 1969 році Віктором Шейнманом, на той час студентом-механіком, який працював у Стенфордській лабораторії штучного інтелекту (SAIL). Повністю електричний маніпулятор із шістьма ступенями свободи (6-DOF) керувався стандартним комп'ютером Digital Equipment PDP-6. Неантропоморфна кінематична конфігурація з одним призматичним та п'ятьма обертальними шарнірами була налаштована таким чином, щоб рівняння для вирішення кінематики робота були досить простими задля прискорення обчислення. Приводи склалися з електродвигунів постійного струму, гармонійних приводів та прямозубих редукторів, потенціометрів та тахометрів для зворотного зв'язку за положенням та швидкістю.

У 1975 році вже інженер Віктор Шейнман розробив по-справжньому гнучкий багатоцільовий маніпулятор, відомий як Programmable Universal Manipulation Arm – програмований універсальний маніпулятор – (PUMA). PUMA був здатний переміщати об'єкт і розміщувати його у будь-якій орієнтації у потрібному місці.

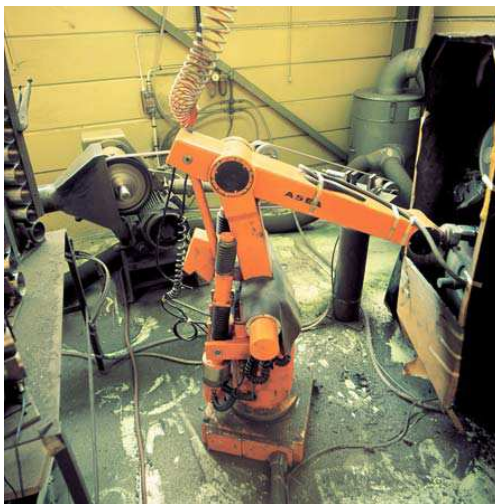


Рисунок 1.10 – Перший ПР з мікропроцесорним керуванням IRB-6

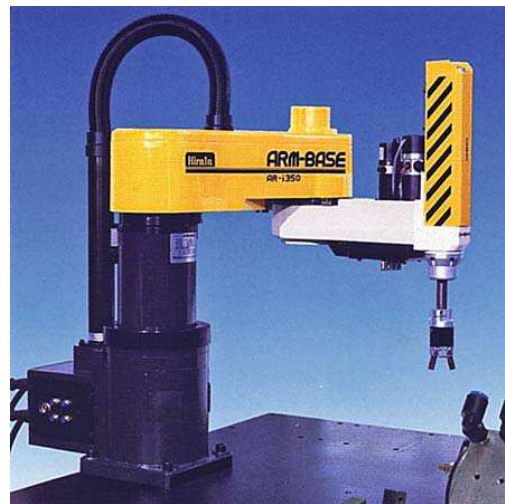


Рисунок 1.11 – Складальний ПР SCARA моделі AR-i350

У 1973 році компанія ASEA (нині ABB) представила перший ПР з мікрокомп'ютерним керуванням IRB-6, який забезпечував безперервний рух

траєкторією, що є необхідною умовою для дугового зварювання або механічної обробки (рис. 1.10). Це був перший робот, що серійно випускався, і поєднував у собі технологію повністю електричного приводу і мікрокомп'ютер для програмування і керування рухом. Робот виявився дуже надійним, конструкція міцною, а термін служби робота становив понад 20 років.

У 1978 році Хіроші Макіно з університету Яманасі, Японія, винайшов Selective Compliance Assembly Robot Arm (селективна податлива рука складального робота) – SCARA. Інноваційна недорога чотиривісна конструкція ідеально підходила для збирання дрібних деталей, оскільки кінематична конфігурація забезпечує швидкі та плавні рухи руки (рис. 1.11). Гнучкі складальні системи, засновані на використанні роботів SCARA, у поєднанні із сумісними конструкціями виробів зробили значний внесок у створення світового буму багатосерійного виробництва електроніки та споживчих товарів. Маніпулятор SCARA особливо підходить для завдань складання, оскільки він поєднує в собі жорсткість вертикальної осі і податливість горизонтальної осі. У 1978 році було зібрано перший робот Hirata AR-300. На рисунку приведена наступна модель AR-i350. Конструкція SCARA поєднує три або чотири осі обертання і одну поступальну вісь.



Рисунок 1.12 – ПР Cincinnati Milacron T3

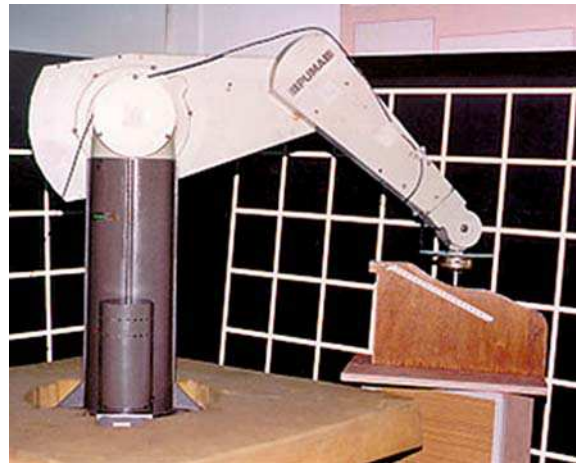
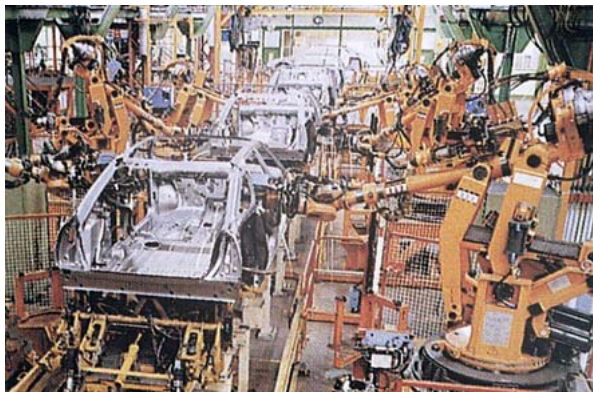


Рисунок 1.13 – ПР Unimation PUMA 560

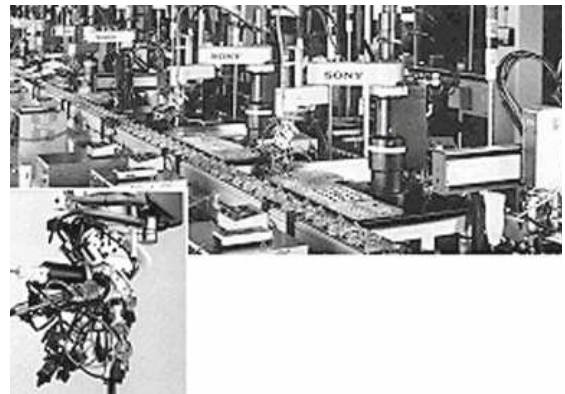
У 1974 році компанія Cincinnati Milacron представила перший робот, керований мікрокомп'ютером. Перші моделі T3 (The Tomorrow Tool) використовували гідравлічні приводи, пізніше їх замінили електродвигуни (рис. 1.12).

У 1979 р. компанія Unimation почала виробництво 6-осьових ПР PUMA 560 що наблизились по спритності до людської руки (рис. 1.13). Цей робот став однією з найпопулярніших моделей і протягом багатьох років використовувався як зразок у дослідженнях у галузі робототехніки.

У 1970-х роках інтенсивне впровадження роботів у автомобілебудування почалося в основному для точкового зварювання та обробки вантажів. Лінія точкового зварювання та лінія складання відеокaset як новаторські способи застосування ПР показані на рис. 1.14.



а – лінія точкового зварювання



б – лінія складання відеокaset

Рисунок 1.14 – Застосування ПР

Точкове зварювання швидко стало основним застосуванням роботів, оскільки ця робота була особливо стомлюючою та небезпечною для робітників. Типова лінія для зварювання кузова автомобіля моделі Citroën CX, що впроваджена у 1985 р., представлена на рис. 1.14, *а*. Автоматизована складальна лінія (впроваджена у 1989 р.) з роботами SCARA, що несе револьверну головку з багатозахоплювальним інструментом, наведена на рис. 1.14, *б*. Зазвичай один робот додає п'ять деталей, перш ніж відеокasetа переміщується на наступну станцію повністю автоматизованої лінії.

Вимоги до швидкості та ваги робота призвели до створення нових кінематичних та трансмісійних конструкцій. Зниження маси та інерції робототехнічних конструкцій було основною метою досліджень, у яких людська рука із співвідношенням ваги до навантаження 1:1 вважалася еталоном. У 2006 році цієї мети було досягнуто завдяки створенню легкого робота компанії KUKA. Цей компактний робот-маніпулятор з 7 ступенями свобо-

ди має розширені можливості керування зусиллям, імітує спритність людської руки та підходить для взаємодії людини і робота (рис. 1.15).

Інший підхід до створення легких і жорстких конструкцій реалізується з 1980-х років шляхом розробки машин з паралельною кінематикою, які з'єднують основу машини з її робочим органом за допомогою трьох-шістьох паралельних стійок. Паралельні роботи особливо підходять для досягнення найвищих швидкостей (наприклад, при комплектуванні), точності (наприклад, при механічній обробці) або відпрацюванні високих робочих навантажень.



Рисунок 1.15 – Легкий ПР KUKA



Рисунок 1.16 – ПР ABB FlexPicker

Паралельний робот фірми ABB FlexPicker для високошвидкісної комплектації наведено на рис. 1.16. Машини з паралельною кінематикою є цікавим підходом для досягнення високої жорсткості при низькій інерції, що дозволяє виконувати точні та високошвидкісні рухи. Спочатку цей 4-осьовий робот (званий «Дельта») використовувався для високошвидкісних завдань із захоплення та розміщення. Робот досягає прискорення до 10g. Однак розміри робочого простору, як правило, менші, ніж у серійних роботів або роботів з відкритим кінематичним ланцюгом, які можна порівняти за розміром.

Для покриття великих робочих просторів ідеально підходять декартові роботи. Крім традиційної конструкції, використовуються три ортогональні поступальні осі. Компанія Güdel представила портал із вигнутими напрямними у 1998 році (рис. 1.17). Ця концепція дозволяє одному або декільком роботам-маніпуляторам відстежувати криві та переміщатися у закритому просторі. Система може бути встановлена у підвісному, порталному або підлоговому виконанні. Таким чином, робочий простір робота буде значно збільшено. Це може бути особливо цінним у сфері логістики або обслуговування техніки. Сигнальна шина дозволяє керувати та координувати роботу кількох роботів з забезпеченням високої швидкості і точності.



Рисунок 1.17 – Портальний робот в декартовій системі координат



Рисунок 1.18 – Людиноподібний робот з двома маніпуляторами

При виконанні складних складальних завдань, одночасному переміщенні та обробці заготовок або поводженні з великими об'єктами вирішальне значення може мати маніпулювання двома руками. Перший комерційний робот для синхронних маніпуляцій двома руками було представлено компанією MOTOMAN у 2005 році. Оскільки дворукий робот імітує розмах і спритність людських рук, його можна розмістити на тому ж місці, де раніше роботу виконувала людина. Таким чином, капітальні витрати може бути скорочено. Він має 13 осей руху: по шість осей на кожну руку плюс одну вісь обертання основи (рис. 1.18).

Дворукий робот Motoman DA-20 забезпечує високошвидкісний рух за допомогою двох 6-вісних важелів, які забезпечують підвищену гнучкість рухів, подібну до людської. Робот також забезпечує роботу без додатково-

го оснащення: одна рука робота утримує деталь, а інша виконує операції з утримуваною деталлю.

Паралельно з промисловими роботами виникли автоматизовані керовані транспортні засоби. Ці мобільні роботи використовуються для переміщення заготовок з точки до точки або завантаження обладнання. У рамках концепції автоматизованих гнучких виробничих систем мобільні роботи стали важливою частиною гнучкості маршрутизації. Спочатку мобільні роботи рухалися на підготовленій підлозі (вбудовані кабелі або магніти для керування рухом). У великому виробництві та логістиці використовуються мобільні роботи, що вільно переміщуються. Зазвичай їх навігація ґрунтується на лазерних сканерах, які створюють точну двомірну карту реальної обстановки для самостійної локалізації та обходу перешкод. Спочатку були реалізовані комбінації мобільних роботів та роботизованих маніпуляторів для автоматичного завантаження та розвантаження верстатів.

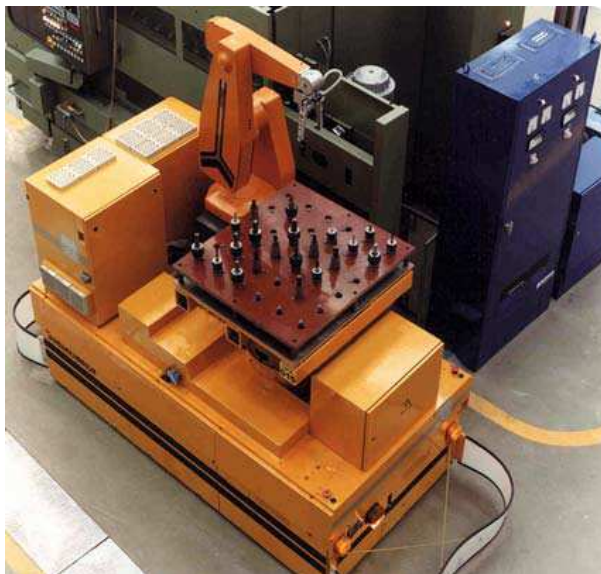


Рисунок 1.19 – Мобільний робот MORO з маніпулятором



Рисунок 1.20 – Автоматизований підйомник MLR

Мобільний робот MORO для машинного завантаження/розвантаження, що розроблений у 1984 р., наведений на рис. 1.19. Це був один із перших прототипів, у якому рука робота поєднувалася з мобільною платформою, що з'єднана з прокладеним у підлозі кабелем. Мобільні маніпулятори переважно використовуються на високоавтомати-

зованих виробничих об'єктах із чистими приміщеннями для автоматичного завантаження та розвантаження технологічного обладнання.

Автоматизований вилковий навантажувач MLR (рис. 1.20) поєднує в собі ручне керування з повністю автономною навігацією і завантаженням/розвантаженням коробок і піддонів. Лазерний сканер, що використовує світловідбиваючі стрічки або інші орієнтири (стіни, колони), дозволяє уникнути зіткнень з перешкодами.

Динаміка зростання парку промислових роботів у світі в 20 столітті наведена у табл. 1.1. У середньому на рік парк роботів зростає на 20–30% і в 1998 році він вперше перевищив 1 млн. шт.

Таблиця 1.1 – Темпи зростання парку роботів

Рік	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Кількість (тис. шт.)	8,5	30	90	400	800	1200

Технічний прогрес у розвитку роботів йде, насамперед, у напрямку вдосконалення систем керування. Перші ПР мали програмне керування, переважно запозичене від верстатів з числовим програмним керуванням. Від них же були взяті приводи. Ці роботи одержали назву роботів першого покоління.

Друге покоління роботів – роботи з адаптивним керуванням. Це роботи, що забезпечені сенсорними системами, головними з яких є системи технічного зору (СТЗ). Промислові роботи з розвиненими сенсорами, включаючи технічний зір, та мікропроцесорним керуванням з'явилися на ринку і почали отримувати практичне застосування у 1980–1981 роках насамперед на складанні, дуговому зварюванні, контролі якості, для взяття неорієнтованих предметів, наприклад, з конвеєра. Це забезпечені відеосистемами роботи «Пума», «Юнімейт», «Цинциннаті мілакрон», складальні робототехнічні системи фірм «Хітачі», «Вестингауз» «Дженерал моторс». Частка таких роботів у загальному парку роботів неухильно зростає і наближається до 50% незважаючи на те, що ці роботи в кілька разів дорожчі за роботи з програмним керуванням і значно складніші в обслуговуванні. Однак це окупається значно більшими функціональними можливостями, а отже, і областями застосування.

У 1967 р. в США (Стенфордський університет) був створений лабораторний макет робота, забезпеченого технічним зором і призначеного для дослідження системи «око-рука», здатної розпізнавати об'єкти зовнішнього середовища і оперувати ними відповідно до завдання.

У 1968 р. в СРСР був створений телекерований від ЕОМ підводний робот «Мантa» із сенсорним пристроєм захоплення, а в 1971 р. – його варіант з технічним зором та системою цілевказівки на телеекрані (рис.1.21).

Третє покоління роботів – це інтелектуальні роботи, тобто роботи з інтелектуальним керуванням. Як правило, ці роботи – предмет досліджень та дослідницьких розробок.



Рисунок 1.21 – Один з перших підводних роботів «Мантa» з системою технічного зору і маніпулятором, керованим від ЕОМ

У 1969 р. в США (Стенфордський науково-дослідний інститут) в рамках робіт з штучного інтелекту був розроблений експериментальний макет рухомого робота «Шейкі» з розвиненою системою сенсорного забезпечення, включаючи технічний зір, та елементами штучного інтелекту, що дозволило роботу цілеспрямовано пересуватись у заздалегідь невідомій обстановці, самостійно приймаючи необхідні для цього рішення (рис. 1.22).

На рисунку позначено: 1 – привод колеса 9; 2 – ролик; 3 – датчик контакту; 4 – пристрій керування телевізійною камерою; 5 – бортовий пристрій керування роботом, пов'язаний зі стаціонарною ЕОМ; 6 – нерухомий оптичний дальномір; 7 – антена системи радіозв'язку; 8 – рухома телевізійна камера; 9 – одно з двох мотор-колiс.

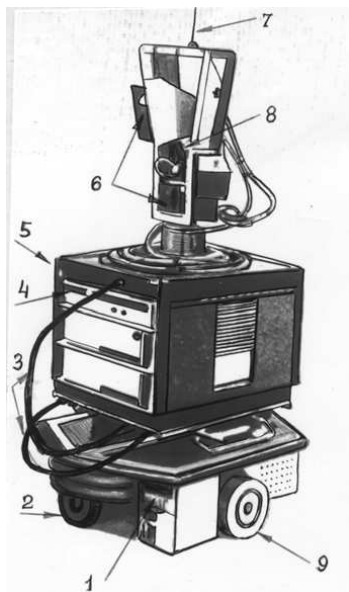


Рисунок 1.22 – Лабораторний інтегральний рухомий робот «Шейкі»

У 1971 р. в Японії також були розроблені експериментальні зразки роботів з технічним зором та елементами штучного інтелекту: робот «Хівіп» фірми «Хітачі» (Японія), здатний самостійно здійснювати механічне складання простих об'єктів за пред'явленим кресленням (рис. 1.23), і робот ЕТЛ-1 електротехнічної лабораторії ЕТЛ (Японія) (рис. 1.24).

У 1971 р. в СРСР був створений експериментальний зразок інтегрального робота, забезпеченого розвинутою системою сенсорів, включаючи технічний зір та мовне керування (рис. 1.25).

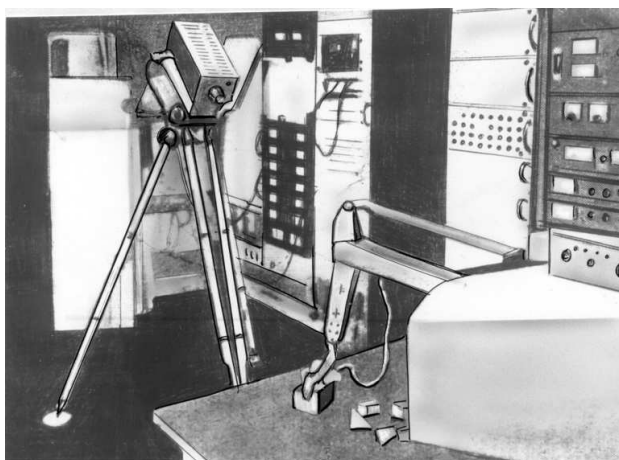


Рисунок 1.23 – Експериментальний робот «Хівіп»



Рисунок 1.24 – Експериментальний електромеханічний робот ЕТЛ-1

У цей період і в ряді інших країн створюють подібні експериментальні установки, так звані інтегральні роботи, що включають маніпулятори, керовані ЕОМ, різні засоби сенсорів і спілкування з людиною-оператором, які призначені для проведення досліджень у галузі створення роботів наступних поколінь, і навіть штучного інтелекту.

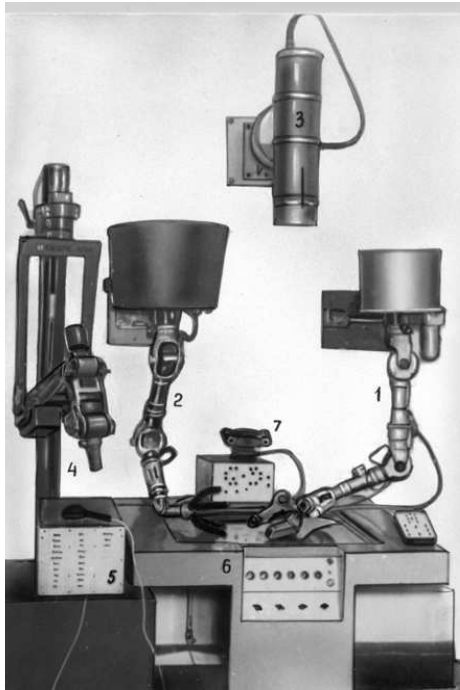


Рисунок 1.25 – Експериментальний робот

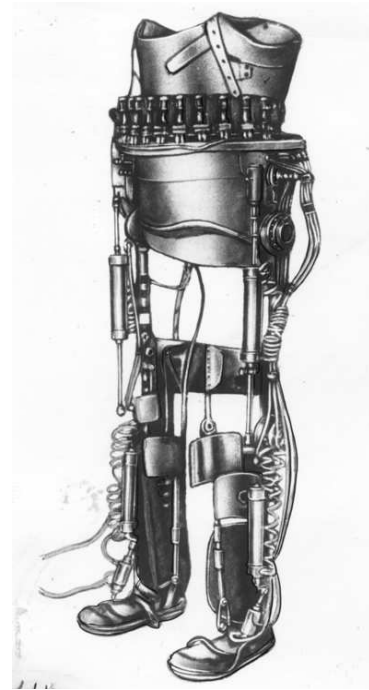


Рисунок 1. 26 – Екзоскелетон

Одночасно розгорнулися роботи в новій специфічній області робототехніки – крокуючі машини як принципово новий транспортний засіб підвищеної прохідності, зразком для якого є ноги тварин і людини. Були створені експериментальні зразки чотири- та шестиногих транспортних машин, протезів ніг людини, так званих екзоскелетонів, для паралізованих та тяжкохворих (рис. 1.26).

1.1.3. Тенденції розвитку робототехніки у світі

До 2007 року еволюція промислових роботів ознаменувалася такими основними тенденціями:

- середня ціна за одиницю робота впала приблизно до однієї третини від його еквівалентної ціни у 1990 році, а це означало, що автоматизація стала доступнішою. У той же час значно покращилися параметри продуктивності роботів, такі як швидкість, вантажопідйомність та середній час відпрацювання. Ці покращення забезпечують більш швидку окупність інвестицій, особливо при дрібносерійному виробництві;
- готові компоненти для персональних комп'ютерів (ПК), споживчого програмного забезпечення (ПЗ) та ІТ-індустрії сприяли покращенню спів-

відношення продуктивності та вартості. Сьогодні більшість виробників інтегрують у свої контролери процесори на базі ПК, а також програмне забезпечення для програмування, зв'язку, моделювання та обслуговування великих ІТ-ринків;

- кілька роботів можуть бути запрограмовані та синхронізовані в режимі реального часу за допомогою одного контролера, що дозволяє роботам точно взаємодіяти при обробці однієї деталі;
- системи технічного зору для ідентифікації об'єктів, локалізації та контролю якості все частіше стають невід'ємною частиною контролера робота;
- роботи об'єднані в мережу польових шин або Ethernet для керування, налаштування та обслуговування;
- нові механізми фінансування дозволяють кінцевим користувачам орендувати роботів або навіть працюючий роботизований осередок, щоб знизити ризики або заощадити інвестиційний капітал;
- навчання та освіта стали важливими послугами для кінцевих користувачів, які сприяють підвищенню визнання робототехнічних технологій. Спеціальні мультимедійні матеріали та курси спрямовані на навчання промислових інженерів та робочої сили навичкам ефективного планування, програмування, експлуатації та обслуговування промислових роботизованих робочих місць.

Майже у всіх технічно розвинених країнах створено національні асоціації з робототехніки. Існують такі програми й на міжнародному рівні.

Міжнародна федерація робототехніки (International Federation of Robotics – IFR) щорічно відстежує показники рівня роботизації в різних країнах. Традиційно IFR поділяє роботи на промислові та сервісні (рис. 1.27). При цьому часто не відображається взаємне проникнення технологій: сервісні роботи все частіше починають використовуватися в промислових галузях, а промислові роботи часто застосовуються в типово сервісних організаціях.

IFR використовує термін «Промисловий робот», що ґрунтується на визначенні Міжнародної організації зі стандартизації: **«автоматично керований, перепрограмований багатоцільовий маніпулятор, програмований по трьох або більше осях, який може бути або нерухомий, або прикріплений до мобільної платформи, що використовується для автоматизації у промисловому середовищі»** (ISO 8373:2021).

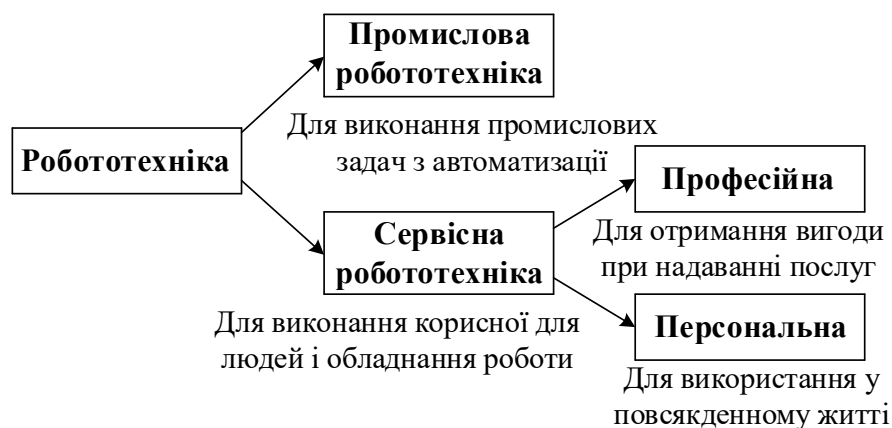


Рисунок 1.27 – Класифікація робототехніки

«Сервісний робот» – це *«робот для особистого або професійного використання, що виконує корисні завдання для людей або обладнання»* (ISO 8373).

До роботів не відносяться: програмне забезпечення (боти, штучний інтелект), віддалено керовані дрони, голосові помічники, автономні автомобілі тощо.

За оцінками IFR, обсяг світового ринку промислових роботів за підсумками 2016 року становив \$35 млрд., загальна кількість роботів у світі в експлуатації – 1,6 млн. штук. У 2017 р. у світі було впроваджено близько 400 тис. промислових роботів, а у 2018 р. – понад 422 тис. на суму 16,5 млрд. доларів США без програмного забезпечення та периферійних пристроїв (рис. 1.28).

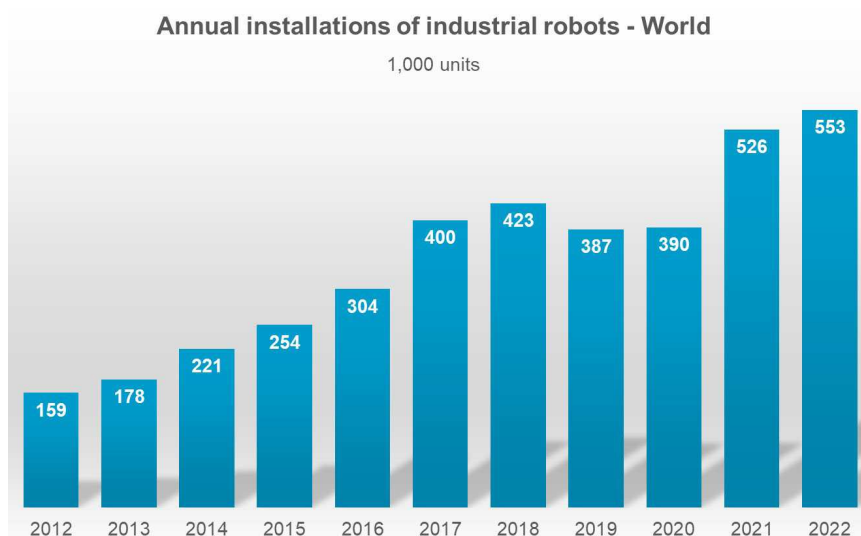


Рисунок 1.28 – Кількість роботів, що щороку впроваджуються у світі

У 2019 році кількість встановлених роботів у світі зменшилася на 12% і становила понад 373 тис. штук на суму 13,8 млрд. доларів США (без програмного забезпечення та периферійних пристроїв). Загальна кількість роботів у світі становила близько 2,72 млн. штук (+ 12%).

У 2020 році кількість встановлених роботів збільшилась лише на 3 тис. штук. У 2021 році відбувся значний стрибок і кількість встановлених роботів у світі перевищила відмітку в 500 000 одиниць та досягла значення у 526 144 штук.

У доповіді IFR від 26.09.2023 р. йдеться, що у 2022 році кількість встановлених роботів у світі досягла нового рекордного рівня у 553 052 штук і збільшилась на 5%. З 2017 по 2022 рік середнє зростання парку роботів за рік складало 7 %. Загальна кількість роботів у світі становить близько 3,9 млн. штук (рис. 1.29).

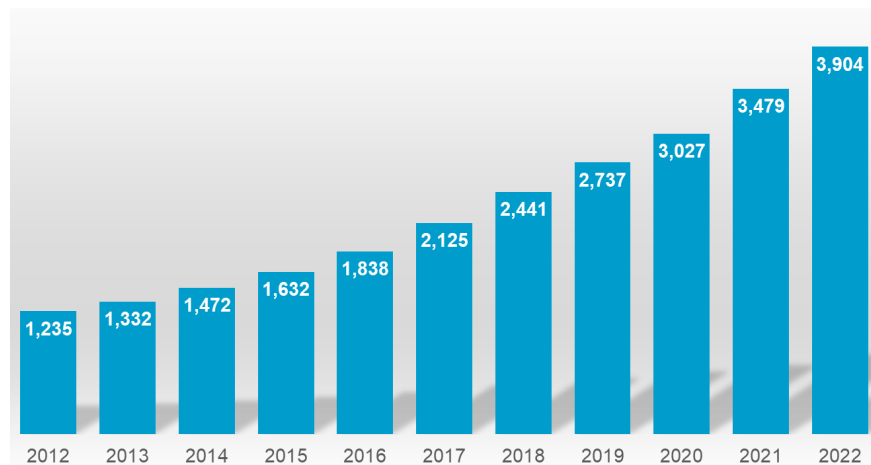


Рисунок 1.29 – Кількість встановлених ПР у світі з 2012 по 2022 роки

З 2017 року оперативний парк промислових роботів зростає в середньому на 13% на рік. Операційні запаси промислових роботів у Китаї з 2017 року зростають у середньому на 25% щороку. Ці запаси перевищили мільйонну позначку у 2021 році та 1,5 млн одиниць у 2022 році, коли вони зросли ще на 22%. Це становить 38% світових запасів. Операційні запаси Японії становили 414 281 одиниць у 2022 році. Операційний запас роботів у Європі становив 728 391 одиниць, а Америці – 491 535 одиниць (+9%).

Впровадження промислових роботів у Європі, Америці та Азії (включаючи Австралію та Нову Зеландію) показано на рис. 1.30.

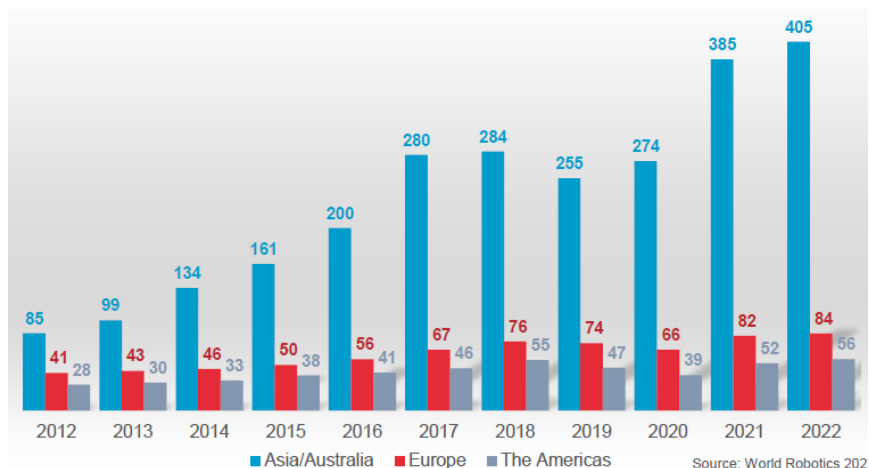


Рисунок 1.30 – Кількість роботів, що впроваджені по регіонах з 2012 по 2022 роки

Азія є найбільшим у світі ринком промислових роботів. У 2022 році було встановлено загалом 404 578 пристроїв, що на 5% більше, ніж роком раніше. 73% встановлених у 2022 році ПР, було встановлено в Азії (у 2021 – 74%). З 2017 по 2022 рік щорічно встановлювана кількість роботів збільшувалася в середньому на 8%. Встановлення роботів на другому за величиною ринку в Європі збільшилося на 3% до 84 226 одиниць. Середньорічний темп зростання з 2017 до 2022 року становить 5%. Темпи зростання були ще вищими в Америці: у 2022 році було встановлено 56 053 роботів. Це на 8% більше ніж рік тому.

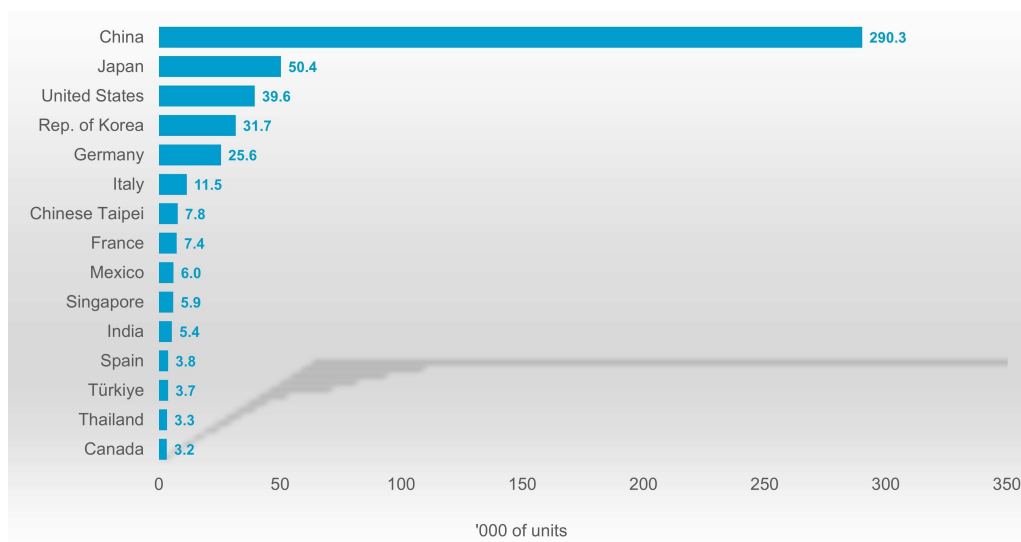


Рисунок 1.31 – Рейтинг країн-споживачів ПР в 2022 році

Існує п'ять основних ринків ПР: Китай, Японія, США, Республіка Корея та Німеччина (рис. 1.31). На ці країни припадає 79% (437 599) встановлених роботів. Три найбільших ринки встановлених ПР з топ-5 – в Азії.

Китай є найбільшим у світі ринком промислових роботів з 2013 року. У 2022 році кожен другий встановлений робот знаходиться у Китаї (рис. 1.32). У 2012 році доля Китаю складала 14%. Кількість встановлених ПР збільшилось на 5% і досягла значення 290 258 одиниць. Кількість встановлених ПР у Японії 50 413 одиниць (+9%). Для порівняння у 2018 р. в Китаї було запроваджено 140 тис. ПР, у Японії – 50 тис. У 2022 р. в США встановлено 39 600 ПР, що на 7% вище, ніж у 2021 р.

Annual installations of industrial robots in 2022

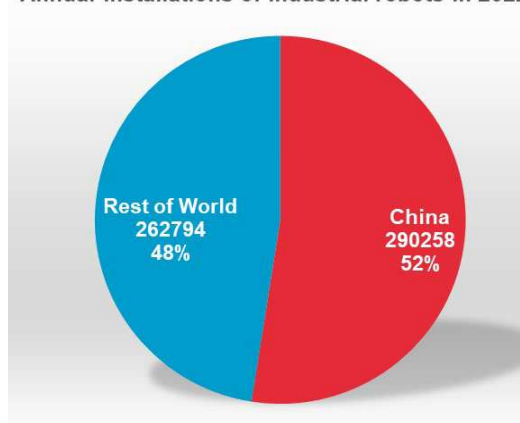


Рисунок 1.32 – Співвідношення встановлених ПР у 2022 р. у Китаї та інших країнах

У 2018 р. США вийшли на третє місце у рейтингу з рекордною кількістю встановлених ПР 40 373 одиниць. В Республіці Корея кількість встановлених ПР майже не змінилась – 31716 одиниць; (+1%). Німеччина є п'ятим за величиною ринком промислової робототехніки у світі та №1 у Європі. У 2022 р. кількість встановлених роботів зросла на 5% і досягла 25600 одиниць, наблизившись до рекордного показника (26723 штук у 2018 р.). Роботизація у Німеччині переважно визначається автомобільною промисловістю.

Постачання ПР по галузях промисловості у 2016 р. наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Розподіл постачання роботів по галузях промисловості

Галузь промисловості	Обсяг, %
Автомобільна промисловість	35
Електрика/електроніка	31
Металургія	10
Виробництво хімічних продуктів і пластмаси	7
Харчове виробництво	3
Інші (інформація про сферу застосування відсутня)	14

З 2016 по 2019 р.р. автомобільна промисловість залишалась найбільшою галуззю з більш ніж 30% від загального числа установок ПР, випереджаючи електротехніку/електроніку, металообробку, пластмаси та хімічні продукти, продукти харчування та напої. З 2013 до 2018 року установки роботів в автомобільній промисловості збільшувалися в середньому на 13% щорічно. За даними IFR у 2018 р. 79% ПР в автомобільній промисловості були встановлені на наступних 5 ринках:

- Китай – 39 351;
- Японія – 17 346;
- Німеччина – 15 673;
- США – 15 246;
- Південна Корея – 11 034.

Застосування роботів в електротехнічній та електронній промисловості (включаючи комп'ютери та обладнання, радіо, телебачення та пристрої зв'язку, медичне обладнання, прецизійні та оптичні інструменти) збільшувалося в середньому на 24% щороку з 2013 року. У 2016-2017 роках вони становили 31% від загальної кількості установок. У 2018 році світовий попит на електронні пристрої та компоненти суттєво знизився, найімовірніше, через китайсько-американську торговельну кризу. Кількість установок роботів у цій галузі знизилася на 14% з пікового рівня у 2017 році до 105 153 одиниць у 2018 році та до 88 тис. у 2019 р.

Металургійна промисловість та машинобудування були третім за величиною споживачем роботів у 2018 р., на них припадало 10% загального попиту. Кількість установок зросла у 2018 р. до приблизно 43500 одиниць.

З 2020 року на світовому ринку роботизації лідируючою галуззю є електротехнічна та електронна промисловість (рис. 1.33). У 2022 році 156936 роботів було встановлено у виробництві побутової техніки, електротехніки, напівпровідників, сонячних батарей, комп'ютерів, телекомунікаційних пристроїв, а також відео- та електронних розважальних товарів. Це на 10% більше, ніж минулого року, і це найвищий рівень за всю історію. З 2017 року кількість встановлених роботів щорічно збільшувалась на 5 %.

Автомобільна промисловість втратила позиції найбільшого споживача ПР у 2020 році. Незважаючи на впевнений темп зростання 16% до нового пікового рівня 136 130 одиниць у 2022 році, ця галузь залишилася на другому місці. З 2017 по 2022 рік щорічні установки в автомобільній промисловості збільшувалися в середньому на 2% щороку.

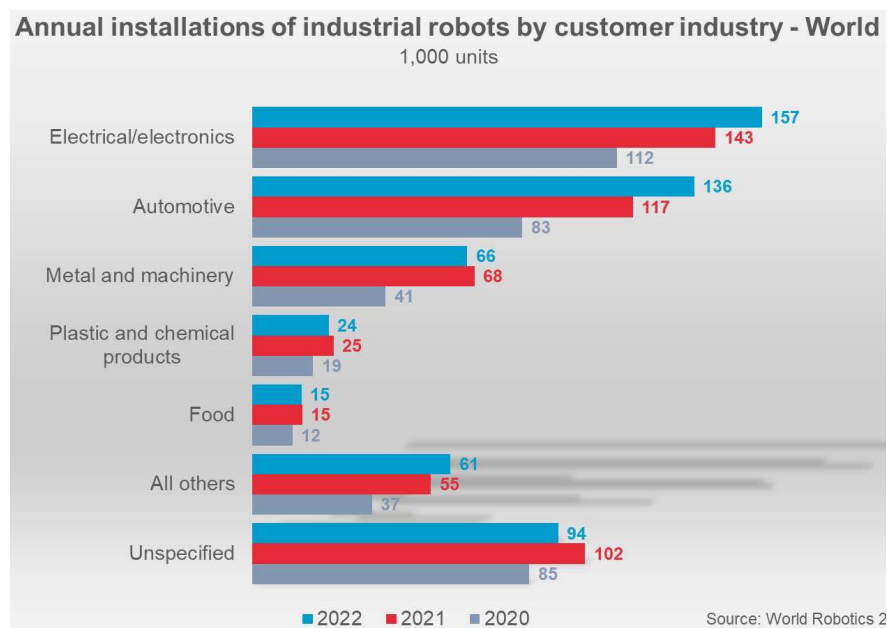


Рисунок 1.33 – Розподіл ПР за галузями промисловості 2020-2022

За останні 10 років значними темпами відбувається роботизація в загальній промисловості. Кількість встановлених роботів досягла майже 50% (рис. 1.34).

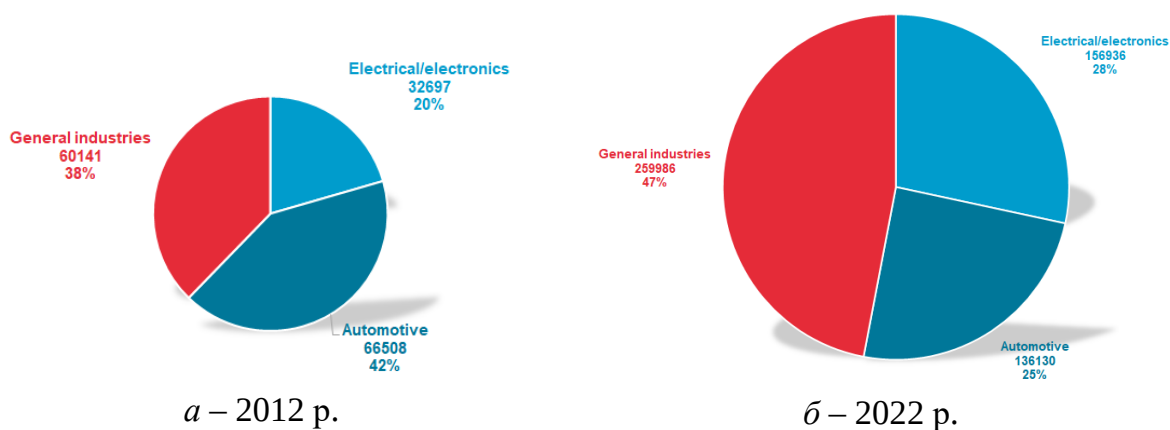


Рисунок 1.34 – Співвідношення встановлених ПР за галузями промисловості

На рис. 1.35 показано розподіл ПР по сферах застосування у 2020-2022 роках. Лідируюче положення займає маніпулювання (обслуговування) з часткою у 48%. Далі зі значним відставанням слідує зварювання та складання.

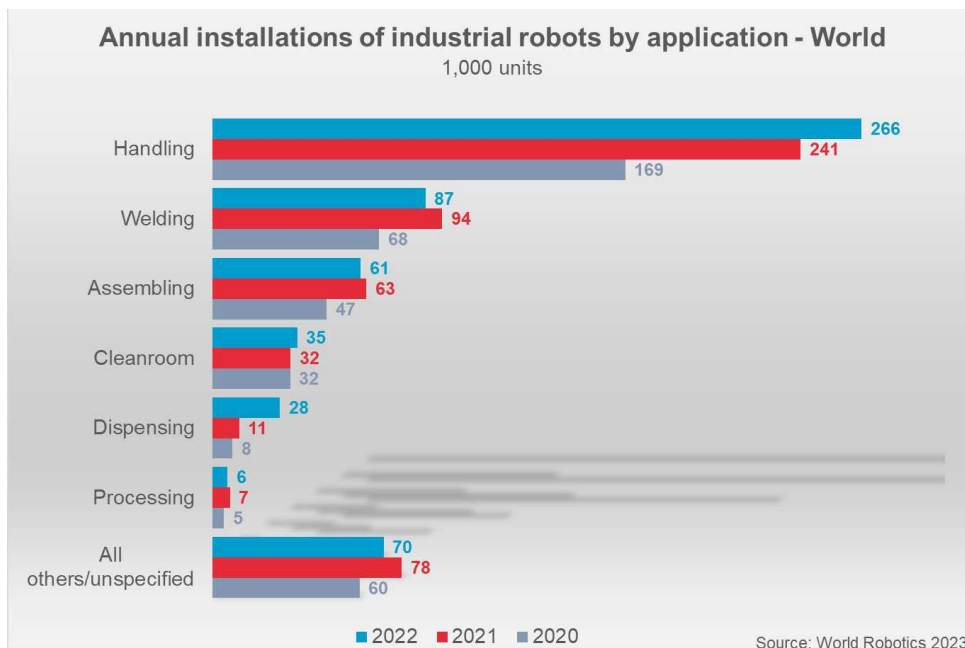


Рисунок 1.35 – Розподіл ПР за областями використання 2017-2019

Для порівняння рівня роботизації в різних країнах застосовується показник щільності роботів – стандарт, завдяки якому можна врахувати відмінності у ступені автоматизації у обробній промисловості по всьому світу.

На рис.1.36 наведено дані про середню кількість промислових роботів на 10 тисяч співробітників у світовій обробній промисловості з 2013 по 2022 рік. У 2022 році середня щільність роботів в обробній промисловості склала 151 робот на 10 000 співробітників.

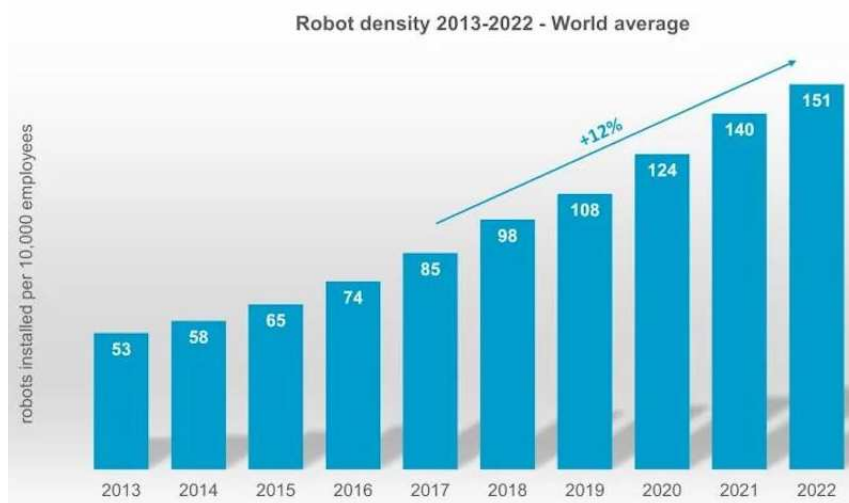


Рисунок 1.36 – Кількість встановлених ПР на 10000 робочих у світі

У 2016 році лідирувала Південна Корея – на 10 тисяч людей-робітників там припадало 631 робот. Найбільше ПР було встановлено на підприємствах автомобільної та електротехнічної промисловості. Слідом за Південною Кореєю йшов Сінгапур – 488 роботів. Близько 90% ПР задіяно в електротехнічній промисловості. Німеччина посідала перше місце в Європі та третє місце у світі – 309 роботів. Згідно з даними Міжнародної федерації робототехніки, в 2016 році 41% продажів роботів у Європі припадав на Німеччину. У багатьох європейських країнах на виробництві було задіяно набагато більше роботів, ніж у середньому у світі. У Швеції – 223, Данії – 211, Італії – 185, у Бельгії – 184, у Великобританії – 71 робот. Замикали рейтинг топ-44 країн: Хорватія – 6, Індонезія – 5, Філіппіни – 3, Індія – 3.

За даними KNN Systems (партнер фірми KUKA) в Україні ПР використовують в автомобільній, хімічній та електронній промисловості, для процесів різання і зварювання, фасування, пакування, палетування. Роботизовані комплекси застосовують підприємства: Henkel, Procter&Gamlbe, Carlsberg Ukraine та «АвтоЗАЗ». У 2016 р. в Україні було куплено 15 вживаних і 5 нових роботів. На 10 тисяч пар робочих рук в Україні припадала половинка робота.

Значення середньої щільності роботів у деяких країнах у 2022 році показано на рис. 1.37. До найбільш автоматизованих країн за щільністю роботів входять: Республіка Корея (1012 роботів на 10 000 співробітників), Сінгапур (730 од.) та Німеччина (415 од.). У Кореї щільність роботів збільшується в середньому на 6% щороку з 2017 року. Основні галузі роботизації – електронна та автомобільна промисловість.

Завдяки великій кількості встановлених роботів останніми роками середня щільність роботів в Азії зросла на 15% у середньому на рік з 2017 р. до 168 одиниць на 10000 співробітників обробної промисловості у 2022 р. У глобальному масштабі економіки Кореї, Сінгапуру, Японії, материкового Китаю, Гонконгу та Китайського Тайбею входять до десятки найбільш автоматизованих країн. За той же період щільність роботів у Європі зросла на 8% у середньому до 136 одиниць на 10000 співробітників (у ЄС щільність роботів становить 208 одиниць, а Німеччина, Швеція та Швейцарія входять до десятки світових лідерів.). В Америці цей показник становив 120 роботів на 10000 співробітників (+7% середньорічного темпу зростання з 2017 р.). Щільність роботів у Північній Америці становить 188 одиниць. США входять до десятки найбільш автоматизованих країн.

Robot density in the manufacturing industry 2022

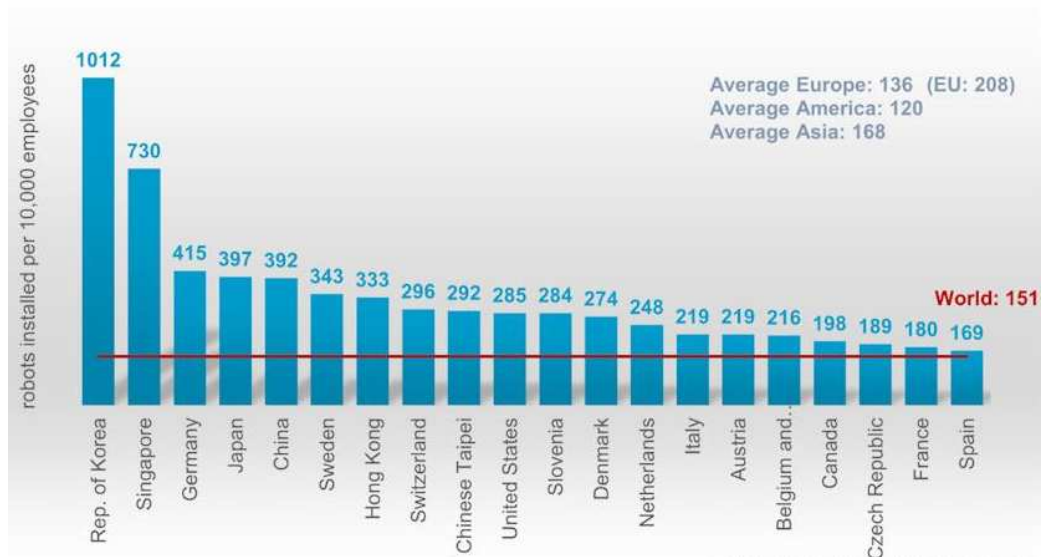


Рисунок 1.37 – Кількість встановлених ПР на 10000 робочих в промисловості в 2022 році

Рейтинг світових лідерів компаній-виробників промислових роботів станом на 2018 р. показаний на рис. 1.38 (зазначено загальну кількість виготовлених роботів). У 2022 році компанії лідери зберегли свої позиції. Загальна кількість виготовлених роботів компанії Fanuc – перевищила 500 000 одиниць, а компанії Yaskawa Motoman – близько 500 000.

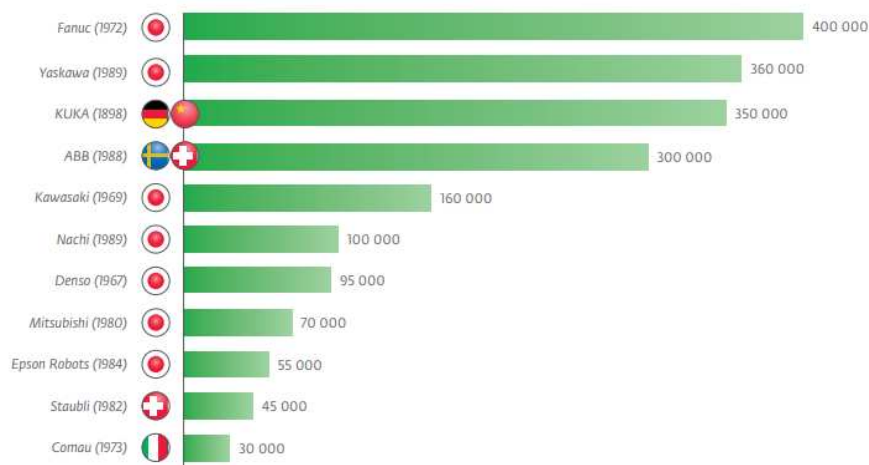


Рисунок 1.38 – Крупніші компанії-виробники промислових роботів

Колаборативні промислові роботи призначені для виконання завдань у співпраці із працівниками в промисловому секторі. IFR визначає два типи роботів, призначених для спільного використання. Одна група охоплює роботів, призначених для спільного використання, які відповідають нормі Міжнародної організації зі стандартизації 10218-1, що визначає вимоги та рекомендації щодо внутрішньої безпечної конструкції, захисних заходів та інформації для використання промислових роботів. Інша група включає роботів, призначених для спільного використання що не відповідають вимогам ISO 10218-1. Це не означає, що ці роботи є небезпечними. Вони можуть відповідати різним стандартам безпеки, наприклад, національним або внутрішнім стандартам. Основні типи спільної роботи ПР і людини наведені на рис. 1.39.

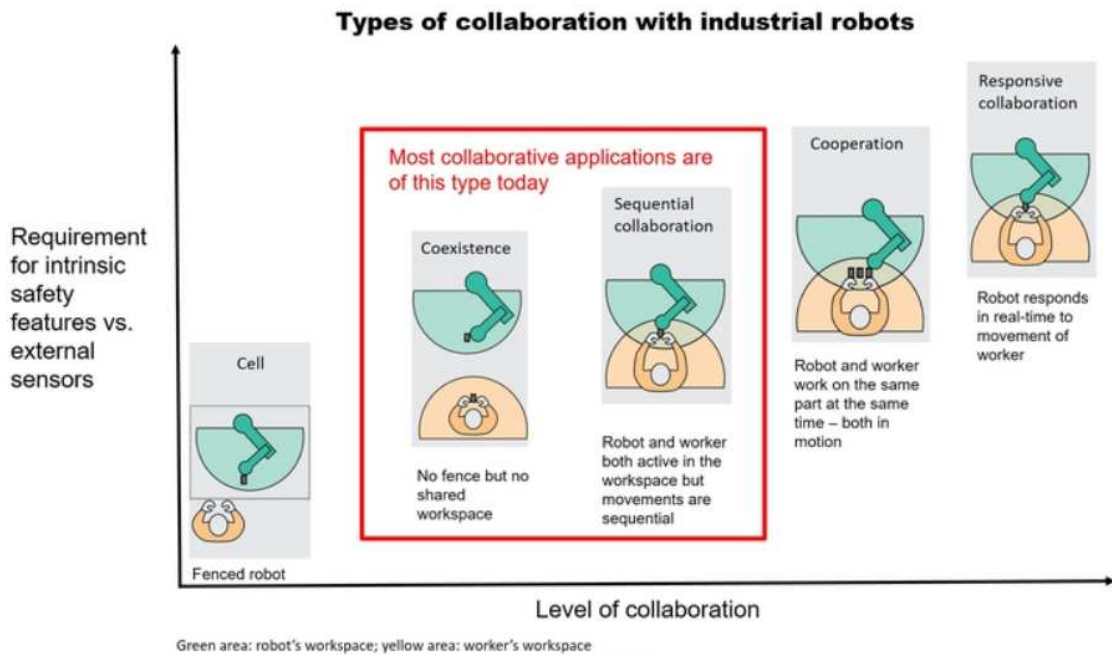


Рисунок 1.39 – Типи спільної роботи з промисловими роботами

Існують значні відмінності у типах роботів для спільного використання, що відповідають вищевказаним специфікаціям, а також у рівні контакту між роботом та працівником. На одному кінці технічного спектру знаходяться традиційні промислові роботи, що працюють в окремому робочому просторі, куди працівники можуть періодично входити, не відключаючи живлення робота та заздалегідь захищаючи виробничий осередок – трудо-

містка процедура, яка може коштувати тисячі доларів за хвилину простою машини. Робочий простір робота може бути оснащений датчиками, які виявляють рух людини та забезпечують роботу робота на дуже низькій швидкості або зупинку, коли працівник знаходиться в межах відведеного робочого простору. На іншому кінці спектру знаходяться промислові роботи, розроблені спеціально для роботи разом із людьми у загальному робочому просторі. Ці роботи, яких часто називають «коботами», оснащені безліччю технічних функцій, які гарантують, що вони не завдадуть шкоди при прямому контакті працівника навмисно чи випадково. Ці функції включають легкі матеріали, закруглені контури, набивку, «обшивку» (набивку з вбудованими датчиками) і датчики на основі або суглобах робота, які вимірюють і контролюють силу і швидкість і гарантують, що вони не перевищать певні граничні значення у разі контакту.

Ринок колаборативних роботів постійно зростає. IFR збирає щорічну статистику щодо колаборативних роботів, до якої входять промислові роботи, спроектовані та призначені для спільного використання відповідно до стандарту ISO 10218-1. У 2022 році кількість новостворених колаборативних роботів зросла на 31% майже до 55 тисяч одиниць. Це становило 9,9% від загальної кількості встановлених промислових роботів (рис. 1.40).

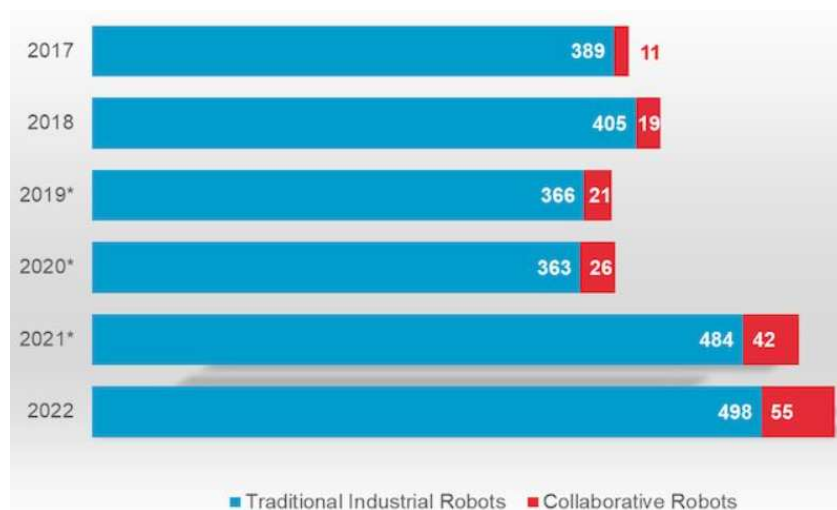


Рисунок 1.40 – Темпи зростання колаборативних і промислових роботів

У статистичному звіті IFR відзначається що у 2022 році кількість сервісних роботів для професійного використання склала 158 тис. одиниць.

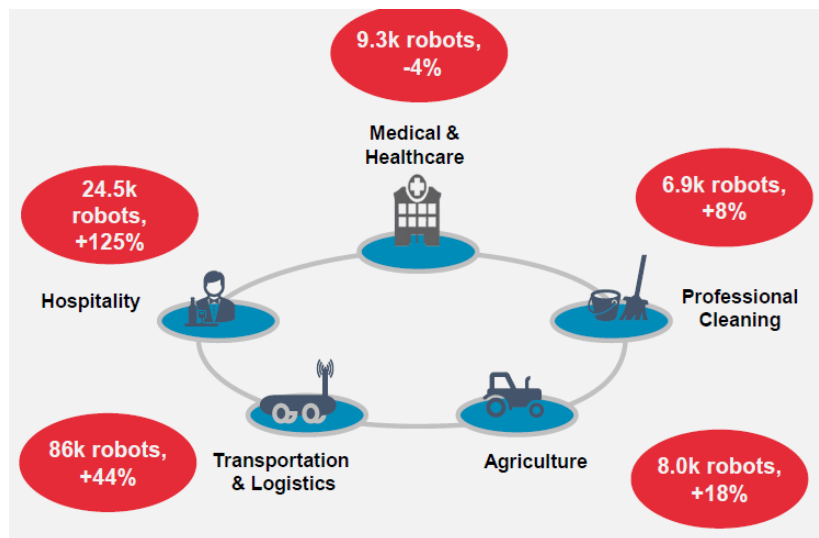


Рисунок 1.41 – Топ-5 галузей використання сервісних роботів

Основні галузі застосування цих роботів наведені на рис. 1.41:

- логістика та транспортування – 86000 одиниць;
- обслуговування – 24500 одиниць;
- медицина та охорона здоров'я – 9300 одиниць;
- сільське господарство – 8000 одиниць;
- професійне прибирання – 6900 одиниць.

1.2. Соціально-економічна ефективність застосування засобів робототехніки

Розглядання питання про ефективність і відповідно перспективність будь-якого нового науково-технічного напрямку чи нового виду техніки необхідно починати з зіставлення його з основними цілями суспільства, а потім уже переходити до оцінки його суто економічної ефективності. Справді, можуть бути такі науково-технічні ідеї, які, даючи певне і навіть дуже велике підвищення ефективності конкретного виробництва, принципово несумісні із загальною метою та принципами громадського виробництва або чимось суперечать їм.

Наприклад, застосування конвеєра та деяких видів напівавтоматичного обладнання, підвищуючи продуктивність, різко послаблює творчий ха-

ракти роботи. Організація виробництва на конвеєрі веде до такої диференціації операцій, при якій люди, що працюють на ньому, виконують однакові, монотонні рухи фактично без необхідності докладання будь-яких інтелектуальних зусиль. Тим не менш, диференціація та спрощення трудових операцій мають важливий позитивний наслідок: саме вони створюють передумови переходу до повністю автоматичного виробництва, у тому числі з використанням промислових роботів, що дозволяє взагалі виключити працю людини під час їх виконання.

Зростання продуктивності праці та, відповідно, розширення обсягу виробленого сукупного продукту в цілому ряді випадків ведуть до збіднення змісту праці та зниження її престижності. Вихід із зазначеного протиріччя полягає у переході до принципово нових технічних рішень, що дозволяють звільнити людину від одноманітних, фізично важких та позбавлених інтелектуального змісту операцій.

Подальше зростання виробництва на основі використання досягнень сучасної науки та техніки обмежується можливостями людини. Це стосується збільшення інтенсивності технологічних процесів, зростання кількості процесів, що протікають в агресивних та шкідливих для людини середовищах (хімія, атомна енергетика та ін.). Щоб зняти такі обмеження, необхідно передати частину трудових операцій новим технічним засобам.

Не менш істотні обмеження виникають і щодо управління якістю продукції, що виробляється. Практика показує, що у виробництві з переважанням ручної праці практично неможливо гарантувати стабільно високу якість продукції.

Робототехніка відноситься саме до тих науково-технічних напрямків, за допомогою яких можуть бути подолані зазначені об'єктивні протиріччя у розвитку сучасного виробництва між зростаючою спеціалізацією трудових операцій, їх інтенсифікацією та необхідністю посилення змістовності праці. Робототехніка, позбавляючи людину важкої і небезпечної праці, з іншого боку звільняє виробництво від безпосередньої участі у ньому людей, і тим самим знімає пов'язані з їх участю обмеження, що перешкоджають подальшій інтенсифікації виробничих процесів і впровадженню нових технологій, які принципово не допускають присутності людей.

Досвід застосування роботів на виробництві показав, що ця форма автоматизації дозволяє вирішити актуальні проблеми соціального, економічного та технічного характеру.

Соціальний аспект застосування роботів характеризується насамперед вирішенням відомої суперечності між високою підготовкою робочих кадрів, що залучаються в сучасне виробництво, та труднощами у забезпеченні їх цікавою, кваліфікованою та перспективною роботою. Робототехніка – від етапу виробництва та до експлуатації досить цікава галузь для кваліфікованих робітників. Не менш важливо, що застосування роботів дозволяє видалити людину із зон, небезпечних або загрозливих здоров'ю, і звільнити її від втомлюваної монотонної праці.

Економічні аспекти розвитку робототехніки визначаються, з одного боку, яскраво вираженою тенденцією до безперервного зростання вартості робочої сили та обмеженням її ресурсів у промислово розвинених країнах, з іншого – відносним здешевленням систем та засобів автоматизації навіть у разі зростання їх функціональних можливостей. Це дає підстави прогнозувати подальше широкє впровадження ПР у виробництво.

Методики розрахунку економічної ефективності застосування ПР повинні враховувати умови конкретної технологічної ділянки, на якій буде використаний робот, а також специфічні особливості, зумовлені тим, що об'єктами порівняння є машина та людина.

Застосування ПР вимагає достатньо кваліфікованого обслуговуючого персоналу та спеціального оснащення, вартість якого становить 20–40% від вартості робота. Однак робот не стомлюється, працює з постійним вищим ритмом і практично нечутливий до умов праці. Тому використовуючи роботи можна підвищити продуктивність, суттєво збільшити стабільність якості продукції, що випускається, знизити відсоток браку і підняти коефіцієнт використання основного технологічного обладнання.

При цьому важливо підвищувати ефективність використання основного технологічного устаткування ділянки з роботом. Для цього необхідно забезпечити виконання критерію оптимального узгодження часових характеристик елементів такої ділянки.

Технічний аспект проблеми, що розглядається, обумовлений, з одного боку, зростанням номенклатури виробів, що випускаються, і зменшенням серійності виробництва, а з іншого – завданнями його автоматизації. Нині найвищого рівня автоматизації досягнуто у масовому виробництві. У серійному та дрібносерійному виробництві має місце протиріччя між порівняно високим рівнем автоматизації основних технологічних процесів та відносно

низьким – на допоміжних операціях. Особливо помітно проявляється це протиріччя при використанні верстатів з ЧПК.

Універсальність роботів, їх автономність і гнучкість в керуванні дозволяють логічно завершити процес автоматизації серійного та дрібно-серійного виробництва та підійти до вирішення завдання комплексної автоматизації ділянок, цехів та заводів.

Виділимо три види джерел ефективності робототехніки:

- піддаються оцінці існуючими методами: підвищення продуктивності, зниження витрат на робочу силу тощо;
- потребують спеціальної оцінки: поліпшення умов праці, стабілізація операцій, скорочення витрат на модернізацію виробництва тощо;
- не піддаються прямій оцінці: підвищення конкурентоспроможності, ефект від інтеграції систем проєктування, підготовки виробництва та самого виробництва тощо.

Джерела ефективності, що піддаються оцінці:

- підвищення продуктивності обладнання шляхом збільшення його завантаження;
- підвищення продуктивності за рахунок скорочення часу обробки виробу;
- економія зарплати робітників, що вивільняються;
- скорочення витрат на життєзабезпечення робітників (прівітрювання та кондиціювання повітря, освітлення, засоби індивідуального захисту);
- зменшення розміру оборотних засобів у незавершеному виробництві (запаси матеріалів, напівфабрикатів та комплектуючих між суміжними ланками технологічного ланцюга);
- скорочення виробничих площ;
- зниження втрат від браку (за рахунок стабілізації операцій обробки та дотримання технологічної дисципліни при автоматичному управлінні процесом);
- економія матеріалів та енергії (мінімізація відходів при розкрої матеріалів; скорочення витрати фарби при нанесенні покриттів або порошку при плазмовому напиленні; оптимізація режимів зварювання);
- виручка від продажу демонтованого обладнання з ручним керуванням.

Джерела ефективності, що вимагають спеціальної оцінки:

- покращення соціальних характеристик праці робітників за рахунок скорочення втрат від травматизму, стомлюваності, професійних захворювань та плинності кадрів; зниження витрат на охорону праці, підготовку

кадрів, дотацій на житло та соціально-побутове обслуговування, різних виплат та пільг;

- зниження витрат на технологічну підготовку виробництва внаслідок універсальності обладнання, безпаперової підготовки технічної документації та автоматизованої підготовки керуючих програм;

- зниження витрат на експлуатацію та ремонт обладнання за рахунок виконання виробничої програми меншою кількістю одиниць обладнання внаслідок роботизації;

- підвищення якості продукції за рахунок стабілізації процесів та виключення впливу суб'єктивного фактору за рахунок повторення раціональних циклів управління незалежно від ступеня втоми та кваліфікації робітника;

- скорочення витрат на набуття робітниками досвіду;

- скорочення збитків від нещасних випадків;

- повторне використання засобів робототехніки під час модернізації виробництва.

Розглянемо конкретні особливості ефективності застосування засобів робототехніки у виробництві. Аналіз результатів застосування роботів у різних галузях промисловості та типах виробництв підтверджує, що вони можуть ефективно використовуватися в умовах як дрібносерійного, так і масового виробництва. У масовому і багатосерійному виробництві з швидкою зміною продукції (автомобілебудування, радіопромисловість, виробництво електропобутових приладів тощо) перспективне застосування роботів для обслуговування агрегатних верстатів і автоматичних ліній, що переналагоджуються, на операціях завантаження–вивантаження на початкових і кінцевих позиціях ліній, для внутрішньо-цехового транспортування. Використання роботів дозволяє здійснювати комплектацію та запуск таких ліній у більш короткі терміни.

Роботи можна ефективно застосовувати, зокрема, для заміни спеціального допоміжного устаткування на окремих операціях в автоматичних технологічних комплексах під час модернізації чи заміни цього устаткування. У цьому випадку відпадає необхідність зупиняти комплекс на тривалий період, а витрати на переоснащення роботів виявляються значно нижчими від витрат внаслідок простою комплексу протягом усього періоду модернізації або заміни спеціалізованого допоміжного обладнання на конкретних операціях.

У серійному та дрібносерійному виробництві найперспективнішим є застосування роботів у поєднанні з обладнанням з ЧПК. Це дозволяє повністю вирішити на основі групової організації виробництва проблему виготовлення виробів малими партіями.

У будь-якій галузі застосування роботів їх необхідно розглядати як компонент всього виробничого комплексу, що включає інше основне та допоміжне технологічне обладнання, об'єднане загальною системою керування. Використання роботів істотно впливає на такі важливі економічні характеристики, як продуктивність праці, обсяг виробництва продукції, собівартість, рентабельність, фондівіддача.

Зростання продуктивності праці забезпечується, з одного боку, збільшенням обсягу виробництва, а з другого – скороченням чисельності виробничих робочих. Зростання обсягу виробництва відбувається внаслідок покращення використання обладнання, підвищення його продуктивності та зниження браку. При цьому підвищення ефективності використання устаткування досягається за допомогою як чинників екстенсивного, так і інтенсивного характеру праці. Фактори інтенсивного характеру передбачають покращення використання обладнання в одиницю часу внаслідок скорочення трудомісткості допоміжних операцій (завантаження-вивантаження деталей, транспортування тощо). Підвищення екстенсивного показника використання устаткування зумовлено збільшенням часу його роботи. У разі роботизації зростання ефективності забезпечується скороченням різноманітних втрат робочого часу і підвищенням змінності роботи устаткування.

Зниження браку продукції є наслідком усунення впливу таких індивідуальних та суб'єктивних факторів, як кваліфікація, досвід, стомлюваність працюючих тощо.

В умовах роботизації відбувається абсолютне та відносне скорочення чисельності виробничих робітників. Під відносним скороченням чисельності розуміється можливість підвищити обсяги виробництва за тієї ж чисельності виробничих робочих завдяки збільшенню річного ефективного фонду часу роботи устаткування в результаті використання роботів.

Збільшення обсягу виробництва в умовах роботизації призводить до зниження собівартості продукції внаслідок зменшення частки накладних витрат на одиницю продукції, скорочення непродуктивних витрат, таких як оплата понаднормових робіт та простоїв робітників, зниження втрат від браку, а також питомих витрат на утримання та експлуатацію обладнання.

Зниження собівартості продукції досягається за рахунок економії заробітної плати робітників, які вивільняються абсолютно і відносно. Ця складова є однією з найбільш очевидних та значних в оцінці економічної ефективності промислових робіт. Економія на заробітній платі утворюється також внаслідок випереджаючого темпу підвищення продуктивності праці порівняно з темпом зростання заробітної плати.

Застосування роботів дозволяє поліпшити використання виробничих фондів, що характеризується показниками рентабельності та фондівіддачі. При цьому рентабельність збільшується внаслідок зростання загальної суми прибутку, одержуваної в результаті зростання обсягу промислового виробництва.

Для оцінки економічного ефекту від застосування роботів у конкретному технологічному комплексі необхідно провести техніко-економічний аналіз з урахуванням технічних параметрів всього обладнання, що входить до комплексу, основних характеристик та особливостей технологічного процесу, приватних організаційних та техніко-економічних показників, а також соціальної значущості роботизації даного процесу. Об'єктами такого аналізу мають бути:

- обладнання, на якому виконуються операції технологічного процесу;
- роботи;
- допоміжне обладнання, яке потрібне для експлуатації комплексу;
- транспортно-складські системи для матеріалів, заготовок, готових виробів, інструментів, оснастки, відходів виробництва;
- запас матеріалів, заготовок, що представляють різного виду запаси, інструменту, технологічного оснащення;
- пристрої забезпечення інших необхідних умов нормальної експлуатації комплексу (вентиляційні, захисні та ін.);
- система управління комплексом загалом;
- виробничі площі, які займає комплекс.

Усі розрахунки економічного характеру з метою оцінки доцільності та ефективності застосування роботів слід виконувати з урахуванням переліченого повного складу об'єкта дослідження. Крім того, одним із важливих факторів, який слід враховувати при економічному обґрунтуванні роботизації, є надійність. Недостатня надійність технічних пристроїв комплексу відповідно знижує ефективність роботизації виробництва. У зв'язку з цим виникає необхідність у дослідженні економічної ефективності різних заходів

щодо підвищення надійності та виявлення оптимальної у цьому відношенні структури комплексу, що роботизується.

Наприклад, чим більш універсальний робот, тим він складніший і менш надійний. У той же час використання у складі технологічного комплексу більш простих і дешевих, але менш універсальних роботів призводить до необхідності включати до складу комплексу додаткове спеціальне обладнання та пристрої, що компенсують зниження функціональних можливостей роботів. Проектування та виготовлення такого спеціального обладнання пов'язане з додатковими витратами, а його розміщення призводить, як правило, до збільшення виробничих площ, які займає комплекс.

Соціальні аспекти роботизації, що пов'язані з покращенням умов праці, ліквідацією важких, небезпечних та шкідливих для здоров'я видів робіт, з підвищенням загальної культури виробництва, мають бути кількісно вимірні та враховані у розрахунках економічної ефективності застосування роботів. Наприклад, використання роботів зменшує плинність кадрів, що виражається у конкретній економії витрат на прийом-звільнення, навчання тощо.

Необхідно враховувати й економічний ефект, пов'язаний з тим, що роботизація дозволяє зменшити кількість професійних захворювань, знизити травматизм, скоротити витрати на лікування та заходи щодо охорони праці та техніки безпеки. Облік соціальних чинників в економічних розрахунках дозволяє точніше визначати галузі ефективного застосування роботів.

Зазвичай економічну ефективність застосування роботів і заснованих на них технологічних комплексів оцінюють за річним економічним ефектом, який є економією наведених річних витрат, що одержувана в результаті використання роботів у складі технологічного комплексу. Далі визначають термін окупності.

Контрольні запитання

1. Коли почався сучасний етап розвитку робототехніки?
2. Назвіть покоління розвитку роботів.
3. Назвіть основні види роботів за класифікацією міжнародної федерації робототехніки.
4. Що означає термін «Промисловий робот»?
5. Дайте визначення сервісного робота.
6. Яка країна є лідером роботизації у світі?
7. Назвіть призначення колаборативних промислових роботів.
8. Назвіть соціальні аспекти застосування роботів.
9. Назвіть економічні аспекти застосування роботів.
10. Назвіть технічні аспекти застосування роботів.
11. Назвіть види джерел щодо визначення ефективності робототехніки.

Розділ 2

Структура, кінематичні схеми та конструкція промислових роботів

2.1. Предмет і визначення робототехніки

2.1.1. Предмет робототехніки

Робототехніка – галузь науки і техніки, що орієнтована на створення роботів і робототехнічних систем, призначених для автоматизації складних технологічних процесів та операцій, у тому числі, виконуваних у недетермінованих умовах, для заміни людини при виконанні важких, стомлюючих і небезпечних робіт. Об'єктами професійної діяльності є роботи і робототехнічні системи як промислового, так і непромислового призначення, а також необхідне програмно-алгоритмічне забезпечення для керування такими системами, їх проєктування та експлуатації.

Виникнувши на основі кібернетики та механіки, робототехніка у свою чергу породила нові напрямки розвитку цих наук. Для кібернетики це пов'язано, перш за все, з інтелектуальним керуванням, яке потрібне для роботів, а для механіки – з багатоланковими механізмами типу маніпуляторів.

Робот можна визначити як універсальний автомат для здійснення механічних дій, подібних до тих, які робить людина, що виконує фізичну роботу. При створенні перших роботів і до сьогодні зразком для них служать фізичні можливості людини. Саме прагнення замінити людину на важких роботах і породило спочатку ідею роботів, потім перші спроби її реалізації (в середньовіччі) і, нарешті, зумовило виникнення та розвиток сучасної робототехніки та роботобудування.

На рис.2.1 показано функціональну схему роботи. Схема включає:

- виконавчі системи – маніпуляційну (один або кілька маніпуляторів) і пересування, якщо робот рухливий;
- сенсорну систему, що забезпечує робот інформацією про зовнішнє середовище;
- пристрій керування.

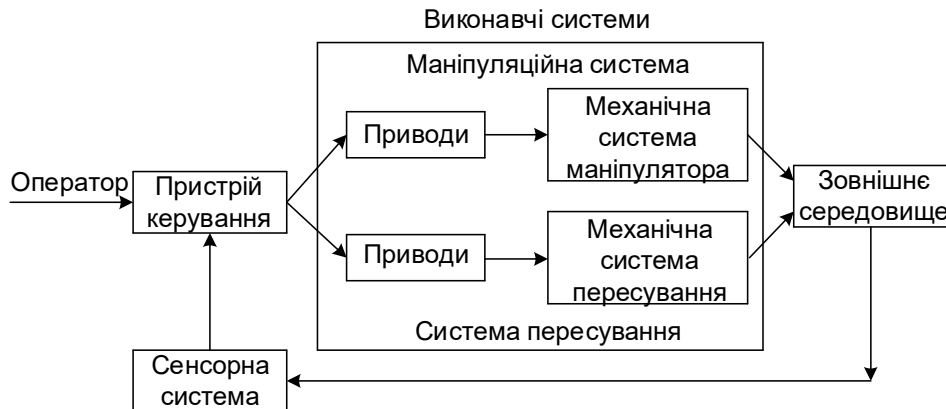


Рисунок 2.1 – Функціональна схема робота

Виконавчі системи в свою чергу складаються з механічної системи і системи приводів (рис. 2.2).

Механічна система маніпулятора – це зазвичай кінематичний ланцюг, що складається з рухомих ланок з кутовим або поступальним переміщенням, який закінчується робочим органом у вигляді затискача або якого-небудь інструменту.

Отже, робот – це машина автоматичної дії, яка поєднує властивості робочих та інформаційних машин, будучи таким чином принципово новим видом машин.

У досить розвиненому вигляді роботи аналогічно людині здійснюють активну силову та інформаційну взаємодію з навколишнім середовищем і завдяки цьому можуть мати штучний інтелект і вдосконалювати його. Щоправда, поки що роботи дуже далекі за своїми інтелектуальними можливостями від людини.

При вирішенні проблеми створення роботів одним із природних шляхів є копіювання людини та живої природи взагалі. Однак не менш важливий і пошук принципово нових шляхів, що визначаються можливостями сучасної техніки.

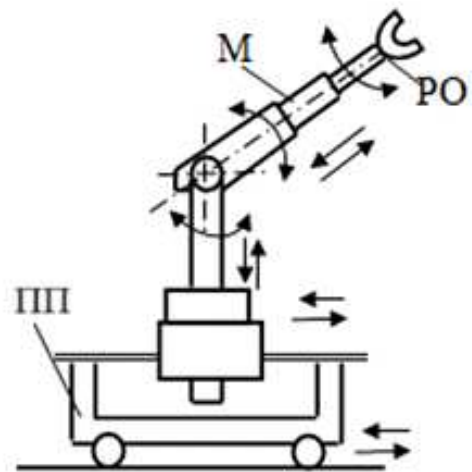


Рисунок 2.2 – Виконавча система робота

Приклад першого підходу – створення механічних рук шарнірного типу і пристроїв захоплення з пальцями, що згинаються. Приклади другого підходу – використання електромагнітного поля для орієнтації та взяття предметів та, нарешті, колісний хід замість крокування. Аналогічні приклади можна знайти і стосовно сенсорних систем (створення «надчуттєвих» органів поряд з копіюванням органів чуття тварин).

Від раніше відомих видів машин роботи принципово відрізняються своєю універсальністю (багатофункціональністю) та гнучкістю (швидким переходом на нові операції). Під універсальністю розуміється універсальність робочих органів робота та його рухів, хоча до універсальності руки людини роботам ще далеко. (Це компенсується можливістю швидкої зміни робочих органів робота у процесі виконання операцій).

Універсальність роботів передбачає можливість виконання ними цілеспрямованих дій, які потребують певних інтелектуальних здібностей. Це відкриває широкі можливості використання роботів як основного технологічного обладнання (на складанні, зварюванні, фарбуванні тощо), так і допоміжного – для заміни робітників, зайнятих на обслуговуванні такого обладнання.

Універсальність роботів дає можливість автоматизувати принципово будь-які операції, що виконуються людиною, а швидкість переналаштування на виконання нових операцій при освоєнні нової продукції або інших змін у виробництві дозволяє зберегти за автоматизованим за допомогою роботів виробництвом, принаймні ту ж гнучкість, яку на сьогодні мають тільки виробництва, що обслуговуються людиною.

Одним з основних напрямків застосування роботів, який значною мірою визначає темпи і проблематику розвитку сучасної робототехніки в цілому, є гнучкі автоматизовані виробництва, перш за все в машинобудуванні. Роботи, як універсальний гнучкий засіб для виконання маніпуляційних дій – важливий компонент таких виробництв.

Історія гнучкої автоматизації розпочалася в 1955 р. з появою верстатів з ЧПК. Саме такого типу автоматичне технологічне обладнання з програмами роботи, що швидко змінюються, є основою для створення гнучких, тобто швидко переналагоджуваних на випуск нової продукції, виробництв. Однак для реалізації ідеї гнучкої автоматизації, був необхідний ще ряд умов.

Цим пояснюється, що перші верстати з ЧПК поширювалися дуже повільно. За десять років їх частка в загальному парку верстатів у технічно передових країнах не досягла і 0,1%.

Ситуація різко змінилася в 70-ті роки з появою наступного найважливішого компонента гнучкої автоматизації – мікропроцесорних систем керування, що забезпечило різке зниження вартості систем ЧПК і підвищення їх надійності.

Роботи як інший обов'язковий компонент гнучкої автоматизації з'явилися в промисловості в другій половині XX століття. Саме в цей час назріла необхідність у таких універсальних і гнучких засобах, без яких неможливо здійснити комплексну автоматизацію сучасного виробництва з його великою номенклатурою та частою змінюваністю продукції, включаючи створення гнучких автоматизованих виробництв.

Крім роботів для тих же цілей широке застосування отримали маніпулятори з ручним керуванням (копіювальні маніпулятори, телеоператори) з різними варіантами напіваавтоматичного та автоматизованого керування, а також однопрограми (не перепрограмовані) автоматичні маніпулятори (автооператори та механічні руки). Усі ці пристрої є попередниками роботів. З'явилися вони головним чином для маніпулювання об'єктами, безпосередній контакт з якими для людини шкідливий або небезпечний (радіоактивні речовини, розпечені болванки тощо). Однак хоча поява роботів істотно звузила сферу їх застосування, ці прості засоби механізації та автоматизації не втратили свого значення. Усі вони сьогодні разом із роботами входять до загального поняття засобів робототехніки.

В результаті з'явилися всі необхідні компоненти для розвитку гнучких автоматизованих виробництв, а саме:

- технологічне обладнання з програмним керуванням;
- мікропроцесори як універсальний гнучкий засіб для обробки інформації;
- роботи як універсальний гнучкий засіб для маніпуляційних дій, потрібних при виконанні основних технологічних операцій (складання, зварювання, фарбування тощо) та різних допоміжних операцій з обслуговування іншого обладнання.

Як зазначено вище, об'єктивною причиною виникнення, і розвитку робототехніки стала історична потреба сучасного виробництва в гнучкій автоматизації з усуненням людини з безпосередньої участі в машинному виробництві та недостатність для цієї мети традиційних засобів автоматизації. Тому завданням робототехніки поряд із створенням власне засобів

робототехніки є розробка заснованих на них систем та комплексів різного призначення.

Системи та комплекси, автоматизовані за допомогою роботів, прийнято називати роботизованими. Роботизовані системи, у яких роботи виконують основні технологічні операції, називаються робототехнічними.

Поряд із впровадженням у діючі виробництва роботи відкривають широкі перспективи для створення принципово нових технологічних процесів, не пов'язаних з вельми обтяжливими обмеженнями, що накладаються безпосередньою участю в них людини. При цьому маються на увазі як дійсно дуже обмежені фізичні можливості людини (по вантажопідйомності, швидкодії, точності, повторюваності тощо), так і необхідна для нього комфортність умов праці (якість атмосфери, відсутність шкідливих зовнішніх впливів тощо). Сьогодні необхідність безпосередньої участі людини у технологічному процесі найчастіше є серйозною перешкодою для інтенсифікації виробництва та створення нових технологій.

Роботи набули найбільшого поширення в промисловості і насамперед у машинобудуванні. Призначені для цієї мети роботи називають промисловими роботами. Не менш широкі перспективи мають роботи у гірничодобувній промисловості, металургії та нафтовій промисловості (обслуговування бурових установок, монтажні та ремонтні роботи), у будівництві (монтажні, оздоблювальні, транспортні роботи), у легкій, харчовій, рибній промисловості.

Під *промисловим роботом* розуміють механічну руку з програмним керуванням що оснащена пристроєм захоплення і призначена для автоматичного відтворення рухових функцій верхніх кінцівок людини у виробничому процесі.

Виділення цих технічних пристроїв в окремий клас обумовлено їх специфічними особливостями, серед яких головними є:

- велике (до 10) число ступенів свободи;
- розімкнені кінематичні ланцюги маніпулятора, утвореного послідовно з'єднаними ланками;
- автономність, що дозволяє швидко включати робот у виробничий процес.

Завдяки цим особливостям ПР набувають функціональної універсальності (можливість виконувати широкий набір операцій), маневреності (ви-

конання рухів у стисненому об'ємі, обмеженому елементами технологічного обладнання), гнучкості у переналагодженні.

Поряд з використанням у промисловості роботи застосовуються і в інших галузях народного господарства та людської діяльності:

- на транспорті (включаючи створення крокуючих транспортних машин);
- у сільському господарстві;
- у охороні здоров'я (протезування, хірургія – стерильна, дистанційна, обслуговування хворих та інвалідів, транспортування);
- у сфері обслуговування;
- для дослідження та освоєння океану і космосу та виконання робіт в екстремальних умовах (стихійні лиха, аварії, військові дії);
- у наукових дослідженнях.

Застосування роботів поряд з конкретним техніко-економічним ефектом, пов'язаним із підвищенням продуктивності праці, змінності роботи обладнання та якості продукції, є важливим засобом вирішення соціальних проблем, дозволяючи звільняти людей від важкої, небезпечної та монотонної праці.

Останніми роками у робототехніці відбуваються якісні зміни, що ґрунтуються на використанні досягнень нової науки – мехатроніки.

Мехатроніка – це область науки та техніки, заснована на синергетичному об'єднанні вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними та комп'ютерними компонентами, що забезпечує проектування та виробництво якісно нових модулів, систем та машин з інтелектуальним керуванням їх функціональними рухами.

2.1.2. Визначення робототехніки

Єдиного загальноприйнятого визначення сучасних роботів поки що не існує. Однак усі визначення схожі і в тому чи іншому вигляді відображають той факт, що робот активно взаємодіє із зовнішнім середовищем і виявляє при цьому деякі елементи розумності. Наприклад, у технічній літературі можна зустріти таке визначення:

Робот – це автономно функціонуюча універсальна автоматична машина, призначена для відтворення певних фізичних, рухових та розумових функцій людини, наділена тими чи іншими засобами зворотного зв'язку (слухом, зором, дотиком тощо), а також здатністю до навчання та адаптації у процесі активної взаємодії з навколишнім середовищем.

Згідно стандарту ISO 8373:2021 *Промисловий робот* – автоматично керований, перепрограмовний багатоцільовий маніпулятор, програмований по трьох або більше осях, який може бути або нерухомий, або прикріплений до мобільної платформи, що використовується для автоматизації у промисловому середовищі.

Терміни, що використовуються у визначенні, означають:

- перепрограмовний: розроблений таким чином, що запрограмовані рухи або допоміжні функції можуть бути змінені без фізичної зміни (зміни механічної системи);
- багатоцільовий: можливість адаптації до іншого застосування шляхом фізичної зміни;
- маніпулятор: механізм, що складається із сукупності сегментів, зчленованих або ковзаючих щодо один одного;
- вісь: напрямок, який використовується для завдання руху робота в лінійному або обертальному режимі.

Розроблено низку нормативних документів з термінології в робототехніці. Розглянемо деякі терміни та визначення робототехнічних систем.

Робототехніка – область науки і техніки, пов'язана зі створенням, дослідженням та застосуванням роботів. Робототехніка охоплює питання проєктування, програмного забезпечення, зчутливлення роботів, керування ними, а також роботизації промисловості та непромислової сфери.

Робот – багатофункціональна машина, що перепрограмується, для повністю або часткового автоматичного виконання рухових функцій аналогічно живим організмам, а також деяких інтелектуальних функцій людини. Під «перепрограмованістю» розуміють можливість заміни, корекції або генерації керуючої програми автоматично або за допомогою людини. До роботів не належать, зокрема, автооператори, а також копіювальні маніпулятори та інші машини, керовані тільки людиною-оператором.

Промисловий робот – робот, призначений для виконання технологічних та (або) допоміжних операцій у промисловості.

Технологічний промисловий робот – промисловий робот для виконання технологічних переходів, операцій, процесів, оснащений робочим або вимірювальним інструментом.

Допоміжний промисловий робот – промисловий робот для обслуговування технологічного обладнання, переміщення об'єктів, оснащений пристроєм захоплення.

Спеціальний робот – робот до виконання однієї операції одного виду.

Спеціалізований робот – робот до виконання різних операцій одного виду.

Універсальний робот – робот для виконання різних операцій різних видів.

Жорсткопрограмований робот – робот, керуюча програма якого, введена на етапі програмування, не може бути змінена в процесі роботи в залежності від функціонування робота і (або) контрольованих параметрів робочого середовища.

Адаптивний робот – робот, керуюча програма якого може автоматично змінюватися в процесі роботи в залежності від функціонування робота та (або) контрольованих параметрів робочого середовища.

Інтелектуальний робот – робот, керуюча програма якого може повністю або частково формуватися автоматично відповідно до поставленого завдання та залежно від стану робочого середовища.

Маніпуляційний робот – робот для виконання рухових функцій, аналогічних функціям руки людини.

Стаціонарний маніпуляційний робот – маніпуляційний робот, закріплений на нерухомій основі.

Мобільний робот – робот, здатний переміщатися у робочому середовищі відповідно до керуючої програми. Мобільний робот може бути забезпечений маніпулятором. До мобільних роботів не належать пересувні маніпуляційні роботи, які можуть бути оперативно переміщені в робочому середовищі вручну або за допомогою транспортних засобів з ручним керуванням.

Роботизований технологічний комплекс (РТК) – сукупність одного або кількох промислових роботів, іншого технологічного обладнання та оснащення для виконання єдиного технологічного процесу.

Робототехнічна система (РТС) – комплекс роботів та відповідного обладнання. Такі системи поділяються на маніпуляційні, мобільні та інформаційні.

Головними відмінними рисами роботів від традиційних засобів автоматизації є гнучкість, адаптивність, інтелектуальність та універсальність.

Під гнучкістю роботів розуміють здатність їх системи керування швидко перебудовуватися на виконання нових операцій шляхом перепрограмування рухів роботів в режимі навчання цієї системи.

Адаптивність роботів характеризується здатністю швидко реагувати на зовнішні і внутрішні збурення і автоматично пристосовуватися до умов

функціонування, що змінюються. Цю здатність визначають, передусім, засобами їхнього «зчутливлення», тобто кількістю та характеристиками датчиків внутрішньої та зовнішньої інформації, а також алгоритмічним та програмним забезпеченням самоналаштування (адаптації) керуючої системи.

Інтелектуальність роботів полягає в їх здатності вирішувати завдання інтелектуального характеру: аналіз складних образів і сцен, розпізнавання образів, планування рухів і операцій, діагностика станів і т. п.

Універсальність (багатофункціональність) роботів дозволяє вирішувати не одне, а цілий клас виробничих завдань.

Можна виділити чотири покоління роботів. Роботи першого покоління – це роботи з програмним керуванням, призначені в основному для виконання певної, заздалегідь запрограмованої послідовності операцій, що диктується тим чи іншим технологічним процесом. Керування роботами першого покоління здійснюється за жорсткою програмою, яка формується в режимі навчання за допомогою оператора. Функціональні можливості роботів першого покоління обмежені малим асортиментом датчиків та недосконалістю системи програмного керування. Застосування роботів першого покоління можливе лише за досить детермінованих та незмінних умов. Для організації таких умов необхідне додаткове технологічне обладнання, вартість якого найчастіше можна порівняти з вартістю самого робота.

Роботи другого покоління – це роботи з адаптивним керуванням. Вони відрізняються від роботів першого покоління істотно більшим асортиментом датчиків зовнішньої інформації і більш складною системою автоматичного керування з самоналаштуванням, побудованою на базі мікропроцесорної техніки і керуючої ЕОМ. Сенсорна система формує сигнали зворотного зв'язку для системи керування, яка, обробляючи отриману інформацію, синтезує і коригує закон керування механізмами робота з урахуванням реально сформованої обстановки. Закон керування може мати ситуаційний характер і тоді його синтез зводиться до формування зв'язків «клас ситуацій – дія». Більш досконалим є такий спосіб керування, при якому сенсорне керування доповнюється алгоритмом автоматичного самоналаштування його параметрів.

Роботи другого покоління значно перевершують за своїми можливостями роботи першого покоління завдяки можливості сприймати зовнішню обстановку, аналізувати сенсорну інформацію і пристосовуватися до умов експлуатації, що змінюються. Такі роботи можуть маніпулювати неорієнто-

ваними деталями, здійснювати складні складальні операції, реагувати на перешкоди у робочій зоні.

Третє покоління – це роботи з інтелектуальним керуванням від ЕОМ. Вони принципово відрізняються від роботів другого покоління складністю функцій і досконалістю системи автоматичного керування, що включає в себе ті чи інші елементи штучного інтелекту. Такі роботи призначені не так для імітації фізичних дій людини, як для автоматизації її інтелектуальної діяльності.

Відмінною рисою інтелектуальних роботів є їхня здатність до навчання на досвіді та адаптації в процесі вирішення завдань. У загальному випадку інтелектуальний робот здатний вести діалог із людиною, формувати у собі модель виробничої обстановки, розпізнавати та аналізувати ситуації, навчатися поняттям і навичкам, планувати поведінку, будувати програмні рухи системи пересування та здійснювати їх надійне відпрацювання в умовах перешкод та неповної поінформованості про змінювані виробничі умови.

У зв'язку з швидким розвитком нейрокомп'ютерів і нейромережних технологій з'явилася можливість створення роботів четвертого покоління – роботів з нейронними системами керування. Принципи нейронного керування значною мірою аналогічні принципам роботи мозку та нервової системи людини. Такі системи не програмують наперед. Вони навчаються і самоорганізуються на вирішення різних рухових, інформаційних та інтелектуальних завдань.

2.1.3. Структура, параметри і класифікація роботів

Як було показано у розділі 2.1.1, робот складається з двох основних частин – виконавчих систем та інформаційно-керуючої системи із сенсорами. В свою чергу, виконавчі системи включають маніпуляційну систему (зазвичай у вигляді механічних маніпуляторів) і систему пересування, що є тільки у рухомих (мобільних) роботів.

Спрощена функціональна схема промислового робота та його інфраструктури наведена на рис. 2.3. Приводи за командами блоку керування (зазвичай системи програмного керування) через кінематичні ланцюги переміщують ланки маніпулятора (руки) робота. Параметри ланок маніпулятора та їх кінематичні зв'язки одне з одним визначають об'єм і конфігурацію робочого простору робота, які слід встановлювати, виходячи з особливостей узгодження промислового робота і технологічного устаткування.

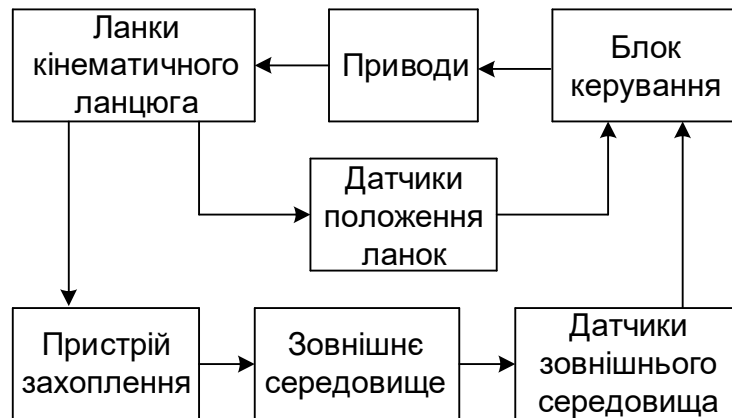


Рисунок 2.3 – Спрощена блок-схема промислового робота

Вплив робота на зовнішнє середовище і маніпулювання об'єктами відповідно до поставленого технологічного завдання здійснюється пристроєм захоплення, який встановлюють на руці робота. При конструюванні пристроїв захоплення враховують властивості середовища та об'єкта, що маніпулюється. Швидкість, точність виконання рухів і навантажувальна здатність робота залежать від типу використовуваного приводу (електричний, гідравлічний, пневматичний), а також системи керування. Керування приводами будується або за розімкненою схемою (робота за упорами), або за замкненою (за сигналами датчиків стану ланок).

Для того щоб ознайомитися з характеристиками та параметрами робіт, розглянемо їх класифікацію за основними показниками, які визначають типи роботів: за призначенням, конструктивними особливостями, за способом керування, швидкодією та за точністю руху.

Першим показником, відповідно до якого всі роботи діляться на найбільш великі групи, є їх призначення, тобто галузь застосування. Сьогодні основним типом роботів, як і раніше, є промислові роботи, які призначені для застосування в галузях промисловості і становлять до 80 % всього парку роботів у світі. У свою чергу ПР діляться на ряд типів більш вузького призначення (наприклад, робот фарбувальний, зварювальний, транспортний, для обслуговування верстатів, пресів, ливарних машин тощо).

За типом виконуваних операцій всі ПР поділяються на *роботи технологічні*, які виконують основні технологічні операції, і *допоміжні роботи*,

призначені для виконання допоміжних технологічних операцій з обслуговування основного технологічного обладнання. Технологічні роботи відносяться до основного технологічного обладнання, а допоміжні можна віднести до засобів автоматизації та механізації.

За широтою переліку операцій, до виконання яких призначений робот, розрізняють роботи спеціальні, спеціалізовані та універсальні. *Спеціальні роботи* призначені для виконання однієї конкретної технологічної операції (наприклад зварювання, нанесення покриттів, певна складальна операція або обслуговування конкретної марки технологічного обладнання). *Спеціалізовані роботи* можуть виконувати кілька однотипних операцій (складальний робот із змінними робочими інструментами, робот для обслуговування певного типу технологічного обладнання тощо). *Універсальні роботи* можуть виконувати різні основні та допоміжні операції в межах їх технічних можливостей.

Збільшення ступеня універсальності робота розширює сферу його можливих застосувань, але одночасно неминуче супроводжується не повним використанням його можливостей на кожній конкретній операції, а також подорожчанням робота. Оптимальними в цьому відношенні є спеціальні роботи, але з іншого боку це гранично звужує їх сферу застосування, а отже, і обсяг їх виробництва.

Класифікація роботів за показниками, що визначають їхню конструкцію. До таких показників відносяться:

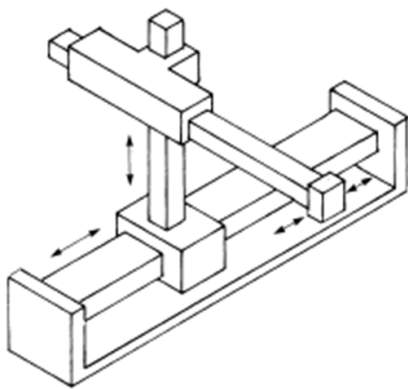
- тип приводів;
- вантажопідйомність;
- кількість маніпуляторів;
- тип та параметри робочої зони;
- рухливість та спосіб розміщення;
- виконання за призначенням.

Приводи, які використовуються в маніпуляторах і системах пересування роботів, можуть бути електричними, гідравлічними та пневматичними. Часто їх застосовують у комбінації. Наприклад, у ланках маніпулятора великої вантажопідйомності використовують гідравлічний привод, а в його пристрої захоплення – простіший і малопотужний пневматичний привод.

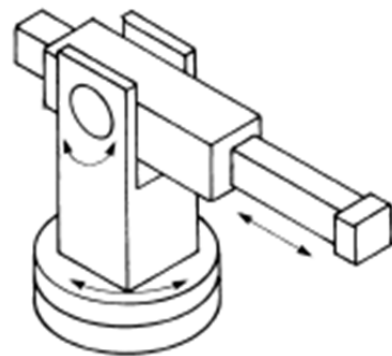
Вантажопідйомність робота – це вантажопідйомність його маніпуляторів, а для транспортного робота ще і його шасі. Вантажопідйомність мані-

пулятора визначається масою корисних вантажів, що він переміщає. Залежно від призначення робота вона може становити від одиниць грамів (надлегкі роботи, наприклад, що застосовуються в мікроелектронній промисловості) до тисяч кілограмів (надважкі, наприклад, транспортні та космічні роботи). Більшість роботів мають вантажопідйомність від 5 до 50 кг.

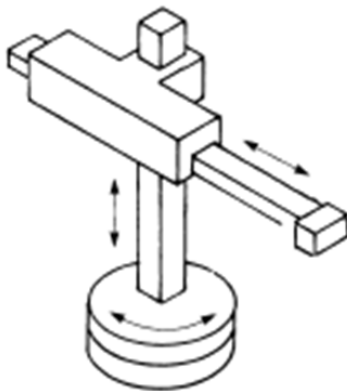
Кількість маніпуляторів у роботів в більшості випадків обмежена одним. Однак залежно від призначення існують конструкції роботів з двома, трьома та дуже рідко з чотирма маніпуляторами. Зазвичай маніпулятори робота виконують однаковими, але є роботи з маніпуляторами різної конструкції. Наприклад, існують промислові роботи для обслуговування пресів холодного штампування з двома різними маніпуляторами: один – основний, для взяття заготовки та встановлення її в прес та інший, спрощеної конструкції, для виконання більш простої операції вилучення готової деталі.



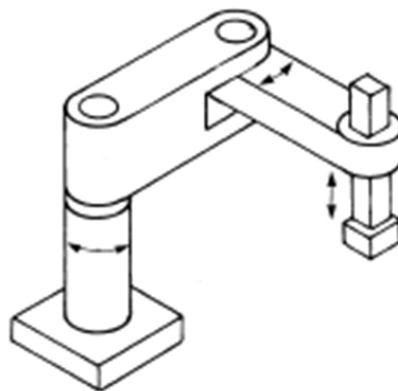
а – декартова або прямокутна система координат



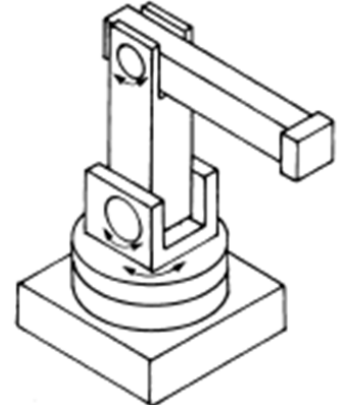
б – сферична система координат



в – циліндрична система координат



г – SCARA



д – кутова система координат

Рисунок 2.4 – Схеми маніпуляторів

Тип та параметри робочої зони маніпулятора. Робоча зона маніпулятора – це простір, у якому може бути його робочий орган при всіх можливих положеннях ланок маніпулятора. Форма робочої зони визначається числом та типом ступенів рухливості маніпулятора. На рис. 2.4 наведені схеми п'яти найпоширеніших маніпуляторів з різними ступенями рухливості, що визначають певну форму робочої зони. Відповідні форми робочих зон маніпуляторів наведені на рис. 2.5.

Рухливість робота визначається наявністю чи відсутністю в нього системи пересування. У першому випадку роботи називають *мобільними*, а в другому – *стаціонарними*. Відповідно до призначення роботів у них знайшли застосування способи пересування практично всіх відомих на сьогодні типів від наземних (колісні та гусеничні та ін.) до призначених для пересування у воді, повітрі та космосі. Специфічним для робототехніки способом пересування є крокування.

За способом розміщення стаціонарні і мобільні роботи бувають підлоговими, підвісними (наприклад, мобільні роботи, що переміщуються по піднятій монорейці) і такими що вбудовуються в інше обладнання (наприклад, розміщені на станині верстата, що обслуговується роботом).

Виконання робота за призначенням визначається зовнішніми умовами, в яких він повинен функціонувати. Розрізняють виконання нормальне, пилозахисне, теплозахисне, вологозахисне, вибухонебезпечне і т.д.

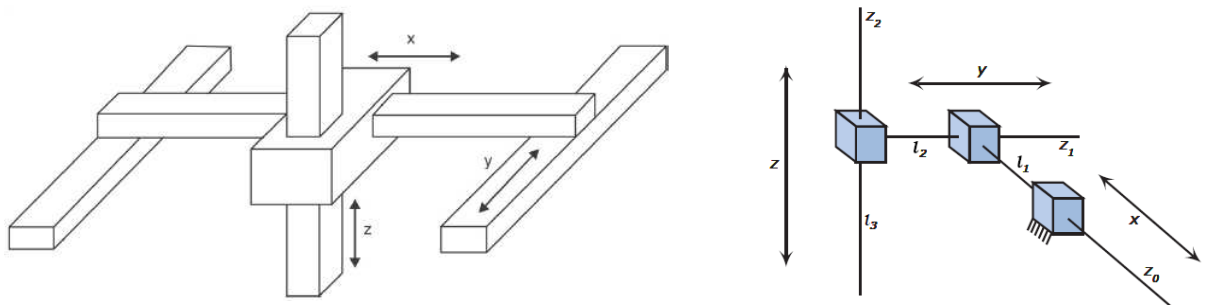
Класифікація роботів за способом керування. За цією ознакою розрізняють роботи з програмним, адаптивним та інтелектуальним керуванням.

Керування рухом за окремими ступенями рухливості може бути безперервним (контурним) і дискретним (кроками, позиційним). В останньому випадку керування рухом здійснюється заданням послідовності точок позиціонування і наступним переміщенням по них кроками від точки до точки (з зупинкою в кожній з них) без контролю траєкторій між ними.

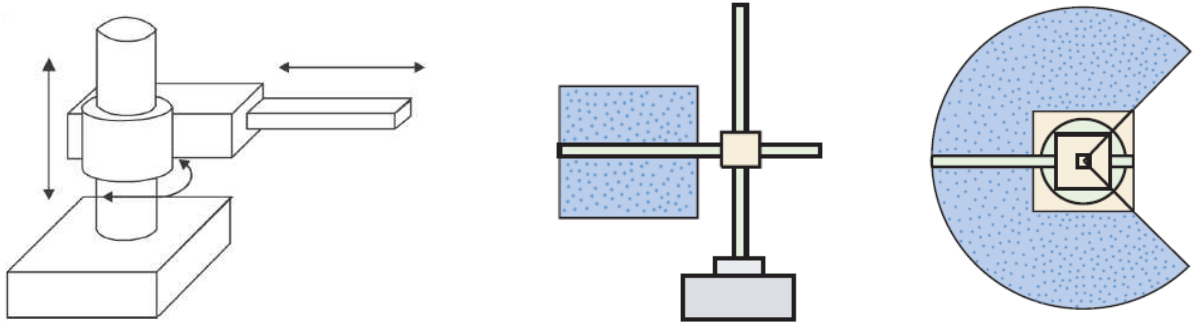
Класифікація роботів з швидкодії та точності рухів. Ці параметри взаємопов'язані та характеризують динамічні властивості роботів.

Швидкодія маніпулятора визначається лінійною швидкістю переміщення його робочого органу і може бути розбита на три діапазони:

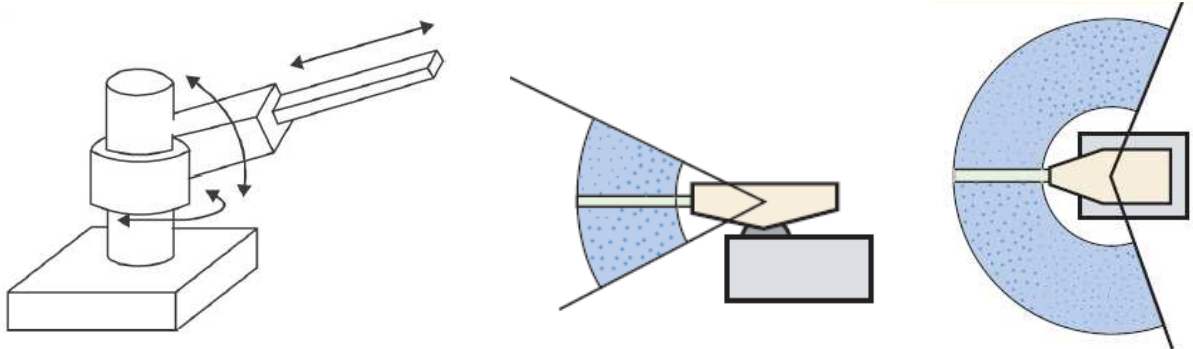
- мала – до 0,5 м/с;
- середня – від 0,5 до 1–2 м/с;
- висока – понад 1–2 м/с.



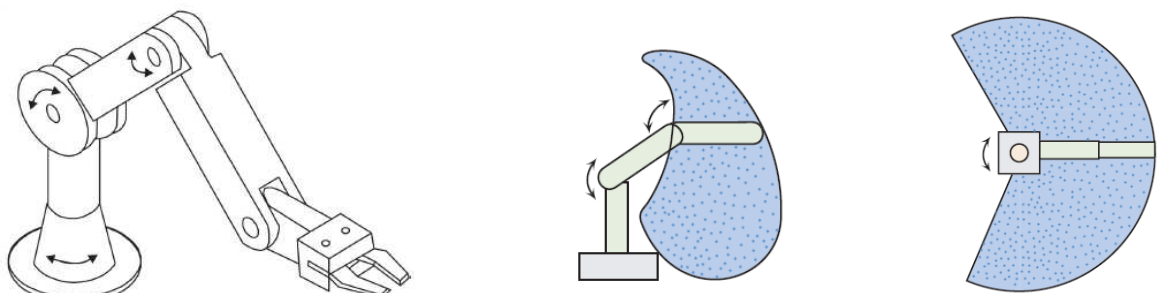
a – декартова або прямокутна система координат



б – циліндрична система координат



в – сферична система координат



г – кутова система координат

Рисунок 2.5 – Форми робочих зон маніпуляторів

Найбільша швидкість маніпуляторів сучасних роботів досягає 10 м/с і вище. Для значної частини областей застосування роботів цей параметр ду-

же важливий, тому що зумовлює їх продуктивність. Основні труднощі у разі підвищення швидкодії пов'язані з відомим протиріччям між швидкістю та точністю.

Точність маніпулятора та системи пересування робота характеризується похибкою позиціювання або відпрацювання траєкторії переміщення. Найчастіше вона визначається абсолютною похибкою. Точність є функцією роздільної здатності приводів і датчиків зворотного зв'язку за положенням.

Також може існувати компроміс між точністю та швидкістю: якщо дати сервоприводу більше часу для переміщення в задане положення, можна отримати більш високу точність, але за рахунок більш низької загальної швидкості.

Точність роботів загального застосування можна розбити на три діапазони в залежності від лінійної похибки:

- мала – від 1 мм та більше;
- середня – від 0,1 до 1 мм;
- висока – менше 0,1 мм.

Більшість сучасних роботів мають середню точність позиціювання. Найменшу точність мають роботи, призначені для виконання найбільш грубих, наприклад, транспортних рухів, а найбільшу – соті міліметра – роботи, які використовуються в електронній промисловості та медицині.

Точність є мірою того, наскільки близько робот наближається до своєї мети в середньому. Ще одним параметром, що характеризує точність маніпулятора є повторюваність. Повторюваність – це міра того, наскільки точно можна досягти одного і того ж положення, якщо рух повторюється багато разів тобто наскільки близько досягнуте положення групується навколо свого середнього значення.

Припустимо, що робота приводять в ту саму точку 100 разів. Оскільки на точність положення можуть впливати багато факторів, робот може не досягати однієї і тієї ж точки щоразу, але перебуватиме в межах певного радіусу від бажаної точки. Радіус кола, утвореного цим рухом, що повторюється, називається повторюваністю. Повторюваність набагато важливіша за точність. Якщо робот неточний, він, як правило, показуватиме постійну помилку, яку можна передбачити і, таким чином, виправити за допомогою програмування.

Різниця між точністю та повторюваністю проілюстрована на рис. 2.6. Повторюваність часто важливіша за точність, оскільки за умови, що помилка точності постійна, її можна допустити. Це справедливо лише в тому випадку, якщо робот продовжує повторювати той самий цикл дій.

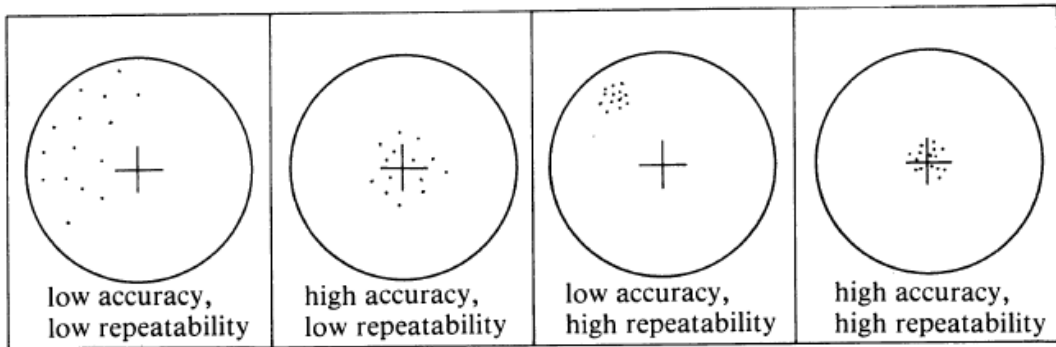


Рисунок 2.6 – Різниця між точністю і повторюваністю

У цій аналогії з мішенню кожна точка є спробою дістатися центрального хреста. Розмір кластера показує розкид результату, а близькість центру кластера до хреста є мірою точності. Точність і повторюваність зазвичай мають один і той же порядок, як правило, міліметри для великих роботів, десятки частки міліметра для роботів загального призначення і соті частки міліметра для найточніших складальних роботів.

У порівнянні з людською рукою істотним недоліком сучасних роботів поки що є зниження точності зі збільшенням ходу маніпулятора. У людини ці параметри значною мірою розв'язані завдяки розподілу рухів на грубі (швидкі) і точні.

Розглянуті параметри роботів відносяться до класифікаційних, тобто використовуються при формуванні типу робота і, відповідно, їх найменування. Приклади назви роботів: легкий пневматичний промисловий робот з цикловим керуванням для обслуговування пресів холодного штампування, фарбувальний гідравлічний промисловий робот з контурним керуванням і т.д.

Параметри, що визначають технічний рівень роботів.

До них відносяться і деякі з раніше розглянутих параметрів, які можуть мати кількісний вираз, такі як швидкодія, точність.

Однак якщо при використанні цих параметрів для класифікації роботів їх розбивають, як було показано вище, на класифікаційні діапазони і

тип робота визначають за належністю значення даного параметра до одного з них, то порівняльну оцінку технічного рівня роботів проводять виходячи з конкретних чисельних значень параметрів.

При цьому широко застосовуються різні, засновані на зазначених раніше параметрах, комбіновані та відносні показники. До них відносяться, зокрема, питома вантажопідйомність, що віднесена до маси робота; вихідна потужність маніпулятора (множення вантажопідйомності на швидкість переміщення), що віднесена до потужності його приводів; розмір робочої зони, віднесений до габаритів робота. Іншими параметрами, що характеризують технічний рівень роботів, є кількість одночасно працюючих ступенів рухливості, надійність, способи та час програмування.

2.2. Кінематика маніпуляторів

2.2.1. Кінематичні схеми маніпуляторів

Основним типом маніпуляційних систем роботів є механічні маніпулятори. Маніпулятори являють собою систему твердих і пружних тіл, з'єднаних між собою різними видами зв'язків. Тверді тіла, що входять до складу виконавчого механізму і є функціональними елементами його кінематичного ланцюга, називаються ланками. Ланка виконавчого механізму конструктивно може складатися з декількох деталей, що не мають між собою відносного руху.

З'єднання двох сполучних ланок, що допускають їх відносний рух, називається кінематичною парою. Сукупність поверхонь, ліній і точок ланки, що входять у контакт з іншою ланкою пари, називається елементом пари. Для того, щоб елементи пари знаходилися в постійному зіткненні, пара повинна бути замкнута геометричним (за рахунок конструктивної форми ланок) або силовим (силою тяжіння, пружиною, силою тиску рідини або газу тощо) способом. Ланки маніпулятора з'єднуються одна з одною за допомогою кінематичних пар з кутовим чи поступальним відносним рухом (рис. 2.7).

У виконавчих механізмах промислових роботів використовують кінематичні пари лише 5, 4 та 3 класів, але в основному кінематичні пари 5-го класу (з одним ступенем свободи). Пари 4 та 3 класів еквівалентно замінюють комбінацією двох або трьох пар 5-го класу.

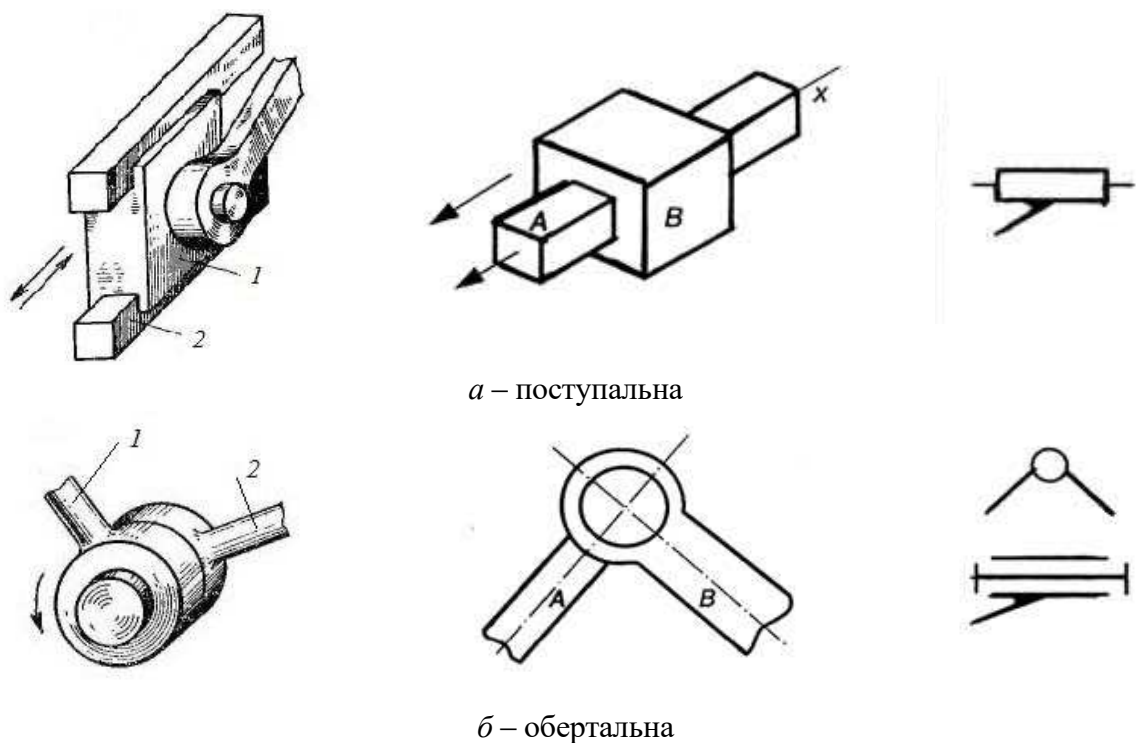


Рисунок 2.7 – Приклади та позначення кінематичних пар 5-класу

Кожна ланка має свою назву. З нерухомою основою пов'язана колона, з колоною пов'язана каретка, з кареткою – рука, з рукою – кисть, з кистю – пристрій захоплення (рис. 2.8).

Кожна кінематична пара отримує рух від керованого приводу. Всі ці приводи об'єднані єдиною системою керування робота для здійснення координованого руху всіх ланок маніпулятора відповідно до програми виконання технологічного процесу. Наприкінці маніпулятора знаходиться пристрій захоплення (затискач) або робочий орган.

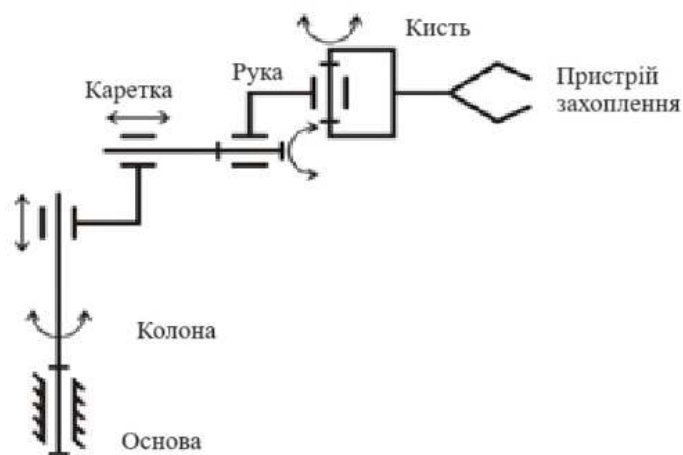
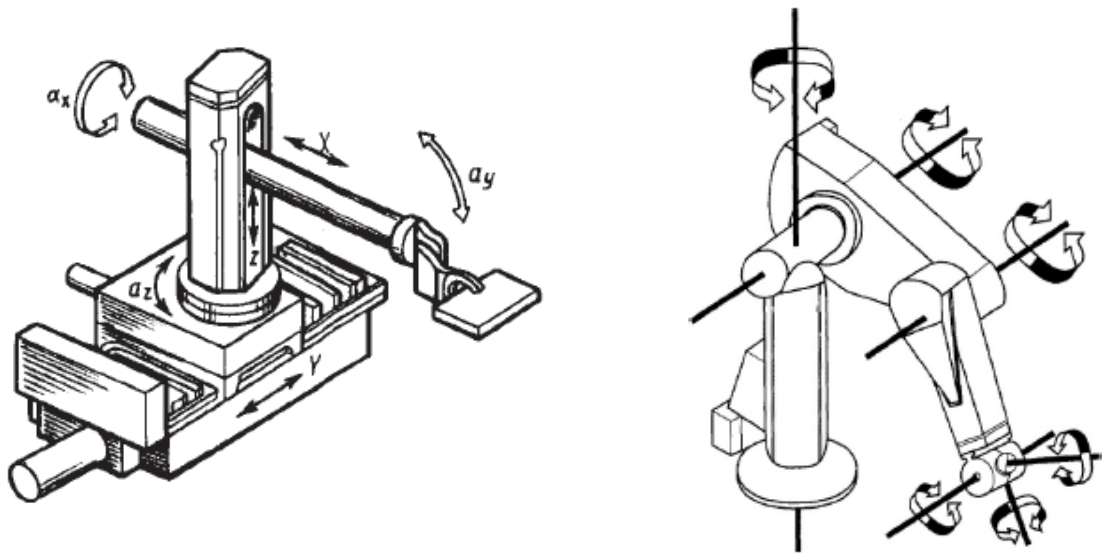


Рисунок 2.8 – Кінематика маніпулятора промислового робота

Кінематичні ланцюги можуть бути замкнутими та розімкненими. В основному кінематичні ланцюги виконавчих механізмів ПР є розімкненими. Однак у процесі функціонування виконавчий механізм може мати різну структуру. Під час руху в просторі його можна розглядати як розімкнутий кінематичний ланцюг. При виконанні технологічної операції на рух виконавчого механізму накладаються додаткові зв'язки, і він перетворюється на замкнутий механізм.

Для повного здійснення просторового руху необхідно мати в маніпуляторі шість ступенів рухливості (рис. 2.9).

Ступені рухливості маніпулятора поділяються на переносні (транспортні) та орієнтуючі. Переносні ступені рухливості служать для переміщення робочого органу в робочій зоні маніпулятора, а орієнтуючі – для його кутової орієнтації. Мінімально необхідне число переносних ступенів рухливості для переміщення робочого органу у просторі робочої зони дорівнює трьом. Однак для розширення маніпуляційних можливостей та реалізації більш складних траєкторій руху, наприклад, з обходом перешкод, а також для підвищення швидкодії маніпулятори зазвичай забезпечують декількома надмірними переносними ступенями рухливості, хоча це ускладнює роботу і робить його дорожчим.



а – циліндрична система координат

б – кутова система координат

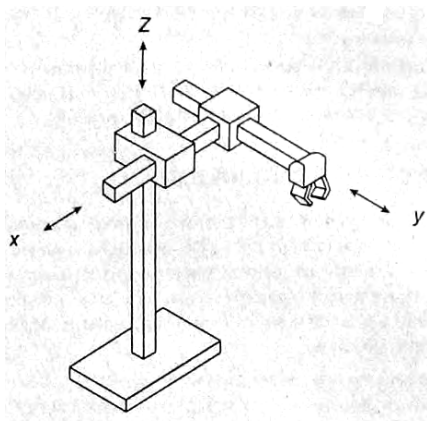
Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд промислових роботів з шістьма ступенями рухливості

Максимально необхідне число орієнтуючих ступенів рухливості дорівнює трьом. Вони реалізуються кінематичними парами з кутовим переміщенням, що забезпечують поворот робочого органу маніпулятора щодо його поздовжньої осі та двох інших взаємно перпендикулярних осей.

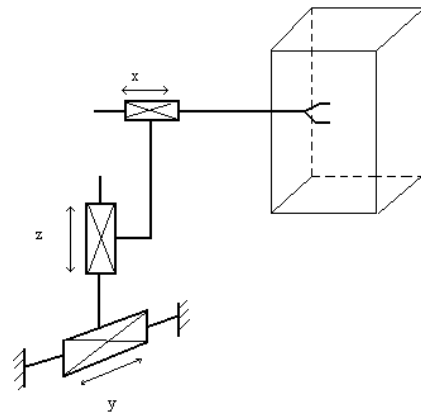
Число ступенів рухливості і кожен рух робота забезпечується відповідною кінематичною схемою його механізмів. Кінематичні схеми роботів мають певні структури кінематики рук і кисті, які залежать від виду і послідовності розташування обертальних і поступальних кінематичних пар.

Існує велика різноманітність кінематичних схем маніпуляторів промислових роботів. Вони пов'язані з різними системами координат. Характер переносних ступенів рухливості (поступальних та обертальних) визначає базову систему координат маніпулятора. На рис. 2.10–2.13 показані конструкції маніпуляторів із трьома переносними ступенями рухливості у різних системах координат та їх робочі зони.

Маніпулятори, що мають всі ступені рухливості поступальні, працюють у *прямокутній системі координат* (рис. 2.10) і мають робочу зону у формі паралелепіпеда. Така система координат найбільш зручна до виконання прямолінійних рухів. Крім того, вона максимально спрощує програмування робота, тому що воно зазвичай виконується в прямокутній системі координат, і, отже, у цьому випадку не потрібно перерахування програми з однієї системи координат в іншу.



а – зовнішній вид



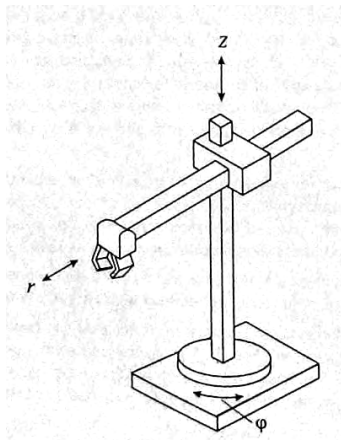
б – кінематична схема і робоча зона

Рисунок 2.10 – Маніпулятор з прямокутною системою координат

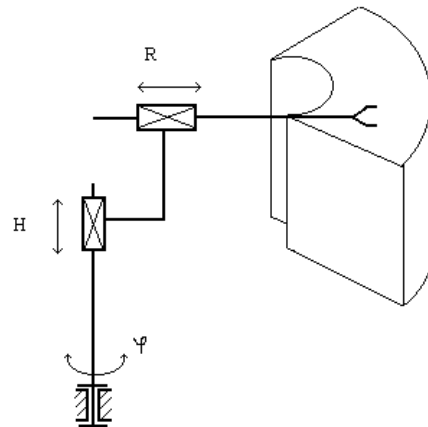
Незважаючи на простоту конструкції, ПР з такою системою координат зустрічаються досить рідко, бо мають великі габарити при малому об'єму робочої зони та характеризуються порівняно невисокою швидкістю. Такі роботи зазвичай або підвішуються над технологічним обладнанням, що обслуговується, або монтуються на напрямних каретках під ним.

Маніпулятори, у яких поряд з поступальними переміщеннями здійснюється одне кутове переміщення (по колу), працюють в *циліндричній системі координат* (рис. 2.11). Відповідно їхня робоча зона обмежена циліндричними поверхнями.

Відповідна цьому випадку базова система координат зручна і набула великого поширення. Вона забезпечує обслуговування великого об'єму робочої зони, але має недолік, пов'язаний з труднощами організації маніпулювання предметами на малій висоті.



а – зовнішній вид

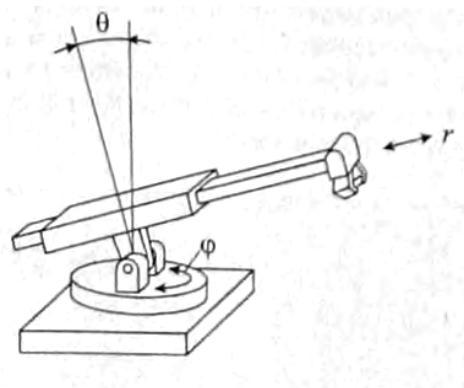


б – кінематична схема і робоча зона

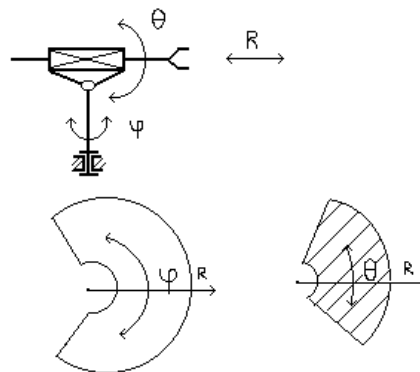
Рисунок 2.11 – Маніпулятор з циліндричною системою координат

На рис. 2.12 показаний маніпулятор, що працює у *сферичній системі координат*. У сферичній системі координат здійснюються вже два кутові переміщення, і робоча зона обмежена сферичними поверхнями.

Це сама універсальна система координат. Вона забезпечує обслуговування більшого об'єму робочої зони, ніж у прямокутній та циліндричній системах координат. Незважаючи на компактність конструкція маніпулятора в цьому випадку виходить складнішою, а ПР потребує більш складної системи керування.



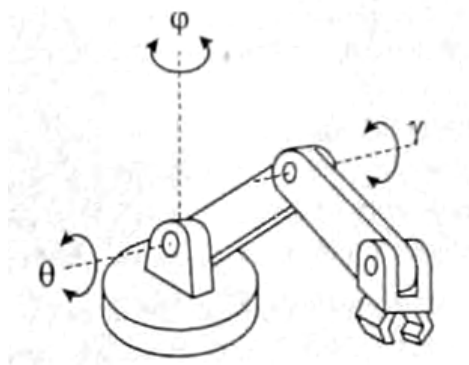
a – зовнішній вид



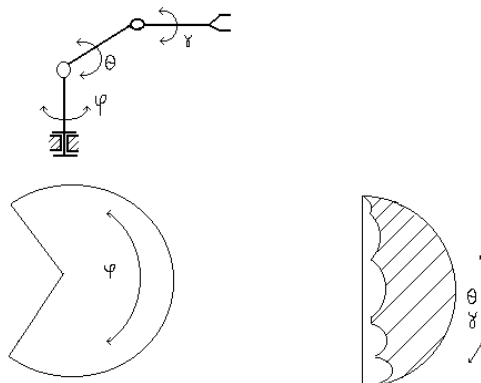
б – кінематична схема і робоча зона

Рисунок 2.12 – Маніпулятор зі сферичною системою координат

Показаний на рис. 2.13 маніпулятор з *кутовою (ангулярною) системою координат* робить тільки кутові переміщення, тобто всі його ланки є шарніри. Тому часто такі маніпулятори називають шарнірними та антропоморфними. Роботи з такого типу маніпуляторами завдяки можливості останніх складатися, практично не виступаючи за габарит основи робота, мають найбільшу компактність, хоча й найбільш складні в керуванні.



a – зовнішній вигляд



б – кінематична схема і робоча зона

Рисунок 2.13 – Маніпулятор з кутовою системою координат

Вибір тієї чи іншої системи визначається сукупністю багатьох конструктивних та експлуатаційних факторів. Це пов'язано і з компонуванням двигунів різного типу. Спочатку часто вживалися циліндрична і сферична системи. Останніми роками дедалі ширше застосування набувають кутові

системи координат. Подані на рис. 2.10–2.13 маніпулятори мають по три переносні ступені рухливості.

Маніпулятори реальних роботів містять більшу кількість ступенів рухливості. Сучасні маніпулятори в середньому мають 4-6 ступенів рухливості, але існують маніпулятори і з 8-9 такими ступенями. У них використовуються різні комбінації кутових та поступальних ступенів рухливості (рис. 2.14 та рис. 2.15).

У кінематичній схемі типу ПУМА на рис. 2.14 відбувається рух всіх ланок руки у вертикальній площині щодо горизонтальних осей і загальний поворот всієї руки в цілому навколо вертикальної осі.

При компонованні кінематичних схем маніпуляторів ПР набув поширення механізм, що називається *пантограф* (рис. 2.16).

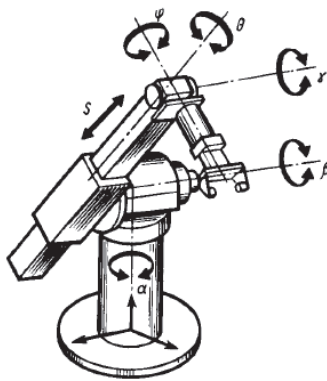


Рисунок 2.14 – Маніпулятор в сферичних координатах

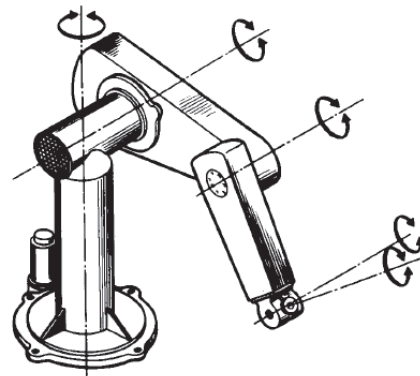


Рисунок 2.15 – Маніпулятор в кутових координатах

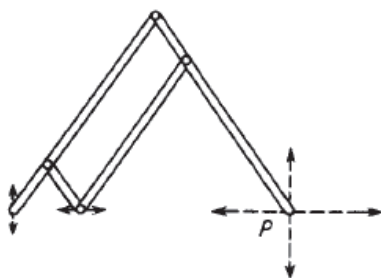


Рисунок 2.16 – Схема пантографа

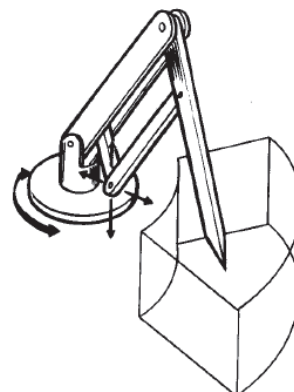


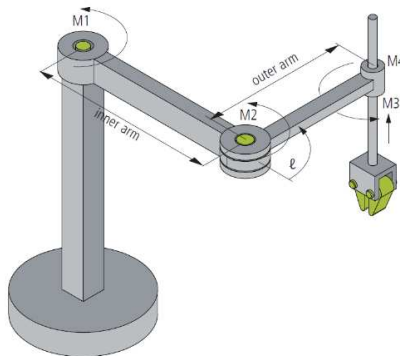
Рисунок 2.17 – Маніпулятор з пантографом

Він має таку властивість, що його ланки мають кутові рухи, а результуюче переміщення кінця маніпулятора відбувається в прямокутній системі координат. Зокрема, незважаючи на кутові рухи ланок, тут легко і з малою енергетичною витратою здійснюються прямолінійні вертикальні та горизонтальні переміщення кінця маніпулятора P . Якщо такий механізм встановити на підставі, що повертається (рис. 2.17), то маніпулятор буде працювати в циліндричній системі координат.

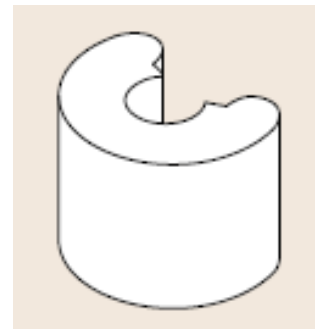
Оригінальним рішенням щодо поліпшення динамічних можливостей шарнірних маніпуляторів є розміщення шарнірів в горизонтальній площині. У схемі типу SCARA всі ланки руки розташовані в горизонтальній площині і обертаються навколо вертикальних осей, а остання ланка з пристроєм захоплення (або інструментом) має вертикальне поступальне переміщення (рис. 2.18). При необхідності всю руку можна підняти або опустити в стійці основи маніпулятора.



a



б



в

Рисунок 2.18 – Маніпулятори типу SCARA

У такій конструкції поєднуються властивості схем з кутовою та циліндричною системами координат. За рахунок жорсткості конструкції у вертикальному напрямку маніпулятори SCARA можуть нести підвищені навантаження на робочому органі. При цьому розвантаження двигунів від ваги ланок маніпулятора та корисного вантажу дозволило суттєво підвищити швидкодію (швидкість робочого органу до 10 м/с та вище). Висока точність позиціювання робочого органу та велика робоча зона дозволяють особливо ефективно застосовувати компоновання SCARA під час складання.

Фірмою ABB Automation (Швеція-Швейцарія) розроблено компоновання маніпулятора *Flex Picker*, що відрізняється вдалим втіленням

ідей мехатроніки та високими швидкостями переміщень робочого органу (рис. 2.19). На осях чотирьох серводвигунів із загальним керуванням є диски, до кожного з яких прикріплена кінематична пара з обертальним з'єднанням ланок. Вільні кінці ланок кожної пари з'єднані в одній точці, до якої прикріплено пристрій захоплення. Розімкнутий ланцюг з жорстких шарнірно-з'єднаних ланок, певним чином орієнтованих один щодо одного, може забезпечити досить великий набір конфігурацій у робочому просторі.

Цим конфігураціям відповідають будь-які положення та орієнтація встановленого на кінцевій ланці робочого органу (пристрою захоплення).

Однак для деяких завдань розімкнена маніпуляційна система або зовсім не може бути застосована, або її застосування важко. В першу чергу це завдання виробництва елементів мікроелектронної техніки, коли розімкнений нежорсткий механізм традиційної руки важко забезпечує порівняно високу точність складання елементів. Крім того, при виконанні таких робіт за умовами технологічного процесу робіт в деяких випадках повинен бути абсолютно чистим (не допускається присутність змащуваних або зношуваних елементів кінематичного ланцюга).



Рисунок 2.19 – Компонівка маніпулятора Flex Picker

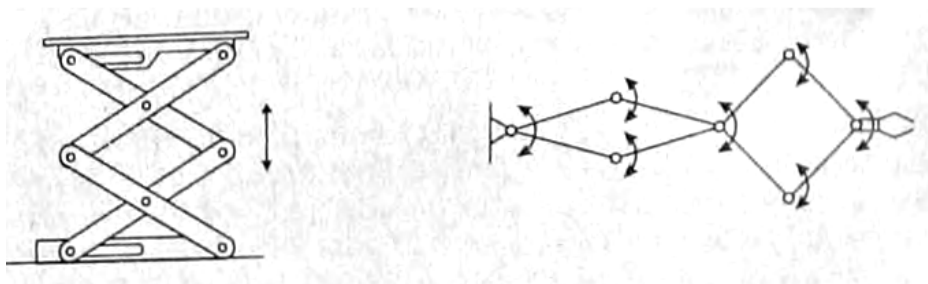


Рисунок 2.20 – Варіанти паралельних кінематичних схем

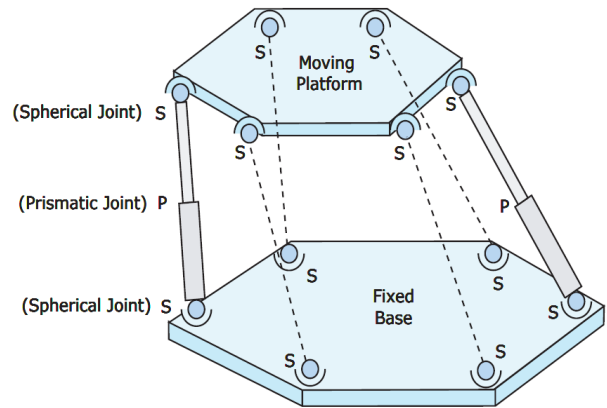
При великих статичних і динамічних навантаженнях і невеликих діапазонах переміщень і поворотів об'єкта маніпулювання знаходять застосування

маніпуляційні системи, структури яких містять паралельні кінематичні ланцюги. На рис. 2.20 показані варіанти кінематичних схем з паралельним з'єднанням ланок, що знайшли застосування в маніпуляторах для підвищення жорсткості та маневреності.

Типовим прикладом конструкції такої маніпуляційної схеми є платформа Стюарта (рис. 2.21). Вона складається з двох пластин, одна з яких є основою, з'єднаних за допомогою шарнірів зі стрижнями, які в свою чергу з'єднані попарно (мінімально трьома) поступальними кінематичними парами.



а



б

Рисунок 2.21 – Гексапод

При зміні довжини цих пар відбувається просторове поступальне і кутове переміщення верхньої пластини щодо нижньої. Як поступальні кінематичні пари можуть застосовуватися гідроциліндри, пневмо- та електропривод. Конструкція, що реалізує таку кінематику, отримала застосування в верстатобудуванні і називається гексапод. Можливе послідовне з'єднання декількох таких конструкцій. Роботи з паралельними кінематичними ланцюгами широко застосовують в операціях складання друкованих плат. Гідність таких систем також полягає у простоті вирішення оберненої задачі кінематики, яка завжди вирішується у явному вигляді.

Іншими варіантами побудови маніпуляторів є кінематична схема з керованою деформацією пружних ланок і застосування регулярних кінематичних структур.

Деформація пружних ланок може бути реалізована на основі різних фізичних принципів та з застосуванням різних матеріалів, але загальною влас-

тивістю є те, що за рахунок керованої зміни просторової конфігурації окремих ланок здійснюється переміщення кліщів або робочого інструменту в просторі. При використанні кінематичної схеми з керованою деформацією пружних ланок число ступенів свободи однієї пружної ланки більше числа керуючих впливів або числа параметрів, що примусово змінюються. На сьогоднішній день відомі кілька конструкційних підходів у створенні ланок з керованим згином.

Найбільш поширені маніпулятори, в яких вигин ланок здійснюється шляхом зміни тиску повітря в порожнинах деформованих елементів. Елементи поділені на два та більше незалежних сегменти. Найвідоміша конструкція маніпулятора, що реалізує принцип керування вигином подібним способом, створена фірмою Festo і позиціонується як біонічний маніпулятор, що повторює функції хобота слона (рис. 2.22). Маніпулятор складається з ультра легких сегментів пластичного матеріалу. Кожен сегмент має камеру, наявність якої перетворює даний сегмент на незалежний пневматичний м'яз. З'єднання таких сегментів різного розміру певної геометричної послідовності дозволило отримати маніпулятор, що володіє високою рухливістю, великими значеннями коефіцієнта сервісу. Подача стисненого повітря в різні камери маніпулятора призводить до відповідного переміщення в тривимірному просторі.



Рисунок 2.22 – Біонічний маніпулятор фірми Festo

Ще один принцип побудови маніпуляторів з керованим вигином на основі застосування твердотільних елементів зі сферичною поверхнею. Подібний гнучкий дволанковий маніпулятор був розроблений фірмою Spine Inc. на початку 80-х років минулого століття. Близько 25 зразків та-

ких маніпуляторів експлуатувалися на підприємствах Volvo, Volkswagen та JCB на лакофарбових виробництвах. Маніпулятор мав 7 ступенів рухливості: два в плечі, два в передпліччі і три кистьові.

Маніпулятор Spine складається з безлічі чечевице-подібних сталевих дисків, що контактують один з одним сферичними поверхнями (рис. 2.23). У дисках ланки є отвори: чотири по периферії диска і один уздовж осі. Через отвори пропущені троси, кожен з яких прикріплений до крайнього від основи диска. Центральний трос натягнутий пружиною і виконує функцію механізму центрування дисків. Периферійні троси попарно з'єднані з керованими двигунами, що знаходяться в основі маніпулятора, і утворюють разом з ними механізм навантаження ланки.

Кожному набору положень двигунів відповідає цілком певна, при відомих статичних навантаженнях, статична деформація ланки загалом. Датчики положення робочого органу передають інформацію до системи керування, яка змінює натяг кожного троса.

Маючи великий радіус дії і високу маневреність, робот здатний добиратися до таких точок об'єкта, які недоступні іншим кінематичним схемам. З його допомогою, наприклад, може виконуватися фарбування внутрішніх порожнин автомобіля.

Регулярні кінематичні структури складаються з однакових кінематичних елементів, що періодично повторюються, та їх поєднань (рис. 2.24). Регулярні структури дозволяють створювати за допомогою простих і однакових елементів надзвичайно гнучкі РТС. Маючи велику кількість ступенів рухливості ($n \gg 6$), такі механізми можуть працювати у середовищі з перешкодами, виконуючи різні технологічні операції.

За способом керування регулярними структурами їх можна розділити на системи з позиційним і з цикловим керуванням положенням елементів.

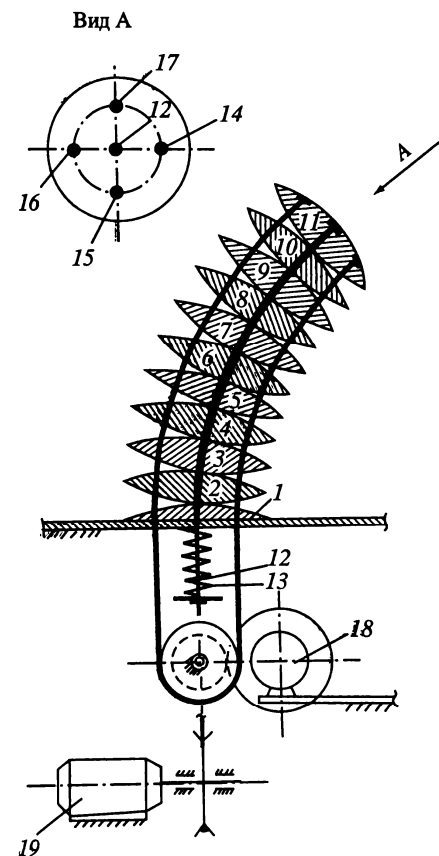


Рисунок 2.23 – Конструкція маніпулятора Spine

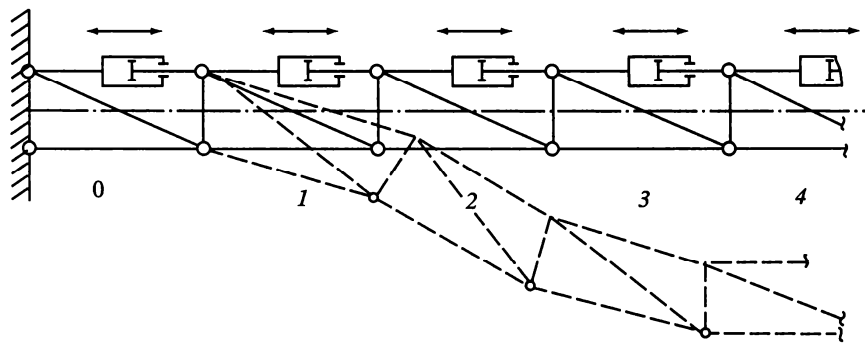


Рисунок 2.24 – Кінематична схема регулярної структури (модулі з'єднані обертальними парами, осі яких паралельні)

Позиційне керування застосовується переважно при невеликій кількості модулів. При великій кількості однакових модулів доцільно застосовувати циклове керування. Кожен модуль може бути в кінцевому числі стійких положень (конфігурацій). Зі збільшенням числа модулів зростає кількість можливих конфігурацій маніпуляційної системи.

Крім розглянутих кінематичних схем конструкція маніпуляторів визначається також типом і розміщенням приводів і механізмів передачі руху від них до ланок маніпулятора.

Наприклад, в маніпуляторах з електричними двигунами застосовуються двигуни кутового або лінійного руху.

Як *механізми передачі руху* (перетворювачі руху) застосовуються такі види: хвильові, планетарні, рейкові, черв'якові, гвинтові, ланцюгові, ремінні, тросові, мальтійські, цівкові та інші.

У маніпуляторах часто застосовуються *пристрої зрівноважування*, які також істотно впливають на конструкцію маніпуляторів. Зрівноважувальні механізми поділяються на дві групи: вантажні та пружинні. Розглянемо особливості розміщення та компонування приводів та пристрою зрівноважування маніпуляторів.

З погляду простоти передачі руху від двигуна до ланки маніпулятора найкраще, звичайно, розміщувати двигуни безпосередньо біля переміщуваних ними ланок. Однак таке компонування маніпулятора призводить до істотного збільшення його габаритів і мас, що рухаються. Цей недолік тим суттєвіше, чим далі ланка маніпулятора, що розглядається, знаходиться від його основи і ближче до робочого органу, так як тим більша кількість попе-

редніх ланок та їх приводів навантажується цією ланкою. Тому чим далі ланка від основи маніпулятора, тим більший ефект дає перенесення його двигуна на одну з попередніх ланок, ближче до основи маніпулятора. Щоправда, це вимагає введення відповідних механізмів передачі руху від двигуна до ланки, що ускладнює конструкцію маніпулятора.

У маніпуляторі, показаному на рис. 2.25 двигун приводу 1-го ступеня рухливості навколо вертикальної осі розміщений на основі маніпулятора. Двигуни ступенів рухливості 2 та 3 розміщені поруч на другій ланці. З огляду на те, що приводяться ними, вони пов'язані через редуктори, а двигун 3 ще й валом з шарнірами Гука. Двигуни ступенів рухомості 4, 5 і 6 розміщені на третій ланці маніпулятора. Передача руху від них здійснюється через вали з шарнірами Гука і зубчасті передачі.

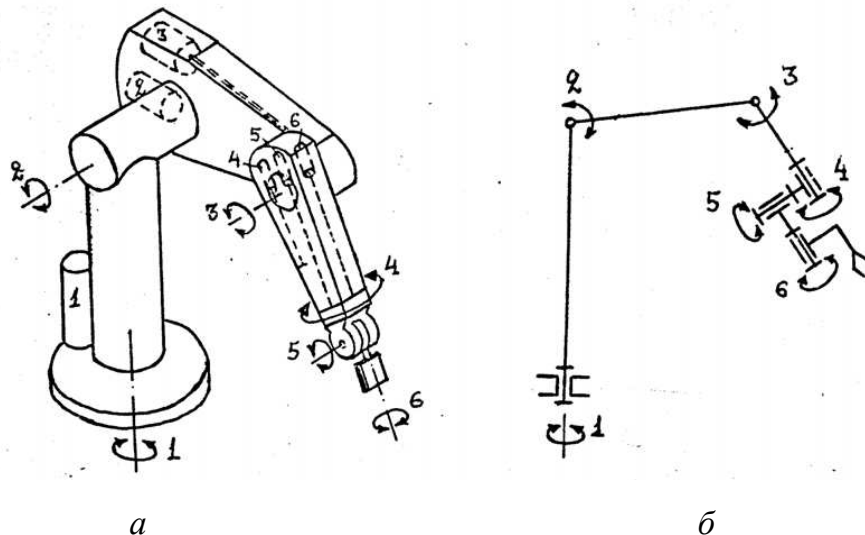


Рисунок 2.25 – Конструкція ПР Puma та його кінематична схема

Розміщення цих двигунів з іншого боку осі обертання ланки щодо основної його частини забезпечує статичне врівноваження ваги цих ланок маніпулятора щодо осей їх обертання і відповідно розвантажує двигуни 2 і 3.

Інший приклад компоновки маніпулятора промислового робота МЕМ-10 СД з сімома ступенями рухливості, у якого всі двигуни розміщені на його основі, а передача руху від них до ланок маніпулятора здійснюється через вставлені один в одного трубчасті вали та конічні зубчасті передачі в шарнірах маніпулятора. Число зубчастих передач у шарнірах маніпулятора від основи до пристрою захоплення змінюється.

Таке компонування застосовується в копіювальних маніпуляторах, призначених для роботи з небезпечними об'єктами (наприклад, радіоактивними), щоб вивести приводи з робочої зони. Крім того, таке компонування забезпечує мінімальні габарити маніпулятора.

Інший граничний випадок – розміщення двигунів безпосередньо біля приведених ними ланок – знайшов застосування в маніпуляторах з безредукторними електричними приводами, що обертаються, і лінійними приводами. Відсутність у цьому випадку редукторів та механічних передач дозволяє забезпечити найбільш високу точність позиціонування завдяки підвищеній жорсткості та відсутності зазорів.

Аналіз кінематичних схем маніпуляторів показує дві основні особливості компонування:

- осі кінематичних пар розташовані паралельно або перпендикулярно одна до одної;
- ланки з'єднані у послідовний кінематичний ланцюг.

Основні недоліки послідовного кінематичного ланцюга:

- низький показник вантажопідйомність/маса маніпулятора, що обумовлено послідовною схемою з'єднання ланок. Кожен привод повинен переміщати не тільки корисне навантаження, але і всі наступні по ланцюгу ланки;
- похибки у переміщеннях всіх шарнірів підсумовуються на кінцевій точці маніпулятора, що призводить до низької точності позиціонування маніпуляторів у порівнянні з роботами з декартовим компонуванням;
- відносно низька жорсткість маніпуляційних роботів, оскільки пружне відхилення робочого органу є результатом накопичення деформацій за всіма ступенями рухливості ланцюга робота.

Як приклад конструкцій сучасних маніпуляторів на рис. 2.26 та рис. 2.27 наведено ряд промислових роботів фірм KUKA та Kawasaki.



Рисунок 2.26 – Ряд промислових роботів фірми KUKA



Рисунок 2.27 – Ряд промислових роботів фірми Kawasaki

2.2.2. Математичний опис кінематичних схем

Розглянемо постановку завдання синтезу та дослідження кінематичних схем маніпуляторів. Складається розрахункова кінематична модель, до якої входять розміри ланок, кількість та розподіл кінематичних пар. Маніпулятор являє собою розімкнутий кінематичний ланцюг. Його ланки з'єднані кінематичними парами, причому один елемент кожної пари кріпиться до попередньої ланки.

Положення кінематичного ланцюга у просторі визначається за допомогою узагальнених координат q_i ($i = 1, 2, \dots, n$), які характеризують відносні поступальні або обертальні переміщення ланок.

Узагальнена координата – незалежна змінна, що визначає положення наступної ланки виконавчого механізму щодо попередньої. Кутові узагальнені координати позначають φ_{ij} , лінійні – S_{ij} . Перший індекс i означає положення якої ланки визначають, другий індекс j – відносно якої ланки визначають положення ланки i . У загальному випадку кутові та лінійні узагальнені координати позначають q_i .

Початок відліку кутової узагальненої координати вибирають на продовженні попередньої (j -ої) ланки, кінець – на напрямку наступної (i -ої) ланки.

Початком відліку лінійної узагальненої координати є середина поступальної кінематичної пари, кінцем – кінцева точка ланки, що висувається. Для першої ланки початок відліку вибирають на осі x системи координат, пов'язаної з основою. Узагальнену координату вважають позитивною, якщо її напрямок не збігається із напрямком ходу годинникової стрілки, та негативною – якщо збігається із напрямком ходу годинникової стрілки.

На рис. 2.28 показаний зовнішній вигляд маніпулятора робота в циліндричній системі координат.

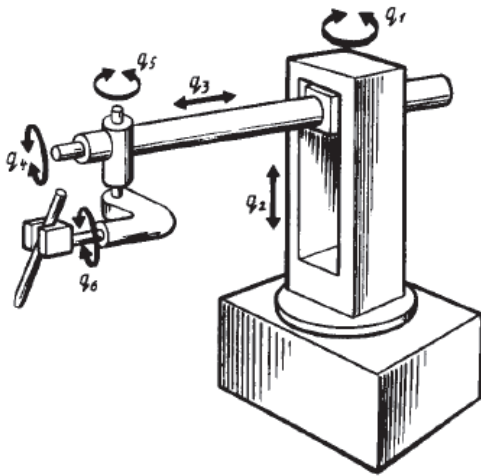


Рисунок 2.28 – Позначення узагальнених координат

На схемі q_1, q_2, q_3 означають переносні переміщення, а q_4, q_5, q_6 – орієнтуючі.

При керуванні маніпулятором необхідно вирішувати характерні завдання кінематики маніпуляторів.

Пряма задача про положення маніпуляторів полягає в розрахунку положення робочого органу маніпулятора і всіх його ланок за заданим відносним переміщенням q_i в кінематичних парах. Можливі три варіанти постановки прямої задачі.

Координати q_i можуть бути задані:

- у вигляді набору n скалярних величин, які визначають деяку фіксовану конфігурацію маніпулятора;
- у вигляді кінцевого числа наборів, які відповідають декільком конфігураціям;
- як набір n безперервних функцій часу $q_i = q_i(t)$.

Під час розрахунку положення робочого органу (наприклад, пристрою захоплення) визначають або координати пристрою захоплення r_j ($j = 1, 2, \dots, m$), або кінцеве число наборів координат пристрою захоплення (положень), або закони переміщення пристрою захоплення в часі $r_j = r_j(t)$. Загалом у результаті розрахунку координат пристрою захоплення можна визначити рівняння траєкторії пристрою захоплення та його орієнтацію вздовж усієї траєкторії.

Таким чином, у прямій задачі розраховують геометричні характеристики робочої зони робота при конструктивних обмеженнях діапазонів можливої зміни узагальнених координат, точнісні характеристики позиціонування та руху при заданих вихідних похибках елементів, а також сервісні характеристики. Прямую задачу про положення використовують при дослідженні кінематики та динаміки маніпуляторів.

Обернена задача про положення маніпулятора полягає у визначенні узагальнених координат q_i за заданим в опорній системі координат (x, y, z) положенням робочого органу або будь-якої ланки маніпулятора. При цьому, як і в прямій задачі, мова може йти про кінцеву кількість положень, або про закон руху робочого органу $x(t), y(t), z(t)$ для якого обчислюються закони зміни узагальнених координат $q_i(t)$ ланок.

Умова $n = m$ є необхідною для того, щоб обернена задача в загальному випадку мала рішення. У деяких випадках за $n = m$ рішень може бути кілька. Умова $n = m$ не є достатньою, тому можливі варіанти, коли рішення оберненої задачі відсутнє (це залежить від типу та розподілу кінематичних пар).

При $n < m$ рішення оберненої задачі в загальному випадку відсутнє.

При $n > m$ обернена задача вирішується неоднозначно. При $n > m$ кажуть, що маніпулятор має надмірні ступені рухливості. Їх використання дозволяє забезпечити маніпулятору можливість обходити перешкоди, а також врахувати обмеження на узагальнені координати або умови на конфігурацію маніпулятора.

Як і в прямій задачі про положення маніпулятора, у оберненій задачі можливі три варіанти постановки:

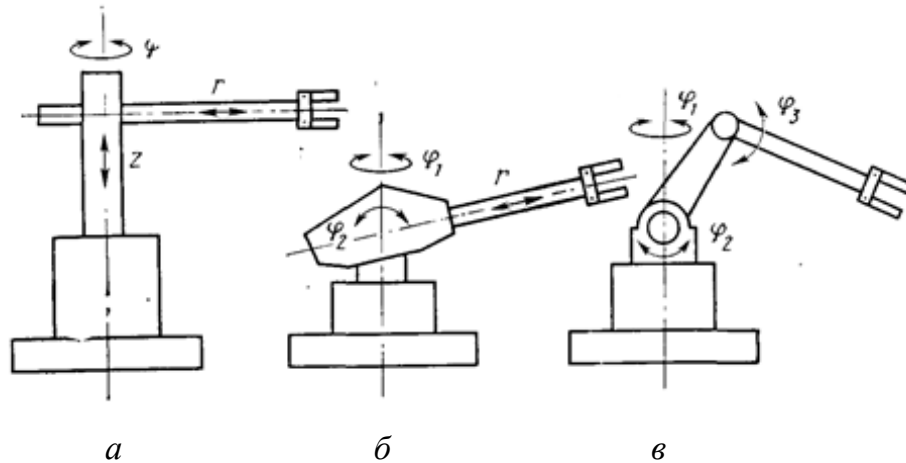
- задається одне положення пристрою захоплення і знаходиться одна конфігурація маніпулятора (кілька конфігурацій, якщо рішень декілька);
- задається кінцева кількість положень пристрою захоплення і знаходяться відповідні конфігурації маніпулятора;
- задається закон руху пристрою захоплення у часі $r_j = r_j(t)$ і знаходяться закони зміни узагальнених координат $q_i = q_i(t)$.

Обернена задача про положення маніпулятора складніша, ніж пряма. У багатьох випадках її ефективно можна вирішити лише чисельно.

Задача розрахунку лінійних швидкостей і прискорень деяких точок маніпулятора, а також кутових швидкостей і прискорень його ланок тісно пов'язана з прямою і оберненою задачею про положення маніпулятора і має пряму і обернену постановку.

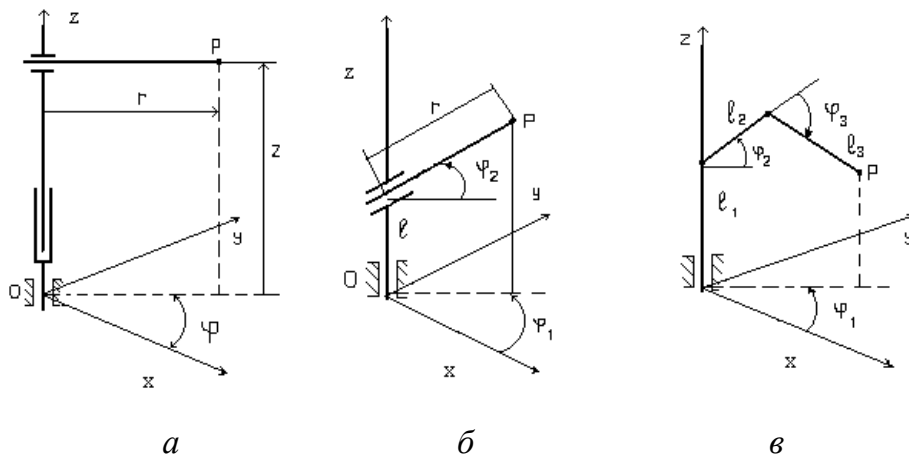
Розглянемо конкретні задачі кінематики маніпуляторів на прикладі кількох кінематичних схем. На рис. 2.29 зображені типові компоновки маніпуляторів для переносних переміщень в різних системах координат, а на рис. 2.30 – відповідні розрахункові кінематичні схеми.

Розглянемо розв'язання прямої задачі про положення маніпуляторів. Отримані співвідношення можна використовувати для кінематичного дослідження маніпуляторів промислових роботів.



a – циліндрична система координат; *б* – сферична система координат;
в – кутова система координат

Рисунок 2.29 – Типові компоновки маніпуляторів



a – циліндрична система координат; *б* – сферична система координат;
в – кутова система координат

Рисунок 2.30 – Розрахункові кінематичні схеми

Координати кінцевої точки маніпулятора P у робочому просторі (де кріпиться робочий орган) у разі циліндричної системи координат (рис. 2.30, *a*) визначаються виразами:

$$\begin{cases} x_p = r \cos \varphi, \\ y_p = r \sin \varphi, \\ z_p = z, \end{cases} \quad (2.1)$$

де $q_1 = z$, $q_2 = \varphi$, $q_3 = r$.

Для маніпулятора у сферичній системі координат (рис. 2.30, *б*):

$$\begin{cases} x_p = r \cos \varphi_1 \cos \varphi_2, \\ y_p = r \sin \varphi_1 \cos \varphi_2, \\ z_p = l + r \sin \varphi_2, \end{cases} \quad (2.2)$$

де $q_1 = \varphi_1$, $q_2 = \varphi_2$, $q_3 = r$.

Для маніпулятора в кутовій системі координат (рис. 2.30, *в*) отримаємо:

$$\begin{cases} x_p = l_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_1 \cos(\varphi_2 + \varphi_3), \\ y_p = l_2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_1 \cos(\varphi_2 + \varphi_3), \\ z_p = l_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3), \end{cases} \quad (2.3)$$

де $q_1 = \varphi_1$, $q_2 = \varphi_2$, $q_3 = \varphi_3$.

На основі співвідношень (2.1)–(2.3) вирішують пряму та обернену задачі. Аналітичне рішення оберненої задачі для розглянутих кінематичних моделей маніпуляторів можна отримати в наступному вигляді.

Для циліндричної системи координат (рис. 2.30, *a*):

$$\begin{cases} r = \sqrt{(x_p^2 + y_p^2)}, \\ \varphi = \arctg \frac{y_p}{x_p}, \\ z = z_p. \end{cases} \quad (2.4)$$

Для сферичної системи координат (рис. 2.30, *б*):

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + (z_p - l)^2}, \\ \varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{y_p}{x_p}, \\ \varphi_2 = \operatorname{arctg} \left[\frac{(z_p - l)}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}} \right]. \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Використовуючи співвідношення (2.4)–(2.5), необхідно враховувати обмеження на узагальнені координати і межі зміни головних значень обернених тригонометричних функцій.

2.3. Конструктивне виконання промислових роботів

2.3.1. Конструкції маніпуляторів промислових роботів

Конструкцію промислових роботів визначають різні фактори: способи установки (підлогові, підвісні, порталні, вбудовані); бажана форма, розміри та розташування робочої зони маніпулятора; вимоги необхідної точності позиціонування та процесів руху; максимальні швидкості та прискорення, пружна податливість ланок; власні частоти. Важливий фактор – потрібна вантажопідйомність робота, а також допустимі габаритні розміри та маса.

Конструкція повинна включати певні види вузлів рухливості і забезпечувати необхідні діапазони зміни взаємного розташування ланок маніпулятора з урахуванням реальної технологічної обстановки в зоні дії робота.

Істотно впливають на конструкцію маніпулятора робота види і потужності встановлюваних приводів, а також їх розташування – безпосередньо біля кінематичних пар, що з'єднують ланки, або в основі робота з відповідними передатними механізмами, або ж у змішаному варіанті. Відіграють роль також способи передачі рухів (зубчасті механізми, ланцюгові передачі та ін.).

При розробці конструкції робота також повинні бути враховані експлуатаційні вимоги: ремонтпридатність та зручність обслуговування, споживана потужність та джерела енергоживлення, вартість та надійність функціонування. У ряді випадків може знадобитися захист від агресивності середовища, а також вибухо- та пожежна безпека.

Повинні бути, крім того, враховані типи пристроїв захоплення та їх змінність (у тому числі автоматично), способи кріплення робочих інструментів (гайковерт, зварювальний або фарбувальний пристрій та ін.).

У конструкції робота має бути передбачена можливість спільної роботи з сенсорами при необхідності адаптивного керування (силомоментні датчики, системи технічного зору та ін.).

Що ж до конструкцій, які стосуються системи керування роботом, то ця система зазвичай буває розділена. Маніпулятор робота несе на собі датчики зворотних зв'язків по положенню і швидкості в кожній кінематичній парі, а також у ряді випадків датчики зусиль в кисті, що несе пристрій захоплення (або інструмент), особливо при автоматизації складальних операцій. Основна ж частина системи керування, включаючи електронні блоки, мікроЕОМ або мікропроцесорні пристрої, міститься в окремій шафі з відповідними лініями зв'язку з маніпулятором робота, сенсорами і з обслуговуванням технологічним обладнанням.

При розгляді кінематичних схем маніпуляторів використовувалося поняття «ланки», як деталі або жорсткого елемента, що не змінює своїх розмірів і форми в процесі руху і взаємодії з іншими ланками і характеризується тільки масою, довжиною і умовами переміщення. Такого уявлення цілком достатньо для вирішення основних завдань механіки маніпуляційної системи. Однак у реальному втіленні ланка маніпулятора як найважливіший елемент конструкції має досить складну будову і містить, крім жорстких несучих елементів, ряд інших компонентів реальної конструкції: частини приводів; складові елементів кінематичних пар; зупиняючі, гальмівні та демпфірувальні пристрої тощо. Такі ланки справжньої конструкції називають вузлами маніпулятора.

У загальному вигляді до складу маніпулятора входять:

- несучі елементи, що забезпечують конструктивну жорсткість і міцність та є базою для розміщення на них інших складових частин вузла;
- сукупність деталей, що утворюють кінематичні пари (цапфи, осі, підшипники, напрямні (ковзання чи кочення) тощо);
- пристрої, що забезпечують рухи за ступенями рухливості та включають елементи приводів маніпулятора (двигуни, трансмісії, лінії підведення енергоносія тощо);
- елементи, що обмежують та регулюють величини та швидкості переміщень (упори, амортизатори, гальмівні пристрої тощо);

- пристрої (датчики) зворотного зв'язку;
- інші пристрої – запобіжні, захисні, мастильні та ін.

Залежно від функціонального призначення і виду реалізованого руху виділимо основні різновиди вузлів.

Рука – один з найбільш складних вузлів, подібний за своїми функціями і структурою до руки людини. Завершенням цього вузла є робочий орган, що безпосередньо взаємодіє з об'єктом маніпулятора. Рука забезпечує робочому органу як переносні, так і орієнтовні ступені рухливості. За структурою руки бувають одно- і багатоланкові. Перші мають одну (поступальну) або дві (поступальну і обертальну) ступені рухливості, другі – кілька. Переважно багатоланкові руки виконуються у вигляді дволанкових з двома переносними обертальними (згини) ступенями рухливості.

Основа – опорна конструкція, на якій розміщуються вузли та системи маніпулятора, може бути нерухомою або переміщуваною. В останньому випадку основа має пристрій пересування, що реалізує одну або дві (дуже рідко три) координатні ступені рухливості маніпулятора.

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

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

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

Розглянемо як приклад конструкції деяких універсальних маніпуляторів.

Електромеханічний робот IRB-6 шведської фірми «Asea» використовується в автомобільній промисловості для таких операцій, як зварювання, фарбування, зняття задирок і т.д. Робот оснащений електродвигунами постійного струму з друкованим якорем. Він має антропоморфну схему з 5-ма ступенями рухливості. Вантажопідйомність робота – 6 кг, точність позиціонування – 0,2 мм, маса маніпулятора – 125 кг. Конструкція маніпулятора, його робоча зона та спрощена кінематична схема показані на рис. 2.31.

Паралельно основній ланці 2 введена тяга, утворюючи з ним паралелограмний механізм. Він забезпечує лінійне вертикальне переміщення ро-

бочого органу при повороті шарніра 3 (при його повороті за годинниковою стрілкою ліва тяга повертає в тому ж напрямку шарнір 2, зрушуючи робочий орган прямо з кола відносно точки 3). Така конструкція спрощує керування рухом робочого органу.

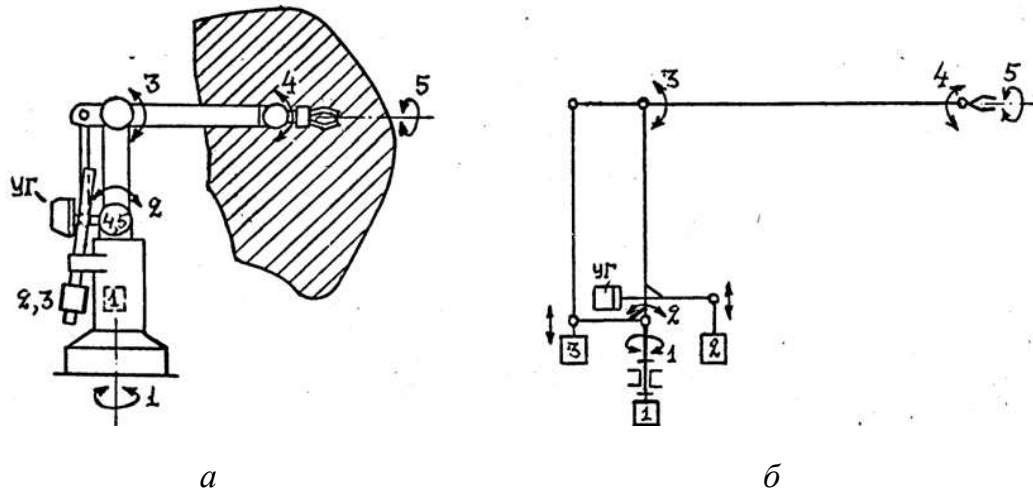


Рисунок 2.31 – Маніпулятор робота IRB-6 та спрощена кінематична схема

Кінематична схема маніпулятора наведена на рис. 2.32. Двигун першого ступеня рухливості (повороту колони) розміщений на основі маніпулятора. Поворот руки навколо вертикальної осі здійснюється від двигуна 1 через безлюфтову хвильову передачу 2, вихідна ланка якої пов'язана з поворотною платформою 19. Двигуни інших ступенів рухливості, включаючи орієнтуючі степені рухливості робочого органу, розміщені на рухомому корпусі. Шарнірно закріплений мотор-редуктор 3 і паралелограмний механізм передають рух до передпліччя 10. Цей механізм складається з двох кривошипів 5 і 8 і двох тяг 7 і 14. Нижній кривошип за допомогою кулько-гвинтової передачі 4 пов'язаний з вихідним валом мотор-редуктора, верхній кривошип пов'язаний із передпліччям.

Нахил плеча 14 забезпечується мотор-редуктором 18, рух якого через кулько-гвинтову передачу передається кривошипу 16, жорстко з'єднаному з плечем 14. Для розвантаження приводу плеча призначений зрівноважувальний вантаж 6.

Механізми орієнтуючих ступенів рухливості складаються з двох мотор-редукторів 15, встановлених співвісно з плечовим шарніром системою тяг 13, 12, кривошипів 17, 9, 11, що утворюють паралелограмні транслятори (їх два і вони розташовані по обидва боки плеча).

Качання кисті здійснюється безпосередньо від кривошипа 11, а ротація — від кривошипа паралельного транслятора через систему конічних зубчастих коліс.

Робот працює у циліндричній системі координат. При необхідності шляхом автоматичного перерахунку необхідних швидкостей в керуючому пристрої можна здійснити поступальні переміщення робочого органу. Це забезпечується за рахунок відповідного одночасного керування мотор-редукторами плеча 3 та передпліччя 18.

Універсальний промисловий робот РМ-01 (аналог робота PUMA-560) призначений для виконання основних технологічних та допоміжних операцій (рис. 2.33).

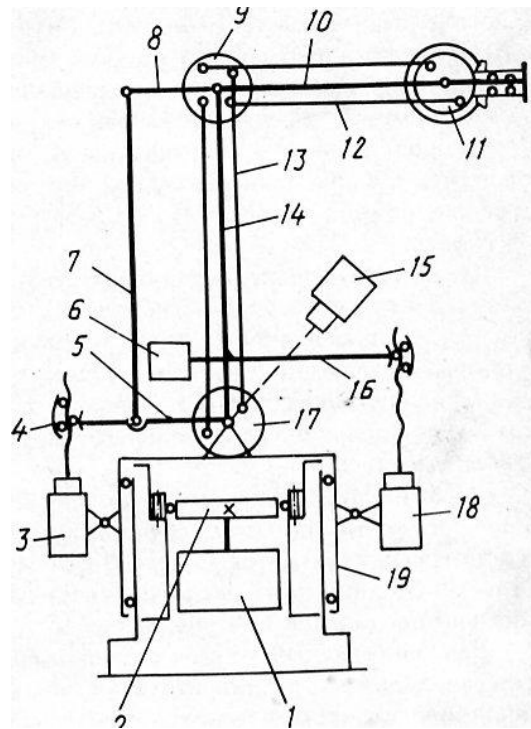


Рисунок 2.32 – Кінематична схема маніпулятора IRB-6

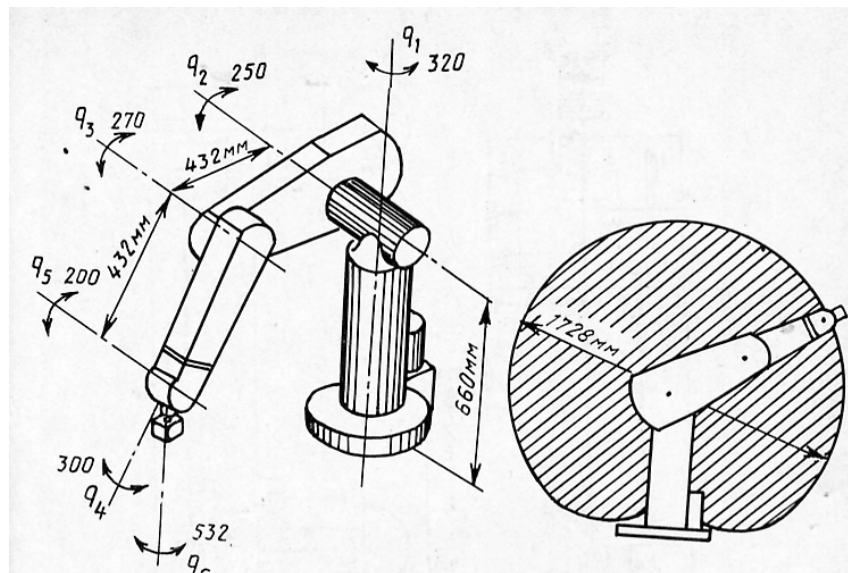


Рисунок 2.33 – Схема маніпулятора робота РМ-01

Вантажопідйомність робота – 2,5 кг, точність позиціювання – 0,1 мм, вага маніпулятора – 62 кг. До складу робота входить маніпулятор з 6-ма ступенями рухливості, побудований за антропоморфним принципом. Він включає корпус, поворотну колону, плече, передпліччя, кисть.

Кінематична схема маніпулятора представлена на рис. 2.34. Електродвигуни приводів розміщені на ланках, це спрощує передачі і підвищує точність, але збільшує переміщувану масу. У якості приводів ступенів рухливості використовуються двигуни постійного струму з напругою живлення 22 В. Кожен двигун забезпечений датчиками положення та швидкості, а також електромагнітним гальмом, що служить для фіксації положення ланок при відключеному двигуні.

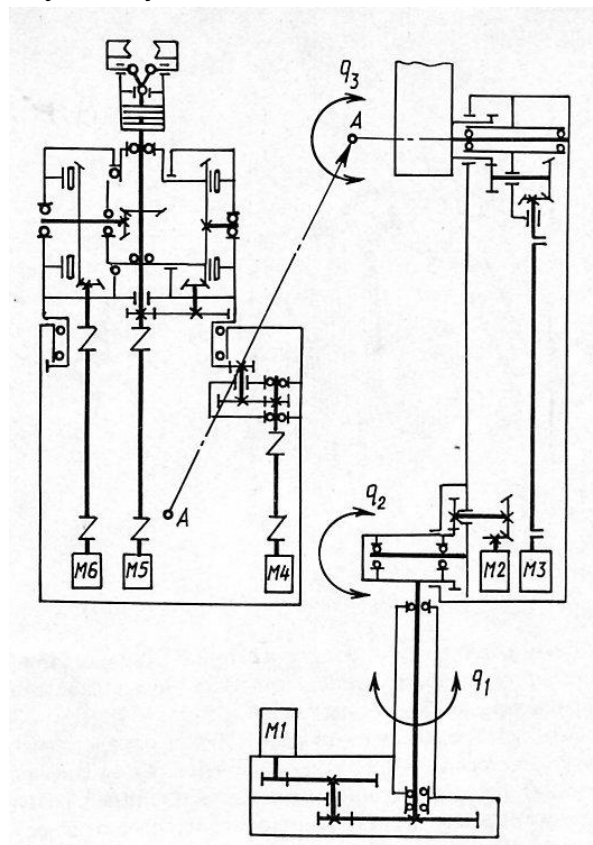


Рисунок 2.34 – Кінематична схема маніпулятора робота РМ-01

У приводах переносних ступенів рухливості q_1 і q_3 використані зубчасті механізми, у приводі координати q_2 – планетарний редуктор з провідним сателітом. Передатні відношення $i_1 = 60$, $i_2 = 50$, $i_3 = 30$. Рухи всіх переносних ступенів рухливості кінематично незалежні.

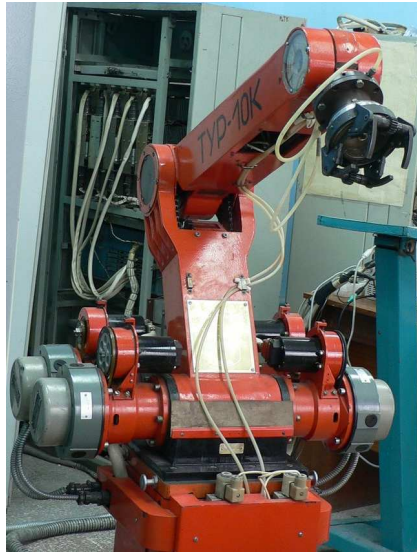
Конструктивні особливості маніпулятора забезпечують при заданій вантажопідйомності високу точність. Схема маніпулятора з розміщенням приводів на ланках дозволяє мінімізувати довжину кінематичних ланцюгів. Привод кожної ланки містить не більше двох зубчастих передач, висока точність яких і наявність механізму вибірки люфтів забезпечує високу точність передачі руху в цілому. Для зменшення похибки кінематичних ланцюгів, викликані деформацією скручування валів, найбільш навантажені деталі виконуються у вигляді труб великого діаметра.

Монококова конструкція корпусних вузлів маніпулятора забезпечує високу жорсткість маніпулятора при мінімальній вазі. Монокок – тип просторової конструкції, в якій зовнішня оболонка є основним і, як правило, єдиним несучим елементом. Підшипникові опори всіх валів максимально рознесені в межах габаритів ланок маніпулятора, що забезпечує жорсткість конструкції, зменшення реакцій в опорах та зниження впливу деформацій та зазорів. При цьому використовуються підшипники великих діаметрів, але легших серій, що необхідно для підвищення їхньої несучої здатності, плавності обертання, довговічності.

Всі зубчасті колеса, безпосередньо пов'язані з переміщуваними ланками, мають максимально можливі діаметри в межах габаритів корпусу. Це дозволяє зменшити зусилля в зачепленні, а, отже, знизити деформації зубів і підвищити точність кутового положення ланок.

Крім описаних заходів полегшення конструкції, у маніпуляторі здійснено раціональне розміщення мас. Центри мас ланок наближені до осей обертання. Для цього вузли приводних механізмів розташовані по обидва боки від шарніра, причому більш потужні частини та електродвигуни – на короткому плечі. Таким чином, конструкція ланки виявляється повністю або частково статично врівноваженою, що знижує потужність двигуна, необхідну для подолання статичного навантаження.

Електромеханічний універсальний ПР ТУР-10 може бути використаний для обслуговування різного обладнання, складання, зварювання та інших технологічних операцій. Маніпулятор має кінематичну схему з 5-ма ступенями рухливості. Вантажопідйомність робота – 10 кг, точність позиціонування – 0,2 мм, маса маніпулятора – 230 кг (рис. 2.35). За своєю структурою конструкція робота ТУР-10 відповідає структурі робота IRB-6, але відрізняється від нього конструктивним виконанням деяких функціональних механізмів.



а



б

Рисунок 2.35 – Універсальний електромеханічний робот ТУР-10

Конфігурацію робочої зони маніпулятора та її розміри показано на рис. 2.36. Значення кутів повороту за кожним ступенем рухливості: $q_1 = \pm 170^\circ$, $q_2 = \pm 45^\circ$, $q_3 = +25^\circ \div -45^\circ$, $q_4 = \pm 90^\circ$, $q_5 = \pm 180^\circ$.

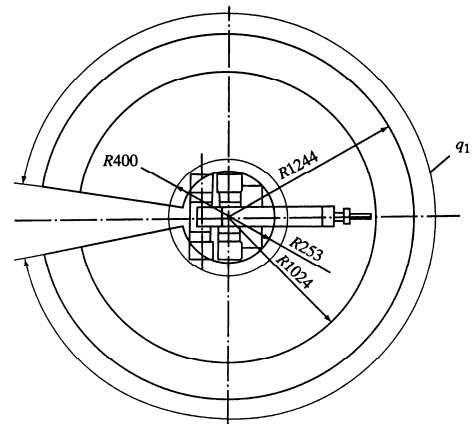
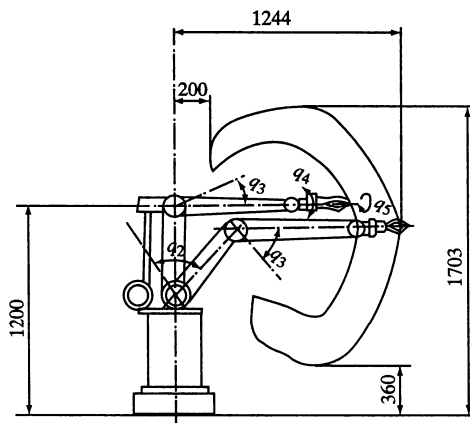


Рисунок 2.36 – Конфігурація і розміри робочої зони робота ТУР-10

Рука робота з п'ятьма ступенями рухливості виконана у вигляді шарнірно-важільного механізму. Робочий орган (кліщі чи інструмент) може переміщатися у будь-яку точку робочого простору. При цьому можлива довільна орієнтація робочого органу в площині ланок руки в межах обмежень руху в з'єднувальних і передавальних механізмах.

Маніпулятор (рис. 2.37) утворений п'ятьма рухомими ланками 1–5, встановленими на нерухомій основі 6. Перша рухома ланка являє собою поворотну платформу 1, що обертається в підшипниках, змонтованих на основі. Привод 7 ланки 1 встановлено на основі. На поворотній платформі змонтовано приводи 8–11 ланок 2–5. До фланця останньої ланки 5 кріпиться робочий орган – пристрій захоплення або технологічний інструмент.

Електромеханічні приводи всіх ланок уніфіковані та виконані у вигляді сукупності двигунів постійного струму Д1–Д5 типу ПЯ-150Ф ($P = 250$ Вт, $n = 3000$ об/хв.), хвильового редуктора з передатним відношенням 102,5, кодових датчиків положення ДП1–ДП5 типу ППК-15 (розрядність 2^{15}) та тахогенераторів ТГ1–ТГ5 типу ТГП-2,5.

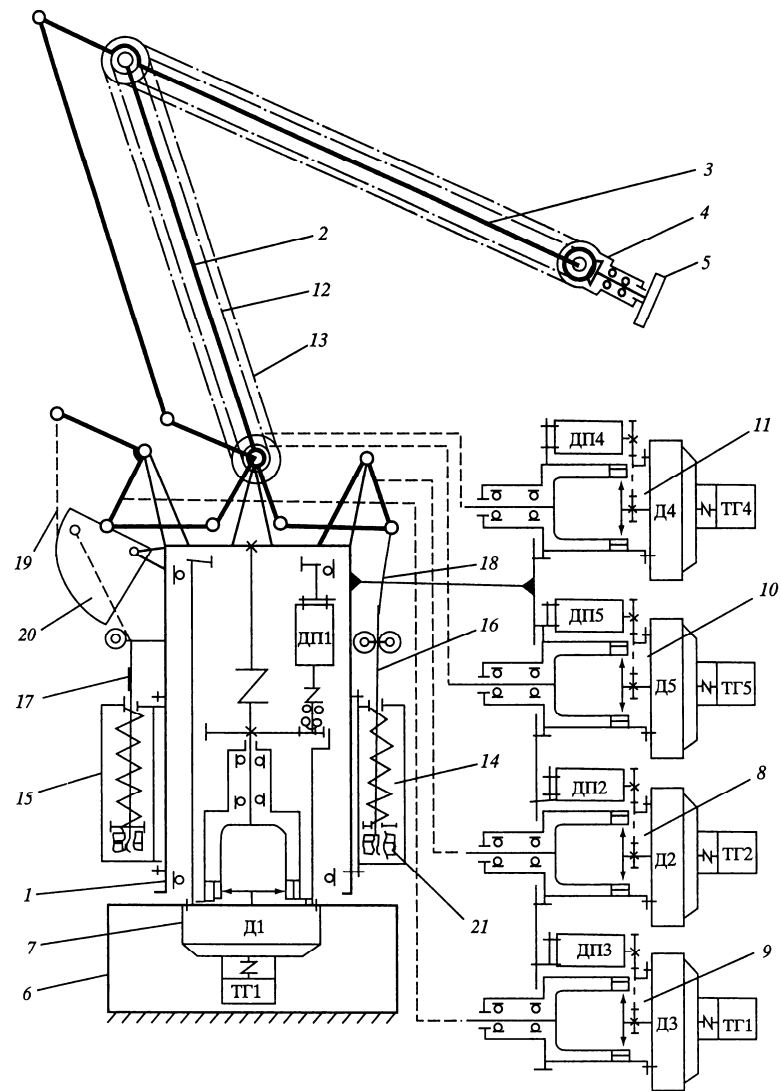


Рисунок 2.37 – Кінематична схема маніпулятора робота ТУР-10

У приводах руки узгоджувальний редуктор від валу двигуна до валу датчика положення виконаний у вигляді зубчастої передачі. Її передатне відношення у приводах руху ланок 2 і 3 дорівнює $45/28$, а в приводах механізму орієнтації (ланки 4, 5) – $90/28$. У приводі поворотної платформи 1 обертання на вал датчика передається з вихідного валу редуктора через зубчасту пару без зазору з передатним відношенням 15,6.

Кінематичні ланцюги приводу від вихідних валів хвильових редукторів до ланок 2 і 3 здійснюються через кривошипно-шатунні механізми, які виконані у вигляді шарнірних паралелограмів. Передача руху до механізму орієнтації (ланки 4 і 5) здійснюється за допомогою ланцюгових передач 12 і 13. Обидві ланцюгові передачі виконані ідентично і містять по дві замкнуті гілки. У деяких модифікаціях конструкції маніпулятора замість ланцюгових передач застосовують подвійні шарнірні паралелограми. Обертання кисті (ланка 5) виконується через конічну передачу.

У рухомих з'єднаннях передавальних кривошипно-шатунних механізмів та шарнірах руки люфт вибирається за рахунок відносного осьового зміщення кілець підшипників. У конічній передачі передбачено пристрій вибірки зазору.

Для статичного врівноваження ланок 2 і 3 в конструкції передбачені пружинні механізми 14 і 15, встановлені на поворотній платформі. Штоки 16, 17 пружин за допомогою ланцюгів 18 і 19, що проходять через ролики, з'єднані з ланками 2 і 3. Шток 17 пов'язаний через додатково встановлений синусний механізм 20 з плечем Г-подібного кривошипа приводу коливання ланки 3, а шток 16 – з пальцем кривошипа коливання ланки 2.

На заданому діапазоні переміщення додатково встановлений механізм має передавальну функцію, зворотну силовій характеристиці пружини врівноваження. Підсумовування ефектів лінійної зміни зусилля на штоку пружини та відповідного приблизно лінійного (на чверті оберту шківів синусного механізму 20) змінювання величини плеча дії цієї сили дозволяє отримати практично постійне зусилля, що діє уздовж ланцюга 19.

На штоках 16, 17 є різьблення, що дозволяє за допомогою гайок 21 забезпечити необхідну величину попереднього підтискання пружин, таку, щоб при будь-якій конфігурації руки не спостерігалось самотовільне переміщення ланок 2 і 3.

За рахунок винесення приводів (маса кожного приводу приблизно дорівнює 15 кг) на поворотну платформу та застосування системи переда-

вальних механізмів у вигляді шарнірних паралелограмів і ланцюгів вдалося істотно полегшити конструкцію руки. Маса маніпулятора 230 кг.

Механізми усунення кінематичного взаємовпливу степенів рухливості в даній конструкції відсутні. Тому при русі ланки 2 або 3 орієнтація всіх наступних ланок в абсолютній системі координат залишається незмінною. При обертанні ланки 4 спостерігається «паразитний» рух ланки 5 внаслідок наявності кінчної зубчастої передачі. Усунення цього кінематичного взаємовпливу здійснюється програмно. При такій розв'язці всі ланки робота програмуються в абсолютній системі координат.

Дана конструкція робота дозволяє при програмуванні розділити рухи руки на два види:

- транспортуючі (регіональні), які переміщують робочий орган у необхідну точку робочого простору (за рахунок ланок 2 та 3) та не змінюють орієнтацію робочого органу;
- орієнтуючі (локальні), що забезпечують необхідну орієнтацію робочого органу робота (за рахунок ланок 4 та 5).

Такий розподіл спрощує програмування робота.

2.3.2. Промислові роботи агрегатно-модульного типу

Конструкція робота компонується з окремих вузлів-модулів. Загальні вимоги до конструкції робота, описані вище, формують і вимоги до конструкцій всіх вузлів за швидкостями та прискореннями, за навантаженнями та потужностями, точності та надійності, міцності та жорсткості тощо.

Велике значення має уніфікація промислових роботів, оскільки роботи застосовуються для автоматизації виконання різних технологічних процесів. Внаслідок цього без проведення уніфікації може виникнути невинуватана різноманітність конструкцій маніпуляторів. Зазвичай, встановлюється деяка *базова модель маніпулятора* для певного ряду умов його застосування.

Ця базова модель може бути використана для ряду конструкцій, що відрізняються компонуванням деяких уніфікованих вузлів – модулів. Це стосується, зокрема, кінцевої частини маніпулятора (набір різних кліщів, пристроїв кріплення інструментів та їх орієнтації). Крім того, з базової моделі маніпулятора з шістьма ступенями рухливості можуть компонуватися маніпулятори з меншим їх числом шляхом вилучення деяких вузлів.

Конструкції роботів та їх маніпуляторів уніфікуються за вантажопідійомністю, за типом приводу, типом кінематики, числом ступенів рухливості, найбільшим переміщенням за кожним ступенем, швидкодією (швидкістю, прискоренням), похибкою позиціонування. Уніфікований вузол робота – складальна одиниця ПР з уніфікованими приєднувальними розмірами та параметрами зовнішнього сполучення.

Отримала розвиток агрегатно-модульна побудова конструкцій маніпуляторів, а також приводів і систем керування роботів. Агрегат ПР – сукупність деталей і вузлів, що утворюють механізм, призначений для виконання рухів по одному ступеню рухливості, які реалізуються за допомогою приводу, що приєднується до нього, з уніфікованими місцями кріплення, у тому числі кріплення приводів. У деяких випадках агрегат може включати редуктор, передатний механізм або його частину.

В якості уніфікованих модулів можуть виступати як пристрої в окремих ступенях рухливості і ланках маніпулятора, так і сукупність двох-трьох ланок, якщо вони нероздільні, наприклад, за передачами рухів від приводів, за зручністю komponування в єдиному блоці комбінацій, що часто зустрічаються, і т.п.

Уніфікованими модулями можуть бути окремі ланки маніпулятора (рис. 2.38), поєднання пристроїв двох сусідніх ступенів рухливості (рис. 2.39). Зірочкою (х) показано місце з'єднання модуля.

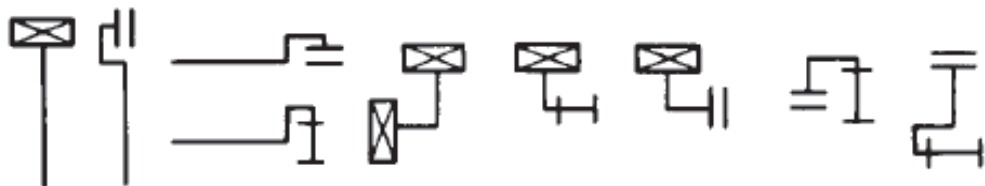


Рисунок 2.38 – Модулі одного ступеня рухливості маніпулятора

Агрегатно-модульний принцип застосовується також і до вузлів конструкцій кріплення основ роботів: підлогові (нерухомі та рухомі), підвісні та порталні.

На рис. 2.40 показано агрегатну конструкцію маніпулятора ПР фірми Bosch. Маніпулятор складається з наступних агрегатів: 1 – горизонтального переміщення, 2 – гойдання (повороту), 3 – повороту, 4 – вертикального переміщення.

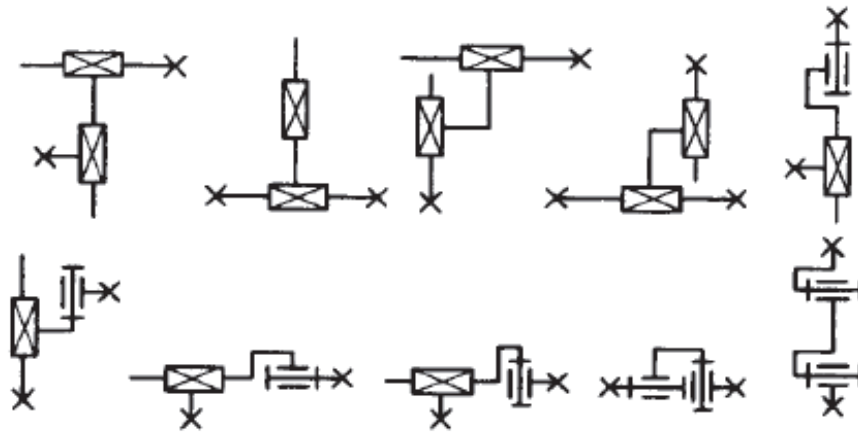


Рисунок 2.39 – Поєднання в одному модулі двох сусідніх ступенів рухливості маніпулятора

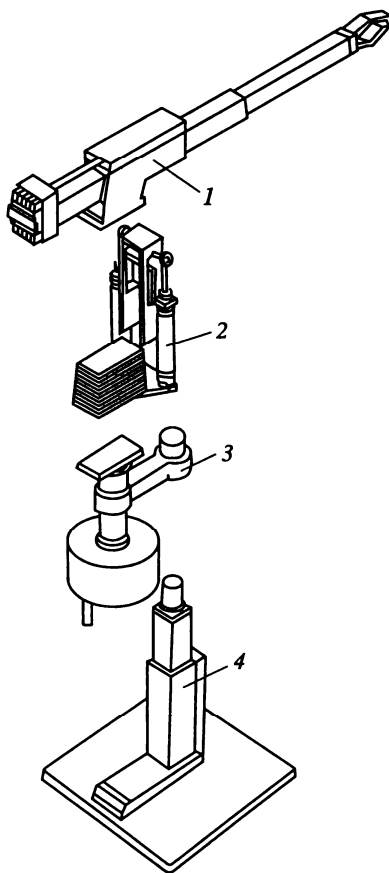


Рисунок 2.40 – Агрегатна конструкція маніпулятора фірми Bosch

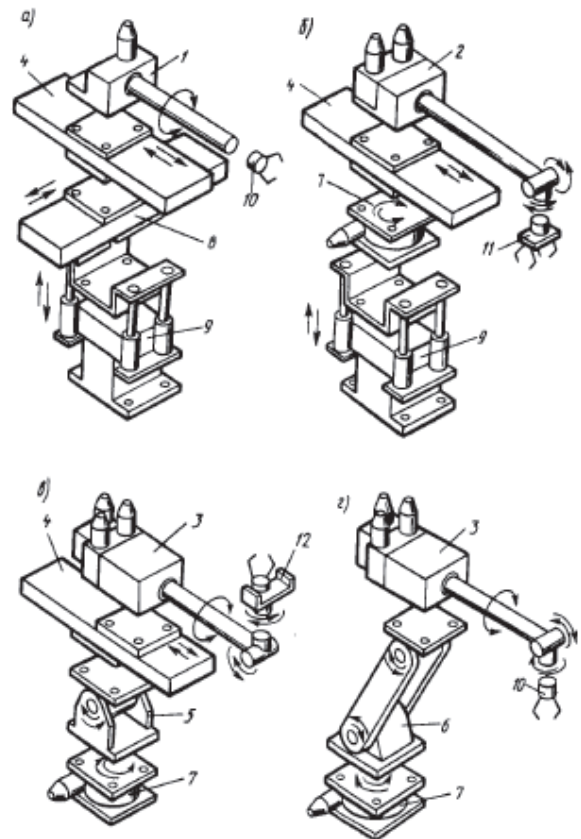


Рисунок 2.41 – Варіанти компоновання модульного робот

Приклад модульної конструкції, що дозволяє реалізувати чотири варіанти компоновок маніпулятора з обертальними ступенями рухливості з однієї і тієї ж серії конструктивних модулів, зображений на рис. 2.41. Очевидно, що кількість варіантів може бути збільшено. Наприклад, кожен із трьох випадків різної кількості орієнтуючих ступенів може бути пов'язаний з будь-яким варіантом переносних ступенів рухливості в різних системах координат.

На рис. 2.41 представлено 4 варіанти компонування маніпуляторів:

- а) – в прямокутній системі координат з одним орієнтуючим ступенем рухливості;
- б) – в циліндричній системі координат з двома орієнтуючими ступенями;
- в) – у сферичній системі координат з трьома орієнтуючими ступенями;
- г) – у кутовій системі координат з трьома орієнтуючими ступенями рухливості.

Прийнято такі позначення: 1 – рука з одним ступенем свободи; 2 – рука з двома ступенями свободи; 3 – рука з трьома ступенями свободи; 4 – модуль радіального ходу; 5 – модуль гойдання; 6 – модуль подвійного гойдання; 7 – модуль азимутального повороту; 8 – модуль поперечного зсуву; 9 – модуль підйому; 10 – пристрій захоплення; 11 – здвоєний пристрій захоплення; 12 – пристрій захоплення зі зсувом.

Приклад іншої модульної конструкції переважно з поступальними ступенями рухливості показаний на рис. 2.42.

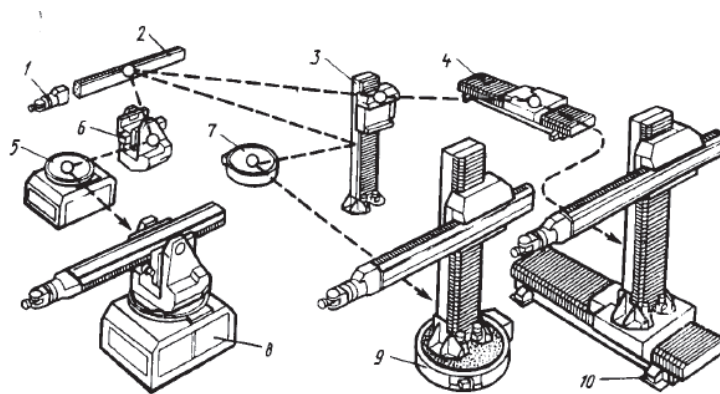


Рисунок 2.42 – Модульні конструкції роботів

На рисунку прийняті позначення: 1 – модуль кисті з трьома обертальними ступенями рухливості; 2 – поступальний модуль передпліччя; 3 –

вертикальний модуль; 4 – поступальний базовий модуль; 5 – базовий модуль обертального руху; 6 – модуль гойдання; 7 – базовий модуль обертального руху; 8 – робот зі сферичною системою координат; 9 – робот, що працює в циліндричній системі координат; 10 – робот, що працює у прямокутній системі координат.

Модульні конструкції маніпуляторів не завжди дають бажаний результат, так як можуть призводити до обтяження ланок маніпулятора, тому застосовуються й інші принципи уніфікації, наприклад на основі базових конструкцій.

2.3.3. Робочі органи маніпуляторів

Робочі органи маніпуляторів служать для безпосередньої взаємодії з об'єктами навколишнього середовища і поділяються на *пристрої захоплення* (затискачі, кліщі) та *спеціальний інструмент*. Робочі органи можуть бути постійними та знімними, у тому числі з можливістю їх автоматичної заміни в ході виконання технологічної операції. Один і той же робот може виконувати різні допоміжні операції і працювати різним інструментом – розпилювачем, гайковертом, пневматичною викруткою. Тому зазвичай для кожної моделі робота створюється велика кількість всіляких пристроїв захоплення, які при необхідності замінюються і монтуються на кисті.

Пристрої захоплення. Вони призначені для захоплення роботом об'єкта маніпулювання, його утримання у певному положенні у процесі маніпулювання при перенесенні до місця обробки, та звільнення після закінчення цього процесу.

Обов'язковими вимогами до пристроїв захоплення ПР є: надійність захоплення та утримання об'єкта, стабільність положення об'єкта маніпулювання у пристрої захоплення під час перенесення, недопустимість пошкоджень об'єкта при захопленні, підвищена міцність при малих габаритах та масі, надійність кріплення до руки в процесі виконання тисяч операцій перенесення.

У дрібносерійному виробництві до пристроїв захоплення роботів висувають додаткові вимоги: можливість захоплення та перенесення об'єктів з різними характеристиками; запобігання захопленню більше одного об'єкта; можливість автоматичної зміни пристрою захоплення під час зміни замовлення.

Зазвичай роботи комплектують набором змінних пристроїв захоплення, кожний з яких призначений для захоплення об'єктів маніпулювання з близькими розмірами, формами, масою та фізичними властивостями. Розробляють пристрої захоплення, що здатні захоплювати довільно орієнтовані об'єкти та автоматично змінювати зусилля утримання об'єкта маніпулювання за зміни його маси.

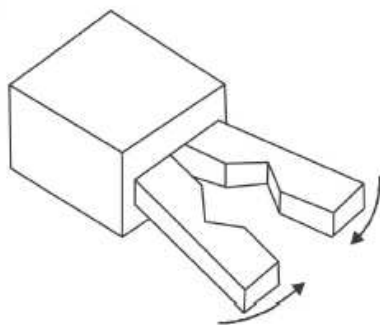
Елементи пристрою захоплення, що механічно контактують з об'єктом, називають губками. Сила утримання об'єкта маніпулювання повинна бути в 10–30 разів більшою за його вагу. Вона залежить від кінематики пристроїв захоплення, конструкції губок, форми та способу фіксації об'єкта.

Для практичного застосування розроблені сотні конструкцій пристроїв захоплення, які за принципом дії можна розділити на три групи.

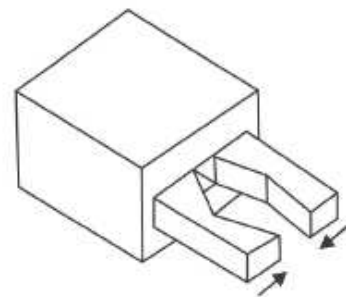
1. Затискні пристрої захоплення

Об'єкт маніпулювання утримується за допомогою сил тертя. Захоплення і відпускання об'єкта здійснюють за допомогою приводу. Розрізняють два типи затискних пристроїв захоплення: механічні та оснащені еластичними камерами.

Механічні пристрої захоплення імітують захоплення об'єкта рукою людини. Основні типи механічних пристроїв захоплення – це механічні пристрої-кліщі (затискачі) з жорсткими або пружними губками. *Кліщі* – це аналог кисті руки людини. Найпростіші механічні двопальцеві кліщі нагадують звичайні плоскогубці, забезпечені приводом. За конструкцією механічні пристрої захоплення виконуються за двома основними типами: паралельні та кутові (рис. 2.43).



a – кутовий захоплювач

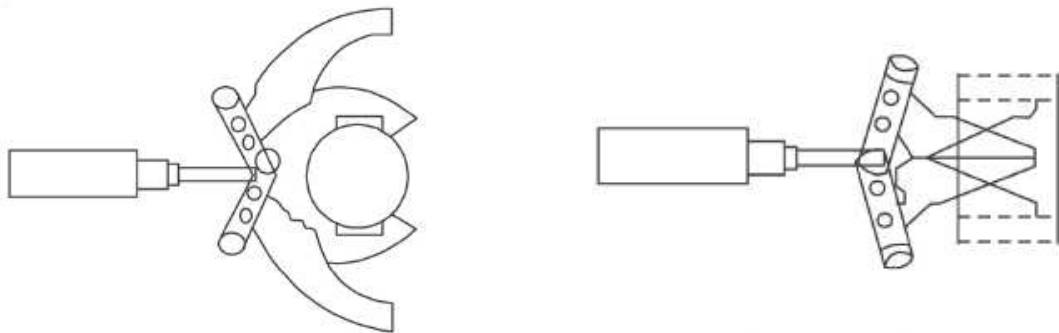


б – паралельний захоплювач

Рисунок 2.43 – Кутові та паралельні пристрої захоплення

Пристрої захоплення за конструкцією також бувають зовнішніми та внутрішніми (рис. 2.44).

У зв'язку з простотою рухів, що здійснюються кліщами («затискання–розтискання») в них зазвичай використовуються нерегульовані пневматичні, гідравлічні та електричні приводи. Залежно від об'єктів маніпулювання застосовують пристрої захоплення з трьома, чотирма та рідше з більшою кількістю пальців. На рис. 2.45 показана конструкція зовнішнього пристрою захоплення з пневматичним приводом. На рисунку прийняті позначення: 1, 2 – пальці (губки); 3, 4 – ричажна передача; 5 – шток пневматичного двигуна (пневмоциліндра); 6 – зворотна пружина.



а – зовнішній

б – внутрішній

Рисунок 2.44 – Зовнішні та внутрішні пристрої захоплення

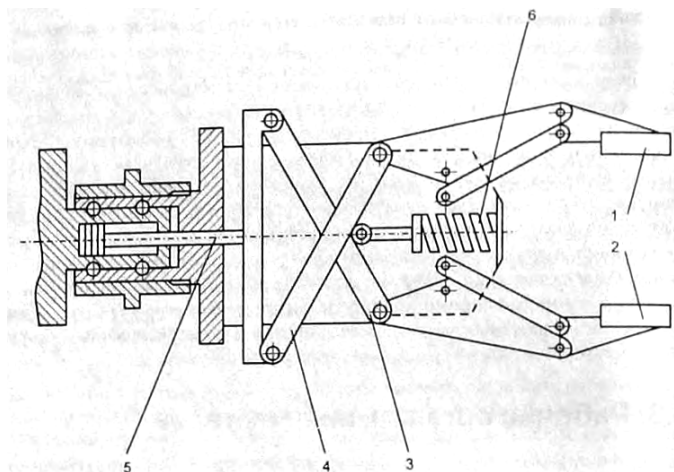


Рисунок 2.45 – Двопальцеві кліщі

Механічні пристрої захоплення застосовуються для взяття і транспортування об'ємних твердих матеріалів (метал, пластмаса, цегла і т.п.). На

рис. 2.46 як приклад наведені ПР фірми KUKA з різними конструкціями пристроїв захоплення для виконання різних технологічних операцій.



а – для утримання колеса



б – для кріплення дверей

Рисунок 2.46 – Промислові роботи зі спеціальними пристроями захоплення

Кліщі часто оснащують контактними датчиками сили, прослизання і дистанційними датчиками (ультразвуковими, оптичними та ін.), що виявляють предмети поблизу кліщів та між його пальцями.

У пристроях захоплення з еластичними камерами захоплення та відпускання об'єктів здійснюють шляхом деформації еластичних елементів. Як і в механічних пристроях захоплення, об'єкт маніпулювання утримується за допомогою сил тертя.

Першим пристроєм захоплення з еластичними камерами став так званий затискач Байєра, створений для захоплення об'єктів, що легко ушкоджуються. Затискач Байєра являє собою 4-6 пальців у вигляді трубок з еластичного матеріалу. Захоплення об'єкта маніпулювання відбувається під час подачі повітря всередину пальців (рис. 2.47).

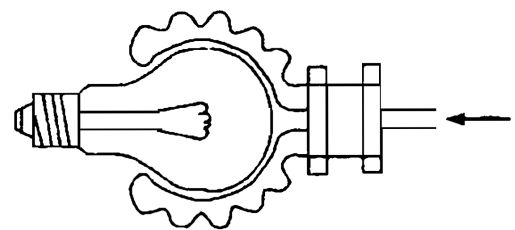


Рисунок 2.47 – Затискач Байєра

2. Притяжні пристрої захоплення

Захоплення об'єкта здійснюється за допомогою сил тяжіння, створюваних за допомогою вакууму, електромагнітного поля, адгезії, електростатичного поля тощо. Вакуумні пристрої захоплення використовують присоски, які утримують об'єкти за рахунок розрядження повітря при його відсмоктуванні з порожнини між присоскою та об'єктом, що захоплюється (рис. 2.48).

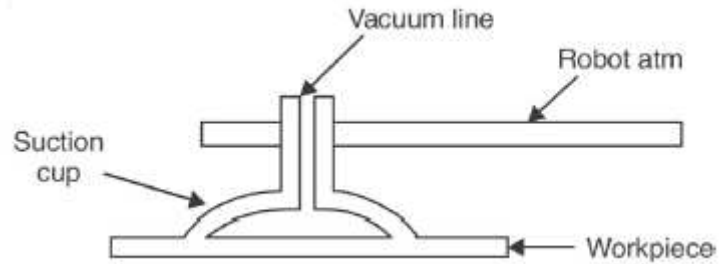
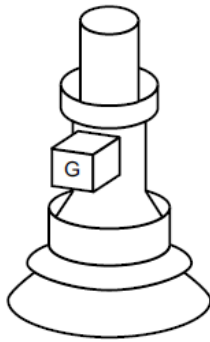


Рисунок 2.48 – Вакуумний пристрій захоплення

Для захоплення об'єктів складної форми застосовують вакуумні прилади з декількома присосками. Вакуумні пристрої захоплення застосовуються переважно під час роботи з листовими деталями (рис. 2.49). Вони характеризуються простотою конструкції та невеликою масою.

Для взяття феромагнітних об'єктів використовуються магнітні пристрої захоплення. У роботах знайшли застосування в основному пристрої захоплення з електромагнітами. Вони представляють собою катушку на розімкненому сердечнику, через яку пропускають електричний струм (рис. 2.50). Електромагнітні пристрої захоплення також в основному застосовуються для роботи з листовими деталями.



Рисунок 2.49 – Вакуумний захоплювач для перенесення скла

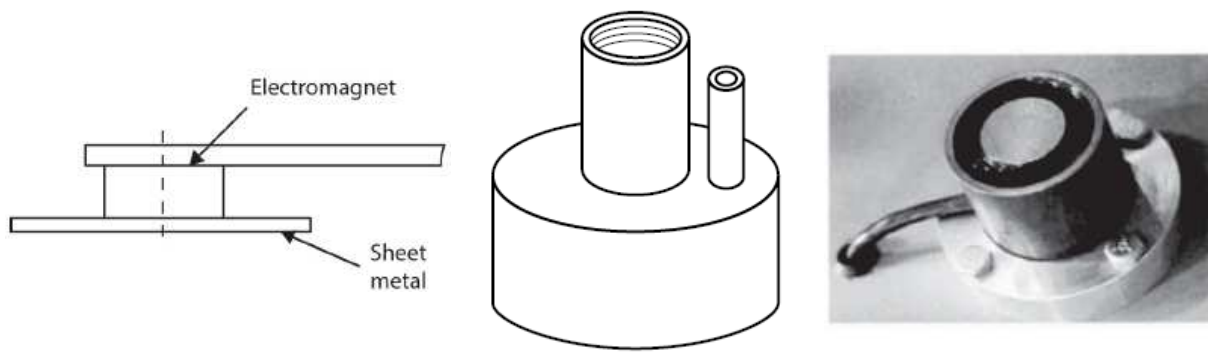


Рисунок 2.50 – Електромагнітний пристрій захоплення

Перевагою електромагнітних пристроїв є велика сила тяжіння на одиницю площі, швидкість спрацьовування та простота конструкції. Іноді застосовуються затискачі з постійними магнітами, проте для звільнення захопленого об'єкта вони забезпечуються додатковими спеціальними механічними виштовхувачами.

3. Підтримуючі пристрої захоплення

До них відносяться різноманітні гаки, петлі або вила, які підтримують об'єкт за нижню поверхню, частини, що виступають, або отвори.

Крім того, у зв'язку з великою різноманітністю об'єктів маніпулювання існує велика кількість різних комбінацій цих типів пристроїв захоплення і безліч спеціальних пристроїв захоплення, заснованих на різних оригінальних принципах дії (наприклад, клейкі пристрої захоплення, пристрої що наколюють, використовують аеродинамічну підйомну силу і т.п.).

За характером орієнтації об'єкта при захопленні розрізняють п'ять видів пристроїв захоплення:

- пристрої, що здатні змінювати положення об'єкта шляхом керованого переміщення своїх елементів;
- centruючі пристрої, що вирівнюють положення об'єкта за рахунок спеціальної форми елементів, наприклад, центрування циліндричних об'єктів;
- базуючі пристрої, що фіксують положення об'єкта за його базовою поверхнею;
- фіксуючі пристрої, що зберігають у процесі перенесення те положення об'єкта, яке було в момент захоплення;
- пристрої, що не змінюють положення об'єкта у процесі захоплення.

За характером керування пристрої захоплення ділять на чотири групи:

- некеровані пристрої на основі постійних магнітів, вакуумних присосок або пружинних губок, з яких потрібно знімати об'єкт;
- командні пристрої, керовані командами захоплення чи відпускання об'єкта;
- програмовані пристрої, у яких відстань між губками та зусилля захоплення змінюються за командами системи числового програмного керування;
- адаптивні пристрої, оснащені датчиками торкання, форми об'єкта, маси об'єкта, зусилля затиску, прослизання після захоплення.

За характером кріплення до маніпулятора пристрої захоплення ділять на такі групи:

- незмінювані пристрої, що є частиною виготовленого маніпулятора;
- змінювані пристрої, що кріпляться до маніпулятора гвинтами;
- швидкозмінні пристрої, що замінюються оператором при зміні об'єктів маніпулювання;
- автоматично змінювані пристрої, що замінюються за командою керування роботизованим комплексом.

Пристрої захоплення часто приєднують до останньої ланки маніпулятора через проміжні конструктивні податливі елементи. За їх допомогою здійснюється компенсація можливих похибок позиціонування, і усуваються виникаючі при цьому механічні напруги у ланках маніпулятора у випадках маніпулювання об'єктами, на переміщення яких накладені механічні обмеження (механічне складання та розбирання, встановлення заготовок у затискачі та гнізда технологічного обладнання, переміщення предметів по напрямних тощо).

Як приклад розглянемо конструкцію та принцип роботи механічних пристроїв захоплення, призначених для комплектації промислових роботів М20П.40.01 та М10П.62.01. Комплект пристроїв захоплення має 8 типорозмірів, що дає можливість проводити затискання і утримання в певному положенні об'єктів маніпулювання по зовнішній і внутрішній поверхні тіл обертання, а також плоских деталей.

На рис. 2.51 показаний пристрій захоплення типорозміру С01. Пристрій складається з наступних вузлів: 1 – блок пневморозподільників, 2 – запобіжний кронштейн, 3 – коробка електророз'єму, 4 – панель кріплення мікрореле, 5, 7 – стяжки зіштовхуючого (демпфуючого) механізму, 6 – захоплюючий механізм.

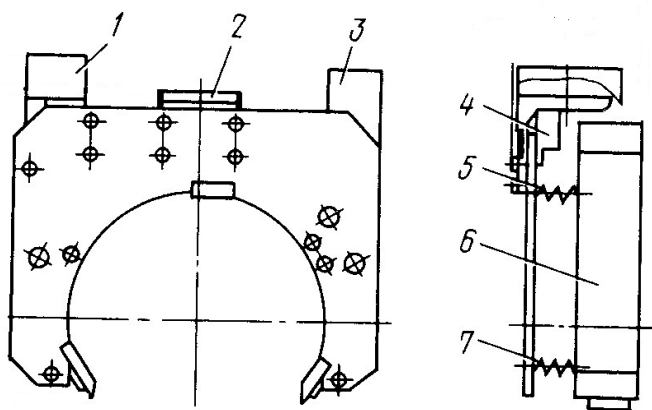


Рисунок 2.51 – Пристрій захоплення C01

Пристрій захоплення кріпиться на запобіжний кронштейн, який ламається у разі перевантаження (105 кг на плечі 280 мм). Пневматичний привод затискних механізмів забезпечує підтримку зусилля затиску при аварійному відключенні електроживлення. Основні технічні характеристики кліщів наведені в табл. 2.1.

У пристрої захоплення C01 застосовується доцентровий затискний механізм, що складається з трьох тримачів (рис. 2.52). Механізм включає в себе двох або трьох поршневій циліндр 4, шестерно-важільну систему 5, кінцеві вимикачі 6.

Тримачі 1, 3 пов'язані між собою шестерно-важільною системою. Тримач 2 пов'язаний з тримачем 1 за допомогою важелів. Тримачі 1, 2, 3 доцентрово і синхронно розходяться при штовхаючому русі циліндра і сходяться при його тягнучому русі. Для компенсації похибки при захопленні деталі призначений механізм демпфування, що складається з трьох стяжок із пружинами.

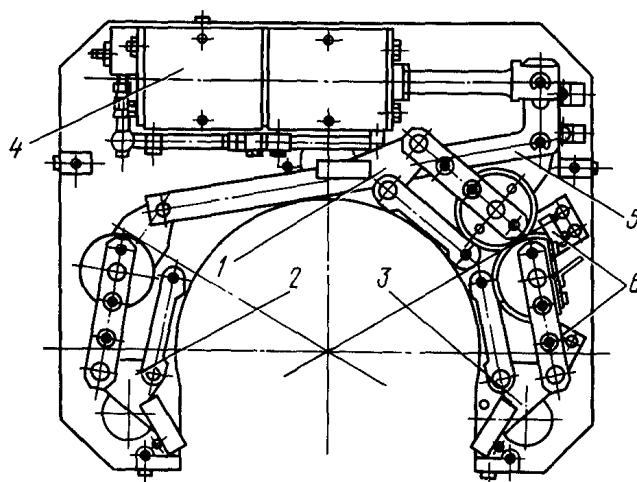


Рисунок 2.52 – Конструкція механізму затискання

Стиснення пружин дозволяє компенсувати кутові та лінійні неточності положення заготовки (деталі). Повністю відкрите і повністю закриті положення тримачів визначається двома мікроперемикачами. Керування затискним механізмом здійснюється трьома електромагнітними пневморозподільниками.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики пристрою захоплення C01

Найменування параметрів	Значення
Кількість об'єктів маніпулювання	1
Основні розміри захоплюваного об'єкта, мм	
– за зовнішнім діаметром	20-115
– за внутрішнім діаметром	38-133
– затиск плоских деталей (товщиною)	3-95
Час захоплення не більше, с	3
Час відпускання не більше, с	3
Зусилля захоплення не менше, Н	350
Роздільна здатність усунення нецентричності закріпленої заготовки, мм	± 3
Маса не більше, кг	9

Електрична принципова схема пристрою захоплення C01 наведена на рис. 2.53. Коло керування затискача призначено для живлення напругою 24 В постійного струму. Електроапаратура змонтована всередині пристрою захоплення.

При надходженні на пристрій за-хоплення сигналу відкриття *FOPD* спрацьовують електромагніти *Y1* та *Y3* і відбувається відкриття затискного механізму. При надходженні сигналу закриття *FCLD* спрацьовують електромагніти *Y2* та *Y3* і відбувається закриття затискного механізму.

Кінцевий вимикач *S1* призначений для контролю повного відкриття затискного механізму; *S2* – для контролю повного закриття затискного механізму; *S3* – для аварійного відключення робота при порушенні в роботі пристрою захоплення (наприклад, при зламі запобіжного кронштейна).

Робочий інструмент. Технологічні інструменти встановлюються на маніпулятори роботів для безпосереднього виконання ними різноманітних технологічних операцій:

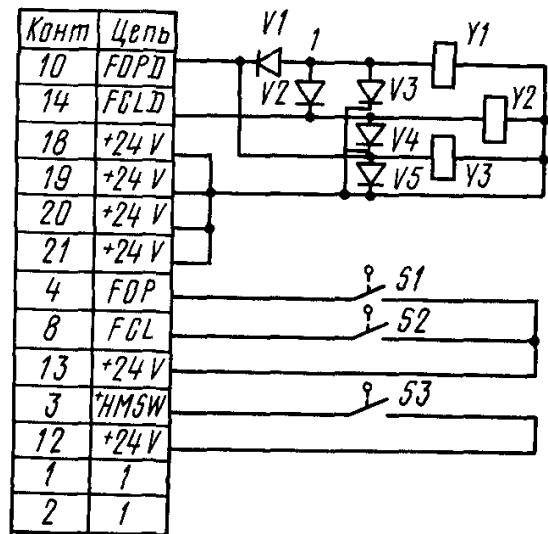


Рисунок 2.53 – Схема електрична принципова

- контактного та електродугового зварювання;
- нанесення покриттів та фарбування;
- складання та розбирання;
- загвинчування гайок;
- зачищення поверхонь;
- паяння та клепки;
- виробництва друкованих плат та ін.

Як технологічні інструменти зазвичай використовують відомі технологічні пристрої, додатково забезпечені системами автоматизації процесів і елементами кріплення до маніпулятора або кисті робота.

Зварювальні технологічні інструменти. Залежно від основних різновидів зварювальних процесів використовують різні зварювальні інструменти. Близько 30% всіх зварних з'єднань (за масою) виконують контактним зварюванням, область застосування якого дуже широка – від космічних апаратів до мініатюрних напівпровідникових пристроїв і плівкових мікросхем. Широке використання промислових роботів почалося з автоматизації контактного точкового зварювання в автомобільній промисловості.

Точкове контактне зварювання, що набуло найбільш широкого поширення, здійснюється двома електродами, між якими затискаються листи, що зварюються, і пропускається електричний струм великої сили. Після закінчення циклу зварювання (від 0,01 до 0,5 с) електроди переносяться в іншу точку виробу і процес повторюється.

Точкове контактне зварювання здійснюється за допомогою зварювальних кліщів (рис. 2.54).

Кліщі являють собою автономну конструкцію, яка складається з корпусу 1 з сережкою 2 кріплення до кисті робота, і рухомого корпусу 3 зі зварювальними рицинами 4 і електродами 5, до яких підводиться електричний струм і рідина, що охолоджує електроди. Змикання та розмикання рицин, а також їх поворотний орієнтуючий рух щодо корпусу забезпечу-

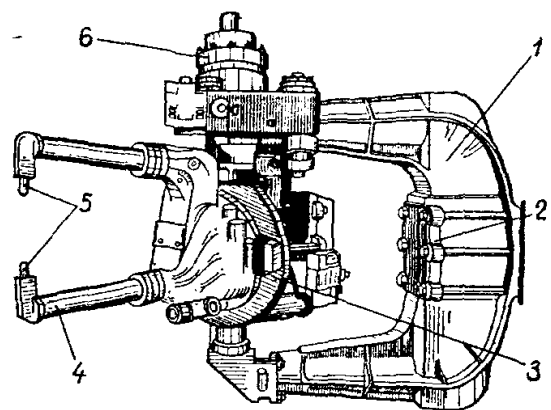


Рисунок 2.54 – Кліщі для контактного точкового зварювання

ються пневмогідравлічним приводом 6. Залежно від виду зварювального шва та форми виробу зварювальні кліщі можуть мати різні конфігурацію та конструкцію.

Електродугове зварювання плавленням – найпоширеніший вид зварювання, проте піддається автоматизації з великими труднощами. В даний час промислові роботи використовуються для електродугового зварювання складних виробів в умовах індивідуального, дрібносерійного та серійного виробництва.

Дугове зварювання проводиться за допомогою електродугових головок або зварювальних пістолетів з повітряним або примусовим водяним охолодженням, автоматичною подачею електродного дроту та направленням у зону зварювання під тиском нейтрального газу (вуглекислого газу або аргону). Типова зварювальна головка (рис. 2.55) складається з пальника 1, через який в зону зварювання автоматично подається зварювальний дріт-електрод 2, а також під тиском надходить нейтральний захисний газ. За допомогою кронштейна 3 пальник встановлюється під технологічним кутом до осі кисті робота з можливістю її повороту навколо цієї осі. Зварювальний дріт, нейтральний газ і охолоджувальна рідина надходять до пальника через гнучкі шланги 4, а її кріплення до кисті робота здійснюється за допомогою кронштейна 5 болтовим з'єднанням.

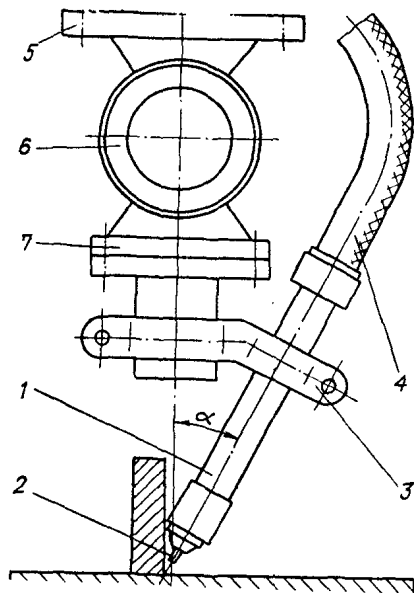


Рисунок 2.55 – Зварювальна електродугова головка

Зміна просторового положення пальника щодо осі кисті робота може проводитися як у вертикальній, так і горизонтальній площині за допомогою з'єднань 6 і 7.

При всій відносній простоті конструкції зварювальна головка – відповідальний і складний пристрій, так як в автоматичних режимах зварювання роботом повинні бути забезпечені не тільки основні операції зварювального процесу, але й такі додаткові, як періодичний контроль та очищення пальника від нагару та бризок розплавленого металу, що потребує спеціальних автоматичних прийомів та пристроїв.

Фарбувальні технологічні інструменти. Для автоматичного фарбування деталей, вузлів і машин застосовуються фарборозпилювачі різних конструкцій, що встановлюються на руці або кисті робота і керуються від його системи керування.

Фарборозпилювальні пристрої, що застосовуються як технологічні інструменти в ПР, принципово не відрізняються від звичайних ручних фарбувальних пульверизаторів, що працюють від стисненого повітря, проте в силу специфіки автоматичного процесу до них висувається ряд більш жорстких вимог, а саме:

- можливість роздільної подачі стисненого повітря на розпилення та керування;
- автоматичне регулювання інтенсивності розпилення та ширини факела фарби, що розпилюється;
- встановлення чіткої послідовності спрацьовування механізмів фарборозпилювача;
- миттєве відсікання викиду стисненого повітря та фарби з фарборозпилювача при його відключенні;
- можливість орієнтації фарборозпилювача у будь-якому просторовому положенні. Реалізується за допомогою застосування гнучкого зап'ястя робота з трьома ступенями рухливості, що дозволяє спрямувати струмінь фарбувальної суміші в будь-яку точку простору, що обслуговується, з будь-яких напрямків.

Фарборозпилювальні пристрої керуються за командами від системи керування ПР, як правило, за допомогою пневматичних логічних елементів; фарба і стиснене повітря підводяться по гнучким шлангам, розбризкування здійснюється через отвори (сопла) розпилювача.

2.3.4. Транспортні та мобільні роботи

Системи пересування роботів відносяться до їх виконавчих систем поруч із маніпуляційними системами. У них знайшли застосування практично всі відомі транспортні засоби.

Транспортний робот або робокар являє собою візок для перевезення вантажу, який може автоматично переміщатися між одиницями технологічного обладнання. Його застосування забезпечує високу маневреність у вузьких проходах цеху, просту зміну маршруту при зміні технології та

відмови обладнання, оптимізацію вантажопотоків. За способом переміщення вантажів виділяють робокари:

- з бортовим маніпулятором для вантажно-розвантажувальних операцій. Іноді забезпечуються спрощеними одно- і двоступеневими завантажувальними пристроями;
- робокари що буксирують один або кілька візків (робокари-тягачі);
- робокари що переміщують вантажі, які встановлюються на візок стаціонарним роботом, що знаходиться в місцях зупинки транспортних роботів.

За методом застосування робокар може працювати в режимах «платформа» та «таксі». У режимі «платформа» деталь обробляють не знімаючи з робокара. У режимі «таксі» деталь знімають з робокара у місці обробки, а потім після обробки кладуть на робокар.

За способом пересування робокари можуть бути колісно-підлоговими, колісно-рейковими, гусеничними, крокуючими і на повітряній подушці. Найбільш поширені колісно-підлогові робокари з трьома колесами, переднє з яких є провідним. Колісні механізми пересування застосовують для відносно рівних поверхонь, де не потрібно контролювати реакцію опори на навантаження.

Також використовуються транспортні роботи, що рухаються по монорейці. Пристрій захоплення в таких роботах опускається та піднімається. Приклад переміщення робота в цілому, разом із його основою, вздовж балки у підвісному варіанті показаний на рис. 2.56. У цьому випадку, крім механізму поступового руху, основа робота має гнучку конструкцію для підводу до нього необхідних комунікацій, зокрема електроенергії.

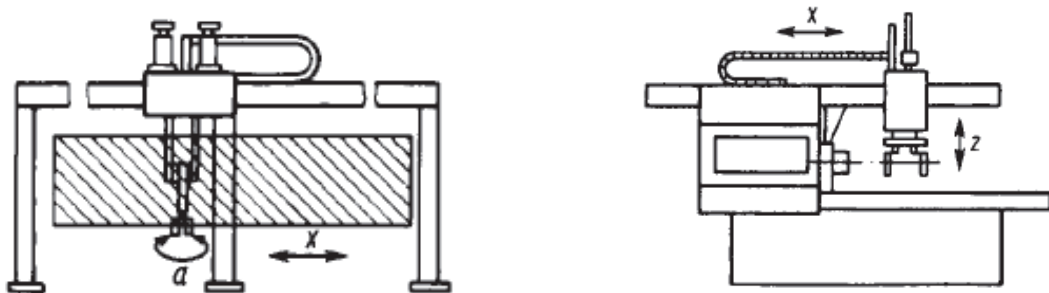
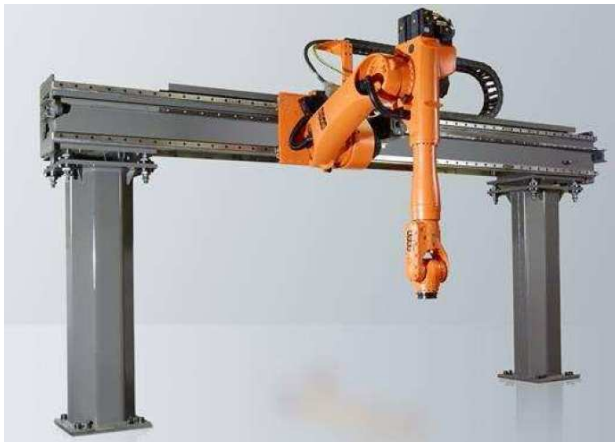
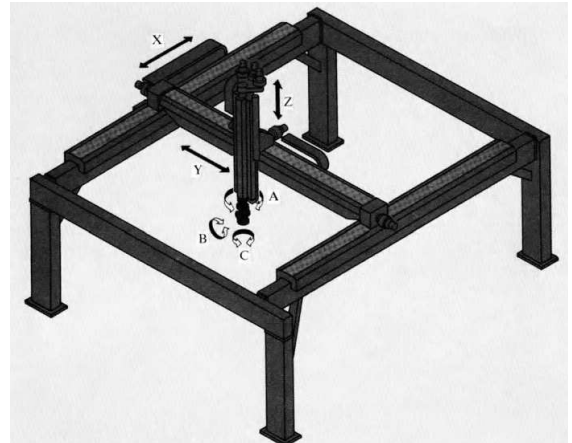


Рисунок 2.56 – Схеми компонування роботів з рухомою основою

На рис. 2.57 показане відповідне компонування портальних промислових роботів фірми KUKA.



а



б

Рисунок 2.57 – Компонування маніпуляторів KUKA

За типом зовнішнього середовища мобільні роботи поділяються на наземні, водні, повітряні і космічні, а за широтою застосування – на універсальні і спеціальні. Перші наземні мобільні роботи були створені для розширення робочої зони їхніх маніпуляторів, а також для виконання суто транспортних операцій (внутрішньо-цеховий, складський та інший транспорт). Наземні універсальні системи пересування – це, перш за все, традиційні колісні та гусеничні транспортні засоби. На рис. 2.58 та 2.59 показані приклади мобільних роботів на колісному та гусеничному ході.

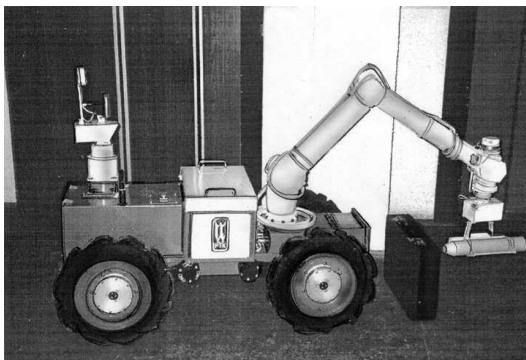


Рисунок 2.58 – Мобільний робот на колісному ході

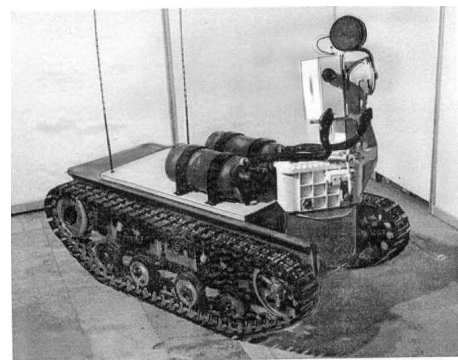


Рисунок 2.59 – Мобільний робот на гусеничному ході

Контрольні запитання

1. Назвіть склад роботів.
2. Назвіть види виконавчих систем робота.
3. Назвіть основні характеристики роботів.
4. Які компоненти необхідні для розвитку гнучкого автоматизованого виробництва?
5. Назвіть покоління розвитку роботів.
6. Призначення адаптивного керування.
7. Дайте класифікацію роботів за типом виконуваних операцій.
8. Дайте класифікацію роботів за типом та параметрами робочої зони маніпулятора.
9. Назвіть основні вузли маніпулятора.
10. Назвіть найпоширеніші кінематичні схеми маніпуляторів.
11. Яким чином можна реалізувати кінематичну схему маніпулятора з керованою деформацією пружних ланок?
12. Яке призначення пристроїв зрівноважування?
13. Що таке пряма задача кінематики?
14. Що таке обернена задача кінематики?
15. Які фактори визначають конструкцію маніпулятора?
16. Назвіть переваги модульного принципу побудови конструкції маніпулятора?
17. Призначення пристрою захоплення.
18. Назвіть основні групи пристроїв захоплення за принципом дії.
19. Які типи приводів використовуються в механічних пристроях захоплення?
20. Який технологічний інструмент використовується в ПР?
21. Назвіть види систем пересування ПР.

Розділ 3

Склад промислових роботів

В розділі 2 (рис. 2.1) наведено функціональну схему роботи. До складу промислових роботів входить декілька великих систем. Механічні системи маніпулятора і пересування були розглянуті у розділі 2. Розглянемо систему приводів, сенсорну систему і пристрої керування ПР.

3.1. Приводи роботів

3.1.1. Класифікація приводів

Як відомо, привод включає двигун, різні механізми для передачі та перетворення руху (редуктори, перетворювачі обертального руху в поступальний та навпаки), гальмо та муфту, а також пристрій керування.

Вибір типу приводу є частиною загального завдання розробки та створення робота нової конструкції. При цьому необхідно враховувати:

- характер навантаження на привод;
- кінематичні параметри маніпуляторів (необхідні кутові та лінійні переміщення, швидкості, закони руху робочого органу);
- кількість точок і точність позиціонування або точність відтворення траєкторії руху;
- фізичний стан об'єкта, що переміщується робочим органом маніпулятора (тверде, крихке, рідке тіло);
- умови експлуатації робота та насамперед характеристики навколишнього середовища: пожежонебезпека, забруднення, температура, механічні впливи, ресурс, економічність та інші фактори.

Використання приводів у ПР має специфічні особливості.

1. Сучасні промислові роботи мають велику кількість ступенів рухливості (як правило, 6–7), кожна з яких забезпечується виконавчим двигуном приводу. На виконання загальної конкретної технологічної операції необхідно групове керування виконавчими двигунами, тобто з погляду керування привод робота розглядається як система.

2. Навантаження на привод (переважає інерційне) є змінним і змінюється в широкому діапазоні.

3. Потрібна висока точність позиціонування виконавчого органу маніпулятора та гарна якість перехідних процесів. Приводи в роботах працюють в основному в перехідних режимах. При цьому для виключення можливості ударів робочого органу відпрацювання траєкторії або заданої координати повинно проводитися без перерегулювання, перехідні процеси повинні бути практично неколивальними. Якщо врахувати, що маніпулятор має кілька кінематичних пар, то до приводів висуваються вимоги багаторазово збільшеної точності.

4. Потрібен великий ресурс роботи при значних динамічних навантаженнях та безрегламентної експлуатації.

5. Привод тривало працює у загальмованому режимі.

До приводів, що застосовуються в роботах, висувають досить жорсткі специфічні вимоги:

- мінімальні габарити і маса при високій вихідній потужності у зв'язку з необхідністю вбудовування приводів у виконавчі системи робота – у маніпулятори та системи пересування;
- стабільність характеристик у широкому діапазоні навантажень на пристрої захоплення, оскільки у одному напрямі пристрій захоплення переміщається з вантажем, а в іншому – без вантажу;
- можливість швидкого розгону та гальмування ланок з метою точного позиціонування робочого органу в заданій точці простору;
- фіксація положення ланки у разі відключення приводу;
- незалежність характеристик від зміни температури.

Важливими параметрами приводів роботів є також надійність, вартість, зручність експлуатації. Вимоги, що висуваються до їх способу керування, швидкодії та точності, безпосередньо визначаються відповідними вимогами до робота в цілому, розглянутими при класифікації роботів. Наприклад, швидкість поступального руху роботів у середньому становить від часток до декількох м/с при похибці відпрацювання переміщення в частках міліметра.

У роботах знайшли застосування практично всі відомі типи приводів: електричні, гідравлічні та пневматичні; з поступальним та обертальним рухом; регульовані (за положенням та швидкістю) і нерегульовані; замкну-

ті (зі зворотним зв'язком) та розімкнуті; безперервної та дискретної дії (у тому числі крокові).

На рис. 3.1 наведено типову схему позиційного приводу маніпулятора.

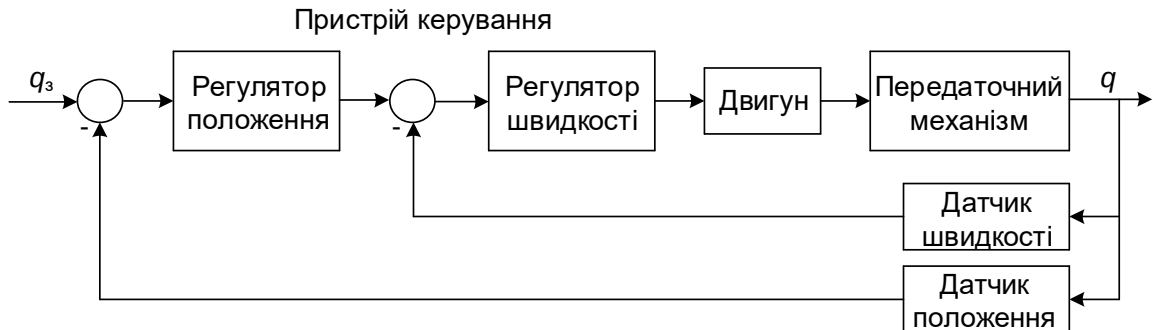


Рисунок 3.1 – Типова схема приводів маніпуляторів

Вхідним сигналом є сигнал q_z задання переміщення. Поряд із загальним зворотним зв'язком q за положенням з датчиком положення у схемі є зворотний зв'язок за швидкістю з датчиком швидкості, який відіграє роль коригуючого гнучкого зворотного зв'язку і може, крім того, служити для керування швидкістю. У тих випадках, коли передаточний механізм є редуктором і знижує швидкість, датчик швидкості вигідніше встановлювати на валу двигуна перед передаточним механізмом, щоб збільшити сигнал зворотного зв'язку за швидкістю. Пристрій керування (регулятор положення і швидкості на схемі) може бути безперервної дії, релейним, імпульсним або цифровим.

Промислові роботи з **пневматичними приводами** мають вантажопідйомність до 10 кг, рідше 20 кг (при потужності 60-800 Вт) для одного ступеня рухливості. Основні переваги пневматичних приводів при використанні у ПР:

- простота та надійність конструкції;
- висока швидкість вихідної ланки приводу (при лінійному переміщенні до 1000 мм/с, при обертанні – до 60 об/хв);
- просте циклове керування (позиціонування проводиться за допомогою перенастроюваних упорів);
- висока точність позиціонування, що визначаються жорсткими упорами;

- відсутність проміжних передавальних ланок між вихідною ланкою приводу та робочим органом робота;
 - простота компонування елементів пневмоприводу;
 - високий коефіцієнт корисної дії (до 0,8);
 - мала відносна маса конструкції приводу на одиницю потужності;
 - низька вартість як конструкції приводу, так і робота та малі матеріальні витрати на обслуговування;
 - мала чутливість до ударних перевантажень та вібрацій;
 - використання стисненого повітря в якості робочого тіла;
 - можливість використання стисненого повітря із заводської пневмомережі з тиском 0,5–0,6 МПа;
 - можливість використання стиснутого повітря як середовища для передачі команд керування та побудови схем автоматики на базі пневмоелементів;
 - можливість роботи в агресивному та пожежонебезпечному середовищі.
- До недоліків пневматичного приводу належать:
- нестабільність швидкості вихідної ланки при зміні навантаження внаслідок стисливості робочого тіла при малих і середніх тисках;
 - обмеженість числа точок позиціювання (як правило, 2 точки) в приводах з цикловим керуванням (збільшення числа точок позиціювання вимагає використання спеціальних конструкцій пристроїв позиціювання);
 - необхідність демпфування руху вихідної ланки приводу в кінці ходу, тому що при великих швидкостях руху вихідної ланки можливі сильні удари робочого органу по упорах;
 - наявність шуму при роботі приводу.

Гідравлічні приводи є основним типом приводу для роботів великої та надвеликої вантажопідйомності. Застосування гідроприводу в робототехніці обумовлено такими перевагами:

- висока швидкодія;
- використання в якості робочого тіла нестисливої рідини, що дозволяє отримати високу стабільність швидкості вихідної ланки при зміні навантаження у широкому діапазоні, високу точність позиціювання, високу частоту реверсування руху;
- безступеневість регулювання швидкості вихідної ланки;

- великий коефіцієнт підсилення за потужністю (понад 1000), високий коефіцієнт корисної дії при різних способах регулювання;
- мала відносна маса гідромашин (при потужності понад 2 кВт вони мають найкращі масогабаритні характеристики);
- відсутність додаткових кінематичних ланцюгів між вихідною ланкою та робочим органом ПР;
- великий досвід розробки та експлуатації гідроприводів;
- широка номенклатура елементів гідроприводів.

Основними недоліками гідравлічних приводів є:

- використання в якості робочого тіла рідини вимагає створення спеціальних насосних установок;
- використання в основному робочої рідини на нафтовій основі виключає можливість застосування роботів з гідроприводами в пожежо- і вибухонебезпечному середовищі;
- обмежений ресурс робочої рідини, що призводить до частої зміни всього об'єму рідини у насосній установці, та збільшує вартість обслуговування;
- вартість елементів гідроприводу вища, ніж елементів пневматичного та електричного приводів;
- межа робочих температур рідини приводу обмежена (150°C), що звужує сферу застосування роботів.

Значне збільшення в останні роки частки роботів з *електричними приводами* (в загальному парку роботів у світі) викликано швидким прогресом у вдосконаленні електричних двигунів, спеціально створених для роботів. Це високомоментні двигуни постійного струму, безколекторні двигуни постійного струму, асинхронні двигуни та силові крокові двигуни. Електродвигуни цих типів у великому діапазоні зміни крутного моменту забезпечують підвищену максимальну швидкість і мають поліпшені масогабаритні показники. Особливостями електроприводів є зменшений момент інерції, можливість вбудовування електромагнітних гальм і різних датчиків, а також механічних передач. Основна сфера застосування електричних приводів у робототехніці – це роботи середньої вантажопідйомності (десятки кілограмів), легкі роботи з високоякісним керуванням та мобільні роботи.

Основні переваги електроприводів:

- компактна конструкція двигунів;

- висока швидкодія;
- рівномірність обертання;
- високий крутний момент на максимальній швидкості;
- висока надійність;
- висока точність позиціювання та відпрацювання траєкторії руху (за рахунок використання прецизійних датчиків положення);
- низькі рівні шуму та вібрації;
- взаємозамінність двигунів;
- компактність перетворювачів;
- доступність електричної енергії;
- високий коефіцієнт корисної дії.

До недоліків електроприводів можна віднести:

- наявність щіток у колекторних двигунах постійного струму;
- обмежене використання у вибухонебезпечних середовищах;
- велика залежність швидкості вихідної ланки від навантаження, що призводить до необхідності створення додаткових контурів регулювання приводу;
- наявність додаткового кінематичного ланцюга між електродвигуном та робочим органом робота.

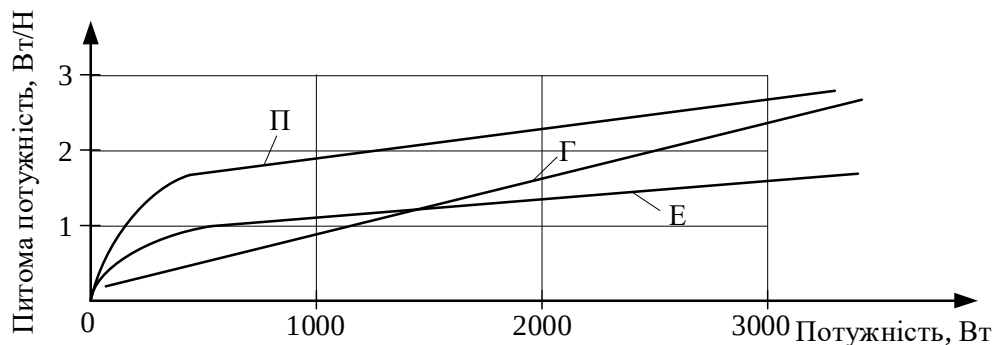


Рисунок 3.2 – Питома потужність (віднесена до ваги) електричних (Е), гідролічних (Г) та пневматичних (П) приводів залежно від їхньої абсолютної потужності

На рис. 3.2 наведено узагальнені порівняльні характеристики різних типів приводів за питомою потужністю. При розрахунку питомої потужності пневмоприводів враховувалася маса апаратури підготовки повітря, а гідроприводів – маса гідростанції, що входять до конструкції роботів.

3.1.2. Пневматичні приводи

До складу пневмопривода входять двигун, розподільний пристрій та регулятор швидкості. Двигун може бути поступального руху – пневмоциліндр або поворотний.

Пневмоциліндр складається з гільзи, виконаної з прецизійної труби зазвичай з фторопластовою накладкою всередині, поршня з ущільненням, яке має мале тертя по фторопласту, і штока. До пневмоциліндра часто прибудоване гальмо, що включається в кінці ходу поршня. Поршень зі штоком, який приєднаний до навантаження двигуна, рухається під дією стисненого повітря, що подається в порожнину циліндра з одного боку поршня. Порожнина, яка розташована з іншого боку поршня, з'єднується при цьому з атмосферою для випуску повітря, що стискається поршнем, який рухається. Напрямок руху поршня зі штоком залежить від того, з якого боку поршня подається стиснене повітря. Варіанти побудови пневмо- та гідроциліндрів наведені на рис. 3.3.

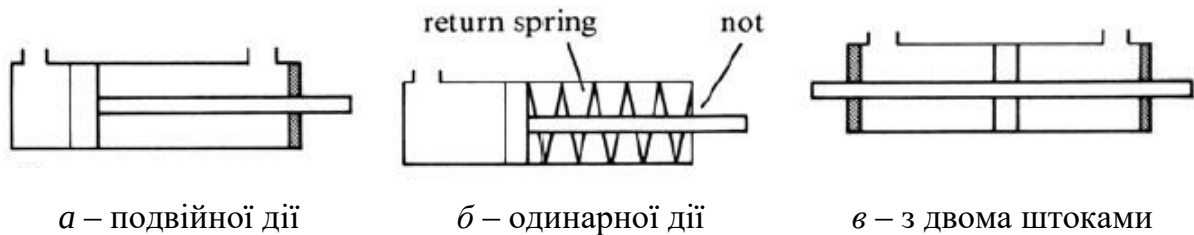


Рисунок 3.3 – Загальні типи пневмоциліндрів

Поворотні пневматичні двигуни, що застосовуються в роботах, мають обмежений кут повороту (неповноповоротні двигуни). Їх рухомою частиною є лопать, що укріплена на вихідному валу і розташована в кільцеподібному корпусі. Усередині корпусу є перегородка, з двох сторін якої виходять порожнини для повітря, розділені рухомою лопаттю (рис. 3.4).

Існують також поворотні пневматичні двигуни, що складаються з пневмоциліндрів і механічної передачі типу рейка-шестерня, яка перетворює поступальний рух рейки на поворот шестірни.

Розподільний пристрій пневмоприводу служить для керування подачею повітря у двигун. Виконують його із золотників або клапанів зазвичай з електромагнітним приводом, керуючі сигнали на які надходять від пристрою керування робота.

Регулятор швидкості підтримує задану швидкість руху приводу шляхом стабілізації витрати повітря, що подається в двигун (наприклад, за допомогою дроселя зі зворотним клапаном).

Пневматичні двигуни працюють на стислому повітрі з тиском 0,3–0,6 МПа. Стиснене повітря надходить на приводи від загального блоку живлення, що складається з апаратури підготовки повітря та редуктора.

Підготовка повітря полягає в його очищенні від вологи та інших домішок і внесенні розпиленого масла для змащення поверхонь, що труться, в двигуні. Редуктор забезпечує підтримку певного тиску на вході приводу.

Стиснене повітря на вхід блоку живлення надходить зазвичай із загальної пневмомережі, в яку він подається від компресора (компресорної станції). У мобільних роботах повітря надходить із балонів, в яких воно знаходиться під підвищеним тиском.

В даний час переважна більшість пневмоприводів робіт мають найпростіше циклове керування (за упорами). Привод переміщається з початкового положення відразу в кінцеве, яке визначається механічним упором, встановленим на рухомій частині приводу (на штоку пневмоциліндра або вихідному валу поворотного двигуна). При цьому рух відбувається на великій швидкості.

При зупинці приводу за рахунок механічного упору виникають різкі динамічні навантаження на конструкцію двигуна, механічні вібрації та підвищений рівень шуму. Тому наприкінці ходу необхідно здійснювати гальмування поршня. Для цього застосовують два найбільш поширені способи.

У першому випадку упор торкається демпфера, який гасить енергію руху, забезпечуючи безударне гальмування приводу. Одночасно з цим припиняється подача повітря у двигун. Демпфери переважно гідравлічні, а для малопотужних приводів – простіші пружинні.

Другий спосіб – гальмування протитиском, при якому демпфер не потрібен, а гальмування відбувається за рахунок перемикання подачі повітря в

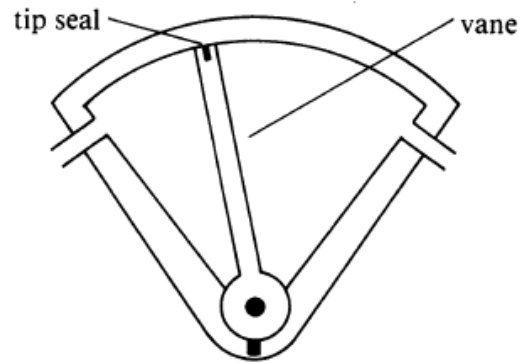


Рисунок 3.4 – Поворотний двигун

момент гальмування з однієї порожнини двигуна в іншу вихлопну порожнину, тобто зустрічно руху поршня (або лопаті в поворотному двигуні).

Задання величини переміщення здійснюється перестановкою упору. Завдяки тому, що кінцеве положення двигуна визначається механічним упором, приводи з цикловим керуванням мають значно більш високу точність, ніж при звичайному позиційному керуванні зі зворотним зв'язком за положенням (похибка менше 0,1 мм), підвищену швидкодію (швидкість переміщення кілька метрів на секунду).

Розроблені конструкції пневмоприводів також і з декількома висувними упорами, які послідовно за програмою виставляються на шляху упору, укріпленого на рухомій частині двигуна. В результаті здійснюються гальмування та позиціювання приводу в проміжних точках, що визначаються положенням цих висувних упорів. Такий спосіб позиціювання може бути реалізований, наприклад, за допомогою розміщеного уздовж пневмоциліндра барабана з упорами. Упори розташовані по довжині барабана зі зміщенням відносно один одного по куту по гвинтовій лінії. В результаті при повороті барабана на шляху упору, що переміщується зі штоком двигуна, послідовно виявляються упори барабана від першого до останнього. Рух барабана, природно, має бути синхронізований із рухом штока двигуна. Існують також конструкції подібних приводів із висувними упорами, забезпеченими індивідуальними приводами.

Зовнішній вигляд пневмоприводів показано на рис. 3.5. Мінімальна дискретність при програмуванні точок позиціювання пневмоприводів і, відповідно, найбільша кількість таких точок на заданому шляху обмежені величиною шляху гальмування, який при швидкості порядку 1 м/с може досягати 100 мм. Для підвищення точності позиціювання в проміжних точках пневмоприводи мають гальмо (зазвичай електромагнітне).

Принципово можливе позиціювання пневмоприводів за допомогою позиційного керування зі зворотним зв'язком за положенням. Однак через стисливість повітря таке керування має значно гіршу точність, ніж при використанні упорів. Поки що у світі створено всього кілька марок пневматичних промислових роботів з таким позиційним керуванням.

Іншим варіантом дискретного позиційного пневмоприводу є дискретний привод, що складається з послідовно з'єднаних циклових пневмоприводів з різними (удвічі) значеннями переміщення. Включивши ці циклові при-

води в різній комбінації, можна отримувати відповідно різне сумарне переміщення з кінцевої кількості його дискретних значень. Наприклад, три таких приводи дають у сукупності 8 точок позиціювання; чотири приводи – 16 точок тощо.

На рис. 3.6 показаний один з серійних пневматичних промислових роботів МП-9С, а на рис. 3.7 – його пневматична схема. Свого часу робот отримав широке застосування на складальних операціях і для обслуговування пресів.

Стиснене повітря з пневмомережі надходить через запірний муфтовий вентиль 1, вологовідділювач 2, регулятор тиску 3 і маслорозпилювач 5 до електропневматичних нормально закритих клапанів 7–13. Тиск у системі контролюється за допомогою технічного манометра 4.



Рисунок 3.5 – Пневмоциліндри фірми Festo

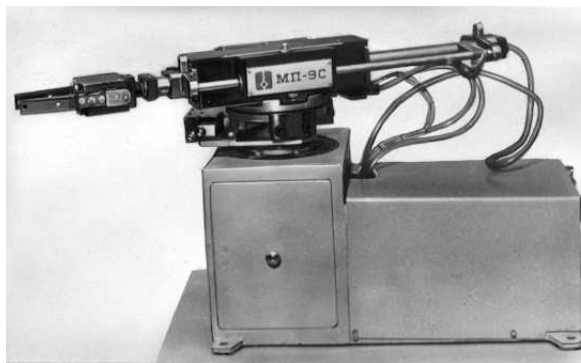


Рисунок 3.6 – Пневматичний промисловий робот МП-9С

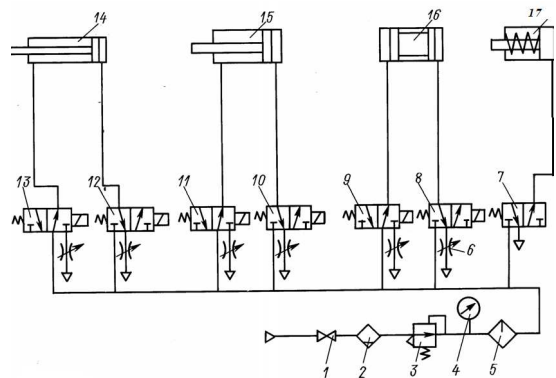


Рисунок 3.7 – Пневматична схема ПР МП-9С

При включенні клапана 7 повітря надходить у пневмоциліндр 17 кліщів. Пальці кліщів зближуються та затискають деталь. При відключенні клапана 7 повітря з пневмоциліндра 17 стравлюється в атмосферу і поршень під дією пружини повертається у початкове положення. При включенні клапанів 8, 10, 12 повітря надходить відповідно до пневмоциліндрів

повороту маніпулятора 16, підйому маніпулятора 15, висування пристрою захоплення 14, а через клапани 9, 11, 13 і дросель 6 стравлюється в атмосферу. За допомогою цих дроселів регулюється швидкість поршнів пневмоциліндрів і, відповідно, ланок маніпуляторів.

3.1.3. Гідравлічні приводи

Гідроприводи знайшли основне застосування в роботах великої вантажопідйомності, а також в роботах середньої вантажопідйомності, коли потрібне особливо якісне керування. Гідропривод складається з тих самих основних частин, що й пневмопривод. Його основою є двигун поступального руху (гідроциліндр) або кутового руху (поворотний гідродвигун), які реалізовані подібно до аналогічних пневматичних двигунів, тільки замість стисненого повітря в них використовується рідина (зазвичай мастило) під тиском до 20 МПа. Відповідно з великим тиском у порівнянні з пневмоприводом створюється і на два порядки більше зусилля. Нестисливість рідини забезпечує гідроприводу значно кращі динамічні та точнісні характеристики порівняно з пневмоприводом.

Гідроприводи реалізуються трьома різними схемами:

- з постійним тиском робочої рідини в системі та постійною продуктивністю гідравлічного насоса;
- з постійним тиском робочої рідини в системі та змінною продуктивністю гідравлічного насоса;
- зі змінним тиском робочої рідини в системі та змінною продуктивністю гідравлічного насоса.

Перші дві схеми називають гідроприводами дросельного керування, а третю схему – гідроприводом об'ємного керування. У ПР широко застосовують гідроприводи дросельного керування.

Зміна швидкості руху рухомого елемента гідродвигуна здійснюється за рахунок дроселювання потоків робочої рідини на вході та (або) виході виконавчого двигуна. Керування гідравлічними двигунами здійснюється за допомогою золотників і клапанів, які мають зазвичай електричне керування, тобто являють собою електрогідравлічні підсилювачі.

На відміну від пневмоприводів гідроприводи мають блок живлення, що входить до складу робота. Цей блок складається з гідронасосу, фільтра, регулятора тиску, пристрою охолодження (зазвичай водяного) та масляного акумулятора із запасом мастила.

На рис. 3.8 показані гідравлічні приводи, а на рис. 3.9 – приклад гідравлічного ПР.

Робот на рис. 3.9 призначений для нанесення покриттів і має в якості робочого органу фарборозпилювач. Крім того він може застосовуватися для зварювання та зачистки. Робот складається з трьох частин: маніпулятора, насосної станції (ліворуч) та пристрою керування (в центрі).

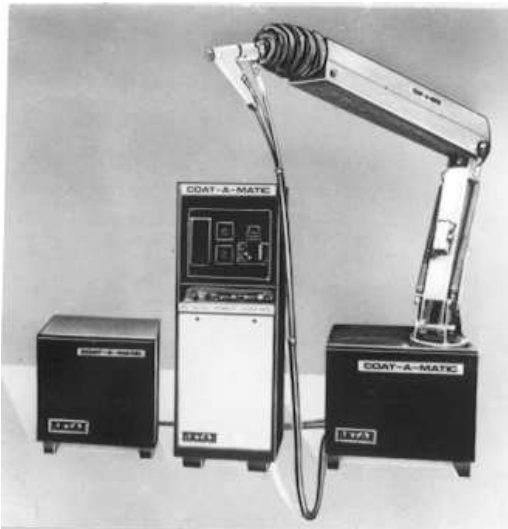


Рисунок 3.9 – Гідравлічний ПР для нанесення покриття «Coat-a-Matic»



Рисунок 3.8 – Гідроциліндри

Маніпулятор ПР має шість ступенів рухливості у кутовій системі координат. Ланки маніпулятора врівноважені за допомогою пружин. Це дозволяє оператору легко переміщати маніпулятор вручну за дві рукоятки біля робочого органу, здійснюючи програмування робота методом навчання.

Гідравлічна схема робота представлена на рис. 3.10. Насосом 8 мастило через зворотний клапан 6 нагнітається у ресивер 23 і через фільтр високого тиску 24 потрапляє в напірну магістраль. Заданий тиск масла підтримується клапаном 10, керованим реле тиску 5, і контролюється манометром 7.

У разі аварійного падіння тиску мастила в гідросистемі реле тиску 5 відключає маніпулятор. З гідросистеми мастило зливається в бак 9 через теплообмінник 12 і фільтр 11. Насосна станція, виконана в окремому корпусі, з'єднується з блоками розподільників, розміщеними в станині, за допомогою шлангів з швидкокороз'ємними муфтами 13 і 22. Кожен із приводів робота керується відповідним розподільником 3, 4, 14, 15, 16, 21.

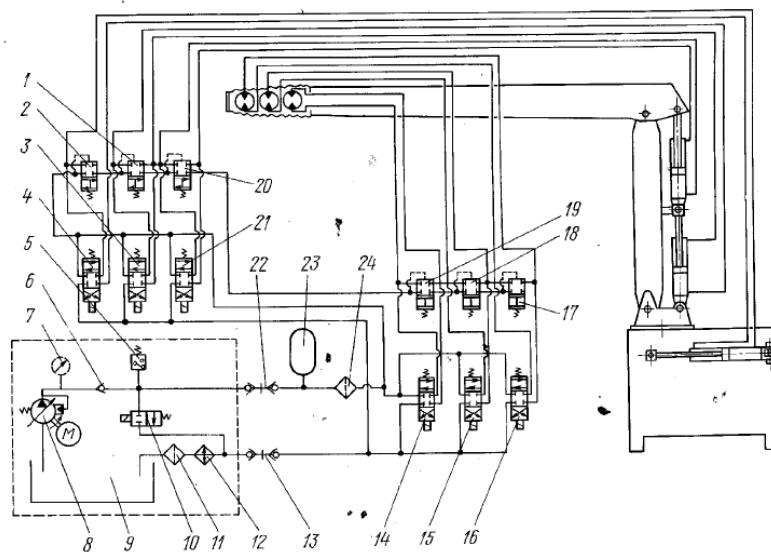


Рисунок 3.10 – Гідравлічна схема робота «Coat-a-Matic»

Переливні клапани 1, 2, 17–20 при непрацюючому масляному насосі з'єднують протилежні порожнини гідроциліндрів і гідродвигунів та дозволяють переміщати робочий орган у режимі навчання. При включенні насоса під тиском мастила клапани перемикаються та з'єднують двигуни з відповідними розподільниками.

3.1.4. Електричні приводи

В даний час електричні приводи найпоширеніші в робототехніці. У промислових роботах знайшли застосування електроприводи таких типів:

- на двигунах постійного струму – традиційних колекторних та безколекторних (вентильних);
- на крокових двигунах;
- на асинхронних двигунах з частотним керуванням і нерегульованих (з цикловим керуванням);
- на основі різного типу регульованих муфт у поєднанні з нерегульованим асинхронним двигуном або двигуном постійного струму;
- на основі електромагнітів (соленоїдних та інших типів).

В основному застосовуються електроприводи (ЕП) з кутовим переміщенням. Однак у ланках маніпуляторів з поступальним переміщенням, поряд з двигунами, що обертаються в комбінації з механізмами, що перетво-

рюють обертальний рух в поступальний, знайшли застосування і спеціальні лінійні приводи.

Електроприводи для роботів у загальному випадку включають: електродвигун з датчиками зворотного зв'язку за положенням і швидкістю; механічну передачу; часто гальмо; іноді муфту (наприклад, для захисту двигуна від перевантаження) і пристрій керування.

На рис. 3.11 показаний зовнішній вигляд електромеханічного ПР IRB-6 фірми ASEA (Швеція). Пристрій керування робота виконано на мікроЕОМ.

Програмування робота – навчання за допомогою переносного пульта. Робот може функціонувати в режимах безперервного та дискретного позиційного керування та комплектуватись різними сенсорними системами, включаючи систему технічного зору та силомоментний сенсор.

Завдяки своїм широким функціональним можливостям IRB-6 знайшов застосування як універсальний робот на багатьох основних технологічних операціях (дугове та точкове зварювання, механічне складання, очищення виливків) та для обслуговування верстатів та іншого технологічного обладнання, перш за все, в автомобільній промисловості.

Перспективними типами електричних приводів для роботів стали високомоментні безредукторні двигуни, приводи з безпосереднім цифровим керуванням, а також бездатчикові приводи з обчислювачами значень переміщення і швидкості за вимірюваними електричними змінними двигуна.

Як приклад розглянемо реалізацію електроприводів ступенів рухливості ПР ТУР-10, кінематична схема якого була наведена в розділі 2.3.1. Кожна ланка руки приводиться до руху відповідним незалежним електроприводом з двоконтурним регулюванням кутової швидкості обертання. При цьому реалізується закон керування, що формується блоком задання програми. На рис. 3.12 представлена функціональна схема пристрою керування одним ступенем рухливості робота. Пристрій керування роботом яв-



Рисунок 3.11 – Промисловий робот IRB-6

ляє собою сукупність блоків задання (формування) програми рухів та її відпрацювання – системи слідкувальних приводів.

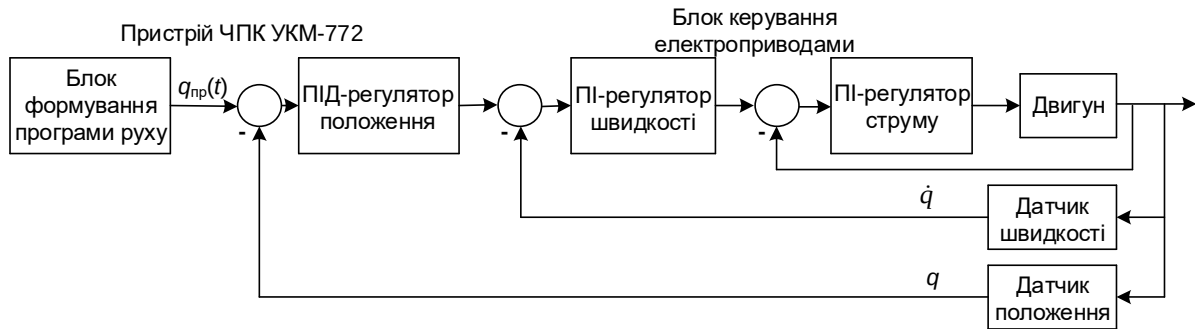


Рисунок 3.12 – Функціональна схема керування одним ступенем рухливості робота ТУР-10К

Конструктивно пристрій керування роботом виконаний у вигляді двох шаф: пристрою ЧПК моделі УКМ-772 та блоку керування електроприводами. Пристрій УКМ-772 забезпечує контурне керування роботом.

Програмне забезпечення пристрою дозволяє складати і редагувати керуючі програми, забезпечувати роботу в автоматичному режимі в узагальнених координатах, реалізувати прямолінійні траєкторії в площині руки в системах координат, пов'язаних з основою і з пристроєм захоплення, здійснювати програмну розв'язку руху згину і обертання кисті, використовувати лінійну інтерполяцію для апроксимації траєкторії руху. Для роботи пристрою керування роботом у контурному режимі використовують математичні моделі, що описують кінематику маніпулятора.

На підставі записаної послідовності опорних точок в блоці формування програми рухів за допомогою інтерполювання розраховуються безперервні траєкторії програмного руху в узагальнених координатах $q_i(t)$, які подаються на вхід слідкувальної системи. Основне завдання слідкувальної системи полягає у забезпеченні необхідної точності відпрацювання програмних рухів.

Блок керування електроприводами (підсилювально-перетворювальний пристрій) являє собою сукупність джерела постійної напруги і широтно-імпульсних транзисторних перетворювачів (ШПП) кожного приводу. Система керування містить пропорційно-інтегральні регулятори струму і кутової швидкості обертання.

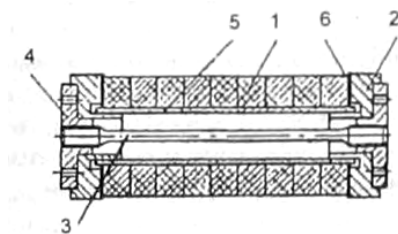
ПД-регулятор положення забезпечує видачу керуючого впливу що пропорційний розузгодженню, інтегралу та швидкості зміни (похідної) регульованої величини. У ПД-регулятор додатково введений самоналагоджуваний канал керування по швидкості, що дозволяє підвищити точність відпрацювання траєкторії. Суть самоналагоджування зводиться до автоматичної зміни коефіцієнта підсилення регулятора положення в залежності від величини поточного розузгодження і швидкості об'єкта регулювання.

Характеристики ПД-регулятора і компенсатора швидкісної похибки визначаються чотирма постійними коефіцієнтами підсилення, що задаються оператором в діалоговому режимі в залежності від необхідної якості перехідних процесів. Ці коефіцієнти неможливо визначити заздалегідь, оскільки вони залежать від індивідуальних динамічних властивостей робота. Як правило, коефіцієнти призначають за результатами пробних рухів у різних режимах роботи, домагаючись стійкості за максимально можливої швидкодії системи.

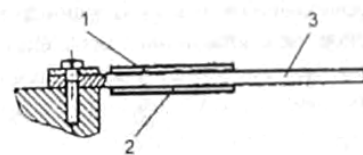
3.1.5. Мікроприводи

Розвиток мікроробототехніки в першу чергу зажадав створення відповідних мікроприводів. Для цього поряд з мініатюризацією традиційних двигунів розробляються абсолютно нові приводи для мікропереміщень, засновані на використанні керованих гнучких деформацій. Одним з таких перспективних типів мікроприводів є *п'єзоприводи*.

На рис. 3.13, *а* показана схема основного елемента такого приводу – п'єзоперетворювача електричної енергії в енергію механічного переміщення. Він представляє собою пакет з п'єзокерамічних шайб 1 з нанесеними на торці електродами. 2



а – з поступальною деформацією



б – із згинальною деформацією

Рисунок 3.13 – П'єзоелектричні перетворювачі мікроприводів

При подачі на них електричної напруги за рахунок зворотного п'єзоелектричного ефекту відбувається збільшення або зменшення (розтягування-стискання) товщини шайб залежно від полярності напруги. П'єзокерамічні шайби надягають на пластмасову втулку 5, по краях розташовуються слюдяні шайби 6. Отриманий циліндр скріплюється за допомогою фланців 2, шпильки 3 і гайок 4.

На рис. 3.13, б показаний інший тип таких перетворювачів на основі згинальних деформацій багатошарових п'єзоелектричних пластин 1, 2. Пластини кріпляться на металевій ресорі 3. Такі перетворювачі мають більший хід, ніж ті, що використовують деформацію розтягування-стискання, але гірші точнісні та силові характеристики.

Характеристики таких електромеханічних перетворювачів:

- величина переміщення на виході (хід) – десятки частки мм;
- швидкість – до 2 м/с;
- похибка керованого позиціонування – частки мм;
- зусилля – сотні Ньютон;
- потужність – десятки Вт.

З таких перетворювачів створюються триступеневі маніпуляційні системи. Вони часто комбінуються зі звичайними електромеханічними маніпуляційними системами, які забезпечують переміщення в десятки міліметрів з похибкою, що визначається даною маніпуляційною системою. Виходить маніпулятор, що складається з послідовно з'єднаних систем грубого і точного позиціонування, робочий хід якого визначається першою системою, а точність – другою.

Крім п'єзоелектричних існують мікроприводи, засновані на інших принципах дії: п'єзوماгнітні, електро- і магнітострикційні, біметалічні, на ефекті пам'яті форми, електростатичні.

Важливим біонічним напрямком у робототехніці є створення мікроприводів типу штучний (технічний) м'яз. Сучасні приводи, що застосовуються в робототехніці, за своїми масогабаритними параметрами на порядок поступаються поперечно-смугастим м'язам тварин і людини. Враховуючи, що параметри приводів значною мірою визначають масогабаритні та енергетичні характеристики роботів в цілому, це визначає інтерес до проблеми створення технічних аналогів таких м'язів.

Одна з очевидних причин значно більшої маси у сучасних приводів у порівнянні з м'язами – це застосування в них металів, особливо феромагнітних в електричних двигунах. Тому першими розробками приводів, що отримали назву штучний м'яз, були пневматичні приводи, в яких циліндр з поршнем замінювався еластичною трубкою (гума, полімери) в обплетенні навхрест (нейлон). При подачі в трубку повітря під тиском обплетення змушує трубку роздмухуватися та скорочуватися на величину до однієї третини довжини, імітуючи роботу м'яза. Такі приводи мають у 3-4 рази меншу масу, ніж пневматичні циліндри на ту ж потужність, і тому вони знайшли застосування насамперед у протезах кінцівок. Джерелом стиснутого газу служать зазвичай одноразові балончики. На рис. 3.14 показана конструкція реверсивного приводу такого типу фірми Bridgestone (Японія).

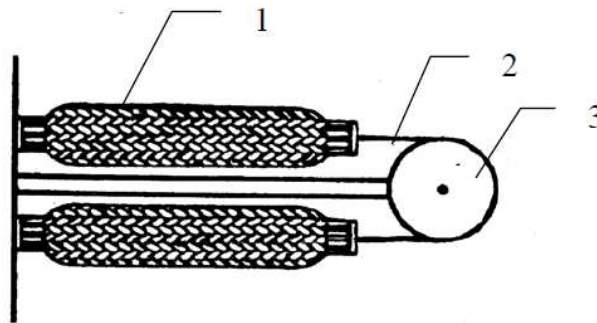


Рисунок 3.14 – Реверсивний гнучкий пневматичний привод

Пристрій складається з двох пневматичних приводів 1 односторонньої дії. При підвищенні тиску в одному з них і одночасному зниженні на ту ж величину в іншому перший привод скорочується, подовжуючи другий. В результаті через трос 2 відбувається поворот блоку 3 який пов'язаний з ланкою маніпулятора. Кут повороту блоку практично прямо пропорційний різниці тисків у приводах. Виконаний на таких приводах шарнірний п'ятиступеневий маніпулятор робота Softarm має вантажопідйомність – 3 кг при масі 5,5 кг та похибку позиціонування – 1,5 мм.

Різновидом пневматичних штучних м'язів є аналогічні пристрої із заміною обплетення поздовжніми тяговими нитками. Такі конструкції мають дещо кращі тягові характеристики та розвивають великі зусилля. Ще більші тягові зусилля можна отримати при заміні газу рідиною під тиском, тобто при переході до гідравлічних штучних м'язів. Такі гідравлічні штучні м'язи

мають також більш високу точність позиціонування і кращу динаміку як і усі гідравлічні приводи в порівнянні з пневматичними приводами.

У середньому представлені пневматичні та аналогічні гідравлічні штучні м'язи в порівнянні з традиційними приводами (циліндрами) в 3 рази легше, в 2 рази менше за габаритами і розвивають в десятки разів більше зусилля на одиницю ваги.

В даний час у світі ведуться інтенсивні дослідження та розробки штучних м'язів, заснованих на інших фізичних принципах. Найбільш близькі до розглянутих пристроїв розробки електромагнітних та електростатичних штучних м'язів.

Електромагнітний штучний м'яз складається з багатовиткової обмотки, стиснутої в джгут, в якому провідники з електричним струмом протилежного напрямку притиснуті один до одного. При пропусканні по них струму вони внаслідок електромагнітної силової взаємодії розходяться у поперечному напрямку. В результаті довжина джгута скорочується подібно до скорочення пневматичних і гідравлічних м'язів.

Один з перших варіантів електростатичного штучного м'яза є циліндром, по осі якого розташований центральний електрод, а по утворюючим циліндра – з'єднані один з одним гнучкі периферійні електроди. При подачі на центральний і периферійний електроди електричного потенціалу виникає електрична сила, яка відштовхує периферійні електроди від центрального. В результаті периферійні електроди згинаються, викликаючи скорочення м'язу.

Інший варіант електростатичного м'яза виконаний у вигляді стовпчика, зібраного з тонких металевих дисків (плівок), розділених пружними ізолюючими прокладками. Усі непарні і всі парні диски з'єднані один з одним. При подачі на них електричної напруги різної полярності диски зближуються, стискаючи прокладки, що ізолюють, і м'яз скорочується.

Для мобільних мікророботів призначених для пересування у вузьких порожнинах (трубопроводи, шлунково-кишковий тракт, кров'яні судини людини і т.п.) розроблені спеціальні мікродвигуни, що реалізують спосіб пересування, як у гусениць і черв'яків. Подібна система пересування на п'єзоприводах складається з декількох п'єзоелектричних сегментів, з'єднаних центральним стрижнем з того ж матеріалу. Поступальне переміщення здійснюється шляхом подовження центрального стрижня, а сег-

менти, що поперечно розширюються за рахунок п'єзоефекту, виконують функції фіксаторів. Частота імпульсів руху 10–20 МГц.

Основні області застосування мікроприводів, що вже визначилися, і заснованих на них мікроманіпуляторів і мікророботів – це технологічні мікрооперації в промисловості (складання, мікрообробка, зварювання тощо), біологічні та фармакологічні технології, медицина (огляд внутрішніх порожнин, доставка туди ліків, хірургічні операції).

3.2. Інформаційне забезпечення роботів

3.2.1. Види інформаційних систем

Інформаційні системи роботів призначені для отримання інформації про зовнішнє середовище та положення робота в ньому. Інформаційні системи можна поділити за функціональною ознакою на дві групи: датчики стану маніпулятора та сенсорні системи роботів (системи зчутливлення). Датчики стану маніпулятора необхідні для функціонування роботів та РТС (наприклад, датчики зворотного зв'язку в приводах, джерелах живлення тощо). Ці пристрої, орієнтовані на внутрішні параметри робота, не специфічні для нього в цілому і тому не відносяться до сенсорних систем робота.

Сенсорні системи роботів за властивостями, що виявляються, і параметрами зовнішнього середовища можна розділити на три групи:

1) Сенсорні системи, що дають загальну картину зовнішнього середовища з наступним виділенням окремих об'єктів, значимих до виконання роботом його функцій.

2) Сенсорні системи, що визначають координати місцезнаходження робота і параметри його руху, включаючи його координати щодо об'єктів зовнішнього середовища та зусилля взаємодії з ними.

3) Сенсорні системи, що визначають різні фізико-хімічні властивості зовнішнього середовища та його об'єктів.

До сенсорних систем першої групи відносяться *системи технічного зору* і *різноманітні локатори*.

Друга група сенсорних систем визначає параметри, що відносяться до самого робота:

- *вимірювачі географічних координат* робота у просторі з використанням супутникових систем, магнітного поля Землі тощо;

- *вимірювачі кутових координат* (гіроскопи);
- *вимірювачі переміщення і швидкості*, в тому числі і відносно окремих об'єктів зовнішнього середовища аж до фіксації зіткнення з ними і вимірювання зусиль, що розвиваються при цьому.

Третя група сенсорних систем найбільш різноманітна. Це вимірювачі геометричних параметрів, щільності, температури, оптичних властивостей, хімічного складу і т.д.

Інформація від сенсорних систем використовується в системі керування робота для виявлення та розпізнавання об'єктів зовнішнього середовища, для керування рухом робота та його маніпуляторів.

У складі робота всі сенсорні системи орієнтовані на обслуговування двох виконавчих систем: маніпуляційної та пересування. Це визначає і основні вимоги до сенсорних систем: дальність дії, точність і швидкодія.

Сенсорні системи, що використовуються в системах пересування робота, поділяються на два види:

- системи, які забезпечують навігацію у просторі;
- системи, що забезпечують безпеку руху (запобігання зіткнень з перешкодами, перекидань на ухилах і т. п.).

Сенсорні системи маніпуляторів теж утворюють дві підгрупи:

- системи, що входять в контур керування рухом маніпулятора;
- системи зчутливлення його робочого органу.

До останніх систем часто входять розміщені біля робочого органу маніпулятора системи технічного зору та вимірювачі зусиль.

За дальністю дії сенсорні системи можна розділити на такі види: контактні, ближньої дії, дальньої та наддальньої дії.

Контактні сенсорні системи застосовуються для зчутливлення робочих органів маніпуляторів та корпусу (бампера) мобільних роботів. Вони дозволяють фіксувати контакт з об'єктами зовнішнього середовища (*тактильні датчики*), вимірювати зусилля, що виникають у місці контакту (*силомоментні датчики*), визначати прослизання об'єктів при їх утриманні пристроєм захоплення. Контактним сенсорним системам властива простота, але вони накладають суттєві обмеження на динаміку і насамперед швидкодію керування роботом.

Сенсорні системи *ближньої дії* забезпечують отримання інформації про об'єкти, розташовані безпосередньо поблизу робочого органу маніпу-

лятора або корпусу робота, тобто на відстанях, порівнюваних з їх розмірами. До таких систем відносяться ультразвукові та оптичні локатори, далекоміри, дистанційні вимірювачі щільності ґрунту тощо. Безконтактні пристрої ближньої дії технічно складніші за контактні, але дозволяють роботу виконувати завдання з більшою швидкістю, заздалегідь видаючи інформацію про різні об'єкти до зіткнення з ними.

Сенсорні системи *дальньої дії* служать для отримання інформації про зовнішнє середовище в обсязі всієї робочої зони маніпуляторів роботів та навколишнього середовища мобільних роботів.

Сенсорні системи *наддальньої дії* застосовуються головним чином у мобільних роботах. До них відносяться різні навігаційні системи, локатори та інші сенсорні системи відповідної дальності дії. Ці пристрої знаходять застосування і в стаціонарних роботах при роботі з рухомими об'єктами, щоб заздалегідь передбачати їх появу в робочій зоні.

В даний час як сенсори роботів найбільш широке застосування отримали системи технічного зору, локаційні, силомоментні та тактильні (рис. 3.15). Найбільш універсальними з них є системи технічного зору. Розвиток СТЗ і зчутливлених роботів, що їх використовують, став одним з важливих напрямків сучасної робототехніки.

Безконтактні сенсорні системи діляться на активні та пасивні. У перших для отримання необхідної інформації використовуються випромінювані ними спеціальні сигнали (оптичні, радіотехнічні, ультразвукові і т.д.), а в других використовуються природні випромінювання середовища та його об'єктів.

Активні сенсорні системи мають передавач, що випромінює первинний сигнал, і приймач, що реєструє сигнал, відбитий від об'єктів середовища або прямий сигнал, що пройшов через середовище. Пасивні системи, звідси, мають лише приймальний пристрій, а роль випромінювача грають самі об'єкти зовнішнього середовища. Тому пасивні сенсорні системи зазвичай технічно простіше і дешевше активних, але менш універсальні. Для деяких застосувань важлива скритність дії пасивних систем.

Слід зазначити, що всі органи чуття людини є пасивними. Однак у деяких тварин (кажани, дельфіни) існують і активні сенсорні системи, коли пасивні системи і, перш за все зір, не забезпечують їх необхідною інформацією. Нарешті, сенсорні системи роботів можна розділити на системи з фіксованим та змінним (скануючі) напрямом сприйняття інформації.

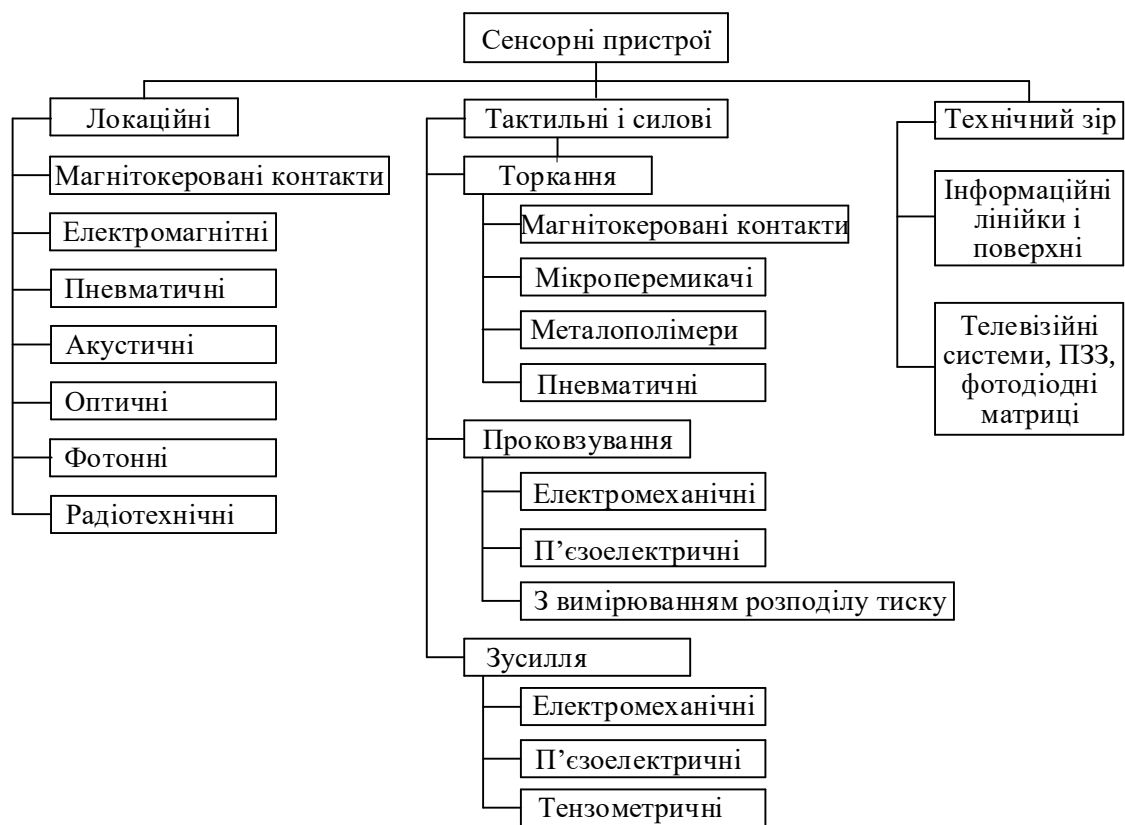


Рисунок 3.15 – Класифікація сенсорних пристроїв

3.2.2. Системи технічного зору

Системи технічного зору у складі систем керування роботами призначені, поряд з іншими сенсорними системами, для реалізації адаптивного керування і для забезпечення людини-оператора, керуючого роботом, відеоінформацією про навколишнє середовище робота та його робочої зони.

У порівнянні із зором живих організмів завдання забезпечення технічного зору простіше в тому відношенні, що, як правило, тут істотно більш обмежений і заздалегідь зумовлений перелік об'єктів зовнішнього середовища, з якими належить мати справу, а також існує можливість певною мірою спеціально організувати зовнішнє середовище для полегшення роботи відеосистем. Наприклад, часто для розпізнавання об'єктів можна маркувати їх, застосовувати поверхні що контрастують з об'єктами, на яких вони розташовані, спеціальні системи освітлення тощо.

Задачі технічного зору поділяють на три групи – контроль якості виробів, ідентифікація об'єктів, керування рухом. При контролі якості виготовле-

ну деталь зіставляють із зображенням еталонної деталі та виявляють їх відмінності. У завданнях ідентифікації об'єктів розпізнають різні види об'єктів, що показуються, і сортують їх за класами. При керуванні рухом оцінюють види перешкод на шляху робота і формують команди керування роботом.

Виділяють три типи СТЗ – розпізнавальні, вимірювальні та оглядово-інформаційні. Розпізнавальні СТЗ застосовують для контролю якості, класифікації та сортування об'єктів за геометричними параметрами. Вимірювальні СТЗ застосовують для вимірювання геометричних параметрів виробів та оцінки їх відповідності заданим. Оглядово-інформаційні СТЗ служать для розпізнавання взаємного розташування об'єктів з метою організації технологічного процесу, наприклад складання.

Основним призначенням СТЗ у роботах є отримання відео-інформації про об'єкти зовнішнього середовища з метою їх виявлення та ідентифікації. Крім того СТЗ можуть застосовуватися для візуалізації інформації від інших типів сенсорних систем. Отримана інформація використовується потім при плануванні дій робота, відпрацювання програм окремих операцій, а також при керуванні ними.

У промисловості системи технічного зору використовують для класифікації та сортування деталей, розбору деталей з навалу, вимірювання координат рухомих об'єктів при наведенні пристрою захоплення, визначення положення та правильної орієнтації деталей при складанні, для контролю якості обробки або покриття деталей, перевірки відповідності розмірів деталей кресленню та багатьох інших завдань.

Функції СТЗ зводяться до виконання наступних дій:

1. Отримання загальної картини навколишнього зовнішнього середовища.
2. Виділення в цій картині окремих об'єктів та їх розпізнавання,

включаючи:

- кластеризацію – розбиття на близькі класи за деякими важливими ознаками;
 - класифікацію – віднесення до певних заданих класів;
 - верифікацію – виявлення конкретного об'єкта, що шукається.
3. Визначення характеристик тих виявлених об'єктів, які необхідні для виконання роботом конкретних завдань.

Системи технічного зору можуть бути:

- одновимірними (лінійка), дво- та тривимірними (стерео);

- монохромними (напівтоновими, чорно-білими);
- кольоровими.

Найпростіший варіант системи технічного зору – це дворівнева чорно-біла система, в якій виділяються тільки дві крайні градації яскравості зображення (0 або 1) без урахування проміжних значень яскравості (напівтонів сірого кольору).

Системами технічного зору називають такі сенсорні пристрої, які забезпечують отримання зображення робочої сцени, його перетворення, аналіз, обробку за допомогою мікропроцесора або мікроЕОМ і передачу результатів вимірювання до керуючого пристрою робота, до ЕОМ вищого рівня керування або людині-оператору для подальшого використання. Склад СТЗ наведено на рис. 3.16.

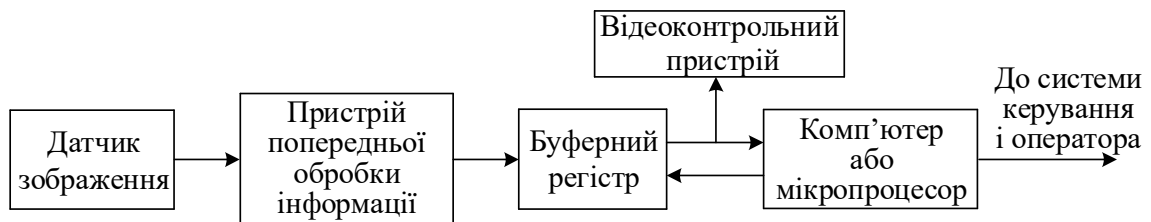


Рисунок 3.16 – Схема системи технічного зору

Система працює в режимах налаштування, навчання та розпізнавання. У режимі налаштування датчик зображення (відеодатчик) наводять на освітлений об'єкт, фокусують зображення і задають поріг градації ознак, що розпізнаються, наприклад чорний і білий. У режимі навчання перед відеодатчиком поміщають еталонні об'єкти і задають в комп'ютері функції належності еталона до певного класу. У режимі розпізнавання комп'ютер веде обробку відеоінформації про невідомий об'єкт за допомогою складних алгоритмів розпізнавання образів та визначає його належність до того чи іншого класу еталонів.

Система технічного зору складається з первинного перетворювача зорового зображення (датчика зображення) в електричний сигнал, пристрою попередньої обробки зорової інформації та мікропроцесора, який реалізує конкретні алгоритми аналізу зовнішнього середовища, розпізнавання її зорових образів, виявлення конкретних властивостей зовнішнього середовища

та визначення необхідних кількісних параметрів. На час обробки зображення комп'ютером інформація зберігається в буферному пристрої.

Основний тип сучасних СТЗ – це однопроцесорні системи на основі персонального комп'ютера. Для підвищення швидкодії та при роботі з досить складними зображеннями застосовуються багатопроцесорні системи з поділом завдання розпізнавання на кілька підзадач, які можна вирішувати паралельно. Для обробки великих масивів даних за тривалий час застосовують СТЗ з послідовною (конвеєрною) структурою.

Датчик зображення – це оптоелектронний перетворювач, що працює, як правило, у діапазоні видимого світла. Існують перетворювачі, що працюють у діапазонах електромагнітного випромінювання до видимого світла (інфрачервоний діапазон – тепловачення, ультракороткий радіодіапазон) та після видимого світла (ультрафіолетове, рентгенівське та гамма-випромінювання – для роботи в непрозорих середовищах аж до твердих тіл (інтроскопія)). Зображення також можуть виходити за допомогою скануючих далекомірів: лазерних, мікрорадіохвильових та інших локаторів.

Перетворювач видимого світла є телекамерою одного з двох типів:

- вакуумні електронно-променеві перетворювачі, тобто телевізійні передавальні трубки;
- твердотільні напівпровідникові перетворювачі на основі приладів із зарядним зв'язком (ПЗЗ) або окремі фотоелементи (фотодіоди, фототранзистори, фоторезистори).

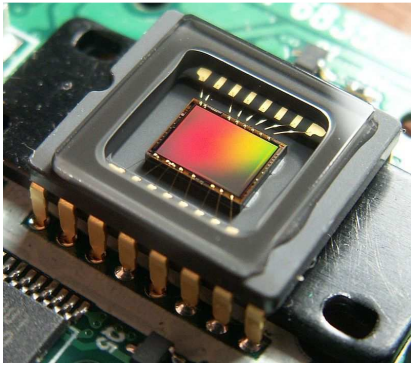
В даний час в якості оптоелектронних перетворювачів в СТЗ найчастіше застосовують ПЗЗ-матриці. ПЗЗ-матриця або CCD-матриця (скор. від англ. «charge-coupled device») – спеціалізована аналогова інтегральна мікросхема, що складається з світлочутливих фотодіодів, виконана на основі кремнію, і використовує технологію ПЗЗ – приладів із зарядним зв'язком. Технологія ПЗЗ дозволяє елементу пам'яті отримати заряд завдяки фотоелектричному ефекту.

Такі матриці (рис. 3.17) являють собою кремнієву пластинку (8x8 мм), світлочутливу поверхню якої утворює сітка вирощених методами інтегральної технології складних мікроелектронних компонентів, здатних сприймати проєктоване на них зображення.

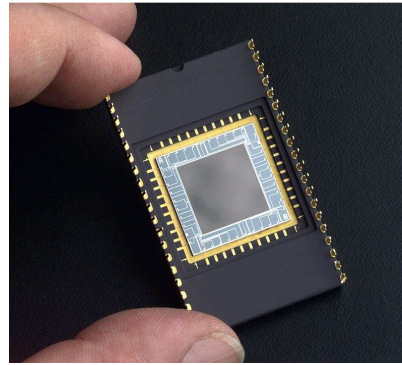
Оптичне зображення об'єкта, сфокусоване на фоточутливій поверхні оптоелектронного перетворювача, трансформується в електричний сигнал,

який в більшості випадків представляється у формі стандартного телевізійного відеосигналу.

Відеосигнал перетворюється на цифрову форму в пристрої попередньої обробки (цифрова плата з пам'яттю зображення).



а – ультрафіолетовий діапазон



б – видимий діапазон

Рисунок 3.17 – ПЗЗ-матриці

У СТЗ, наведений на рис. 3.16 завдання обробки зорової інформації вирішуються послідовно наступним чином:

- попередня обробка відеозображення датчика у вигляді його фільтрації з метою підвищення якості зображення шляхом звільнення від шумів та інших перешкод, включаючи зміну освітленості та тіні, згладжування, підвищення контрастності з посиленням меж об'єктів та їх частин, перетворення аналогового сигналу в цифровий;
- сегментація, тобто декомпозиція зображення з послідовним виділенням окремих об'єктів із загальної картини, потім їх частин і т.д. (виявлення контурів, ділянок певної текстури та кольору);
- визначення показників цих об'єктів, тобто виділення ознак (дескрипторів) для їхнього подальшого розпізнавання (виділення відрізків прямих, отворів, кіл, оцінка величини площі тощо);
- розпізнавання, тобто кластеризація, класифікація або верифікація.

Попередня обробка виконується в такий спосіб. Поле зору оптоелектронного перетворювача розбивається на окремі елементи, які утворюють сітку, що складається, наприклад, з 256х256 точок. З іншого боку, у системах технічного зору, які розрізняють кілька рівнів яскравості, квантування, тобто перетворенню на цифрову форму, може піддаватися і амплітуда відеосигналу в кожній точці зображення. У пристрої сполучення здійсню-

ється також фільтрація відеосигналу, представленого в цифровій формі, в результаті якої знижується кількість перешкод на зображенні.

Наступні етапи перетворення та аналізу зображення здійснюються мікропроцесором (мікроЕОМ). Оперуючи з масивом нулів і одиниць, що описують розподіл яскравості світлового потоку поля зору відеодатчика, процесор послідовно виділяє точки зображення, в яких відбувається різка зміна яскравості. Як правило, ці точки належать контуру тієї чи іншої деталі, що знаходиться на сцені, або є точками, що підкреслюють різні особливості однієї деталі, наприклад, отвори, ребра тощо.

Надалі виконується аналіз зв'язності, тобто визначається належність кожної точки тому чи іншому контуру, що є замкнутою кривою, і здійснюється сегментація зображення, що представляє собою процедуру виділення на зображенні окремих об'єктів, що не зв'язані і не торкаються.

Після виконання попередніх перетворень можна підрахувати кількість окремих деталей, що знаходяться в полі зору, і приступити до завершальної фази аналізу зображення. У ході цієї фази обчислюються характерні ознаки кожного із виділених у процесі сегментації об'єктів. В якості цих ознак використовуються різні параметри зображення об'єкта, що не змінюються при його зсуванні або повороті. Такими параметрами можуть бути: площа, довжина периметра, максимальний і мінімальний моменти інерції, кількість кутів, радіуси вписаного та описаного кіл та ін.

Одночасно можуть бути виміряні координати центрів тяжіння та орієнтація кожного з об'єктів на зображенні по відношенню до системи координат оптоелектронного перетворювача, знання яких необхідне для захоплення потрібної деталі роботом та встановлення її в задане положення з необхідною орієнтацією, наприклад, при складанні виробів.

Розпізнавання або вибір бажаної деталі виконується шляхом порівняння обчисленого для кожної деталі списку ознак з аналогічними списками, отриманими в процесі навчання системи технічного зору, які зберігаються в пам'ятовувальному пристрої.

Для розпізнавання зображення використовуються інтегральні та контурні методи обробки чи метод характерних точок.

При ідентифікації об'єкта інтегральними методами визначаються *координати центру форми, моменти інерції щодо осей координат і кут орієнтації*. Перевагою інтегральних методів є висока точність обчислення

параметрів положення. Однак їх застосування передбачає введення всього зображення в ЕОМ, що вимагає значного часу обчислення.

При використанні контурних методів виділяють контур зображення і по ньому ідентифікують об'єкт. При використанні методу характерних точок робочу зону робота формують таким чином, що об'єкт займає в ній фіксоване число можливих стійких положень. Тоді датчики розташовуються у деяких характерних точках. Якщо кількість цих точок незначна, метод простий і зручний в експлуатації. Зі збільшенням числа фіксованих положень збільшується число датчиків та зростає обсяг обчислень при розпізнаванні об'єкта.

У порівнянні з відеосистемами інших призначень до систем, призначених для використання у складі роботів, висуваються такі жорсткі вимоги, як необхідність роботи в реальному масштабі часу і висока надійність при невисокій вартості. Необхідність роботи у реальному масштабі часу, тобто обробляти та аналізувати одержувані зображення швидко, не викликаючи затримки у діях робота чи іншого технологічного обладнання, накладає певні обмеження на вибір технічних рішень під час створення СТЗ.

3.2.3. Локаційні системи

Локаційні датчики застосовують для вимірювання відстаней до об'єктів, виявлення перешкод, швидкості руху та розмірів об'єктів. Вони необхідні для наведення пристрою захоплення на об'єкти, що рухаються і неорієнтовані об'єкти, запобігання зіткнень мобільних роботів з перешкодами, визначення координат об'єктів і роботів.

Розроблено акустичний, магнітний, оптичний, радіаційний, радіохвильовий, тепловий, електричний, електромагнітний, пневматичний та інші фізичні принципи локації. При пасивній локації локаційний датчик сприймає сигнали, що безпосередньо випромінюються об'єктом. При активній локації локаційний датчик визначає відстань, порівнюючи прямий і відбитий від об'єкта сигнали.

Інформаційні локаційні датчики вимірюють відстань до об'єктів для зміни поведінки робота. Локаційні датчики безпеки призначені для захисту рухомих об'єктів від зіткнень. Розрізняють системи ближньої та дальньої локації. Системи ближньої локації вимірюють відстані в одиницях сантиметрів. Системи дальньої локації вимірюють відстані в декілька сотень метрів.

Найпоширеніший метод ультразвукової локації заснований на здатності пружних хвиль частотою понад 20 кГц відбиватися від межі розділу твердих, рідких або газоподібних середовищ. Він полягає у зіставленні випромінюваних та відбитих від неоднорідностей середовища акустичних імпульсів.

Датчики з імпульсним випромінюванням ультразвукових коливань працюють на частоті 0,05–1 МГц із частотою повторення імпульсів 10–100 Гц, що забезпечує вимірювання відстаней 10–10000 м із похибкою до 5%. Датчики з безперервним випромінюванням ультразвукових коливань виділяють інформацію про відбитий сигнал, закладену в амплітуді, частоті або фазі хвилі.

Для випромінювання та прийому ультразвукових коливань використовують п'єзоелектричні керамічні або магнітострикційні перетворювачі. При збільшенні частоти з 0,02 до 1 МГц зменшується дальність дії та зростає роздільна здатність вимірювань. Акустичні датчики зручні для оптично непрозорих середовищ, забезпечуючи вимірювання відстаней у повітрі до 2 км, у рідині – до 40 м з похибкою 2% від відстані, що вимірюється.

Структура ультразвукового локаційного датчика представлена на рис. 3.18. Його принцип дії полягає в акустичній локації простору. Генератор 1 виробляє пачки ультразвукових імпульсів, які через комутатор 2 надходять у випромінювач-приймач 3, спрямований у бік об'єкта. Потім комутатор перемикає випромінювач-приймач в режим прийому відбитих від поверхні об'єкта імпульсів. Ці імпульси через підсилювач-формувавч 4 надходять у перетворювач 5, де порівнюються з імпульсами, що виробляються генератором 1. Відстань до об'єкта визначають по різниці фаз між прямим і відбитим імпульсами.

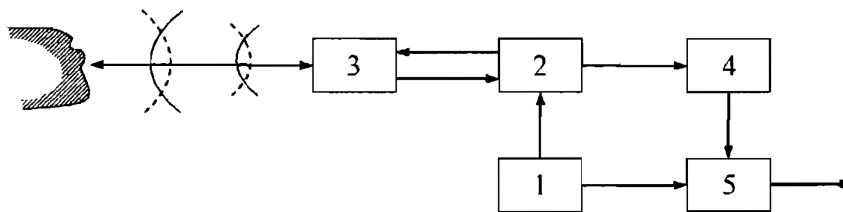


Рисунок 3.18 – Схема ультразвукового сенсорного пристрою

Оптичний метод локації заснований на ефекті відображення світлових імпульсів від поверхні об'єкта. У порівнянні прямого і відбитого імпульсів

вдається досить точно виміряти відстань до об'єкта. На рис. 3.19 наведено схему визначення відстаней оптичним методом.

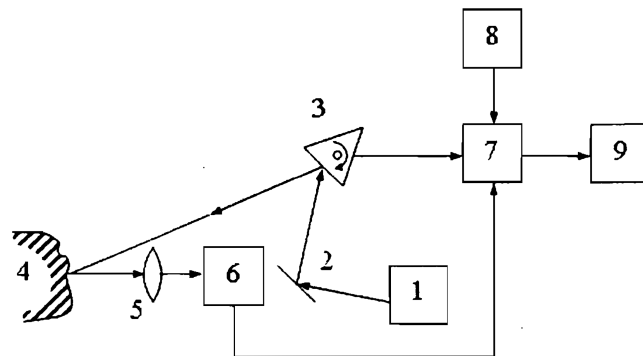


Рисунок 3.19 – Схема світлолокаційного сенсорного пристрою

Світлові імпульси від генератора 1 через плоске дзеркало 2 направляються на тригранну дзеркальну призму 3, що обертається, і відображаються від неї, проходячи по поверхні об'єкта 4. Відбиті від об'єкта імпульси через систему лінз 5 надходять у фотоприймач 6. При проходженні призми 3 через вихідне положення комутатор 7 підключає генератор електричних імпульсів 8 до лічильника імпульсів 9, а при попаданні імпульсу світла на фотоприймач 6 – відключає генератор 8. Число імпульсів, накопичених у лічильнику 9 за час між подачею прямого та прийомом відбитого імпульсів, перераховують у відстань до об'єкта.

За аналогією з акустичним луна-методом можливе визначення відстаней шляхом вимірювання зсуву по фазі між прямим і відбитим оптичними або інфрачервоними імпульсами. Відстань у діапазоні 0,3–4,0 м визначають з точністю 3 см.

Для підвищення надійності та швидкості виконання робочих операцій затискач робота часто оснащують світлолокаційними та ультразвуковими датчиками. Розміщення локаційних датчиків на пристрої захоплення робота показано на рис. 3.20.

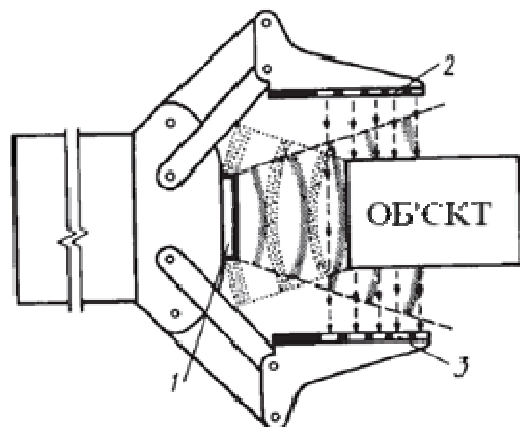


Рисунок 3.20 – Локаційні датчики на пристрої захоплення робота

Ультразвуковий локатор 1 має суміщений випромінювач-приймач ультразвуку, що дозволяє зменшити його розміри і розмістити між губками.

Вимірювання відстані до об'єкта маніпулювання необхідно у багатьох випадках, коли область його можливого розташування по відношенню до поздовжньої осі пристрою захоплення може бути досить широкою, а вимоги до допустимої похибки фіксації об'єкта в кліщах жорсткі. Оптичний локаційний датчик складається з пар інфрачервоний світлодіод 2 – фотодіод 3, що розташовуються на протилежних губках кліщів.

У цьому випадку положення об'єкта маніпулювання по відношенню до робота грубо оцінюється за кількістю затінених фотоприймачів.

3.2.4. Силомоментні системи

Силомоментні системи зчутливлення – це сенсорні пристрої, що забезпечують вимірювання компонент вектору сили і вектору моменту сил, які розвиваються роботом у процесі взаємодії з виробом у проєкції на деяку систему координат.

Найбільшого поширення у робототехніці набули силомоментні тензорезисторні датчики. Вони являють собою тензоопір, що наклеєний на пружні елементи конструкції руки та об'єднані за мостовою схемою.

Силомоментний сенсор (рис. 3.21) складається з наступних частин:

1. Механічна частина, що є сукупністю пружних елементів з розміщеними на них тензоперетворювачами (тензорезисторами). Тензоперетворювачі формують електричний сигнал, пропорційний до деформації пружного елемента, що виникає внаслідок складного силового навантаження маніпулятора.

2. Підсилювальні та комутуючі пристрої.

3. Пристрій для обчислення величин проєкції вектору сили та вектору моменту сили.

Як обчислювальний пристрій використовується або спеціальний мікропроцесор, вбудований в силомоментну систему, або мікроЕОМ керуючого пристрою робота. Аналогова частина силомоментної системи, що формує сукупність електричних сигналів, величина яких пропорційна деформаціям конструкції, сполучається з цифровим обчислювальним пристроєм за допомогою аналого-цифрового перетворювача.

Найчастіше силомоментні датчики встановлюються між останньою ланкою робота і його пристроєм захоплення. У цьому випадку компоненти

силового вектору вимірюються в проєкції на пов'язану із затискачем систему координат.

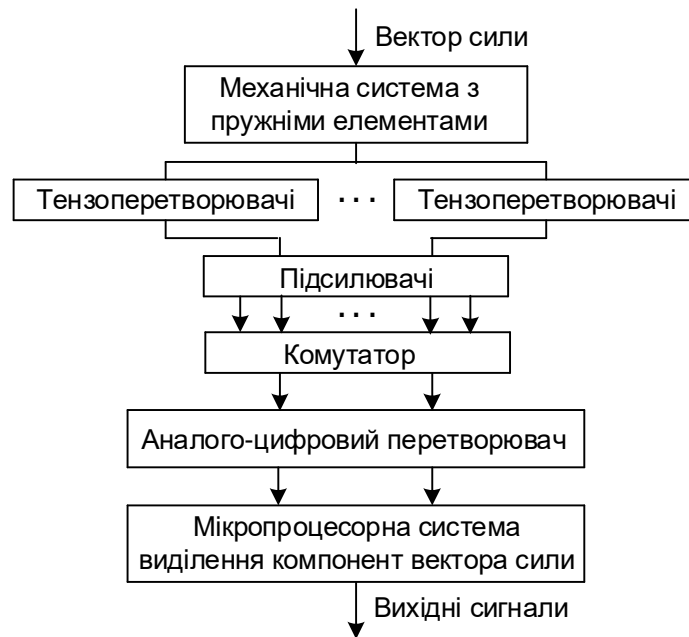


Рисунок 3.21 – Схема силомоментного датчика

На рис. 3.22 наведений силомоментний датчик, який вимірює три компоненти сили. На плоскій хрестоподібній пружній пружині 1 з двох сторін наклеєні чотири тензорезистора 2.

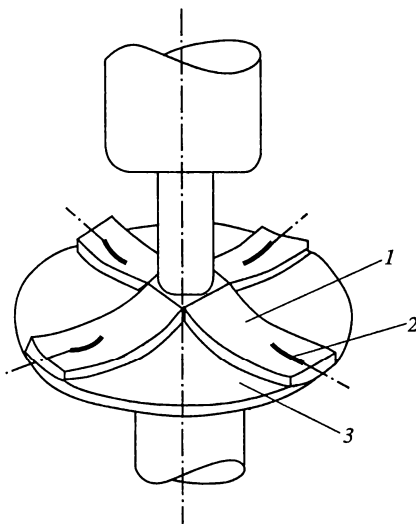


Рисунок 3.22 – Трикомпонентний датчик сили

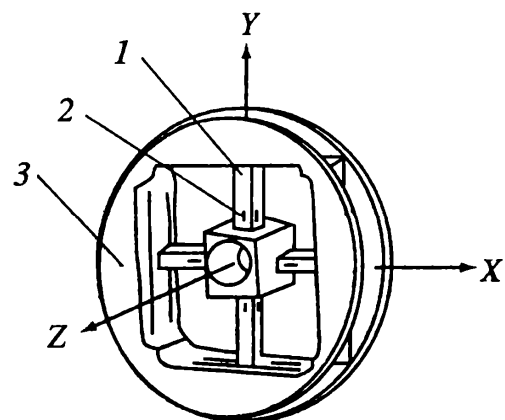


Рисунок 3.23 – Трикомпонентний датчик вимірювання сили

Центр пружини за допомогою опорного елемента 3 прикріплений до руки робота, а зовнішні краї – до круглого фланця на кліщах. Кожна пара тензорезисторів дає сигнал, пропорційний різниці деформацій протилежних кінців пластини. Це дозволяє визначити деформації згину і кручення в з'єднанні ланок.

На рис. 3.23 показаний датчик, зовнішні кінці балок якого закріплені в тонких опорних пластинах, податливих у радіальному напрямку. Пластини відокремлені від фланців прорізами. Тому кожна пружна балка може легко переміщатися в осьовому напрямку, як у поступальній парі, але без тертя ковзання. Сенсор не має складових елементів та виконаний монолітно з дюралюмінію.

Шестикомпонентні датчики мають складнішу конструкцію. Сенсор (рис. 3.24) виконаний у вигляді кільця-основи, з'єднаного чотирма радіальними пружними балками з центральною площадкою. Центральна площадка пов'язана з навантажувальним фланцем аналогічними балками з тензо-метрами, що вимірюють деформацію від сил, які діють у площині, паралельній основі. Сигнали з виходів восьми тензометричних мостів після 1000-кратного підсилення обробляють мікропроцесором. В результаті одержують 6 компонент навантаження.

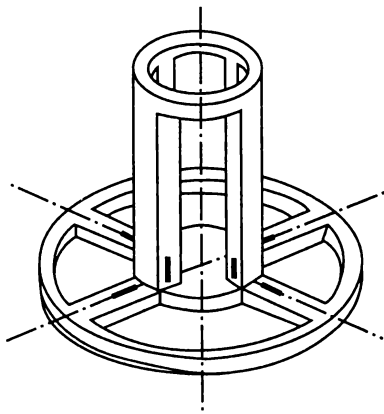


Рисунок 3.24 – Шестикомпонентний силовий сенсор

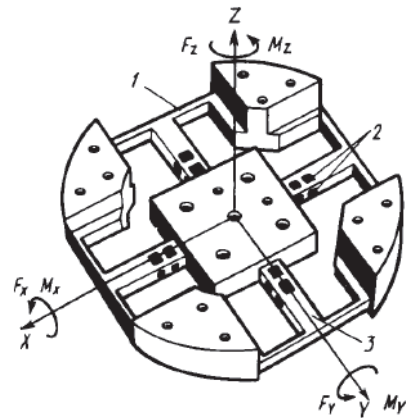


Рисунок 3.25 – Силомоментний датчик

На рис. 3.25 показано устрій 1 механічної частини силомоментного датчика, в якому використовується метод перетворення вектору сил або вектору моменту сил в електричну напругу. Сильовий вплив, прикладений

між центральним фланцем, до якого кріпиться, наприклад, інструмент, і чотирьохсегментним зовнішнім фланцем, що приєднується до останньої ланки робота, деформує хрестоподібно розташовані пружні елементи 3 і наклеєні на них тензорезистори 2. Внаслідок розтягування чи стиснення тензорезисторів змінюється їх опір, що використовується для отримання електричного сигналу, пропорційного діючим компонентам силового впливу.

Вимоги до силомоментних датчиків

1. *Висока жорсткість.* Частота власних коливань механічного пристрою пов'язана з його жорсткістю, отже, висока жорсткість забезпечує швидке демпфування коливань, що виникають при вимірі сил і точність показань на коротких часових інтервалах. Це знижує величину відхилень від дії сил та моментів, що може призвести до помилки позиціювання маніпулятора.

2. *Компактність конструкції.* Це дозволяє полегшити рух маніпулятора в умовах навалу деталей, а також зменшити ймовірність зіткнення датчика з об'єктами, що знаходяться в робочому просторі. Компактний датчик можна розміщувати ближче до розташованого в кліщах технологічного обладнання, завдяки чому зменшується помилка позиціювання обладнання через неадекватність робочих умов обладнання та датчика. Бажано розширити діапазон вимірювання сил та моментів. Цьому сприяє мінімізація відстані між маніпулятором і датчиком, що призводить до зменшення величини важеля сил, що прикладаються до маніпулятора.

3. *Лінійність.* Хороша лінійність вихідного сигналу чутливих елементів від сил і моментів, що прикладаються, дозволяє виділити сили і моменти за допомогою простих матричних операцій. Спрощується процес калібрування датчика сили.

4. *Малі величини гістерезиса та внутрішнього тертя.* Внутрішнє тертя зменшує чутливість вимірювальних елементів. Це також зменшує гістерезисні ефекти при поверненні вимірювального приладу у вихідне положення.

Синомоментні датчики являють собою невеликі, чутливі, легкі і компактні конструкції діаметром 10 см і товщиною 3 см з динамічним діапазоном до 90 кг. Для зменшення гістерезису і збільшення точності вимірювання датчик зазвичай виконують з однієї твердої металевої заготовки (як правило, алюмінієвої). Зовнішній вигляд силомоментних датчиків виробництва компанії FUTEK (США) показаний на рис. 3.26.



а – модель TFF325



б – модель TFF350

Рисунок 3.26 – Силомоментні датчики компанії FUTEK

Похибка вимірювання сил та моментів досягає 5%. Недоліком використання силового датчика затискача, вбудованого в зап'ястя, є те, що він забезпечує вимірювання векторів сили, що розділяються в процесі контакту елементів при складанні тільки в одній точці.

3.2.5. Тактильні системи

Тактильні сенсори відносять до найпростіших чутливих пристроїв. Тактильними називають такі сенсорні системи, які дозволяють роботу зареєструвати факт торкання з об'єктом, визначити положення точок торкання та виміряти контактні сили у кожній з них. Крім отримання інформації про контакт вони застосовуються і для визначення розмірів об'єктів шляхом їх обмацування.

Найчастіше тактильними датчиками покривають внутрішні і зовнішні поверхні губок пристрою захоплення.

Технічні аналоги дотикових сенсорів – тактильні сенсорні системи можуть бути побудовані з використанням різних фізичних ефектів: п'єзoeлектричного, електромагнітного, магнітоелектричного та ін.

Тактильні датчики поділяються на два основні типи: *дискретні* та *аналогові*. Дискретні датчики, як правило, спрацьовують за наявності або відсутності об'єкта, в той час як вихідний сигнал аналогових датчиків пропорційний зусиллю, що прикладається.

Розрізняють тактильні датчики торкання, контактного тиску та прослизання. Датчики торкання відрізняються від датчиків контактного тиску наявністю порога спрацьовування дії заданої сили. Найпростішим датчиком торкання є шляховий перемикач з рухомим щупом, що спрацьовує при зіткненні з об'єктом.

Залежно від типу тактильні сенсори можуть бути технічно реалізовані на кінцевих вимикачах, герметизованих магнітокерованих контактах, п'єзокристалічних перетворювачах, на основі струмопровідної гуми («штучна шкіра») і т.д. Важливою вимогою, що висувається до цих пристроїв, є висока чутливість (спрацьовування при зусиллі в одиниці і десятки грам) при малих габаритах, що поєднується з високою механічною міцністю і надійністю. Для підвищення надійності та швидкості виконання робочих операцій пристрої захоплення робота часто оснащують безконтактним рецепторним полем, наприклад, з використанням світлолокаційних та ультразвукових датчиків. Істотний недолік тактильних сенсорів, як згадувалося, у тому, що вони, зазвичай, накладають обмеження на швидкість роботи.

Дискретні тактильні датчики є контактними приладами типу мікроперемикачів. У найпростішому випадку перемикач розміщено на внутрішній поверхні кожного пальця кліщів маніпулятора (рис. 3.27).

Цей варіант сенсора використовується для визначення наявності деталі між пальцями кліщів. Переміщуючи маніпулятор над об'єктом, і послідовно здійснюючи контактування з його поверхнею, можна також здійснити центрування маніпулятора щодо об'єкта для його захоплення та перенесення.

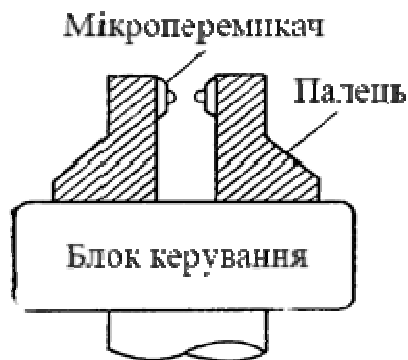


Рисунок 3.27 – Пристрій захоплення з бінарними тактильними датчиками

Шляхом розміщення декількох дискретних тактильних датчиків на внутрішній поверхні кожного пальця кліщів досягається розширення одержуваного обсягу інформації.

Крім того, вони часто встановлюються на зовнішній поверхні кінцевої ланки маніпулятора для отримання керуючих сигналів, що використовуються при формуванні траєкторії руху маніпулятора в робочому просторі («обмацування»).

Аналоговий тактильний датчик є реєструючим приладом, вихідний сигнал якого пропорційний прикладеній силі.

Найпростіший з таких приладів складається з пружного стрижня (рис. 3.28), який механічно пов'язаний з віссю, що обертається. Горизонтальна сила, що діє на стрижень, перетворюється на пропорційний поворот осі. Цей поворот безперервно вимірюється за допомогою потенціо-

метра або кодовим пристроєм з дискретним виходом. За відомої жорсткості пружини сила відповідає зазначеному переміщенню.

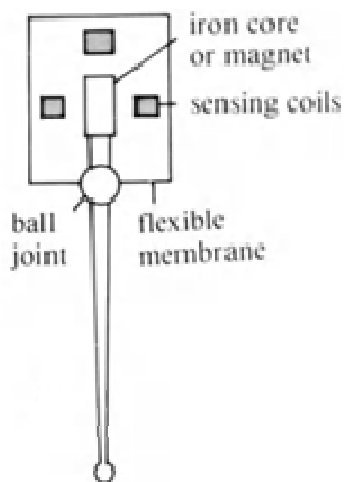


Рисунок 3.28 – Типовий аналоговий тактильний датчик

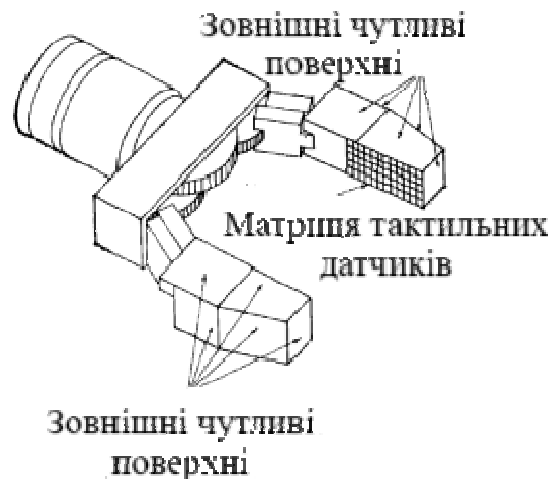


Рисунок 3.29 – Кліщі робота, оснащені матрицями тактильних датчиків

Для збільшення обсягу інформації про процес взаємодії робота з об'єктом на кліщах робота розміщують матриці тактильних датчиків (рис. 3.29), параметри яких змінюються залежно від тиску. В основу роботи матриці покладено ефект зміни під навантаженням електричного опору будь-якого еластичного матеріалу, в якості якого може бути використаний, наприклад, каучук, по всій масі якого в процесі виготовлення розподілені мікрочастинки речовини, що проводить електричний струм (наприклад, «графітові стовпчики»).

У таких пристроях, зазвичай званих «штучною шкірою», тиск від об'єкта викликає відповідні деформації, які вимірюються як опір, що безперервно змінюється. Зміна опору легко перетворюється на електричний сигнал, амплітуда якого пропорційна силі, що діє на відповідну точку поверхні матриці.

Під дією зовнішньої сили каучук прогинається, замикаючи електричний контакт з електродами поперечних рядів. Потім каучук деформується, в результаті чого частинки, що проводять струм, зближуються і починають контактувати один з одним, збільшуючи кількість можливих шляхів для

протікання електричного струму, що підводиться за допомогою металевих електродів.

Тактильна матриця з вуглецевого матеріалу представляє собою два шари вуглецевих волокон діаметром 7–30 мікрон, перпендикулярно накладених один на одного. На перетинах волокон утворюються електричні контакти, опір яких залежить від площі та сили (F) стиснення шарів x і y (рис. 3.30). Так, перетин двох волокон діаметром 0,5 мм в ненавантаженому стані має опір 2 кОм, а при навантаженні 10 Н знижується до 1 кОм.

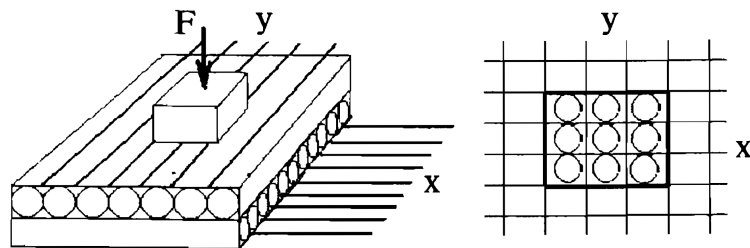


Рисунок 3.30 – Вуглеволоконний датчик торкання:
 x – поздовжні вуглецеві волокна; y – поперечні вуглецеві волокна

Конструктивно вуглеволоконні датчики виготовляють у вигляді склотканини з нитками графіту або матеріалу повстяної структури з ущільнених відрізків вуглецевих волокон. Таким чином, тактильні елементи, чутливі до дотику та тиску з боку стороннього предмета, локалізуються в області перетину поздовжніх і поперечних електродів, а їх загальна кількість дорівнює добутку числа стовпців на число рядків тактильної матриці. У результаті формується тактильний образ, що є ніби зліпком даної деталі, перетвореним у форму електричних сигналів і записаним у пам'ять мікроЕОМ робота.

Аналізуючи отриманий тактильний образ, можна оцінити, чи збігається він з одним з еталонів, занесених у пам'ять ЕОМ у процесі навчання робота розпізнаванню деталей, і, якщо збігається, визначити положення його характерних точок і орієнтацію, наприклад, осей інерції по відношенню до осей матриці.

Розглянуті тактильні датчики вимірюють сили, перпендикулярні до чутливої поверхні датчика. Визначення прослизання шляхом вимірювання тангенціального руху є іншою важливою задачею побудови тактильних

датчиків. Датчик для визначення прослизання включає зубчасту кулю, яка вільно обертається та відхиляє тонкий стрижень, встановлений на осі провідного диска (рис. 3.31).



Рисунок 3.31 – Пристрій для визначення величини і напрямку прослизання

Під диском рівномірно розташовані електричні контакти. Обертання кулі, викликане прослизанням по ньому об'єкта, призводить до вібрації стрижня і диска з частотою, пропорційною швидкості обертання кулі. Від напрямку обертання залежить, який контакт буде задіяний вібруючим диском. Усереднений напрям прослизання визначається по імпульсах у відповідних вихідних електричних контурах.

Тактильні системи поки що не набули значного поширення в промисловій робототехніці. Це пов'язано зі специфікою їх застосування, що полягає в необхідності безпосереднього контакту з деталями, що мають задирки та можуть бути також нагріті до високої температури.

У міру ускладнення завдань, які вирішуються робототехнічними системами, відповідно збільшується і кількість сенсорних систем. При цьому окремі сенсорні системи можуть використовуватися як для вирішення не пов'язаних один з одним автономних завдань, так і комплексно для вирішення загальних завдань. Останній варіант є найбільш складним алгоритмічно, оскільки вимагає системного підходу до спільного функціонування кількох сенсорних систем. Найпростіші приклади такого комплексного підходу – це доповнення системи технічного зору будь-яким далекоміром для отримання з необхідною точністю інформації про дальність або спільне використання одержуваної від відповідних сенсорних систем інформації про положення робочого органу маніпулятора і про зусилля, з яким він впливає на об'єкти зовнішнього середовища. Останнє необхідне при виконанні технологічних операцій, що вимагають позиційно-силового керування маніпулятором (шліфування поверхні і т.п.).

Конструктивно сенсорні пристрої розміщують на робочих органах маніпуляторів (пристрої ближньої дії), на корпусі робота або поза роботом (пристрої дальньої та наддальньої дії). На рис. 3.32 показані приклади кліщів роботів з різними видами і різною кількістю сенсорів:

- 1 – пристрій захоплення із дев'ятьма ультразвуковими датчиками.
- 2 – кліщі з дев'ятьма тактильними і вісьмома світловими локаторами.
- 3 – кліщі з 26 тактильними датчиками і 16 світловими локаторами.
- 4 – пристрій захоплення з 12 ультразвуковими локаторами.

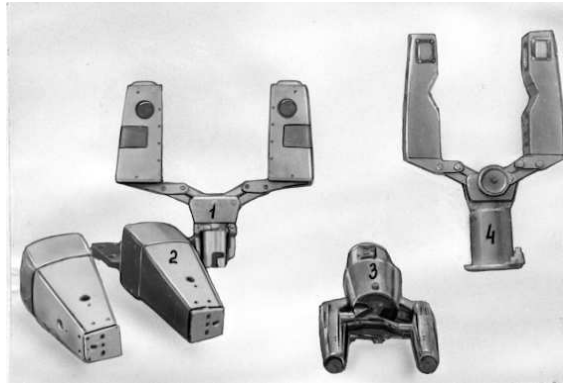


Рисунок 3.32 – Пристрої захоплення роботів з сенсорами

Приклад маніпулятора ПР з сенсорами показаний на рис. 3.33. На рисунку прийняті наступні позначення: 1 – маніпулятор, 2 – силомоментний датчик, 3 – замок, 4 – відеокамера, 5 – трипальцевий затискач.



Рисунок 3.33 – Маніпулятор фірми АВВ з різноманітними сенсорами

3.3. Системи програмного керування роботами

3.3.1. Класифікація та особливості систем керування

У робототехніці існують три завдання керування: керування маніпуляторами, системою пересування та спільне керування групою роботів. Застосовувані для вирішення цих завдань методи керування можна класифікувати таким чином.

1. За ступенем участі людини в процесі керування існують системи: автоматичного, автоматизованого та ручного керування.

2. За типом алгоритму автоматичного керування (способу керування) розрізняють системи:

- *програмного керування*, в яких керування здійснюється за заздалегідь складеною керуючою програмою, що залишається незмінною в процесі реалізації;

- *адаптивного керування*, в яких керування здійснюється в залежності від інформації про поточний стан зовнішнього середовища і самого робота, одержуваної в процесі керування від сенсорних пристроїв;

- *інтелектуального керування*, у яких адаптивні властивості розвинені до рівня інтелектуальної діяльності.

3. За типом руху існують системи керування:

- безперервні (контурні);

- дискретні позиційні або просто позиційні (кроками від точки до точки);

- дискретні циклові (з одним кроком по кожній координаті).

4. За видом керованих змінних розрізняють системи керування положенням (позицією), швидкістю і силою (моментом).

Перелічені способи керування часто застосовуються в комбінації – різні способи за різними координатами або шляхом послідовного переходу від одного способу керування до іншого. Способи керування реалізуються пристроями керування апаратно або програмно.

Пристрій керування робота здійснює автоматичне керування його виконавчими системами – маніпуляційними та пересування, утворюючи в сукупності з ними як об'єктами керування систему автоматичного керування робота. Крім того, пристрій керування роботів часто використовують і для керування різними іншими об'єктами (технологічним обладнанням, транспортними пристроями тощо), які працюють спільно з роботом, утво-

рюючи з ним єдиний технологічний комплекс, а також для зв'язку з людиною-оператором, в тому числі для здійснення процесу керування.

Таким чином, з позиції теорії керування робот може бути представлений як сукупність об'єкта керування у вигляді виконавчих пристроїв та пристрою керування (рис. 3.34).



Рисунок 3.34 – Функціональна схема робота

Пристрої керування можуть бути індивідуальними, що входять до складу кожного робота, і груповими, що керують кількома роботами. Конструктивно індивідуальні пристрої керування виконують зазвичай окремо від механічної частини робота, або, значно рідше, в загальному корпусі.

Переважає більшість роботів має електронні пристрої керування, виконані на мікропроцесорній базі. Загальний вигляд деяких типів електронних пристроїв керування промисловими роботами показано на рис. 3.35–3.36. Вид шафи керування всередині показано на рис. 3.37.



а – виконання у вигляді шафи



б – виконання на панелі

Рисунок 3.35 – Пристрій програмного керування ПР типу IRC5 фірми ABB



Рисунок 3.36 – Шафи двох ПР
FANUC R-2000iB

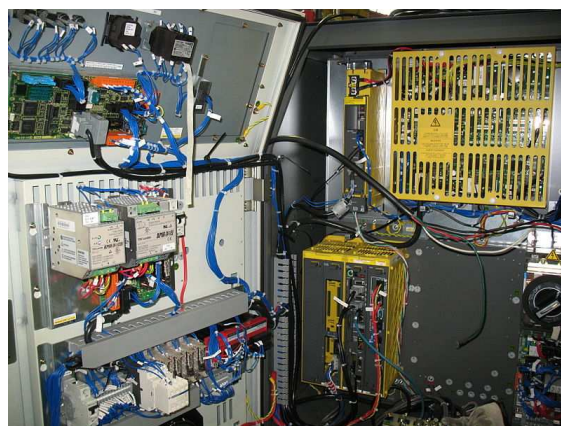


Рисунок 3.37 – Всередині
шафи керування

Розглянемо особливості систем програмного керування роботами. На рис. 3.38 наведено узагальнену схему системи програмного керування. На пульті керування задаються режими роботи, виконується індикація стану робота та його пристрою керування. У запам'ятовувальному пристрої знаходяться робочі програми. Блок керування положенням забезпечує відпрацювання заданих точок і траєкторій приводами робота та іншого обладнання, що працює спільно з ним. Блок керування переходами контролює закінчення відпрацювання попереднього кроку програми, зберігає номер кроку, що відпрацьовується, і видає сигнал на відпрацювання наступного кроку.

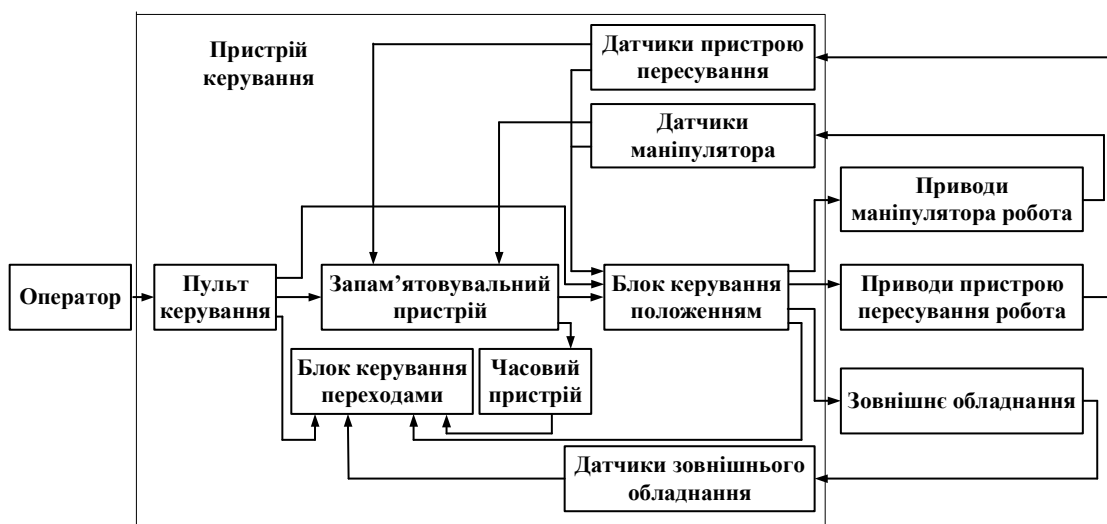


Рисунок 3.38 – Загальна схема системи програмного керування

Часовий пристрій формує необхідні програми витримки часу. Запам'ятовувальний пристрій, блок керування переходами і часовий пристрій в сукупності складають програмно-часовий пристрій, що є основою програмного керування. На рисунку показані зв'язки пристрою керування з оператором, приводами ланок маніпуляторів та пристрою пересування робота, з можливим зовнішнім обладнанням, а також внутрішні зв'язки між окремими блоками пристрою.

Робот має два основні режими функціонування: режим *програмування* та режим *відтворення* програми.

Для робота, що працює за жорсткою програмою, оператор є єдиним джерелом зовнішньої інформації про необхідні дії, яка вводиться у вигляді програми в запам'ятовуючий пристрій. Робот повинен потім відпрацьовувати цю інформацію в автоматичному режимі, не отримуючи ніякої іншої інформації ззовні. У зв'язку з цим перед початком програмування оператор визначає порядок всіх дій робота, складає програму функціонування та вводить її у пам'ять пристрою керування.

Програмування робота, тобто складання та введення керуючої програми для керування маніпулятором робота, здійснюється методом навчання або аналітично з використанням ЕОМ. Програмування методом навчання стосовно до роботів має два варіанти.

У першому варіанті оператор в режимі ручного керування окремими приводами ступенів рухливості послідовно встановлює робочий орган маніпулятора в заздалегідь вибрані точки програмної траєкторії. При цьому в кожній такій точці в пам'ять пристрою керування заносяться значення сигналів з датчиків положення всіх приводів. Після проходження всієї траєкторії в пристрої керування виявляється записаною відповідна керуюча програма. Після пробного її відтворення та за необхідності коригування в окремих точках програма готова до роботи.

Послідовність ручного керування: оператор–пульт керування–блок керування положенням–маніпулятор. Послідовність введення програми: сенсорні пристрої маніпулятора–запам'ятовувальний пристрій. Шлях проходження команди на введення інформації: пульт керування–блок керування переходами–запам'ятовувальний пристрій.

Другий варіант програмування методом навчання полягає в механічному переміщенні робочого органу маніпулятора рукою оператора та за-

пису при цьому показань датчиків положення приводів як у попередньому варіанті. Для виконання такої операції на робочому органі передбачаються спеціальні ручки, конструкція маніпулятора з врівноважуванням його мас та забезпеченням можливості від'єднання приводів від його механічної частини, щоб оператор міг безперешкодно переміщати маніпулятор безпосередньо рукою. Таким чином, цей варіант програмування потребує відповідної зміни конструкції маніпулятора.

Розвитком цього варіанта програмування навчанням стало застосування знімної багатоступеневої задавальної рукоятки, яка розміщується на час навчання на робочому органі маніпулятора. Оператор, зсуваючи рукоятку з нейтралі в потрібному напрямку, здійснює переміщення робочого органу шляхом керування приводами маніпулятора через його пристрій керування за допомогою контактів задавальної рукоятки. Цей варіант програмування, таким чином, застосовується до всіх маніпуляторів, не вимагаючи від'єднання приводів.

Очевидною перевагою програмування методом навчання є його простота, а недолік пов'язаний з тим, що для складання програми використовується сам робот і, отже, на цей час він вимикається з виробничого процесу. Крім того, цей метод не універсальний і тому не завжди застосовний. Наприклад, він не придатний для програмування складальних та інших операцій, що виконуються одночасно декількома маніпуляторами.

Аналітичний спосіб програмування дозволяє синтезувати керуючі програми на ЕОМ без використання робота, з наступним введенням її в запам'ятовуючий пристрій. По суті, у цьому випадку замість робота використовується його математична модель, за допомогою якої здійснюється процес програмування подібно до того, як це робиться на реальному роботі. При цьому для отримання математичної моделі заданої точності необхідно регулярно визначати чи вимірювати відповідні параметри робота. Такий спосіб програмування не вимагає відключення робота на час програмування від технологічного процесу, в якому він задіяний. Тому майбутнє за аналітичним способом програмування. Послідовність проходження інформації: оператор–пульт керування–запам'ятовувальний пристрій.

У режимі відтворення, тобто автоматичної роботи за програмою, сигнали з виходу пристрою керування надходять на приводи маніпуляторів, пристрої пересування робота і зовнішнього обладнання, які під впливом

цих сигналів здійснюють задані програмою рухи. Очевидно, що програмна інформація повинна включати три види інформації:

- *інформацію про положення*, тобто про необхідні позиції для кожного ступеня рухливості;
- *інформацію про послідовність* цих позицій, яка пов'язує їх у загальному русі маніпулятора;
- *інформацію про час*, що визначає темп руху маніпулятора у часі.

Відповідно до цього програмна інформація організована у певну структуру, що містить блоки інформації про положення, команди переходу та часу.

Найпростішою одиницею програмної інформації є число (*команда*) представлене в дискретній чи аналоговій формі, що відповідає одиничній операції, яка виконується роботом (переміщення однієї ланки маніпулятора, відкривання/закривання його пристрою захоплення, витримка часу, видача зовнішньої команди). Залежно від характеру одиничної операції їй відповідає число, що містить від 1-го біта інформації (операції типу «Включити-Вимкнути») до 13-14 біт для операції точного переміщення ланки маніпулятора.

Групі одиничних операцій, що мають закінчений зміст (наприклад, переміщення робочого органу маніпулятора в певну точку в результаті одночасної роботи його ланок), відповідає група чисел, яка об'єднана загальними умовами відтворення, – *кадр*. Кадри можуть об'єднуватися в підпрограми, що відповідають закінченій невеликій послідовності дій робота.

Порядок видачі на відпрацювання чисел, кадрів та підпрограм при відтворенні програми визначається закладеним у пристрій керування принципом відтворення:

- жорстка послідовність кадрів та підпрограм;
- можливість зміни послідовності відтворення за якимись внутрішніми або зовнішніми (стосовно робота) умовами.

Внутрішні умови задаються через пульт керування або записуються в запам'ятовувальний пристрій. Керування за внутрішніми умовами створює додаткові функціональні можливості (наприклад, багаторазова обробка окремих ділянок програми за заданим в лічильнику числом, модифікація окремих команд програми за номером циклу, що відпрацьовується тощо). Робота за внутрішніми умовами теж є роботою за жорстким алгоритмом, так як внутрішні умови, задані оператором, не змінюються в процесі

відпрацювання. Типовим прикладом роботи за внутрішніми умовами є впорядкована розкладка предметів у тару, коли необхідно рахувати кількість покладених предметів і від циклу до циклу змінювати координати чергового осередка тари.

Інформація про зовнішні умови надходить у пристрій керування робота у вигляді сигналів про перебіг протікання будь-якого зовнішнього процесу. Це дозволяє роботу в процесі роботи переходити на іншу програму, відпрацьовувати або пропускати окремі ділянки програми, змінювати окремі команди програми, переходити на роботу за внутрішніми умовами і т. п. Це дозволяє гнучко реагувати на ті зміни, можливість яких була заздалегідь передбачена при програмуванні робота. Керування за невеликою кількістю (5-10) сигналів з внутрішніми і зовнішніми умовами передбачається майже у всіх сучасних пристроях керування роботами загальнопромислового застосування. Сигнали про внутрішні та зовнішні умови надходять у блок керування переходами пристрою керування (рис. 3.38) і змінюють номер наступної команди, що відпрацьовується.

Устрій блоку керування переходами визначається прийнятим принципом вироблення сигналу про кінець відпрацювання чергового кадру і готовності до відпрацювання наступного. Існують три такі принципи: за сигналами датчиків, часовий та комбінований.

У першому випадку виконання одиничних операцій попереднього кроку підтверджується спрацьовуванням датчиків або сигналом з блоку керування положенням, у другому випадку сигнал про перехід до наступного кроку виробляється часовим пристроєм після закінчення певного проміжку часу. У третьому випадку поперемінно (для різних кроків) використовуються обидва способи.

При часовому принципі вироблення сигналу датчиків про перехід не потрібно. Сигнали переходу програми виробляються або часовим пристроєм, що запускається на початку кожного кроку, або тактуючим пристроєм, що запускається на початку циклу відпрацювання. Фактичне підтвердження відпрацювання у разі відсутнє. Зазвичай блок керування переходами включає лічильник кроків, комутатор переходів у програмі та схеми збігу сигналів відпрацювання.

Розглянемо особливості систем програмного керування роботами, що реалізують різні методи керування.

3.3.2. Дискретні циклові системи програмного керування

Найпоширеніший тип роботів із цикловим програмним керуванням – це пневматичні промислові роботи.

Пристрій керування робота з цикловим керуванням реалізує загально-системний рівень керування, завдання якого здійснювати координацію роботи приводів. Координація полягає у встановленні певної послідовності включення окремих приводів та необхідних часових інтервалів між включеннями. У результаті за програмою, що задається зазвичай від мікроконтролера, можна змінювати послідовність виходу в різні, але жорстко задані точки простору (змінювати цикл рухів). Значення переміщень (координат позицій) і швидкостей за ступенями рухливості налаштовують щоразу під час впровадження робота у той чи інший технологічний процес. Переміщення за ступенями рухливості налаштовують жорсткими упорами, а швидкості відповідним регулюванням приводів.

Таке найпростіше керування застосовується в окремих ступенях рухливості в електромеханічних та гідравлічних роботах і дуже часто у пристроях захоплення.

Цикловий режим програмного керування застосовується, як правило, у тих випадках, коли по кожному з n ступенів рухливості робота з узагальненими координатами q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) можливе позиціонування лише у двох крайніх точках q_{ip} , q_{ik} . Індекси «п» та «к» означають початкове та кінцеве положення відповідних рухомих елементів (рис. 3.39).

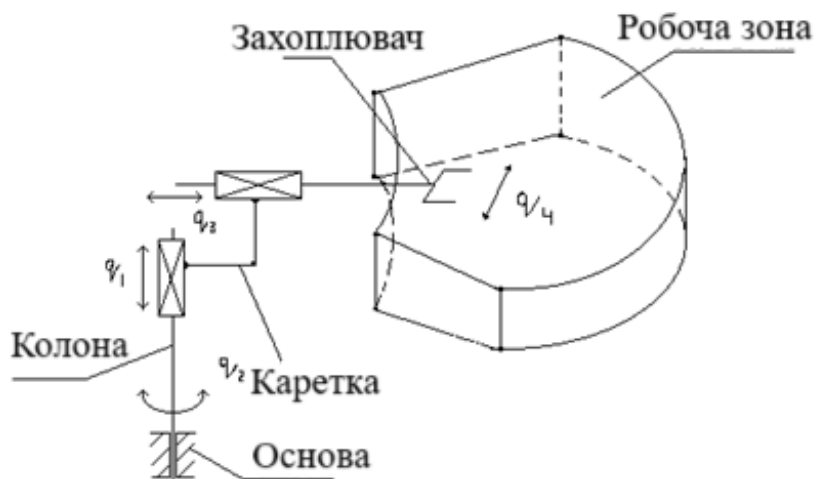


Рисунок 3.39 – Робот з цикловою системою програмного керування

Для переведення i -ї ланки в стан q_{in} необхідно на її привод подати нульовий керуючий сигнал $U_i = 0$. Для переведення цієї ланки в стан q_{ik} на той самий привод необхідно подати сигнал $U_i = 1$. Причому при переході робота в новий стан при незмінному керуючому векторі $U = (U_1, \dots, U_n)$ цей стан залишається постійним.

Програмування робота полягає у встановленні на кожному приводі упорів, які визначають величину переміщення за відповідним ступенем рухливості, швидкості цих переміщень, послідовності включень приводів та можливі затримки часу між цими включеннями. Всі ці операції, крім установки упорів, проводяться за допомогою перемикачів або інших органів на пульті пристрою керування. Внаслідок простоти циклового керування для роботів з таким керуванням, як правило, застосовують пристрої групового керування.

При організації циклового керування роботом можуть бути використані досить прості автомати, побудовані на елементах цифрової обчислювальної техніки. Такі автомати включають: пам'ять послідовності кодів необхідних станів робота, пам'ять послідовності часових інтервалів, тобто тих інтервалів часу, в яких керуючі вектори залишаються незмінними, часовий пристрій та блок керування переходами.

В якості пристроїв, призначених для автоматизації виробництва, в системах керування роботами використовуються програмовні логічні контролери (ПЛК). У промислових роботах досить нескладно за допомогою ПЛК організувати роботу робота з цикловою системою керування, здійснювати контроль за роботою та індикацію.

ПЛК широко застосовуються для керування промисловими роботами, як в автономному режимі, так і в складі роботизованих комплексів. ПЛК є ідеальним засобом керування роботизованим виробничим модулем. У цьому випадку в функцію ПЛК входить синхронізація координатних переміщень робочих органів робота з технологічним і допоміжним обладнанням, що обслуговуються. Найбільш часто ПЛК використовуються для керування пневматичними роботами з цикловою системою керування.

Структурна схема програмованого мікроконтролера, призначеного для циклового керування промисловими роботами, наведена на рис. 3.40.

Модуль процесора здійснює збір, цифрову обробку та виведення інформації відповідно до виконавчої програми, записаної в модуль перепро-

грамовної постійної пам'яті. Призначення виконавчої програми – перетворення інструкцій, введених оператором за допомогою пульта керування, в послідовність кодів машинної мови мікропроцесора, що реалізують ці інструкції. Керуюча програма розміщується в модулі запам'ятовувальних пристроїв. Вона записується користувачем у кодах команд вхідної мови мікроконтролера і забезпечує виконання заданого алгоритму керування зовнішнім обладнанням.

Для введення програми використовують пульт керування, портативний програматор або персональний комп'ютер зі спеціальним програмним забезпеченням. Ускладнення програм керування призвело до відмови від застосування програматорів, а різноманіття контролерів з власними мовами програмування до появи п'яти стандартних мов програмування: мови сходових діаграм, функціонально-блочних діаграм, списку інструкцій, діаграм послідовних функцій, структурованого тексту.

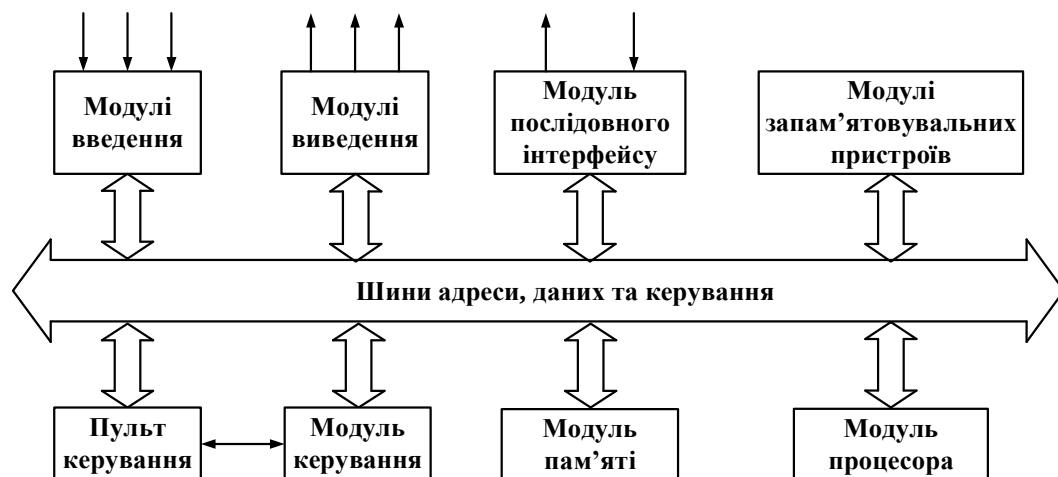


Рисунок 3.40 – Структурна схема мікроконтролера для циклового керування

Пульт керування та модуль керування складають технічні засоби спілкування оператора з мікроконтролером. Модулі введення та виведення призначені для зв'язку мікроконтролера з виконавчими пристроями маніпулятора робота та з технологічним обладнанням. Модуль послідовного інтерфейсу служить для обміну інформацією між мікроконтролером і керуючим обчислювальним комплексом верхнього рівня.

Мікроконтролер реалізує режими роботи циклового робота:

- автоматичне керування за програмою, записаною в пам'ять робочої програми;
- ручне керування за командами, поданими з пульта керування;
- покрокове виконання програми;
- програмування (запис команд в пам'ять робочих програм);
- перегляд програми (виведення на індикацію вмісту пам'яті робочих програм).

3.3.3. Системи позиційного програмного керування

Типові приклади роботів з дискретним позиційним керуванням – це промислові роботи для точкового зварювання (рис. 3.41), складання, а також обслуговування металорізальних верстатів та іншого технологічного обладнання. У таких роботів відповідно до програми керування можуть змінюватися не тільки цикл рухів, а й значення переміщень за ступенями рухливості.

Ці роботи мають велику кількість (до кількох тисяч) точок позиціювання робочого органу маніпулятора завдяки використанню позиційних приводів. Однак на відміну від циклових приводів тут точність позиціювання, а також стійкість та якість перехідного процесу забезпечується не упорами, а замкненою зворотними зв'язками системою керування приводами (рис. 3.1). Виняток становлять розімкнені позиційні приводи на крокових двигунах, які мають невелике поширення в робототехніці.

Принциповою відмінністю роботів з позиційним керуванням від роботів з цикловим керуванням є необхідність забезпечення заданої якості позиціювання за рахунок реалізації закону керування.

При позиційному керуванні забезпечується рух ланки маніпулятора через задані точки між початковою та кінцевою позиціями. Керування рухом ланки між сусідніми точками не здійснюється. Для керування необ-



Рисунок 3.41 – ПР для контактного зварювання R2000i (Fanuc, Японія)

хідні розрахунок і послідовна видача команд для проходження ланки через задані точки програмної траєкторії $q(t)$ в моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_n$ і перевірка відповідності фактичного та заданого положень ланок. Розрахунок програмної траєкторії зводиться до визначення тривалості T керування та її розбиття на відрізки; сигнали керування формують для кожного відрізка.

Керуюча програма містить інформацію про послідовність кроків, положення ланок і час виконання кроків програми. Застосовують послідовне, безкоординатне та термінально-координатне керування переміщенням ланок через задані точки.

При послідовному керуванні рухається одна ланка, інші залишаються нерухомими. При безкоординатному керуванні всі ланки рухаються своїми траєкторіями одночасно. При термінально-координатному керуванні ланки починають і припиняють рух одночасно.

При безкоординатному і термінально-координатному керуванні необхідно враховувати взаємовплив приводів (вплив приводів ступенів рухливості один на одного при одночасному сумісному переміщенні).

У позиційних системах взаємовплив приводів позначається на всіх показниках якості регулювання, включаючи точність. Позиційні системи більш чутливі до нестаціонарності параметрів та впливу зовнішніх збурень, ніж циклові, оскільки останні є розімкненими релейними системами.

Процес дискретного позиційного програмного керування маніпулятором має такий вигляд. У пристрої керування зазвичай на програмоносії зберігається керуюча програма, яка складається з програм для окремих приводів.

Ці програми являють собою послідовність чисельних значень координат на кожному кроці позиціювання приводу цього ступеня рухливості. Як правило, відпрацювання керуючої програми полягає в одночасній подачі на всі приводи значень чергового кроку та відпрацювання приводами цього завдання. Після того, як всі приводи зупиняться, робочий орган маніпулятора займе відповідну чергову позицію у просторі та орієнтацію. Потім керуюча програма видає команду виконання приводами наступного кроку тощо. В результаті робочий орган маніпулятора переміщатиметься кроками по запланованій дискретній траєкторії, зупиняючись після кожного кроку.

У найпростіших позиційних системах з невеликим числом точок позиціювання інформація про положення, послідовність і час запам'ятовується окремо, як і в циклових системах. Однак у системах з великою кількістю то-

чок позиціювання всі ці три види інформації об'єднуються і запам'ятовуються в одному блоці.

Позиційні системи керування роботами відносяться до загального класу систем автоматичного керування. Основними технічними характеристиками систем керування, що відносяться до даного класу, є: кількість керованих координат 3–8, обсяг пам'яті програм (кадрів) 100-2500, число технологічних команд обміну інформацією із зовнішнім обладнанням 15–128, тип приводу слідкувальний або дискретний. За способом обробки інформації (послідовна або паралельна) позиційні системи будуються за структурою з центральним обчислювачем і з децентралізованою структурою, коли обчислювач входить до складу кожного координатного блоку.

Приклад системи з централізованою структурою показаний на рис. 3.42. Пристрій керування має центральний обчислювач, в якому послідовно обробляється вся інформація. Обмін інформацією між блоками здійснюється через шини *A*, *B* і *C*.

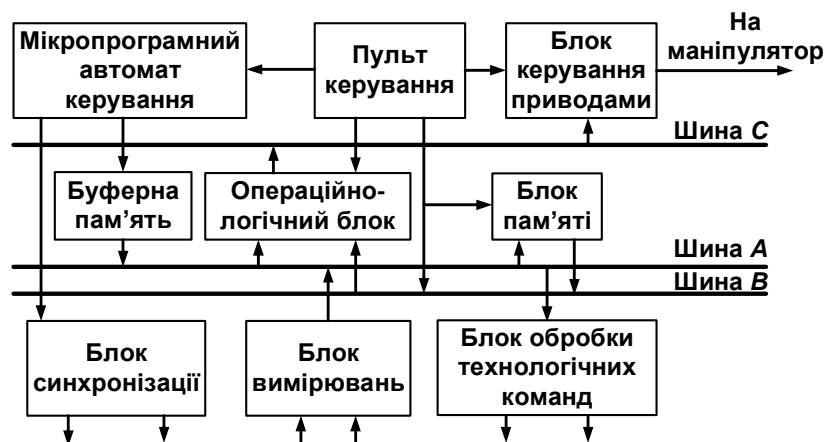


Рисунок 3.42 – Схема централізованої структури позиційної системи програмного керування

Пристрій керування побудований за принципом синхронного мікропрограмного автомата (МПА) з кінцевим числом станів і жорстким циклом керування. МПА призначений для формування керуючих мікрокоманд відповідно до алгоритму функціонування позиційного пристрою. Реалізація функцій центрального керування та логічної обробки інформації здійснюється операційно-логічним блоком, який разом з МПА являє собою спеціалізований обчислювач.

Програми керування розміщуються в блоці пам'яті, який здійснює прийом, зберігання та видачу за запитом з МПА необхідної програми. Інформація формується за зонами. В одній зоні може бути записано кілька програм. Зв'язок між зонами здійснюється за допомогою команд умовного чи безумовного переходів.

У загальному випадку функціональний склад керуючої програми позиційного маніпулятора може бути записаний виразом:

$$\Phi = (X + Y + Z + \dots + W + F + N + R + t + p) n,$$

де $X, Y, Z, \dots, W$ – масив інформації, що відповідає величинам геометричних переміщень за ступенями рухливості, F – швидкість переміщень; N – технологічні команди; R – інформація про послідовність виконання команд; t – часова затримка; p – логічні команди умов переходу; n – кількість кадрів програми.

У режимі запису і читання інформації обмін відбувається через буферний запам'ятовуючий пристрій, який призначений для оперативного зберігання робочої програми, розміщеної в одній зоні і використовується безпосередньо для автоматичного керування роботом.

Блок керування приводом складається із уніфікованих цифро-аналогових перетворювачів. Максимальний вихідний сигнал – 10 В.

Блок вимірювання перетворює сигнали датчиків положення ланок маніпулятора в цифровий код і містить до восьми однакових каналів вимірювання. Розрядність перетворення – 15.

Блок відпрацювання технологічних команд видає на технологічне обладнання та маніпулятор команди з супровідними ознаками об'єктів (вихід технологічних команд релейний) та приймає від обладнання та маніпулятора сигнали про відпрацювання команд.

Блок синхронізації виробляє послідовності імпульсів, що синхронізують роботу пристрою, а також частоти, необхідні для роботи вимірювальної системи та формування витримок часу.

Пульт керування призначений для включення пристрою, завдання режимів роботи, організації керування в режимах «Навчання», «Пошук кадру», «Програма», а також організації ручного введення інформації та цифрової індикації. Ручне керування маніпулятором здійснюється з виносного пульта керування.

Використання спеціалізованих контролерів і мікропроцесорів у структурі позиційних систем керування робить їх більш гнучкими і забезпечує

можливість програмування алгоритмів керування шляхом зміни складу програмного забезпечення.

3.3.4. Системи безперервного програмного керування

Типові роботи з безперервним, тобто контурним керуванням – це промислові роботи для дугового зварювання та різання, для фарбування та нанесення покриттів, для абразивної зачистки облою, а також для складних складальних операцій.

Приклад такого робота показано на рис. 3.43. Їхня головна відмінність від роботів з дискретним позиційним керуванням полягає в безперервному русі робочого органу маніпулятора по програмній траєкторії. Сама програмна траєкторія при цьому може задаватися у вигляді дискретної функції часу, тобто послідовності точок, але робочий орган проходить ці точки без зупинок, на відміну від позиційного керування.

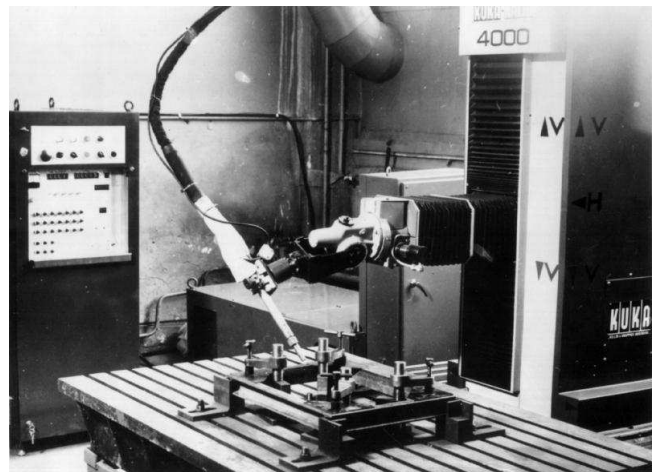


Рисунок 3.43 – ПР для дугового зварювання

З цього випливає принципова відмінність систем контурного керування від позиційних систем щодо динаміки. Якщо в дискретних позиційних системах істотна лише статична точність у точках позиціонування, то у безперервних потрібна динамічна точність руху по заданій траєкторії. Відповідно, якщо в дискретних позиційних системах стійкість і якість перехідних процесів оцінюються тільки в цих точках, то при контурному керуванні необхідно забезпечити ці вимоги також безперервно по всій траєкторії руху. Це вимагає від приводів більшої швидкодії.

Ці особливості систем контурного керування призводять до принципової відмінності їх програмування в порівнянні з дискретними позиційними системами. У дискретних позиційних системах керуюча програма, яка відпрацьовується приводами, – це програмна послідовність точок позиціонування, у яких має відбуватися зупинка приводів. Для безперервних систем ке-

рування програмна траєкторія та керуюча програма, що її реалізує, виявляються різними поняттями, які можуть збігатися лише у окремих випадках.

Якщо, наприклад, записати керуючу програму для маніпулятора з безперервним керуванням методом навчання, переміщуючи його робочий орган необхідною програмною траєкторією на невеликій швидкості, а потім відтворити цю програму на значно більшій швидкості, що визначається вимогами технологічного процесу, то через неминуче динамічне запізнення робочий орган на всіх вигинах реальної траєкторії відхилятиметься від програмної траєкторії. Ця динамічна помилка зростатиме зі збільшенням швидкості руху. Тому керуючі програми при такому методі програмування навчанням необхідно коригувати та відпрацьовувати на заданій реальній швидкості, з якою програмна траєкторія має відтворюватися. Те саме стосується й аналітичного програмування: тут потрібна динамічна математична модель робота, тоді як при дискретному позиційному керуванні потрібна кінематична модель.

Пристрої контурного керування призначені для здійснення руху пристрою захоплення по безперервній траєкторії. Існують два основних способи побудови пристроїв контурного керування роботами.

Перший спосіб заснований на запису в пам'ять системи керування інформації про зміну положення кожного ступеня рухливості у часі, тобто у вигляді безперервної траєкторії для відпрацювання приводом.

Другий спосіб полягає в записі кінцевого числа координат точок, що належать бажаній траєкторії руху пристрою захоплення робота, з подальшою генерацією безперервної траєкторії, що з'єднує ці точки шляхом виконання інтерполяції за заданим законом.

Якщо в першому випадку в керуючому пристрої відсутні обчислювальні блоки, але потрібно запам'ятовувачий пристрій з певним обсягом пам'яті, то в другому – обсяг пам'яті невеликий, але в пристрій керування доводиться включати блок інтерполяції.

Характерною особливістю робіт з контурною системою керування є наявність слідкувального приводу в кожному ступені рухливості маніпулятора. У деяких електромеханічних роботах з контурною системою керування, коли привод за кожним ступенем рухливості будується за принципом дії слідкувальної системи, ставляться аналогові датчики зворотного зв'язку (наприклад, потенціометр і тахогенератор). Внаслідок цього доводиться

вводити в систему аналого-цифрові перетворювачі. Значно більша ефективність системи за швидкодією, точності і плавності рухів маніпулятора досягається при встановленні імпульсних або кодових датчиків зворотного зв'язку. Тоді з керуванням від ЕОМ виходить суто цифрова система керування приводами. Системи контурного керування можуть також функціонувати в режимах позиційного керування.

Пристрій контурного програмного керування «Робоконт». Структурна схема одного з перших мікропроцесорних пристроїв контурного програмного керування маніпуляторами промислових роботів «Робоконт» представлена на рис. 3.44. Пристрій побудований на базі мікропроцесора K1810BM86 і включає наступні основні модулі:

- центральний процесор, що виконує функції обробки інформації та керування;
- системна магістраль, що призначена для обміну інформацією між модулями системи;

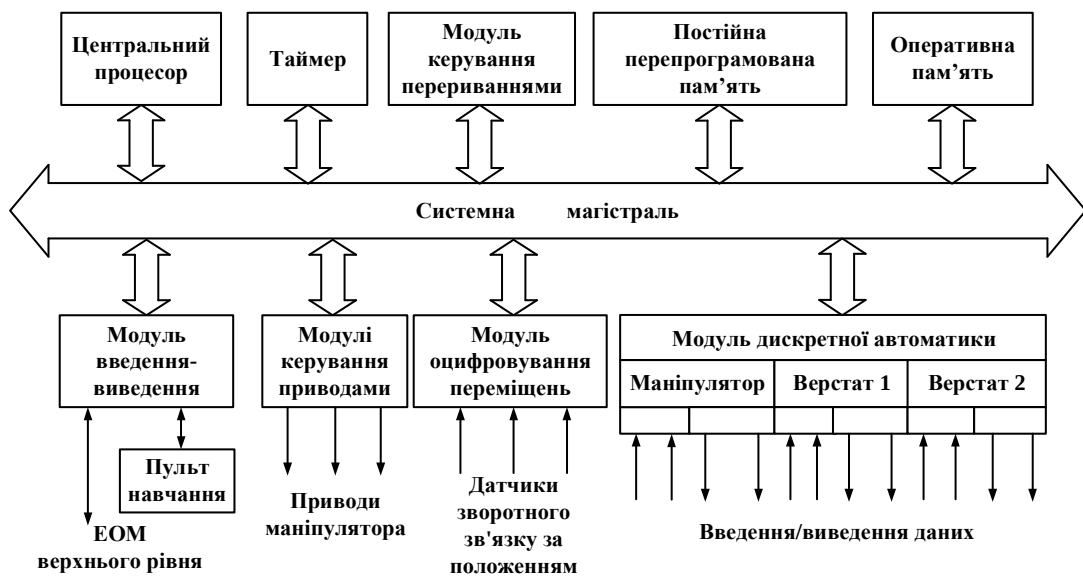


Рисунок 3.44 – Структурна схема контурного пристрою керування «Робоконт»

- таймер, який служить для синхронізації процесів, що протікають у системі керування;
- модуль керування перериваннями, що працює з урахуванням пріоритетів функціонування різних модулів системи;

- пам'ять оперативна та постійна перепрограмована;
- модуль введення–виведення забезпечує зв'язок з ЕОМ верхнього рівня та з пультом навчання промислового робота;
- модуль керування приводами;
- модуль оцифровування переміщень необхідний для узгодження вихідних сигналів датчиків зворотного зв'язку із системною магістраллю;
- модуль дискретної автоматики забезпечує зв'язок системи керування із зовнішнім технологічним обладнанням.

Програмне забезпечення системи керування виконує такі функції:

- діагностика та налаштування параметрів;
- навчання робота та редагування робочої програми;
- виконання робочої програми;
- зв'язок із ЕОМ верхнього рівня.

Основним засобом взаємодії людини-оператора з роботом є переносний пульт оператора, за допомогою якого можна здійснювати навчання, ручне керування роботом, отримувати інформацію про його стан, конфігурацію системи керування і т.д.

У режимі діагностики та налаштування параметрів користувач має можливість визначити працездатність всіх блоків, що входять до складу системи, а також змінити деякі параметри (коефіцієнти, що задають налаштування регуляторів приводів, часові параметри тощо).

У режимі навчання оператор формує робочу програму, яка є сукупністю команд і даних.

Режим виконання призначений для запуску однієї з сформованих оператором робочих програм. Виконання програм може протікати в автоматичному режимі або в покроковому (налагоджувальному) режимі. Крім того, можна імітувати рух маніпулятора і технологічного обладнання.

Режим зв'язку з ЕОМ верхнього рівня дозволяє включити робот до складу гнучкого виробничого модуля.

Пристрій контурного програмного керування KR C4. Одним з найбільш поширених в даний час є універсальний пристрій керування промисловими роботами фірми KUKA типу KR C4 (Kuka Robot Control). Пристрій реалізовано в п'яти варіантах шаф, призначених для різних областей застосування. На рис. 3.45 показаний зовнішній вигляд двох основних варіантів конструкції шафи.

Апаратна та програмна архітектура пристрою керування KR C4 включає керування роботом (Robot Control), керування за допомогою програмовних логічних контролерів – (PLC Control), керування рухом (Motion Control) наприклад, KUKA.CNC та керування безпекою (Safety Control). Вперше Robot Control і Motion Control інтерактивно інтегровані з процесами керування для ПЛК, ЧПК та безпеки.



а – шафа керування типу «компакт»



б – стандартна шафа керування

Рисунок 3.45 – Конструкція пристрою керування KR C4

Всі виділені процеси керування взаємодіють один з одним у реальному часі і без обмежень інтерфейсу. При цьому всі контролери використовують загальну базу даних (рис. 3.46). Пристрій керування KR C4 відповідає всім міжнародним стандартам ISO і США та підтримує інтерфейс користувача для роботи та програмування 25 мовами світу.

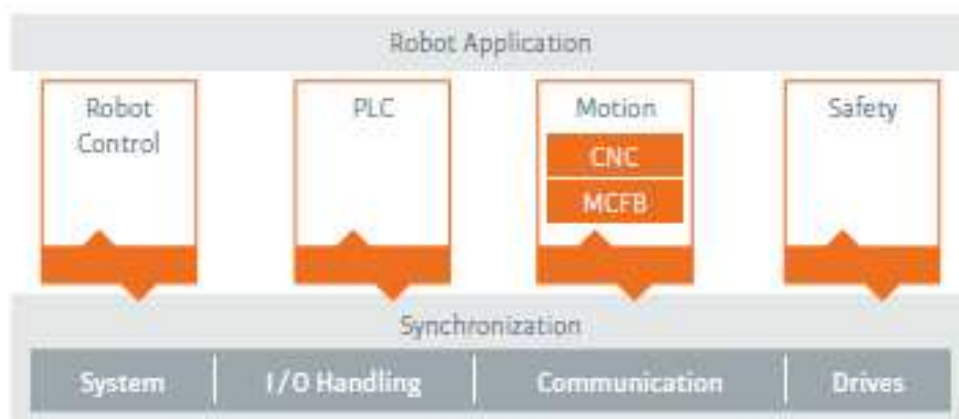


Рисунок 3.46 – Модулі пристрою керування KR C4

Для зв'язку з оператором призначено пульт KUKA smartPAD (рис. 3.47). Пульт має вбудований USB-порт для підключення до пристрою KR C4. Пульт містить 6D мишу для завдання руху в декартових координатах та переорієнтації робота на три або шість ступенів руху. Крім того, пульт містить поворотні перемикачі для прямого керування по восьми осях. Контекстно-залежний інтерфейс відображає лише ті параметри, які є актуальними в даний момент.



Рисунок 3.47 – Пульт KUKA smartPAD

KR C4 пропонує опції програмування для кожної групи операторів:

- просте шаблонне програмування з використанням вбудованих форм для нефахівців;
- комплексне програмування з використанням KUKA.KRL;
- високодиференційоване експертне програмування.

KUKA.KRL (KUKA Robot Language) є стандартною мовою програмування. Вона підходить для широкого спектру можливостей, що надаються робототехнікою KUKA.

Пульт керування KUKA smartPAD забезпечує зручну роботу з програмним забезпеченням. Інтуїтивно зрозумілий пульт KUKA smartPAD може використовуватися для створення складних і настроюваних програм для керування роботом у широкому діапазоні програм – як онлайн, так і в автономному режимі.

Опція PLC забезпечує повний доступ до всієї системи введення-виведення контролера та високу продуктивність. Це дозволяє керувати пристроями введення-виведення окремого робота, РТК або виконувати групове керування роботами.

Контролер безпеки інтегрований у систему керування без використання спеціального обладнання. Функції безпеки та орієнтований на безпеку зв'язок реалізуються через протоколи на основі Ethernet. Концепція безпеки використовує багатоядерну технологію та забезпечує двоканальну роботу, необхідну для реалізації програм безпеки.

Системне програмне забезпечення KUKA.CNC встановлює прямий зв'язок між ЧПК та роботом, завдяки якому керування роботом здійснюється за допомогою стандартних інструментів ЧПК. Основні функції KUKA.CNC:

- програмування роботів на базі ЧПК;
- корекція на радіус інструменту в системі керування;
- поліпшена траєкторія рухів робота;
- автономне програмування за допомогою CAD/CAM систем.

Програма KUKA.CNC пропонує для реалізації програм керування ядро системи ЧПК, повністю інтегроване в систему KR C4. Керуючі програми можна редагувати і виконувати з використанням робота без попереднього перетворення на мову KRL. У програмі KUKA.CNC разом з ядром ЧПК пропонується спеціальний інтерфейс користувача власної розробки. На пульті керування smartPAD, поряд з інтерфейсом smartHMI (система керування KRL), доступний максимально зручний для користувача графічний інтерфейс CNC-HMI (система ЧПК).

Інтерфейс користувача KUKA.CNC містить стандартні елементи керування системи ЧПК. Це дозволяє швидше адаптуватися операторам, які мають досвід роботи з верстатами ЧПК, до керування роботами з ЧПК. Система ЧПК може виконувати програми, які мають дуже велику кількість блоків (кадрів). Успішно виконуються навіть програми, що містять мільйон точок на траєкторії. Невеликі проміжки між окремими точками траєкторії у поєднанні з плануванням траєкторії на підставі попереднього аналізу 150 точок помітно покращують точність та характеристики рухів

Роботи KUKA виконують завдання на обробку, як і металообробні верстати, – вони підтримують програмування з використанням CNC-коду.

Системні вимоги для KUKA.CNC:

- програмне забезпечення KUKA.SystemSoftware;
- KUKA.WorkVisual.

Системне програмне забезпечення KUKA.SystemSoftware – операційна система та центральний елемент усієї системи керування. У ній закладені всі базові функції, які потрібні для роботи роботизованої системи. Наприклад, керування даними та користувачами, планування траєкторії або керування введенням-виведенням. Крім того, в нього інтегровані додаткові функції, які забезпечують широкі можливості при програмуванні робота.

Зручна для користувача структура програмного забезпечення KUKA.SystemSoftware на базі Windows забезпечує просте керування. Крім

того, обсяг функцій ПЗ у будь-який час може бути розширений завдяки сумісним інтерфейсам. Наприклад, можна настроїти або доповнити систему відповідно до індивідуальних вимог, встановивши додаткові пакети ПЗ, що містять інструкції та конфігурації, орієнтовані на конкретну область застосування.

Основні функції KUKA.SystemSoftware:

- кілька ступенів складності програмування;
- конфігурування польової шини та розподіл входів/виходів для різних промислових мереж (Profibus, Profinet, Ethernet-IP, EtherCAT, ProfiSAFE);
- гнучке конфігурування додаткових приводів та/або кінематичних систем;
- резервне копіювання та відновлення системи за допомогою вбудованого менеджера при запуску копії конфігурації із сервера;
- можливість запрограмувати до восьми паралельних циклічних інтерпретаторів робота для виконання некритичних за часом спеціальних завдань керування.

Додаткові функції KUKA.SystemSoftware:

- обмін даними за протоколом TCP/IP;
- обмін даними із датчиками у реальному часі;
- захист системи керування від шкідливих програм;
- розширений контроль робота та забезпечення системної безпеки шляхом чіткого визначення робочого простору, надійного спрацьовування запобіжних пристроїв у робочих/безпечних зонах;
- унікальна технологія захисту даних у системі KUKA.SystemSoftware на основі шифрування функціональних модулів.

Інженерний модуль KUKA.WorkVisual використовується як універсальне програмне середовище для проєктування роботизованих комплексів або технологічних процесів, а також для керування різними життєвими циклами програм. Інженерний пакет KUKA.WorkVisual забезпечує більш ефективну роботу з системами автоматизації протягом усього життєвого циклу програмного забезпечення. KUKA.WorkVisual охоплює всі кроки проєкту (конфігурування, програмування, введення в експлуатацію та діагностика) в єдиному однорідному середовищі автономної розробки, інтерактивної діагностики та технічного обслуговування. Максимальний ступінь узгодженості та універсальності досягається за рахунок каталогів та проєктних даних, що охоплюють усі програми.

KUKA.WorkVisual завдяки узгодженню з Robot Control, PLC Control, Motion Control та Safety Control дозволяє виконувати конфігурацію вводу/виводу, з'єднання, зовнішньої кінематики та груп роботів. Таким чином, в автономному режимі можна додати потенційні конфлікти, що дозволить уникнути їх надалі. Це скорочує час введення в експлуатацію за одночасної мінімізації ризиків. Взаємодії відображаються завдяки візуальним інструментам, що робить їх інтуїтивно зрозумілими і більш простими в керуванні.

Інженерний пакет KUKA.WorkVisual охоплює всі області у життєвому циклі програми та встановлює ідеальну відповідність між онлайн та офлайн світом. Редактори та компоненти інфраструктури систематично отримують доступ до центральних сервісів (таких як, база даних проєкту, каталоги та онлайн-сервіси). Програмна архітектура KUKA.WorkVisual реалізована у вигляді модулів.

Переваги KUKA.WorkVisual:

- уніфікований інтерфейс користувача, що відповідає стандартам;
- узгоджений архів проєктних даних, запобігання помилкового багаторазового введення даних;
- мережне адміністрування всіх контролерів KR C4;
- широкі можливості діагностики;
- інтегрована, уніфікована магістральна шина – введення/виведення та діагностика;
- підтримувані магістральні шини PROFINET, PROFIBUS, EtherCAT, EtherNet/IP, DeviceNet та VARANBUS;
- редактори для текстового програмування;
- незалежне від проєкту редагування програм системи керування безпосередньо в інженерно-технічному середовищі.

Керуюча програма KUKA.PLC mxAutomation має інтуїтивно зрозумілий програмний інтерфейс для програмування та інтеграції роботів KUKA у виробничу лінію. Керуюча програма KUKA.PLC mxAutomation дозволяє стороннім системам керування з ПЛК керувати роботами KUKA на рівні елементарних рухових команд. Завдяки цьому спрощується реалізація орієнтованої на користувача єдиної концепції керування роботизованими виробничими машинами. При цьому інтерпретатор команд системи керування KR C4 передає команди ПЛК планувальнику траєкторії, який безпомилково і з високою точністю приводить у рух робот.

Переваги програмного забезпечення KUKA.PLCmxAutomation:

- просте програмування: програмування роботів KUKA здійснюється за допомогою функціональних блоків програми mxAutomation у звичайному програмному середовищі ПЛК;
- висока гнучкість: при зміні умов виробництва зміни в систему керування на базі mxAutomation можна вносити в будь-який час у звичному для оператора операційному середовищі;
- сертифікація PLCOpen: програмне забезпечення KUKA.PLC mxAutomation 2.1 відповідає вимогам організації PLCOpen;
- захоплення заготовок, що рухаються: програма синхронізує рухи робота з рухом транспортерів і стрічкових конвеєрів;
- просте керування: об'єднання систем керування робота і машини, що використовується в додатку KUKA.PLC mxAutomation, дозволяє легко інтегрувати роботи KUKA в існуючу концепцію керування. Керування роботом здійснюється через звичний людино-машинний інтерфейс. Те ж саме відноситься і до налаштування робота за допомогою пристроїв ручного керування за умови дотримання відповідних правил техніки безпеки. Хорошим прикладом об'єднання є пропонована компанією Siemens інтеграція роботів KUKA в систему Sinumerik S7 на базі програми mxAutomation.
- підтримка більшості виробників ПЛК: підготовлена до застосування в Європі, Азії та Америці та підтримує наступні системи керування сторонніх виробників:
 - Siemens (SINUMERIK (Run myRobot); SIMATIC; STEP 7 V5.4, S7-300 і S7-400; STEP 7 (TIA Portal), S7-300, S7-400, S7-1500;
 - AllenBradley;
 - LabView;
 - Beckhoff;
 - Schneider-Electric.

3.4. Програмування промислових роботів

3.4.1. Способи програмування роботів

Програмування ПР є процесом накопичення та подальшого запам'ятовування в системі керування інформації, необхідної для виконання роботом конкретної технологічної операції. Будь-яку рухову операцію роз-

бивають на низку послідовних відносно простих кроків, що описують кожен елементарний руховий перехід. Тому програма робота зазвичай містить інформацію про послідовність переходів, для кожного з яких включена інформація:

- про положення затискача робота та його стан (закритий, відкритий);
- про час виконання переходу у потрібне положення, після закінчення якого виробляється сигнал на відпрацювання наступного переходу;
- про необхідний стан периферійних пристроїв та обладнання РТК;
- про те, які датчики зовнішнього середовища та самого робота опитувати та як логічно обробляти отримані дані про стан датчиків з метою зміни чи визначення зазначеної вище інформації для подальшого елементарного переходу.

В даний час набули широкого поширення два способи введення цієї інформації в систему керування роботом (рис. 3.48).

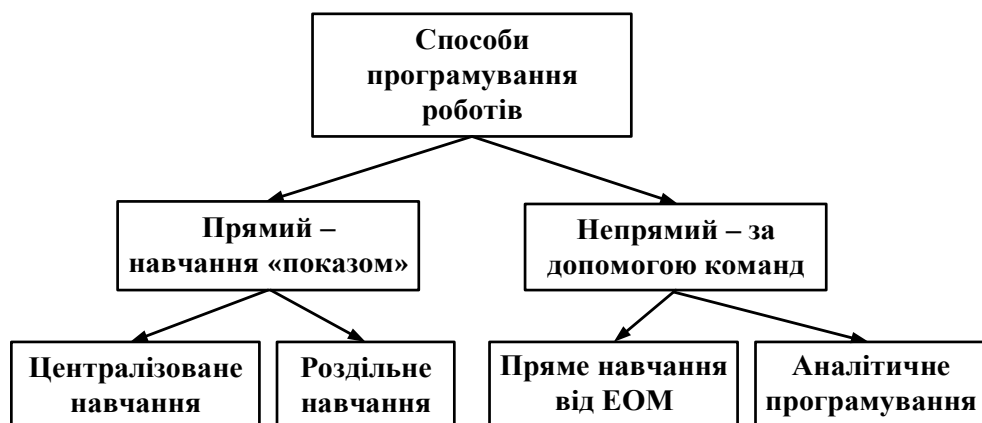


Рисунок 3.48 – Класифікація способів програмування роботів

Перший спосіб – прямий – навчання «показом»: керуючи роботом у ручному режимі, його виводять у необхідну конфігурацію, запам'ятовують у ній показання датчиків зворотних зв'язків за положенням і використовують їх як програмні значення.

Другий метод – непрямий: за моделлю робота і зовнішнього середовища аналітично визначають необхідну програмну конфігурацію робота, тобто програмні значення положень елементів робота, які оснащені датчиками зворотних зв'язків.

Спосіб навчання «показом» почали застосовувати раніше у зв'язку з його простотою та низьким функціональним рівнем систем керування перших зразків ПР.

Якщо інформація про положення пристрою захоплення, часу виконання переходу та технологічних команд за кожним елементарним переходом накопичується в системі керування відповідно до послідовності відпрацювання програми, то такий метод програмування називають централізованим навчанням. Якщо ж послідовність переходів програмується окремо від координат позицій, часу виконання переходу та інших програмних параметрів, такий метод називають методом роздільного навчання.

При одному і тому ж циклі роботи робота метод централізованого навчання вимагає більшого обсягу пам'яті, ніж метод роздільного навчання, оскільки часто необхідно в одному циклі кілька разів помістити затискач в ту саму точку робочого простору. У той же час досвід показує, що при централізованому навчанні досягається більш висока точність відпрацювання програми.

Сучасна система керування робота будується на основі мікропроцесорної обчислювальної техніки з відповідною атрибутикою: логічними та арифметичними пристроями, розвиненою оперативною та постійною пам'яттю, великою кількістю каналів вводу/виводу як дискретної, так і аналогової інформації, розвиненим математичним забезпеченням, що включає спеціалізовані мови програмування. З розширенням технічних можливостей програмних та апаратних засобів, що використовуються в системах керування ПР, з'явилася можливість реалізації непрямого методу програмування (однак прогрес у галузі обчислювальної техніки не ліквідував прямий спосіб програмування).

Удосконалення прямого способу перетворило його на так званий *on-line programming* – покрокове (часто в режимі діалогу) введення та відпрацювання команд безпосередньо на програмованому роботі. Цей спосіб застосовується переважно для циклових і позиційних ПР.

На відміну від нього спосіб аналітичного програмування в «чистому» вигляді (*off-line programming*) полягає в незалежній підготовці програм на автономному пристрої з подальшим перенесенням на об'єкт, що програмується. Іноді за достатньої потужності обчислювальних засобів робота підготовку програми можна проводити як фонове завдання (робот в цей час може виконувати вже налагоджені технологічні операції).

Спосіб прямого навчання. На початку 1950-х років при розробці систем автоматизації металорізального обладнання був запропонований спосіб, відповідно до якого програма роботи верстата формувалася як копія ручного процесу обробки першої деталі, що виконується висококваліфікованим оператором.

Для програмування робіт, призначених для достатньо грубих операцій, ідея копіювання першого ручного циклу, що лежить в основі прямого навчання, виявилася найбільш плідною. Навчання полягає в тому, що оператор виконує перший технологічний цикл, керуючи в ручному режимі рухами інструмента, закріпленого у пристрої захоплення робота. При цьому всі переміщення інструменту послідовно записуються в запам'ятовувальний пристрій робота. Цей спосіб простий, доступний оператору відповідної кваліфікації та практично не вимагає додаткових пристроїв.

Таким чином, перший цикл виконується оператором у ручному режимі, всі необхідні параметри рухів і дій запам'ятовуються в системі керування, а потім цей цикл може бути повторений в автоматичному режимі. Тому метод програмування «показом» часто називають методом навчання за першим циклом.

Ефективність такого підходу під час програмування робіт обумовлена тим, що точності зорового зворотного зв'язку оператора, зазвичай, цілком достатньо для виконання рухових дій робота, тому що при програмуванні робочих позицій оператор орієнтується безпосередньо за результатом – за кінцевим положенням пристрою захоплення щодо технологічних позицій, розміщених у робочому просторі робота. Оператора не цікавить зв'язок між декартовими координатами простору, в якому він працює, та узагальненими координатами робота.

На результат програмування практично не впливають абсолютна похибка датчиків зворотного зв'язку та нелінійність їх характеристик. Основна вимога, яка висувається до системи при такому програмуванні, – висока повторюваність виходу затискача в задані позиції (повторюваність – одна з найважливіших точнісних характеристик ПР).

Для досягнення максимальної точності відтворення програми необхідно прагнути зберегти умови виконання рухів при навчанні і при автоматичному відпрацюванні програми. Фактично це ніколи не виконується через те що:

- швидкості руху при навчанні, як правило, в 2–3 рази нижче, ніж при відтворенні програми;

- при навчанні позиція досягається зазвичай послідовним включенням приводів окремих ступенів рухливості, а відпрацювання рухів здійснюється при одночасному русі за декількома ступенями рухливості.

Внаслідок неоднакових початкових умов і динаміки процесів руху, що змінилися, похибка позиціонування може бути значною. В результаті необхідно коригувати програму, створену за першим циклом, і навчання робота перетворюється на досить тривалий та трудомісткий ітераційний процес.

При способі роздільного навчання для програмування однієї точки позиціонування достатньо лише однієї групи запам'ятовувальних пристроїв. Якщо ж у цю точку необхідно виводити затискач кілька разів за цикл, причому з різних точок робочого простору (підхід до заданої точки з різних сторін), похибка такого виходу може значно зрости через наявність зони нечутливості приводів та зазорів в кінематичних ланцюгах.

У цьому випадку проявляється нестабільність умов навчання та автоматичного відпрацювання різних елементів циклу. Тому спосіб централізованого навчання, хоч і вимагає порівняно з роздільним навчанням більшого обсягу пам'яті при тому самому циклі, але за інших рівних умов має кращі точнісні показники.

Тривалий ітераційний процес навчання зумовлює низьку продуктивність операцій програмування роботів. Тому в системах з прямим навчанням, на відміну від аналітичного програмування, представляє інтерес створення системи навчання з автоматичною корекцією похибок позиціонування. У такій системі за рахунок введення додаткового комплексу датчиків реалізується можливість за кілька автоматичних циклів (2–4) виявити похибку позиціонування, обумовлену розбіжністю умов навчання та автоматичного відтворення програми, і запам'ятати скоректовану величину сигналу, що визначає програмну позицію.

Програмування за допомогою команд. Спосіб навчання «показом» має такі обмеження, які звужують область його використання тільки для простих роботів і нескладних технологічних операцій:

- неможливість використання сенсорної інформації (від тактильних і силомоментних датчиків, систем технічного зору), що вимагає математичної обробки;

– відсутність можливості виконання обчислювальних операцій, повторення деяких елементів циклу руху, переходів на різні елементи циклу за умовами, що часто визначаються за поточними показаннями датчиків.

Наведені обмеження знімаються при побудові системи керування роботом на базі обчислювальної техніки та при використанні мов програмування, властивих сучасним ЕОМ. Мовне програмування дозволяє створювати програми практично будь-якої складності. Удосконалення роботів відбувається у напрямку розвитку більш високих рівнів системи керування. Сучасний розвиток робототехніки пов'язаний з інтенсивною розробкою програмного забезпечення, спрямованого на реалізацію в системах керування роботів елементів штучного інтелекту. При цьому за рахунок нарощування технічних засобів і вдосконалення програмного забезпечення розширюються функціональні можливості кожного рівня, а також підвищується універсальність і автономність роботи шляхом надання йому адаптивних властивостей по відношенню до зовнішнього середовища.

Оператор повинен мати можливість взаємодії з роботом на різних рівнях ієрархії системи керування. Кожному рівню має відповідати своя вхідна мова. Лише на нижньому рівні допускається прямий спосіб навчання (on-line programming). Переважним способом є аналітичне програмування – off-line programming.

Система керування роботом, що виражена в термінах програмних завдань, розбита на чотири рівні керування: виконавчий, тактичний, стратегічний та інтелектуальний.

На виконавчому рівні керування рух руки робота задається в кодах значень узагальнених координат за окремими ступенями рухливості. Ці коди перетворюються на керуючі сигнали, що відпрацьовуються приводами робота у функції часу. В результаті синхронізації за часом затискач робота переміщається в робочому просторі деякою траєкторією, що забезпечує виконання заданої операції.

На тактичному рівні рух визначається в термінах координат затискача в декартовому просторі. Необхідна траєкторія формується автоматично у вигляді деякої послідовності проходження опорних точок, між якими здійснюється інтерполяція. Потім виконується перетворення декартових координат опорних точок в узагальнені координати робота. На виході тактичного рівня формується послідовність векторів узагальнених координат робота в функції часу.

Для вирішення зазначених завдань на тактичному рівні потрібна повна інформація про роботу, яка формується у вигляді деякої сукупності даних, що характеризують його модель. Моделі можуть бути виконані на кінематичному та динамічному рівні. Модель роботи становить одну з найважливіших підсистем загальної бази даних системи керування.

Усі типові завдання тактичного рівня, що є основою програмного забезпечення цього рівня, «прив'язуються» до конкретної роботи через його модель. Повне програмне забезпечення не можна перенести з одного робота на інший. Будь-яка зміна конструкції робота в частині його структури, довжин ланок, розташування кінематичних пар, а також розподілу мас ланок або характеристик приводів у разі динамічної моделі має бути врахована відповідною зміною даних, що описують модель.

На стратегічному рівні керування завдання формується шляхом вказівки операцій, які необхідно виконати над об'єктом маніпулювання. На відміну від нижчих рівнів керування, тут завдання відповідає на питання «що зробити», а не «як зробити». Програміст у певному вигляді не формує рух робота, не оперує декартовими координатами затискача чи узагальненими координатами робота. Він оперує тільки з символічними іменами об'єктів або їх елементів. Звичайно, всі ці імена мають бути визначені в системі.

Завдання обробки інформації на стратегічному рівні полягає в перетворенні отриманого програмного завдання на операцію в послідовність елементарних рухів і дій робота, описаних відносно затискача у декартовій системі координат, з урахуванням наявних обмежень. Для вирішення цього завдання повинні бути відомі розташування об'єктів, їхня орієнтація, стан зв'язків між об'єктами, стан периферійного обладнання тощо. Вся ця інформація становить модель навколишнього середовища, яка є другою найважливішою підсистемою бази даних робота. Будь-яке перетворення середовища роботом, і навіть периферійним технологічним чи допоміжним устаткуванням має супроводжуватися адекватним перетворенням поточного стану її моделі. Основним джерелом інформації для коригування моделі середовища є сенсорна система робота.

На інтелектуальному рівні завдання формується у термінах технологічного завдання без деталізації дій на низьких рівнях ієрархії системи керування. На цьому рівні здійснюється автоматичне перетворення програмного завдання на послідовність укрупнених дій робота над об'єктами сере-

довища. При цьому за допомогою сенсорної системи досліджується поточна ситуація, що склалася в зоні роботи робота, аналізуються різні плани досягнення поставленої мети, на підставі аналізу поточної ситуації автоматично приймається рішення про вибір раціонального плану, який конкретизується до рівня завдання послідовності дій над об'єктами середовища.

Послідовне укрупнення завдань в ієрархічній структурі системи керування роботом чітко відбивається у структурі мов програмування. На виконавчому рівні переважають машинно-орієнтовані (на кшталт використовуваних процесів) мови типу асемблера. На тактичному рівні керування, де формуються рухові функції в координатах робочого органу, використовуються робото-орієнтовані мови програмування.

Для стратегічного та інтелектуального рівнів, повністю абстрагованих від особливостей геометрії та кінематики робота, активно розробляються та проходять апробацію задачно-орієнтовані мови програмування. Оскільки для функціонування верхніх рівнів керування вихідною інформацією служать повні геометричні моделі середовища з описом всіх об'єктів, включаючи і сам робот, то задачно-орієнтовану мову часто називають мовою програмування об'єктного рівня або системою моделювання робочої обстановки.

Робото- та задачно-орієнтовані мови програмування, як правило, подібні або базуються на мовах високого рівня універсальних ЕОМ. При цьому рівень інтеграції команд у задачно-орієнтованих мовах вищий, ніж у робото-орієнтованих. Тому вхідний текст програм задачно-орієнтованою мовою відрізняється більшою компактністю і наочністю.

Уявлення про структуру програми для роботизованої операції збирання двох елементів мовами програмування різного рівня показано в прикладі, наведеному на рис. 3.49.

При використанні задачно-орієнтованих мов програмування досягається дуже важлива для практики якість: значно меншою мірою потрібні знання користувача в області програмування ЕОМ і побудови алгоритмів руху роботів.

Забезпечення мінімальних вимог до рівня професійної підготовки оператора-програміста – одна з головних умов, що висуваються до мов програмування роботів. Рівень мови визначає продуктивність програмування. Як показали дослідження, кількість операторів програми, налаго-

джених в день програмістом, – приблизно постійно і не залежить від рівня мови. Обсяг тексту програми, яка потрібна на вирішення цього завдання, з переходом на мову високого рівня зменшується.

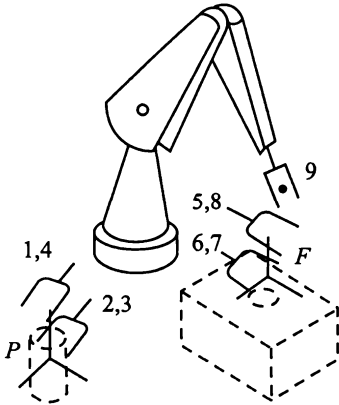
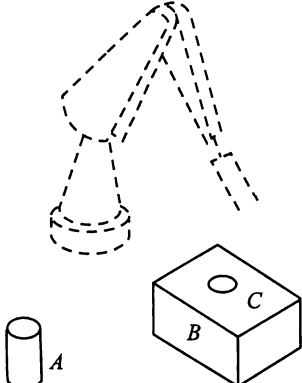
	Опис роботи	Послідовність операцій
Програмування на робото-орієнтованій мові		1. Перевести затискач 3 в точку, що знаходиться над т. Р на відстані 50 мм. 2. Опустити 3 в точку Р. 3. Затиснути 3. 4. Підняти 3 на 50 мм над т. Р. 5. Перевести 3 в точку, що знаходиться над т. F на відстані 50 мм. 6. Опустити 3 в точку F. 7. Розтиснути 3. 8. Підняти 3 на 50 мм над т F. 9. Перевести 3 в початкову точку.
Програмування на задачно-орієнтованій мові		Помістити втулку А у отвір С об'єкта В

Рисунок 3.49 – Приклади програмування складання на робото-орієнтованій і задачно-орієнтованій мовах програмування

Простота програмування, особливо при синтезі алгоритмів руху на основі інформації від сенсорної системи робота, досягається за рахунок суттєвого розвитку операційного середовища – системного, сервісного та службового програмного забезпечення, в якому функціонує прикладна програма користувача.

3.4.2. Структура програмного забезпечення систем керування роботами

Функції програмного забезпечення систем керування роботами полягають в обслуговуванні зовнішніх по відношенню до системи керування об'єктів: людини-оператора, приводів робота, інформаційної системи, технологічного обладнання та обчислювального пристрою верхнього рівня керування (рис. 3.50).

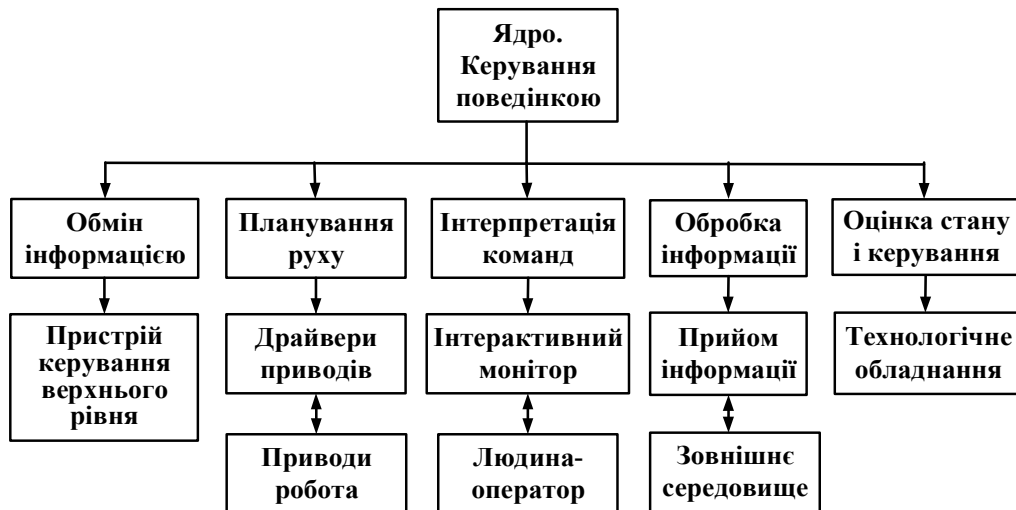


Рисунок 3.50 – Структура програмного забезпечення

Система керування взаємодіє з людиною-оператором у режимі активного діалогу, у процесі якого людина виконує такі дії:

- формує робочу програму, яка може бути представлена або у вигляді набору даних, що описують точки позиціювання пристрою захоплення робота і керуючі сигнали на технологічне обладнання, або у вигляді набору інструкцій проблемно-орієнтованою мовою;
- редагує робочу програму за допомогою програми-редактора даних або редактора тексту, оскільки програма може являти собою дані або інструкції;
- створює об'єктний та завантажувальний модулі робочої програми, забезпечує видалення старих файлів, включення нових, перейменування та зберігання програм у бібліотеці;
- налагоджує робочу програму, тобто за підтримки програмного забезпечення здійснює її покрокове виконання, аналізує результати налагодження і за задовільну якість програми дає команду на її виконання;

- реалізує функції контролю справності обладнання, зокрема, перевіряє канали зв'язку з технологічним обладнанням, калібрує вимірювальні системи робота та виконує інші операції діагностування.

Основу системного програмного забезпечення становить операційна система – набір взаємопов'язаних між собою програм, які є фактично посередниками між апаратними засобами і сервісними програмами або програмами користувача. У функції операційної системи входять організація та керування процесами введення-виведення інформації для різних периферійних пристроїв. Поряд із стандартними для ЕОМ пристроями типу клавіатури, моніторів, принтерів та дискових накопичувачів периферійними пристроями також є приводи робота, його сенсорна система та датчики середовища.

Операційна система здійснює керування зовнішньою пам'яттю і файловою системою, обслуговування переривань, як від вбудованих таймерів, так і від ініціативних датчиків середовища, наприклад, від датчиків, що реєструють появу людини в зоні роботи робота. Нарешті, до функцій операційної системи входять:

- синхронізація роботи кількох процесорів (якщо кожна ступінь рухливості робота керується від свого мікропроцесора);
- організація мультизадачної обробки, тобто розподіл часу процесора між задачами, що паралельно вирішуються в системі;
- виявлення помилкових ситуацій у діях оператора та самої системи керування з подальшою індикацією помилок;
- запуск та виконання сервісних програм та програм користувача.

До сервісних програм належать безпосередньо компілятори або інтерпретатори з вхідних мов програмування, програми-редактори, компонувальники, програми створення баз даних. До службових програм відносяться планувальники завдань, а також безліч спеціальних програм, що реалізують окремі функції сенсорної системи робота та алгоритми побудови рухів.

Такий комплекс забезпечує автоматичний переклад завдань із вхідної мови високого рівня на мову нижчого рівня і так послідовно до видачі команд керування приводами безпосередньо на виконавчому рівні. Отже, простота та компактність вхідної мови, якою оперує людина під час програмування робота, досягається за рахунок створення потужного програмного забезпечення.

Досвід створення програмного забезпечення для складних систем показав, що найбільш доцільно будувати програмне забезпечення як сукупність логічно завершених програм-модулів або їх пакетів, кожен з яких відповідає за реалізацію окремих функцій РТС. Модульність дозволяє створювати та налагоджувати програми незалежно одна від одної, узгодивши їх тільки за вхідними та вихідними даними. При цьому суттєво полегшується компонування всієї системи з налагоджених модулів, а також досягається гнучкість і можливість модернізації та вдосконалення створеної системи за рахунок заміни або модифікації окремих програм.

Укрупнена структура програмного забезпечення робота, кожен блок якої являє собою пакет програм-модулів, призначений для обслуговування відповідних каналів введення-виведення комп'ютерної системи керування, представлена на рис. 3.51.

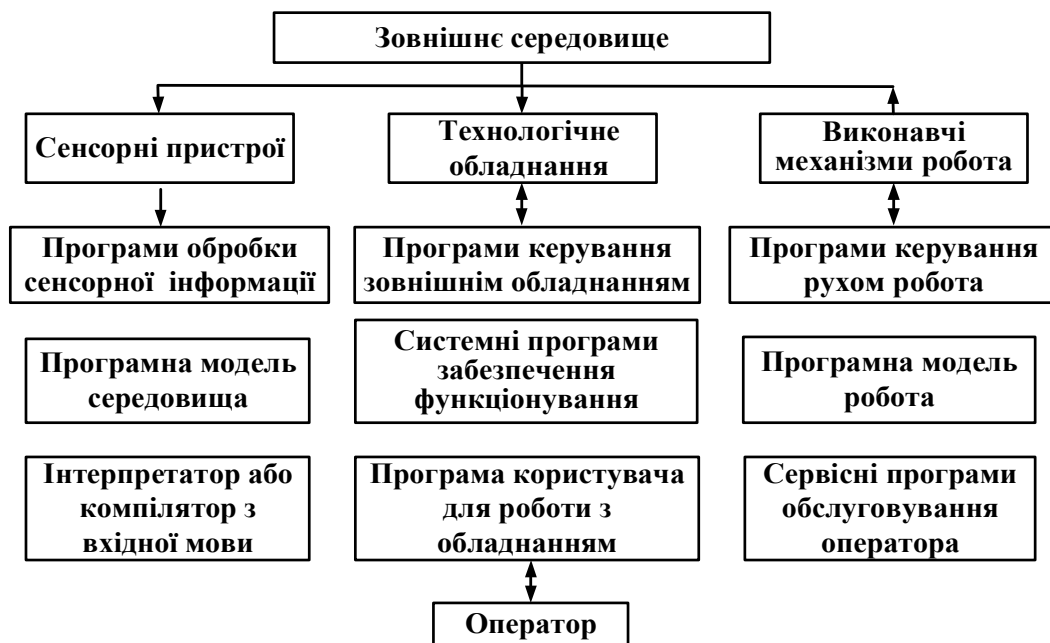


Рисунок 3.51 – Структура програмного забезпечення робота

У загальному випадку існують чотири групи каналів зв'язку:

- з сенсорними пристроями (в основному на введення інформації);
- з технологічним обладнанням;
- з виконавчими механізмами (на виведення – пряме керування, на введення – для контролю та організації зворотних зв'язків);

- канал взаємодії з оператором (на введення – для вказівки директив та програми роботи обладнання, на виведення – для відображення результатів роботи системи).

По всіх каналах інформація може надходити у вигляді сигналів трьох типів:

- аналоговий – сигнал змінного рівня, який за допомогою аналого-цифрового перетворювача формується у відповідний двійковий код;
- цифровий – комбінація двійкових кодів;
- ініціативний – як одиночний імпульс, що поступає у систему переривань керуючої ЕОМ.

Цифрові та аналогові канали опитуються за ініціативою ЕОМ періодично або при необхідності при виконанні тих чи інших програм. Надходження сигналу по ініціативному каналу може відбутися в будь-який час. Сигнал перериває поточну роботу процесора та викликає відповідну програму реакції. Вирішення конфліктів між різними ініціативними каналами здійснюється за допомогою системи пріоритетів, що призначаються. Канал вищого пріоритету може перервати програму реакції каналу нижчого пріоритету.

Система керування ініціюється за командою оператора. На вхідній мові оператор формує програму користувача роботи обладнання, яка сприймається системою як деякий завершений обсяг символічної інформації (файл), представлений послідовністю двійкових кодів. Під керуванням операційної системи цей символічний файл обробляється програмою-інтерпретатором або компілятором із вхідної мови. В результаті формується послідовність команд (робоча програма), представлена також у вигляді двійкових кодів, але вона містить всі перевірки необхідних умов і переходи до службових програм-модулів функціональних пакетів програм.

При виявленні синтаксичних чи логічних помилок у символічному файлі система видає оператору діагностичні повідомлення. З ініціативи оператора символічний файл може бути оброблений сервісними програмами – програмою-редактором, налагоджувачем тощо, що дозволяє досить швидко та ефективно отримати налагоджену на рівні синтаксису робочу програму користувача. На цьому закінчується перший етап налагодження програми користувача.

На другому етапі робоча програма з директиви оператора може бути виконана в покроковому режимі з виводом керуючих впливів та прийомом інформації по всіх задіяних каналах введення-виведення. Оператор, спостерігаючи за виконанням кожного елемента циклу на працюючому облад-

нанні і відстежуючи виконувані команди, що відтворюються на екрані дисплея, може ввести відповідні поправки або безпосередні значення даних. До таких даних, зокрема, відносяться значення координат позицій, в які переміщається пристрій захоплення робота. Дані зазвичай вводяться за сигналом оператора після того, як він за допомогою пульта ручного керування вивів затискач в необхідну позицію (тут використовуються елементи прямого навчання).

Після завершення необхідних корекцій та введення необхідних уставок закінчується другий етап і скоригована робоча програма готова до реалізації у робочому режимі. Оператор може користуватися сервісними програмами для організації її зберігання на довгостроковому носії та для видачі її на друкуючий пристрій. У покроковому та робочому режимах програма виконується з використанням необхідних службових пакетів програмних модулів системи, записаних у постійному запам'ятовувальному пристрої.

До таких пакетів належать:

- програми керування рухом робота;
- програми керування зовнішнім обладнанням, наприклад, режимом роботи джерела струму при роботизованому зварюванні або фарбопультом при фарбуванні;
- програми обробки сенсорної інформації про зовнішнє середовище.

Програмні модулі керування рухом використовують дані програмної моделі робота, а модулі обробки сенсорної інформації використовують і оновлюють дані моделі середовища, сформовані в оперативній пам'яті.

Всі ці програмні модулі працюють під керуванням системних програм, які обслуговують як зовнішні запити (за ініціативними сигналами від зовнішніх пристроїв, включаючи оператора), так і внутрішні запити від різних програмних модулів на обробку даних та опитування зовнішніх каналів. У функцію цього ядра програмного забезпечення входять: організація служби реального часу та системи переривань з урахуванням пріоритетів пристроїв та модулів.

3.4.3. Розвиток мов програмування роботів

В даний час існують три базові напрями при створенні мов програмування роботів.

Перший ґрунтується на використанні універсальних мов програмування для ЕОМ. Для роботів найширше застосування знайшли системи

програмування UNIX, INTERLISP та ADA. Як правило, у цих системах розширення вхідної мови на робототехнічні завдання керування здійснюється шляхом створення спеціальної бібліотеки підпрограм. Прикладом може бути бібліотека RCCL (Robot Control C Library), що написана мовою високого рівня, та працює під керуванням операційної системи UNIX.

Використання універсальної мови як базової істотно спрощує завдання створення системи програмування для роботів, але через свою надмірність вимагає високої кваліфікації програмістів і досить потужних процесорів для керування роботами. Крім того, зазначений підхід, як правило, вимагає доповнення універсальної мови комплектом програм-драйверів для керування пристроями, підключеними до каналів введення-виведення. До таких драйверів висувають високі вимоги щодо швидкодії, що зумовлює їх реалізацію мовами низького рівня. Це ускладнює використання «розширених» універсальних мов ЕОМ керування роботами.

Відповідно до другого напрямку передбачається в якості базової мови використовувати систему ЧПК (типу системи автоматизації програмування АРТ). Такий підхід позбавлений зазначених вище недоліків, оскільки в сучасних системах ЧПК добре вирішені питання апаратно-програмного сполучення, а оператори на виробництві освоїли ці системи. Можливості цього підходу можуть бути раціонально використані для циклових та простих позиційних роботів. Більш складні робототехнічні системи, оснащені сенсорами, вимагають суттєвого розширення мови щодо розвитку структури даних, запровадження обчислювальних операцій, гнучкості використання підпрограм, обробки логічних умов. Це накладає значні обмеження на поширення мов систем ЧПК з метою керування роботами.

Третій напрямок, яким переважно ведеться розвиток систем програмування для роботів, – створення спеціалізованих мов. Перша з таких мов була створена наприкінці 1950-х років фахівцями фірми «Unimation» (США). Програма цією мовою представляла послідовність команд рухових інструкцій із зазначенням деяких додаткових функцій. Команди містили коди керуючих сигналів на приводи ступенів рухливості. Послідовні точки траєкторії задавалися вектором значень узагальнених координат. Додаткові функції включали стан пристрою захоплення (відкрито-закрито), часова затримка, зовнішні сигнали і т.д. Ця розробка започаткувала розвиток цілої низки систем (рис. 3.52), який продовжується і в даний час.

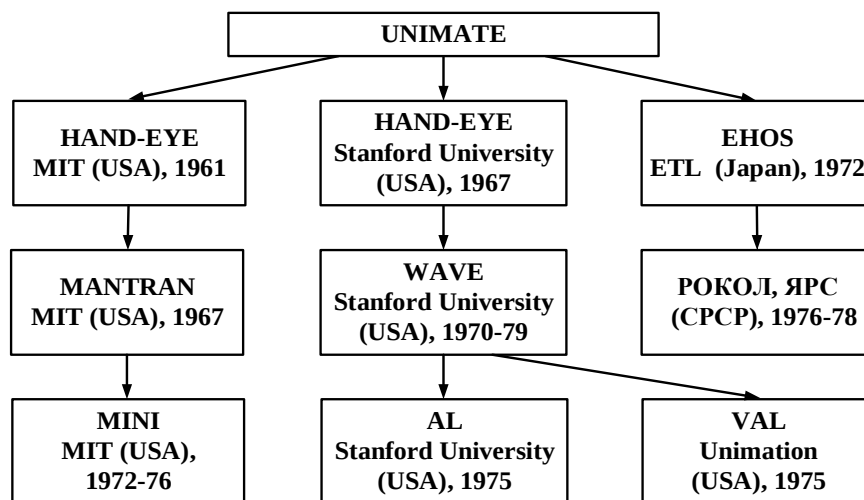


Рисунок 3.52 – Розвиток мов програмування роботів

На початковому етапі мови для роботів розвивалися в дослідницьких центрах, що займаються штучним інтелектом і розробкою великих робото-технічних проєктів, пов’язаних з використанням великих обсягів сенсорної інформації. В результаті були експериментально апробовані та налагоджені основні прийоми використання сенсорів для цілей керування роботами: принцип «обережного» руху до моменту спрацювання тактильного датчика (MANTRAN), основи обробки зорової інформації (Hand-Eye, MINI, WAVE). У цих мовах використовувалися синтаксичні конструкції для урахування силових і тактильних взаємодій робота із зовнішнім середовищем.

Разом із прийомами використання сенсорної інформації також удосконалювалися алгоритми побудови рухів робота. У мові WAVE було запропоновано опис положення кінцевої ланки робота за допомогою декартових координат та їх взаємозв’язок із узагальненими координатами робота шляхом вирішення прямої та оберненої задач кінематики, а також забезпечення безперервності зміни швидкостей та прискорень за рахунок інтерполяції траєкторії сплайнами високих порядків.

Підсумком розвитку робіт у галузі мов програмування для роботів стало створення в Стенфордській лабораторії штучного інтелекту алголоподібної мови високого рівня AL (Assembly Language) для програмування кількох роботів. Мова AL є мовою реального часу, за допомогою якої можна керувати паралельно процесами складання на основі розвиненої ієрархічної моделі навколишнього середовища.

Ця модель є графом жорстких та нежорстких відношень зв'язку між локальними системами координат, пов'язаними з різними об'єктами середовища та робота. Поряд із повною орієнтацією на робототехнічні завдання мова AL включає традиційний для універсальних мов ЕОМ набір операторів, що забезпечують формування блоків, циклів, процедур та функцій, а також надає можливість використання різних типів векторних та скалярних даних.

Як правило, всі зазначені мови мають яскраво виражений дослідницький характер і не знайшли широкого застосування у промисловій робототехніці. При їх створенні передбачалося, що програма виконуватиметься на двох ЕОМ:

- інструментальній, на якій буде здійснюватися компіляція програми, написаної вихідною мовою;

- керуючій, де виконуватиметься у реальному часі в режимі інтерпретації програма, що отримана мовою низького рівня. Режим інтерпретації забезпечує оператору інтерактивні можливості та деякі засоби налагодження.

Істотно відрізняється від розглянутих вище система ЕНОС, створена в Електротехнічній лабораторії ЕТЛ (Японія). За своєю вихідною структурою вона виконана як діалогова система людина-машина, у якій кожна команда оператора сприймається як виклик відповідної послідовності підпрограм написаних мовою високого рівня.

Система включає інтерпретатор команд, програму-редактор та виконуючу програму. Інтерпретатор транслює команди оператора, за потреби запитує дані та вибирає з бібліотеки відповідні підпрограми. За допомогою редактора формуються та коригуються програми у вигляді послідовності команд. Ці програми можуть бути виконані програмою в покроковому або безперервному режимах.

Наприкінці 1970-х років з'явилася велика кількість мов програмування роботів, в яких були об'єднані функціональні досягнення використання сенсорів та алгоритмів побудови руху (дослідницька мова AL) та переваги інтерпретуючих систем ЕНОС. Появі безлічі мов сприяло підключення до цієї галузі досліджень низки фірм, що спеціалізуються на роботах і обчислювальній техніці.

Створені в цей період мови програмування, не втративши універсального характеру, стали мати яскраво виражену практичну спрямованість за рахунок орієнтації на керування роботами конкретної структури в конк-

ретних технологічних процесах. При цьому основний наголос робиться на спрощення мови та на можливість її використання некваліфікованим оператором.

Зокрема, мова JARS створена в Лабораторії реактивного руху (США) за контрактом з NASA для керування роботами при складанні сонячних батарей; мова RAIL – для робототехнічного складання та дугового зварювання; мова ALFA (A Language For Automation) – для програмування транспортних та завантажувальних операцій; PLAN (The Programming Language for Welding robot) – для зварювання; HELP – для складальних процесів за допомогою робота, що працює у декартовій системі координат; SIGLA (SIGma LAnguage) та створені на цій базі діалогові мови MAL та VML – для керування роботами з кроковими двигунами типу SIGMA фірми Olivetti (Італія).

Простота багатьох із зазначених мов досягається за рахунок двоетапного формування програми. На першому етапі програма складається заздалегідь вхідною текстовою мовою. На другому етапі оператор у режимі прямого навчання вводить геометричні параметри та дані, що визначають реальний технологічний процес. Для розширення можливостей вхідної мови для роботів та формування підпрограм керування розробники часто застосовують універсальні мови програмування ЕОМ високого рівня: мова PASCAL використовується в системах JARS, HELP, SRL та VML; LISP – у RPL, MINI. Мови MAL і VAL, що широко використовуються в даний час, мають структуру універсальної мови BASIC.

Для промислового використання японські робототехнічні фірми розробили мови програмування PASLA, IML, HOPS-1, SPEL, AR-BASIC, FRL, SCOL. Вони орієнтовані на різні технологічні операції, починаючи від завантаження–вивантаження і до робототехнічної обробки матеріалів лазерним променем.

3.4.4. Структура і короткий опис системи програмування VAL

Система програмування VAL (Variable Assembly Language) розроблена фірмою Unimation для роботів PUMA. Її вхідна мова відповідно до розглянутої вище класифікації відноситься до робото-орієнтованих мов програмування. Мова має структуру BASIC і включає широкий набір інструкцій для керування електромеханічним роботом з п'ятьма або шістьма ступенями рухливості. Мова орієнтована на інженера-виробника.

У першій редакції (VAL-1) система займає 12 Кбайт постійної пам'яті і додатково 4 Кбайт оперативної пам'яті для розміщення програм користувача. Поряд із спеціальним інтерфейсом зі слідкувальними приводами робота, кожен з яких виконаний на базі мікропроцесорного регулятора, і інтерфейсом системи технічного зору VAL обслуговує три периферійні пристрої: пульт оператора у вигляді дисплея з клавіатурою, пульт ручного навчання та програмоносій на гнучкому диску.

У системі VAL програмно реалізовано:

- інтерактивний монітор, що забезпечує зв'язок керуючої ЕОМ з усіма периферійними пристроями;
- текстовий редактор для створення та модифікації програм користувача;
- інтерпретатор вхідної мови;
- програма-налагоджувач і службові програми, що утворюють виконавчу систему.

Введення даних, що характеризують послідовність положень затискача робота, може здійснюватися:

- у режимі прямого навчання за командою з пульта ручного керування;
- з пульта оператора шляхом вказівки ідентифікаторів, чисельні значення яких задаються в режимі редагування програми;
- за командою монітора в інтерактивному режимі.

Програма може виконуватися на різних швидкостях задану кількість разів. При налагодженні дозволено виконання окремих кроків програми до заданого рядка або до появи помилки. Після виправлення помилки програма може бути продовжена. Операції в системі виконуються у двох режимах: оперативному та фоновому. В оперативному режимі виконується програма користувача та здійснюється керування маніпулятором. У фоновому режимі (на фоні виконання програми користувача) виконуються команди монітора, за допомогою яких оператор може отримувати інформацію про поточний стан системи, змінювати положення цільових точок позиціонування, а також в режимі діалогу працювати з текстовим редактором.

Рухи у системі VAL можуть формуватися трьома способами:

- просте позиціонування – без інтерполяції, траєкторія не задається, час відпрацювання сигналу з кожного ступеня рухливості мінімальний;
- з інтерполяцією за узагальненими координатами – при лінійній інтерполяції траєкторія затискача в декартовому просторі відрізняється від прямолінійної;

- з інтерполяцією у декартовому просторі.

Для більш повного уявлення про можливості системи VAL розглянемо деякі команди монітора та оператори мови VAL (команди монітора можуть або вводитись як директиви з пульта оператора і відразу відпрацьовуватись, або входити в текст програми користувача).

Команди монітора, що забезпечують керування виконанням програми користувача, мають такий вигляд:

SPEED <value> – встановити швидкість для наступних інструкцій, що дорівнює значенню value;

EXECUTE <prog>, <nloop>, <step> – виконати nloop раз програму з ім'ям prog, починаючи з кроку step;

NEXT <prog>, <nloop>, <step> – те саме, але покрокове виконання програми;

ABORT – перервати виконання програми після завершення поточної інструкції;

RETRY – продовжити програму;

PROCEED – продовження виконання програми, зупиненої внаслідок помилки, а також операторів PAUSE чи WAIT.

Команди керування станом системи:

ZERO – ініціалізація системи керування;

KALIBRATE – калібрування датчиків;

STATUS – запит на видачу інформації про стан виконуваної програми.

Команди завдання точок позиціювання:

POINT <A> <=B> – присвоєння точці позиціювання затискача координат точки (A і B – ідентифікатори шестивимірних векторів, перші три значення яких визначають декартові координати затискача, а решта – кути Ейлера, що характеризують орієнтацію затискача);

DPOINT <A> – видалення точки позиціювання A;

HERE <A> – присвоєння точці A позиціювання значення координат, що відповідають поточному положенню робота;

WHERE – запит на видачу поточних координат робота на екран дисплея;

TEACH <A> – команда формування координат точки A позиціювання в режимі прямого навчання від ручного пульта керування;

BASE <dx>, <dy>, <dz> – зміна базової (абсолютної) системи координат робота на величини dx, dy, dz відповідно координатам x, y, z та поворот на кут dz навколо осі z щодо раніше встановленої системи координат ;

TOOL <A> – зміна системи координат, пов’язаної з інструментом (затискачем), A – ідентифікатор шестивимірної вектору.

Оператори мови VAL, що дозволяють будувати рух робота:

RIGHTY, LEFTY, ABOVE, BELOW – зміна конфігурації антропоморфного робота за допомогою переміщення затискача відповідно вправо, вгору і вниз шляхом керування лише першими трьома ступенями рухливості;

MOVE <A> – рух затискача в точку A з інтерполяцією за узагальненими координатами;

MOVEST <A> – рух затискача в точку A з інтерполяцією в декартових координатах;

DRAW <dx>, <dy>, <dz> – зміщення інструменту (затискача) по прямій в точку, віддалену від поточного положення за координатами x, y, z відповідно на dx, dy, dz;

DRIVE <j>, <φ>, <ω> – рух j-го шарніра робота на кут φ зі швидкістю ω;

READY – повернення робота у вихідне положення;

OPEN , CLOSE – команди відкриття чи закриття затискача до відстані між губками, рівної B під час наступної інструкції руху.

Є також команди керування траєкторією та точністю позиціонування. До них відносяться:

NONULL – команда виконання рухів без очікування сигналу досягнення заданої позиції. Зворотна команда – NON.

Можливості взаємодії із сенсорними пристроями та керування зовнішнім обладнанням характеризують наступні оператори мови VAL:

SIGNAL <j1>, <j2>... – на каналах виведення з номером j1, j2 ... виставлені сигнали, рівень кожного з яких визначено знаком перед номером каналу;

IGNORE <j1> – заборонити переривання за зовнішнім сигналом, виставленим на канал номер j1;

WAIT <j1> – призупинити виконання програми до появи зовнішнього сигналу потрібного рівня (визначуваного знаком) на каналі введення номер j1;

DELAY <t> – затримка рухової операції на час t с.

Наведений перелік операторів мови та команд системи дає уявлення про рівень мови та можливості оператора-програміста при формуванні рухових функцій робота. У цьому списку не згадані стандартні оператори мови BASIC з керування виконанням програми, а також широкий спектр

команд файлової системи та програми-редактора. Система VAL забезпечує також різноманітний набір сервісних послуг: діагностування та калібрування внутрішніх пристроїв та зовнішнього обладнання, виконання тестових завдань, друк інформації про проходження програми, збоїв та помилок в системі.

Приклад простої програми, написаної мовою VAL, наведено на рис. 3.53. Програма реалізує взяття деталі з точки під назвою PICK та її переміщення до точки PLACE. Позиція PICK визначається на етапі підготовки програми при введенні команди 4 за конфігурацією робота, виведеного в необхідне положення (модифікація команди MOVE зі знаком оклику). Рух затискача задається командою MOVE. Щоб уникнути можливих зіткнень з деталлю або столом, затискач спочатку за допомогою команди APPRO переводиться в точку, віддалену від точки PICK на 50 мм по вертикалі, – це вихідне положення для виконання операції захоплення об'єкта.

Далі здійснюється переміщення зі зниженою швидкістю (30% від номінальної) та захоплення об'єкта (оператори 3, 4 та 5). Після відведення затискача на 70 мм по вертикалі (оператор 6) та переміщення в зону точки PLACE (оператор 7) робот також акуратно встановить деталь у потрібну точку робочого простору (оператори 8-11).

Програмний блок складається з трьох секцій: власне програми, секції навчання та секції виконання.

Програма готується з використанням текстового редактора. За допомогою секції навчання в режимі діалогу визначаються точки позиціонування. У разі це точка PLACE. Секція виконання визначає режим налагодження та виконання програми. У фазі налагодження програма виконується на зниженій швидкості, у фазі виконання – на номінальній.

У процесі вдосконалення VAL було створено нову універсальну систему програмування VAL-II. На відміну від розглянутої вище, вона має два блоки по 64 Кбайт у кожному. Один із них використовується для зберігання операційної системи, інший – для програм користувача. Цикл квантування системи – 28 мс. Цей період поділено на інтервали, протягом яких обслуговуються всі периферійні канали та пристрої, а також виконуються оперативні та фонові завдання (режим розподілу часу). Таким чином, час реакції системи на будь-яку зовнішню подію не перевищує 28 мс.

Програмна секція**• EDIT DEMO 1**

1. OPEN
2. APPRO PICK, 50
3. SPEED 30
4. MOVE PICK!
5. CLOSE I
6. DEPART 70
7. APPROS PLACE, 70
8. SPEED 20
9. MOVE PLACE
10. OPEN I
11. DEPART 70
12. E

Провести редагування програми з ім'ям DEMO 1

Розкрити пальці затискача 3 і перейти до наступного кроку програми

Перемістити 3 в точку, що знаходиться над точкою PICK на висоті 50 мм

Виконати один наступний крок програми зі швидкістю, що дорівнює 30% від запрограмованої швидкості руху

Опустити 3 в точку PICK, (!) – поточному положенню

3 присвоїти ім'я PICK

Затиснути пальці 3 і перейти до наступного кроку програми

Підняти 3 на 70 мм над точкою PICK

Перемістити 3 по прямолінійній траєкторії в точку, що знаходиться над точкою PLACE на відстань 70 мм

Виконати один наступний крок програми зі швидкістю, що дорівнює 20% від запрограмованої швидкості руху

Опустити 3 в точку PLACE

Розкрити пальці 3 і перейти до наступного кроку програми

Підняти 3 на 50 мм над точкою PLACE

КІНЕЦЬ. Вийти з режиму редагування

Секція навчання

HERE PLACE

X/JT 1 Y/JT 2 Z/JT3...

225.66 618.84-131.94

CHANGE?

Поточному положенню 3 присвоїти ім'я PLACE

Індикація на екрані дисплея координат поточного положення ПЗ

Секція виконання

SPEED 30

EXEC DEMO 1,3

SPEED 100

EXEC -10

В режимі навчання і налагодження програми зменшити швидкість до 30% від запрограмованої швидкості руху

Виконати програму DEMO 1 – 3 рази

В робочому режимі встановити запрограмовану швидкість руху

Перейти до виконання програми без зупинок. (Якщо кількість повторів задається негативним числом, робот повторює задану програму до приходу зовнішнього сигналу переривання).

Рисунок 3.53 – Приклад програми керування роботом на мові VAL

Можливості мови VAL-II суттєво розширено за рахунок введення широкого набору математичних функцій та операцій з масивами цілих та дійсних чисел. Мова збагачена структурованими операторами, такими як IF-THEN-ELSE для виконання умовних переходів, WHILE, DO-UNTIL, FOR – для організації циклів. Поряд із розширенням кількості програмованих каналів введення-виведення в мові реалізовані можливості керування в реальному часі рухом робота, траєкторія затискача якого задана певною формулою. Все це спрощує написання складних програм і ефективно наближає мову VAL-II до універсальних мов високого рівня для ЕОМ.

Контрольні запитання

1. Назвіть особливості використання приводів у маніпуляторах ПР.
2. Назвіть переваги і недоліки пневматичних приводів ПР.
3. Назвіть види пневматичних приводів та їх склад.
4. Назвіть переваги і недоліки гідравлічних приводів ПР.
5. Назвіть види гідравлічних приводів та їх склад.
6. Назвіть переваги і недоліки електричних приводів ПР.
7. Назвіть види електричних приводів та їх склад.
8. Назвіть напрямки розвитку мікроприводів роботів.
9. Призначення сенсорних систем роботів.
10. Назвіть основні вузли систем технічного зору.
11. Назвіть принцип роботи локаційних датчиків.
12. Назвіть види і принцип дії силомоментних сенсорів.
13. Особливості і різновиди тактильних сенсорів.
14. Дайте класифікацію систем керування ПР
15. Дайте характеристику дискретних циклових систем програмного керування.
16. Назвіть особливості програмування і відпрацювання керуючої програми в дискретній позиційній системі програмного керування.
17. В чому полягають особливості безперервних систем програмного керування?
18. Дайте класифікацію способів програмування роботів.
19. Назвіть особливості програмування роботів методом навчання.
20. Назвіть особливості програмування роботів методом команд.
21. З яких модулів складається програмне забезпечення роботів?

Розділ 4

Керування промисловими роботами

4.1. Математичний опис роботів

4.1.1. Основні принципи організації руху роботів

Робот та інші засоби робототехніки – це типові динамічні системи, що працюють в основному в неусталених режимах. З точки зору математичного опису і аналітичного вивчення вони представляють великі труднощі в силу значної кількості ступенів рухливості, нестаціонарності, нелінійностей і високого порядку рівнянь, що їх описують. Тому основними методами вивчення та проєктування роботів є комп’ютерне моделювання та фізичний експеримент.

Перш ніж приступити до математичного опису роботів, розглянемо загальні принципи, якими слід керуватися при оцінці та синтезі їх динамічних характеристик. Для більшої певності зробимо це стосовно найбільш складної частини роботів – маніпуляторів.

1. *Принцип відповідності вільних та вимушених рухів.* Вільні рухи маніпуляторів повинні бути максимально узгоджені з вимушеними (необхідними). Іншими словами, механічну частину і приводи слід вибирати, виходячи з типових рухів, які повинен здійснювати маніпулятор, щоб його керовані рухи реалізовувалися найбільш економно, і при цьому забезпечувалася висока якість керування.

2. *Принцип послідовного розподілу рухів.* Цей принцип можна розглядати як приватне вирішення загальної суперечності між складністю дій і точністю їх виконання (із зростанням складності неминуче падає точність). Керований рух у загальному випадку має містити дві фази – грубу і точну.

У рухах людини можна чітко виділити дві складові: швидкий, але неточний «балістичний» рух і повільний більш точний і осмислений рух у завершальній фазі. Такий поділ є компромісним рішенням завдань із суперечливими вимогами щодо швидкості та точності руху.

Аналогічним чином необхідно будувати і рухи роботів: на різних етапах руху оперувати різними критеріями якості та відповідно отримувати

різні способи реалізації рухів, включаючи різні способи керування. Наприклад, при наближенні робочого органу маніпулятора до об'єкта, з яким належить виконання якоїсь технологічної операції, можливий перехід від програмного до адаптивного керування за відносними координатами, пов'язаними з цим об'єктом. Аналогічно при керуванні пересуванням мобільного робота при наближенні до місця зупинки зазвичай переходять від керування швидкістю до позиційного керування.

3. *Принцип паралельного розподілу рухів.* Рухи за окремими ступенями рухливості повинні бути узгоджені виходячи із завдання загального руху робота. Необхідні рухи робочого органу маніпулятора реалізуються як сукупність його складових за окремими ступенями рухливості. Відповідно до цього вимоги, що висуваються до результуючого руху (за точністю, швидкістю, вантажопідйомністю), повинні бути оптимально розподілені між складовими, що реалізуються за допомогою певних приводів. Наприклад, доцільно вибирати кінематику маніпулятора таким чином, щоб до ступенів рухливості, які визначають вантажопідйомність всього маніпулятора, вимоги до якості керування були полегшеними, і, навпаки, щоб були максимально розвантажені приводи, що забезпечують задану точність позиціонування. Аналогічно слід підходити до поділу вимоги щодо швидкодії.

4. *Принцип поєднання різних способів керування.* Різні способи керування рухом – автоматичне, програмне, адаптивне, інтелектуальне, а також керування людиною-оператором – повинні застосовуватися в оптимальному поєднанні і при максимальному використанні апріорної інформації, виходячи із загальних вимог до заданого руху маніпулятора. Іншими словами, це керування як для окремих складових руху за ступенями рухливості, так і за фазами в часі в загальному випадку має бути комбінованим. При цьому в основі вибору способів керування, як і в попередньому випадку, повинна лежати оптимізація за загальносистемними критеріями якості. Для цього треба прагнути максимально детермінувати зовнішнє середовище, наприклад, при необхідності здійснювати розпізнавання його об'єктів, вдаватися до їх маркування і т.д. Необхідно по можливості знижувати вимоги до якості керування шляхом застосування, зокрема, автоматичної компенсації впливу збурюючих чинників (нестабільність зовнішнього середовища, параметрів енергоживлення тощо).

5. *Принцип оптимальної послідовності рухів за ступенями рухливості.* Рухи за окремими ступенями рухливості повинні бути оптимально роз-

поділені за часом і принципово можуть виконуватися одночасно, послідовно і в різних проміжних комбінаціях. У першому граничному випадку, очевидно, забезпечується найбільша швидкодія переміщення робочого органу маніпулятора, а в другому – при послідовному включенні ступенів рухливості – можуть бути максимально спрощені керування і система приводів (аж до застосування одного приводу для декількох ступенів рухливості). У кожному конкретному випадку існує певна оптимальна послідовність рухів за окремими ступенями рухливості.

6. *Рухи за окремими ступенями рухливості мають бути оптимально взаємопов'язані.* Рухи, що здійснюються за окремими ступенями рухливості одночасно, можуть взаємно впливати один на одного через загальну кінематику, навантаження і т.д. Ці взаємовпливи можуть бути як шкідливими, так і корисними для реалізації загального заданого руху, що потребує оптимізації. Тому для кожного конкретного маніпулятора і, більше того, для різних видів його рухів існує оптимальний алгоритм пов'язаного керування приводами маніпулятора, який має бути визначений та по можливості реалізований. Часто для спрощення завдань керування маніпулятором прагнуть усунути ці взаємні впливи шляхом введення спеціальних перехресних компенсаційних зв'язків з керування окремими ступенями рухливості або відповідного ускладнення кінематичної схеми маніпулятора. Однак хоча таке автономне керування простіше, воно не забезпечує явно найкращої якості керування рухом маніпулятора в цілому.

7. *Принцип ієрархічного керування.* Керування рухом у загальному випадку має бути багаторівневим. Тому необхідно оптимально розділяти загальне завдання керування роботом за кількома рівнями керування. Для різних завдань загальна кількість використовуваних рівнів буде різною: від прямого керування з верхнього рівня окремими приводами до використання раніше відпрацьованих типових алгоритмів і програм, що комбінуються з верхніх рівнів.

8. *Принцип взаємного узгодження дій робота і спільно працюючого устаткування.* Вимоги до рухів робота мають бути узгоджені з вимогами до працюючого спільно з ним іншого обладнання, а також до об'єктів маніпулювання. Ці вимоги можуть бути суттєво полегшені за рахунок часто несуттєвих змін конструкції та режиму роботи цього обладнання, а також конструкції об'єктів, якими має маніпулювати робот. Сюди відноситься, наприклад, улаштування різних технологічних напрямних, упорів і фасок

для полегшення захоплення і позиціювання предметів, що переміщуються, з'єднання їх один з одним при складанні і т. п.

4.1.2. Математичний опис маніпуляторів і систем пересування роботів

З позиції теорії керування робот можна подати як сукупність об'єкта та пристрою керування (рис. 3.34). Об'єкт керування є виконавчими пристроями, що складаються з механічної системи та приводів. Тоді рис. 3.34 можна перетворити на вид, поданий на рис 4.1.

На рисунку прийняті позначення: ПК_з – загальний пристрій керування; ПК_п – пристрій керування привода; Д – двигун; М – механізм привода; МС – механічні системи (маніпуляційна і пересування); СС – сенсорні системи.

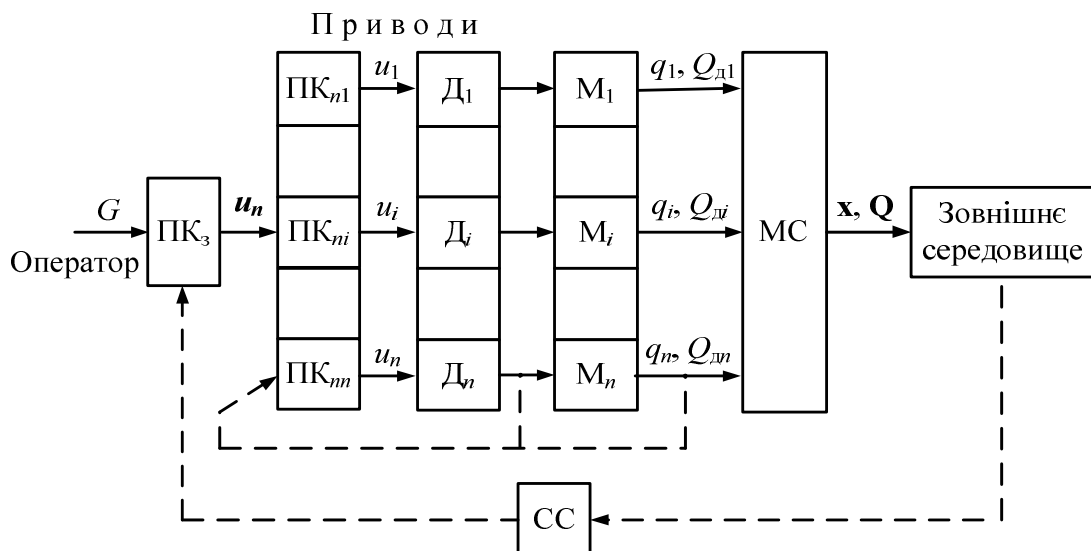


Рисунок 4.1 – Функціональна схема робота

Математичний опис механічної системи маніпуляторів. Типову кінематичну схему шарнірного маніпулятора з мінімальним числом ступенів рухливості наведено на рис. 4.2. Механічна система маніпулятора як об'єкта керування характеризується:

- типом і числом переносних та орієнтуючих робочий орган Р ступенів рухливості ($(q_1, q_2, q_3$ – переносні ступені рухливості, q_4, q_5, q_6 – орієнтуючі ступені рухливості);
- типом і розміром робочої зони, в рамках якої переміщається робочий орган маніпулятора.

Вхідні змінні механічної системи маніпулятора $Q_{д1}, Q_{д2}, \dots, Q_{дn}$ – це зусилля від двигунів D , що діють за n ступенями руху, а вихідні – координати робочого органу x_p і зусилля Q_p , з яким він впливає на об'єкти зовнішнього середовища.

Найбільше число ступенів свободи робочого органу m дорівнює шести: три координати, що визначають положення його центру в просторі і три кути орієнтації. Крім координат робочого органу можуть представляти інтерес і координати $x_1, x_2, \dots, x_n$ проміжних ланок, що визначають поточну конфігурацію всього маніпулятора.

Координати x визначаються в системі координат, нерухомій щодо його основи (рис. 4.2), і називаються *абсолютними* (опорними, інерціальними). Відносне положення сусідніх ланок маніпулятора визначається *відносними* (узагальненими) координатами $q_1, q_2, \dots, q_n$, де n – число ступенів рухливості маніпулятора.

Математичний опис механічної системи маніпулятора пов'язує його вихідні змінні x_i, Q_i з вхідними $Q_{ді}$. У свою чергу абсолютні координати x_i визначаються відносним положенням ланок маніпулятора, тобто відносними координатами $q_1, q_2, \dots, q_n$. Загалом механічна система маніпулятора описується системою двох наступних рівнянь:

$$\begin{cases} x = f(q), \\ q = A_m(Q_d, Q_{зб}). \end{cases} \quad (4.1)$$

Тут перше рівняння – рівняння кінематики маніпулятора, що виражає абсолютні координати його ланок x ($x_1, x_2, \dots, x_n$) через їх відносні координати q ($q_1, q_2, \dots, q_n$), а друге – рівняння динаміки для q ($q_1, q_2, \dots, q_n$), де Q_d ($Q_{д1}, Q_{д2}, \dots, Q_{дn}$) – зусилля двигунів, що діють за відповідними координатами ланок маніпулятора q , а $Q_{зб}$ ($Q_{зб1}, Q_{зб2}, \dots, Q_{збn}$) – збурюючі і протидіючі зусилля, A_m – оператор механічної системи маніпулятора. Рівняння для зусиль $Q_{вз}$, з якими маніпулятор взаємодіє з об'єктами зовнішнього середовища, будуть розглянуті далі.

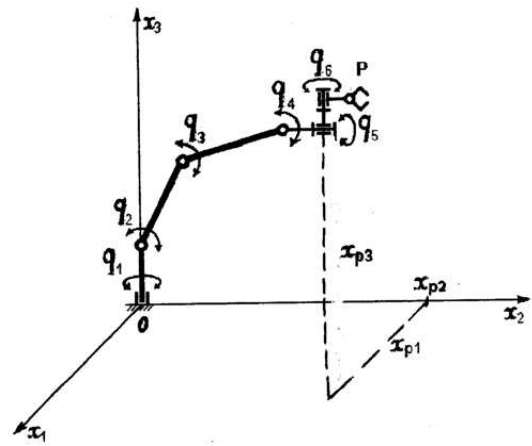


Рисунок 4.2 – Кінематична схема шарнірного маніпулятора з трьома ланками

Розглянемо послідовно рівняння (4.1). Рівняння $x = f(q)$ є виразом для перерахунку координат, яке виводиться за правилами аналітичної геометрії. Нехай потрібно знайти цей вираз для абсолютних координат робочого органу маніпулятора $x_p (x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$. Введемо для кожної ланки свою систему координат, в якій відбувається переміщення наступної ланки за зміни її відносної координати q_i . Якщо вивести вираз для координат робочого органу в системі координат попередньої ланки, потім аналогічно виразити координати робочого органу, перераховані в систему координат попередньої ланки через координати попередньої ланки, то діючи таким чином можна дійти до основи маніпулятора, з якою пов'язана система абсолютних координат x . У результаті отримаємо шуканий вираз абсолютних координат робочого органу $x_p (x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$ через відносні координати всіх ланок $q (q_1, q_2, \dots, q_n)$.

Розглянемо методику такого перерахунку із застосуванням матричного обчислення (рис. 4.3).

Перерахунок координат точки P з системи (O', x'_1, x'_2, x'_3) в систему (O, x_1, x_2, x_3) описується векторно-матричним рівнянням:

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}\mathbf{r}' + \mathbf{n} \quad (4.2)$$

або обернене перетворення:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{r} - \mathbf{n}), \quad (4.3)$$

де $\mathbf{r} = r(x_1, x_2, x_3)$ – радіус-вектор точки P в системі координат (O, x_1, x_2, x_3) ; $\mathbf{r}' = r'(x'_1, x'_2, x'_3)$ – радіус-вектор точки P в системі координат (O', x'_1, x'_2, x'_3) ; $\mathbf{n}$ – радіус-вектор системи координат (O', x'_1, x'_2, x'_3) в системі координат (O, x_1, x_2, x_3) .

Матриця повороту $\mathbf{A}$ є матрицею 3×3 :

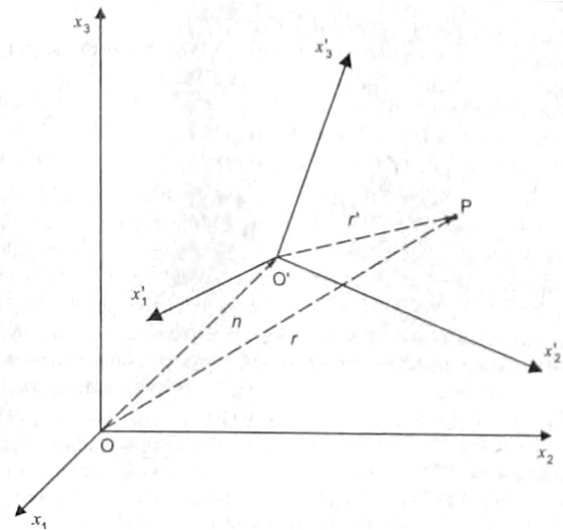


Рисунок 4.3 – Схема перерахунку координат

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

де $a_{sk} = \cos(i_s, i'_k)$; i_s, i'_k – орти систем координат, що розглядаються; $s, k = 1, 2, 3$.

Для матриці $\mathbf{A}$ справедливі рівності:

$$|\mathbf{A}| = 1, \quad \mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T, \quad (4.5)$$

де індекс T означає операцію транспонування матриці.

Якщо ланки маніпулятора мають один ступінь рухливості один щодо одного, наприклад, поворот на кут φ , то:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Якщо здійснюється тільки паралельне зміщення у разі поступального руху ланки, рівняння (4.2) набуває вигляду

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{n} \quad (4.7)$$

Сукупність рівнянь (4.2), складених для усіх рухомих ланок маніпулятора, дає шукане рівняння кінематики.

Необхідно відзначити, що при вирішенні рівняння кінематики мають бути враховані різні конструктивні та інші обмеження відносних переміщень ланок q_i .

Перейдемо до розгляду другого рівняння системи (4.1) – рівняння динаміки $q = A_m(Q_d, Q_v)$, яке пов'язує відносні координати ланок q_i з діючими на систему рушійними Q_{di} і протидіючими Q_{vi} силами. Залежно від розв'язуваних задач, це рівняння може бути виведено у різній формі з числа відомих у теоретичній механіці – у формі рівнянь Ньютона, Гауса, Даламбера, Лагранжа та їх модифікацій. Розглянемо отримання рівняння динаміки механічної системи маніпулятора за допомогою рівняння Лагранжа другого роду, що найчастіше використовується при дослідженні динаміки маніпуляторів.

Для i -ланки маніпулятора рівняння Лагранжа другого роду у загальному вигляді записується так:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i. \quad (4.8)$$

Тут $L = K - P$ – функція Лагранжа, а K і P – відповідно кінетична і потенційна енергії ланки; $Q_i = Q_{di} - Q_{vi}$ – результуюча сила, що зведена до виходу приводу ланки, $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Рівняння (4.8) можна подати у наступній формі:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + c_i = Q_i. \quad (4.9)$$

Перший член рівняння (4.9) описує сили, що залежать від прискорення (відповідно коефіцієнти при $\ddot{q}_j$ характеризують інерцію ланки); другий член – швидкісні сили (відцентрові, коріолісові, в'язкого тертя і т.п.); третій – гравітаційні, статичні.

Систему рівнянь ланок (4.9) можна коротше записати в матрично-векторній формі:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q} \quad (4.10)$$

де $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ – симетрична матриця-функція розмірності $n \times n$, що описує інерційні властивості системи; $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – вектор-функція швидкісних сил розмірності n ; $\mathbf{c}(\mathbf{q})$ – вектор узагальнених статичних сил і сил тертя в кінематичних парах руки маніпулятора розмірності n , $\mathbf{Q}$ – вектор зведених до узагальнених координат моментів приводів.

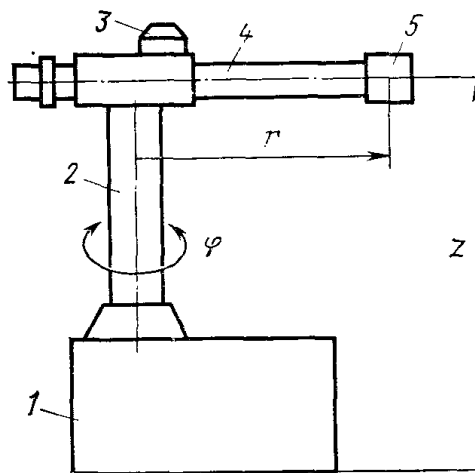


Рисунок 4.4 – Маніпулятор з трьома ланками в циліндричній системі координат

Фізичний зміст членів рівняння (4.10) очевидний і структура рівняння не залежить від метода, яким воно виведено.

Розглянемо як приклад рівняння динаміки триланкового маніпулятора з циліндричною системою координат (рис. 4.4). На основі маніпулятора 1 розміщені двигуни і передачі, що здійснюють поворот і вертикальне переміщення колони 2 і руки 4 маніпулятора. Горизонтальне переміщення руки і пристрою захоплення 5 з вантажем здійснює двигун і передача 3. Кінетична і потенційна енергії маніпулятора відповідно рівні:

$$\begin{aligned} K = & \frac{1}{2} m (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\phi}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} m_r \left[\dot{r}^2 + \left(r - \frac{l}{2} \right)^2 \dot{\phi}^2 + \dot{z}^2 \right] + \\ & + \frac{1}{2} \frac{m_r l^2}{12} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} m_z \dot{z}^2 + \frac{1}{2} (J_\phi + J'_\phi) \dot{\phi}^2, \\ P = & (m + m_r + m_z) z g, \end{aligned} \quad (4.11)$$

де m – маса робочого органу з корисним вантажем;

m_z – маса вертикальної каретки, що рухається за координатою z ;

m_r – маса горизонтальної стріли, що рухається за координатою r ;

l – довжина стріли;

J_ϕ – момент інерції маси колони m_z , зведений до осі ϕ ;

J'_ϕ – момент інерції частин колони, які приймають участь тільки в кутовому русі, зведений до осі ϕ ;

g – прискорення сили тяжіння.

Вираз для кінетичної енергії являє собою суму кінетичних енергій окремих частин і відповідає такому положенню маніпулятора, в якому при середньому положенні стріли вона виступає на однакову величину, що дорівнює $l/2$ в обидві сторони від вертикальної осі колони. Прийmemo $q_1 = \phi$, $q_2 = z$, $q_3 = r$ і підставимо наведені в (4.11) вирази для K і P в (4.8). Після перетворення отримаємо рівняння у векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} a_\phi(r) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{z} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_\phi(\dot{\phi}, \dot{r}, r) \\ 0 \\ b_r(\dot{\phi}, r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ c_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_\phi \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

В рівнянні (4.12) прийняті такі позначення:

$a_\phi(r), a_z, a_r$ – елементи матриці інерційних коефіцієнтів;

$[\ddot{\phi}, \ddot{z}, \ddot{r}]^T$ – вектор прискорень;

$$a_{\varphi}(r) = J_{\varphi} + J'_{\varphi} + (m + m_r)r^2 - m_r l r + m_r \frac{l^2}{3};$$

$$a_z = m + m_r + m_z;$$

$$a_r = m + m_r;$$

$$b_{\varphi}(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) = 2 \left[(m + m_r)r - m_r \frac{l}{2} \right] \dot{r} \dot{\varphi};$$

$$b_r(\dot{\varphi}, r) = \left[m_r \frac{l}{2} - (m + m_r)r \right] \dot{\varphi}^2;$$

$$c_z = (m + m_r + m_z)g.$$

$[b_{\varphi}(\dot{\varphi}, \dot{r}, r), 0, b_r(\dot{\varphi}, r)]^T$ – вектор, обумовлений силами інерції від взаємного впливу рухів за координатами φ і r ;

$b_{\varphi}(\dot{\varphi}, \dot{r}, r), b_r(\dot{\varphi}, r)$ – компоненти вектору, обумовлені відповідно коріолісовою та відцентровою силами інерції (у дужках зазначені координати, від яких залежать дані коефіцієнти);

$[0, c_z, 0]^T$ – вектор сил тяжіння;

$[M_{\varphi}, F_z, F_r]^T$ – вектор узагальнених сил і моментів;

M_{φ} – момент, що розвивається приводом за координатою φ ;

F_z, F_r – сили, що розвиваються приводами за координатами z і r відповідно.

Рівняння (4.12) можна записати у вигляді векторно-матричного рівняння (4.10). Тоді отримаємо:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{\varphi}(r) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_{\varphi}(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) \\ 0 \\ b_r(\dot{\varphi}, r) \end{bmatrix}; \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ c_z \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} M_{\varphi} \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Рівняння (4.13) можна представити системою трьох нелінійних рівнянь:

$$\begin{cases} a_{\varphi}(r)\ddot{\varphi} + b_{\varphi}(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) = M_{\varphi}, \\ a_z\ddot{z} + c_z = F_z, \\ a_r\ddot{r} + b_r(\dot{\varphi}, r) = F_r. \end{cases} \quad (4.14)$$

На рис. 4.5 показана відповідна структурна схема, де представлені, зокрема, взаємовпливи рухів за окремими ступенями рухливості. Таким

чином, навіть при розгляді найпростішої моделі маніпулятора рівняння руху вийшли нелінійними та взаємопов'язаними за координатами φ і r . Однак рух по координаті z описується незалежним лінійним рівнянням.

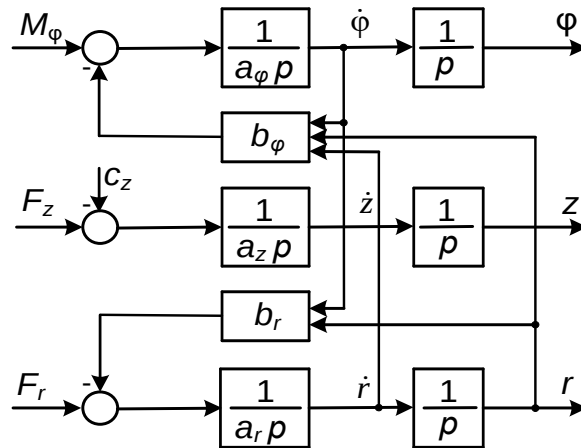


Рисунок 4.5 – Структурна схема механічної частини маніпулятора з трьома ланками в циліндричній системі координат

При заданому русі $r = r(t)$ рівняння руху за кутом φ виявляється лінійним, але з коефіцієнтами, залежними від $r(t)$, отже, від часу. Аналогічно, якщо заданий рух $\varphi = \varphi(t)$, то лінійним, але нестационарним рівнянням описуватиметься рух по r .

Якщо рухи проводяться послідовно спочатку по r , потім по φ або навпаки, то рівняння суттєво спрощуються і стають лінійними з постійними коефіцієнтами. Однак і в цьому випадку необхідно враховувати, що на різних фазах руху можуть змінюватися інерційні коефіцієнти через зміну конфігурації маніпулятора і маси вантажу, що переміщується. Ці зміни відбуваються від запуску до запуску.

З рівняння динаміки (4.10) для відносних координат q можна отримати рівняння для абсолютних координат, використовуючи рівняння кінематики $x = f(q)$, що зв'язує ці змінні. Для цього треба двічі продиференціювати останній вираз, щоб перейти в ньому до $\ddot{q}$, що входить до рівняння (4.10):

$$\dot{x} = \frac{\partial f(q)}{\partial q} \dot{q} = J(q) \dot{q}, \quad (4.15)$$

де $J(q) = \frac{\partial f(q)}{\partial q}$ – $m \times n$ матриця Якобі з елементами $\frac{\partial f_j}{\partial q_i}$;

$j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n$.

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}), \quad (4.16)$$

де $\mathbf{D}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ – вектор-стовбець з елементами:

$$\dot{\mathbf{q}}^T \frac{\partial^2 f_k(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q} \partial \mathbf{q}^T} \dot{\mathbf{q}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f_k}{\partial q_i \partial q_j} \dot{q}_i \dot{q}_j, \text{ де } k = 1, 2, \dots, m.$$

Отримавши звідси вираз для $\ddot{\mathbf{q}}$ і підставивши в рівняння (4.10) або, навпаки, підставивши сюди вираз для $\ddot{\mathbf{q}}$ з рівняння (4.10), отримаємо шукане рівняння для $\mathbf{x}$:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}} - \mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{Q}. \quad (4.17)$$

Основний інтерес це рівняння представляє для координат робочого органу маніпулятора $\mathbf{x}_p$.

Коли число ступенів рухливості маніпулятора n більше числа ступенів рухливості його робочого органу m , тобто має місце надмірність ступенів рухливості, виникає неоднозначність залежності $\mathbf{q} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{x})$. Для її подолання зазвичай вводять якісь корисні додаткові умови за кількістю надлишкових ступенів рухливості.

Виведемо рівняння для зусиль, з якими маніпулятор взаємодіє з об'єктами зовнішнього середовища. Тут можливі два варіанти.

Перший варіант, коли зовнішнє середовище впливає на маніпулятор, надаючи його ланкам певний опір. У цьому випадку використовується рівняння динаміки маніпулятора для відносних змінних (4.10) з підстановкою в нього зазначених сил, перерахованих для цих координат. Отримуємо рівняння:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}' - \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{Q}_{\text{зовн}} \quad (4.18)$$

Тут $\mathbf{Q}' = \mathbf{Q}_d - \mathbf{Q}_{\text{в1}}$, де $\mathbf{Q}_{\text{в1}}$ – внутрішні збурюючі сили; $\mathbf{Q}_{\text{зовн}}$ – зовнішні збурюючі сили, що діють з боку зовнішнього середовища; $\mathbf{J}^T(\mathbf{q})$ – транспонована $n \times m$ матриця Якобі, за допомогою якої відбувається перерахунок $\mathbf{Q}_{\text{зовн}}$ в систему відносних координат для визначеної ланки маніпулятора з m ступенями рухливості. Вираз $\mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{Q}_{\text{зовн}}$ виходить з балансу потужностей $\mathbf{Q}_{\text{зовн}}^T \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Q}_{\text{в2}}^T \dot{\mathbf{q}}$ – діючи на ланки в системі відносних координат сили, що викликані силою $\mathbf{Q}_{\text{зовн}}$.

Другий варіант силової взаємодії із зовнішнім середовищем – це силовий вплив на зовнішнє середовище робочим органом самого маніпулятора. У цьому випадку необхідно користуватися рівнянням динаміки для

абсолютних координат, якими здійснюється взаємодія із зовнішнім середовищем. Воно виходить із рівняння (4.17):

$$A(q)J^{-1}(q)\ddot{x}_p - A(q)\dot{J}^{-1}(q)\dot{J}(q)\dot{x}_p + b(q, \dot{q}) + c(q) = Q_p + Q'' \quad (4.19)$$

Тут Q_p – виділені з вектору Q та перераховані в систему абсолютних координат зусилля, що створюються приводами на робочому органі та діють за $l \leq m$ координатами, за якими відбувається цей силовий вплив на середовище. Для інших $(m - l)$ координат рівняння динаміки залишається попереднім – (4.10) або (4.17). Q'' – решта від Q' , також перерахована в систему абсолютних координат.

В цілому, згідно з розглянутими рівняннями механічної системи маніпулятора, він як об'єкт керування являє собою дуже складний динамічний об'єкт. Вихідними змінними цього об'єкта є шість координат робочого органу (три координати центру і три кути його орієнтації) та сили взаємодії із зовнішнім середовищем, що діють за деякими з цих координат. З них керуваними змінними (загальна кількість відповідно до шести) можуть бути як координати робочого органу, так і зусилля, що діють за їх напрямками. Наприклад, при виконанні технологічної операції нанесення покриттів за допомогою пульверизатора потрібно керувати всіма шістьма координатами. Операція зняття шорсткостей і задирок з поверхонь вимагає поряд з керуванням координатами для здійснення сканування робочим інструментом по цій поверхні ще й керування силою, спрямованою за нормаллю до цієї поверхні.

В системах керування маніпуляторами керування здійснюється, як правило, не за вимірюваними координатами робочого органу x_p , а за відносними координатами q . Таке рішення пояснюється складністю вимірювання абсолютних координат робочого органу, проте в результаті точність позиціонування робочого органу маніпулятора визначається точністю датчиків координат q_i , а також точністю перерахунку від q до x_p . В результаті вимоги до точності датчиків q_i , виявляються в кілька разів вище за потрібну точність керування x_p .

Керування зусиллям на робочому органі маніпулятора здійснюється зазвичай за допомогою багатокомпонентних датчиків зусилля, які розташовані в зап'ясті робочого органу або обчислювачів цих зусиль (спостерігачів) по вимірюваним іншим змінним, що входять в рівняння динаміки маніпулятора.

Взаємний вплив ступенів рухливості маніпуляторів. Динаміка механічної системи маніпуляторів описується у відносних координатах векторно-матричним рівнянням:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q} \quad (4.20)$$

Тут $\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}$ – векторна функція сил інерції, пропорційних прискоренню, де $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ – симетрична $n \times n$ матриця, що описує інерційні властивості системи; n – число ступенів рухливості маніпулятора; $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – n -мірний вектор швидкісних сил – відцентрових, коріолісових, тертя та залежних від швидкості втрат у зчленуваннях; $\mathbf{c}(\mathbf{q})$ – n -мірний вектор сил тяжіння; $\mathbf{Q}$ – вектор сил, що діють за n ступенями рухливості системи.

Наявність q у дужках означає, що члени цього рівняння залежать від конфігурації маніпулятора. Отже, механічна система маніпулятора є нестационарною. Важливою її властивістю є взаємозв'язаність ступенів рухливості, тобто вплив їх один на одного. Існує чотири типи такого взаємовпливу: вплив на величину інерції, впливи за прискоренням $\ddot{q}$, за швидкістю $\dot{q}$ і за положенням q .

Перші два типи взаємовпливу враховуються матрицею

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

Вплив на величину інерції по i -му ступеню рухливості інших ступенів враховується в діагональних елементах a_{ii} матриці. У наведеному раніше прикладі (рис. 4.4) маніпулятора з трьома ступенями руху, що працює в циліндричній системі координат, такий вплив враховується елементом $a_{\phi}(r)$ в рівнянні (4.12). Тут має місце залежність моменту інерції координати ϕ від координати r . З висуванням горизонтальної стріли маніпулятора збільшується момент інерції обертання його колони щодо вертикальної осі.

У маніпуляторах зі сферичною системою координат (рис. 2.12) величина висування руки (стріли) r впливає на моменти інерції щодо осей ϕ і Θ . Аналогічний вплив положення ланок на момент інерції щодо попередніх осей існує і в маніпуляторах з кутовою системою координат (рис. 2.13).

Другий тип взаємовпливу – за прискоренням $\ddot{q}$ враховується недиагональними елементами a_{ij} матриці $\mathbf{A}(\mathbf{q})$. Він полягає в дії за окремими ступенями

рухливості сил інерції, пропорційних прискоренням за іншими ступенями рухливості. Такий вплив має місце, наприклад, в шарнірних маніпуляторах від попереднього шарніра на наступні, що діють в одній з ним площині.

Третій тип впливу – за швидкістю $\dot{q}$ враховується вектором $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$. У прикладі маніпулятора з циліндричною системою координат це відцентрова сила $b_r(\dot{\phi}, r)$, що діє по координаті r у функції швидкості $\dot{\phi}$ і коріолісова сила $b_\phi(\dot{\phi}, \dot{r}, r)$, що діє по ϕ у функції від добутку $\dot{\phi}\dot{r}$ в рівнянні (4.12).

Четвертий тип впливу – за силою тяжіння враховується вектором $\mathbf{c}(\mathbf{q})$. Це вплив сили тяжіння ланок, що рухаються не в горизонтальній площині. Такий вплив, наприклад, існує в шарнірних маніпуляторах, що працюють у вертикальній площині.

Таким чином, як об'єкти керування маніпулятори являють собою багатовимірні взаємопов'язані системи. Взаємопов'язаність ускладнює завдання керування такими об'єктами, проте вона не обов'язково надає негативний вплив на якість керування. У розглянутому прикладі маніпулятора з циліндричною системою координат при висуванні його стріли, тобто при збільшенні координати r обертання колони сприяє цьому руху стріли за рахунок відцентрової сили по координаті ϕ . Тому з точки зору спрощення завдання керування бажано зменшувати рівень взаємовпливу ступенів рухливості для незалежного керування ними. Проте з погляду якості керування такий підхід не є найкращим. Теоретично оптимальне рішення дає уявлення маніпулятора в якості об'єкта керування як єдиної багатовимірної взаємозв'язаної системи.

Розглянемо способи боротьби із взаємовпливом ступенів руху, які слід застосовувати для виключення цих взаємовпливів. Існують дві групи таких способів:

- конструктивні, засновані на врівноважуванні мас ланок маніпулятора;
- алгоритмічні, які реалізуються системою керування.

Найпростіший варіант першого способу – це врівноважування мас ланок противагами, у тому числі такими, що автоматично переміщуються для врівноважування змінних мас, наприклад, корисного вантажу.

При статичному врівноважуванні маніпулятора в різних просторових положеннях, маніпулятор розвантажується від дії сил тяжіння його ланок, завдяки чому енергія приводів переважно йде на переміщення вантажу.

Для маніпуляторів, всі ланки яких переміщуються в одній площині, таке врівноваження може забезпечити повне усунення взаємовпливів ступенів рухливості (рис. 4.6).

Умова врівноважування полягає в рівності моментів сил ваги протизаваги і ваги ланок, що врівноважуються, відносно їх осі обертання. Очевидний недолік такого способу – збільшення інерції ланок маніпулятора та його загальної маси. У зв'язку з цим для зменшення моменту інерції доцільно зменшувати відстань протизаваги до осі обертання, тому що момент інерції пропорційний квадрату цієї відстані.

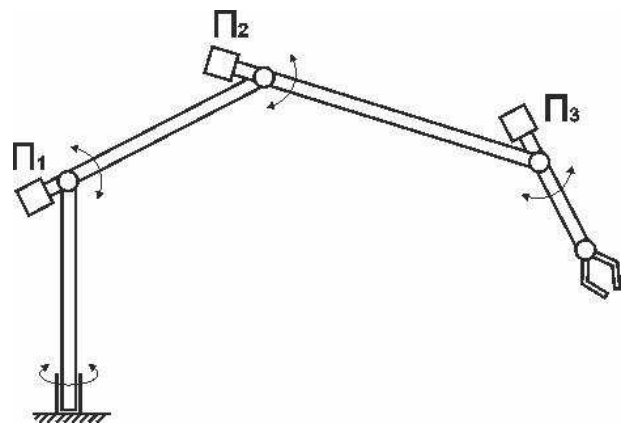


Рисунок 4.6 – Шарнірний маніпулятор з протизавагами (П1, П2, П3)

Кращим вирішенням розглянутої задачі є використання в якості протизаваги конструктивно необхідних частин маніпулятора шляхом розміщення їх по різні боки від осі обертання. До таких частин можуть належати, наприклад, елементи приводів та робочих органів маніпулятора. Це дозволяє поставити приводи відповідно меншої потужності, а отже, і меншої ваги та габаритів, що полегшує і всю конструкцію маніпулятора.

Крім протизаваги для врівноважування ланок застосовуються пружини і додаткові приводи, що створюють необхідне зусилля для врівноважування. Пружинні спеціальні врівноважуючі механізми крім усунення взаємовпливу ступенів рухливості дозволяють компенсувати і гравітаційні сили, у тому числі корисного вантажу, і відповідно знизити необхідну потужність двигунів або підвищити вантажопідйомність маніпулятора.

Друга група способів усунення взаємовпливу ступенів рухливості, яка заснована на використанні системи керування, полягає у компенсації цих впливів за допомогою перехресних керуючих впливів на приводи. Наприклад, таким чином можуть бути компенсовані взаємні впливи ступенів рухливості маніпулятора з циліндричною системою координат (рис. 4.4). Для цього через приводи M_ϕ і F_r треба ввести перехресні впливи, які компенсують взаємовпливи між ϕ і r , що описуються ланками b_ϕ по $\dot{\phi}r$ та b_r по $\dot{\phi}$.

Найбільш загальним засобом зменшення взаємовпливів є підвищення швидкодії керування ступенями руху маніпулятора, оскільки це відповідно підвищує ефективність компенсації будь-яких збурень, що діють на ці ступені рухливості, включаючи і їх взаємовпливи.

Врахування пружності ланок маніпулятора. Рівняння динаміки (4.10) механічної системи маніпулятора виведено з припущення абсолютної жорсткості її ланок, тобто за відсутності їх пружних деформацій. Насправді вони можуть зазнавати певних деформацій. При їх обліку у рівнянні маніпулятора у вигляді рівняння Лагранжа другого роду (4.8) з'являться нові змінні у вигляді координат пружних деформацій.

У ланках маніпуляторів можливі 2 типи пружності: розподілені і зосереджені. Розподілена пружність викликається гнучкістю ланок, їх вигином або скручуванням. Зосереджена пружність може мати місце у зчленуваннях ланок та у передачах (зубчастих, ланцюгових, тросових тощо).

Пружні деформації зазвичай є небажаними, тому що вони породжують коливання, що знижують швидкодію та створюють додаткові динамічні навантаження на приводи.

Основна причина появи пружних деформацій – прагнення зменшити масу механічної системи маніпулятора. Мінімум її маси має місце при розрахунку маніпулятора не на жорсткість, а на міцність. При цьому знімаються обмеження на пружні деформації в механічній системі. Це неминуче призводить до ускладнення системи керування, тому оптимальне рішення має бути при синтезі обох систем спільно.

Проте пружність може грати й позитивну роль. При виконанні деяких складальних операцій і при взаємодії робота з об'єктами зовнішнього середовища в зап'ястя робочого органу вводять пружність для забезпечення податливості. Крім того, існують маніпулятори типу «хобот», в яких керована гнучкість лежить в основі їх принципу дії.

На рис. 4.7 показано розрахункову двомасову модель ланки із зосередженою пружністю. На рисунку прийняті такі позначення:

M_1 , M_2 – відповідно рушійний момент на вході та момент навантаження на виході ланки;

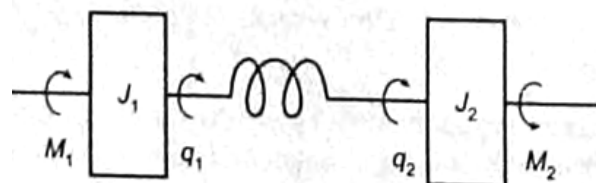


Рисунок 4.7 – Двомасова модель ланки з зосередженою пружністю

J_1, J_2 – моменти інерції;

q_1, q_2 – відносні координати (кути повороту) на вході та виході ланки. Різниця $(q_1 - q_2)$ є кутом скручування гнучкого елемента, представленого у вигляді пружини.

Математичний опис цієї ланки

$$\begin{cases} J_1 p^2 q_1 = M_1 - k' p(q_1 - q_2) - k(q_1 - q_2), \\ J_2 p^2 q_2 = k' p(q_1 - q_2) + k(q_1 - q_2) - M_2, \end{cases} \quad (4.22)$$

де k, k' – коефіцієнти жорсткості та в'язкого тертя гнучкого елемента; p – оператор диференціювання.

Типова ланка з розподіленою пружністю – гнучкий стрижень, показаний на рис. 4.8. Стрижень з масою m на кінці згинається при його повороті під дією моменту M_1 за наявності будь-якого протидіючого моменту M_2 . Така ланка з розподіленими параметрами описується диференціальним рівнянням у частинних похідних.

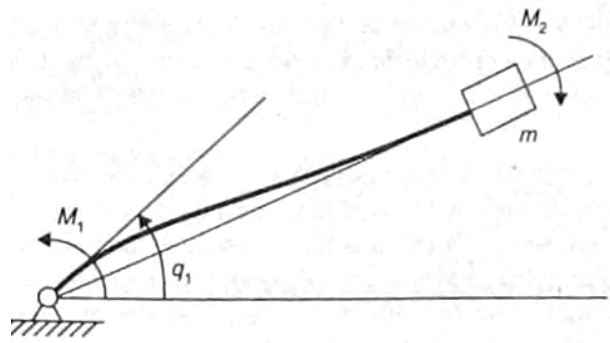


Рисунок 4.8 – Модель ланки з розподіленою пружністю

Цьому відповідає нескінченна кількість ступенів свободи та цілий спектр частот коливань. Якщо важливо знати тільки положення кінцевої точки стрижня з масою m , то розподілену модель можна звести до розглянутої вище дискретної двомасової моделі. Це відповідає урахуванню лише однієї основної гармоніки коливань із усього спектра.

Рівняння динаміки механічної системи маніпулятора, що містить розглянуті раніше пружні ланки, можна подати у вигляді:

$$\begin{bmatrix} A_{11}(q, q_{\text{пр}}) & A_{12}(q, q_{\text{пр}}) \\ A_{21}(q, q_{\text{пр}}) & A_{22}(q, q_{\text{пр}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{q}_{\text{пр}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(\dot{q}, q; \dot{q}_{\text{пр}}, q_{\text{пр}}) \\ b_2(\dot{q}, q; \dot{q}_{\text{пр}}, q_{\text{пр}}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k' \dot{q}_{\text{пр}} + k q_{\text{пр}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1(q, q_{\text{пр}}) \\ c_2(q, q_{\text{пр}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_d \\ 0_z \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

Порівняно з рівнянням (4.10) маніпулятора без пружних деформацій у (4.23) з'явилися нові «пружні» координати $q_{\text{пр}}$ і відповідне рівняння для них.

Рівняння (4.23) виводиться також, як і рівняння (4.10) для жорсткої механічної системи маніпулятора, з рівняння Лагранжа другого роду (4.8).

У виразах для кінетичної та потенційної енергій ланок необхідно врахувати пружність ланок.

Для більш точного опису ланки з розподіленою пружністю, що враховує вищі гармоніки, вона розбивається на кілька частин, кожна з яких описується методом кінцевих елементів.

При вирішенні завдання керування маніпулятором з гнучкими ланками необхідно вживати заходів для гасіння коливань, що викликаються пружними деформаціями в цих ланках. Основним способом є застосування зворотних зв'язків за величиною пружних деформацій та їх першої похідної. При цьому виникає проблема їх визначення, яка може бути вирішена або шляхом вимірювання цих деформацій спеціальними датчиками або шляхом їх розрахунку за допомогою функціонально пов'язаних з ними вимірюваних змінних. Також можна застосовувати стабілізуючі зворотні зв'язки безпосередньо за цими змінними, не обчислюючи деформацій.

Математичний опис приводів. У маніпуляторах промислових робіт застосовуються електричні, гідравлічні та пневматичні позиційні приводи. Також можливе застосування крокових приводів та приводів з керуваннями муфтами та нерегульованими двигунами.

Математичний опис системи приводів маніпулятора – це залежність:

$$\mathbf{Q}_д = \mathbf{A}_п(\mathbf{U}_п), \quad (4.24)$$

де $\mathbf{Q}_д$ – вектор рушійних сил на виході приводів маніпулятора розмірності n , що рухають його ступені рухливості; $\mathbf{A}_п$ – оператор системи приводів; $\mathbf{U}_п$ – вектор керуючих впливів на вході цієї системи.

Що стосується переміщень q на виході приводів, то оскільки останні пов'язані загальною механічною системою маніпулятора, вони не є незалежними змінними і для їх знаходження необхідно вирішувати спільно систему рівнянь, що описують механічну систему з приводами.

Математичний опис двигуна окремого приводу з кутовим переміщенням має вигляд:

$$\begin{cases} J_д p \Omega_д = M_д - M_l, \\ (T_с p + 1) M_д = f(U_п, \Omega_д), \end{cases} \quad (4.25)$$

де $J_д$ – момент інерції; $M_д$ – момент, що розвиває двигун; M_l – момент навантаження на валу двигуна; $\Omega_д$ – кутова швидкість обертання двигуна; $T_с$ – стала часу електричного кола; $f(U_п, \Omega_д)$ – статична характеристика двигуна.

Залежність $f(U_{\pi}, \Omega_d)$ у лінійному наближенні має вигляд:

$$f(U_{\pi}, \Omega_d) = k_U U_{\pi} - k_{\Omega} \Omega_d, \quad (4.26)$$

де k_U – коефіцієнт передачі двигуна по напрузі; k_{Ω} – коефіцієнт передачі двигуна по швидкості.

При використанні цього виразу система (4.25) приводиться до рівняння:

$$(T_m T_e p^2 + T_m p + 1) \Omega_d = k U_{\pi} - \frac{T_e + 1}{k_{\Omega}} M_l, \quad (4.27)$$

$$\text{де } T_m = \frac{J_d}{k_{\Omega}}, \quad k = \frac{k_U}{k_{\Omega}}.$$

Для електричного двигуна T_e – це електромагнітна стала часу, яка зазвичай значно менше ніж електромеханічна стала часу T_m , яка визначається моментом інерції J_d . Якщо величиною T_e можна знехтувати, тоді за умови $T_e = 0$ рівняння (4.27) набуває вигляду:

$$(T_m p + 1) \Omega_d = k U_{\pi} - \frac{1}{k_{\Omega}} M_l, \quad (4.28)$$

Математичний опис приводу включає, крім двигуна, опис механічної передачі на виході (наприклад, редуктор) і пристрою керування. Для типової схеми приводу алгоритм, що реалізується його пристроєм керування, – це пропорційно-диференціальне (ПД), або рідше пропорційно-інтегрально-диференціальне (ПІД) керування.

При дослідженні динаміки маніпуляторів у «великому» необхідно враховувати нелінійність статичної характеристики двигуна – нечутливість та насичення, які обмежують швидкодію приводу.

Математичний опис маніпулятора з приводами. Математичний опис маніпулятора включає розглянуті залежності:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = f(\mathbf{q}), \\ \mathbf{q} = \mathbf{A}_m(\mathbf{Q}_d, \mathbf{Q}_v), \\ \mathbf{Q}_d = \mathbf{A}_{\pi}(\mathbf{U}_{\pi}), \end{cases} \quad (4.29)$$

де $\mathbf{A}_m$ і $\mathbf{A}_{\pi}$ – оператори механічної системи і системи приводів маніпулятора, $\mathbf{U}_{\pi}$ – вектор керуючих впливів на вході приводів.

Якщо скористатися рівнянням динаміки маніпулятора (4.10) та лінеаризованим рівнянням приводу, схема якого наведена на рис. 3.1, отримаємо систему рівнянь маніпулятора з приводами:

$$\begin{cases} \mathbf{A}(\mathbf{q})p^2\mathbf{q} + \mathbf{b}(p\mathbf{q}, \mathbf{q}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}_д - \mathbf{Q}_в, \\ \mathbf{Q}_д = \mathbf{W}_{п2}(p)\mathbf{U}_п - \mathbf{J}_д p^2\mathbf{q}, \\ \mathbf{U}_п = \mathbf{W}_{п1}(p)(\mathbf{q}_3 - \mathbf{q}) - \mathbf{W}_{п3}(p)p\mathbf{q}, \end{cases} \quad (4.30)$$

де $\mathbf{W}_{п2}(p)$ – передавальна матриця системи приводів, що зв’язує вектори $\mathbf{Q}_д$ і $\mathbf{U}_п$, $\mathbf{W}_{п1}(p)$, $\mathbf{W}_{п3}(p)$ – передавальні матриці послідовного і паралельного коригуючих ланок, $\mathbf{J}_д$ – діагональна матриця моментів інерції двигунів, що зведені до виходу приводів $\mathbf{q}$ (множенням на квадрат передавального відношення редуктора).

Системі рівнянь (4.30) відповідає структурна схема, наведена на рис. 4.9. У схему можуть бути включені різні нелінійності типу насичення, нечутливості, сухого тертя і т.п.

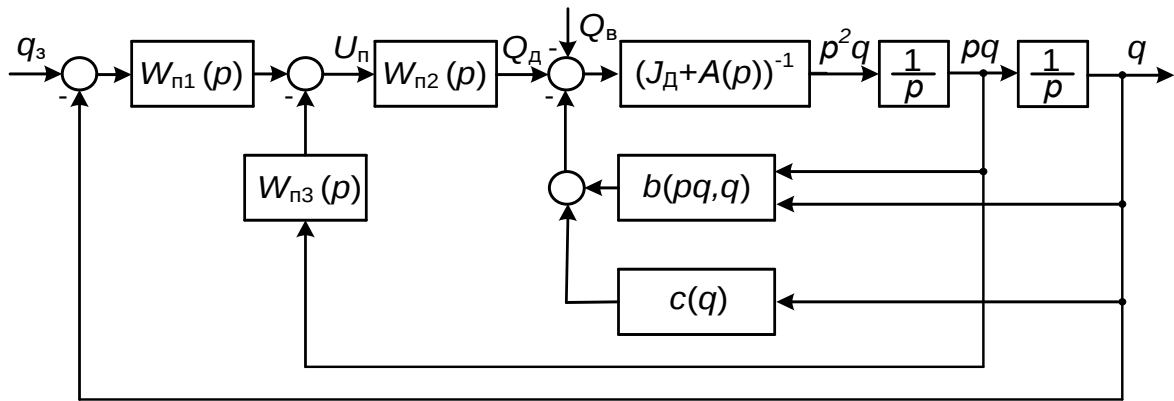


Рисунок 4.9 – Структурна схема маніпулятора з приводами

Виключивши з (4.30) проміжні змінні, отримаємо загальне рівняння:

$$\begin{aligned} [\mathbf{J}_д + \mathbf{A}(\mathbf{q})] p^2\mathbf{q} + \mathbf{b}(p\mathbf{q}, \mathbf{q}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}) = \\ = \mathbf{W}_{п2}(p)\mathbf{W}_{п1}(p)(\mathbf{q}_3 - \mathbf{q}) - \mathbf{W}_{п2}(p)\mathbf{W}_{п3}(p)p\mathbf{q} - \mathbf{Q}_в. \end{aligned} \quad (4.31)$$

При дослідженні конкретних режимів роботи маніпулятора можна спростити математичний опис системи (4.31).

1. При невисоких швидкостях руху (приблизно менше 0,5 м/с), коли динамічний взаємовплив приводів малий, можна знехтувати цим взаємовпливом за прискоренням та швидкістю, тобто недіагональними елементами матриці $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ та змішаними добутками швидкостей у виразі $\mathbf{b}(p\mathbf{q}, \mathbf{q})$.

У цьому випадку ліва частина рівняння (4.31) набуває вигляду:

$$[\mathbf{J}_д + \mathbf{J}_з(\mathbf{q})] p^2\mathbf{q} + \mathbf{b}(p\mathbf{q}, \mathbf{q}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}). \quad (4.32)$$

В рівнянні (8.32) $b(pq, q) = \sum_{i=1}^n b_{ii}(q)(pq_i)^2$, тобто не має членів $b_{ij}(q)\dot{q}_i\dot{q}_j$.

Діагональна матриця ефективних моментів інерції $\mathbf{J}_3(\mathbf{q}) = \text{diag}(J_{13}, J_{23}, \dots, J_{n3})$ відносно q_i i -ї та всіх наступних $(i+1), \dots, n$ ланок знаходиться виходячи з рівняння динаміки механічної системи маніпулятора (4.10) при заміні $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ на $\mathbf{J}_3(\mathbf{q})$:

$$J_{i3} = \frac{\partial Q_{di}}{\partial \ddot{q}_i}. \quad (4.33)$$

Відповідно цей вираз можна представити у вигляді:

$$J_{i3}(q) = \left(\frac{\partial \ddot{q}_i}{\partial Q_{di}} \right)^{-1} = [A^{-1}(q)]_{ii}^{-1}. \quad (4.34)$$

Крім того, при наявності в приводах редукторів з великим передаточним числом можна знехтувати величинами моменту інерції маніпулятора $J_{di}(q)$ в порівнянні з величинами моменту інерції приводу J_{di} і відповідно в рівнянні (4.31) знехтувати $\mathbf{A}(\mathbf{q})$.

2. При невисоких швидкостях руху перехідні процеси в приводах протікають значно швидше, ніж переміщення самого маніпулятора. Тому рівняння маніпулятора (4.31) можна розділити на два рівняння, які вирішуються незалежно: одне рівняння у вигляді рівняння (4.31) при $p = 0$ у його лівій частині та друге у вигляді другого та третього рівнянь системи (4.30).

3. Використовуючи метод «заморожених» коефіцієнтів, можна розбити робочу зону маніпулятора на ділянки, в яких члени $b(pq, q)$ і $c(q)$ рівняння динаміки маніпулятора будуть мати постійні значення q .

Математичний опис систем пересування роботів, як і їх маніпуляційних систем, складається з опису механічної системи та системи приводів. Якщо дальність пересування робота порівнянна з розміром робочої зони його маніпулятора, математичний опис системи пересування можна взагалі включити в опис маніпулятора шляхом додавання до нього ступеня рухливості системи пересування.

У загальному випадку, коли, як найчастіше і буває, маніпуляційна система і система пересування діють в різний час, в такому об'єднанні немає сенсу, так як обидві системи все одно повинні розглядатися окремо.

Загальна особливість приводів систем пересування роботів у тому, що їхній основний режим – це керування за швидкістю з переходом на позиційне керування при зупинках.

4.1.3. Комп'ютерне моделювання робототехнічних систем

Внаслідок складності робототехнічних систем основним засобом їх дослідження крім, зрозуміло, фізичного моделювання та натурних експериментів є комп'ютерне моделювання роботів при вирішенні завдань, як аналізу, так і синтезу.

Попередніми етапами такого комп'ютерного дослідження є вирішення двох завдань:

- підтвердження достовірності використовуваного математичного опису робота, тобто вирішення задачі ідентифікації;
- розробка комп'ютерної моделі та доказ її адекватності вихідному математичному опису.

Завдання ідентифікації включає етапи структурної та параметричної ідентифікації. У рамках структурної ідентифікації необхідно визначити суттєві властивості об'єкта дослідження, відкинувши ті, якими, виходячи з конкретних цілей майбутнього дослідження, можна знехтувати. В результаті визначається структура об'єкта. Насамперед тут треба розглянути і врахувати нелінійності, обмеження, пружності, взаємовплив ступенів рухливості маніпуляторів.

На етапі параметричної ідентифікації повинні бути встановлені з оцінкою точності чисельні значення всіх параметрів структурної схеми системи, які були визначені на попередньому етапі, діапазони їх зміни та інші кількісні залежності та характеристики.

Завдання розробки комп'ютерної моделі полягає у створенні програми чисельного розв'язання системи рівнянь, що описує об'єкт дослідження, на основі одного з відомих методів чисельного інтегрування. На рис. 4.10 дано узагальнену схему пакету програм для розглянутого раніше математичного опису маніпуляторів.

Пакет має модульну структуру і включає головну керуючу програму і набір підпрограм. Керуюча програма забезпечує введення вихідних даних, їх попередню обробку і формування завдань.

У блоці «Складання рівнянь кінематики» формуються матриці перерахунку координат, програми перерахунку абсолютних та відносних координат. У блоці «Рішення рівнянь кінематики» здійснюється розрахунок програмних траєкторій $q_z(t)$ по $x_p(t)$, тобто розв'язання оберненої задачі кінематики. У блоці «Складання рівнянь динаміки» обчислюються коефіцієнти рівняння динаміки для механічної системи маніпуляторів. У блоці

«Рівняння динаміки системи» формується права частина цього рівняння, включаючи приводи та пристрій керування робота, тобто для випадку замкнутої системи керування.

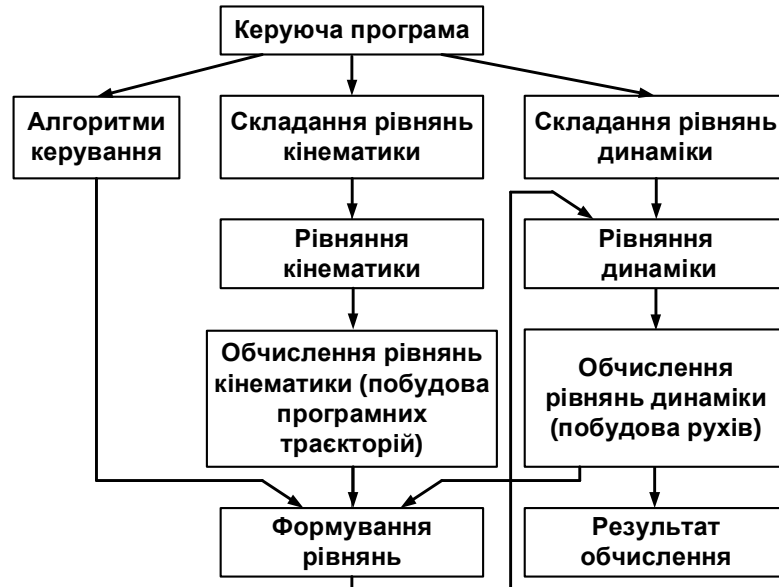


Рисунок 4.10 – Схема пакету програми моделювання маніпуляційних систем

Процес моделювання, наприклад програмного руху, протікає так: по дискретним значенням заданої траєкторії руху робочого органу і зусиль, що розвиваються, обчислюються відповідні задані значення відносних переміщень приводів та їх зусиль. Потім для цих значень обчислюються значення відпрацьованих змінних і відповідні похибки їх відпрацювання, а також при необхідності показники якості перехідних процесів. Далі можуть визначатися інші характеристики системи, що досліджується: чутливість до змін окремих параметрів, залежність якості керування від конфігурації маніпулятора і ваги корисного вантажу і т.п.

Описана послідовність відповідає розв'язанню задачі аналізу. Завдання синтезу – структурного та параметричного – вимагає, перш за все, вибору критеріїв якості. Потім вирішується оптимізаційна задача вибору змінюваної частини структурної схеми та її параметрів. Остання задача, внаслідок складності об'єкта дослідження, вирішується зазвичай шляхом послідовних наближень, починаючи з гранично спрощеної моделі з послідовним її ускладненням і відповідним уточненням рішення. Останні етапи

цього процесу часто виконуються за процедурою аналізу, тобто дослідження впливу нововведених елементів схеми та відповідної корекції раніше знайденого рішення задачі синтезу, в тому числі і шляхом введення додаткових коригувальних ланок, тобто зміни структури системи.

4.2. Алгоритми програмного керування роботами

4.2.1. Алгоритм циклового програмного керування

Циклове керування окремим приводом. Процес циклового програмного керування окремими пневматичними приводами складається з трьох етапів: розгону, руху з постійною швидкістю і гальмування при досягненні упору (рис. 4.11). Тривалість другого етапу (усталеного руху з постійною швидкістю) визначається величиною заданого переміщення приводу. При незначній величині переміщення другий етап може бути відсутнім (на рисунку показано пунктиром).

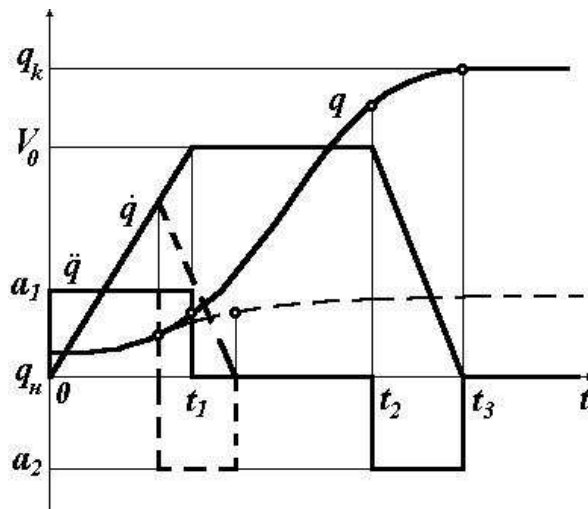


Рисунок 4.11 – Процес циклового керування приводом

Наведений на рисунку трапецеїдальний закон зміни швидкості описується системою рівнянь:

$$\ddot{q}(t) = \begin{cases} a_1 = \text{const} & \text{при } t \leq t_1 \\ 0 & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \\ a_2 = \text{const} & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (4.35)$$

де $\ddot{q}(t)$ – узагальнене прискорення, a_1 і a_2 – прискорення розгону і гальмування. Для узагальнених швидкостей система рівнянь (4.35) запишеться у вигляді:

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} a_1 t & \text{при } t \leq t_1 \\ V_0 & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \\ V_0 - a_2(t - t_2) & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (4.36)$$

де $V_0 = a_1 t_1$ – усталена швидкість.

Система рівнянь (4.35) відповідає спрощеному опису процесу циклового керування без урахування динаміки демпфера, можливої пружності механічної передачі та без урахування перехідних процесів руху робочого тіла у трубопроводах. Все це необхідно враховувати під час математичного опису приводу для виконання точних кількісних розрахунків.

Особливо важливо враховувати пружні деформації, які створюють коливання в циклових приводах при їх розгоні та гальмуванні. Найбільш небажані коливання, що виникають при гальмуванні приводу, так як вони затягують процес його зупинки і, отже, знижують швидкодію. Коливання, що виникають на етапі розгону приводу, зазвичай встигають загаснути на момент його гальмування, і тому менш шкідливі. Однак, якщо тривалість етапу руху з постійною швидкістю мала, обидва ці типи коливань можуть скластися, що ускладнить процес гальмування.

Оскільки при цикловому керуванні гальмування приводу здійснюється демпфером при наїзді ним на упор, гасіння при цьому можливих коливань – завдання налаштування демпфера, тобто підбору величини створюваної ним сили в'язкого тертя.

Хоча циклове керування – це найпростіший спосіб однокрокового дискретного керування, його не слід розглядати як вироджений варіант багатокрокового дискретного позиційного керування. Системи циклового керування принципово відрізняються від них методом позиціювання за допомогою механічних упорів. Це забезпечує цикловим системам значно більшу точність і швидкодію. Максимальна швидкодія забезпечується за рахунок релейного керування, що реалізує трапецеїдальну тахограму.

Спільне циклове керування приводами маніпулятора. Особливістю спільного керування приводами маніпуляторів є необхідність урахування їх взаємовпливу. Розглянемо цей вплив на прикладі маніпулятора з циліндричною системою координат, типової для роботів з цикловим керу-

ванням. Як було показано раніше (рис. 4.4) у такому маніпуляторі має місце взаємний вплив приводів повороту φ і висування стріли r . На координату r діє відцентрова сила, пропорційна швидкості $\dot{\varphi}$, а на координату φ – коріолісова сила, пропорційна зі зворотним знаком доданку $\dot{\varphi}r$. В результаті при одночасному повороті колони маніпулятора і висуванні його стріли відцентрова сила прискорюватиме висування по r , а коріолісова сила – уповільнювати поворот φ .

Звідси випливає, що для підвищення швидкодії при виконанні маніпулятором спільного руху привод стріли потрібно включати якомога пізніше включення приводу повороту колони. В цьому випадку буде максимальний ефект прискорення висування стріли за рахунок відцентрової сили та мінімальне гальмування повороту колони коріолісовою силою. Іншими словами, умовою максимальної швидкодії в цьому випадку буде початок руху по φ з наступним включенням приводу r із затримкою за часом, що забезпечує одночасне завершення обох рухів.

При виконанні спільного руху приводів φ і r , коли координата r повинна зменшуватися, алгоритм оптимального спільного керування цими приводами буде відповідно іншим. В цьому випадку слід максимально затримати початок повороту колони щодо руху стріли.

Що стосується приводу підйому z , то, оскільки між ним і приводами φ і r взаємний вплив відсутній, момент його включення, коли потрібен рух і по z , повинен вибиратися з дотриманням однієї умови: цей рух повинен закінчитися до моменту закінчення рухів двох інших приводів, не збільшуючи тривалість циклу руху маніпулятора.

Розглянемо особливості оптимального з погляду швидкодії спільного керування промисловим роботом ПР з двома подібними маніпуляторами для обслуговування преса холодного штампування (рис. 4.12). ПР лівим маніпулятором бере чергову заготовку з магазину М1 і кладе її в прес П. Одночасно правий маніпулятор виймає з преса відштампований виріб і кладе його у магазин М2.

При цьому приводи кожного маніпулятора здійснюють по 6 рухів:

1. Висунення стріли та захоплення об'єкта маніпулювання.
2. Втягування стріли.
3. Поворот за годинниковою стрілкою.
4. Висунення стріли зі звільненням об'єкта.

5. Втягування стріли.

6. Поворот проти годинникової стрілки у вихідну позицію.

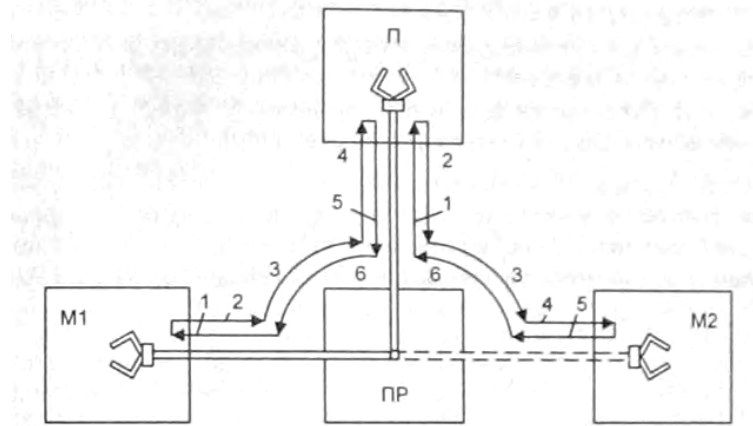


Рисунок 4.12 – Схема технологічного комплексу холодної штамповки

Одночасно в крайніх позиціях може знадобитися вертикальне переміщення маніпуляторів.

Взаємовплив приводів повороту колони і висування стріли визначає оптимальний за швидкодією алгоритм керування обома маніпуляторами: втягування стріли одного маніпулятора має починатися одночасно з його поворотом, а початок висування стріли іншого маніпулятора має бути затримано настільки, щоб воно закінчувалося одночасно з поворотом.

Синтез керуючих програм для систем циклового керування зводиться до визначення величин оптимальних витримок часу між моментами включення приводів і відповідного значення мінімального часу всього циклу роботи при виконанні конкретної технологічної операції. Це здійснюється за допомогою комп'ютерного моделювання на основі опису динаміки маніпулятора. При цьому вибирається величина затримки включення приводів і обчислюється тривалість всього циклу роботи. В результаті знаходять залежність тривалості циклу від величини затримки та оптимальне значення величини затримки, що відповідає мінімальній тривалості циклу.

4.2.2. Алгоритм дискретного позиційного керування

Дискретне позиційне керування окремим приводом. Процес переміщення в позиційних приводах на черговий крок, як і в циклових приводах, складається з етапів розгону, руху з постійною швидкістю і гальму-

вання (рис. 4.11). Принциповою відмінністю робіт з позиційним керуванням від робіт з цикловим керуванням є необхідність забезпечення необхідної якості позиціювання за рахунок реалізації закону керування.

Основний варіант алгоритму дискретного позиційного програмного керування приводом відповідає структурній схемі слідкувальної системи, що була розглянута в розділі 3 (рис. 3.1). Ця схема послідовно відпрацьовує задані збільшення (приріст) керованої вихідної координати q_i . Схема може бути доповнена засобами корекції, що компенсують вплив зовнішніх збурень і насамперед навантаження.

Синтез оптимального за швидкодією алгоритму керування призводить до необхідності застосування релейного керування. Оскільки система двохпозиційного релейного керування нестійка в малому, при підході до точок позиціювання необхідно переходити на інший алгоритм керування. У результаті виходить система так званого дуального керування зі змінною структурою (рис. 4.13).

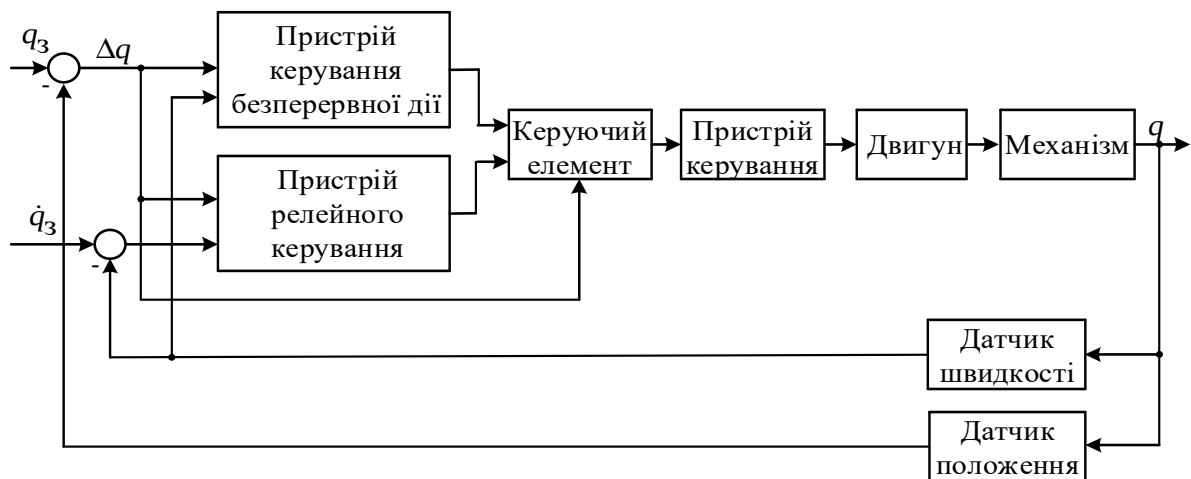


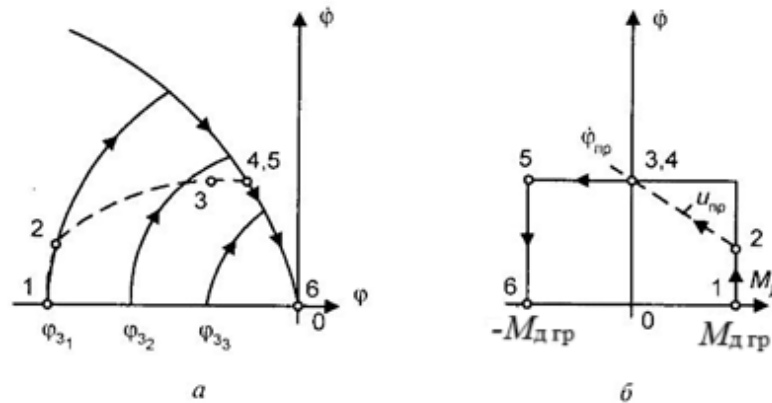
Рисунок 4.13 – Схема системи дуального керування приводом

Пристрій керування безперервної дії включається поблизу чергової точки позиціювання, тобто при малому розузгодженні $\Delta q = q_3 - q$, забезпечуючи стійкість і точність позиціювання в заданій точці. Пристрій релейного керування включається в момент подачі програмного задання на черговий крок, а також при виникненні великих розузгодженностей. Керуючий елемент може бути реалізований, наприклад, за допомогою керованих ключів, що здійснюють форсування двигуна у відповідні інтервали часу.

Спочатку розглянемо алгоритми релейного керування. На рис. 4.14 показаний процес оптимального за швидкодією релейного керування електричним приводом, що описується двома диференціальними рівняннями першого порядку з обмеженнями по вхідній напрузі і по рушійному моменту (струму).

Відповідно до теорії оптимального керування оптимальний за швидкодією алгоритм керування напругою на вході приводу складається з трьох інтервалів:

- на першому інтервалі граничне значення має момент двигуна $M_d = M_{д гр}$;
- на другому інтервалі граничне значення має напруга на обмотці якоря двигуна $U_a = U_{а гр}$;
- на третьому інтервалі граничне значення має момент двигуна M_d , але зі зворотним знаком $M_d = -M_{д гр}$.



a – фазові траєкторії b – механічні характеристики

Рисунок 4.14 – Релейне керування позиційним електроприводом

Для двигуна постійного струму незалежного збудження змінні, що обмежуються, пов'язані з напругою на обмотці якоря відомими виразами:

$$\begin{aligned} U_a &= R_a I_a + K\Phi\Omega, \\ M_d &= K\Phi I_a, \end{aligned} \quad (4.37)$$

де U_a – напруга на обмотці якоря; I_a – струм обмотки якоря, який має обмеження $I_{а гр}$; R_a – опір обмотки якоря; K – конструктивний коефіцієнт двигуна; Ω – кутова швидкість обертання якоря; Φ – магнітний потік обмотки збудження.

На фазовій площині (рис. 4.14, a) суцільними лініями показані оптимальні за швидкодією процеси руху при відпрацюванні заданих кутів пово-

роту φ_3 вихідного валу двигуна при обмеженні по рушійному моменту. Вони складаються з парабол, що виходять з початкових точок $(\varphi_3, 0)$ на осі абсцис, і загальної параболи, що описує етап гальмування (лінії перемикавання). Пунктиром показаний процес, що відповідає наявності обмеження швидкості.

Рівняння функції перемикавання:

$$\Psi(\dot{\varphi}, \varphi) = 0 \quad (4.38)$$

При виконанні умови $R_a I_{a \text{ гр}} \leq U_{a \text{ гр}}$ отримаємо:

$$\Psi(\dot{\varphi}, \varphi) = \varphi_3 - \varphi - K_1 \dot{\varphi}^2 \text{sign } \dot{\varphi}, \quad (4.39)$$

де $K_1 = \frac{J_l + i^2 J_d}{2iM_{д \text{ пр}}}$, i – передавальне відношення редуктора, J_d і J_l – моменти

інерції якоря двигуна і механізму навантаження.

Алгоритм керування двигуном являє собою двопозиційне релейне керування з вхідним сигналом $\pm U_{a \text{ гр}}$. Знак цього сигналу визначається знаком функції перемикавання (4.14). Обмеження струму при цьому здійснюється за допомогою сигналу зворотного зв'язку за струмом. При досить сильному зворотному зв'язку струм і момент двигуна практично безінерційно будуть стежити за вхідною напругою U_a , реалізуючи режим керування двигуном за моментом.

Ділянка 1–2 на рис. 4.14 відповідає етапу розгону з постійним прискоренням при $M_d = M_{д \text{ гр}}$; ділянка 2–3 – продовження етапу розгону за умови $U_a = U_{a \text{ гр}}$, коли зі зростанням проти-ЕРС напруга на якорі досягла свого граничного значення; ділянка 3–4 – етап руху з постійною швидкістю, який може виникати за досить великої тривалості процесу розгону на ділянці 2–3; ділянка 4–5 – момент переходу до етапу гальмування реверсуванням струму якоря і відповідно моменту; ділянка 5–6 – етап гальмування при $M_d = -M_{д \text{ гр}}$.

Неминучі похибки реалізації описаного оптимального алгоритму керування затягують перехідний процес. При завищенні коефіцієнта пропорційності K_1 у виразі функції перемикавання (4.38) зростає монотонність і тривалість перехідного процесу внаслідок недовикористання двигуна, а при зменшенні коефіцієнта K_1 виникає коливальність з перевантаженням двигуна.

Якщо в приводі є суттєві пружні деформації, алгоритм оптимального за швидкодією релейного керування ускладнюється збільшенням числа перемикань релейного вхідного сигналу. У цьому випадку застосовуються

спрощені квазіоптимальні алгоритми, що призводять до зниження швидкодії і також складаються з трьох етапів керування:

- розгін з гранично допустимим прискоренням аж до граничної швидкості при досить великому заданому переміщенні;
- рух із постійною швидкістю;
- гранично швидке гальмування.

У цьому випадку оптимізації підлягають лише моменти переходу від одного етапу до іншого, що реалізується вибором функції перемикавання.

Перехід від релейного керування до каналу безперервного керування здійснюється при підході до точки позиціювання. Внаслідок малості відхилення від точки позиціювання дослідження каналу безперервного керування можна проводити із застосуванням рівнянь, лінеаризованих щодо цієї точки.

Головна складність синтезу алгоритму такого керування пов'язана з нестационарністю параметрів навантаження механічної системи маніпулятора, тобто зі зміною параметрів маніпулятора при зміні конфігурації під час переміщення його робочого органу за програмною траєкторією.

Принципово тут можливі два шляхи вирішення проблеми:

- застосування засобів динамічної корекції, що забезпечують область параметрів необхідної якості керування;
- підстроювання пристрою керування приводу при зміні параметрів його навантаження та інших можливих збуреннях.

В останньому варіанті є такі способи підстроювання:

- за програмою, розрахованою заздалегідь за заданим програмним рухом, тобто у функції часу;
- у функції поточного значення керуючого впливу $q_3(t)$;
- у функції фактичного значення $q(t)$. В точках позиціювання задане і фактичне значення практично збігаються;
- адаптивне підстроювання в функції обраного показника якості керування.

Спільне дискретне позиційне керування приводами. Це тактичний рівень керування маніпулятором, який при програмному керуванні здійснює координоване керування приводами окремих ступенів рухливості. Переміщення робочого органу маніпулятора забезпечується за послідовністю точок, заданих у вигляді програмної дискретної траєкторії з зупинкою в кожній точці в задані моменти часу t_k . Цей алгоритм реалізується подачею

на приводи завдань у вигляді дискретних програм $q_3(t_k)$, які знаходяться по $x_{p3}(t_k)$ рішенням оберненої задачі кінематики маніпулятора:

$$q_3(t_k) = f^{-1}[x_{p3}(t_k)]. \quad (4.40)$$

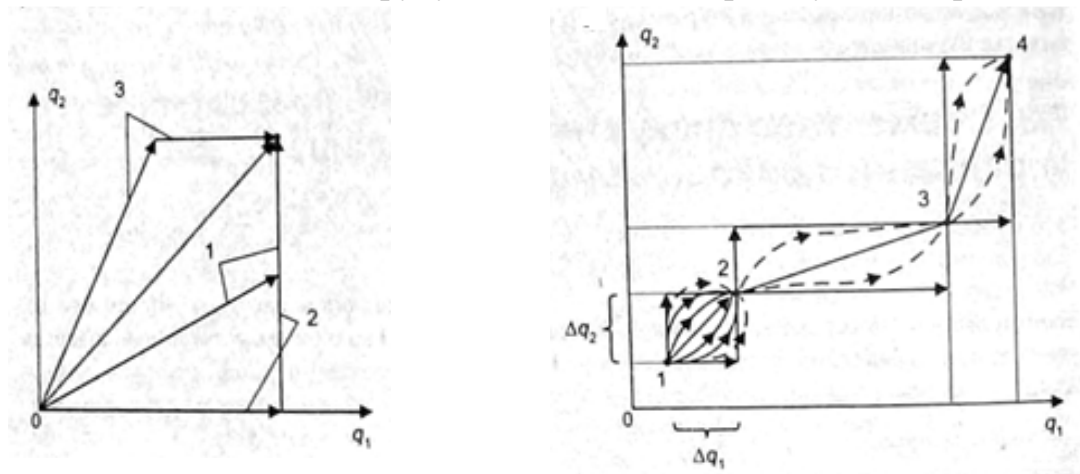
Ці задання формуються у вигляді послідовності прирощень відносних координат $\Delta q_3 = q_3(t_k) - q_3(t_{k-1})$ і часу відпрацювання кожного кроку $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$.

В результаті відпрацювання всіма приводами чергового кроку робочий орган маніпулятора переміститься в наступну точку дискретної програмної траєкторії із заданою орієнтацією.

На відміну від процесу керування окремим приводом при одночасному керуванні приводами всіх ступенів рухливості необхідно враховувати їхній взаємовплив через загальну механічну систему маніпулятора. Оскільки йдеться про програмне керування, цей взаємовплив можна врахувати при програмуванні шляхом коригування програм та програмної зміни налаштування систем керування приводами.

Розглянемо, як залежить взаємовплив приводів від характеру їхнього відносного руху і як за допомогою коригування цих рухів можна за необхідності послабити такий вплив. На рис. 4.15 наведена двокоординатна дискретна траєкторія, що реалізується відповідно за допомогою двох приводів цих координат q_1 і q_2 . Час t є параметром.

Спочатку розглянемо процес керування на кінематичному рівні, тобто при досить малих швидкостях руху, коли можна не враховувати інерцію.



а – кінематичний режим

б – динамічний режим

Рисунок 4.15 – Двокоординатні дискретні траєкторії позиційного керування

На рис. 4.15, *а* показані варіанти траєкторій між програмними точками, що відповідають різним співвідношенням швидкостей приводів. При збільшенні швидкості першого приводу щодо швидкості другого траєкторія руху опускається (лінія 1) у межі до ламаної лінії, що складається з горизонтальної та вертикальної ділянок (лінія 2). При збільшенні швидкості другого приводу траєкторія навпаки підніматиметься вгору (лінія 3). Очевидно, що траєкторія буде прямою лінією при виборі значень швидкостей приводів пропорційно до величин заданих переміщень. В цьому випадку обидва приводи одночасно закінчать свій рух і зупиняться, а траєкторія матиме мінімальну довжину.

При цьому в динаміці взаємовплив приводів буде мінімальним, тому що при одночасному гальмуванні приводів їхній взаємний вплив один на одного під час позиціювання в заданих точках знижуватиметься. Якщо переміщення з точки 1 в точку 2 (рис. 4.15, *б*) відбувається по увігнутій траєкторії, перший привод почне гальмуватися, коли другий ще рухається з найбільшою швидкістю. В результаті якість позиціювання першого приводу може бути погіршена збуреннями другого приводу. Таким чином, щоб мінімізувати взаємовплив приводів при їхньому позиціюванні, слід при програмуванні встановлювати на кожному кроці руху значення швидкостей пропорційно заданим переміщенням.

Цей висновок зроблено за умови нехтування інерцією приводів. Її вплив і відмінність у динамічних характеристиках приводів позначаються на траєкторіях (рис. 4.15, *б*) майже до «викидів» за межі прямокутників, обмежених вертикальними і горизонтальними лініями (пунктирні лінії між точками 1 і 2). Тому в загальному випадку з урахуванням динаміки приводів для забезпечення їх одночасного гальмування можуть знадобитися інші співвідношення програмних значень швидкостей, на відміну від кінематичного режиму.

Якщо вибором програмних рухів приводів звести до мінімуму їх взаємовплив, система програмного керування маніпулятора розпадається на практично автономні системи керування окремих приводів. Небажаний взаємовплив приводів можна компенсувати перехресними коригуючими зв'язками.

Дослідження динаміки та синтез алгоритмів дискретного позиційного програмного керування складається з наступних етапів:

1. Складання математичної (комп'ютерної) моделі механічної системи та незмінних частин приводів.

2. Аналіз цієї моделі з метою визначення діапазонів можливої зміни його параметрів, гнучких деформацій та взаємовпливу ступенів рухливості. Маються на увазі діапазони зміни параметрів механічної системи та корисного вантажу, в рамках яких має бути забезпечена необхідна якість керування. Взаємовплив приводів враховується при завданні діапазонів зміни збурень.

3. Декомпозиція системи керування шляхом її розбиття на системи керування окремих приводів та їх автономний синтез.

4. Синтез алгоритму загальносистемного рівня керування системою приводів маніпулятора.

5. Аналіз впливу неврахованих раніше нелінійностей та інших особливостей системи, включаючи взаємовпливи та гнучкі деформації з коригуванням раніше отриманих результатів.

6. Вибір та відпрацювання способу програмування системи керування. Керуюча програма, що реалізує необхідну дискретну траєкторію руху робочого органу маніпулятора, може бути синтезована двома способами. Перший спосіб полягає у вирішенні оберненої задачі кінематики маніпулятора на основі його комп'ютерної моделі. Другий спосіб – навчання. Людина-оператор, керуючи послідовно окремими приводами через його пристрій керування, виводить робочий орган маніпулятора в задані точки позиціонування і заносить в пам'ять пристрою керування відповідні показання датчиків положення приводів. Сукупність цих даних і становитиме керуючу програму, яка потім буде відтворена.

4.2.3. Алгоритм безперервного позиційного керування

Особливості безперервного керування роботами. У роботах з безперервним позиційним керуванням рух робочого органу маніпулятора повинен здійснюватися за програмною траєкторією із забезпеченням динамічної точності по всій траєкторії руху. Однак, якщо подати на приводи маніпулятора програмні траєкторії $q_3(t)$, які розраховані за заданою програмною траєкторією його робочого органу $x_{p3}(t)$ шляхом вирішення оберненої задачі кінематики:

$$q_3(t) = f^{-1}[x_{p3}(t)], \quad (4.41)$$

то їх відпрацювання відбудеться з динамічним запізненням (рис. 4.16).

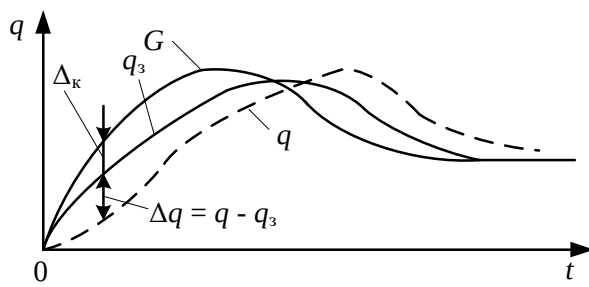


Рисунок 4.16 – Динамічне запізнювання $q(t)$ під час відпрацювання програмної траєкторії $q_3(t)$

Помилка Δq буде тим більшою, чим вища швидкість руху. Зменшення величини помилки можливе двома способами.

По-перше, корекція програмної траєкторії руху шляхом формування додаткового коригуючого впливу для компенсації динамічного запізнення. В результаті приводи будуть відпрацьовувати керуючу програму:

$$G(t) = q_3(t) + \Delta_k(t), \quad (4.42)$$

де $\Delta_k(t)$ – динамічна корекція.

Керуючу програму можна розрахувати шляхом вирішення оберненої задачі динаміки з математичного опису маніпулятора з приводами:

$$\begin{cases} \mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}_d, \\ \mathbf{Q}_d = \mathbf{A}_\pi(\mathbf{U}_\pi). \end{cases} \quad (4.43)$$

Підставивши в (4.43) замість $q(t)$ задану програмну траєкторію $q_3(t)$, знайдену по $x_{pz}(t)$ рішенням оберненої задачі кінематики, знаходимо шукану керуючу програму $U_{pz}(t)$.

По-друге, підвищення швидкодії системи автоматичного керування шляхом введення в неї динамічної корекції, яка формуватиметься безпосередньо в ході відпрацювання заданої програмної траєкторії, що подається на вхід системи.

Другий спосіб значно складніше, оскільки ігнорується апріорне знання траєкторії, що підлягає реалізації, проте при цьому спрощується програмування робота, яке зводиться до кінематичного синтезу програмної траєкторії для приводів.

У системах безперервного керування розрізняють два варіанти програмування: кінематичне та динамічне.

Кінематичне програмування відповідає малим швидкостям руху робочого органу (менше 0,5 м/с), коли динамічною похибкою відпрацювання програмної траєкторії можна знехтувати.

Динамічне програмування застосовується при великих швидкостях, коли необхідно вводити динамічну корекцію в керуючу програму, тобто при її розрахунку аналітично вирішувати обернену задачу динаміки, а не кінематики, як у першому випадку.

Безперервне керування окремим приводом. Типова схема приводу з безперервним керуванням (як і з дискретним позиційним) відповідає структурній схемі слідувальної системи (рис. 3.1). Однак режим її роботи і вимоги, що висуваються, відмінні від дискретних систем, оскільки система контурного керування повинна безперервно підтримувати відповідність завданню не тільки по переміщенню q , але і по швидкості $\dot{q}$.

У безперервних системах також може застосовуватися дуальне керування як поєднання безперервного керування з релейним керуванням. Однак у системах дискретного керування основний час руху посідає релейне керування, а перехід до безперервного керування здійснюється лише поблизу точок позиціонування. У системах контурного керування основним режимом є безперервне керування, а перехід до релейного керування здійснюється епізодично при виникненні великих відхилень від програмної траєкторії руху. Як правило, у системах безперервного керування застосовується додаткова релейна приставка, що підключається за певної величини розузгодженості $\Delta q_i = q_{i3} - q_i$.

Розглянемо алгоритми динамічної корекції приводу, що забезпечують необхідну компенсацію помилки відпрацювання заданої програмної траєкторії. Принципово можливі такі способи корекції:

- корекція програмної траєкторії;
- послідовна корекція у прямому каналі вхідного керуючого впливу;
- паралельна корекція в каналі зворотного зв'язку за похибкою відпрацювання вхідного сигналу.

Перший спосіб застосовується лише в системах програмного керування, і був розглянутий вище. Наступні два способи динамічної корекції можуть застосовуватися не тільки в системах програмного керування.

Послідовна коригуюча ланка (рис. 4.17) повинна здійснювати компенсацію інерційності і не ідеальності приводу, в результаті чого повинна забезпечуватися рівність $q = q_3$. Цю ланку часто називають компенсатором.

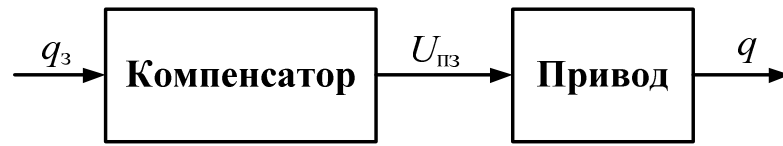


Рисунок 4.17 – Послідовна динамічна корекція привода

Якщо оператор цієї ланки A_k буде обернений до оператора приводу, тобто $A_k = A_{\pi}^{-1}$, то загальний оператор приводу з компенсатором $A_k A_{\pi} = 1$. При цьому привід без спотворення повторюватиме на виході q вхідний сигнал q_z з кінцевою точністю, яка визначається точністю відповідності оператора A_k реальному приводу.

Практично компенсатор як будь-яка послідовна коригуюча ланка не дозволяє реалізувати повну компенсацію не ідеальності коригованого об'єкта через неминучу неточність математичної моделі об'єкта, а перекомпенсація при цьому веде до нестійкості. Крім того, компенсатор виконує свої функції тільки при достатньо обмежених за величиною вхідних впливах, при яких приводи маніпулятора не виходять в насичення і не перестають керуватися. При цьому дія самого компенсатора як ланки, що здійснює форсуючу дію на приводи для подолання інерційності, сприяє цьому. Тому налаштування компенсатора завжди роблять із запасом у вигляді недокомпенсації і він розглядається тільки як засіб поліпшення динамічних властивостей об'єкта керування, у той час як керування має здійснюватися за розузгодженістю $\Delta q = q_z - q$, тобто за допомогою пристроїв керування з негативним зворотним зв'язком.

Розглянемо другий спосіб динамічної корекції за допомогою зворотних зв'язків. У типовій схемі приводу (рис. 4.1) має місце внутрішній зворотний зв'язок по швидкості, що забезпечує необхідну якість перехідних процесів. При досить малих швидкостях програмного руху ця корекція може бути достатньою для забезпечення заданої динамічної точності відпрацювання вхідного впливу. Однак при підвищенні вимог до швидкодії потрібна додаткова корекція.

При цьому необхідно враховувати такі особливості приводів маніпуляторів:

- можлива наявність гнучких ланок, що призводить до виникнення пружних деформацій;
- нестационарність навантаження з боку механічної системи маніпулятора, включно з корисним навантаженням його робочого органу;
- наявність взаємовпливу приводів.

Пружні деформації і коливання, що викликаються ними при безперервному керуванні можуть виникати при різких змінах напрямку або швидкості руху по траєкторії, а також при впливі зовнішніх збурень. При досить плавній траєкторії та відсутності значних збурень вони практично відсутні.

Методи боротьби з цими коливаннями в частині керування передбачають введення в пристрій керування приводу додаткових налагоджувальних параметрів, спеціально призначених для придушення пружних коливань. Ця можливість заснована на тому, що частоти пружних коливань зазвичай вищі за спектр частот програмних рухів. Тому при синтезі алгоритму керування можна спочатку вважати механічну систему жорсткою. Потім в математичній моделі враховується гнучкість ланок і здійснюється синтез контурів з додатковими параметрами, що змінюються. Це забезпечує частотне підстроювання програмного руху.

Додаткові налагоджувальні параметри реалізуються введенням демпфуючих зворотних зв'язків за пружними деформаціями (наприклад, за швидкістю, що створює штучну в'язкість), за пов'язаними з ними іншими змінними або із застосуванням спостерігачів, що здійснюють розрахунок деформацій за цими змінними. Іншим способом зниження пружних коливань є корекція самих програмних траєкторій шляхом їх згладжування, щоб не збуджувати ці коливання.

Для зниження пружних коливань при різких змінах програмної траєкторії можна знижувати швидкодію приводу програмно або за допомогою послідовної коригувальної ланки. При цьому збільшення динамічної похибки дозволить погасити найбільші та тривалі коливання. В результаті похибка відпрацювання програмної траєкторії може бути значно знижена.

При нестационарності параметрів навантаження приводів задача керування полягає в тому, щоб у всьому діапазоні зміни цих параметрів, забезпечити не тільки стійкість, але також необхідну якість перехідних процесів і точність відпрацювання програмної траєкторії. Для вирішення цього завдання необхідно:

- розширення областей стійкості та якості у просторі змінних параметрів за допомогою додаткових коригувальних пристроїв;
- введення автоматичного підстроювання пристроїв керування на необхідну якість перехідних процесів;
- перехід до принципово нових алгоритмів керування, які забезпечують робастність, тобто структурну нечутливість якості керування до змін параметрів системи та інших збурень.

Перший спосіб застосовується при зміні параметрів в досить обмеженому діапазоні і тому не дає загального рішення, на відміну від двох наступних способів. Його реалізація вимагає синтезу алгоритму керування з вибором корекції, що забезпечує при фіксованому налаштуванні збереження необхідної якості керування у всьому діапазоні зміни параметрів.

Введення автоматичного підстроювання дозволяє забезпечити більш високу якість керування і в більшому діапазоні зміни параметрів. У безперервних системах керування застосовуються ті ж види підстроювання, що і в дискретних позиційних: програмне підстроювання, підстроювання функції q_z або q і адаптивне підстроювання. Крім того для безперервних систем застосовуються і більш досконалі способи підстроювання, засновані на алгоритмах штучного інтелекту.

Робастні системи керування – це системи, які мають структуру, тобто алгоритм керування, що забезпечує принципову незалежність (інваріантність) якості керування від значень параметрів навантаження і збурень. Для приводів маніпуляторів це означає нечутливість до зміни конфігурації його механічної системи, до зміни корисного навантаження в робочому органі і до взаємовпливу приводів. Таке керування робить приводи для рівня їх спільного керування автономними і стаціонарними.

Для систем керування роботами найбільш поширені два типи таких систем:

- система керування із зворотним зв'язком за прискоренням;
- релейна система керування.

Прискорення, як відомо, є ознакою та мірою порушення балансу сил, які діють на систему, тобто мірою будь-яких збурень – зовнішніх чи внутрішніх, включаючи параметричні. Тому пристрій керування зі зворотним зв'язком по прискоренню парює будь-які збурення, стабілізуючи режим керованого ним об'єкта і підтримуючи рівність $q = q_z(t)$.

Розглянемо отримання ефекту робастності за допомогою гранично сильного зворотного зв'язку по відхиленню – релейного зворотного зв'язку. Як відомо, негативний зворотний зв'язок послаблює вплив всіх зовнішніх і внутрішніх збурень, включаючи нестабільність параметрів та перешкоди. Цей ефект зростає із посиленням зворотного зв'язку. При збільшенні коефіцієнта зворотного зв'язку в межі виходить релейний зворотний зв'язок, який еквівалентний ланці безперервної дії з коефіцієнтом передачі рівним нескінченності. Отже, такий гранично сильний зворотний зв'язок має відповідно забезпечити і граничну незалежність об'єкта, що ним охоплюється від будь-яких збурень, тобто в даному випадку – робастність приводу.

Розглянуті методи динамічної корекції застосовуються зазвичай разом. На рівні керування окремими приводами спільне застосування послідовної корекції та зворотних зв'язків дозволяє спростити алгоритми реалізації кожного з цих способів, отримавши при цьому якість керування, недосяжну при застосуванні тільки одного з них.

Спільне безперервне керування приводами. Це тактичний рівень керування маніпуляторами, основне завдання якого – координація приводів окремих ступенів рухливості для забезпечення руху робочого органу маніпулятора за заданою траєкторією (як і для дискретного позиційного керування). Однак для систем безперервного керування необхідно контролювати не тільки положення робочого органу, а й вектор швидкості для забезпечення необхідної точності руху за програмною траєкторією.

Алгоритм спільного керування приводами залежить від алгоритмів керування окремими приводами. Якщо приводи мають автономні робастні системи керування, функція рівня спільного керування зводиться до мінімуму – до видачі на приводи програмних траєкторій $q_{iz}(t)$. Синтез цих траєкторій здійснюється на етапі програмування (аналітично – шляхом вирішення оберненої задачі кінематики або експериментально – методами навчання).

Якщо приводи не робастні, але в них є динамічна корекція програмного руху, що дозволяє подавати на них завдання у вигляді програмної траєкторії $q_{iz}(t)$, функція рівня спільного керування доповнюється тільки заданням загальної корекції і компенсації взаємовпливу приводів. Те саме відноситься і до випадку, коли в приводах немає вказаної динамічної корекції, і вона вводиться в керуючу програму. За відсутності динамічної корекції в приводах функція тактичного рівня керування доповнюється здійсненням динамічної корекції всієї системи приводів.

На загальносистемному рівні також застосовуються способи послідовної корекції та корекції за допомогою зворотних зв'язків. У цьому випадку вихідними змінними відповідно є вектор положення робочого органу x_p або кінематично зв'язаний з ним вектор $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ та вектор зусилля на робочому органі Q_p .

На рис. 4.18. наведено схему системи програмного керування маніпулятором з послідовною корекцією (з компенсатором). Пристрій керування приводами виконується за найпростішою типовою схемою з внутрішнім зворотним зв'язком по швидкості і релейною приставкою.

Безперервний пристрій керування здійснює функції регулятора, що підтримує рівність $q = q_3$. Перемикач переключає на релейне оптимальне за швидкодією керування при виникненні великих розузгодженостей $\Delta q = q_3 - q$. Компенсатор не забезпечує повну компенсацію, проте розв'язує приводи і робить їх практично автономними. При цьому знімається необхідність підстроювання та забезпечується компенсація нестабільності параметрів навантаження. Це гранично спрощує загальносистемний алгоритм безперервного пристрою керування.

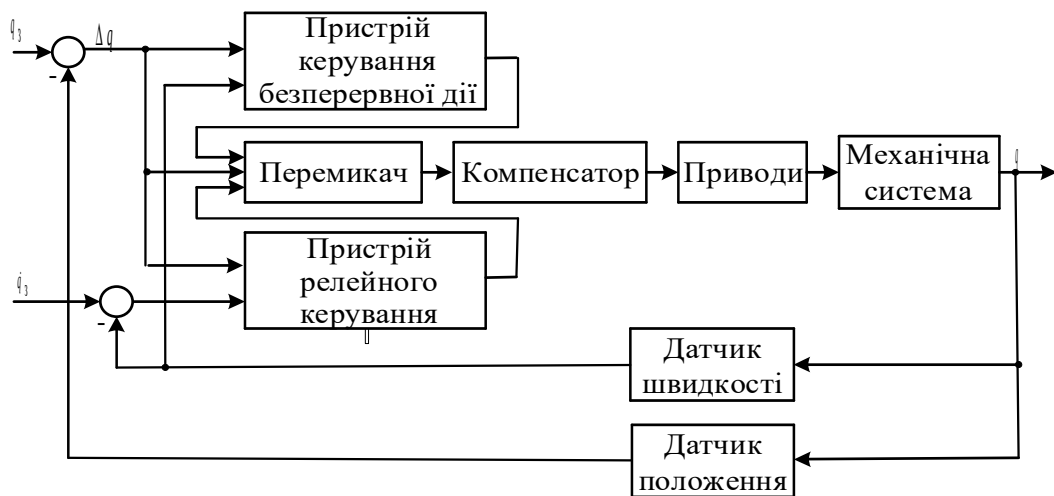


Рисунок 4.18 – Схема системи безперервного керування маніпулятором

Задання динамічної корекції системи керування маніпулятором за допомогою зворотних зв'язків полягає в синтезі алгоритму керування в функції від вектору розузгодженості $\Delta q = q_3 - q$ з метою забезпечення якості відпрацювання q_3 .

Постановку задання ілюструє рис. 4.19. Необхідно визначити оператор A_p пристрою керування за величиною Δq маніпулятора, представленого ланкою $A_{мп}$. Такий пристрій можна назвати програмним регулятором, оскільки його задача – забезпечити стійкість і необхідну точність руху робочого органу маніпулятора за програмною траєкторією.

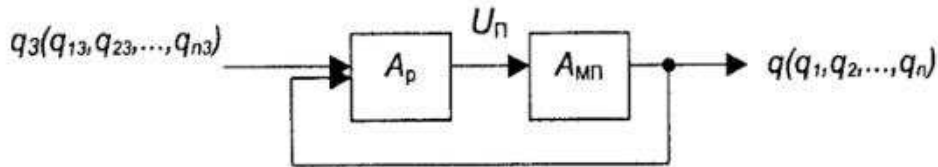


Рисунок 4.19 – Структурна схема системи керування

Аналітичний синтез оператора A_p з отриманням загального рішення поставленої задачі практично неможливий внаслідок складності об'єкта керування – маніпулятора (багатомірність, взаємопов'язаність, нестационарність, нелінійність, пружність). Тому синтез виконується шляхом багатокрокових ітераційних процедур: спочатку спрощення об'єкта, а потім окремих неврахованих факторів для коригування алгоритму керування.

На першому етапі в порядку спрощення задання достатньо знехтувати взаємовпливом приводів. При цьому система розпадається на автономні приводи, алгоритми керування якими було розглянуто раніше. Врахування взаємовпливу вимагатиме запровадження відповідних перехресних зв'язків між приводами, що забезпечують компенсацію насамперед негативних для якості керування маніпулятором взаємовпливів.

При застосуванні робастних алгоритмів керування приводами їх взаємовплив усувається, тому на загальносистемному рівні додаткових заходів не потрібно. Однак таке розв'язування приводів досягається за рахунок введення граничного форсування. Тому загалом вибір алгоритмів керування окремими приводами має визначатися конкретними технічними вимогами до системи керування маніпулятора. Зокрема, чим нижче вимоги до швидкодії, тим простіше в реалізації керування доцільно вибирати, аж до кінематичного керування та програмування без динамічної корекції.

Якщо розглянуті вище способи спільного керування за допомогою загальносистемного програмного регулятора доповнити можливостями послі-

довної загальносистемної корекції за допомогою компенсатора, вийде структура дворівневого безперервного керування маніпулятором (рис. 4.20).

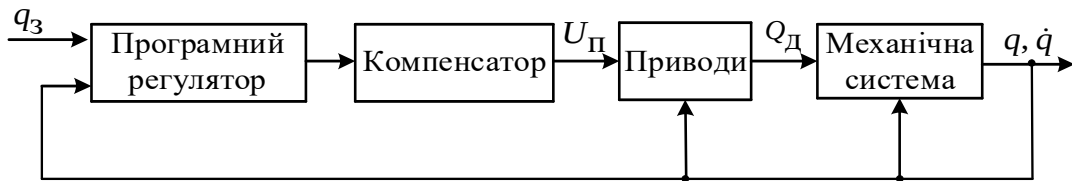


Рисунок 4.20 – Схема маніпулятора з програмним регулятором

4.2.4. Системи керування маніпулятором спільно за положенням та силою

Промислові роботи виконують певну роботу, тобто разом із переміщенням розвивають силовий вплив на об'єкти зовнішнього середовища. Відповідне керування називається позиційно-силовим. Позиційно-силове керування має такі варіанти:

- може здійснюватися лише на рівні абсолютних координат робочого органу маніпулятора, тобто по x_p і Q_p , або по відносним координатам на приводному рівні, тобто по q і Q_d ;
- може здійснюватися за однією координатою або за різними: за одними координатами – позиційне керування, за іншими – силове;
- може бути незалежним або пов'язаним, коли переміщення та силові впливи є функціонально залежними. Незалежне позиційно-силове керування можливе тільки за різними координатами, а пов'язане може бути як за різними координатами, так і по одній і тій же координаті.

Розглянемо комбінації перерахованих варіантів автоматичного позиційно-силового керування:

1. Позиційно-силове керування за абсолютними ступенями рухливості робочого органу, тобто по x_p і Q_p .

1.1. Незалежне керування складовими векторів x_p і Q_p за різними ступенями рухливості.

1.2. Пов'язане керування за положенням і силою за різними ступенями рухливості.

1.3. Пов'язане позиційно-силове керування за одними і тими самими ступенями рухливості робочого органу маніпулятора.

2. Позиційно-силове керування за відносними ступенями рухливості, тобто по q і Q_d . У цьому випадку можливі всі перелічені вище варіанти позиційно-силового керування.

3. Комбіноване позиційно-силове керування за абсолютними і відносними ступенями рухливості. Абсолютні і відносні змінні можуть використовуватися одночасно.

4.3. Адаптивне та інтелектуальне керування роботами

4.3.1. Функціональна схема системи сенсорного керування роботами

На рис. 4.21 показано загальну функціональну схему системи керування рухом виконавчих систем робота з використанням сенсорної інформації про навколишнє середовище. Сенсорні системи забезпечують для керування рухом робота зворотний зв'язок по x_p , Q_p і різним параметрам зовнішнього середовища, інформація про які необхідна при виконанні роботом конкретних технологічних операцій.

Схема включає п'ять рівнів керування:

- перший, нижній рівень – це керування окремими ступенями рухливості робота, тобто приводами;
- другий – спільне програмне керування приводами ступенів рухливості;
- третій – спільне адаптивне керування приводами;
- четвертий – синтез плану виконання дій;
- п'ятий, верхній – рівень обробки сенсорної інформації та синтезу за її допомогою моделей зовнішнього середовища, самого робота, а також програм виконання ним типових операцій.

Кожен із перерахованих рівнів може містити внутрішні підрівні.

Зв'язок людини-оператора із роботом здійснюється через пульт. Функції оператора в системі керування полягають у наступному:

- видача завдань на виконання певних операцій;
- надання в діалоговому режимі допомоги у виконанні окремими рівнями своїх функцій та контроль за ними;
- оперативне взяття на себе за необхідності функцій будь-якого рівня майже до керування окремими приводами. Це може бути потрібно у разі

неможливості робота виконати якусь складну операцію або в аварійних ситуаціях.

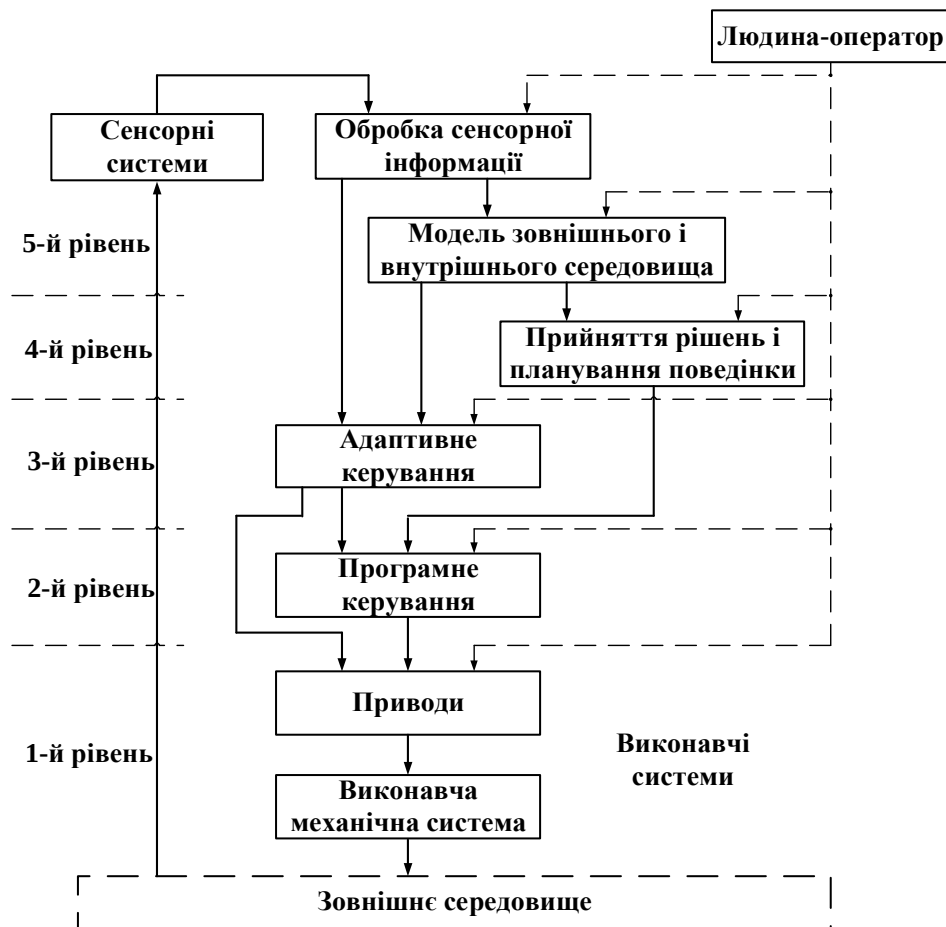


Рисунок 4.21 – Функціональна схема системи керування сенсорного робота

Видача людиною-оператором завдань може здійснюватися у різній формі залежно від того, які рівні керування повинні бути при цьому задіяні.

4.3.2. Принципи побудови адаптивного керування роботами

Системи програмного керування роботами засновані на найбільш простому способі автоматичного керування, коли апріорі досить точно відомо все про зовнішнє середовище і самого робота. Це дозволяє заздалегідь спланувати і запрограмувати роботу робота. При цьому відсутній зворотний зв'язок за фактичним станом зовнішнього середовища, з яким взаємодіє робот. Такі системи застосовуються тільки при повністю детер-

мінованих і незмінних протягом всього процесу керування зовнішніх умов роботи, цілях керування і параметрах самого робота.

Проте така ситуація має місце далеко не завжди. Розглянемо кілька типових прикладів:

- операція взяття довільно розташованого об'єкта або об'єкта, що переміщується (для її виконання необхідне автоматичне наведення кліщів маніпулятора на об'єкт);
- нагвинчування гайки на болт (для цього потрібно попередньо «наживити» гайку на різьблення);
- дугове зварювання швів, положення яких може змінюватись (зварювальну голівку потрібно вести строго за швом та з певною кутовою орієнтацією);
- вставлення стрижня в отвір з точністю, яка перевищує точність позиціонування при програмному керуванні, і тому вимагає пробних пошукових рухів;
- рух у заздалегідь невідомому просторі з обходом непередбачених перешкод.

Для виконання подібних операцій необхідно оперативно одержувати інформацію про зовнішнє середовище безпосередньо в ході виконання цих операцій і потім використовувати її в реальному часі при керуванні рухом. Таке керування в функції поточної інформації про зовнішнє середовище називається адаптивним. Необхідною умовою його реалізації є наявність сенсорних систем, які дають цю інформацію. Адаптація розширює функціональні можливості робота, оскільки дозволяє виконувати завдання, які не вирішуються програмно, і спрощує його експлуатацію, не вимагаючи точного знання моделі зовнішнього середовища і самого робота.

У процесі адаптації взаємодіють пристрій керування ПК, об'єкт керування та середовище. У робототехніці можливі три способи адаптації керування до змін середовища (рис. 4.22).

1. Зміна роботи керуючого пристрою ПК при зміні стану об'єкта під впливом середовища (рис. 4.22, *а*). Прикладом є адаптація керування до зміни в'язкості робочої рідини гідроприводів підводного робота, що залежить від температури води.

2. Зміна роботи ПК при зміні стану середовища під впливом дій об'єкта (рис. 4.22, *б*). Прикладом є корекція траєкторії руху електрода зварювального робота за положенням лінії стику виробів, що зварюються.

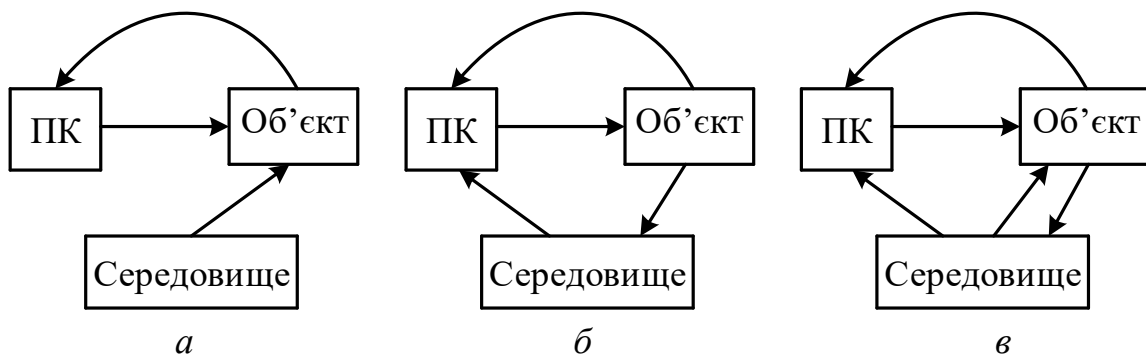


Рисунок 4.22 – Способи адаптації робототехнічних систем

3. Зміна роботи ПК з метою досягнення заданої якості керування при взаємних змінах об'єкта та середовища (рис. 4.22, *в*). Це може бути зміна швидкості обертання абразивного кола та зусилля натискання в залежності від форми виробу, що обробляється, і опору матеріалу при абразивній зачистці виробу роботом.

Адаптація керування роботом вимагає створення системи датчиків стану середовища і робота, алгоритмів обробки інформації від датчиків і синтезу системи адаптивного керування.

Для обробки великих обсягів інформації, переданої від датчиків, застосовують інтегральні і структурні методи розпізнавання образів. Інтегральні методи зводяться до аналізу вектору інтегральних ознак. Структурні методи використовують топологічні особливості об'єктів, які представлені структурними ознаками, такими як кількість отворів, площа, периметр об'єкта.

Адаптивне керування застосовується у таких випадках.

1. Визначення значень заздалегідь невідомих параметрів для введення їх в керуючу програму системи. Тут адаптивне керування є надбудовою над системою програмного керування, здійснюючи її самоналаштування. Це параметрична адаптація системи програмного керування.

2. Вибір керуючої програми з готового набору програм або складання її з набору типових підпрограм, у тому числі і в ході виконання операції на основі оцінки поточної ситуації за сигналами датчиків. Тут адаптивне керування теж доповнює систему програмного керування.

3. Зміна (перемикання) структури системи керування, тобто її алгоритму, з урахуванням оцінки поточної обстановки. Наприклад, зміна способу корекції в системі програмного керування або перехід від однієї сенсорної системи до іншої в системі адаптивного керування.

Варіанти 2 і 3 – це *структурна адаптація* системи програмного керування (самоорганізація системи).

4. Безпрограмне керування рухом у реальному часі лише за сенсорною інформацією. Наприклад, виконання операції наведення робочого органу маніпулятора на довільно розташований об'єкт.

Таким чином, адаптивне керування може здійснюватися як через систему програмного керування, так і минаючи її шляхом безпосереднього впливу на приводи (рис. 4.21). При виконанні конкретних технологічних операцій адаптивне керування найчастіше застосовується саме в комбінації з програмним керуванням, забезпечуючи зміну параметрів або структури програмного керування або заміну програмного керування при необхідності переходу на керування поточною сенсорною інформацією.

Крім того, можлива комбінація перерахованих способів адаптації, що послідовно змінюють один одного в часі або їх ієрархія у вигляді декількох рівнів адаптації. Наприклад, над рівнем параметричної адаптації, що здійснює підстроювання системи програмного керування, може бути рівень структурної адаптації, що здійснює дискретну зміну в схемі в міру вичерпання можливості підстроювання.

4.3.3. Системи адаптивного керування

Загальні принципи організації адаптивної системи керування розглянемо на прикладі промислового робота, що здійснює знімання деталей з підвісного конвеєра і укладання в тару (рис. 4.23). Послідовність дій робота зазначена на рисунку цифрами 1–2–3–4.

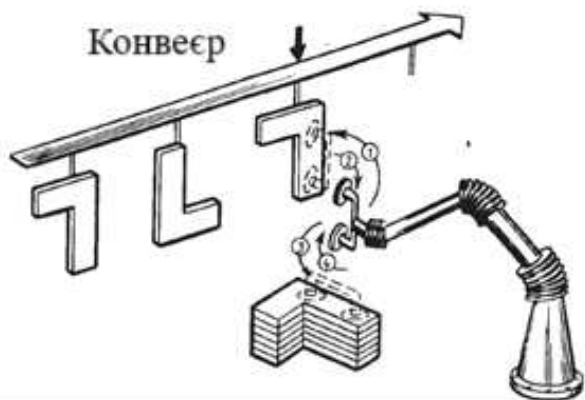


Рисунок 4.23 – Приклад реалізації адаптивного робота

Якщо момент проходження деталлю заданого положення відомий (на рисунку це положення відзначено темною стрілкою), то завдання може бути виконано роботом, керованим за жорсткою програмою.

Для цього достатньо задати координати точок позиціонування у вихідному положенні, положенні затискача і положенні тари, в яку орієнтовано укладаються деталі. Алгоритм, що ле-

жити в основі програми дій робота, можна представити у такому вигляді:

- 1 – задати координати точок позиціювання;
- 2 – перенести затискач у положення захоплення деталі;
- 3 – перейти у положення захоплення деталі;
- 4 – включити пневматичний пристрій захоплення;
- 5 – перейти у вихідне положення;
- 6 – перенести пристрій захоплення з деталлю до тари;
- 7 – вимкнути пневматичний пристрій захоплення;
- 8 – повторити з мітки 2.

Успішне перевантаження деталей з конвеєра в тару буде продовжуватися, поки не виникне навіть невелике відхилення положення деталі від заданого в програмі. Причиною відхилення може бути нерівномірність швидкості руху конвеєра або розгойдування деталі. У цьому випадку деталь буде захоплена роботом невірно або не буде захоплена зовсім. Природно, робот не помітить подібного збою і продовжуватиме робити помилкові дії, поки не втрутиться людина-оператор і не вимкне його.

Збої через нерівномірність руху конвеєра можна виключити, зберігши програмний режим роботи. Для цього достатньо оснастити конвеєр датчиком, що спрацює в момент проходження гаком конвеєра заданого положення затискача, встановивши в керуючій програмі між мітками 2 і 3 умовний оператор, що дозволяє перехід на мітку 3 тільки після отримання сигналу датчика.

Однак введення в систему керування датчика положення гака конвеєра не виключає збоїв від розгойдування деталей. Крім того, програмне керування виявляється безсилим, якщо деталі неправильно підвішені на конвеєрі. Очевидно, що вирішити це завдання під силу лише адаптивній системі керування. Для цього існуючий робототехнічний модуль необхідно оснастити не тільки датчиком положення гака, а ще й засобами для розпізнавання деталей та вимірювання координат точки їх захоплення. У цьому випадку розглянутий вище алгоритм дій робота модифікується на таку послідовність:

- 1 – задати координати точок позиціювання: вихідної і тари;
- 2 – перенести пристрій захоплення у вихідне положення;
- 3 – за сигналом датчика положення гака зробити розпізнавання деталі, виміряти координати точки захоплення та орієнтацію деталі;

- 4 – перейти у положення захоплення деталі, орієнтувати затискач відносно осі деталі;
- 5 – включити пневматичний пристрій захоплення;
- 6 – перейти у вихідне становище;
- 7 – перенести пристрій захоплення з деталлю до тари;
- 8 – вимкнути пневматичний пристрій захоплення;
- 9 – повторити з мітки 2.

Таким чином, додаткові пристрої, введені в систему керування, і модифікація вихідної програми дозволяють обслуговувати конвеєр, що переміщується з апріорі невідомою швидкістю і довільним, в певних межах, розташуванням деталей.

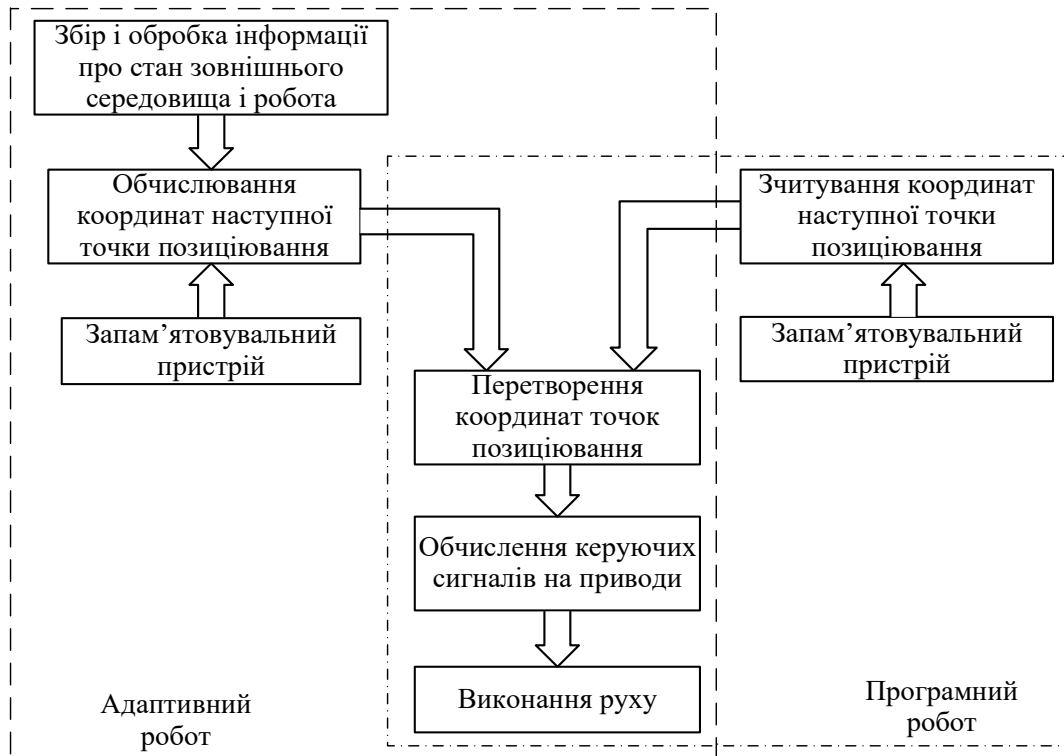


Рисунок 4.24 – Схеми керування адаптивним і програмним роботом

Аналізуючи функції програмної та адаптивної систем керування роботом, що вирішують розглянуте завдання, можна побачити, що вони відрізняються лише пристроями, які сприймають інформацію про навколишнє середовище. Ці пристрої обробляють вхідну інформацію та вибирають послідовність обходу вже наявних у програмі робота точок позиціонування

(рис. 4.24). Компоненти адаптивної та програмної системи, що відповідають за виконання обраної послідовності обходу заданих точок, виявляються подібними.

Таким чином, основна властивість адаптивних систем – реалізація мети керування в умовах недетермінованого зовнішнього середовища і дрейфу параметрів робота – відображається в структурі двома новими елементами: інформаційною системою, а також пристроєм для обчислення координат цільових точок і послідовності їх обходу, який використовує інформацію про зміни, що відбулися у зовнішньому середовищі та компонентах робота.

Функції керування адаптивним роботом виконує обчислювальний пристрій, рівень складності якого визначається рівнем адаптації робота. У найпростішому випадку це може бути мікропроцесор або мікроЕОМ, для складних адаптивних робототехнічних систем обчислювальний пристрій може бути мультимікропроцесорною мережею.

Для сучасних адаптивних робототехнічних систем характерне поєднання у обчислювальному пристрої функції адаптації до змін зовнішнього середовища та параметрів приводів робота з широким набором апаратних та програмних засобів самодіагностики самої системи керування.

4.3.4. Реалізація адаптивного керування

Адаптивне керування окремим приводом. Принцип адаптивного керування може застосовуватися не тільки в системі спільного керування приводів маніпулятора або засобів пересування робота (рис. 4.21), але і в системі керування окремим приводом. У цьому випадку системи керування робота в цілому та його виконавчих пристроїв будуть не адаптивними, а звичайними системами програмного керування. Адаптація при цьому відноситься не до загальносистемних, а до локальних змінних. Така адаптація називається *внутрішньою*, на відміну від *зовнішньої*, що здійснюється за допомогою загальносистемного сенсорного зворотного зв'язку. Розглянемо деякі варіанти систем адаптивного керування окремим приводом.

Адаптивне підстроювання приводу здійснюється у функції відхилення від необхідного значення будь-якого контрольованого параметра якості керування. Його основна перевага перед способами підстроювання за програмою функції q_z або q полягає в тому, що вона не використовує математичного опису системи, що підлаштовується і, отже не вимагає його знан-

ня. Всі інші способи підстроювання засновані на заздалегідь розрахованих за математичним описом об'єкта керування залежностях значень параметрів, що підлаштовуються, від стану об'єкта. Тому неточність математичного опису реального об'єкта веде до похибки і в налаштуванні. У тих випадках, коли цей недолік суттєвий або навіть неприпустимий, необхідне застосування складнішого адаптивного налаштування.

На рис. 4.25 наведено варіант схеми такого підстроювання для приводу з типовим алгоритмом керування, де якість керування (наприклад, коливальність) оцінюється за поточними значеннями q_3 і q на виході приводу. Цю оцінку здійснює адаптер. При відхиленні значення вибраного показника якості від необхідного значення адаптер видає коригуючий сигнал з відповідним знаком блоку налаштування, який виконує підстроювання приводу шляхом формування сигналів корекції.

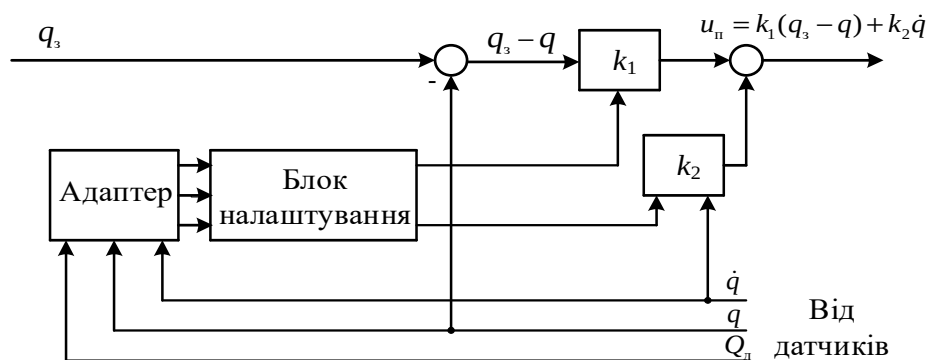


Рисунок 4.25 – Функціональна схема адаптивного підстроювання приводу

Специфічна вимога до систем адаптивного підстроювання приводів маніпуляторів – забезпечення високої швидкодії. Коригування якості керування повинно здійснюватися в ході кожного руху маніпулятора, а не в результаті усереднення показників якості за кілька однакових програмних рухів.

Тому з багатьох варіантів різних способів такого підстроювання в робототехніці основне застосування отримала схема з еталонною моделлю. На рис. 4.26 показаний один із варіантів такого формування адаптером сигналу підстроювання. У блоці «Еталонна модель» закладено математичну модель об'єкта з обраними в якості еталона чисельними значеннями його параметрів. Об'єкт являє собою механічну систему, на яку привод впливає зусиллям Q_d з урахуванням сигналу підстроювання.

За сигналами значень вихідних змінних об'єкта з датчиків зворотного зв'язку приводу шляхом вирішення оберненої задачі динаміки визначається зусилля $Q_{де}$, яке відповідає еталонним параметрам об'єкта. Різниця $\Delta Q = Q_d - Q_{де}$ відповідає відхиленню об'єкта від його еталонної моделі. Ця різниця подається на блок налаштування для зміни налаштування приводу, що усуває це відхилення.

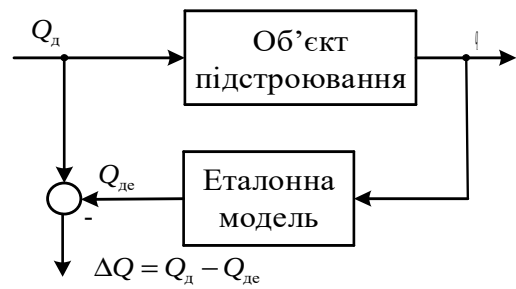


Рисунок 4.26 – Схема формування сигналу адаптивного підстроювання з еталонною моделлю

На рис. 4.27 показана функціональна схема системи керування з адаптивним підстроюванням приводу на базі *асоціативної пам'яті*. Пристрій адаптивного підстроювання (виділено пунктиром) стабілізує певний показник якості керування (коливання, швидкодія і т.п.), вибираючи з набору налаштувань пристрою керування приводу, що міститься в асоціативній пам'яті, налаштування, яке відповідає поточному стану об'єкта керування.

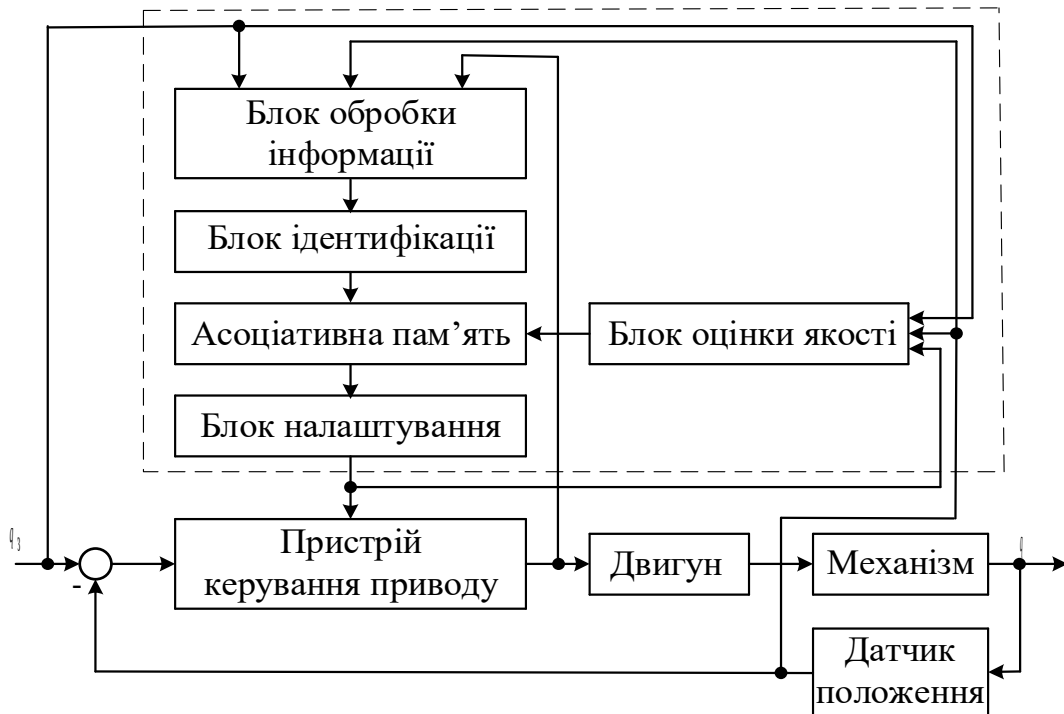


Рисунок 4.27 – Система адаптивного керування приводу з асоціативною пам'яттю

Поточний стан визначається в блоці ідентифікації виходячи з інформації, що надходить з об'єкта через блок обробки інформації. Блок оцінки якості керує асоціативною пам'яттю, відкриваючи її для чергового запису нової інформації за певної зміни показника якості.

Схема повинна проходити етап навчання, під час якого відбувається заповнення асоціативної пам'яті набором ситуацій і відповідних їм оптимальних рішень у вигляді налаштування схеми.

Адаптивне керування маніпулятором. У системах спільного керування приводами маніпулятора застосовуються ті самі способи адаптації, як і при керуванні окремими приводами.

На рис. 4.28 показана схема системи адаптивного керування маніпулятором, що є конкретизацією тієї частини загальної схеми сенсорного керування (рис. 4.21), яка реалізує таке керування.

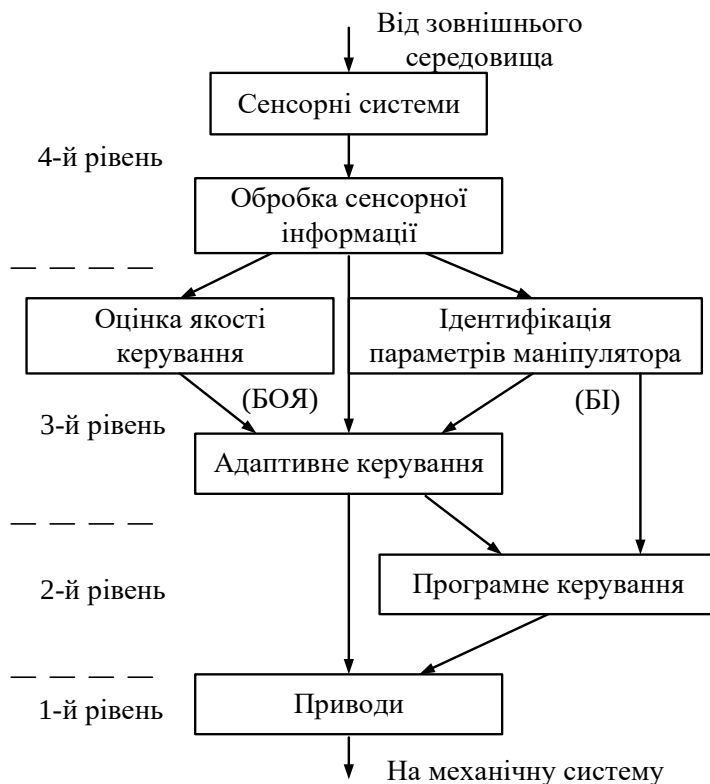


Рисунок 4.28 – Схема системи адаптивного керування маніпулятором

Схема охоплює три варіанти адаптивного керування:

- у функції оцінюваної якості керування з її стабілізацією або оптимізацією;
- за відхиленням від еталонної моделі;
- у функції поточної інформації, одержуваної від сенсорних систем, про об'єкти зовнішнього середовища або координати робочого органу маніпулятора відносно цих об'єктів.

Розглянемо приклад реалізації останнього варіанта адаптивного керування рухом, оскільки воно характерне для зовнішньої адаптації.

На рис. 4.29 спрощено показаний один з алгоритмів виконання типової складальної операції вставляння стрижня в отвір. Для виконання такої операції кліщі повинні бути оснащені сенсорами у вигляді далекомірів, розташованих на його пальцях, датчиком наявності предмета між пальцями, сенсорів, що визначають відносне положення деталей, що сполучаються, і зусилля сполучення.

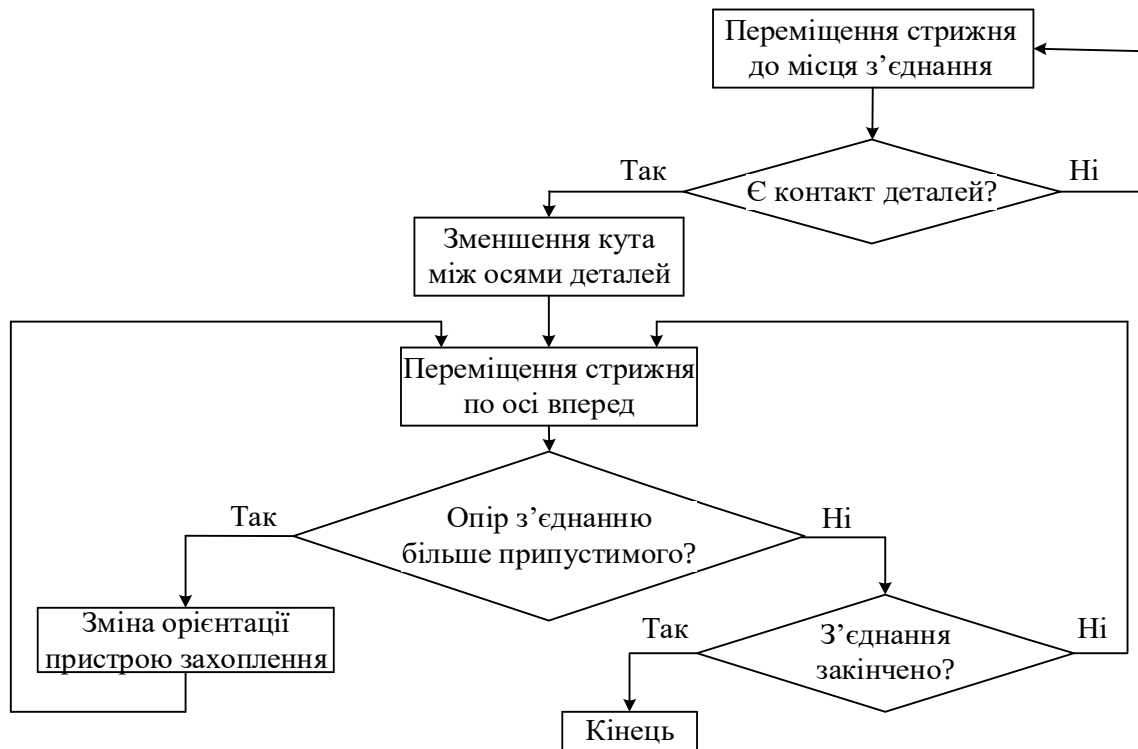


Рисунок 4.29 – Структурна схема алгоритму з'єднання «вал-втулка»

Операція виконується за методом спрямованого орієнтування і полягає в переміщенні стрижня, затисненого в кліщах маніпулятора, відносно отвору до збігу їх осей настільки, щоб стало можливим вставлення стрижня в отвір. Після цього здійснюється останній рух.

4.3.5. Системи інтелектуального керування

Інтелектуальне керування – це найвищий ступінь керування в теорії автоматичного керування після програмного та адаптивного. Воно засноване на застосуванні методів штучного інтелекту (звідси назва цього способу керування). Термін «штучний (технічний) інтелект» означає, що тех-

нічна система, що володіє ним, здатна виконувати функції, які, якби їх виконувала людина, вважалися б інтелектуальними, тобто вимагали від людини застосування її природного інтелекту.

Сучасні методи штучного інтелекту можна об'єднати в дві групи:

- математичні методи, що ґрунтуються на математичній логіці, лінгвістиці, теорії ігор тощо;
- евристичні методи, запозичені з досвіду та особливостей мислення людини – методи експертних систем, методи, засновані на технічних нейронних структурах та асоціативної пам'яті.

Основна сфера застосування інтелектуального керування – це, перш за все, складні об'єкти та великі системи. Разом з тим інтелектуальне керування часто потрібно і для досить простих об'єктів, якщо з їх допомогою вирішуються інтелектуальні завдання або якщо саме завдання керування ними вимагає інтелектуального підходу, наприклад, через складність зовнішніх умов.

У робототехніці штучний інтелект потрібен, перш за все, для вирішення наступних завдань:

- обробка сенсорної інформації;
- формування моделей зовнішнього середовища;
- оцінка поточної ситуації, прийняття рішень та планування поведінки;
- керування рухом;
- створення інтелектуального інтерфейсу для людини-оператора.

Рівень штучного інтелекту пов'язаний, перш за все, з розвитком ієрархічної структури моделі середовища шляхом формування все більш узагальнених рівнів її уявлення при переході від образів зовнішнього середовища, що безпосередньо сприймаються сенсорами системи, до все більш узагальнених абстрактних образів і понять. Наслідок цього – розширення функціональних можливостей робота завдяки автономному вирішенню складніших інтелектуальних завдань, включаючи самовдосконалення у процесі активної взаємодії із зовнішнім середовищем під час вирішення цих задач.

Одним із найбільш узагальнених типів моделей середовища є лінгвістичні моделі. Вони застосовуються для складних об'єктів з неоднозначною реакцією на ті самі ситуації, які не можуть бути описані формально логічно і тому описуються евристично на основі експертних оцінок мовою близькою до природної.

Методи штучного інтелекту застосовують у системах керування не тільки у загальносистемних контурах керування, а й для вирішення різних локальних завдань окремих систем робота. У цьому випадку процес керування роботом не стає інтелектуальним подібно до того, як у системах керування наявність внутрішньої адаптації в окремих частинах системи не робить систему в цілому адаптивною.

На рис. 4.30 показана узагальнена схема системи інтелектуального керування робота, яка є конкретизацією загальної схеми (рис. 4.21) керування сенсорного робота в частині застосування штучного інтелекту при вирішенні перерахованих раніше завдань.

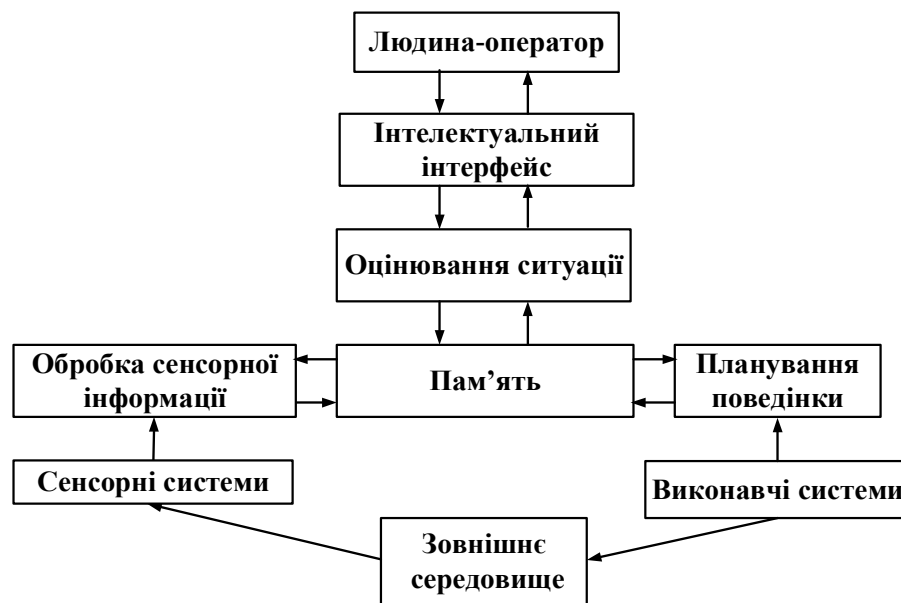


Рисунок 4.30 – Схема системи інтелектуального керування робота

У центрі схеми знаходиться блок пам'яті, що двосторонньо пов'язаний з іншими системами, які переробляють інформацію. Обсяг та рівень організації пам'яті – головний показник інтелектуального потенціалу робота. До блоку пам'яті входить база знань про зовнішнє середовище – основа інтелекту та база даних, як про зовнішнє середовище, так і про сам робот і про операції, які він може виконувати. Крім того, спеціалізовані оперативні бази знань та даних, що пов'язані з центральною пам'яттю, можуть бути і в окремих системах робота.

База знань про зовнішнє середовище містить як апріорну інформацію, що вводиться до початку роботи, так і оперативну сенсорну, яка набува-

ється в процесі сприйняття навколишнього середовища при виконанні роботом заданих дій, а також у процесі його спеціальних пізнавальних дій, спрямованих на вивчення цього середовища. Ця інформація включає опис геометричних та інших фізичних характеристик об'єктів середовища та їх взаємозв'язок. Такий опис має ієрархічну структуру. Наприклад, опис робочої зони маніпулятора включає плани всієї зони та її частин, що відрізняються як масштабом і відповідно точністю, так і ступенем узагальнення первинної сенсорної інформації (виділення ліній, контурів, поверхонь, об'єктів).

Введення в ці плани (карти) часу як параметра дає картину зовнішнього середовища в динаміці з урахуванням взаємодії її об'єктів один з одним і з роботом. База знань про зовнішнє середовище містить також правила, що дозволяють моделювати можливі зміни цього середовища. Самі знання представляються у вигляді логічних і мережних моделей середовища. Логічні моделі базуються на апараті математичної логіки та будуються із системи базових елементів і системи правил та аксіом.

Застосовуються *мережі фреймів*, що описують об'єкти середовища та *семантичні мережі*. Фрейм (англ. Frame – «каркас» або «рамка») – спосіб представлення знань у штучному інтелекті, що є схемою дій у реальній ситуації. Спочатку термін «фрейм» запроваджено в 70-ті роки ХХ ст. для позначення структури знань для сприйняття просторових сцен. Фрейм – це модель абстрактного образу, мінімально можливий опис сутності будь-якого об'єкта, явища, події, ситуації, процесу. Фрейми використовують у системах штучного інтелекту (наприклад, в експертних системах) як одну із поширених форм представлення знань. Системи на мережах фреймів ґрунтуються на об'єктному підході з процедурними знаннями всередині об'єктів.

Семантична мережа є простою об'єктною системою. Семантична мережа – інформаційна модель предметної області, що має вигляд орієнтованого графа, вершини якого відповідають об'єктам предметної області (середовища), а дуги задають відносини між ними. Об'єктами можуть бути поняття, які несуть сенс (семантику), події, властивості, процеси.

Всі інші блоки схеми мають ієрархічну структуру, рівні якої з'єднані один з одним по вертикалі знизу вгору. У свою чергу, показані на рис. 4.30 з'єднання блоків, здійснюються багатоканально між однойменними рівнями по горизонталі.

Блок обробки сенсорної інформації отримує з блоку пам'яті екстраполяцію зміни стану зовнішнього середовища, а передає до нього чергову ко-

рекцію цього стану на рівнях сенсорної картини середовища. У блоці обробки сенсорної інформації є паралельні канали обробки інформації від сенсорів різного типу, в яких інформація передається за рівнями знизу вгору з все більшим узагальненням. Аналогічні рівні інших блоків з'єднані горизонтально, утворюючи ієрархію контурів керування рухом.

Блок оцінки ситуації та блок планування поведінки отримують із блоку пам'яті поточну модель зовнішнього середовища, а передають до нього її оцінку за певними критеріями та синтезований план керування рухом робота. Головні завдання цих блоків – прийняття рішень, адекватних оцінці поточної ситуації, та подальший синтез плану реалізації.

При синтезі цього плану застосовуються різні прийоми розв'язання задач, розроблені в рамках штучного інтелекту, у тому числі:

- пошук рішення у просторі станів (знаходження послідовності перетворення вихідного стану на кінцеве цільове);
- зведення завдання до підзадачі (послідовне розбиття задачі на підзадачі аж до елементарних, вирішення яких відоме);
- рішення у вигляді доказу теорем (формулювання завдання як теореми та її рішення (доказ) з урахуванням системи аксіом).

У завдання блоку оцінки ситуації входить також оперативне коригування цілей керування та їх пріоритетів. Це верхній інтелектуальний рівень в ієрархії керування роботом.

Блок інтелектуального інтерфейсу у загальному випадку має бути двосторонньо пов'язаний з усіма переліченими функціональними блоками (на рис. 4.30 зв'язки не показані).

Звернімо увагу на особливість розглянутої узагальненої схеми системи інтелектуального керування. У ній відсутній у явному вигляді блок, відповідальний за реалізацію способу інтелектуального керування, як це має місце для адаптивного та програмного керування. Пояснюється це тим, що штучний інтелект розподілений за всіма функціональними блоками схеми відповідно до перерахованих вище функцій, при реалізації яких він може вимагатися. У конкретних системах він може бути присутнім у будь-якому з цих блоків. Саме тому поруч із терміном «системи інтелектуального керування» існує більш загальний термін «інтелектуальні системи керування».

Застосування штучного інтелекту в системах керування роботами почалося з введення елементів штучного інтелекту в системи адаптивного керування на основі зазначених раніше інтелектуальних методів.

Найбільшого поширення набули технології *експертних систем*. На рис. 4.31 показано типову структуру експертної системи керування приводами маніпулятора. Така система може бути використана і на рівні планування поведінки. База знань містить теоретичні емпіричні відомості про кінематику та динаміку маніпулятора.

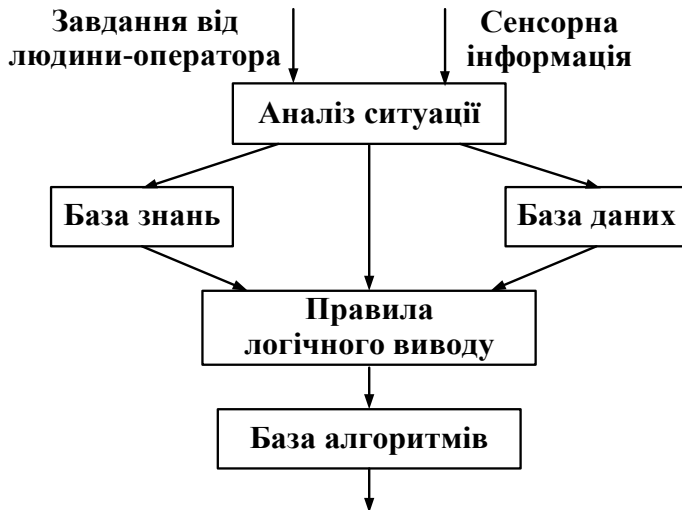


Рисунок 4.31 – Структура експертної системи адаптації

База даних включає інформацію про поточний стан системи керування та мету керування, а база алгоритмів – алгоритми обробки даних, ідентифікації та керування. Блок правил логічного висновку формує експертний висновок про оптимальну поточну структуру та налаштування системи приводів, яке потім реалізується вибором відповідного алгоритму керування з передачею його в систему керування.

На рис. 4.32 наведено приклад керування маніпулятором за заданими абсолютними координатами його робочого органу x_p з експертною оцінкою налаштування за допомогою бази даних, що навчається. Блок програмування виконує перерахунок абсолютних координат x_{pz} в узагальнені координати q_z . Блок оцінки якості виявляє відхилення обраного показника якості кожного приводу системи приводів з їх вихідними змінними.

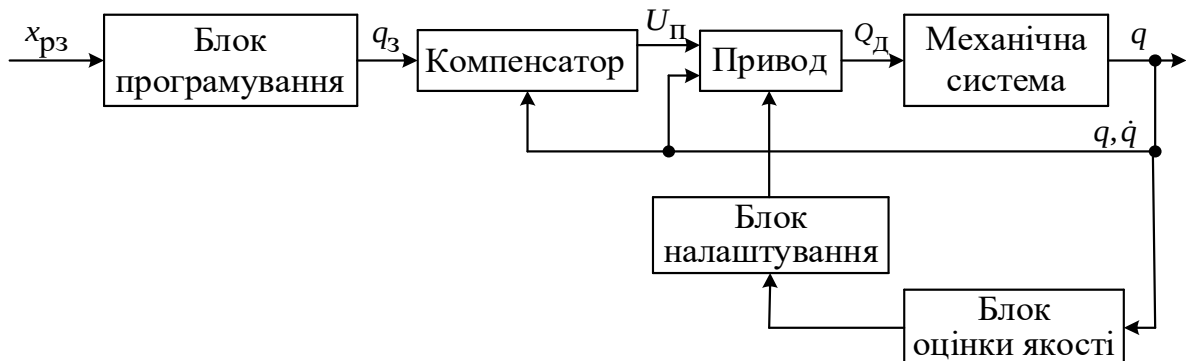


Рисунок 4.32 – Схема системи керування маніпулятором з самонавчальною експертною системою налаштування

Це реалізується у вигляді експертної системи. Блок налаштування приводів також побудовано на базі знань, що містить рекомендації експертів. Під час накопичення досвіду в ході експлуатації системи зміст бази знань поповнюється, тобто відбувається самовдосконалення системи.

Замість компенсатора з підстроюванням можна застосовувати багаточарову нейронну мережу, що навчається. У цьому випадку відпадає необхідність знання математичної моделі керованого об'єкта.

На рис. 4.33 показана система керування приводом на базі нейронних мереж. Нейро-мережна модель об'єкта керування налаштовується на об'єкт за сигналом розузгодженості його виходів і формує навчальну вибірку для підстроювання нейро-мережного пристрою керування відповідно до прийнятого критерію якості керування (швидкість, енергоспоживання тощо) при зміні параметрів об'єкта.

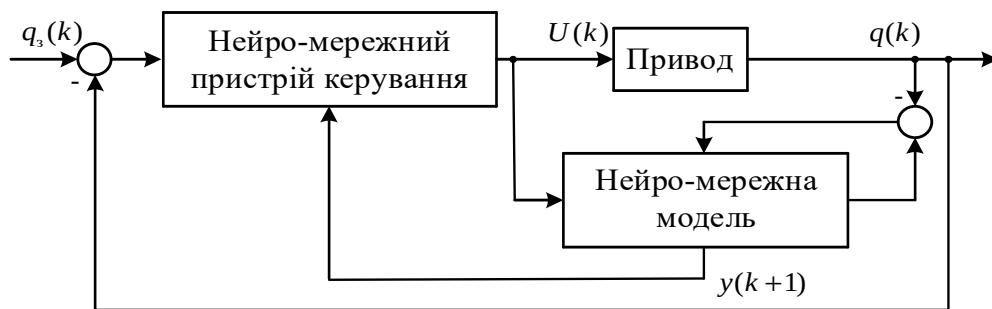


Рисунок 4.33 – Система керування приводом на базі нейронних мереж

Налаштування нейронних мереж здійснюється зміною вагових коефіцієнтів зв'язків і параметрів нейронів. Систему керування маніпулятора, розроблену на основі цієї схеми на базі нейронних мереж за абсолютними координатами його робочого органу, наведено на рис. 4.34. Нейронна мережа 1 вирішує пряму задачу кінематики $x_p = f(q)$, а мережа 2 – обернену $q = f^{-1}(x_p)$.

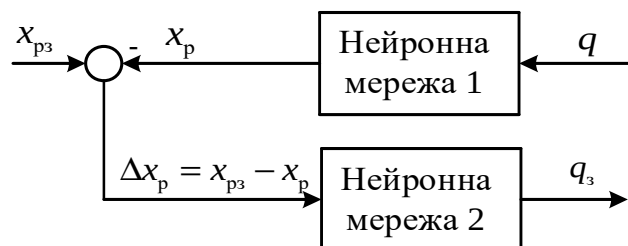


Рисунок 4.34 – Структура системи керування маніпулятором

Крім відсутності необхідності використання математичної моделі об'єкта керування перевагами нейро-мережних систем також є висока швидкодія, обумовлена паралельною обробкою компонентів векторних змінних, і простота.

4.3.6. Сучасні пристрої керування роботами і тенденції їх розвитку

Типова схема сучасного мікропроцесорного пристрою програмного керування роботом складається з декількох мікропроцесорів, кожен з яких керує одним або декількома приводами, і центрального мікропроцесора на другому рівні керування, що здійснює спільне керування ними. Центральний мікропроцесор може бути замінений персональним комп'ютером. На нижньому рівні керування окремими приводами вид керування може бути аналоговим, імпульсним чи цифровим. Типовий підсилювач потужності – широтно-імпульсний перетворювач ШПП, що забезпечує найбільше значення ККД та швидкодію.

Одна з тенденцій розвитку таких структур керування пов'язана саме з удосконаленням вирішення завдань спільного керування приводами. До цих завдань належить обчислення $q_3(t)$ по $x_{p3}(t)$. При досить складній кінематиці маніпулятора для вирішення цього завдання навіть на основі оберненої задачі кінематики може виявитися недостатньо одного мікропроцесора. Тим більше це стосується швидкодіючих маніпуляторів з безперервним керуванням, для яких потрібно вирішувати обернену задачу не кінематики, а динаміки. Звідси виникає необхідність використання на другому рівні керування мікропроцесорних структур з розпаралелюванням розв'язання цієї задачі. Середня кількість мікропроцесорів залежить від їх обчислювальної потужності та становить 3–4.

Інше завдання другого рівня керування – загальносистемна динамічна корекція у вигляді послідовної корекції типу компенсатора, перехресних зв'язків, що компенсують взаємовплив приводів, та компенсації змін корисного навантаження на робочому органі маніпулятора. Вирішення цього завдання також потребує відповідних обчислювальних потужностей і, отже, додаткових мікропроцесорів.

У пристроях керування сенсорних роботів реалізація ієрархічних рівнів керування, включаючи обробку сенсорної інформації та виконання інших функцій адаптивного та інтелектуального керування, здійснюється окремими мікропроцесорами. Вибір числа мікропроцесорів для цих рівнів і

синтез алгоритмів їх спільної роботи виконується, перш за все, виходячи з вимог функціонування системи в реальному масштабі часу. Розвиток мікропроцесорної бази цих систем йде шляхом збільшення розрядності від 8 до 16 і до 32 і шляхом збільшення обсягу вбудованої постійної пам'яті від 8–32 Кбайт до 128 Кбайт і до 1Мбайт та більше.

Досвід розвитку та широкого застосування уніфікованих пристроїв керування, заснованих на серійних мікропроцесорах загальнопромислового застосування, призвів до наступного етапу розвитку пристроїв керування роботами, що базується на створенні спеціальних мікропроцесорних функціональних модулів. З їх допомогою стало можливим не тільки збирати традиційні типи пристроїв керування для окремих роботів, але й створювати з таких модулів, об'єднаних локальними мережами, розподілені системи групового керування роботів та РТК.

В даний час цей принцип побудови розподілених систем керування з модулів, об'єднаних локальними мережами, реалізований багатьма провідними в галузі створення систем керування роботів і РТС фірмами: Siemens, Fanuc, Olivetti та ін.

До типових модулів входять контролери обробки сигналів сенсорів, мережні контролери для підключення до локальної мережі, інтерфейси для зв'язку з оператором та іншими системами, а також силові перетворювачі і джерела живлення. До них пропонуються локальні мережі різного рівня.

Програмне забезпечення (системне, прикладне та інструментальне) розглянутих систем керування є ієрархічним, як і структура самої системи керування, і модульним, відповідно до її апаратної реалізації. Його основою є ієрархія мов, що включає в загальному випадку мови наступних рівнів:

- мови спілкування оператора з роботом через інтелектуальний інтерфейс;
- проблемно-орієнтовані мови для опису виконуваних технологічних операцій у координатах робочої зони робота (Autopass, LM-GED, Robex та ін.);
- робото-орієнтовані мови для опису рухів самого робота (WAVE, VAL, HELP, TEACH та ін.);
- мови елементарних рухів (SIGLA, RCL, RPL, ANORAD);
- мови керування окремими приводами.

У системах керування роботів, що входять до технологічних комплексів, до цієї ієрархії можуть також входити проміжні мови, призначені для зв'язування систем, що використовують різні мовні засоби.

Одне з актуальних завдань розвитку програмного забезпечення – підвищення спільності мови верхнього рівня, тобто мови користувача, до рівня професійної мови технолога або іншого фахівця, що експлуатує РТС, для того, щоб від них не вимагалось спеціальних знань щодо програмування таких систем. Межею у цьому напрямі буде, очевидно, можливість спілкуватися з робототехнічними системами природною людською мовою.

Важливим етапом у розвитку розподіленого керування на базі спеціалізованих модулів, об'єднаних в локальну мережу, стала поява трансп'ютерів – програмованих перетворювачів дискретної інформації з розвиненими засобами зв'язку. З таких з'єднаних у мережу елементів збираються розподілені системи керування у вигляді набору спеціалізованих функціональних модулів, що працюють паралельно.

Сімейство трансп'ютерів постійно поповнюється новими виробами більшої розрядності, з більшим обсягом пам'яті, з більшою швидкістю обміну інформацією і з великою кількістю портів введення/виведення, що випускаються фірмами Intel, Motorola та ін.

Однак можливості розпаралелювання обробки інформації в таких системах мають свою межу. Вона визначається тим, що зі збільшенням числа паралельно функціонуючих трансп'ютерів відбувається зниження їх завантаження, проте при цьому зростає завантаження каналів, що з'єднують їх. Тобто подальше збільшення кількості мікропроцесорів не дає суттєвого збільшення обчислювальної потужності.

Кардинальним рішенням є перехід до апаратного забезпечення у вигляді *нейронних структур*. Перший досвід застосування таких структур дозволив суттєво перевершити швидкодію сучасних розподілених систем керування у обробці сенсорної інформації та плануванні поведінки. Створення подібних однорідних структур та необхідної для них елементної бази є одним із важливих напрямів розвитку штучного інтелекту загалом.

4.4. Групове керування в робототехнічних системах

4.4.1. Завдання групового керування

Групове керування – це спільне пов'язане керування кількома об'єктами, наприклад роботами. Основною метою такого керування є забезпечення виконання групою об'єктів загальної технологічної операції з

певним розподілом між ними окремих її частин. Крім того, воно може вимагатися і для запобігання взаємних перешкод, наприклад, зіткнень об'єктів, що рухаються при виконанні ними самостійних операцій.

Приклади завдань групового керування:

- керування виробничим обладнанням, наприклад, у складі технологічної лінії, що спільно реалізує загальний технологічний процес;
- керування групою рухомих об'єктів (літальні апарати, автомашини тощо), що рухаються строем або вирішують інше загальне завдання;
- керування електрогенеруючими агрегатами електроенергетичної системи, що працюють на загальне навантаження, яке забезпечує заданий розподіл його між агрегатами.

Завдання керування групою роботів полягає або у реалізації системою керування роботами *заздалегідь знайденої* послідовності дій всіх роботів групи, або у відшуванні такої послідовності та її реалізації у *процесі досягнення* поставленої мети.

Завдання керування групою роботів, дії яких спрямовані на досягнення загальної групової мети називають завданням групового керування. Суть завдання групового керування полягає у відшуванні та реалізації таких дій кожного окремого робота групи, які призводили б до оптимального, з погляду деякого групового критерію, досягнення загальної групової мети.

Системи групового керування, що застосовуються в робототехніці, можуть бути розділені на такі ієрархічні рівні:

- спільне керування приводами виконавчих систем роботів (керування автономними роботами);
- керування кількома маніпуляторами одного робота;
- спільне керування кількома роботами;
- керування роботами та спільно працюючим з ними іншим технологічним обладнанням у складі технологічних комплексів.

Групове керування промисловими роботами при організації спільного керування роботами у складі РТК та гнучких виробничих систем є одним з основних варіантів керування ПР та технологічним обладнанням автоматичних (автоматизованих) виробництв.

Можливості систем групового керування визначаються набором завдань, які вирішуються системою. Усі завдання можна розбити на два рівні:

- забезпечення протікання технологічного процесу;

- підвищення ефективності системи загалом.

Наприклад, при керуванні роботизованими лініями можна виділити такі завдання першого рівня:

1. *Координатне керування маніпулятором робота.*

2. *Керування динамікою маніпулятора.* Цей режим необхідний для забезпечення високої точності переміщення робочого органу при великій швидкості руху маніпулятора. Вибір того чи іншого алгоритму керування визначається пристроєм і характеристиками робота (типом приводу, наявністю зворотного зв'язку, залежністю моментів інерції від положення робочого органу та інших).

3. *Керування робочим органом робота.* Цей режим керування потрібен для забезпечення необхідних характеристик виробу, що обробляється, наприклад, якість і міцність зварного з'єднання, дотримання необхідних режимів і т.д.

4. *Керування конвеєром та позиціонерами.*

До завдань другого рівня належать такі:

1. *Навчання* (або інші методи автоматичного програмування). Цей процес забезпечує універсальність роботів як технологічних інструментів і дозволяє формувати масиви, що описують траєкторії переміщення робочих органів усіх роботів, в результаті процедури, що виконується оператором. Питання навчання промислових роботів у системах групового керування з центральною ЕОМ має певні специфічні особливості.

2. *Контроль якості виконуваних робіт.* Незважаючи на програмне керування робочими органами роботів, можуть виникнути некеровані зміни технологічного режиму (наприклад, при випадковій зміні параметрів мережі живлення, в результаті зношування робочого інструменту і т.п.). Контроль якості обробки дозволяє розбракувати (сортувати) вироби в розімкнутій системі або навіть оперативно змінювати режим обробки для компенсації спотворень у замкнутій системі.

3. *Розподіл у часі енергоспоживання роботів із метою мінімізації витрат енергії.* У промислових роботах основним споживачем енергії є робочий орган. Наприклад, при контактному точковому зварюванні потужність, що споживається для зварювання однієї точки, дорівнює десяткам кіловат, у той час як для переміщення маніпулятора потрібна потужність порядку одиниць кіловат. При незалежній роботі зварювальних кліщів кожного з роботів мережа живлення повинна бути розрахована на сумарну

потужність, що споживається в імпульсному режимі. Програмний розподіл у часі моментів зварювання різними роботами дозволяє суттєво знизити вимоги по потужності до живильної мережі та певною мірою стабілізувати навантаження. Введення цього режиму дає можливість значно здешевити та спростити систему живлення лінії.

4. *Оперативний контроль стану механічного та іншого обладнання на лінії.* Проведення ефективного оперативного контролю стану обладнання з наданням рекомендацій щодо порядку проведення профілактичних робіт та усунення несправностей у періоди запланованих зупинок ліній дозволить суттєво (до 20%) підвищити продуктивність основного обладнання без додаткових витрат.

5. Адаптація.

Серед відомих підходів до вирішення завдання групового керування роботами можна виділити два діаметрально протилежні підходи (рис. 4.35). У першому випадку це завдання вирішується одним, зосередженим (центральним) пристроєм керування. У другому випадку рішення здійснюється деяким, розподіленим за роботами групи, пристроєм керування. Перший підхід називається централізованим груповим керуванням, а другий підхід – децентралізованим груповим керуванням.



Рисунок 4.35 – Стратегії групового керування

Стратегії централізованого керування групою об'єктів можна розбити на два класи – стратегію, що використовує принцип єдиного керування, і стратегію, що використовує принцип ієрархічного керування.

Суть стратегії централізованого єдиного керування полягає в наявності у групі командира або деякого центрального пристрою керування. При

ієрархічній стратегії істотно знижується складність завдання, яке вирішується окремим центральним пристроєм керування, що, своєю чергою, підвищує рівень оперативності прийняття рішень.

Суть стратегії децентралізованого керування полягає в тому, що в системі немає будь-якого центрального пристрою керування, а кожен член групи самостійно приймає рішення про свої дії, намагаючись при цьому зробити максимально можливий внесок у досягнення загальної, групової мети.

Серед децентралізованих стратегій можна також виділити два типи: стратегія колективного керування та стратегія зграйного керування. Стратегія колективного керування має на увазі, що об'єкти, які входять до групи, за допомогою деякого каналу мають можливість обмінюватися один з одним інформацією з метою оптимізації групових дій. Стратегія децентралізованого колективного керування використовується, наприклад, у комп'ютерних мережах. Зграйна стратегія керування є в тому, що кожен об'єкт, що входить до групи, не має жодного інформаційного зв'язку з іншими об'єктами і може навіть не знати, ні скільки об'єктів входить до його групи, ні їхньої характеристики. Зграйна стратегія часто зустрічається в живій природі.

Сформулюємо основні принципи групової організації та керування, які вироблені в природі і людському суспільстві та можуть бути корисні у робототехніці:

1. Основу всіх систем групового керування становлять такі типи керування: централізоване, з провідним, децентралізоване, зграйне та їх комбінації. Останні можуть здійснюватися у часі (послідовно) та у просторі (паралельно).

2. У загальному випадку структури групового керування є ієрархічними з функціональною спеціалізацією за рівнями та виробленими оптимальними значеннями чисельності об'єктів на кожному рівні.

3. Одні й ті ж самі об'єкти керування можуть входити до складу кількох структур, що мають різні, але не антагоністичні цілі.

4. Керування цими структурами також є у загальному випадку ієрархічним та комбінованим, поєднуючи принципи централізованого та децентралізованого керування. Перший реалізує загальносистемні цілі, а другий здійснює координацію дій членів своєї групи та адаптацію до місцевих умов.

5. Еволюція систем групового керування йде у напрямку збільшення децентралізації із збереженням за центром лише забезпечення загально-системних функцій групи, що не піддаються декомпозиції.

6. Групи нижнього рівня можуть мати децентралізоване керування з паралельним централізованим керуванням об'єктами групи, що здійснюється з верхнього рівня, або з виділенням у групі керованого централізованого об'єкта.

4.4.2. Принципи групового керування роботами

Розглянемо загальні рекомендації для організації та керування групами роботів.

1. Загальне вирішення цього завдання – ієрархічна комбінована централізовано-децентралізована система групового керування.

2. Її основа – нижній рівень децентралізованого керування та поведінки з розподілом спільної мети між роботами. Ключова проблема групового керування роботами – оптимізація складу роботів цього рівня, включаючи їх число, спеціалізацію, способи розподілу спільної мети та координацію дій окремих роботів між ними.

3. Для вирішення завдання координації дій необхідно керуватися критеріями оптимальності, що відповідають конкретним цілям. Ними можуть бути час досягнення мети (швидкість), загальні енерговитрати, вартість тощо, а також комбінації подібних критеріїв при заданих обмеженнях інших показників (надійність, ресурс, збурюючі впливи). Основні параметри, що змінюються при заданій загальній меті – це число роботів, розподіл між ними цієї мети, відповідна спеціалізація та обсяг інформаційного обміну між роботами.

4. Розробка структури всієї ієрархічної системи керування групою роботів аж до верхнього рівня постановки мети та планування, а також технічної діагностики та відновлення функціонування групи при окремих відмовах стосовно конкретних призначень та цілей групи.

5. Остання задача – розробка алгоритмів обробки інформації та керування. У часовому аспекті це завдання поділяється на два:

– завдання оцінки ситуації, прийняття рішень до дії і планування цих дій. Це завдання реалізується переважно до початку самих дій, але з можливістю оперативного коригування вже під час цих дій;

– завдання безпосереднього керування цими діями в процесі керування в реальному масштабі часу (в динаміці).

Найбільш складними ці завдання виявляються за умов організованої протидії з боку іншої групи робіт чи об'єктів іншого типу.

Розглянемо можливий підхід до синтезу структури групового керування лише на рівні планування за критерієм забезпечення заданого часу виконання завдання. На рис. 4.36 наведено якісні залежності часу прийняття рішення у системі групового керування, що використовує різні способи керування, від кількості об'єктів у групі.

При централізованому керуванні центр приймає рішення про дії всіх підпорядкованих об'єктів групи. При цьому складність завдання зростає експоненційно із зростанням кількості об'єктів у групі і, відповідно, експоненційно зростає час прийняття відповідного рішення. При використанні децентралізованого групового керування кожен об'єкт групи приймає рішення лише за себе обмінюючись інформацією з іншими членами групи з метою оптимізації групового рішення. Тому час групового рішення у такій групі зростає лінійно зі збільшенням її членів. Графік часу рішення при використанні змішаного способу керування буде знаходитися між двома описаними графіками.

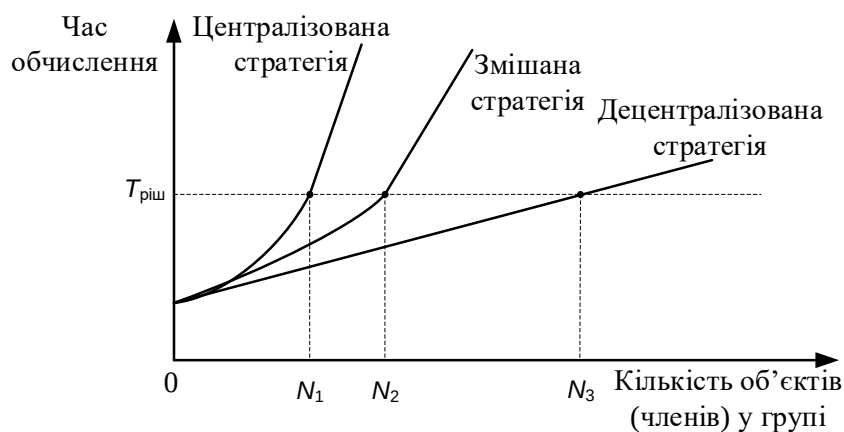


Рисунок 4.36 – Залежність часу ухвалення рішення від способу групового керування

Знаючи кількість об'єктів у групі та необхідне значення часу групового рішення $T_{\text{ріш}}$, можна вибрати найбільш прийнятний спосіб керування. Якщо число об'єктів менше N_1 , краще використовувати централізоване керування,

оскільки воно забезпечує більш оптимальне групове рішення. Якщо кількість об'єктів знаходиться в межах від N_1 до N_2 , доцільно змішане керування. Якщо кількість об'єктів перебуває між N_2 і N_3 , слід використовувати децентралізоване керування – найменш трудомістке з погляду часових витрат на ухвалення рішення. Якщо кількість об'єктів у групі більша за N_3 , слід переходити до ієрархічного розбиття групи на підгрупи і, використовуючи децентралізоване керування, спочатку забезпечити розподіл завдання між підгрупами, а потім, використовуючи той самий підхід, приймати рішення про способи керування об'єктами всередині кожної підгрупи.

При подальшому збільшенні кількості об'єктів групи необхідно відповідно збільшувати кількість рівнів ієрархії, щоб не перевищити необхідний час прийняття групового рішення. Значення необхідного часу рішення $t_{\text{ріш}}$ залежить від умов, у яких має функціонувати група. Якщо група промислових роботів з програмним керуванням працює у стаціонарних умовах, то обмеження на час вирішення завдання їх групового керування майже не накладаються, тому що ця задача може бути вирішена заздалегідь, а результати рішення можуть бути закладені у програми.

Найпростіший випадок групового керування у робототехніці – це керування системою приводів одного маніпулятора з метою забезпечення переміщень його робочого органу. У цьому випадку практично завжди застосовується централізоване паралельне керування приводами. Простота такого керування забезпечується за рахунок підвищених вимог до точності керування окремими приводами порівняно з необхідною точністю позиціювання робочого органу маніпулятора, яка при такому керуванні визначається сукупністю похибок всіх приводів.

Зі зростанням вимог до точності керування абсолютними координатами робочого органу виникає необхідність переходу до керування безпосередньо за цими координатами. У цьому випадку маніпулятор необхідно оснащувати відповідними датчиками. Керуючі впливи на окремі приводи при цьому розраховуються розв'язуванням оберненої задачі кінематики чи динаміки залежно від необхідної швидкодії маніпулятора. В результаті відбувається перехід до керування «з провідним», де роль останнього грає робочий орган маніпулятора (пристрій захоплення, ланка із закріпленим інструментом тощо).

З розвитком адаптивного та інтелектуального керування роботами дедалі чіткіше проглядається тенденція децентралізації за рахунок розподілу

між окремими підсистемами робота або окремими роботами групи завдань обробки сенсорної інформації, формування моделей середовища, бази знань і т.д., тобто тенденція застосування методів розподілених обчислень та розподіленого керування.

Наступна за складністю задача групового керування роботами – це координація їх руху у просторі, тобто керування кількома автономно діючими маніпуляторами. І тут кожен маніпулятор здійснює автономні дії, тобто не пов'язані у просторі та в часі з іншими маніпуляторами. Прикладом такого керування може бути керування групою роботів, що виконують операції з обслуговування не пов'язаних одиниць технологічного обладнання. Найпростіший приклад – запобігання зіткненням маніпуляторів або мобільних роботів. Для маніпуляторів це може бути при одночасній роботі, коли їх робочі зони перекриваються. Граничний випадок – це робота маніпуляторів на загальному робочому місці, наприклад у складі складального центру. У цьому випадку, крім забезпечення робочих рухів роботів, система групового керування повинна забезпечувати їхню безпеку, яка полягає у виключенні зіткнень. Для забезпечення безпеки від зіткнень необхідно застосовувати систему децентралізованого керування.

Більш складне завдання групового керування – це забезпечення спільної роботи кількох маніпуляторів (керування декількома роботами, що виконують спільне завдання) з координацією їх рухів одночасно і в просторі та в часі, тобто координація виробничих траєкторій руху маніпуляторів у реальному масштабі часу. Найпростіший варіант такого керування – синхронізація виконуваних окремими роботами чи іншими засобами робототехніки операцій, тобто узгодження їх дій у часі. Це необхідно при виконанні групою роботів спільної роботи, яка розпадається на технологічні операції, що послідовно виконуються окремими роботами. При цьому робочі зони цих роботів не перетинаються і, отже, небезпека зіткнення їх маніпуляторів відсутня. Наприклад, керування групою роботів на складальній лінії, де роботи послідовно виконують післяопераційне складання будь-якого виробу шляхом механічного з'єднання деталей, що переміщуються маніпуляторами. Переміщення деталей у зону складання може здійснюватися за допомогою централізованого керування. Але сама операція складання вимагає переходу до децентралізованого керування відносними координатами.

Наступна за складністю задача групового керування – керування гнучкими виробничими системами, у яких промислові роботи функціону-

ками показані матеріальні потоки. Функції та склад кожного рівня наведено у табл. 4.1. У середині цих основних рівнів можуть бути свої підрівні.

Таблиця 4.1 – Рівні керування гнучкої виробничої системи

Рівні керування	Функції	Склад
1. Одиниця обладнання	Спільне керування приводами Контроль технічного стану	Пристрій керування обладнанням, з'єднаний з пристроєм керування осередку, до якого воно входить
2. Технологічний осередок	Спільне керування частинами осередку Контроль якості продукції Контроль технічного стану (діагностика) осередку Обробка сенсорної та іншої інформації Введення-виведення інформації на пульт та локальну обчислювальну мережу ділянки	Пристрій керування осередку Пульт керування, з'єднаний з локальною мережею
3. Технологічна ділянка	Спільне керування технологічними осередками, складськими та транспортними системами ділянки Збір та обробка інформації про якість продукції та технічний стан обладнання Підготовка та зберігання програмного забезпечення Введення-виведення інформації на пульт і локальну обчислювальну мережу ділянки та мережу цеху	Локальна обчислювальна мережа ділянки Комп'ютер із інтелектуальним інтерфейсом
4. Цех	Спільне керування технологічним обладнанням цеху Збір та обробка інформації про якість продукції та технічний стан обладнання Підготовка та зберігання програмного забезпечення для підрозділів цеху Оперативно-календарне планування Зв'язок з ділянками та з сусідніми та вищими підрозділами підприємства	Локальна обчислювальна мережа цеху Комп'ютер із інтелектуальним інтерфейсом

У технологічних осередках роботи та інші засоби робототехніки можуть застосовуватися на основних та допоміжних операціях з обслуговування основного технологічного обладнання (роботизований технологічний осередок). У першому випадку всі частини осередку знаходяться за-

звичай під керуванням пристрою керування робота. У другому випадку пристрій керування робота зазвичай підпорядковується пристрою керування технологічного обладнання. Однак можливий і зворотний взаємозв'язок. Наприклад, у технологічних модулях холодного штампування керування пресом часто здійснюється від пристрою керування обслуговуючого його робота.

У транспортних системах роботи застосовуються безпосередньо як транспортний засіб або для виконання завантажувально-розвантажувальних операцій. В останньому випадку він керується пристроєм керування відповідної транспортної системи.

У складських автоматизованих системах засоби робототехніки знайшли застосування, насамперед у вигляді штабелерів, що обслуговують осередки стелажних складів.

Основні частини автоматизованої системи керування – апаратне та програмне забезпечення. При побудові групового керування використовується системний підхід, який передбачає ієрархічну структуру апаратних засобів та модульну структуру математичного забезпечення. Основне завдання проєктування за такого підходу – раціонально розподілити функції між апаратним та математичним забезпеченням системи, і навіть між її різними рівнями.

Розглянемо функції системи групового керування лініями промислових роботів на прикладі лінії контактного точкового зварювання (рис. 4.38).

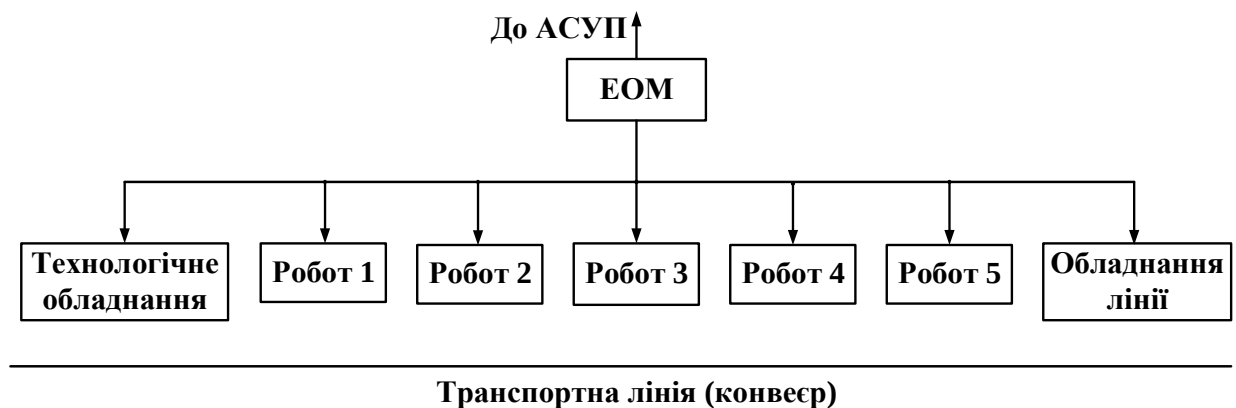


Рисунок 4.38 – Схема групового керування лінії точкового зварювання

Система групового керування може забезпечити:

- навчання роботів (завдання траєкторії переміщення зварювальних кліщів від позиції до позиції);
- координатне керування переміщенням маніпуляторів усіх роботів за індивідуальними програмами;
- керування швидкістю переміщення маніпуляторів залежно від зміни динамічних характеристик при зміні їх положення (при будь-яких переміщеннях система забезпечує синусоїдальну зміну швидкості при переході від однієї позиції до іншої по кожній з координат, але максимальне прискорення встановлюється залежно від поточних координат маніпуляторів);
- керування технологічним режимом зварювання кожного робота (тривалість імпульсу та паузи, кількість імпульсів, фаза підпалу, тривалість стиснення);
- скорочення витрати енергії для зварювання в порівнянні з системами індивідуального керування зварюванням;
- контроль якості зварювання;
- контроль стану зварювального та механічного обладнання лінії, прогнозування виходу обладнання з ладу та видачу рекомендацій на профілактичні роботи;
- автоматичне відключення робота, що вийшов з ладу, і заміну його резервним шляхом перерозподілу робочих програм без зупинки лінії;
- керування конвеєром та кантувальниками;
- контроль основних параметрів живильних мереж – електричної, гідравлічної та пневматичної;
- зниження витрат на керуюче обладнання, порівняно з індивідуальними системами керування.

Апаратна частина системи керування містить:

- модулі керування роботами, що забезпечують відпрацювання заданих переміщень, розгін та гальмування маніпулятора;
- блоки завдання фази підпалу при зварюванні, а також відпрацювання програмних режимів зварювання та стиснення;
- модуль навчання, що забезпечує переміщення маніпуляторів у режимі навчання, керування швидкістю переміщення робота в режимі навчання і завдання початкових, проміжних і кінцевих точок траєкторії.

Програмне забезпечення включає програми: навчання, координатного керування, керування технологічними режимами, організації діалогу з опе-

ратором, діагностики механічного та технологічного обладнання лінії, розподілу електроенергії в системі.

Кожен із чотирьох рівнів керування в табл. 4.1 реалізується у вигляді системи мікропроцесорних пристроїв керування, об'єднаних локальною обчислювальною мережею. Оскільки верхній рівень керування містить інтелектуальний пульт загального керування всією ієрархічною структурою, загальним способом керування є централізоване чотирирівневе керування з центрами на кожному рівні, що підпорядковані центрам вищого рівня. Водночас на окремих рівнях можуть застосовуватись і децентралізовані способи керування.

Розвиток способів та засобів керування постійно стимулює пошуки шляхів ослаблення централізації в керуванні виробництвом для того, щоб мати можливість максимально враховувати місцеві умови при збереженні єдиної централізованої стратегії.

На рис. 4.39 показаний варіант подальшої децентралізації керування виробництвом. Учасники виробничого процесу у вигляді технологічних модулів (TM_i) та функціональних модулів ($ФМ_i$) об'єднані локальною обчислювальною мережею через шину даних. Функціональні модулі цього пристрою спеціалізуються на виконанні певних загальносистемних функцій, тобто разом вони реалізують функції рівня централізованого керування всім виробничим процесом. До них відносяться модулі завантаження обладнання, забезпечення інструментом, транспортування, інтерфейсу оператора, підготовки керуючих програм, зведеної інформації і т.д.

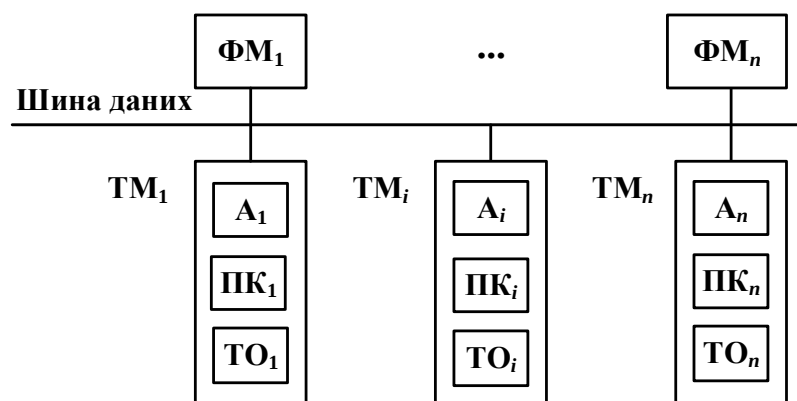


Рисунок 4.39 – Функціональна схема розподіленої гнучкої виробничої системи

Технологічні модулі включають основне технологічне обладнання (ТО_i) зі своїм пристроєм керування (ПК_i), технологічні пристрої та оснащення, а також командний пристрій (А_i), званий адміністратором (комп'ютер, керуючий контролер). Функції адміністратора – приймати замовлення виконання чергової операції; запитувати у відповідних функціональних модулів необхідне для цього матеріальне та інформаційне забезпечення; після початку виконання операції визначати через адміністраторів інших технологічних модулів, на якому слід продовжити обробку виробу після закінчення операції на своєму модулі. При цьому враховується завантаження модулів та особливості виконуваних на них операцій.

У цій системі керування відсутнє єдине планування та диспетчеризація. Відповідно виключається можливість завчасного синтезу та оптимізації планів виробництва. Послідовність виготовлення кожного виробу визначається спонтанно вже під час самого виробничого процесу. Тут функціональні модулі, що реалізують функції центру, швидше обслуговують безпосередніх виробників (технологічні модулі), аніж керують ними. Така структура відрізняється високою надійністю. Сфера її оптимального (з погляду економічної ефективності) застосування – умови випадкового потоку заявок на вході.

Перспективним напрямом у децентралізації керування виробництвом є також створення віртуальних виробництв у вигляді кооперації окремих виробників, а також постачальників та збутовиків, об'єднаних через загальний інформаційний простір (наприклад, Інтернет) загальною системою керування та базою даних.

4.5. Керування засобами робототехніки людиною-оператором

4.5.1. Класифікація систем керування засобами робототехніки людиною-оператором

Розглянемо системи керування роботів та інших засобів робототехніки з людиною оператором у контурі керування. Такі системи відносяться не до систем автоматичного керування (САК), які розглядалися раніше, а до автоматизованих систем керування (АСК) або в ширшому розумінні – до *людино-машинних або біотехнічних систем*.

На рис. 4.40 наведено схему такої системи керування. Людина-оператор виконує функції пристрою керування. Вона отримує або формує завдання $G_{\text{л}}$ для керованої ним технічної системи, отримує за допомогою своїх органів чуття інформацію від сенсорної системи про стан зовнішнього середовища і самої технічної системи, і формує керуючі впливи G на систему так, щоб забезпечити зміну контрольованих вихідних змінних x і Q відповідно до завдання.

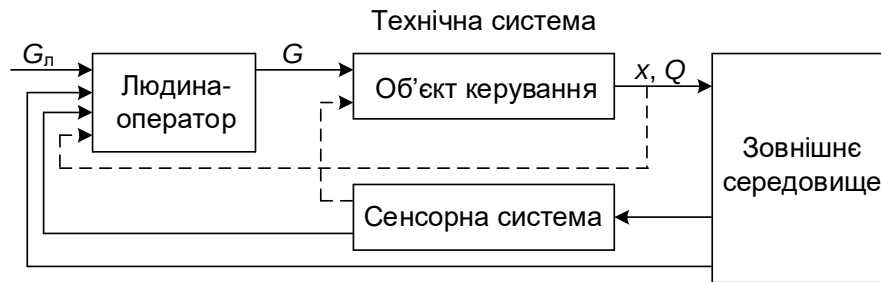


Рисунок 4.40 – Схема людино-машинної системи керування

Таке керування доцільно застосовувати у разі неможливості реалізації автоматичного керування на базі сучасної техніки або відсутності вигоди в порівнянні з керуванням від людини.

Перший варіант відповідає досить складним операціям та об'єктам керування. Приклади таких технологічних операцій у промисловості: кування, дугове зварювання складних виробів, деякі складальні та налагоджувальні операції. Приклади таких об'єктів: мобільні роботи, що діють у складній непередбачуваній атмосфері, космічні та підводні маніпулятори.

До другого варіанту відносяться деякі технологічні операції, що виконуються людиною швидше, краще і дешевше, хоча вони піддаються роботизації (деякі складальні та зварювальні операції) або особливо відповідальні операції, які людина не може довірити автомату (деякі операції в екстремальних ситуаціях, в космосі, під водою). В останньому випадку оптимальним рішенням зазвичай стає комбінація автоматичного та автоматизованого від людини-оператора керування.

Слід зазначити, що у всіх системах, званих автоматичними, людина-оператор у деяких випадках бере участь у процесі керування. Це може бути на етапі програмування, при взятті оператором на себе керування у над-

звичайній ситуації, при оперативному коригуванні дій робота у разі зміни ситуації.

Розглянемо класифікацію систем керування засобами робототехніки з боку людини-оператора.

Залежно від рівня в ієрархії керування, на якому бере участь людина, розрізняють такі типи керування:

- командне керування окремими приводами на виконавчому рівні;
- копіювальне керування та керування за допомогою задавальної рукоятки на програмному та адаптивному рівнях;
- супервізорне та інтерактивне керування на стратегічному рівні.

За місцем знаходження (віддаленню) людини-оператора щодо керованого об'єкта розрізняють:

- місцеве керування;
- дистанційне керування (з механічним або електричним зв'язком з керованим об'єктом на десятки метрів або кабельне керування до сотень метрів);
- телекерування (керування за каналами зв'язку без обмеження дальності).

За функціями, що виконуються людиною, можливі наступні варіанти його участі:

- виконання функцій верхніх рівнів системи керування (обробка сенсорної інформації, оцінка ситуації, планування поведінки);
- керування виконанням конкретних технологічних операцій;
- програмування.

За способом підключення людини-оператора до технічної системи розрізняють:

- пристрої керування, що входять до складу керованого об'єкта (наприклад, робота) і спеціально призначені для керування об'єктом тільки людиною-оператором (наприклад, задавальний маніпулятор в системі копіювального маніпулятора);
- пристрої, що входять до складу пристрою автоматичного керування і призначені для переходу до керування людиною-оператором (наприклад, переносний пульт оператора для програмування робота методом навчання);
- спеціальні пристрої, що виконують функції інтерфейсу «оператор-робот», які можуть підключатися до пристрою керування робота для виконання будь-яких з перерахованих раніше функцій щодо його керування.

4.5.2. Системи керування з людиною-оператором

Розглянемо системи керування відповідно до класифікації за рівнем керування.

Системи командного керування. Таке керування реалізується людиною-оператором на нижньому рівні керування роботом шляхом керування окремими приводами та здійснюється зазвичай у релейному режимі керування переміщенням та швидкістю.

Командне керування застосовується виключно як додатковий спосіб керування, наприклад, у промислових роботах для їх програмування методом навчання чи в аварійних ситуаціях. Точність такого керування визначається умінням оператора, через якого замикається зоровий зворотний зв'язок у контурі керування. Швидкодія при цьому низька, тому що, по-перше, для отримання прийнятної точності таке керування ведеться зазвичай на зниженій швидкості, а по-друге, тому що для переміщення робочого органу маніпулятора в чергову позицію приводи включаються по черзі послідовно.

Системи копіювального керування маніпулятором. Цей спосіб дистанційного керування маніпуляторами людиною-оператором був винайдений для виконання робіт у небезпечних для людини умовах. Принцип копіювального керування показано на рис. 4.41.

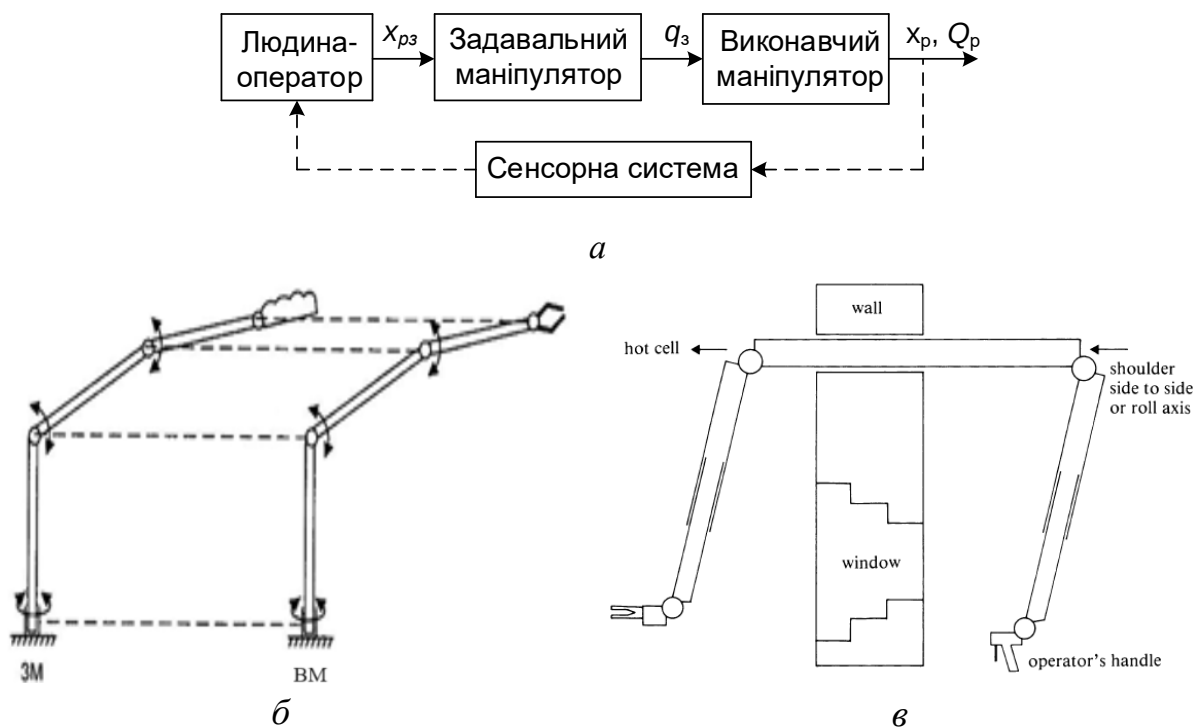


Рисунок 4.41 – Принцип дії копіювального маніпулятора

Об'єктом керування є виконавчий маніпулятор ВМ, а органом керування – задавальний маніпулятор ЗМ. Кінематична схема задавального маніпулятора подібна до схеми виконавчого маніпулятора. Замість робочого органу, як у виконавчого маніпулятора, у задавального маніпулятора є рукоятка, яку оператор тримає у своїй руці. Ланки маніпуляторів пов'язані таким чином, що оператор, переміщуючи рукоятку, змушує робочий орган виконавчого маніпулятора повторювати цей рух. Таким чином, ВМ повторює, копіює рух задавального маніпулятора. Звідси виникла назва цієї маніпуляційної системи – копіювальний маніпулятор.

Перші конструкції таких маніпуляторів не мали приводів, а ланки виконавчого та задавального маніпуляторів були з'єднані механічними тросами і тягами, за допомогою яких виконавчий маніпулятор переміщався під дією зусилля з боку людини-оператора, прикладеного до задавального маніпулятора. У наступному поколінні копіювальних маніпуляторів механічні зв'язки були замінені електричними у вигляді синхронних передач.

Значно більшу точність, швидкодію і вантажопідйомність мають копіювальні маніпулятори з слідкувальними приводами, які відпрацьовують розузгодженість датчиків положення відповідних ланок обох маніпуляторів. В результаті виконавчий маніпулятор і його робочий орган відстежують положення задавального маніпулятора, що переміщається оператором.

Задавальний маніпулятор може бути значно менше виконавчого, щоб краще відповідати розмірам робочої руки людини і скоротити об'єм, який займає оператор з задавальним маніпулятором.

Існує два типи систем копіювальних маніпуляторів:

- необоротні або односторонньої дії;
- оборотні або двосторонньої дії.

Другий тип відрізняється від першого наявністю робочого органу з силовим сенсором. Оператор, переміщуючи задавальний маніпулятор, відчуває на своїй руці протидіюче зусилля, що пропорційне зусиллю, з яким робочий орган виконавчого маніпулятора діє на об'єкти зовнішнього середовища. І тут виникає ефект відбиття зусилля. Таке зчутливлення необхідне для виконання рухів за наявності зовнішніх зв'язків і перешкод (наприклад, операції складання типу вал-втулка і різьбове з'єднання).

Для розширення функціональних можливостей копіювальних маніпуляторів застосовують засоби адаптації, щоб за зміни характеру завдання чи зовнішніх умов відповідно змінювати алгоритм керування, тобто структу-

ру системи. Наприклад, при виконанні транспортних операцій з переміщення вантажів або робочого органу виконавчого маніпулятора до місця виконання технологічної операції доцільно відключати непотрібний для такої операції контур відображення зусилля з тим, щоб полегшити оператору виконання цієї операції, усунувши необхідність фізичного подолання зусилля протидії. Особливо це істотно при переміщенні великих вантажів протягом тривалого часу.

Таке перетворення системи з оборотної на необоротну може бути досягнуто введенням в привод гальмівних передач (наприклад, черв'ячних). Вони виключають рух та передачу зусилля у зворотному напрямку, роблячи систему необоротною.

Системи керування з задавальною рукояткою. Принцип дії цих систем керування пояснює рис. 4.42. Задавальна рукоятка (ЗР) – джойстик з обчислювачем виконує ту ж функцію, що і задавальний маніпулятор в системі копіювального маніпулятора, тобто за задаваною рукою оператора траєкторією робочого органу маніпулятора $x_{pz}(t)$ визначаються задання $q_3(t)$ його приводів. Задання $q_3(t)$ обчислюються за допомогою математичної моделі маніпулятора шляхом вирішення оберненої задачі кінематики.

Для керування рухом робочого органу в загальному випадку потрібно задавати 6 координат – 3 переносні і 3 орієнтуючі кутові. Для їх завдання можна застосовувати дві триступеневі задавальні рукоятки: одна для керування переміщенням, а інша для орієнтації робочого органу. Також існують і шестиступеневі рукоятки. Кожна ступінь рухливості задавальної рукоятки оснащена датчиком положення. Оператор, зсуваючи рукою задавальну рукоятку з нейтрального положення, задає за допомогою цих датчиків координати x_{pz} робочого органу маніпулятора. Обчислювач за цими сигналами визначає задавальні сигнали для приводів q_3 .



Рисунок 4.42 – Функціональна схема системи керування з задавальною рукояткою

Переваги ЗР в порівнянні з задавальним маніпулятором:

- мінімальне число ступенів рухливості, не пов'язане з числом ступенів рухливості маніпулятора;
- більша простота та компактність;
- можливість реалізації більшої кількості різних режимів керування: за положенням (позиційне), за швидкістю (швидкісне), за силою (силове).

У разі *позиційного керування* переміщення задавальної рукоятки визначає уставку абсолютних координат робочого органу x_{pz} . Обчислювач визначає задання для приводів $q_z(t) = f^{-1}(x_{pz})$, відпрацювання яких виконує виконавчий маніпулятор ВМ, переміщуючи робочий орган в задану позицію. Таким чином, цей спосіб керування ідентичний системі з задавальним маніпулятором.

Швидкісний спосіб керування означає, що зміщення задавальної рукоятки з нейтрального положення задає вектор швидкості робочого органу маніпулятора, тобто напрямок переміщення рукоятки визначає напрямок руху, а величина переміщення – величину швидкості руху робочого органу.

Змінюючи положення задавальної рукоятки в ході руху маніпулятора, оператор може маневрувати його робочим органом в реальному масштабі часу. Обчислювач при цьому розраховує завдання для швидкостей приводів $\dot{q}_z = f^{-1}(\dot{x}_{pz})$, а приводи відпрацьовують їх в режимі швидкісних слідкувальних систем. Такий спосіб найзручніший для керування транспортними операціями у вільному просторі, тобто за відсутності перешкод.

Силовий спосіб керування передбачає, що переміщення задавальної рукоятки, визначає вектор сили, з якою робочий орган повинен впливати на об'єкти зовнішнього середовища. Приводи маніпулятора в цьому випадку реалізують керування за силою і відпрацьовують розраховані обчислювачем уставки для сили (моменту).

Цей спосіб керування застосовується при виконанні технологічних операцій, що вимагають керованого силового впливу на об'єкт операції. У цьому випадку задавальна рукоятка повинна мати силове зчутливлення, що створює ефект відображення зусилля, яке діє на робочий орган маніпулятора, як у копіювальних маніпуляторах (показано пунктиром на рис. 4.41 та рис. 4.42).

Для виконання конкретних технологічних операцій часто застосовують різні комбінації розглянутих трьох способів керування. Такі системи

керування відносяться до адаптивних систем із змінною структурою. Зміна структури може здійснюватись автоматично або оператором. Розглянемо варіанти методів керування.

Швидкісно-позиційне керування. Для здійснення транспортного руху у вільному просторі застосовується швидкісне керування, а для виконання наступних точних технологічних операцій – позиційне. Перехід від одного способу керування до іншого полягає у зміні алгоритму роботи обчислювача. Якщо перехід здійснюватиметься оператором, то при наближенні робочого органу маніпулятора до місця виконання операції, що вимагає позиціювання, оператор знижує швидкість руху, наближаючи задавальну рукоятку до нейтрального положення. Автоматичне перемикання на позиційне керування здійснюється в функції відхилення задавальної рукоятки, тобто в функції швидкості, коли її величина стає досить малою.

Швидкісно-силове керування. На відміну від попереднього способу при підході до місця виконання технологічної операції здійснюється перехід до силового керування, яке потрібне для виконання цієї операції. Для автоматичної зміни способу керування може використовуватися сигнал про контакт з об'єктом виконання операції, який отримується від датчика сили (моменту), що знаходиться в контурі силового керування.

Позиційно-силове керування. Послідовно застосовуються ці два способи керування.

Швидкісно-позиційно-силове керування. У послідовності, що визначається технологічною операцією, здійснюється застосування всіх трьох способів керування.

Системи супервізорного та інтерактивного керування. *Супервізорний спосіб керування* являє собою послідовність автоматично виконуваних роботом заздалегідь занесених до його пам'яті типових операцій, в проміжках між якими оператор задає чергову операцію, забезпечуючи таким чином виконання певної складної роботи. Команди оператора включають два види інформації: назву (код) типової операції та введення чисельних значень деяких параметрів програми цієї операції (наприклад, координати об'єктів зовнішнього середовища, які треба взяти).

Більш досконале *інтерактивне (діалогове) керування* передбачає двосторонній, тобто діалоговий зв'язок із роботом. Робот (його пристрій керування) після отримання певного завдання може запитати у оператора інформацію, якої не вистачає для його виконання або будь-які уточнення,

повідомити про неможливість виконання операції, про виникнення несправності тощо. У свою чергу оператор може запитувати у робота додаткову інформацію про стан його окремих систем, зміст пам'яті, додаткову сенсорну інформацію про зовнішнє середовище. Для реалізації діалогового режиму в розвиненій формі, включаючи мовний обмін, потрібен інтелектуальний інтерфейс «оператор-робот».

Розглянуті методи керування від людини-оператора зазвичай застосовуються разом із автоматичним керуванням. Розглянуті системи є прикладами комбінованих систем. У промислових роботах з програмним керуванням широко використовується спосіб програмування навчанням, що базується на керуванні з боку оператора. У системах із основним способом керування від людини-оператора прагнуть окремі операції, які можуть виконуватися автоматично, здійснювати в автоматичному режимі. Об'єднувати ці два типи керування можна як послідовно, коли один тип керування змінюється іншим, так і паралельно, коли, наприклад, людина-оператор коригує хід автоматично виконуваної операції.

На рис. 4.43 наведено функціональну схему такого комбінованого керування. Через блок програмування БП здійснюється автоматичне керування рухом виконавчих систем робота. Блок керування приводами БКП формує керуючі сигнали на маніпулятор.

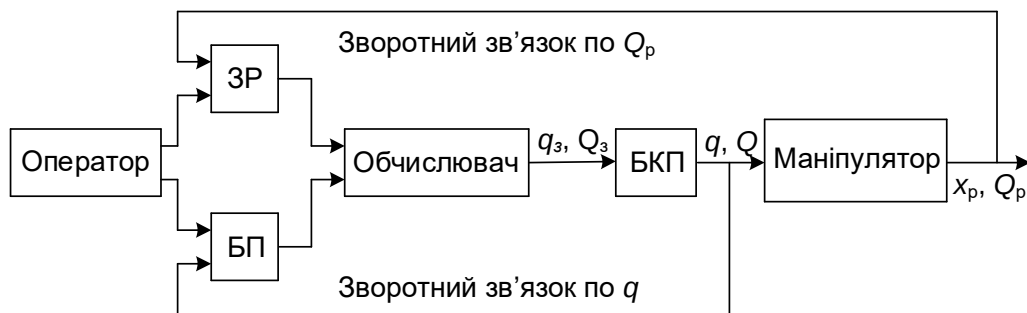


Рисунок 4.43 – Функціональна схема системи комбінованого автоматичного і автоматизованого керування від задавальної рукоятки

Через задавальну рукоятку ЗР оператор може коригувати цей процес (у тому числі в режимі силового керування) або повністю брати на себе керування, наприклад, в аварійних ситуаціях. Крім того, оператор може включатися в процес керування в режимі супервізорного керування через блок програмування.

Контрольні запитання

1. Назвіть принципи організації руху роботів.
2. Назвіть об'єкт керування роботів.
3. Назвіть характеристики механічної системи маніпулятора як об'єкта керування.
4. Поясніть призначення рівняння кінематики маніпулятора.
5. Поясніть призначення рівняння динаміки маніпулятора.
6. Назвіть особливості маніпуляторів, які враховують під час математичного опису.
7. Назвіть особливості комп'ютерного моделювання роботів.
8. Поясніть алгоритм циклового програмного керування роботами.
9. Поясніть алгоритм дискретного позиційного керування роботами.
10. Поясніть алгоритм безперервного позиційного керування роботами.
11. Назвіть види систем позиційно-силового керування роботами.
12. Назвіть рівні ієрархічної системи сенсорного керування роботами.
13. Назвіть способи адаптації керування до змін середовища в РТС.
14. Поясніть принцип параметричної і структурної адаптації.
15. Назвіть основні елементи систем адаптивного керування.
16. Назвіть види і методи реалізації систем адаптивного керування роботами.
17. Назвіть види систем інтелектуального керування роботами.
18. Назвіть види систем ієрархічного групового керування роботами.
19. Дайте класифікацію стратегій групового керування.
20. Назвіть принципи групового керування роботами.
21. Як залежить час прийняття рішення у системах з різними способами групового керування від кількості об'єктів у групі?
22. Дайте класифікацію людино-машинних систем керування роботами.
23. Назвіть принцип копіювального керування маніпуляторами.
24. Назвіть способи керування маніпуляторами за допомогою задавальної рукоятки.

Розділ 5

Проектування засобів робототехніки

5.1. Особливості та методи проектування засобів робототехніки

Проектування технічних систем – це процес створення нового виробу у вигляді його проекту. Проект – це сукупність технічних документів, за якими виріб виготовляється та експлуатується. Процес проектування стандартизований і складається з наступних етапів:

- розробка технічного завдання;
- попереднє проектування (розробка технічної пропозиції);
- ескізний проект;
- технічний проект (розробка повного комплексу технічної документації на виріб).

Перші два етапи відносяться до науково-дослідних робіт, інші – до дослідно-конструкторських. Процес проектування виробу не закінчується технічним проектом, а триває протягом усього часу виробництва та експлуатації виробу, тобто всього «життєвого циклу». Протягом цього часу виріб остаточно «доводиться», підвищується його технічний рівень шляхом коригування технічної документації.

Порядок та методи проектування засобів робототехніки регламентуються комплексом нормативно-технічних документів, які включають Держстандарти (за класифікацією, термінологією та позначенням, основним параметрам) та методичні вказівки (за технічними вимогами, методами випробувань та правилами приймання, за оцінкою економічної ефективності). Аналогічні документи є і за основними компонентами роботів – пристроями керування, приводами, пристроями захоплення, оснащенню (наприклад, пристрої подачі та позиціонування об'єктів маніпулювання).

На першому етапі проектування робота при розробці технічного завдання, перш за все, необхідно в рамках визначення технічних вимог щодо нього та подальшого аналізу шляхів їх реалізації дослідити взаємодію робота з іншим працюючим спільно з ним технологічним обладнанням

та об'єктами маніпулювання. Мета дослідження – виявлення можливостей, що дозволяють за рахунок досить несуттєвих їх змін полегшити вимоги до роботів і тим самим отримати загальну техніко-економічну вигоду для всієї системи машин, що спільно працюють. Найбільшого техніко-економічного ефекту при цьому може бути досягнуто, коли все це обладнання проектується одночасно з роботом. Найчастіше це має місце під час проектування роботів, що виконують основні технологічні операції. Одночасно з тією ж метою необхідно досліджувати можливості створення оснащення та інших засобів упорядкування та спрощення зовнішнього середовища робота.

На рис. 5.1 наведена якісна залежність вартості власне робота та вартості його оснащення у функції від ступеня упорядкування зовнішнього середовища. Як випливає з цих графіків, існує певна оптимальна для кожної конкретної задачі ступінь упорядкування зовнішнього середовища, при якій досягається мінімальна сумарна вартість робота та оснащення.

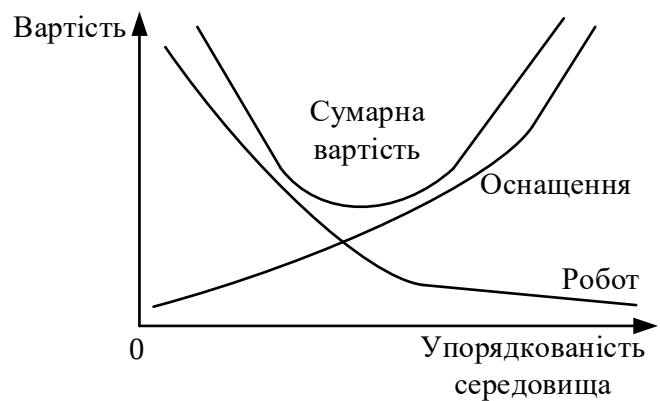


Рисунок 5.1 – Вартість робота та оснащення

Тільки після такого розгляду взаємодії робота із зовнішнім середовищем та оптимізації технічних вимог до робота та об'єктів цього середовища слід переходити до проектування власне робота. Як і для інших технічних систем під час проектування застосовується принцип декомпозиції, тобто розбиття всієї задачі на кілька розв'язуваних паралельно простіших підзадач.

Відповідно до цього на першому етапі проектування після складання функціональної схеми робота має бути проведено його розбиття на три частини – механічну систему, апаратуру керування та програмне забезпечення, проектування яких потребує фахівців різного профілю. В основі вирішення цього завдання лежить розподіл функцій робота та технічних вимог до нього між цими трьома взаємозалежними частинами. Це завдання неоднознач-

не і найбільш відповідальне, оскільки його вирішення значною мірою визначає результат усієї подальшої роботи зі створення робота.

При зазначеному розподілі функцій робота, передусім, виділяють функції, які повністю чи переважно визначаються однією з цих частин і відповідно приписуються їм. Наприклад, вантажопідйомність та геометрія робочої зони визначаються механічною системою, параметри енергоживлення та діапазон температури зовнішнього середовища істотні для апаратури керування, мови програмування мають значення тільки для програмного забезпечення.

При розробці технічної пропозиції досить обмежитися такими основними вимогами, як розміри і форма робочої зони, кількість точок і точність позиціонування, вантажопідйомність, переміщення та швидкості, типи приводів та системи керування, спосіб сполучення з іншим обладнанням. Відповідно до цих вимог вибирають кінематичну схему маніпулятора, визначають вид, взаємну орієнтацію, число і послідовність розташування ступенів рухливості; вибирають тип приводу та системи керування, спосіб установки робота (підлоговий, порталний та ін.), уточнюють несучі конструкції маніпулятора та тип пристрою захоплення.

Інші функції необхідно оптимально розподілити між частинами робота на підставі певних обраних критеріїв. Взаємовплив між деякими з цих функцій додатково ускладнює завдання і може призвести до того, що локальне покращення характеристик однієї з частин робота погіршить ефективність робота в цілому. Наприклад, відомий взаємозв'язок точності та швидкодії не дозволяє незалежно розподіляти вимоги до кожного з цих параметрів між частинами робота.

Принцип декомпозиції значно полегшує процес проєктування, але при цьому обмежує технічний рівень техніки, що створюється, оскільки ігнорує взаємодії незалежно проєктованих частин системи. Оптимальний підхід до проєктування потребує системного підходу до робота як до єдиного цілого.

При проєктуванні перших роботів спочатку створювалися їх виконавчі пристрої, а потім для них як заданих об'єктів керування проєктувалися пристрої керування. Однак надалі в міру вдосконалення роботів та прагнення до досягнення більш високих параметрів виконавчі пристрої та пристрої керування стали проєктуватись спільно як єдина система на основі загальних критеріїв. Це дозволило забезпечити оптимальний розподіл технічних вимог до

робота між цими його частинами.

Характерний приклад – завдання мінімізації маси маніпуляторів. Перехід від традиційного розрахунку механічної частини на жорсткість з обмеженням пружних деформацій ланок до розрахунку лише на міцність зі зняттям цих обмежень дозволяє приблизно втричі зменшити масу механічної системи маніпуляторів. Однак гнучкість конструкції, що виникає при цьому, і викликана нею коливальність істотно ускладнюють завдання керування рухом таких маніпуляторів і відповідно технічні вимоги до пристрою керування.

За такого системного підходу до проєктування роботів можна сформулювати загальні принципи їх створення:

1. Децентралізація керування аж до конструктивного вбудовування пристроїв керування окремими частинами механічної системи у ці механічні частини. Це дозволяє підвищити надійність та швидкодію системи керування в цілому за рахунок скорочення зв'язків, розпаралелювання та ієрархічної її побудови.

2. Необхідність забезпечення значно більшої надійності керування, ніж зазвичай вважається прийнятним для таких типів об'єктів. Це викликано тим, що у цих системах відмова керування, зазвичай, веде до аварії всієї системи.

3. Широке застосування комп'ютерного моделювання, без чого такі складні системи, зазвичай, неможливо створити на сучасному науково-технічному рівні.

Слід зазначити, що проєктування нового ПР – ітераційна процедура: під час проєктування часто доводиться повертатися до перегляду раніше прийнятих рішень після виявлення невідповідності окремих конструктивних рішень тим чи іншим вимогам.

Після виконання ескізного проєкту в ході подальшого технічного проєктування ПР проводиться комплексний аналіз його точнісних, динамічних і міцнісних характеристик. За результатами цього аналізу у разі потреби вносять корективи до прийнятих раніше рішень та після затвердження технічного проєкту переходять до розробки робочої документації на дослідний зразок ПР.

Виготовлений зразок ПР всебічно досліджують, здійснюють доведення конструкції, експериментально визначають його характеристики. Після

внесення необхідних змін до робочої документації здійснюють технологічну підготовку до виготовлення дослідної партії та подальшого серійного виробництва ПР.

У основі методів проектування техніки лежить уніфікація. Проектування нового виробу – це завжди суперечлива задача для розробника: з одного боку існує природне прагнення використовувати всі останні досягнення науки і техніки в даній галузі, з іншого – цьому перешкоджають обмеження за термінами, вартістю, матеріальними ресурсами та ін., які зазвичай обумовлюються у технічних вимогах до виробу, що створюється. Вихід тут один – компроміс у вигляді оптимальної наступності з раніше створеними подібними виробами та їх компонентами. Основним засобом для цього є, як відомо, уніфікація та стандартизація. Іноді у технічному завданні прямо обумовлюється ступінь (відсоток) уніфікації.

Проблема уніфікації для робототехніки має особливо велике значення. Сфера застосування роботів швидко розширюється, охоплюючи нові галузі людської діяльності. Відповідно швидко зростає їхня номенклатура. Вже сьогодні кількість необхідних типів роботів лише загально-промислового застосування вимірюється сотнями. У зв'язку з цим одним із найважливіших завдань робототехніки є комплексна уніфікація роботів та їх компонентів.

За визначенням міжнародної організації зі стандартизації, *стандартизація* – це встановлення та застосування правил упорядкування діяльності у певній галузі. Сюди, зокрема, входить встановлення одиниць величин, термінів та позначень, вимог до продукції, технологічним процесам, техніки безпеки. До нормативно-технічних документів щодо стандартизації належать стандарти, методичні вказівки та технічні умови.

Уніфікація – це найефективніший метод стандартизації, що полягає у раціональному скороченні числа виробів однакового функціонального призначення з метою підвищення економічності виробництва та експлуатації, підвищення якості.

У робототехніці уніфікація розвивається за трьома рівнями: для компонентів роботів, для власне роботів та для технологічних комплексів з роботами. Відпрацьовані та серійно уніфіковані компоненти, що випускаються, – по суті єдиною можливою основою розвитку робототехніки в умовах згаданого необмеженого зростання номенклатури роботів та необхідності оперативно створювати та освоювати у виробництві та експлуатації нові типи роботів та їх модифікацій.

Основними етапами уніфікації роботів та їх елементів, як і будь-якого іншого устаткування є:

- групування роботів (або їх елементів) з однаковими функціями (вибір роботів з однаковими системами координат, які призначені для автоматизації подібних виробничих процесів тощо);
- формування переліку основних функціональних параметрів пристроїв, що уніфікуються (вантажопідйомність, точність, хід ступенів рухливості тощо);
- перехід від випадкового набору значень параметрів до деякого впорядкованого параметричного ряду;
- групування відомих уніфікованих пристроїв, параметри яких лежать у межах одного інтервалу цього ряду;
- порівняння та вибір найкращих типових схемних та конструкторських рішень для кожного інтервалу параметричного ряду.

Можливості роботів описуються численними параметрами. До основних параметрів роботів, перш за все, відносяться: тип загальної схеми компонування, вид системи керування, діапазони переміщень ступенів рухливості, вантажопідйомність. Зменшення частоти цих параметрів дозволяє знизити вартість роботів за рахунок збільшення серійності. Але, з іншого боку, воно призводить до деякого завищення їх функціональних можливостей порівняно з необхідними для автоматизації конкретних виробництв. При виборі раціональної частоти параметричних рядів слід враховувати технічні вимоги до роботів для різних виробничих процесів, а також інтенсивність залежності їхньої складності або вартості від функціональних параметрів.

Створення уніфікованих функціональних компонентів роботів (приводів, пристроїв керування і т.д.) стало першим етапом уніфікації в галузі робототехніки. Наступним етапом стала уніфікація цих компонентів з урахуванням *модульного принципу побудови*. Сутність цього принципу полягає у побудові механічних, апаратних та програмних частин робота з уніфікованих частин – модулів. Модулі уніфіковані за функціональним призначенням та умовами сполучення один з одним (за конструкцією, вхідними та вихідними параметрами тощо).

Система модулів будується за ієрархічним принципом: складні модулі складаються з більш простих. Наприклад, привод, виконаний у вигляді модуля, є готовою конструктивною частиною для збирання маніпуляторів та пристроїв пересування, що пристосована для з'єднання з модулями іншого функ-

ціонального призначення. При цьому в свою чергу він також складається з дрібніших модулів, які дозволяють збирати різні модифікації цього приводу.

Модульний принцип побудови роботів дозволяє найбільш легко створювати їх модифікації та нові типи на базі тих самих конструктивних частин. При цьому виникає можливість у кожному конкретному випадку вибирати оптимальну ступінь кінематичної, апаратної та програмної надмірності, вартість і розподіл функцій між роботом і технологічним обладнанням, що працює разом з ним (аж до конструктивного об'єднання окремих модулів робота з цим обладнанням).

При проектуванні модулів слід орієнтуватися на максимально можливе використання уніфікованих елементів і добре відпрацьованих конструкцій.

При розробці ескізного проєкту ПР оцінюють швидкості та прискорення характерних точок маніпулятора, визначають навантаження на модулі у найважчих режимах роботи, формують точні вимоги до окремих вузлів ПР.

У ході проектування модулів ПР відповідно до технічних вимог вибирають їх компоновальні схеми. З умов міцності, жорсткості та точності визначають форму та розміри несучих конструкцій модулів, напрямних, осей та їх опор, вимоги до точності їх виготовлення. Розраховують навантаження на привод, на основі яких вибирають необхідний двигун та проєктують передачі.

Після вибору основних технічних рішень та конструктивного опрацювання у першому наближенні модулів і всього маніпулятора розробляють його привод та систему керування. Вибирають типи датчиків, джерел живлення та підсилювачів. Розраховують їх параметри і підбирають необхідні типорозміри з числа моделей, що випускаються промисловістю. Оцінюють досягнуті на етапі ескізного проектування основні функціональні, конструктивні та експлуатаційні характеристики робота.

Ідею модульної побудови роботів можна трактувати як економічно оптимальний шлях створення функціональної надмірності, але не в окремому роботі, а в рамках всього арсеналу уніфікованих частин – модулів. Модульний принцип побудови роботів можна застосовувати також під час проектування функціонально складних роботів з технічним зором та інтелектуальним керуванням. При цьому його можна розглядати як форму реалізації ідеї створення таких роботів, стосовно не до окремого робота, а до всієї їх множини.

В цілому модульний підхід до побудови роботів дає наступні переваги:

- різко скорочуються (до кількох місяців) терміни створення та освоєння виробництва нових марок роботів, оскільки вони збираються з апробованих серійних компонентів;
- зростає технічний рівень роботів і знижується їх вартість, що пов'язано зі здешевленням компонентів роботів при їх серійному виробництві, а також зі зменшенням надмірності в конструкції та параметрах роботів завдяки тому, що з'являється можливість для кожного конкретного застосування компонувати роботи з мінімально необхідної кількості найпростіших модулів;
- знижуються витрати на створення, виробництво та експлуатацію роботів, суттєво спрощується їх обслуговування та ремонт;
- виробництво роботів зводиться головним чином до їх збирання зі стандартних частин, що може бути організовано практично на будь-якому машинобудівному виробництві.

Особливо велике значення для підвищення технічного рівня та ефективності застосування роботів мають модульні пристрої керування. З їхньою допомогою можна вирішувати проблеми керування як самими роботами, так і технологічними комплексами (дільницями, цехами) загалом. Це дозволяє різко прискорити та здешевити створення та використання роботів у складі технологічних комплексів.

Ідея модульної побудови роботів була сформульована, обґрунтована та реалізована на початку 1980-х років. Високу ефективність застосування модулів було апробовано під час створення роботів для виконання робіт з ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р.

В даний час модульний принцип побудови роботів успішно використовується більшістю провідних фірм, які виробляють роботи.

Поряд із цим принципом існують й інші принципи побудови техніки, також засновані на ідеї уніфікації – це принципи базового виробу та агрегатної побудови.

Принцип базового виробу полягає у створенні сімейства виробів, що повторюють конструкцію спочатку відпрацьованого базового виробу, але в інших габаритах та вантажопідйомності. Принцип агрегатної побудови полягає у створенні виробів різного призначення та компоновок з уніфікованих складальних функціональних одиниць – агрегатів (агрегатні верстати,

агрегатні системи у приладобудуванні та обчислювальній техніці). Ці обидва принципи побудови технічних систем знайшли застосування і в робототехніці і можуть розглядатися як окремі випадки модульного принципу.

Ці принципи застосовуються при створенні спеціальних роботів, що випускаються серійно: складальних, зварювальних, для нанесення покриттів і т.д. Однак і при проектуванні таких роботів модульний принцип може бути корисним для попереднього фізичного моделювання майбутнього виробу, що підлягає системній оптимізації.

5.2. Проектування промислових роботів агрегатно-модульного типу

Агрегатно-модульний принцип створення ПР на базі уніфікованих вузлів, або модулів має наступні переваги:

- можливість побудови спеціальних і спеціалізованих роботів для конкретної технологічної операції, які не мають надмірності функцій і тому дешевших порівняно з універсальними роботами;
- скорочення часу та трудомісткості проектування спеціальних роботів, тому що вони створюються з урахуванням уніфікованих вузлів, номенклатура яких може поповнюватися;
- підвищення надійності внаслідок відпрацьованості цих уніфікованих вузлів та відсутності надмірності;
- здешевлення виробництва роботів внаслідок обмеженої номенклатури деталей та вузлів і, отже, підвищення серійності випуску;
- поліпшення умов експлуатації та ремонту роботів, внаслідок зменшення різноманітності конструкцій вузлів і деталей;
- скорочення термінів підготовки обслуговуючого персоналу.

Разом з тим агрегатно-модульний принцип має певні недоліки: відмова в деяких випадках від вигідніших конструктивних рішень на користь менш вигідних, але відповідних принципу агрегатної побудови; збільшення габаритів та маси конструкції; збільшення числа стиків, що підвищує трудомісткість складання роботів, знижує жорсткість та точність.

Існують різні форми реалізації принципу агрегатної побудови роботів з уніфікованих вузлів, що виконують певні функції. Можна виділити такі

основні принципи класифікації при побудові груп роботів: вид системи координат, спосіб встановлення робота в РТК, спеціалізація, число ступенів рухливості, вантажопідйомність, тип системи керування.

За спеціалізацією та компонованням агрегатно-модульні роботи можуть бути умовно поділені на дві групи:

- агрегатування на основі однієї важливої компоувальної схеми (однотипні роботи). Конкретні виконання роботів відрізняються розмірами та вантажопідйомністю, а також характером комплектацій (системами керування, додатковими модулями тощо);

- агрегатування, що дає можливість отримувати кілька різних компоувальних схем (різноміснї роботи). Вони різняться за видом системи координат, формою і розмірами робочих зон та іншими ознаками.

За характером технічних показників агрегатно-модульні роботи можуть бути поділені на три групи: з незмінними значеннями основних технічних показників, з обмеженим діапазоном та з широким діапазоном основних технічних показників.

Конструктивні параметри модулів визначаються силовими розрахунками за критеріями міцності, надійності, необхідним діапазоном переміщень, швидкостей та прискорень, а також багатьма факторами, пов'язаними з допустимими похибками позиціонування та руху. Тут мають значення пружність та жорсткість конструкції, можливі вібрації, змінність мас об'єктів маніпулювання тощо.

Вихідною інформацією при цьому є загальні вимоги до робота в цілому з урахуванням його функціонування у складі РТК на певних технологічних операціях. Звідси виходять основні вимоги за зазначеними вище факторами (точності, жорсткості тощо) до маніпулятора робота. Потім, маючи конкретну послідовність ланок з тими чи іншими кінематичними парами, визначають розподіл вимог по модулям для всіх ступенів рухливості, а за ними визначаються конструктивні параметри модулів.

За типом системи керування розрізняють роботи, що комплектуються системами керування одного типу чи різних типів.

Різноміснїм агрегатно-модульного принципу побудови роботів є модульний принцип. В цьому випадку роботи проєктують на базі функціональних модулів, що включають усі необхідні механізми, приводи, датчики зворотного зв'язку, енергетичні та інформаційні комунікації, необхідні для роботи модуля.

До основних завдань проєктування модуля відносяться вибір складу, визначення взаємодії його основних функціональних елементів та конструктивних параметрів деталей та агрегатів.

При вирішенні цих завдань необхідно використовувати попередній досвід робототехніки (аналіз існуючих конструкцій роботів та створення бази даних можливих або типових конструктивних рішень модулів). Проєктування модулів може бути розбите на такі основні етапи:

- вибір загальної компоновальної кінематичної схеми;
- вибір геометричних та функціональних співвідношень між основними елементами;
- визначення розмірів напрямних або осей;
- оцінка маси та сил інерції рухомих елементів та вибір приводу;
- вибір основних розмірів несучих корпусів, опор, напрямних чи осей;
- визначення вимог до точності основних елементів;
- оцінка загальної маси та габаритних розмірів модуля.

Проєктування модуля починається з вибору його загальної кінематичної схеми з урахуванням інформації, зібраної у базі даних. Компоновальні кінематичні схеми для систематизації групують за такими ознаками:

- *за призначенням* – підйому або висування руки, повороту, гойдання, зсуву затискача, горизонтального переміщення робота або його модулів;
- *за видом напрямних* – дві, три, чотири циліндричні напрямні, призматичні напрямні з трьома або чотирма гранями, змішані напрямні;
- *за видом опор напрямних* – ковзання, з тілами кочення у вигляді роликів на осях або в сепараторах, з кульковими опорами кочення тощо;
- *по рухливості каретки* – по нерухомих напрямних рухається каретка, щодо нерухомої каретки рухаються напрямні, комбіновані схеми;
- *за виглядом та розташуванням приводу* – обертальний привод із зубчастою або ланцюговою передачею, поступальний привод тощо;
- *за розміщенням упорів, гальмівних пристроїв та датчиків положення* – на основній або допоміжній напрямній, корпусі, додатковій штанзі тощо.

Виконавчий модуль реалізує рух робота за одним ступенем рухливості, та має у своєму складі агрегат, двигун, редуктор, датчики зворотного зв'язку, уніфіковані приєднувальні розміри і параметри зовнішнього сполучення з колами енергоживлення та керування.

Модуль-привод перетворює команди, що надходять від пристрою керування, у необхідні зусилля або обертальний момент. Включає у своєму

складі двигун, редуктор, датчики зворотного зв'язку і пристрій керування приводом, що забезпечують необхідні рухи ланок механізмів робота.

На рис. 5.2 наведений набір модулів виконавчої системи ПР, різні комбінації яких дають можливість компоувати маніпулятор, що забезпечує рішення технологічної задачі.

1 Рука висувна



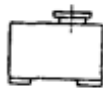
2 Рука ліктьова двошарнірна



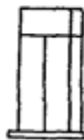
3. Рука ліктьова тришарнірна



4 Механізм повороту



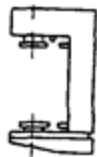
5 Механізм підйому



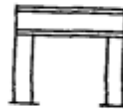
6 Механізм качання



7 Каретка



8 Монорейка



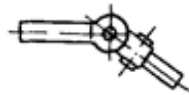
9 Стіл тактовий



10 Стіл хрестовий



11 Орієнтуючий механізм



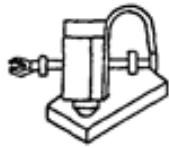
12 Пристрій захоплення



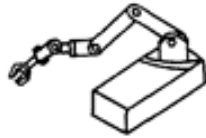
Рисунок 5.2 – Деякі конструкції уніфікованих агрегатних модулів ПР

«Руки» маніпулятора, що входять до набору (висувна, ліктьова дво- або тришарнірна), механізми (повороту, підйому, гойдання, орієнтування), каретка, монорейка, столи (тактовий, хрестовий) і пристрої захоплення дозволяють отримати варіанти компоновок маніпуляторів промислових роботів (рис. 5.3) з різними можливостями маніпуляційної системи. Оснащення таких маніпуляторів модульними керуючими пристроями дає можливість формувати промислові роботи модульного типу, що не мають надлишкових можливостей і найбільш повно відповідають конкретним технологічним процесам, специфіці та можливостям виробництва.

Модулі 1, 4, 5, 12



Модулі 3, 4, 11, 12



Модулі 1, 4, 5, 11, 12



Модулі 2, 7, 8, 12

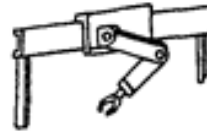


Рисунок 5.3 – Приклади конструкцій ПР з уніфікованих агрегатних модулів

Модуль пристрою керування – збірна одиниця з уніфікованими приєднувальними розмірами, що підключається до загальної схеми через уніфіковані інтерфейси та виконує якісь задані функції (наприклад, процесор, група плат сполучення з каналом зовнішньої інформації).

В даний час у робототехніці застосовують мехатронні модулі руху та інтелектуальні мехатронні модулі.

Мехатронний модуль руху (ММР) – конструктивно і функціонально самостійний виріб, що включає керований двигун, механічний та інформаційний пристрій. До складу ММР входить вбудований інформаційний пристрій, що включає датчики зворотного зв'язку та інформації, а також електронні блоки для обробки та перетворення сигналів.

Інтелектуальний мехатронний модуль (ІММ) – конструктивно та функціонально самостійний виріб, побудований шляхом синергетичної інтеграції рухової механічної, інформаційної, електронної та керуючої частин. Порівняно з ММР у конструкцію ІММ додатково вбудовуються керуючі та електронні пристрої: цифрові обчислювальні пристрої, електронні силові перетворювачі, комп'ютерні пристрої сполучення та зв'язку.

Переваги агрегатно-модульного принципу можуть бути повністю реалізовані тільки при задоволенні наступних вимог до створюваних ПР:

- характеристики та технологічні параметри ПР повинні максимально точно відповідати його функціональному призначенню та вимогам конкретного технологічного процесу;

- компонування маніпулятора ПР та його керуючого пристрою має забезпечувати мінімальний обсяг маніпуляційних дій, необхідних для забезпечення певного технологічного процесу, тобто відповідати принципу мінімізації конструктивного рішення;

- обсяг операцій, що виконуються ПР, та темпи їх виконання у поєднанні з витратами на впровадження повинні забезпечувати техніко-економічну ефективність застосування ПР.

Розробка та створення модульних конструкцій – трудомістке та тривале завдання, якому має передувати цілий комплекс робіт: проведення досліджень щодо встановлення параметричних рядів конструктивно-технологічних характеристик ПР, розробка принципів агрегатної побудови ПР стосовно технологічних процесів, розробка технологічних вимог, яким повинні відповідати агрегатно-модульні ПР, вибір системи модулів та кінематики ПР, розробка принципів створення широко номенклатурних та переналагоджуваних роботизованих комплексів, що обслуговуються агрегатно-модульними ПР, обґрунтування доцільності створення та застосування агрегатно-модульних ПР.

5.3. Принципи проєктування промислових роботів

Проєктування ПР є складним системним завданням, для вирішення якого необхідно, щоб принципи та підходи відповідали вимогам, що висуваються до ПР, як до технічного засобу гнучкої виробничої системи.

Основними технічними вимогами є:

- забезпечення функцій та параметрів гнучкої виробничої системи;
- гнучкість (простота переналагодження при переході на інший виріб);
- стійка робота в автоматичному режимі;
- економічність, що забезпечується низькою вартістю і експлуатаційними витратами, відповідністю складності виконуваних робіт;
- надійність роботи, а також включення та вимкнення в інтервалі температур від 0 до 50 °C;
- відповідність питомих показників за матеріало- та енергоємністю найкращим світовим зразкам.

Виходячи з перелічених вимог, доцільно керуватися такими принципами.

Параметри робота вибирають з урахуванням функціонального аналізу технологічних чинників. Виходячи з економічних вимог, необхідно при цьому мінімізувати кількість ступенів рухливості, а також переміщення при максимально допустимій похибці позиціювання. При виборі раціональної кінематичної схеми та компоновання самого робота доцільно поєднувати робочі зони технологічного обладнання та зменшувати кількість варіантів підходу до цих зон робочого органу.

Компоновання робота та кінематичну структуру визначають методом багатокритеріальної оцінки. При цьому необхідно враховувати:

- відносний об'єм та форму робочої зони;
- відповідність траєкторій робочого органу вимогам ТП;
- можливості системи керування з реалізації одночасного руху кількох ступенів рухливості із заданими параметрами;
- площа, яку займає гнучкий виробничий модуль ГВМ;
- простоту конструкції.

Динамічні параметри робота необхідно визначати, виходячи з продуктивності ГВМ, значень переміщень робочого органу за цикл. Продуктивність та обсяг випуску ГВМ мають забезпечувати задану норму рентабельності його впровадження у виробництво.

Похибка позиціювання визначається з технологічних вимог із запровадженням коефіцієнта запасу $k_z = 1,2 \dots 1,3$. Розподіл похибки позиціювання між ступенями рухливості робота необхідно проводити з урахуванням її векторного уявлення, значень переміщень за ступенями рухливості, роздільної здатності датчиків положення і технології виготовлення елементів конструкції.

Проектування механічної системи проводять з урахуванням того, що вона складається з двох систем: несучої механічної системи і виконавчої системи, взаємопов'язаних між собою, але такими що відрізняються функціональним призначенням. Несуча механічна система забезпечує форму і обсяг робочої зони, служить для розміщення вузлів виконавчої системи і являє собою розімкнутий кінематичний ланцюг. Виконавча система служить для забезпечення динамічних параметрів робота та заданої точності і являє собою систему механізмів, що приводять в рух ланки несучої механічної системи.

Переміщення орієнтуючого механізму визначають із аналізу змін положень об'єкта маніпулювання або робочого органу в процесі виробництва щодо положення вихідної ланки несучої механічної системи.

Силовий розрахунок маніпулятора і модулів. Завдання силового розрахунку – визначення діючих на модулі ступенів рухливості сил та моментів. У номінальному режимі роботи робот навантажується силами інерції об'єкта маніпулювання та конструктивних елементів самого маніпулятора. Для визначення цих сил повинні бути відомі швидкості, прискорення та інерційні параметри конструкцій, які несе модуль, що розглядається.

В результаті загального розрахунку маніпулятора визначають зовнішнє навантаження на вході кожного модуля $\mathbf{P}_n = [p_x, p_y, \dots, p_\alpha, \dots, p_\gamma]^T$ та навантаження від сил інерції, перш за все рухомих елементів конструкції модуля $\mathbf{H}_n = [H_x, H_y, \dots, H_\alpha, \dots, H_\gamma]^T$. Ці параметри є вихідними для силового розрахунку модуля. До основних завдань такого розрахунку відносяться вибір необхідного зусилля приводу модуля та визначення зусиль в опорах напрямних або осі.

Кінематичні параметри маніпулятора визначаються необхідними характеристиками швидкодії, наприклад, повним часом спрацьовування T кожного ступеня рухливості, а також видом приводу і системи керування. Привод та система керування визначають загальний характер зміни у часі швидкостей та прискорень спрацьовування ступенів рухливості. На ранніх етапах проектування залежності між швидкістю та часом можна апроксимувати трапецією. Співвідношення між тривалістю окремих ділянок руху (розгону t_p , руху з постійною швидкістю t_y і гальмування t_t) та повним часом спрацьовування T характерні для кожного виду приводу та системи керування.

Вибравши типові для даного виду приводу та системи керування співвідношення $k_p = t_p/T$ і $k_t = t_t/T$, можна оцінити максимальну швидкість v та прискорення a спрацьовування ступеня рухливості. В результаті інтегрування швидкості отримаємо зв'язок між максимальною швидкістю v та величиною переміщення ступеня рухливості S :

$$S = 0,5Vt_p + Vt_y + 0,5Vt_t. \quad (5.1)$$

Після підстановки в (5.1) виразів $t_p = k_p T$; $t_t = k_t T$ і $t_y = T - t_p - t_t$ знайдемо оцінку максимальної швидкості V спрацьовування ступеня рухливості:

$$V = \frac{S}{T} \frac{1}{1 - 0,5(k_p + k_t)}. \quad (5.2)$$

Тоді оцінка максимального прискорення при гальмуванні

$$a = \frac{V}{t_t} = \frac{S}{T^2} \frac{1}{k_t [1 - 0,5(k_p + k_t)]}. \quad (5.3)$$

Розрахунок швидкодії промислового робота. Час виконання роботою циклу переміщень деталі багато в чому визначає продуктивність всього роботизованого комплексу. Тому вимоги до швидкодії робота зазвичай досить високі. Час переміщення роботою деталі обумовлений законами зміни зовнішніх сил (рушійних та опору) та інерційністю ланок механізму. Закон зміни керуючих сил залежить від типу використовуваного приводу та від виду системи керування.

Розглянемо розрахунок швидкодії одного з приводів промислового робота із цикловою системою керування. При цикловій системі керування відносні переміщення ланок обмежуються пересувними упорами та кінцевими вимикачами.

На рис. 5.4 зображено кінематичну схему маніпулятора з трьома ступенями рухливості. Час виконання роботою рухів визначається динамічними характеристиками приводів та маніпулятора – рушійними силами та силами опору, масами та моментами інерції ланок. Під дією цієї сили рука переміщається з постійним прискоренням і швидкістю, що зростає. Обмеження ходу поршня може здійснюватися або жорстким упором або упором з демпфером.

При зупинці на упорі без демпфера, швидкість ланки повинна миттєво зменшитися з деякого кінцевого значення до нуля.

Така зупинка ланки називається жорстким ударом. Вона супроводжується великими динамічними навантаженнями на ланки механізму. Так як реальний маніпулятор є пружно-інерційною системою, то ці навантаження викличуть відбиття ланки від упору, а також коливання всього механізму. Затискач здійснюватиме коливання щодо заданого кінцевого положення. Час згасання цього процесу значно знижує швидкість робота.

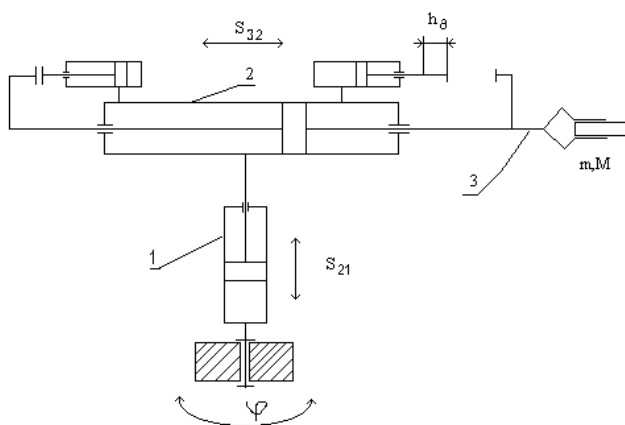


Рисунок 5.4 – Кінематична схема ПР

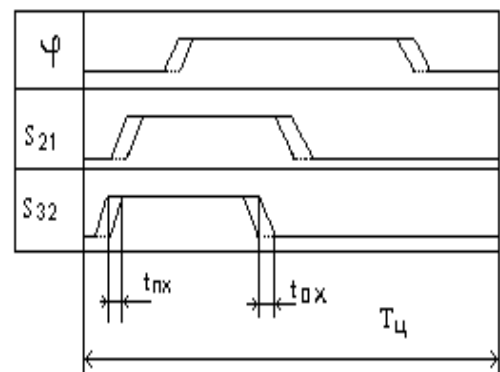


Рисунок 5.5 – Циклограма роботи ПР

Зменшити ці коливання або взагалі виключити їх можна, забезпечивши безударну зупинку. Однак це можливо тільки в регульованому приводі при контурному керуванні. Крім того, при безударній зупинці в кінці ходу відносна швидкість близька до нуля, тому час переміщення затискача в необхідне положення значно зростає. Компромісним рішенням є зупинка з м'яким ударом, при якому відносна швидкість в кінці ходу дорівнює нулю, а прискорення обмежене деяким допустимим значенням. У механізмах з цикловим керуванням режим руху з м'яким ударом забезпечується установкою упорів з демпферами, що гасять кінетичну енергію руки.

Циклограма роботи ПР наведена на рис. 5.5. Загальний час циклу $T_{\text{ц}}$ складається з часу зупинок в заданих положеннях (на циклограмі зупинки показані прямими паралельними горизонтальній осі t) і часу відносних переміщень ланок з одного заданого положення до іншого $t_{\text{пх}}$ і назад $t_{\text{ох}}$ (похилі прямі). Час зупинок зазвичай задано умовами технологічного процесу.

При проектуванні складно врахувати всі можливі варіанти організації руху робота. Тому його конструктивні параметри слід вибирати за найважливішим режимом роботи – одночасного спрацьовування всіх ступенів рухливості. Швидкості робочого органу роботів зазвичай задаються специфікою технологічного процесу.

Розрахунок точності маніпуляторів промислових роботів. Похибка позиціювання робочого органу маніпулятора є наслідком неточної роботи різних функціональних елементів робота. Завдання загального розрахунку точності маніпулятора – визначення залежності похибки позиціювання робочого органу від похибок модулів та вибір допустимих похибок модулів.

Під похибкою n -го модуля розуміється геометричне відхилення його входу від номінального положення. При цьому умовно передбачається, що немає похибок положення виходу цього модуля. У загальному випадку похибка модуля описується матрицею-стовпцем $\Delta_n = [\Delta x_n, \Delta y_n, \dots, \Delta \alpha_n, \dots, \Delta \gamma_n]^T$, що містить три лінійні $\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n$ складові похибки, спрямовані вздовж осей x_n, y_n, z_n і три кутові $\Delta \alpha_n, \Delta \beta_n, \Delta \gamma_n$ похибки щодо тих же осей.

Похибки позиціювання робочого органу робота Δ_0 залежать від заданих похибок модулів Δ_n ($n = 1, 2, \dots, N$). Кожна складова похибки позиціювання робочого органу $\Delta_0 = \{\Delta x_0, \Delta y_0, \dots, \Delta \alpha_0, \dots, \Delta \gamma_0\}$ є певною функцією похибок модулів.

При розрахунку точності маніпулятора можна використовувати відповідні передавальні відношення, отримані в результаті силового розрахунку.

Як і при розрахунку всього маніпулятора, при розрахунку точності модуля ступеня рухливості визначають похибки модуля за заданими похибками функціонування конструктивних елементів і вибирають вимоги до цих елементів, що забезпечують задану точність модуля.

За ступенем стабільності похибки роботів поділяють на систематичні, випадкові динамічні та статичні.

Джерелами систематичних похибок є:

- похибки розмірів основних конструктивних елементів, спричинені неточністю їх виготовлення, зношуванням та статичними деформаціями під дією сил ваги власних конструкцій та постійної складової зусилля приводу;
- постійні складові похибок датчиків положення, у тому числі похибки нульових значень;
- похибки функціонування системи керування, спричинені старінням її елементів та наближеністю розрахунків.

Вплив систематичних похибок на якість роботизованого процесу залежить від методів програмування. При програмуванні методом навчання робот у режимі ручного керування виводиться в необхідні положення, показання датчиків запам'ятовуються і згодом відпрацьовуються автоматичною системою керування. Отже, більшість систематичних похибок виявляються врахованими.

Метод аналітичного програмування полягає у розрахунку та запам'ятовуванні необхідних сигналів керування. У цьому випадку систематичні похибки безпосередньо впливають на похибку положення робочого органу щодо зовнішнього обладнання або виробу, що обробляється. Частину таких похибок можна врахувати за допомогою поправок, отриманих під час проведення атестаційних випробувань робота.

На відміну від систематичних випадкові похибки впливають на якість виконання роботом виробничих завдань за будь-яких методів програмування. Випадкові динамічні похибки, насамперед вібрації, можуть викликатися:

- силами інерції, що виникають під час вільного переміщення маніпулятора;
- силою взаємодії робота із зовнішнім середовищем у процесі захоплення та відпускання об'єкта маніпулювання, різних стадій сполучних рухів, створення технологічних зусиль тощо;

- змінними складовими зусилля приводу, у тому числі пульсаціями тиску живлення в роботах з гідرو- та пневмоприводами;
- нестійкістю роботи приводу та системи керування робота;
- вібраціями основи робота, що викликаються зовнішніми джерелами (наприклад, струси від спрацювання важкого неврівноваженого ковальсько-пресового обладнання).

Точність позиціонування робочих органів маніпуляторів визначається похибками позиціонування характеристичної точки пристрою захоплення (точка M) та похибками кутової орієнтації пристрою захоплення (рис. 5.6).

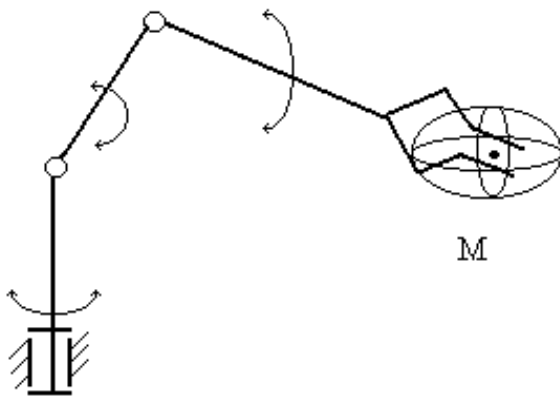


Рисунок 5.6 – Еліпсоїд відхилень центру пристрою захоплення

Похибки позиціонування визначаються технологічними відхиленнями розмірів ланок маніпулятора, зазорами в кінематичних парах маніпулятора та механізмів приводів, деформаціями (пружними та температурними) ланок, а також похибками системи керування та датчиків зворотного зв'язку. У паспортних даних маніпуляторів вказується максимально допустиме відхилення центру кліщів маніпулятора від його

номінального розташування на безлічі можливих змін конфігурацій механізму. У результаті похибок точка M описує у просторі деякий еліпсоїд, який називається еліпсоїдом відхилень.

Розрахунок модулів на жорсткість. Інформація про жорсткість модуля і маніпулятора в цілому необхідна для оцінки викликаних деформаціями похибок позиціонування, а також для аналізу процесів поєднання об'єктів маніпулювання з роботом та зовнішнім обладнанням.

У загальному випадку деформація модуля аналогічно його похибці описується матрицею-стовпцем $\delta_n = [\delta x_n, \delta y_n, \dots, \delta \alpha_n, \dots, \delta \gamma_n]^T$, що містить три лінійні $\delta x_n, \delta y_n, \delta z_n$ складові зміщення центру входу модуля в напрямку осей $x_n y_n z_n$ і три кутові $\delta \alpha_n, \delta \beta_n, \delta \gamma_n$ складові щодо тих же осей.

Податливість модуля – характеристика, зворотна жорсткості, встановлює зв'язок між деформацією δ_n і навантаженням, що її викликає, на вході модуля P_n .

Жорсткість механічної системи визначають з урахуванням допустимих зсувів робочого органу під час позиціювання під впливом інерційних сил. Деформацією від дії сил тяжіння нехтують, оскільки вона враховується під час програмування. Перед початком розрахунку розподіляють допустимі деформації між несучою та виконавчими системами. Деформація несучої системи становить 85...95% від сумарної деформації, виконавчої системи – 5...15% і залежить від застосовуваного передавального механізму. При використанні кульково-гвинтових механізмів деформація становить 3...5%, зубчастих передач – 5...8%, хвильових – 10...15%.

При розрахунку жорсткості несучої механічної системи, розрахункова модель повинна враховувати:

- масу та розташування вантажу та робочого органу, орієнтуючого механізму, передавальних механізмів та ланок;
- контактну податливість вузлів з'єднання ланок.

Врівноважування маніпуляторів. У більшості кінематичних схем маніпуляторів приводи сприймають статичні навантаження від ваги ланок. Це вимагає значного збільшення потужностей двигунів приводів та моментів гальмівних пристроїв. Для боротьби із цим використовують такі методи.

1. Використовують кінематичні схеми маніпуляторів, у яких сили ваги ланок сприймаються підшипниками кінематичних пар. На потужність приводів та гальмівних пристроїв, при такому рішенні сили ваги впливають лише через сили тертя у парах. Як приклад можна навести кінематичну схему робота SCARA (рис. 5.7). Недоліком цього є великі осьові навантаження в підшипниках.

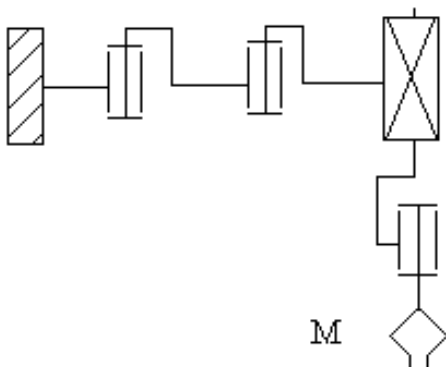


Рисунок 5.7 – Кінематична схема робота SCARA

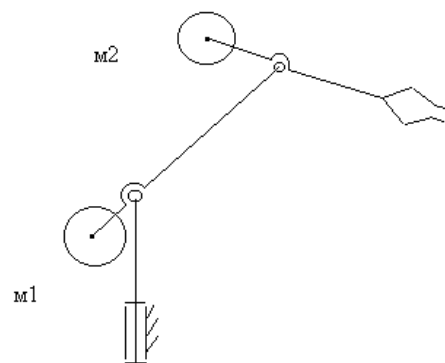


Рисунок 5.8 – Врівноваження за допомогою корегування маси ланок

2. Врівноважування ланок маніпулятора за допомогою коригування їхньої маси. При цьому центр мас ланки за допомогою коригувальних мас зміщується до центру кінематичної пари (рис. 5.8) Недоліком цього методу є значне збільшення маси маніпулятора та моментів інерції його ланок.

3. Врівноважування сил ваги ланок маніпулятора за допомогою пружних розвантажувальних пристроїв – пружинних розвантажувачів або врівноважувачів. Ці пристрої не дозволяють забезпечити повне розвантаження приводів від дії сил ваги по всьому відносному переміщенні ланок.

Тому конструкція цих пристроїв включає кулачкові або важільні механізми, які узгоджують пружну характеристику пружини з характеристикою сил ваги ланок, що врівноважуються.

На рис. 5.9 показана схема промислового робота, в якому привод вертикального переміщення руки забезпечений механізмом для силового розвантаження, що складається з пружини та кулачкового механізму з профілем, виконаним по спіралі Архімеда.

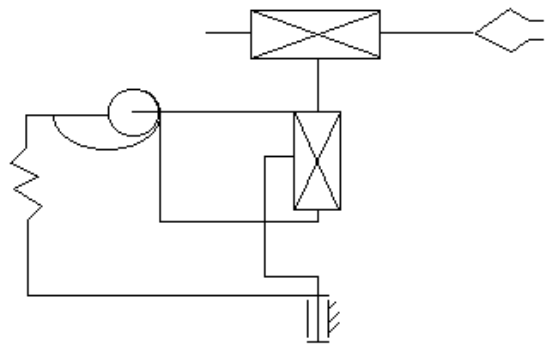


Рисунок 5.9 – Врівноваження за допомогою розвантаження

4. Врівноважування вузлів, що переміщуються проводять також, вбудовуючи пристрої на базі пневмо- або пневмогідроприводу.

5.4. Проектування електроприводів роботів

5.4.1. Постановка завдання та основні етапи проектування

Електричний привод є найперспективнішим видом приводу для промислових роботів. Це зумовлено цілою низкою переваг електроприводу порівняно з гідроприводом або пневмоприводом (розділ 3).

Електропривод як силовий елемент робота, як правило, складається з наступних основних частин: електричного двигуна, підсилювача потужності та механічної передачі. У ПР з контурним та позиційним керуванням використовують електропривод з головним зворотним зв'язком за положенням.

Такий ЕП може працювати або в слідкувальному режимі (контурні пристрої керування), або в режимі позиціонування (позиційні пристрої керування). Електропривод може містити додаткові елементи: тахогенератори, датчики струму, корегуючі пристрої і т.д.

Проектування електроприводів роботів здійснюється на основі енергетичних, динамічних, конструктивних та експлуатаційних вимог. ЕП повинен мати необхідну потужність, забезпечувати необхідну точність відпрацювання програмних впливів, мати задані динамічні характеристики. У деяких випадках потрібно використовувати певний тип двигунів, підсилювачів, джерел живлення, отримати мінімальні габаритні розміри та вагу, забезпечити певний температурний режим тощо.

Алгоритм проектування допускає багатоінваріантність рішень, оскільки вимоги часто мають суперечливий характер. Спільними для всіх приводів є вимоги до енергетичних і динамічних характеристик, що визначають запаси стійкості та якість перехідних процесів.

Ці вимоги лежать в основі розглянутої нижче методики проектування, що дозволяє попередньо вибрати елементи ЕП та зробити їх динамічний розрахунок.

Приводи робота можуть працювати незалежно, коли здійснюються послідовні рухи за різними ступенями рухливості (можливо в позиційних пристроях керування), та спільно, коли потрібно відтворити в просторі задану траєкторію (контурні пристрої керування). В обох випадках використовується система приводів робота. При відпрацюванні заданої траєкторії руху за рахунок взаємного впливу ступенів рухливості погіршуються динамічні характеристики приводів.

Всі етапи проектування приводів ПР розбивають на дві групи.

На етапах проектування першої групи приводи розглядаються незалежно за кожним ступенем рухливості. Взаємний вплив ступенів рухливості враховується запровадженням діапазонів зміни інерційних характеристик навантаження та максимального моменту навантаження. Необхідні числові дані визначаються при проектуванні модулів ступенів рухливості та в результаті дослідження кінематики та динаміки маніпулятора.

На етапах проектування другої групи аналізують працездатність системи приводів при спільному русі: перевіряють виконання технічних умов і при необхідності розраховують додаткові компенсуючі впливи на приводи для здійснення розв'язування.

Етапи проєктування першої групи є визначальними, оскільки дозволяють вибрати елементи, побудувати структурні схеми та розрахувати параметри слідкувальних електроприводів робота.

До основних етапів проєктування належать:

- визначення вихідних даних для розрахунку;
- вибір основних елементів слідкувального приводу;
- побудова структурної схеми системи та визначення динамічних характеристик обраних елементів;
- синтез динамічних характеристик ЕП та функціональних блоків;
- перевірочний розрахунок.

Визначення вихідних даних для розрахунку. Вихідними даними є параметри маніпулятора та параметри режимів руху. Для обертальних ступенів рухливості визначають такі вихідні дані:

- мінімальне та максимальне значення моменту інерції навантаження J_n ;
- максимальне стале значення моменту навантаження $M_{l\max}$;
- максимальна кутова швидкість навантаження $\Omega_{\max}$;
- максимальне кутове прискорення навантаження $\alpha_{\max}$;
- гранично припустима помилка позиціювання $\delta_{\max}$.

Деякі вихідні дані можуть бути задані, а деякі визначаються розрахунковим шляхом під час виконання силового розрахунку. Для поступального ступеня рухливості вихідні дані визначають і записують у такій же послідовності.

Вибір основних елементів електропривода. На цьому етапі вибирають виконавчий двигун та редуктор, датчики положення та швидкості, визначають вимоги до підсилювача потужності. Виписують типи та технічні дані вибраних елементів. При виборі елементів рекомендується орієнтуватися на типові елементи, що випускаються промисловістю.

Побудова структурної схеми системи та визначення динамічних характеристик обраних елементів. На основі динамічних характеристик вибраних елементів складають передавальну функцію заданої частини системи та розраховують її параметри: коефіцієнти передачі та сталі часу. При змінному моменті інерції навантаження задана частина сприймається як квазістаціонарна. У цьому випадку визначають діапазон зміни відповідного параметра передавальної функції.

Синтез динамічних характеристик електроприводу та функціональних блоків. Завдання синтезу вирішується у два етапи. На першому

етапі вибирають бажану передавальну функцію приводу, а на другому – визначають передавальні функції необхідних функціональних блоків (регуляторів положення, швидкості, струму та коригувальних пристроїв). При цьому враховують змінний характер деяких параметрів заданої частини системи, які змінюються від пуску до пуску.

Перевірочний розрахунок. На цьому етапі розраховують перехідний процес та визначають його показники якості: час перехідного процесу, перерегулювання, показник коливання. Також досліджують вплив зміни параметрів заданої частини на показники якості та при необхідності вносять зміни до передавальних функцій регуляторів.

Крім основних етапів проєктування, можливі й додаткові етапи, пов'язані з урахуванням наступних факторів:

- пружної податливості елементів ланок маніпулятора та редуктора;
- нелінійності характеристик окремих елементів приводів, наприклад, насичення магнітної системи двигуна, люфти в редукторі, сухе тертя у шарнірах, обмеження у підсилювачі тощо;
- неточна компенсація взаємного впливу при спільній роботі приводів за різними ступенями рухливості маніпулятора.

5.4.2. Розрахунок енергетичних параметрів приводу

Розрахунок енергетичних параметрів приводу ПР (силовий розрахунок) виконують у наступній послідовності: орієнтовний розрахунок потужності двигуна, попередній вибір двигуна, розрахунок оптимальних за швидкодією передавальних чисел для кожного модуля руху, остаточний вибір двигуна за умов оптимального часу відпрацювання циклу переміщення і найбільш компактної конструкції.

Кінематичні характеристики приводу. При проєктуванні приводів роботів закон зміни швидкості (лінійної v для модуля поступального руху або кутової Ω для модуля обертального руху) приводу в більшості випадків задають трапецеїдальним (рис. 5.10), що забезпечує постійне прискорення (лінійне a або кутове α при розгоні і гальмуванні).

Довжина шляху розгону Θ_p (або s_p для модуля поступального руху) дорівнює довжині шляху уповільнення Θ_t (або s_t) і становить деяку частину загального шляху переміщення Θ (або s).

Відношення шляху розгону Θ_p (s_p) вихідної ланки приводу до його повного переміщення Θ (s) є характеристикою циклу роботи приводу:

$$K_{\text{ц}} = \frac{\Theta_p}{\Theta} = \frac{\Theta_r}{\Theta} = \frac{s_p}{s} = \frac{s_r}{s} \quad (5.4)$$

де $K_{\text{ц}}$ – коефіцієнт, що характеризує відносну інтенсивність наростання чи зниження швидкості виконавчої ланки маніпулятора.

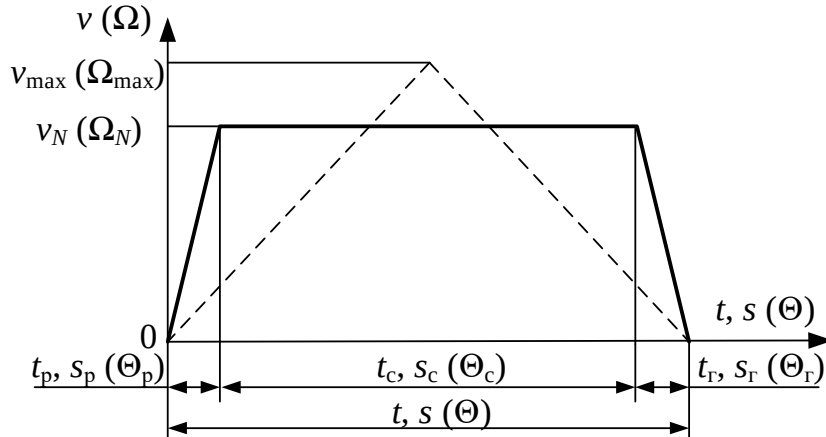


Рисунок 5.10 – Трапецеїдальний закон зміни швидкості

При заданій номінальній швидкості Ω_N (або v_N при поступальному русі) зменшення коефіцієнта $K_{\text{ц}}$ підвищує швидкодію, але збільшує динамічні навантаження на ланки приводу, тому в проєктних розрахунках величину коефіцієнта $K_{\text{ц}}$ слід приймати з умови обмеження максимальних прискорень вантажу, що переноситься, і елементів конструкції маніпулятора значеннями, що не перевищують $g/2$ ($g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення сили тяжіння), тобто близько 5 м/с^2 . Таким чином, для приводів ПР з найбільш поширеними величинами переміщень та швидкостей ланок можна в орієнтовних розрахунках приймати $K_{\text{ц}} = 0,1$.

Якщо $K_{\text{ц}} = 0,5$, то шлях розгону вихідної ланки приводу стає рівним половині повного його переміщення, тобто $\Theta_p(s_p) = 0,5 \Theta(s)$, і усталений рух відсутній. Трапецеїдальний закон зміни швидкості вироджується у трикутний. При цьому законі максимальна швидкість $\Omega_{\max}$ ($v_{\max}$) більша за номінальну. Шлях розгону Θ_p для прийнятого рівноприскореного руху

$$\Theta_p = \frac{\Theta}{2} = \frac{\alpha t_p^2}{2} = \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\Omega_{\max}}{\alpha} \right)^2 = \frac{\Omega_{\max}^2}{2\alpha} \quad (5.5)$$

де α – кутове прискорення вихідної ланки приводу; t_p – час розгону вихідної ланки приводу до усталеної швидкості. Тоді $\Omega_{\max} = \sqrt{\Theta \alpha}$.

При проєктуванні приводів роботів номінальні швидкості переміщення вихідних ланок виконавчого пристрою (ВП) повинні бути менше максимальних, тобто $\Omega_N < \Omega_{\max}$ і $v_N < v_{\max}$.

Шлях розгону при кутовому переміщенні вихідної ланки можна визначити як $\Theta_p = K_{\text{ц}} \Theta$.

Під час усталеного руху кутове переміщення вихідної ланки дорівнює $\Theta_y = \Theta - 2\Theta_p = \Theta - 2K_{\text{ц}} \Theta = (1 - 2K_{\text{ц}}) \Theta$.

$$\text{Час розгону вихідної ланки } t_p = \frac{2\Theta_p}{\Omega_N} = \frac{2K_{\text{ц}} \Theta}{\Omega_N}.$$

$$\text{Час усталеного руху } t_y = \frac{\Theta_y}{\Omega_N} = \frac{(1 - 2K_{\text{ц}}) \Theta}{\Omega_N}.$$

Час повного переміщення вихідної ланки приводу

$$t = 2t_p + t_y = \frac{2 \cdot 2K_{\text{ц}} \Theta}{\Omega_N} + \frac{(1 - 2K_{\text{ц}}) \Theta}{\Omega_N} = \frac{(1 + 2K_{\text{ц}}) \Theta}{\Omega_N}.$$

$$\text{Кутове прискорення вихідної ланки } \alpha = \frac{\Omega_N}{t_p} = \frac{\Omega_N^2}{2K_{\text{ц}} \Theta}.$$

При лінійному переміщенні вихідної ланки приводу у всіх формулах для кутового переміщення необхідно Θ замінити на s , Ω_N на v_N і α на a – лінійне прискорення вихідної ланки приводу.

Механічна система приводу у складі двигуна, виконавчої ланки і передачі між ними є досить складним кінематичним ланцюгом з великою кількістю рухомих мас. Тому в інженерних розрахунках, особливо при проєктуванні, коли точні значення розрахункових параметрів невідомі, прийнято на основі ряду припущень замінювати таку систему більш простою одно-або двомасовою розрахунковою схемою з приведенням інерційних, силових та інших параметрів до якоїсь однієї ланки, наприклад, до валу двигуна. При цьому система може бути представлена в інтерпретації як поступального, так і обертового рухів, а приведення параметрів системи до відповідної ланки здійснюється за відомими правилами.

При визначенні потужності двигуна модуля руху робота за основу приймають одномасову розрахункову схему, тому розрахунок має орієнтовний характер. Потужність двигуна визначається в період пуску, коли дви-

гун долає, крім статичного опору вантажу, що переноситься, і неврівноважених частин рухомих ланок, також їх інерційний вплив.

Положення центру C_i маси системи рухомих ланок маніпулятора робота та об'єкта (рис. 5.11) може бути визначено як геометрична сума головних векторів h_k ланок, спрямованих паралельно осям відповідних ланок ВП робота.

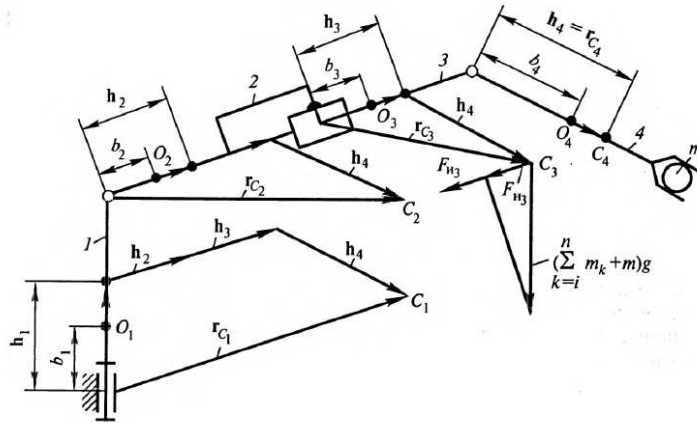


Рисунок 5.11 – Положення центрів мас рухомих ланок маніпулятора

$$\mathbf{h}_k = \frac{m_k b_k \left(\sum_{j=k+1}^n m_j \right) l_k}{\sum_{k=i}^n m_k}, \quad (5.6)$$

де m_k – маса k -ї ланки; b_k – відстань від кінця $(k-1)$ -ї ланки до центру O_k маси k -ї ланки, мм; l_k – довжина k -ї ланки; n – число ланок ВП робота; m_j – маса j -ї ланки.

Радіус-вектор r_{Ci} центру C_i маси системи ланок $i...n$ дорівнює: $r_{Ci} = \sum_{k=i}^n \mathbf{h}_k$, де $\mathbf{h}_k$ – головний вектор k -ї ланки.

Кінець вектору r_{Ci} визначає центр C_i маси системи $i...n$ ланок ВП. На рис. 5.11 показане графічне знаходження центру маси різних систем ланок ВП робота: C_1 – центр маси всього ВП та об'єкта; C_2 – центр маси системи ланок 2, 3, 4 та об'єкта; C_3 – центр маси ланок 3, 4 та об'єкта; C_4 – центр маси ланки 4 та об'єкта.

Відповідно до принципу Даламбера момент M_{li} опору i -го приводу механізму складається з статичного моменту опору M_{ni} від неврівноваже-

ності системи рухомих ланок (рухомі ланки приводу та вантаж, що переноситься) маніпулятора, розташованої між аналізованим i -м приводом і робочим органом з об'єктом (статичний момент неврівноваженості), та динамічного або інерційного моменту M_{di} , що виникає в момент розгону та гальмування цих же ланок та об'єкта:

$$M_{li} = M_{ni} + M_{di}. \quad (5.7)$$

Момент опору від неврівноваженості маси (рис. 5.11) дорівнює:

$$\begin{aligned} M_{ni} &= \left(\sum_{k=i}^n m_k + m \right) g h_{Ci} = \left(\sum_{k=i}^n m_k + m \right) g \sum_{k=i}^n h_k \cos \sum_{j=1}^k \Theta_j = \\ &= \left(\sum_{k=i}^n m_k + m \right) g r_{Ci} \cos \sum_{j=1}^k \Theta_j, \end{aligned} \quad (5.8)$$

де m – вантажопідйомність або маса об'єкта (вантаж, що переноситься); h_{Ci} – проєкція радіуса-вектору r_{Ci} на горизонталь; h_k – довжина головного вектору k -ї ланки; Θ_j – кут між продовженням $(j-1)$ -ї ланки і напрямом j -ї ланки.

Формулу (5.8) застосовують для розрахунку готової або спроектованої конструкції ВП робота, коли маси всіх ланок відомі.

Позначимо $K_{li} = \frac{\left(\sum_{k=i}^n m_k + m \right) r_{Ci}}{m \sum_{k=i}^n l_k}$, де $K_{li} = 1,1 - 2,0$ – коефіцієнт конструкції.

Тоді момент опору від неврівноваженості мас дорівнюватиме:

$$M_{ni} = K_{li} m g \sum_{k=i}^n l_k \cos \sum_{j=1}^k \Theta_j, \quad (5.9)$$

де l_k – довжина k -ї ланки. Якщо аналізована система ланок ВП урівноважена без об'єкта, то $K_{li} = 1$. Формулу (5.9) використовують у проєктних розрахунках, коли маси всіх ланок невідомі.

Динамічний момент:

$$M_{di} = \left(\sum_{k=i}^n J_k + J \right) \alpha_i = \frac{\left(\sum_{k=i}^n J_k + J \right) \Omega_{Ni}^2}{2 K_{\pi i} \Theta_i}, \quad (5.10)$$

де J_k – момент інерції k -ї ланки відносно i -го ступеня рухливості (СР); J – момент інерції об'єкта відносно i -го СР; $\alpha_i = \frac{\Omega_{Ni}^2}{2 \Theta_{pi}} = \frac{\Omega_{Ni}^2}{2 K_{\pi i} \Theta_i}$ – кутове прискорення i -ї ланки; Ω_{Ni} – номінальна кутова швидкість i -ї ланки; Θ_{pi} –

кут розгону i -ї ланки; Θ_i – повне кутове переміщення i -ї ланки; $K_{\text{ци}} = \frac{\Theta_{pi}}{\Theta_i}$ – характеристика циклу i -го привода.

Формула (5.10) справедлива для готової чи спроектованої конструкції виконавчого пристрою робота, коли моменти інерції всіх ланок відомі. У проєктних розрахунках, коли моменти інерції ланок робота невідомі, динамічний момент знаходять за такою формулою:

$$M_{\text{ди}} = \frac{K_{2i} J \Omega_{Ni}^2}{2K_{\text{ци}} \Theta_i}, \quad (5.11)$$

де $K_{2i} = 1 + \frac{\sum_{k=i}^n J_k}{J}$ – коефіцієнт конструкції. В проєктних розрахунках приймають $K_{2i} = 1,8 - 2,3$.

Момент інерції об'єкта відносно i -го ступеня рухливості дорівнює $J = J_0 + m h_i^2$, де J_0 – момент інерції об'єкта відносно центральної осі x , y або z ; $h_i = \sum_{k=i}^n l_k \cos \sum_{j=1}^k \Theta_j$ – відстань від i -го СР до об'єкта за горизонталлю.

Отже, динамічний момент сил інерції дорівнює

$$M_{\text{ди}} = \frac{K_{2i} (J_0 + m h_i^2) \Omega_{Ni}^2}{2K_{\text{ци}} \Theta_i}. \quad (5.12)$$

Після підстановки (5.9) і (5.12) у (5.7) отримаємо формулу проєктного розрахунку для визначення моменту опору i -го приводу маніпулятора:

$$M_{li} = K_{1i} m g \sum_{k=i}^n l_k \cos \sum_{j=1}^k \Theta_j + \frac{K_{2i} (J_0 + m h_i^2) \Omega_{Ni}^2}{2K_{\text{ци}} \Theta_i}. \quad (5.13)$$

Сила опору F_{li} i -го приводу складається з сили опору $F_{\text{ни}}$ від невірноваженості системи рухомих ланок ВП робота, розташованої між i -м приводом, що розглядається, і робочим органом (РО) з об'єктом, та динамічної (інерційної) сили $F_{\text{ди}}$, що виникає в момент розгону і гальмування цих же ланок та об'єкта (рис. 5.11):

$$F_{li} = F_{\text{ни}} + F_{\text{ди}}. \quad (5.14)$$

Силу опору $F_{\text{ни}}$ i -го приводу від невірноваженості маси можна отримати, якщо спроектувати силу тяжіння системи ланок ВП робота, розташовану між i -м приводом, що розглядається, і РО з об'єктом, прикладену в

центрі C_i , маси цієї системи, на напрям переміщення поступального СР, що розглядається:

$$F_{ni} = \left(\sum_{k=i}^n m_k + m \right) g \sin \sum_{k=1}^i \Theta_k, \quad (5.15)$$

де m – маса об'єкта; Θ_k – кут між продовженням $(k-1)$ -ї ланки і напрямом k -ї ланки.

Формулу (5.15) використовують для розрахунку готової або спроектованої конструкції ВП робота, коли маса кожної ланки відома.

Позначимо $K_{3i} = \frac{\sum_{k=i}^n m_k + m}{m}$, де $K_{3i} = 1, 4 - 2, 3$ – коефіцієнт конструкції.

Тоді сила опору від неврівноваженості мас буде дорівнювати:

$$F_{ni} = K_{3i} m g \sin \sum_{k=1}^i \Theta_k. \quad (5.16)$$

Цю формулу використовують у проектних розрахунках, коли маса кожної ланки невідома.

Динамічна сила F_{di} дорівнює:

$$F_{di} = \left(\sum_{k=i}^n m_k + m \right) a_i = \frac{\left(\sum_{k=i}^n m_k + m \right) v_{Ni}^2}{2K_{\psi i} s_i}, \quad (5.17)$$

де $a_i = \frac{v_{Ni}^2}{2s_{pi}} = \frac{v_{Ni}^2}{2K_{\psi i} s_i}$ – лінійне прискорення i -ї ланки; v_{Ni} – номінальна лінійна швидкість i -ї ланки; s_{pi} – шлях розгону i -ї ланки; s_i – повне лінійне переміщення i -ї ланки; $K_{\psi i} = \frac{s_{pi}}{s_i}$ – характеристика циклу i -го привода.

Формула (5.17) справедлива для розрахунку готової чи спроектованої конструкції ВП робота, коли маса кожної ланки відома.

У проектних розрахунках, коли маса ланок ВП робота невідома, динамічну силу знаходять за такою формулою:

$$F_{di} = K_{3i} m a_i = \frac{K_{3i} m v_{Ni}^2}{2K_{\psi i} s_i}. \quad (5.18)$$

Після підстановки (5.15) та (5.18) у (5.14) отримаємо формулу проектного розрахунку для визначення сили опору i -го приводу ВП робота:

$$F_{li} = K_{3i} m \left(\frac{v_{Ni}^2}{2K_{ii} s_i} + g \sin \sum_{k=1}^i \Theta_k \right). \quad (5.19)$$

Приклад розрахунку. Виконаємо розрахунок моментів та сил для кінематичної схеми маніпулятора, що має три ступені рухливості та працює у сферичній системі координат (рис. 5.12).

Розрахунок моментів та сил модуля руху маніпулятора виконують на підставі вихідних даних технічного завдання, що включає наступні вихідні параметри:

m – вантажопідйомність або маса вантажу, що переноситься, кг;

r – максимальний радіус дії, м;

Θ, s – величини переміщення вантажу по кутовій та лінійній координатах відповідно, рад, м;

Ω_N, v_N – номінальні швидкості переміщення вантажу за кутовою та лінійною координатами, рад/с, м/с.

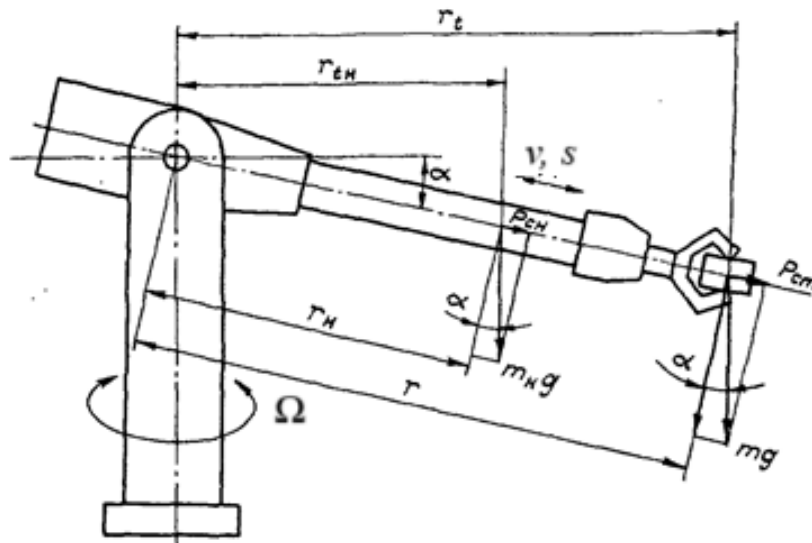


Рисунок 5.12 – Розрахункова схема модуля руху робота

У загальному вигляді радіуси обертання вантажу та невірноважених мас змінні та залежать від кута нахилу модуля (рис. 5.12) маніпулятора

$$r_t = r \cos \alpha; \quad r_{tn} = r_n \cos \alpha,$$

де r і r_n – постійні радіуси розташування центрів ваги вантажу та невірноважених мас; α – кут нахилу площини обертання модуля до горизонталі.

Статичний момент від неврівноважених мас можна представити у вигляді суми статичних моментів неврівноваженості мас вантажу $M_{\text{нв}}$, що переноситься, і рухомих ланок модуля $M_{\text{нм}}$ щодо осі їх обертання на підставі (5.8)

$$M_{\text{н}} = M_{\text{нв}} + M_{\text{нм}} = mgr_t + m_{\text{н}}gr_{\text{тн}} \quad (5.20)$$

де m і $m_{\text{н}}$ – відповідно маси вантажу, що переноситься, і неврівноважених рухомих частин модуля; r_t і $r_{\text{тн}}$ – радіуси обертання центрів ваги вантажу, що переноситься, і неврівноважених мас рухомих частин модуля відповідно.

Вважаючи, що маси ланок маніпулятора невідомі, застосовуємо коефіцієнт статичної неврівноваженості конструкції, що враховує відносну величину моменту неврівноваженості частин модуля, що обертаються. Якщо модулі руху маніпулятора врівноважені без вантажу, то $K_1 = 1$. Однак це вимагає додаткових конструктивних заходів і не завжди вдається, тому в загальному випадку для розрахунку слід приймати величину $K_1 = 1,1 - 2,0$. Таким чином,

$$M_{\text{н}} = K_1 mgr \cos \alpha \quad (5.21)$$

Динамічний або інерційний момент визначається як сума інерційних моментів $M_{\text{дв}}$ вантажу, що переноситься на максимальному радіусі обертання і обертових частин модуля руху $M_{\text{дм}}$ при максимальному радіусі перенесення

$$M_{\text{д}} = M_{\text{дв}} + M_{\text{дм}} = J_i \alpha = (J_{\text{ів}} + J_{\text{ім}}) \alpha, \quad (5.22)$$

де $J_i = J_{\text{ів}} + J_{\text{ім}}$ – сумарний момент інерції; $J_{\text{ів}} = mr^2$ – момент інерції від максимального вантажу, що переноситься ПР на максимальному радіусі обертання; $J_{\text{ім}} = m_{\text{н}}r_{\text{н}}^2$ – момент інерції обертових частин модуля при максимальному радіусі перенесення; α – кутове прискорення.

Застосуємо коефіцієнт динамічної неврівноваженості конструкції, що враховує відносну величину моментів інерції частин модуля, що обертаються. Для існуючих конструкцій ПР (5.11) коефіцієнт конструкції $K_2 = 1,8 - 2,3$. Таким чином,

$$M_{\text{д}} = K_2 J_{\text{ів}} \alpha = K_2 mr^2 \alpha = \frac{K_2 mr^2 \Omega^2}{2K_{\text{ц}} \Theta} \quad (5.23)$$

Момент M_l опору привода модуля обертального руху дорівнює сумі (5.21) і (5.23):

$$M_l = K_1 mgr \cos \alpha + \frac{K_2 mr^2 \Omega^2}{2K_{\text{ц}} \Theta} \quad (5.24)$$

Для приводу повороту колони (обертання відносно вертикальної осі) кут $\alpha=90^\circ$. Тоді

$$M_l = M_d = \frac{K_2 mr^2 \Omega^2}{2K_{\text{ц}} \Theta} \quad (5.25)$$

Для приводу обертання щодо горизонтальної осі кут $\alpha=0^\circ$. Тоді

$$M_l = M_{\text{н}} + M_d = K_1 mgr + \frac{K_2 mr^2 \Omega^2}{2K_{\text{ц}} \Theta} \quad (5.26)$$

При поступальному переміщенні сила опору F_l приводу складається з сили опору $F_{\text{н}}$ від неврівноваженості системи рухомих ланок ВП робота, розташованої між розглянутим приводом і РО з об'єктом, і динамічної (інерційної) сили F_d , що виникає в момент розгону і гальмування цих же ланок і об'єкта (рис. 5.12):

$$F_l = F_{\text{н}} + F_d. \quad (5.27)$$

Сила опору від неврівноваженості мас, коли маса ланок ВП робота невідома, дорівнюватиме:

$$F_{\text{н}} = K_3 mg \sin \alpha. \quad (5.28)$$

Коефіцієнт конструкції $K_3 = 1,4 - 2,3$.

Динамічну (інерційну) силу знаходять за формулою:

$$F_d = K_3 ma = \frac{K_3 mv^2}{2K_{\text{ц}} s}. \quad (5.29)$$

Сила F_l опору приводу модуля поступального руху дорівнює сумі (5.28) і (5.29):

$$F_l = F_{\text{н}} + F_d = K_3 mg \sin \alpha + \frac{K_3 mv^2}{2K_{\text{ц}} s}. \quad (5.30)$$

Для приводу з горизонтальним переміщенням кут $\alpha=0^\circ$. Тоді

$$F_l = F_d = \frac{K_3 mv^2}{2K_{\text{ц}} s}. \quad (5.31)$$

Для приводу з вертикальним переміщенням кут $\alpha=90^\circ$. Тоді

$$F_l = F_{\text{н}} + F_d = K_3 mg + \frac{K_3 mv^2}{2K_{\text{ц}} s}. \quad (5.32)$$

5.4.3. Вибір електродвигуна приводу

Розрахункові значення необхідних моментів, сил або потужностей, що забезпечують координатні рухи модулів рухливості робота, є основою попереднього підбору двигунів, енергетичні параметри яких повинні бути близькі до розрахункових. При цьому слід враховувати також необхідні параметри руху – швидкості руху валу двигуна і кути його повороту.

Для кожного модуля руху рекомендується підібрати попередньо кілька двигунів близької потужності, але з різними швидкостями руху для подальшого остаточного вибору за критерієм швидкодії механізму.

Електродвигун вибирають за необхідною потужністю, приведеною до валу двигуна, і потрібному моменту.

Для приводу кутового руху необхідну потужність електродвигуна визначають за формулою:

$$P = M_l \frac{\Omega}{\eta}, \quad (5.33)$$

де M_l – момент опору на вихідній ланці приводу; Ω – кутова швидкість вихідної ланки приводу; $\eta = 0,8-0,9$ – коефіцієнт корисної дії механічної передачі приводу.

Для приводу лінійного руху необхідну потужність електродвигуна визначають за такою формулою:

$$P = F_l \frac{v}{\eta}, \quad (5.34)$$

де F_l – зусилля опору на вихідній ланці приводу; v – лінійна швидкість вихідної ланки приводу.

Так як електродвигуни однієї і тієї ж потужності мають різні номінальні M_N і максимальні $M_{\max}$ обертальні моменти, то необхідно визначити потрібні номінальні значення моменту $M_{N \text{ потр}}$ і потрібні максимальні значення моменту $M_{\max \text{ потр}}$:

$$\begin{cases} M_{N \text{ потр}} = \frac{M_n}{i\eta}, \\ M_{\max \text{ потр}} = \frac{M_n + M_d}{i\eta}, \end{cases} \quad (5.35)$$

де M_n – момент опору від невірноваженості маси ланок та об'єкта; M_d – динамічний момент опору; i – передатне відношення приводу.

Остаточно тип електродвигуна (за умови роботи у тривалому режимі) вибирають за каталогами, виходячи з умов:

$$\begin{cases} P_N \geq P, \\ M_N \geq M_{N \text{ потр}}, \\ M_{\max} \geq M_{\max \text{ потр}}. \end{cases} \quad (5.36)$$

Приводи маніпуляторів промислових роботів працюють у повторно-короткочасному режимі. На рис. 5.13 наведено довільну циклограму навантаження приводу. Враховуючи, що час розгону і гальмування приводу значно менше усталеного часу, можна визначити значення необхідної еквівалентної середньо-квадратичної статичної потужності, приведенної до валу двигуна:

$$P_{\text{екв s}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n P_{sk}^2 \cdot t_{pk}}{\sum_{k=1}^n t_{pk}}}, \quad (5.37)$$

де P_{sk} – необхідна статична потужність двигуна на k -ій робочій ділянці навантажувальної циклограми двигуна; t_{pk} – тривалість k -ої робочої ділянки циклограми.

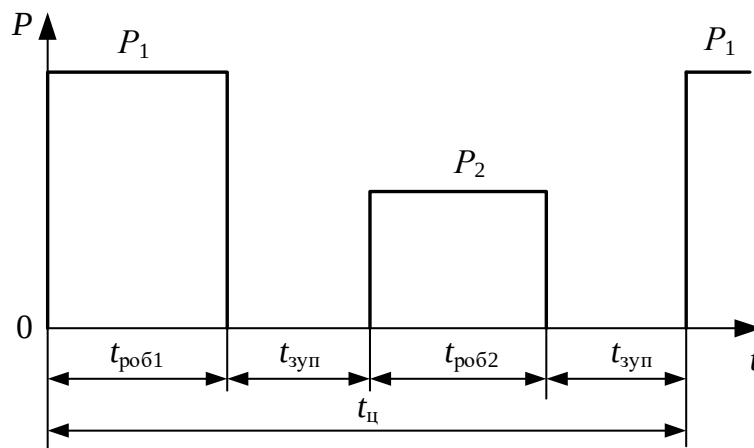


Рисунок 5.13 – Навантажувальна діаграма приводу

Для приводу обертального руху:

$$P_{sk} = M_{\text{нк}} \frac{\Omega_k}{\eta}, \quad (5.38)$$

де P_{sk} – момент опору від неврівноваженості маси на k -ій робочій ділянці циклограми; Ω_k – кутова швидкість вихідної ланки приводу на k -ій робочій ділянці циклограми; k – кількість включених станів двигуна за цикл.

Для приводу поступального руху:

$$P_{sk} = F_{hk} \frac{v_k}{\eta}, \quad (5.39)$$

де F_{hk} – сила опору від неврівноваженості маси на k -ій робочій ділянці циклограми; v_k – лінійна швидкість вихідної ланки приводу на k -ій робочій ділянці циклограми.

Обчислюємо необхідний номінальний момент двигуна

$$M_{N \text{ потр}} = \frac{M_{hk \max}}{i\eta} \quad (5.40)$$

і потрібний максимальний момент двигуна

$$M_{\max \text{ потр}} = \frac{M_{k \max}}{i\eta} = \frac{M_{hk \max} + M_{dk \max}}{i\eta}, \quad (5.41)$$

де $M_{hk \max}$ – максимальний момент опору від неврівноваженості мас ланок та об'єкта на вихідній ланці приводу на k -ій робочій ділянці циклограми; $M_{k \max}$ – максимальний момент опору на вихідній ланці приводу на k -ій робочій ділянці циклограми; $M_{dk \max}$ – динамічний момент опору на k -ій робочій ділянці циклограми.

Тип електродвигуна вибирають за каталогами, виходячи з умов:

$$\begin{cases} P_N \geq P_{екв\ s}, \\ M_N \geq M_{N \text{ потр}}, \\ M_{\max} \geq M_{\max \text{ потр}}. \end{cases} \quad (5.42)$$

Перевищення потужності $P_N \geq P_{екв\ s}$ двигуна, як правило, проводиться з урахуванням коефіцієнта запасу $k_{\text{зап}} = 1,1-1,3$, що враховує вплив динамічних навантажень та інших, неврахованих при побудові спрощеної навантажувальної діаграми та розрахунках, факторів.

При виборі типу електродвигуна необхідно враховувати його конструктивні особливості, геометричні параметри, масогабаритні характеристики, термін служби та ін.

5.4.4. Визначення передатного відношення приводу

Оптимальне передатне число модуля руху робота слід встановлювати таким, при якому тривалість переміщення об'єкта по координаті забезпечувала б необхідний час технологічного циклу або вихідної циклограми роботи робота.

Визначення оптимальних передатних чисел дозволяє зробити остаточний вибір двигуна з ряду попередньо підібраних, відповідно до вимог найбільш компактної конструкції.

Передатне відношення приводу ступеня рухливості ВП робота при незначних динамічних навантаженнях (переважають неврівноважені навантаження) при кутовому русі може бути визначено за формулою:

$$i = \frac{\Omega_N}{\Omega} = \frac{M_l}{M_{\text{потр}} \eta}, \quad (5.43)$$

де Ω_d – номінальна швидкість двигуна; Ω – швидкість вихідної ланки перетворювача руху; M_n – навантаження опору на вихідній ланці перетворювача руху; $M_{\text{потр}}$ – необхідне зусилля двигуна.

Слід зазначити, що передатне відношення у загальному випадку має розмірність. Так, при перетворенні обертального руху в поступальне розмірність передатного відношення – метр в мінус першому ступені, при перетворенні поступального руху в обертальне розмірність передатного відношення – метр. При лінійному русі параметри Ω і M потрібно замінити параметрами v і F .

Для приводу обертального ступеня рухливості B (рис. 5.14) передатне відношення знаходять за формулою:

$$i = \frac{\Omega_d}{\Omega} = \frac{M_n}{M_{\text{потр}} \eta}, \quad (5.44)$$

де Ω_N – номінальна кутова швидкість двигуна; Ω – кутова швидкість вихідного валу перетворювача руху; $M_{\text{потр}}$ – необхідний крутний момент на валу двигуна; M_n – момент опору на вихідному валу ступеня рухливості від неврівноваженості мас вихідної системи рухомих ланок B , C , D виконавчого пристрою, розташованих за ступенем рухливості, що розглядається, і об'єкта разом.

Для приводу поступального ступеня рухливості A (рис. 5.14) при перетворенні обертального руху на поступальне:

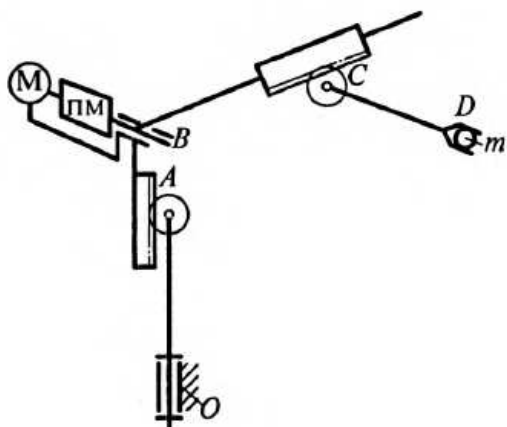


Рисунок 5.14 – Кінематична
схема маніпулятора

$$i = \frac{\Omega_N}{v} = \frac{F_n}{M_{\text{потр}} \eta}, \quad (5.45)$$

де v – лінійна швидкість функціональної ланки поступального ступеня рухливості; F_n – сила опору на функціональній ланці ступеня рухливості від неврівноваженості маси вихідної рухомої системи ланок A, B, C, D виконавчого пристрою та об'єкта.

Для приводу обертового ступеня рухливості C (рис. 5.14) при перетворенні поступального руху в обертальний:

$$i = \frac{v_N}{\Omega} = \frac{M_N}{F_{\text{потр}} \eta}, \quad (5.46)$$

де $F_{\text{потр}}$ – необхідна сила на рухомій ланці двигуна лінійного переміщення; v_N – номінальна лінійна швидкість рухомої ланки двигуна.

Вибір передатного відношення залежить від закону зміни швидкості Ω . Трапецеїдальний закон зміни швидкості характерний для приводів, в яких момент інерції навантаження J_n перевищує власний момент інерції обертових частин двигуна J_d з урахуванням приведенного до валу двигуна моменту інерції перетворювача руху відповідного ступеня рухливості:

$$\frac{J_n}{i^2 J_d} > 1 \quad (5.47)$$

Зазвичай $J_d \approx (1,1-1,3)J_p$, де J_p – момент інерції ротора двигуна, значення якого наводиться в каталогах двигунів.

Якщо відношення $\frac{J_n}{i^2 J_d} \leq 1$, то передатне відношення привода визначають за формулою:

$$i = \sqrt{\frac{J_n}{J_d}} \quad (5.48)$$

Контрольні запитання

1. Назвіть етапи проєктування засобів робототехніки.
2. Як реалізується принцип декомпозиції під час проєктування засобів робототехніки?
3. Назвіть переваги уніфікації як метода проєктування робототехніки.
4. Назвіть принципи побудови техніки, що засновані на методі уніфікації.
5. Назвіть переваги модульного підходу до побудови роботів.
6. Назвіть переваги агрегатно-модульного принципу створення ПР.
7. Назвіть основні етапи проєктування модулів.
8. Опишіть особливості конструкції мехатронного модуля руху.
9. Опишіть особливості конструкції інтелектуального мехатронного модуля.
10. Назвіть призначення силового розрахунку.
11. Яким чином проводиться розрахунок точності маніпуляторів ПР?
12. Назвіть основну мету розрахунку врівноважування маніпуляторів.
13. Назвіть етапи проєктування приводів ПР.
14. Які параметри переміщення визначаються на початковому етапі силового розрахунку приводів ПР?
15. Які параметри кінематичної схеми маніпулятора використовуються для попереднього вибору потужності двигунів?
16. Назвіть призначення навантажувальної діаграми приводів.

Розділ 6

Застосування засобів робототехніки

6.1. Застосування засобів робототехніки в промисловості

6.1.1. Класифікація технологічних комплексів із застосуванням роботів

Завдання робототехніки поряд із створенням власне засобів робототехніки полягає і у створенні технічних систем та комплексів, заснованих на використанні цих засобів. Як було зазначено раніше, незважаючи на безперервне розширення сфери застосування робототехніки основною областю цього застосування залишається промисловість, і насамперед машинобудування та приладобудування. Тут з'явилися перші роботи та зосереджено до 80% всього світового парку ПР.

Вони поділяються на технологічні, які виконують основні технологічні операції, та допоміжні, зайняті на допоміжних операціях з обслуговування основного технологічного устаткування. Технічні комплекси з такими роботами називають роботизовані технічні комплекси. Термін «робототехнічні системи» означає технічні системи будь-якого призначення, в яких основні функції виконують роботи.

На рис. 6.1 як приклад РТК наведений типовий виробничий осередок. Виробничий осередок визначається як взаємопов'язана група виробничих процесів, які обслуговуються системою обробки матеріалів. У цьому конкретному випадку виробничі процеси складаються з токарного і фрезерного верстатів з ЧПК. Ці верстати обслуговуються ПР, який завантажує заготовку спочатку в один верстат, передає її до наступного, а потім розвантажує та укладає оброблену деталь на палети або конвеєр.

Промисловий робот, по суті, є елементом технологічного обладнання (ТО), що дозволяє створювати РТК. Тому структуру ПР, працюючого разом із деяким технологічним устаткуванням можна уявити так, як це показано на рис. 6.2.

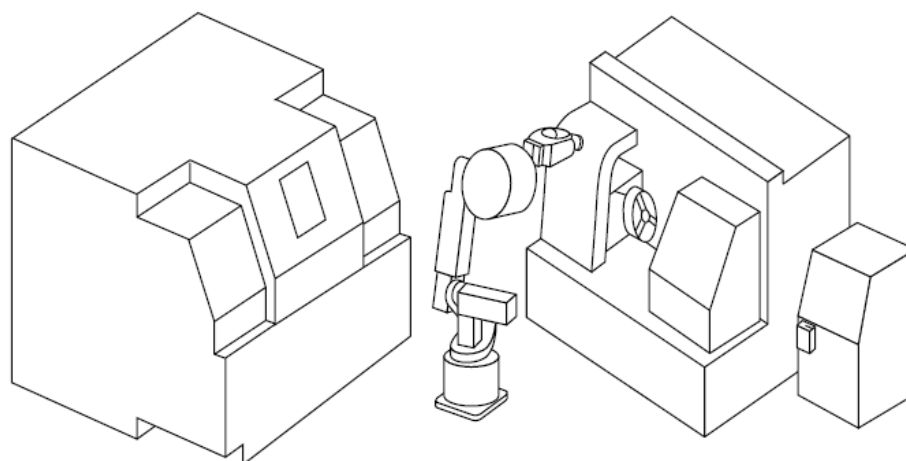


Рисунок 6.1 – Виробничий осередок

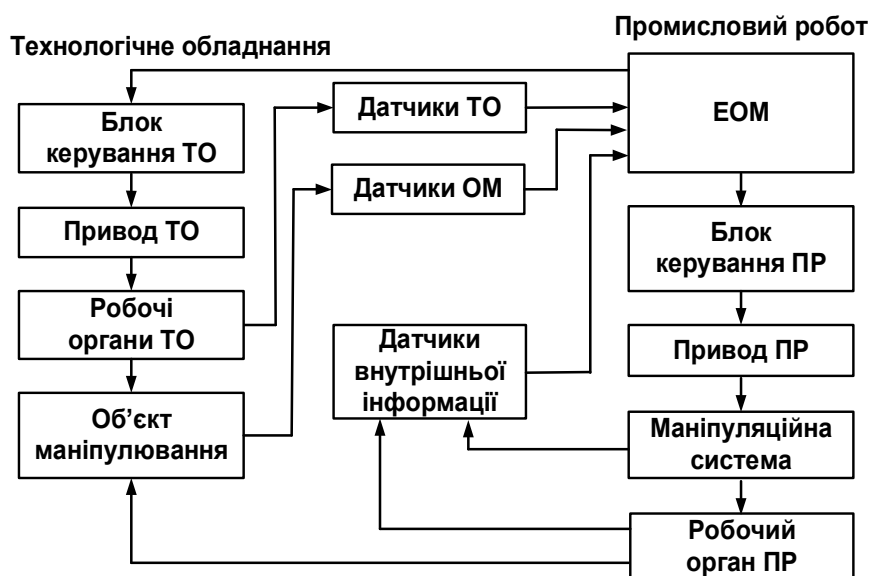


Рисунок 6.2 – Структура промислового робота у складі РТК

Очевидно, що призначення ТО, що обслуговується, істотно впливає на конструкцію і технічні характеристики ПР. З цієї причини говорять не про ПР взагалі, а про роботи-складальники, роботи пресового виробництва, роботи-зварювальники і т.п. Універсальність ПР, як перепрограмовної маніпуляційної системи, носить не абсолютний, а відносний характер, оскільки має сенс лише в рамках того обладнання, для обслуговування якого проєктується робот.

У загальному випадку технологічне обладнання складається з тих же блоків та пристроїв, що і ПР. Як і ПР воно включає блок керування, привод, робочі органи, які подібно робочому органу ПР взаємодіють з об'єктом маніпулювання. ТО має також свої датчики, що визначають положення його робочих органів, тобто датчики внутрішньої інформації. Виконавчі елементи як ТО, так і ПР керуються від ЕОМ. Єдина відмінність ПР від ТО полягає в тому, що він додатково має антропоморфну виконавчу систему – маніпулятор.

Розглянемо класифікацію технологічних комплексів у промисловості із застосуванням засобів робототехніки. У табл. 6.1 представлено класифікацію технологічних комплексів у машинобудуванні.

Тип виробничого підрозділу. Тут класифікаційною ознакою є кількість виконуваних технологічних операцій. Найпростішим типом такого підрозділу є *технологічний осередок* (ТОс).

У ньому виконується лише одна основна технологічна операція (крім допоміжних). При цьому кількість одиниць ТО та ПР у складі ТОс не регламентується. Зокрема, в ТОс може зовсім бути відсутнім технологічне обладнання крім ПР, коли основну операцію виконує ПР, або, навпаки, можуть бути відсутні самостійні ПР, коли останні об'єднані з основним технологічним обладнанням.

Наступним більшим типом є *технологічна ділянка* (ТД). Вона характеризується тим, що тут виконується кілька технологічних операцій, об'єднаних технологічно, конструктивно (обладнанням) або організаційно (керуванням). Ці операції можуть бути однаковими чи різними. Якщо різні операції технологічно послідовно пов'язані, то така ділянка є *технологічною лінією* (ТЛ).

Технологічна ділянка зазвичай складається з ТОс, але може не мати їх. Наприклад, ділянка може включати кілька одиниць технологічного обладнання, що обслуговуються одним ПР (нерухомим з розміщенням обладнання навколо ПР або мобільним, що переміщається вздовж ряду одиниць обладнання).

Наступним типом комплексу є *цех*, що складається з кількох ділянок. Межею розвитку роботизованого виробництва є комплексно роботизоване підприємство.

Таблиця 6.1 – Класифікаційні ознаки та відповідні їм основні типи технологічних комплексів з роботами

№ за/п	Ознака	Найменування
1	Тип підрозділу	Технологічний осередок Ділянка Лінія Цех
2	Ступінь зміни виробництва, пов'язаний із застосуванням ПР	Для новоствореного виробництва: • з принципово новою технологією • з новим технологічним обладнанням Для модернізуємого виробництва: • зі зміною технології • з модернізацією обладнання
3	Вид технологічного процесу	Механообробка Холодне штампування Кування Лиття Пресування пластмас Термічна обробка Зварювання Транспорт Контроль та випробування інше
4	Тип виконуваних роботами технологічних операцій	Операції, що виконуються роботами: • основні • допоміжні
5	Серійність та номенклатура продукції	З певним розміром партії продукції, що випускається без переналадження комплексу З певним переліком номенклатури продукції, що випускається
6	Компонування комплексу	Лінійне Кругове Лінійно-кругове По площі Об'ємне
7	Тип керування	Централізоване Децентралізоване Комбіноване
8	Участь людини	У виконанні технологічних операцій: • основних • допоміжних В керуванні комплексом

До складу ділянок та цехів крім технологічних осередків зазвичай входять ще склади, транспорт (у тому числі і на базі ПР) та системи контролю якості продукції.

Класифікація технологічних комплексів за ступенем зміни виробництва, пов'язаного із застосуванням ПР. Така зміна, очевидно, буде максимальною для нових виробництв, заснованих на нових технологіях і мінімальною для діючого виробництва, що автоматизується на базі серійних ПР.

Класифікація за видом технологічного процесу. Вона не вичерпується наведеним у табл. 6.1 переліком типових для сучасного стану областей застосування ПР у машинобудуванні.

Класифікація за типом виконуваних роботами технологічних операцій. Тут визначено два вже названі вище основні варіанти: коли ПР виконують основні технологічні операції (складання, зварювання, фарбування тощо) або допоміжні з обслуговування основного технологічного обладнання.

Серійність та номенклатура продукції. Серійність визначається обсягом партій продукції, які можуть виготовлятися без переналагодження комплексу, а номенклатура – широтою переліку видів продукції, що випускаються. Обидва ці показники мають значний вплив на ефективність застосування ПР. Зокрема, кожен технологічний комплекс характеризується граничними значеннями цих параметрів, поза рамками яких цей комплекс виявляється економічно не вигідним аж до доцільності переходу від гнучких комплексів до спеціальних автоматів (при великій серійній і вузькій номенклатурі) або навіть до використання робітників замість ПР (у протилежному граничному випадку одиничного виробництва).

Класифікація за типом компонування комплексу. Наведено основні (базові) типи таких компонок. При простому лінійному компонуванні обладнання розташовується в один ряд (по лінії), а при найбільш складному об'ємному компонуванні – на декількох поверхах (рівнях).

Класифікація за типом керування. Вона включає розглянуті вище способи керування: централізоване, децентралізоване та комбіноване. Централізоване керування здійснюється пристроєм групового керування. Децентралізоване керування реалізується за допомогою місцевих пристроїв керування, пов'язаних один з одним мережею для координації.

Класифікація за рівнем участі людини. Вказані два варіанти участі людини: коли людина безпосередньо виконує деякі технологічні операції (основні або допоміжні) і коли вона бере участь в керуванні комплексом.

6.1.2. Компонування та керування технологічними комплексами з роботами

Аналіз машинобудівного виробництва за видами та рівнями автоматизації показує, що використання РТК є необхідним для зниження тривалості циклу виготовлення виробів та циклу підготовки виробництва.

Досвід застосування РТК у машинобудівному виробництві визначив дві основні схеми використання ПР у маніпуляційних (при виконанні допоміжних операцій) та виробничих (при виконанні основних технологічних операцій) РТК:

1. Одиничне обслуговування устаткування забезпечується вбудованим в обладнання ПР, що має спільну чи роздільну з устаткуванням систему керування. Особливий інтерес становить обслуговування двома чи більше ПР одиниці технологічного устаткування. Така схема зустрічається під час обслуговування обробних центрів, ковальсько-пресового та інших видів устаткування.

2. Групове обслуговування характеризується тим, що кількість обслуговуючих ПР менше кількості обслуговуваних одиниць обладнання. До цієї схеми відноситься обслуговування одним ПР групи одиниць обладнання при лінійному, лінійно-паралельному або круговому розташуванні. Застосування групового обслуговування покращує характеристики РТК, наприклад підвищується коефіцієнт використання ПР. Для реалізації групового обслуговування необхідно забезпечити міжопераційні заділи та створити можливість зміни порядку обробки.

У першому розділі наведено загальну класифікацію технологічних комплексів, в яких можуть бути застосовані роботи. На відміну від найпростіших комплексів у вигляді технологічного осередку роботизованим ділянкам, лініям та цехам притаманні наступні принципово нові якості. Насамперед – це необхідність наявності транспортно-складської системи та єдиної системи керування. Ці системи матеріально та інформаційно зв'язують окремі технологічні осередки, автоматизовані склади (матеріалів, заготовок, інструменту, відходів виробництва, готової продукції) та інші частини ком-

плексу в одну узгоджену діючу систему. Крім того, такі комплекси повинні включати, крім систем керування в реальному часі безпосередньо технологічним обладнанням, розташовані над ними ієрархічні рівні управління, що вирішують завдання програмування та оперативно-календарного планування (змінного, добового, тижневого тощо).

На рис. 6.3 показаний приклад простого лінійного компоновання однопоточної роботизованої технологічної лінії холодного штампування з безпосереднім зв'язком між осередками у вигляді лінії. У ній відсутня міжопераційна транспортна система, а предмети виробництва передаються з магазину поштучної видачі заготовок М від одного осередку до іншого безпосередньо допоміжними ПР у складі кожного осередку. Такі лінії з безпосереднім жорстким зв'язком між осередками прості, проте вимагають певного взаємного розташування основного технологічного обладнання ТО.

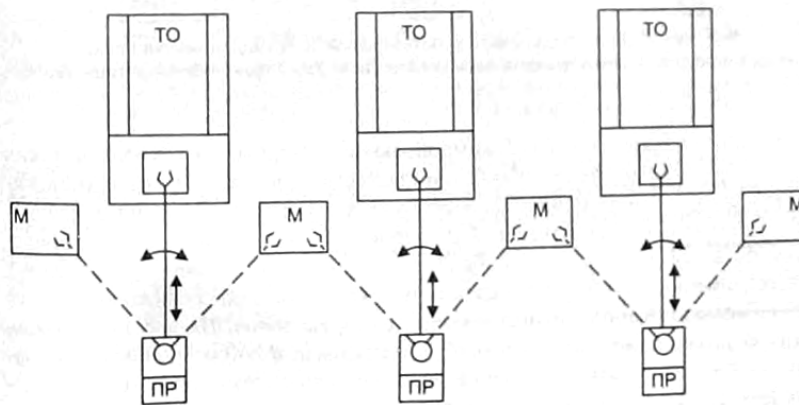


Рисунок 6.3 – Схема однопоточної роботизованої технологічної лінії холодного штампування з лінійним компонованням

На рис. 6.4 показаний більш складний варіант лінійного компоновання однопоточної роботизованої технологічної лінії холодного штампування, в якій транспортні зв'язки між складовими її осередками здійснюються за допомогою спеціальних транспортних пристроїв.

Це дає можливість територіально розв'язати окремі осередки і полегшити компоновання всього комплексу. Як транспортний пристрій Тр можуть бути використані транспортер, мобільні роботи.

Показані на рис. 6.3 та рис.6.4 компоновання характерні для технологічних процесів з малим циклом обробки предметів виробництва на техноло-

гічному обладнанні (одиниці та десятки секунд), що властиво, зокрема, процесам холодно-листового штампування. Для технологічних процесів із більшою тривалістю обробки на технологічному устаткуванні часто застосовують інший тип побудови комплексів з обслуговуванням одним ПР кількох одиниць технологічного обладнання.

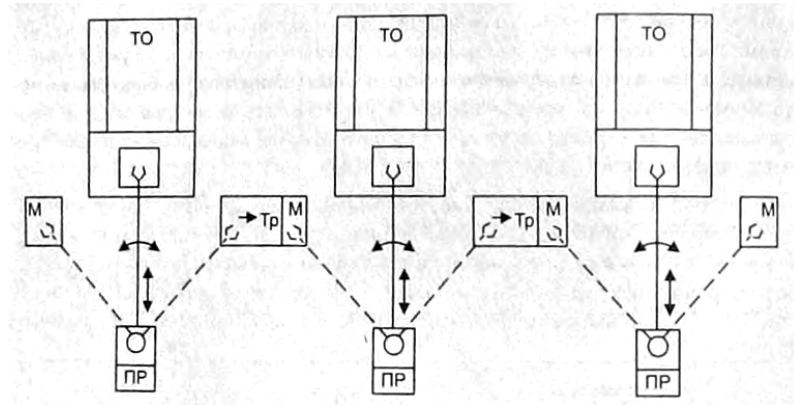


Рисунок 6.4 – Схема однопоточної роботизованої технологічної лінії холодно-листового штампування з лінійним компонованням і транспортним пристроєм

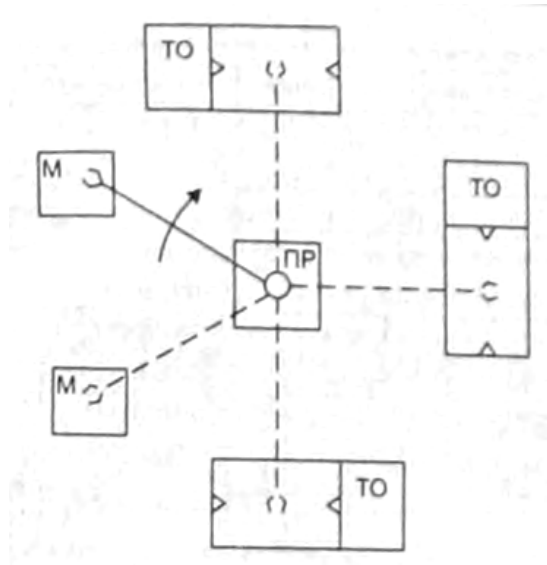


Рисунок 6.5 – Схема роботизованої технологічної ділянки механічної обробки з круговим компонованням

На рис. 6.5 показаний варіант такого комплексу з круговим компонованням, в якому один ПР обслуговує три металорізальних верстати розташованих навколо нього. Інше типове компоновання лінії механообробки із

застосуванням мобільного промислового робота (МПР), який може бути підлоговим або підвісним, (переміщується по трасі (Т), наприклад, по монорейці) наведена на рис. 6.6.

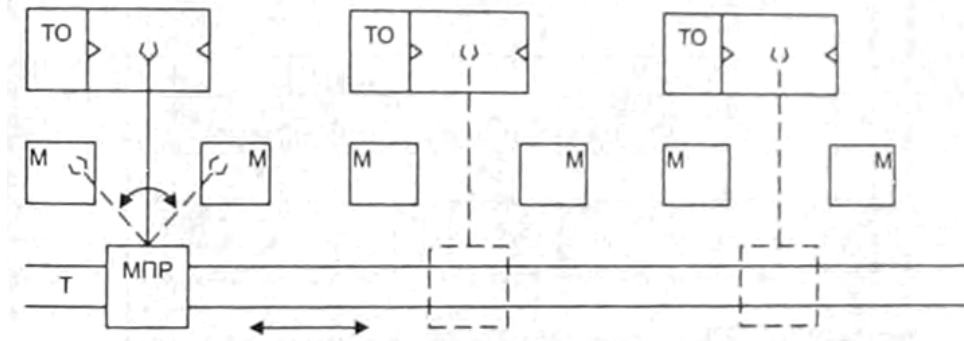


Рисунок 6.6 – Схема роботизованої технологічної ділянки механічної обробки з лінійним компонованням, яка обслуговується мобільним ПР

На рис. 6.7 показаний приклад складнішого роботизованого технологічного комплексу з автоматизованим складом (АС) і рухомими автооператорами-штабелерами (А) для цеху механообробки з лінійно-круговим компонованням. За схемою можна простежити послідовність руху предметів виробництва.

У наведених прикладах ПР виконують допоміжні операції з обслуговування основного технологічного устаткування. На рис. 6.8 показана схема складальної лінії з лінійним компонованням, на якій основні операції виконують ПР. Транспортний пристрій реалізовано у вигляді крокового транспортера Тр, яким від одного робочого місця до іншого переміщуються касети К з об'єктами складання.

На рис. 6.9 представлена схема складального цеху з типових складальних ліній, показаних на рис. 6.8. На рис. 6.10 показано типову робото-технічну складальну ділянку з круговим компонованням, характерним для приладобудівної промисловості (РС – роторний стіл). На спрощеній схемі не показані контрольні операції, обов'язкові у складальному виробництві.

Усі частини технологічних комплексів об'єднані загальною системою керування. Ця система є ієрархічною та включає в загальному випадку наступні три рівні керування. Перший рівень утворюють системи керування окремими технологічними осередками та іншим працюючим у складі комплексу обладнанням. На цьому рівні використовуються пристрої керування типу ПЧПК.

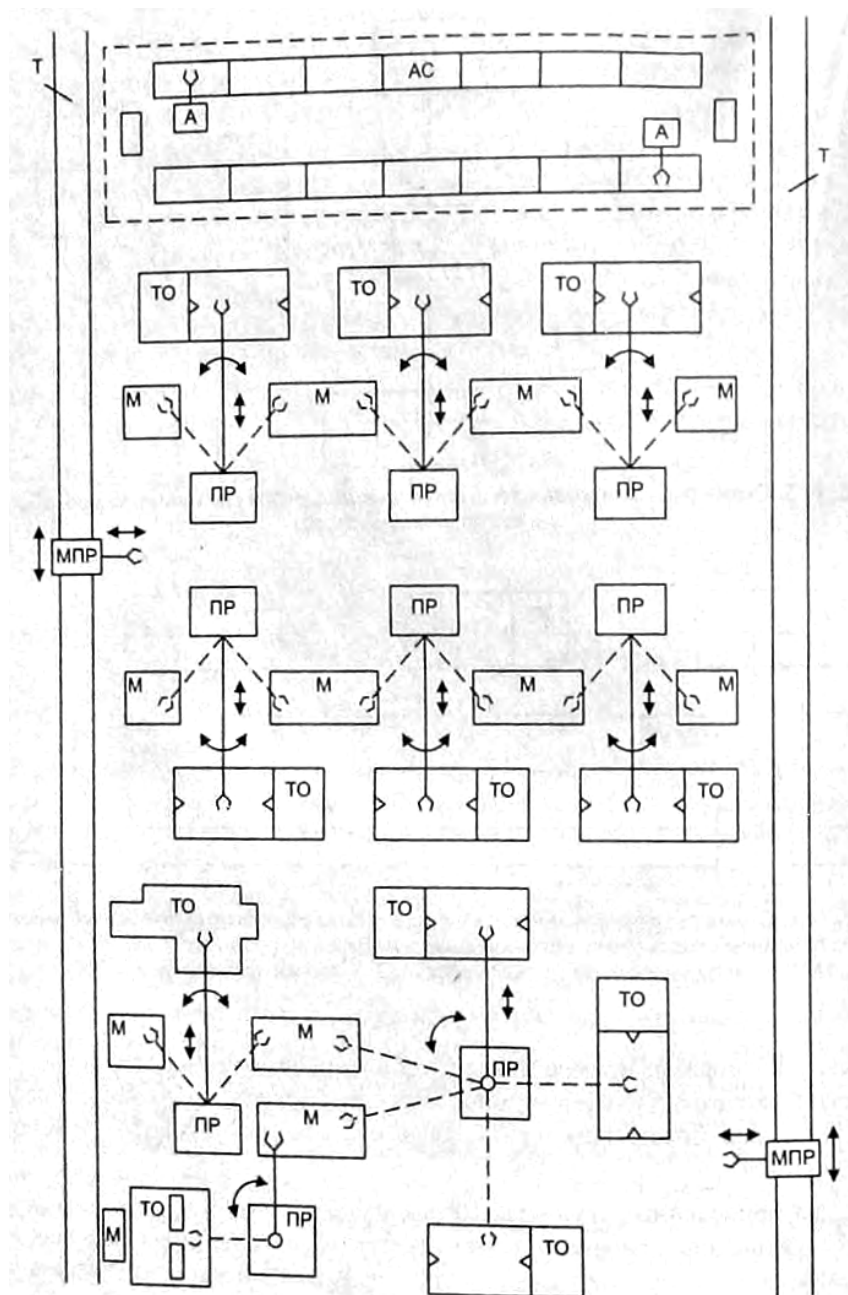


Рисунок 6.7 – Схема роботизованої технологічної ділянки механічної обробки з компонованням по площі

Другий рівень керування – це рівень координації окремих частин комплексу, включаючи транспортні системи, в узгоджено діючу систему. Реалізується цей рівень зазвичай на стандартних мікроЕОМ. На цьому рівні здійснюються також контроль технологічних режимів та справності обладнання, синтез керуючих програм для першого рівня, обробка та переда-

ча інформації між керованими на цьому рівні частинами комплексу та до наступного, третього рівня керування.

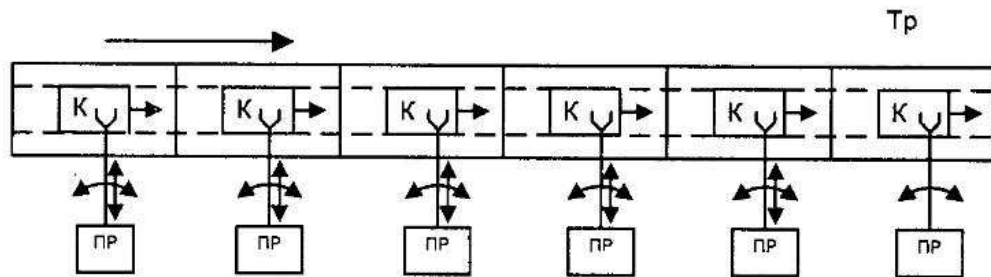


Рисунок 6.8 – Схема складальної робототехнічної лінії з лінійним компонуванням



Рисунок 6.9 – Схема складального цеху

Третій рівень – рівень оперативно-календарного планування та контролю функціонування всього комплексу. Тут складається та зберігається план виробництва за обсягом та номенклатурою на зміну, добу, тиждень і т.д., здійснюються контроль його виконання, облік та аналіз простоїв обладнання. До складу цього рівня входить також система технічної діагностики обладнання. Реалізується цей рівень на мініЕОМ. Усі використовувані в комплексі ЕОМ об'єднані у єдину локальну інформаційно-обчислювальну мережу.

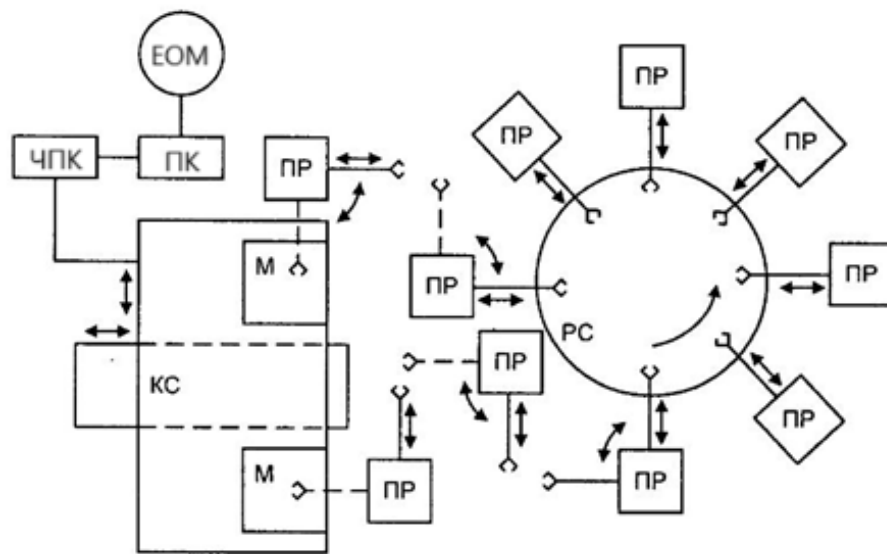


Рисунок 6.10 – Схема робототехнічної складальної ділянки з круговим компонуванням

Перелічені три рівні керування є основними та можуть доповнюватися проміжними рівнями. Так, системи керування окремими технологічними осередками у свою чергу можуть мати два рівня керування – рівень керування окремими одиницями обладнання, що входить в осередок, і рівень спільного групового керування цим обладнанням у складі осередку. У великих комплексах типу цеху, що містять кілька ділянок, поруч із системами керування цими ділянками зазвичай є наступний над ними рівень координації роботи.

6.1.3. Етапи проєктування технологічних комплексів

У процесі створення технологічних комплексів можна виділити три основні етапи: технологічний, алгоритмічний та технічний. На першому етапі здійснюється аналіз технологічного процесу, і в результаті визначається структура комплексу. Аналіз технологічного процесу (ТП) є одним з найбільш відповідальних етапів, від якості виконання якого значною мірою залежить ефективність комплексу, що розробляється.

Склад технологічного етапу проєктування технологічного комплексу включає:

- * визначення операцій, які потребують автоматизації;
- * розробка економічних показників ТП;

- * визначення номенклатури та обсягу матеріалів та інструменту;
- * визначення контрольованих параметрів ТП та засобів автоматизації операцій контролю;
- * визначення вимог до транспорту та типів транспортних засобів;
- * визначення вимог до складів, розрахунків обсягу складських запасів та міжопераційних заділів, визначення засобів автоматизації складських операцій.

На підставі проведених розрахунків:

- визначають типи та число ПР та технологічного оснащення;
- визначають інформаційні канали комплексу;
- складають схеми розміщення ТО та циклограми його роботи;
- розробляють структуру комплексу.

У зв'язку з тим, що цей етап включає порівняння великої кількості можливих варіантів розміщення обладнання, транспортних шляхів тощо, важливим засобом його виконання є комп'ютеризація.

Результатом алгоритмічного етапу розробки є визначення алгоритмів функціонування всього комплексу та його частин, вимог до пристроїв керування, каналів зв'язку та допоміжного обладнання. Склад алгоритмічного етапу проєктування технологічного комплексу включає:

- розробку банку даних;
- розробку алгоритмів керування основним та допоміжним технологічним обладнанням комплексу;
- розробку алгоритмів оперативно-календарного планування за обсягом та номенклатурою, складання змінно-добових завдань, обліку та аналізу простоїв обладнання;
- розробку алгоритмів контролю якості;
- розробку алгоритмів автоматичної діагностики та усунення несправностей.

На цьому етапі відбувається також зв'язування з автоматизованою системою управління підприємством.

На етапі алгоритмічного проєктування комплексу необхідно, зокрема, враховувати такі вимоги:

- найбільш повне та раціональне використання виробничих фондів;
- можливість коригування банку даних під час виконання виробничої програми;
- поетапність введення технологічних комплексів та його частин.

При алгоритмічній розробці технологічних комплексів важливим питанням є забезпечення вимог до надійності комплексу. Вихід будь-якого з його пристроїв з ладу не повинен спричинити зупинку всього виробничого процесу. Частково для усунення окремих короточасних відмов обладнання служать міжопераційні заділи, але для повного вирішення проблеми надійності на стадії алгоритмічного проєктування необхідно розробляти алгоритми автоматичної діагностики та оперативного усунення несправностей.

Істотним елементом цього етапу є створення банку даних, що містить усі відомості про типи та характеристики всього обладнання, пристроїв керування, каналів зв'язку тощо. Причому він повинен безперервно коригуватися та розширюватися з включенням існуючих рішень щодо окремих елементів комплексу та окремих технологічних операцій. Банк даних повинен включати буфер оперативного управління, через який здійснюється обмін даними з АСУ підприємства, до якого заносяться параметри перебігу виробничого процесу.

На рис. 6.11 наведено типову функціональну схему організації управління технологічним комплексом.

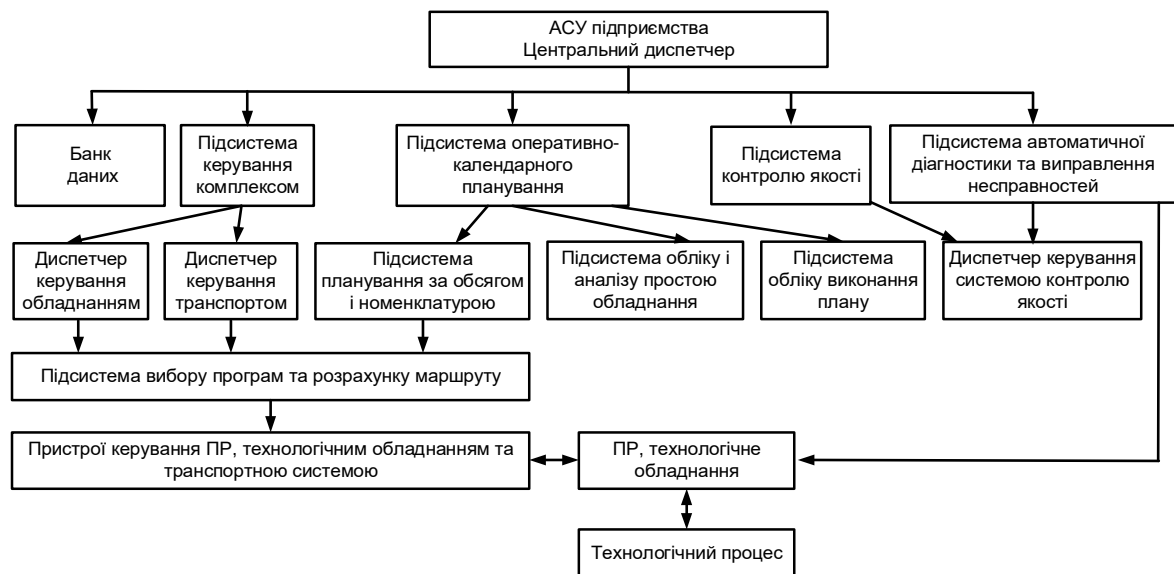


Рисунок 6.11 – Схема управління технологічним комплексом

Заключним етапом процесу проєктування технологічного комплексу є його технічна реалізація. Цей етап включає, зокрема, розробку або вибір ПР, їх пристроїв керування, технологічного оснащення, транспортних

шляхів та способів транспортування, каналів зв'язку, пристроїв інформаційного забезпечення на основі вимог, визначених на попередніх етапах проєктування.

6.1.4. Особливості роботизації технологічних комплексів в діючому виробництві

Завдання комплексної автоматизації та роботизації діючих виробництв має суттєві особливості порівняно зі створенням нових технологічних комплексів. В останньому випадку створюваний комплекс від початку проєктується з урахуванням застосування засобів робототехніки, можливості застосування ПР, що поставляються в комплекті з основним обладнанням, сполучення систем керування всіх складових частин і т.д. При вирішенні цього завдання для діючого виробництва необхідно враховувати обмеження, зумовлені тим, що в цьому випадку йдеться про модернізацію більшою чи меншою мірою непристосованого до застосування засобів робототехніки виробництва та його технологічного обладнання. При цьому часто не допускається тривала зупинка виробництва.

Основними труднощами при вирішенні цього завдання є:

- необхідність розміщення засобів робототехніки на обмежених площах технологічного комплексу, що діє, включаючи забезпечення транспортних операцій;
- необхідність забезпечення раціонального використання можливостей застосування ПР та їх пристроїв керування, що значною мірою визначає вартість та ефективність роботи всього комплексу, а також зручність його експлуатації;
- забезпечення необхідної продуктивності, тобто, як правило, її суттєвого підвищення, у тому числі за рахунок відповідної швидкодії ПР.

Існує й низка інших труднощів, пов'язаних з управлінням усім комплексом, особливостями конструкції основного обладнання та виробленої продукції, проте вони мають менше значення.

При вирішенні розглянутого завдання першорядне значення має необхідна вантажопідйомність ПР та інших засобів робототехніки, оскільки вона в основному визначає їх розміри, а отже, і можливості розміщення на робочому місці замість робітників, що вивільняються. У зв'язку з цим при вирішенні питання про застосування ПР у діючому виробництві необхідно

розрізняти такі три наведені в табл. 6.2 основні випадки, що визначаються масою об'єктів маніпулювання.

Найважчим випадком застосування ПР та маніпуляторів на діючому виробництві є робота з виробами, маса яких вимірюється одиницями кілограмів (приблизно до 25 кг), коли для розміщення ПР необхідно більше місця, ніж для робітників, що замінюються ними.

Основним рішенням, яке в цьому випадку прийнятно практично майже завжди, є застосування підвісних ПР, зокрема розміщення їх над основним обладнанням, яке обслуговує такий ПР. Таке рішення набуло досить широкого поширення, наприклад, у механообробці. При цьому часто використовують мобільні ПР, що пересуваються над основним обладнанням рейковим шляхом, що дає можливість обслуговувати одним ПР кілька верстатів.

Таблиця 6.2 – Особливості застосування ПР у діючому виробництві залежно від маси об'єктів маніпулювання

Маса об'єктів маніпулювання	Область застосування	Місце, що займається, та умови розміщення	Типові рішення
Частки кілограма	Приладобудування, легка промисловість	ПР займають місця менше, ніж робітник, тому розмістити їх на робочому місці не складно	При використанні ПР для обслуговування основного обладнання ПР розміщуються безпосередньо на обладнанні
Одиниці кілограмів	Машинобудування	ПР займають більше місця, ніж робітник, тому існує проблема їхнього розміщення в межах існуючого робочого місця	Підвісні ПР, у тому числі рухомі (на рейках)
Десятки кілограмів і більше	Важке машинобудування, транспорт	ПР займають місця не більше, ніж робітник разом із спеціальними засобами механізації, що використовуються для роботи з великими вантажами	ПР, збалансовані маніпулятори

Поруч із ПР для цих цілей досить широке застосування знаходять збалансовані маніпулятори з ручним керуванням. Розміщуючись на вертикальній колоні, вони займають значно менше місця, ніж ПР тієї ж вантажопідйомності, завдяки чому їх часто можна встановлювати в цехах, що діють, без переміщення основного обладнання. Крім того, такі маніпулятори дешеві та прості в експлуатації. Їх застосування дозволяє суттєво полегшити умови праці, підвищити продуктивність та за рахунок цього скоротити кількість робітників.

6.1.5. Гнучкі виробничі системи

Найвищим рівнем автоматизації виробництва є *гнучкі виробничі системи* (ГВС) чи *гнучкі автоматизовані виробництва* (ГАВ). Гнучкі виробничі системи (FMS – flexible manufacturing system) поєднують CAD/CAM/CAE-системи, інформаційну систему MIS (Management Information System) та ПР.

Гнучкість у широкому сенсі – це не тільки здатність функціонування при зміні умов виробництва всередині технологічного комплексу, але й швидка підготовка нової програми, інструменту, пристосувань, заготовок, необхідних для цього функціонування.

Комплексно-автоматизовані виробництва дозволяють швидко переходити на випуск нової продукції, здійснювати її модернізацію, удосконалювати технологію виробництва насамперед шляхом зміни керуючих програм. Створення та впровадження ГАВ виходить за межі робототехніки, проте ПР є найважливішим універсальним компонентом таких виробництв.

Для досягнення успіху на ринку промислові підприємства змушені працювати над скороченням терміну випуску продукції, зниженням її собівартості та підвищенням якості. CAD/CAM/CAE-системи, що виникли завдяки стрімкому розвитку комп'ютерних та інформаційних технологій, є найбільш продуктивним інструментом для вирішення цих завдань.

Під CAD-системами (computer-aided design – комп'ютерна підтримка проєктування, «САПР») розуміють програмне забезпечення, яке автоматизує працю інженера-конструктора та дозволяє вирішувати завдання проєктування виробів та оформлення технічної документації за допомогою персонального комп'ютера.

CAM-системи (computer-aided manufacturing – комп’ютерна підтримка виготовлення, «АСУТП») автоматизують розрахунки траєкторій переміщення інструменту для обробки на верстатах з ЧПК і забезпечують видачу керуючих програм за допомогою комп’ютера.

CAE-системи (computer-aided engineering – комп’ютерна підтримка інженерних розрахунків) призначені для вирішення різних інженерних завдань, наприклад для розрахунків конструктивної міцності, аналізу теплових процесів, розрахунків систем та механізмів.

Для ефективної роботи підприємства важливо організувати автоматизований збір та обробку інформації. Для цього застосовують спеціальне програмне забезпечення – систему MIS, яка дозволяє ефективніше управляти фінансами компаній, маркетинговими інструментами, документообігом та іншими внутрішніми бізнес-процесами.

MIS – це інформаційна система управління, що відповідає за загальне управління. Вона являє собою централізовану БД, де відбувається збір та зберігання даних про відділи підприємства, його фінанси, робочі процеси та співробітників. Система MIS автоматично збирає інформацію, структурує її та надає її авторизованому користувачеві у зручному для аналізу вигляді. За допомогою системи MIS виконується оптимізація робочого процесу. Дане ПЗ застосовують для підвищення доходу компаній та ефективності роботи співробітників. Вона виконує такі завдання:

1. Збір та зберігання інформації про фінанси та документообіг, комунікації з клієнтами, роботу кожного відділу або навіть співробітника, ефективність маркетингу та продажу, бухгалтерії, обсяги та динаміку виробництва, дослідження потреб ринку, динаміки попиту та ін.

2. Обробка інформації. Завдання системи – структурувати та регулярно надавати інформацію у зручній формі.

3. Розподіл інформації між співробітниками чи відділами у вигляді текстового файлу, фото, аудіо чи відео.

4. Складання прогнозів – проведення аналізу отриманих раніше даних, і складання на його основі прогнозу на різні сфери роботи підприємства.

5. Планування закупівель, виробництва та ін.

6. Контроль – звітність та аналіз даних про ефективність кожного з відділів.

Складовою частиною програм типу MIS є програмне забезпечення ERP, що відповідає лише за планування ресурсів підприємства. ERP

(Enterprise resource planning) – це програмне рішення, завдання якого – управління виробничими процесами, маркетинговими інструментами, бухгалтерією, персоналом та ін. Це частина MIS, відповідальна за управління виробництвом з допомогою даних про ресурси підприємства, яку можна використовувати як самостійну систему.

Розглянемо деякі визначення, що використовуються під час розгляду гнучких виробничих систем.

Гнучка виробнича система – сукупність у різних поєднаннях обладнання з ЧПК, роботизованих технологічних комплексів, гнучких виробничих модулів, окремих одиниць технологічного обладнання та систем забезпечення їх функціонування в автоматичному режимі протягом заданого інтервалу часу, що володіє властивістю автоматизованого переналагодження при виробництві виробів довільної номенклатури у встановлених межах значень їх характеристик.

Гнучка автоматизована лінія (ГАЛ) – ГВС, в якій технологічне обладнання розташоване в прийнятій послідовності технологічних операцій.

Гнучка автоматизована ділянка (ГАД) – ГВС, що функціонує за технологічним маршрутом, в якому передбачена можливість зміни послідовності використання технологічного обладнання.

Гнучкий автоматизований цех (ГАЦ) – ГВС, що являє собою у різних поєднаннях сукупність ГАЛ, роботизованих технологічних ліній, ГАД, роботизованих технологічних ділянок для виготовлення виробів заданої номенклатури.

Гнучкий виробничий модуль (ГВМ) – одиниця технологічного обладнання для виробництва виробів довільної номенклатури у встановлених межах значень їх характеристик з програмним керуванням, що автономно функціонує, та автоматично здійснює всі функції, пов'язані з їх виготовленням, і має можливість вбудовуватися в ГВС.

Як базову функціонально-структурну схему ГВС обробки розглянемо схему на рис. 6.12, яка включає в себе технологічну та накопичувально-складську підсистеми, об'єднані загальними транспортною та автоматизованою інформаційно-управляючою підсистемами.

Технологічна підсистема складається з комплексів основного та допоміжного обладнання, конкретний склад та кількість якого визначаються специфікою виробництва. До складу технологічної підсистеми входить кілька ГВМ.

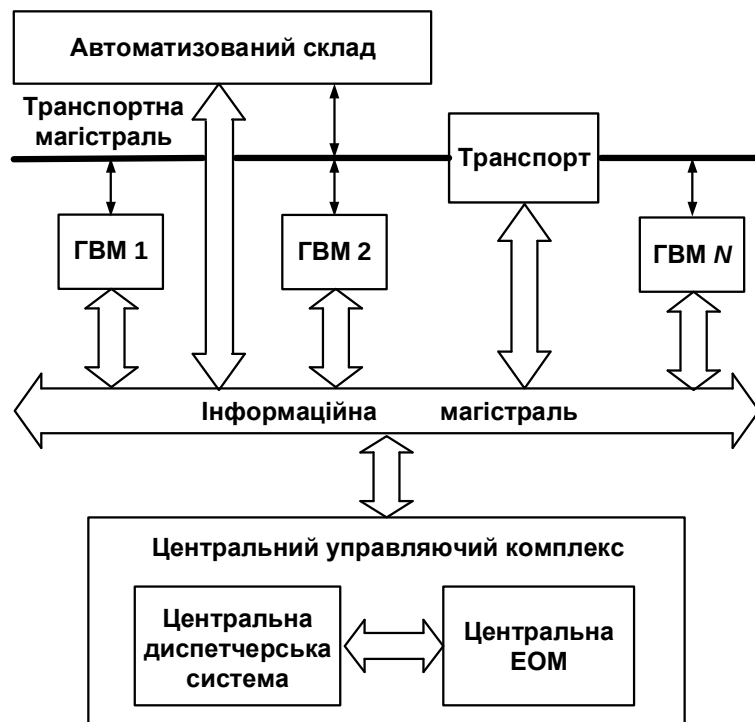


Рисунок 6.12 – Базова функціонально-структурна схема ГВС

У рамках ГВС принципово змінюється роль і місце транспортної та накопичувально-складської підсистем. З допоміжних систем традиційно організованого виробництва в ГВС вони перетворюються на основні, з якими нерозривно пов'язана ефективність дії високопродуктивного технологічного обладнання.

Склад та компонування технологічного обладнання ГВС визначаються на етапі проектування та залежать від призначення ГВС, прийнятої технології обробки, організації виробництва та необхідного рівня надійності. До складу основного обладнання можуть входити: токарні, фрезерні, свердлильні, розточувальні, шліфувальні, електроерозійні верстати з ЧПК, обробні центри, верстати для попередньої обробки та довідних операцій, транспортно-складські системи та промислові роботи, розмічальні машини та пристрої для розмірного контролю деталей, засоби адаптивного керування, діагностики технологічного обладнання та контролю зношування інструментів.

Вибір технічних засобів системи управління значною мірою залежить від складу та компонування технологічного обладнання ГВС, технології

обробки, організації виробництва, економічної доцільності автоматизації компонентів ГВС.

На рис. 6.13 наведено типовий склад ГАВ. У найбільш повному вигляді таке виробництво складається із двох частин:

- гнучка виробнича система (ГВС), яка безпосередньо реалізує технологічний процес виготовлення виробів;
- автоматизовані системи проектування виробів, що підлягають виготовленню, та технологічної підготовки їх виробництва, що реалізуються за допомогою автоматизованих робочих місць (АРМ).

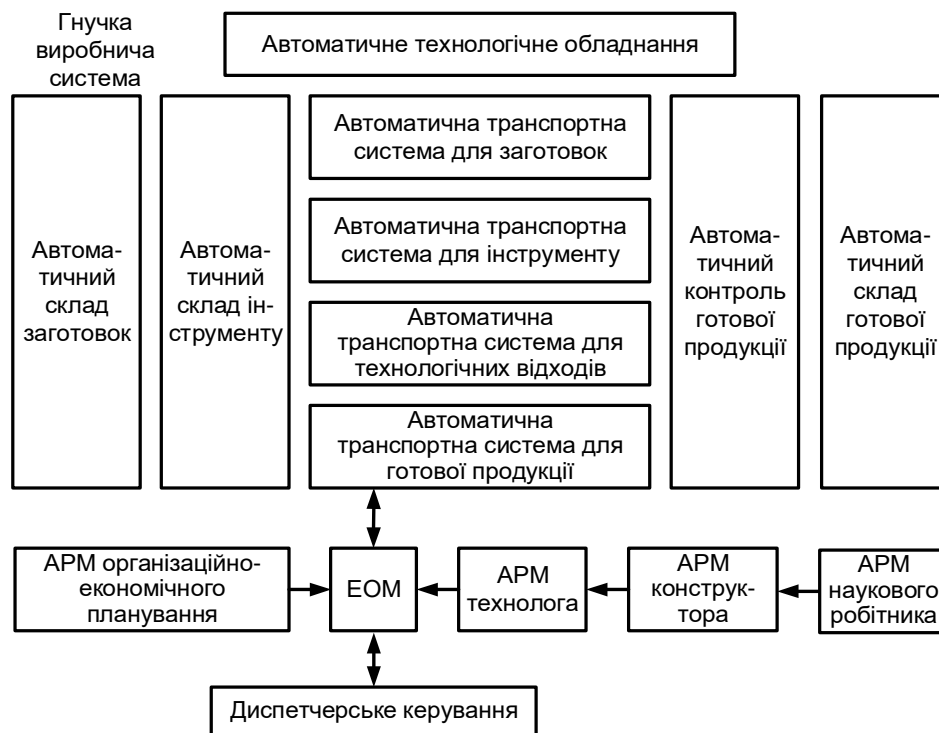


Рисунок 6.13 – Склад гнучкого автоматизованого виробництва

Ці частини об'єднані загальною автоматизованою системою управління АСУ на базі локальної комп'ютерної мережі.

Основним принципом побудови гнучких виробництв є їх компоновка з уніфікованих модулів, що постачаються комплектно. Відповідно до складу ГАВ (рис. 6.13) основними такими модулями є технологічні модулі-осередки, транспортні модулі (у тому числі на базі транспортних навісних та підлогових роботів), складські (у тому числі з роботами-штабелерами), модулі контролю якості продукції та технічної діагностики обладнання.

Останні модулі утворюють систему автоматичного контролю якості, без якої неможлива автоматична робота всього комплексу. У завдання таких систем входять власне вимірювання контрольованих параметрів, реєстрація результатів цих вимірювань, візуалізація їх на терміналах, подача керуючих впливів у системи керування обладнанням, коли за цими параметрами необхідне автоматичне коригування технологічних процесів (наприклад, у разі адаптивного керування верстатами, що враховує знос інструменту, зміну розмірів заготовок тощо). Прикладом устаткування, що використовується у системах автоматичного контролю ГАВ, є робототехнічні контрольно-вимірювальні машини.

Система управління ГВС (СУ ГВС) призначена для забезпечення спільної роботи всіх підсистем та компонентів ГВС з метою максимального корисного використання обладнання з ЧПК та виконання поставлених завдань. Різні підсистеми СУ ГВС вирішують безліч завдань управління на всіх рівнях ієрархічної системи управління з декомпозицією загальної задачі за рівнями. Крім виконавчого рівня керування технологічним обладнанням з використанням локальних систем керування (ЛСК) виділяють також середній та верхній рівні управління (рис. 6.14).

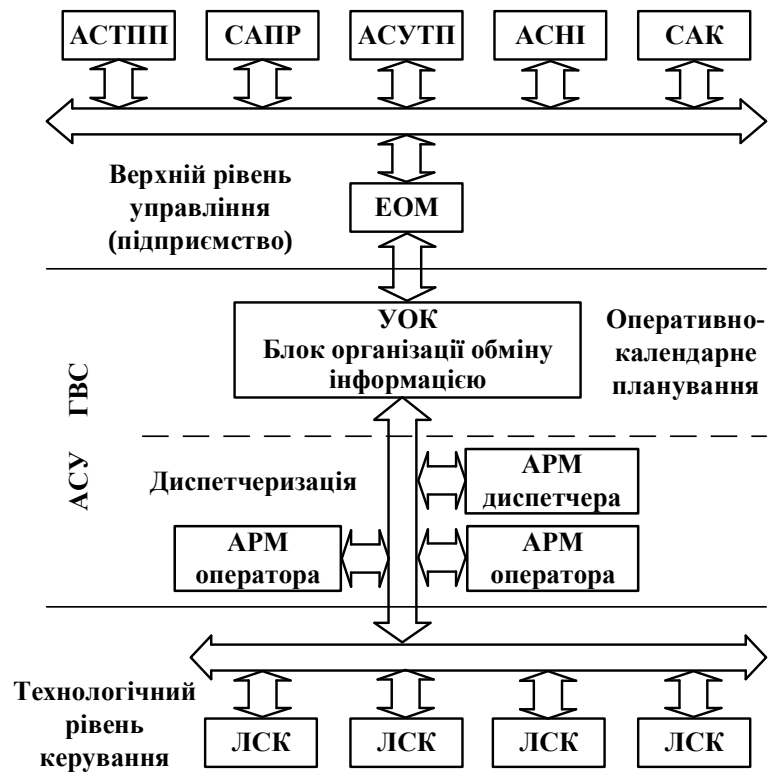


Рисунок 6.14 – Організаційна структура АСУ ГВС

Середній рівень управління (АСУ ГВС) має реалізовувати такі функції:

- зберігання масивів змінно-добових завдань, облік забезпечення заготовками, інструментом, технологічною інформацією на добу;
- зберігання та оперативне оновлення даних про поточний стан автоматизованих складів;
- зберігання керуючих програм (КП) для верстатів з ЧПК (на добу);
- облік виконання змінно-добових завдань із фіксацією браку та незавершеного виробництва;
- координація робіт усіх виконавчих технологічних підсистем;
- введення КП в пристрої ЧПК верстатів і пристрої керування ПР, а також їх коригування або заміна у зв'язку зі змінами умов роботи при виконанні змінно-добового завдання.

Верхній рівень управління ГВС має реалізовувати такі функції:

- планово-економічне управління виробництвом;
- ведення оперативного обліку стану виробничих процесів;
- ведення інформаційних масивів у межах системи управління базами даних (СУБД);
- обмін інформацією з АСУВ (автоматизована СУ виробництвом);
- ведення бібліотеки КП для верстатів з ЧПК та ПР по всій номенклатурі деталей;
- розрахунок КП;
- ведення архіву технологічної інформації для автоматизованих робочих місць конструктора (АРМ-К) та технолога (АРМ-Т);
- формування змінно-добових завдань та КП в ЕОМ середнього рівня;
- автоматизоване конструкторське та технологічне проектування (АРМ-К) та (АРМ-Т.)

Верхній рівень управління включає системи:

- АСТПВ – автоматизована система технологічної підготовки виробництва;
- АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом;
- САПР – система автоматизованого проектування;
- АСНД – автоматизована система наукових досліджень;
- САК – система автоматизованого контролю.

Кожному рівню ієрархічної системи управління ГВС відповідає свій комплекс завдань та склад програмно-апаратних засобів.

Основний принцип створення системи управління ГВС – інформаційна, програмна, технічна та організаційна інтеграція всіх її підсистем та компонентів на модульній основі. Модульний принцип забезпечує узгоджене поетапне введення в експлуатацію окремих підсистем, а в процесі функціонування забезпечує його працездатність при дії збурень та зміні цільових умов. Межі дії підсистем управління залежать від виду ГВС (ГАЛ, ГАД, ГАЦ), складності об'єкта управління, характеру перебігу технологічного процесу у часі, прийнятого режиму оперативного управління та потужності обчислювальної техніки.

Складність реалізації повного набору функцій ГВС робить необхідним групування функцій в підсистеми, що підтримуються відповідними модулями програмного забезпечення, до яких можна віднести модулі автоматизованих планових розрахунків, модуль диспетчеризації і модуль локального управління.

Модуль диспетчеризації у реальному часі вирішує такі завдання:

- оперативне управління ГВС із центрального пульта управління (АРМ) відповідно до змінно-добового завдання;
- підготовка даних для коригування змінно-добового завдання;
- підготовка даних для коригування виробничого плану;
- коригування маршрутних графіків у зв'язку зі збоями, відхиленнями та несправностями;
- подання звіту за запитами та всієї необхідної документації.

Модуль групового управління вирішує завдання:

- автоматичне управління узгодженою роботою виконавчих модулів;
- централізоване зберігання та видача КП за запитами локальних систем ЧПК;
- перезапис до бібліотеки керуючих програм, скоректованих локальними системами ЧПК;
- діагностування виконавчих модулів та обчислювальних засобів.

Загалом система управління ГВС має задовольняти наступним вимогам:

- забезпечення управління відповідно до прийнятих критеріїв;
- забезпечення можливості функціональних зв'язків із системами суміжних рівнів;
- забезпечення необхідного рівня надійності.

Межу, до якої прагне процес гнучкої автоматизації виробництва, можна коротко визначити так:

- автоматичне виробництво виробів якими завгодно малими партіями;
- собівартість та продуктивність, близькі до досягнутих у сучасному масовому виробництві;
- практично безлюдне виробництво – кількість працюючих у порівнянні з існуючим менше на два порядки;
- комплексна автоматизація всіх частин виробництва, включаючи технологічні процеси, підготовку виробництва, розробку документації на вироби, що випускаються, планування та управління виробництвом в цілому.

Таким чином, у максимально повному виконанні ГАВ на його вхід надходять технічні завдання на черговий виріб, а на виході – готова продукція. При цьому процес може відбуватися безупинно з урахуванням машинних носіїв інформації, тобто без паперової документації.

Для дрібносерійного виробництва ступінь його гнучкості характеризується кількістю типів виробів, які можуть бути виготовлені шляхом зміни лише програм. Типові значення цієї величини для сучасних ГАВ механообробки – десятки типів деталей і сотні їх модифікацій. Антиподом ГАВ щодо гнучкості є автоматичні лінії з так званою жорсткою автоматизацією (рис. 6.15).

В цілому поняття гнучкості можна визначити як можливість швидкої реакції виробництва на такі внутрішні та зовнішні «збурення»:

- завдання при переході на випуск нової продукції в межах заданої номенклатури повинні реалізовуватись шляхом зміни КП, а при зміні цієї номенклатури – шляхом зміни складу використовуваного технологічного обладнання;
- вихід з ладу окремих одиниць обладнання або інших частин виробництва повинен швидко паруватися їх заміною.

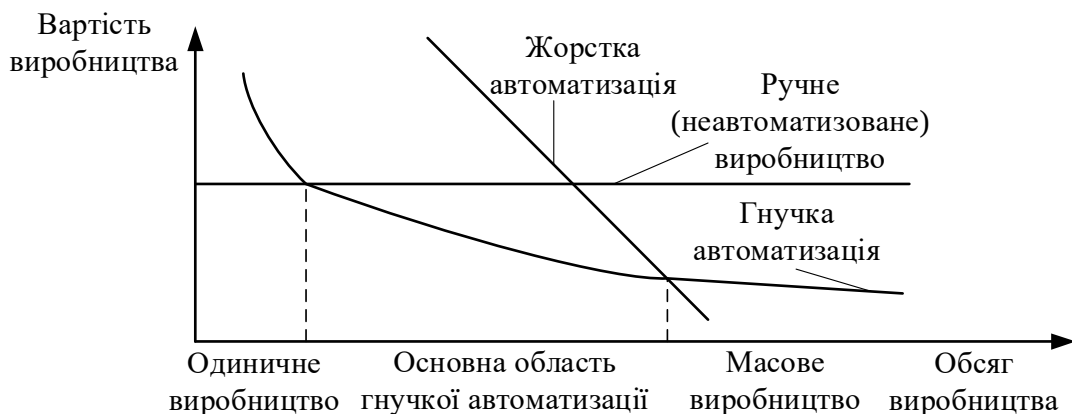


Рисунок 6.15 – Залежність вартості продукції від обсягу її випуску для різних видів виробництва

У світі використання гнучкої автоматизації пов'язують з такими конкретними перевагами:

- підвищення конкурентоспроможності продукції (за рахунок більш швидкої змінності виробів, підвищення їх якості, економії ресурсів і праці);
- зростання продуктивності;
- стабілізація виробництва та прискорення оборотності капіталу;
- підвищення ефективності використання робочої сили;
- створення нових технологічних процесів та виробництв.

6.2. Промислові роботи на основних технологічних операціях

З початку розвитку сучасної робототехніки в міру вдосконалення робіт відбувається стійке зростання частки ПР, що застосовуються на основних технологічних операціях. У 1980-1981 роках їхня частка у загальному парку робіт перевищила 50%, а в даний час становить понад 60%. Досвід показує, що хоча впровадження ПР на основних операціях вимагає значно більших (в 3-4 рази) витрат, ніж на допоміжних операціях, саме тут досягається найбільша ефективність застосування ПР при вивільненні робітників. Великий і соціальний ефект у зв'язку з шкідливістю для людини низки деяких операцій (наприклад, фарбування, зварювання) або їх монотонністю (наприклад, складання на конвеєрі).

У машинобудуванні основними типами технологічних комплексів, у яких ПР отримали широке застосування на основних операціях, є комплекси складання, зварювання, нанесення покриттів, шліфування, зачистки, клепок. Крім машинобудування до таких комплексів відносяться також комплекси для буріння у гірській справі, монтажу вогнетривів у металургії, для монтажних та облицювальних робіт у будівництві, упаковки штучної продукції у легкій та харчовій промисловості.

6.2.1. Складальні робототехнічні комплекси

Цей тип робототехнічних комплексів за своїм значенням є, мабуть, найважливішим. Складальними операціями у промисловому виробництві зайнято близько 40% робітників. Однак складальні процеси роботизовані відносно мало, в них зайнято близько 10% загальної кількості ПР. Склада-

льні операції в машинобудуванні відрізняються високою трудомісткістю. Витрати на складання зазвичай становлять до 50% собівартості виробів, а в приладобудуванні ще більше – до 50–60%.

Разом з цим ступінь автоматизації складальних робіт сьогодні дуже низький у зв'язку з обмеженими можливостями традиційних засобів автоматизації у вигляді спеціальних складальних автоматів. Такі автомати застосовні головним чином у масовому виробництві, тоді як, наприклад, у машинобудуванні до 80% продукції належить до дрібносерійного і серійного виробництва. Тому створення гнучких складальних комплексів на основі ПР є одним із основних напрямів у автоматизації складальних операцій.

Складання це процес маніпуляції роботом компонентами, у результаті якого виходить готовий зібраний продукт. Складання (рис. 6.16) – це процес припасування та з'єднання деталей і вузлів; зазвичай виконується за допомогою гайок, болтів, гвинтів, кріпильних деталей або з'єднань, що замикаються.

До складальних операцій відносяться механічне складання, електричний монтаж, мікроелектронне складання.

Сучасні промислові роботи здатні виконувати різноманітні види складальних операцій: встановлення деталей, по садкові та різьбові з'єднання, запресування та склепування, операції змащування, покриття та зачистки поверхонь, вимірювання, контроль та ін.

Одним з основних користувачів ПР є електронна промисловість особливо у сфері споживчих електронних товарів. Типова роботизована система складання наведена на рис. 6.17. Роботи забезпечують точність, швидкість і послідовність виконання операції складання, які є недосяжними вручну, а також гнучкість, яку не можуть забезпечити більш спеціалізовані системи складання.

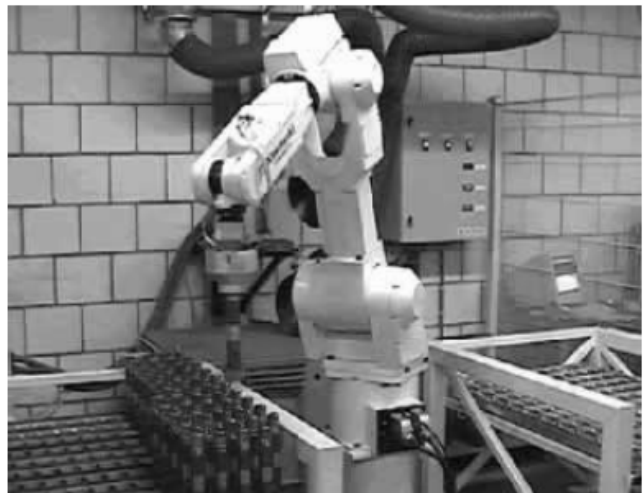


Рисунок 6.16 – Приклад виконання роботом складальної операції

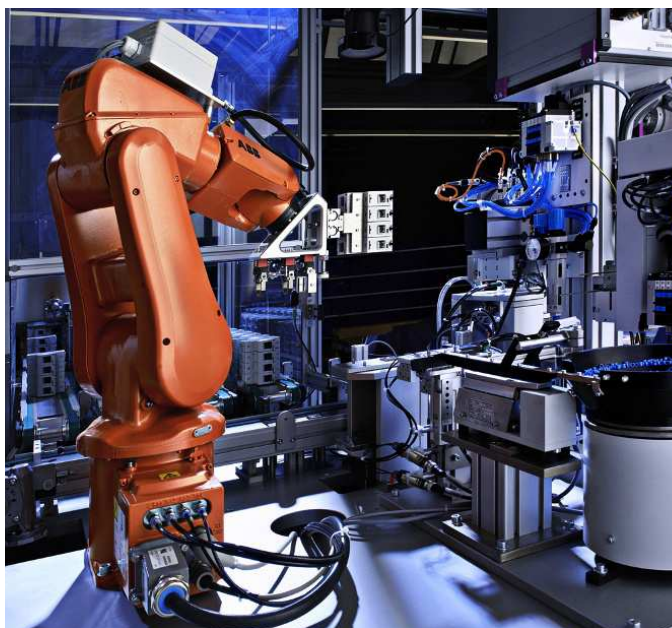


Рисунок 6.17 – Роботизована система складання



Рисунок 6.18 – Складальний робот Yaskawa Motoman

Зазвичай для складання використовуються роботи SCARA, але все частіше використовуються дельта-роботи і універсальні ПР з шістьма ступенями рухливості. Складальні роботи компанії Yaskawa Motoman (рис. 6.18) з 6-ма ступенями свободи, які приводяться в дію за рахунок системи сервоприводів є одними з найкращих механізмів для автоматизованого складання. Вони доступні на ринку промислової автоматики за ціною, в середньому, від 2000 доларів.

Дельта-роботи можуть досягати високої швидкості, але у них обмежена робоча зона, і їх необхідно встановлювати над областю, де вони повинні працювати. Роботи SCARA також швидкі і, як і дельта-роботи, обмежені чотирма осями, але можуть забезпечити дуже ефективну робочу зону. Машина SCARA, як правило, дешевші, ніж еквівалентні дельта-роботи та універсальні ПР. Основною перевагою універсальних ПР є їх гнучкість, яка забезпечує додаткову можливість орієнтації та знижує ризик при проектуванні системи складання.

Найважливішим параметром для більшості складальних операцій є швидкість, особливо для збирання компонентів електроніки. Корисне навантаження може бути важливим і має враховувати вагу пристрою захоплення, встановленого на роботі. Досяжність та розмір також можуть бути

важливими, часто тому, що складальні системи повинні бути компактними. В результаті компактний робот може бути кращим, ніж більша машина.

Застосування ПР у складанні має, можливо, найбільший потенціал для зростання. Автоматизація складання відстає від автоматизації виробництва первинних компонентів, оскільки вона вимагає набагато спритніших маніпуляцій. Провідні компанії витрачають на автоматизацію роботизованого складання великі кошти та беруть участь у гонці за розробкою наступного покоління заводів. Наприклад, компанія IBM витрачає 350 мільйонів доларів на модернізацію одного заводу з виробництва принтерів.

Однак автоматизація складання з використанням ПР висуває додаткові вимоги до якості деталей, що складаються, головні з яких – повна взаємозамінність, виключення зі складального процесу додаткових обробок і пригонки, технологічність форм деталей (наявність фасок, напрямних конусів, місць захоплення), незабрудненість поверхонь.

При обслуговуванні складальних операцій у складі складального РТК промислові роботи можуть використовуватись для виконання як допоміжних, так і основних складальних операцій. У першому випадку вони обслуговують спеціальне складальне устаткування, забезпечуючи ритмічну подачу деталей, тобто здійснюючи завантажувальні операції; у другому – самі виконують основні складальні операції – з'єднання та скріплення деталей.

Об'єкти механічного складання прийнято ділити на дві групи: «вал» та «корпус». В об'єктах типу «вал» на деякий вал надягають підшипники, зубчасті колеса, втулки, манжети та ін. В об'єктах типу «корпус» деталі вкладають у корпус. Більшість складальних операцій зводяться до операції введення валу в отвір, наприклад при складанні годинників, встановленні коліс на автомобіль, монтажі шестеренчастого насоса.

Процес складання містить наступні послідовні взаємопов'язані операції:

- завантаження деталей, що складаються, у завантажувальні та транспортні пристрої (зазвичай з їх орієнтацією);
- переміщення деталей до місця складання;
- базування, тобто фіксація у строго певній позиції, з орієнтацією деталей на складальній позиції;
- власне операція складання, тобто поєднання деталей, включаючи досить часто закріплення;
- контрольно-вимірювальні операції під час складання;

- видалення зібраного вузла зі складальної позиції для переміщення його на наступну складальну позицію, якщо складання не закінчено.

Кожна з цих операцій принципово може бути виконана за допомогою ПР, але не завжди це доцільно. Наприклад, у тих випадках, коли потрібно переміщення по одній координаті, простим рішенням може бути застосування пристроїв типу штовхачів. В інших випадках можуть застосовуватись спеціальні орієнтатори та прості однопрограми механічні руки.

Роль ПР у складальних РТК поряд з більш простими та спеціальними засобами автоматизації може бути різною. Залежить вона, передусім, від конкретних вимог до гнучкості комплексу, що у свою чергу визначається серійністю продукції, що випускається. Тому розглянемо роль ПР у складальних комплексах, які можна класифікувати наступним чином залежно від обсягу продукції, починаючи з масового виробництва і закінчуючи одиничним:

1. Спеціальні складальні автомати для масового та багатосерійного виробництва з можливим застосуванням простих автоматичних маніпуляторів на допоміжних та окремих основних складальних операціях.

2. Робототехнічні складальні комплекси для багатосерійного та серійного виробництва, в яких складальні операції виконують спеціальні ПР з цикловим керуванням.

3. Робототехнічні складальні комплекси для багатосерійного та серійного виробництва на базі універсальних та спеціалізованих ПР, кожен з яких може здійснювати різні складальні операції за рахунок зміни інструменту (у тому числі безпосередньо в процесі збирання виробу).

4. Робототехнічні складальні комплекси для серійного виробництва, в яких все складання виконується одним універсальним ПР.

5. Робототехнічні складальні комплекси для серійного виробництва за участю людини в керуванні ПР або у виконанні ним окремих операцій вручну.

Включення людини безпосередньо до технологічного процесу складання може викликатися:

- економічними міркуваннями;
- технічною неможливістю автоматизувати окремі складні операції (наприклад, деякі регульовальні та налагоджувальні дії);
- необхідністю оперативного підключення людини в аварійних ситуаціях, коли автомат з якоїсь причини не справляється із завданням;
- тимчасово на етапі освоєння складання нового виробу (у тому числі і як один із способів програмування методом навчання).

Прикладами спеціальних складальних автоматів, зазначених у п. 1 наведеної вище класифікації, є автомати для монтажу друкованих плат та складальні роторні лінії, що використовуються у масовому та багатосерійному виробництвах. Засоби робототехніки знаходять тут обмежене застосування в основному для їх обслуговування на вході та виході (операції завантаження–вивантаження).

На рис. 6.19 показаний один з перших складальних РТК масового виробництва механічних наручних годинників на базі спеціальних ПР, що відноситься до п. 2 наведеної класифікації. На прямоточній транспортній системі закріплено пристрій-супутник, який переміщується від позиції до позиції з фіксацією через рівні проміжки часу. Складання здійснюється за принципом паралельно-послідовного складання на всіх позиціях одночасно з наступним переміщенням пристрою-супутника на черговий крок.

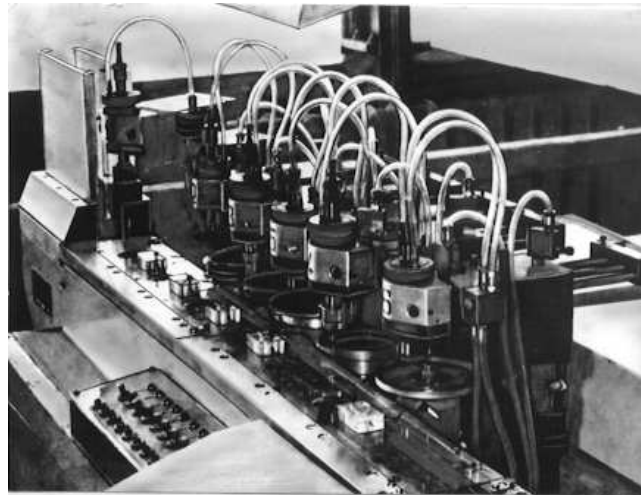


Рисунок 6.19 – Складальний РТК

Установка оснащена спеціальними пневматичними ПР з пристроями, які змінюються в залежності від марки годинників, що збираються.

Складальні лінії, з яких складається комплекс, включають транспортну систему, спеціальні ПР, пульт керування, вібробункери, живильники, а також різне оснащення та пристрої. Деталі та вузли годинників надходять на позиції складання з вібробункерів в орієнтованому положенні. Платини годинника, набрані в касети, автоматично встановлюються в пристрої-супутники, які є складовим елементом прямоочної транспортної системи. Роботи виконують установку деталей або вузлів у платину годинника в заданій послідовності. Щоб забезпечити умови збирання, платина годинника фіксується знизу за допомогою спеціального пристрою. Застосування таких комплексів дозволяє у 6–8 разів підвищити продуктивність, покращити якість збирання годинників, ліквідувати монотонну ручну працю та підняти культуру виробництва.

Прикладом складальної робототехнічної лінії, побудованої відповідно до п. 3 класифікації та реалізованої на базі універсальних ПР є лінія для складання кузова автомобіля (рис. 6.20).

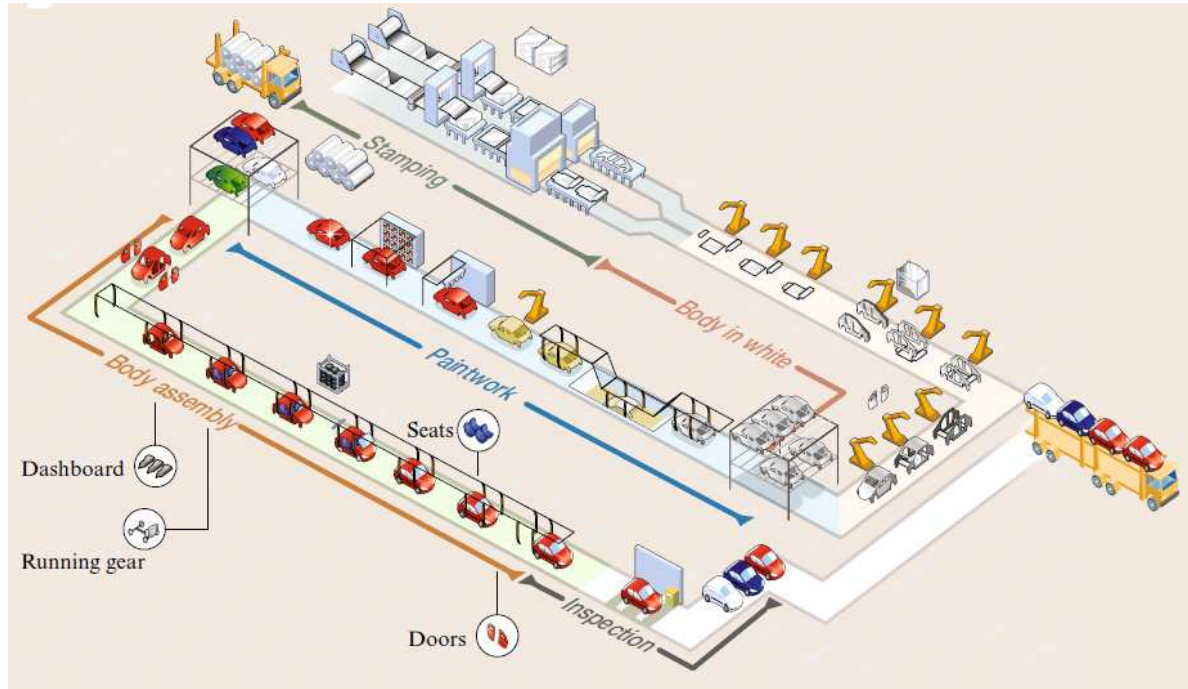


Рисунок 6.20 – Лінія складання кузовів автомобілів (Peugeot Citroën)

Спочатку переважним застосуванням роботів було складання кузова автомобіля, оскільки вигода від автоматизації цих робіт була очевидною. Обробка та позиціонування металевих листів, точкове зварювання та транспортування каркасів кузова були або небезпечними, фізично складними для працівника, або їх було важко реалізувати на стаціонарних автоматизованих лініях, враховуючи бажану різноманітність конфігурацій кузова автомобіля, які повинні були бути зібрані на одній виробничій лінії.

Складання кузова автомобіля зазвичай виконується за наступними етапами: штампування листа металу в пластини, фіксація і вирівнювання пластин на піддонах, точкове зварювання, фарбування кузова автомобіля та остаточне складання (рис. 6.21) кузова автомобіля (двері, панель приладів, вітрові скла, сидіння, трансмісії). На автомобільних заводах може працювати понад 1000 роботів, що працюють у дві-три зміни на день.

Окремі складальні одиниці та компоненти, такі як двигуни, трансмісії, осі, двері або крила, попередньо монтуються в окремих зонах. Кузов авто-

мобіля доставляється в зону збирання строго за графіком, тобто в потрібний час і місце на складальній лінії.



Рисунок 6.21 – Робототехнічна лінія складання кузовів автомобілів

Сучасні ПР на складальних операціях кузовів автомобілів мають робоче навантаження 100–300 кг і повинні забезпечувати такі вимоги:

- необхідна повторюваність щонайменше $\pm 0,5$ мм при типових навантаженнях близько 100 кг для інструменту точкового зварювання та кабельного пакету призводить до жорстких та важких конструкцій руки. Типове співвідношення ваги робота до корисного навантаження становить близько 1500 кг : 150 кг;
- тризмінна безперервна робота потребує найвищої надійності як робота, так і обладнання. Типовий середній час між відмовами становить близько 50000 год.
- потужність лінії залежить від швидкості роботи при точковому зварюванні. Таким чином, час переміщення від точки до точки між позиціями зварювання має бути якомога коротшим. Це досягається в основному за рахунок потужних приводів (середня споживана потужність приводів робота зазвичай становить 5 кВт).
- Більшість траєкторій, положень та орієнтацій генеруються за допомогою систем автономного програмування. Точне моделювання руху робота залежить від моделей робота, які включають як кінематичні властивості робота, так і характеристики контролера. Загальноприйнятим стан-

дартним форматом для систем автономного програмування є інтерфейс реалістичного моделювання робота.

Наступним типом робототехнічних складальних комплексів, які виявляються економічно вигіднішими при меншій серійності виробництва, є комплекси з ПР, що послідовно виконують різні складальні операції на одному робочому місці аж до повного складання цілого виробу (п. 4 наведеної класифікації).

Така побудова комплексу істотно підвищує його гнучкість, дозволяючи суто програмно змінювати кількість складальних операцій без зміни кількості ПР, що неминуче, коли кожен ПР виконує тільки одну операцію. У таких комплексах у ПР в ході складання багаторазово змінюються робочі органи під час переходу від однієї операції до іншої. Прикладами ПР, призначених для такого багатоопераційного складання, є електромеханічні ПР типу «Сігма» (Італія) та «Пума» (США).

На рис. 6.22 показаний один із перших РТК, що здійснює складання на одному робочому місці такого досить складного виробу, як пилосос. Комплекс змонтований на складальному столі і включає два електромеханічні маніпулятори (1, 2) з 8 ступенями рухливості (перший, силовий працює у вертикальній площині, а другий, оснащений сенсорами – у горизонтальній) та 7 телевізійних камер.

Три з них (α , β , γ) орієнтовані вертикально, а чотири (A, B, C, D) – горизонтально.

Пристрій захоплення горизонтального маніпулятора має датчики зусилля і тактильні. Пилосос 3 збирається з трьох вузлів: фільтра 4, електродвигуна 5 і корпусу 6, які надходять на складання неорієнтованими.

Для автоматизації складальних операцій широко використовуються роботи типу SCARA.

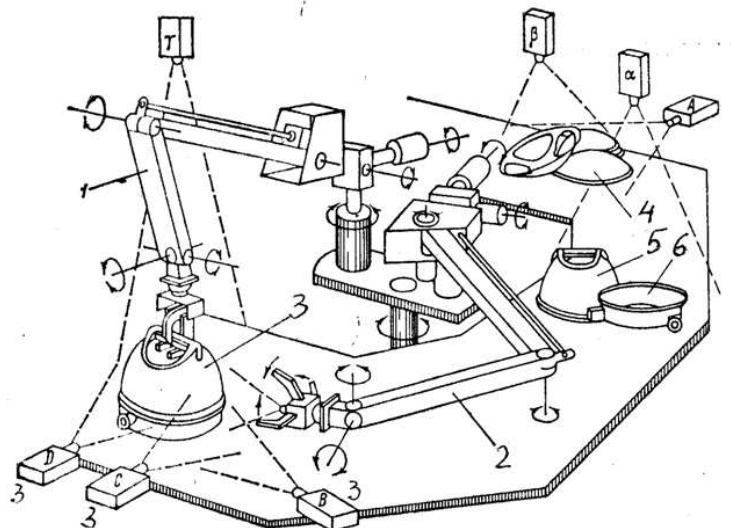


Рисунок 6.22 – РТК для складання пилососів Hitachi (Японія)

Ці роботи мають швидкість ланок до 1,5 м/с, автоматичну зміну пристроїв захоплення та інструментів. Вони зручні тим, що мають податливість по відношенню до горизонтального зусилля і жорсткість по відношенню до вертикального зусилля, тому при їх використанні полегшується вставлення валиків і болтів в отвори та інші подібні операції з ліквідацією помилки взаємного позиціонування за рахунок податливості.

Приклад гнучкого виробничого модуля складання друкованих плат на основі двох роботів типу SCARA показаний на рис. 6.23.

Складання друкованих плат є стомлюючою і трудомісткою операцією, що важко піддається автоматизації, особливо у випадку багатомоделного виробництва. Установка мікросхем та інших елементів вимагає крім високої точності позиціонування компонентів, що з'єднуються (плати і деталі), також спеціальної підготовки їх виводів: формування, обрізки під заданий розмір і т.п.

На рисунку прийняті такі позначення: 1 – інструмент робота для формування виводів; 2 – вібробункери; 3 – трубчасті живильники; 4 – фіксатор плати; 5 – транспортна система для переміщення плати; 6 – стрічкові живильники; 7 – кліщі для встановлення елементів; 8 – пристрій для обрізання виводів.

Роботи забезпечують високоякісне складання продукції, піднімаючи продуктивність праці на 10-20% і знижуючи брак на 30-40%. Складальний комплекс з 1-2 роботами застосовують при складанні виробів з 6–12 деталей при обсязі випуску 20–100 тисяч виробів на рік. Найбільший ефект від використання складальних роботів досягається при повній автоматизації всієї лінії виробництва. Приклад такої лінії показано на рис. 6.24.

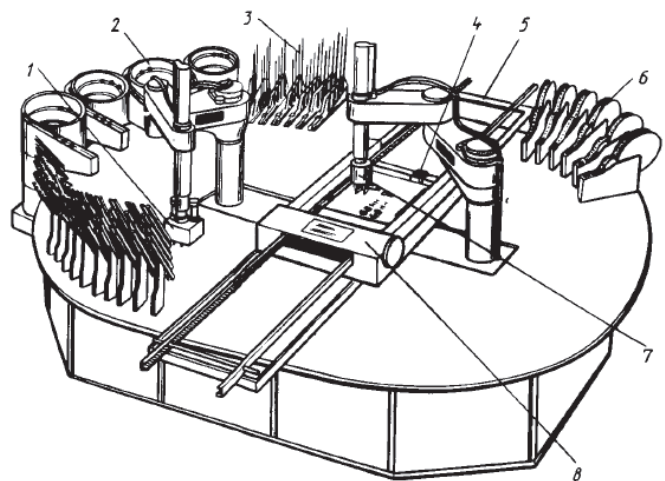


Рисунок 6.23 – Гнучкий виробничий модуль складання друкованих плат



Рисунок 6.24 – Складальна роботизована лінія

Однією з найважливіших проблем для складальних додатків є позиційна повторюваність. Якщо дві деталі повинні бути з'єднані механічним способом, вони повинні бути розташовані в межах допусків, які дозволяють використовувати технологію з'єднання. Для цього може знадобитися деяка форма введення або скосу на деталях. Може знадобитися технічний зір визначення місця розташування деталей. Необхідно, щоб деталі були повторюваними. Наприклад, якщо компоненти мають бути вставлені в друковану плату, ніжки на компонентах мають бути прямими та неушкодженими. Однією з інших основних проблем складання є подача компонентів. Використання чашкових живильників та інших механізмів для надійної подачі деталей у складальну систему є ключовим елементом успіху системи.

Похибка позиціонування пристрою захоплення робота в десятки разів більша за зазор між валом і отвором, що часто не перевищує 10 мікрон. Оскільки зменшення похибки позиціонування ланок маніпулятора досягло своєї технічної межі, доводиться вирішувати це завдання шляхом адаптивного керування рухом пристрою захоплення, оснащеного силомоментним датчиком. Важливим напрямом роботизації складального виробництва є застосування адаптивних промислових роботів. Оснащення промислового робота системою силомоментних сенсорів дозволяє змінити його поведінку.

Розглянемо, наприклад, складання гладких циліндричних або різьбових з'єднань, які у великій кількості зустрічаються в продукції машинобудування та приладобудування (установка поршнів у циліндри автомобіль-

ного двигуна, запресування підшипників, кріплення одних деталей до інших болтами, гайками, шпильками, штифтами тощо).

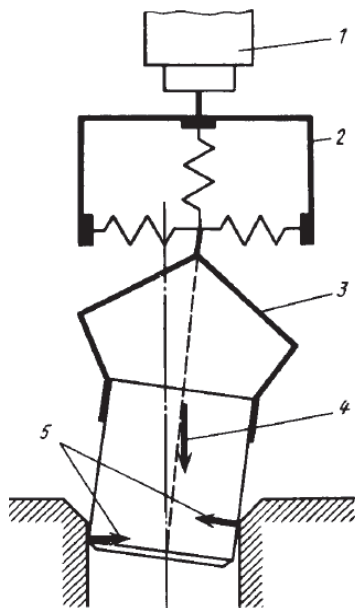


Рисунок 6.25 – Сполучання деталей з гладкими циліндричними поверхнями

Роботу складно з'єднати два тіла або вставити одне в інше, наприклад циліндр у круглий отвір, навіть якщо між ними існує зазор, так як завжди є помилки у відносному позиціюванні та орієнтації деталей, що сполучаються (рис. 6.25). На рисунку прийняті такі позначення: 1 – остання ланка робота; 2 – силомоментний датчик; 3 – пристрій захоплення; 4 – напрямок руху; 5 – сили реакції. Через початкову неспіввісність і кутовий перекос або ускладнюється рух циліндра від гирла отвору вглиб, або деталі взагалі заклинюються. Так зазвичай і відбувається при автоматизованому складанні за допомогою робота без силомоментного датчика, якщо похибки позиціювання деталей виявляються більшими за допустимі. Якщо ж робот адаптивний, з силомоментним сенсором, то напрям

дії сил, що виникають при контакті тіл, йому відомий, і він точно «знає», в якому напрямку потрібно перемістити пристрій захоплення з затиснутою в ньому деталлю, щоб сили реакції стали рівними нулю, або не перевищували заданої величини.

Операцію введення валу в отвір ділять на чотири етапи, кожен із яких вимагає власної програми керування. Спочатку шукають поверхню деталі, фіксуючи появу зусилля в пристрої захоплення в момент торкання валом поверхні. Потім переміщують пристрій захоплення по концентричній траєкторії до тих пір, поки вал не потрапить в отвір. На третьому етапі зменшують радіус колоподібних рухів пристрою захоплення, поки вал не торкнеться протилежних сторін отвору. На заключному етапі повертають вал до суміщення його осі і осі отвору, що фіксується вирівнюванням зусиль по осях X , Y , Z . Після суміщення осей можна вводити вал в отвір. Закінчення кожного етапу розпізнають за фактом зміни зусиль у пристрої захоплення. На наступному етапі змінюють напрямок руху пристрою захоплення.

Аналогічним чином діє і людина, виконуючи ту саму операцію. Він прагне звести до нуля будь-яку протидію, що виникає, автоматично центруючи деталі, які сполучаються.

Розглянемо компонування адаптивного складального РТК (рис. 6.26).

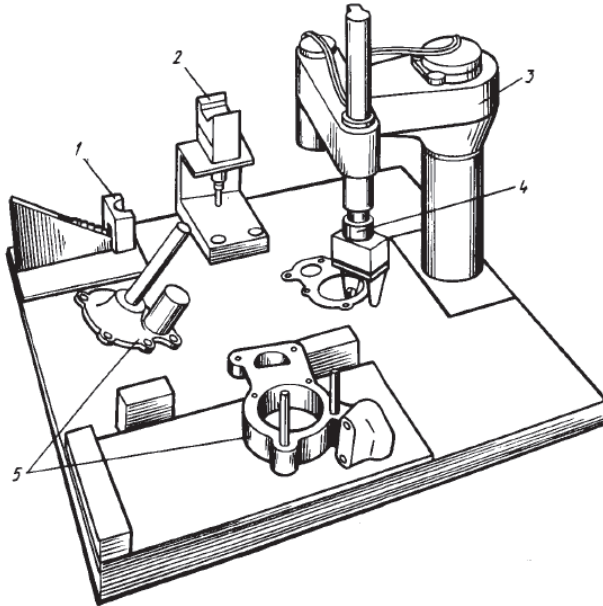


Рисунок 6.26 – Адаптивний складальний РТК



Рисунок 6.27 – Координатно-вимірвальна машина DEA (Італія)

Складальний комплекс має наступні основні вузли: 1 – живильник; 2 – гайковерт; 3 – промисловий робот; 4 – силомоментний датчик; 5 – деталі, що з'єднуються. Робот з силомоментним датчиком підводить циліндр до гирла, потім, визначивши після зіткнення по силі реакції напрямок на центр отвору, починає, не перериваючи контакту, переміщати циліндр до нього, поступово вирівнюючи і вводячи його всередину до завершення складання. Здатність сенсорного робота визначати напрямок на центр після контакту циліндра із зазвичай ширшою входною частиною отвору дозволяє мало не в десять разів знизити вимоги до похибки позиціонування та орієнтації деталей, що складаються.

Близькі до складальних робіт і часто застосовуються разом з ними роботи для контролю розмірів – вимірвальні машини. На рис. 6.27 показаний зовнішній вигляд одного з типів вимірвальної машини.

Робочим органом є вимірювальний щуп, яким проводиться обмацування контрольованого виробу у потрібних точках. Зазвичай такі вимірювальні машини мають прямокутну систему координат і пристрій ЧПК, що забезпечує точність до одиниць мікрометрів.

6.2.2. Зварювальні робототехнічні комплекси

Найпоширенішими є роботи для виконання технологічних операцій зварювання. У зварювальному виробництві зосереджено до половини парку промислових роботів. Процес роботизації зварювання дозволяє скоротити кількість кваліфікованих зварювальників, оскільки робот працює у 8 разів ефективніше за людину. Переваги автоматизованого зварювання очевидні: маніпулятори забезпечують високу якість зварювання та ідентичність готової продукції; знижують брак при обробці деталей; збільшують швидкість виробництва. Впровадження зварювальних роботів у виробництво дозволяє підприємствам скоротити час виготовлення продукції, включаючи підготовку об'єкта та процес зварювання з 30 до 7 хвилин. Лідерами в галузі автоматизованого зварювання є компанії KUKA та Kawasaki. Вони постачають маніпулятори для зварювання за ціною в середньому \$2300, які є надійними, ефективними та легкими в експлуатації. З численних видів зварювання ПР отримали основне застосування при виконанні контактного точкового та дугового, а також електронно-променевого зварювання.

Контактне точкове зварювання здійснюється шляхом нагрівання імпульсним електричним струмом. Робочими органами ПР для виконання такої операції є зварювальні кліщі (рис. 6.28).

При точковому зварюванні зварювальні кліщі рухаються вздовж лінії з'єднання листів завтовшки до 3 мм. Через заданий крок (20-200 мм) переміщення робочий орган зупиняється, подається команда на стиск кліщів та подачу через них струму. У точці з'єднання кліщів листи зварюються. Потім кліщі розтискаються, і робочий орган переміщається до наступної точки зварювання. За рахунок більш точного кроку підвищується якість зварювання.

ПР для контактного точкового зварювання мають спеціальну конструкцію, яка передбачає розміщення зварювального трансформатора та струмопровідного кабелю, що йде від нього до зварювальних кліщів.

Зварювальний трансформатор розташований зазвичай на маніпуляторі ПР, у тому числі і безпосередньо в його робочому органі (щоб максимально

скоротити довжину кабелю від трансформатора до зварювальних кліщів, якими проходить великий імпульсний зварювальний струм).

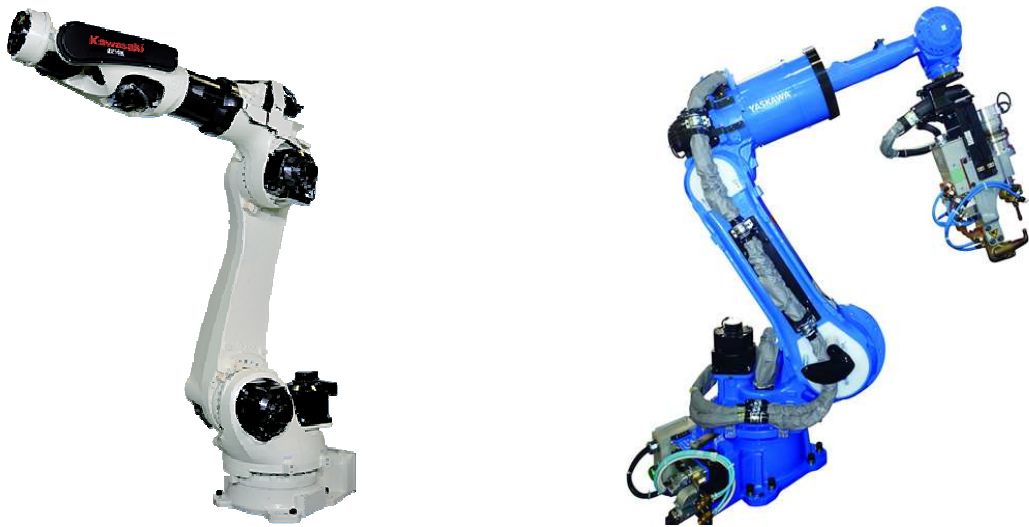


Рисунок 6.28 – Роботи для точкового зварювання

Вантажопідйомність маніпуляторів таких зварювальних ПР зазвичай становить 20–30 кг. Керування ПР для контактного точкового зварювання – дискретне позиційне.

Пристрій керування повинен бути розрахований на роботу в умовах сильних електромагнітних перешкод, створюваних імпульсами зварювального трансформатора. Найбільш широко контактне точкове зварювання за допомогою ПР застосовується в автомобілебудуванні (зварювання кузовів), суднобудуванні та вагонобудуванні. Існують зварювальні ПР, в яких маніпулятор закінчується одним електродом, а другим електродом служить зварюваний виріб (рис. 6.29).

Приклад компоновки лінії для зва-

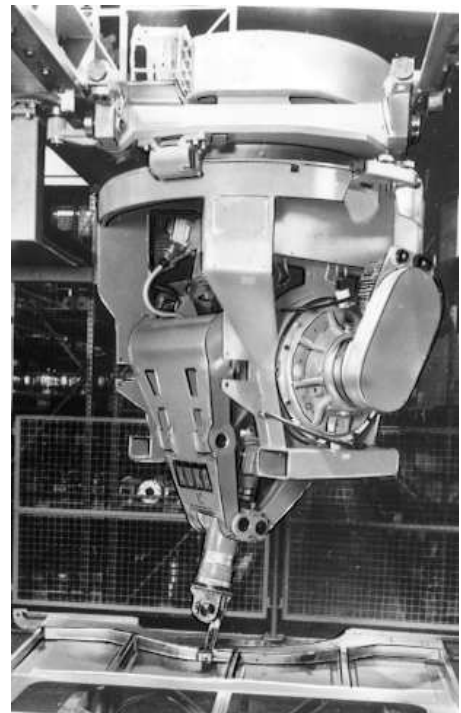


Рисунок 6.29 – Зварювальний робот для контактної точкової зварювання фірми KUKA

рювання кузовів автомобілів показаний на рис. 6.30. На конвеєрі одночасно встановлено кілька зварювальних ПР з великою продуктивністю. Кузов встановлюється на кроковому конвеєрі 2 у зібраному та закріпленому вигляді; конвеєр фіксується на кожному кроці. На позиціях I-IV всі роботи 1 працюють одночасно і виконують зварювання в 10–15 точках кожен за час фіксованого положення конвеєра. Ці дії запрограмовані, і кожен ПР за програмою обходить автоматично всі призначені йому точки зварювання на кузові 3.

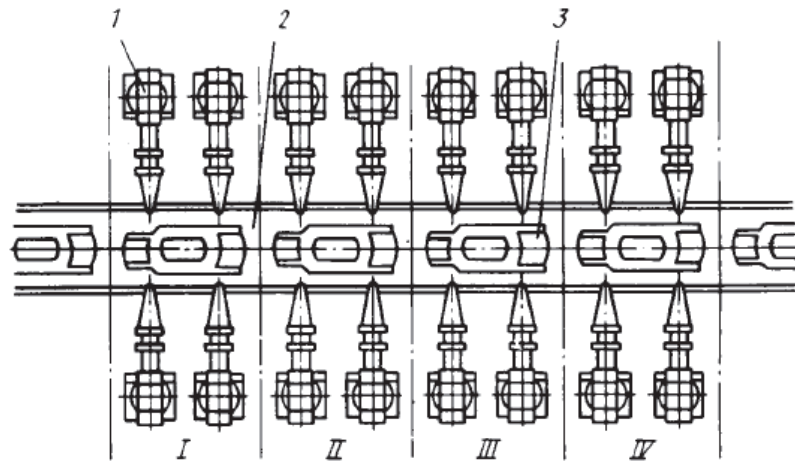


Рисунок 6.30 – Лінія точкового зварювання кузовів автомобілів

На рис. 6.31 та рис. 6.32 показаний зовнішній вигляд роботизованих ділянок зварювання кузовів автомобілів з різними схемами розміщення ПР.

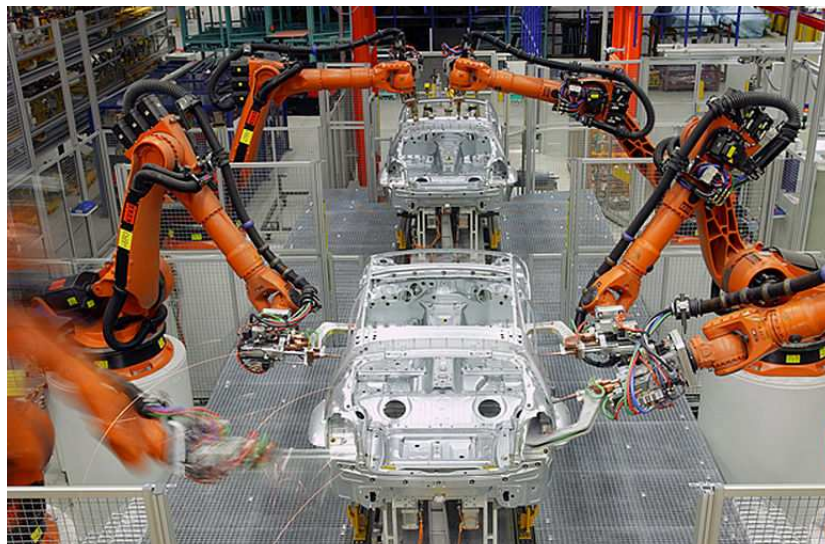


Рисунок 6.31 – Ділянка точкового зварювання роботами KUKA кузовів автомобілів



Рисунок 6.32 – Ділянка точкового зварювання кузовів автомобілів роботами ABB

Роботи для точкового зварювання також використовуються під час виробництва автомобільних компонентів (рис. 6.33) та інших деталей за межами автомобільної промисловості.

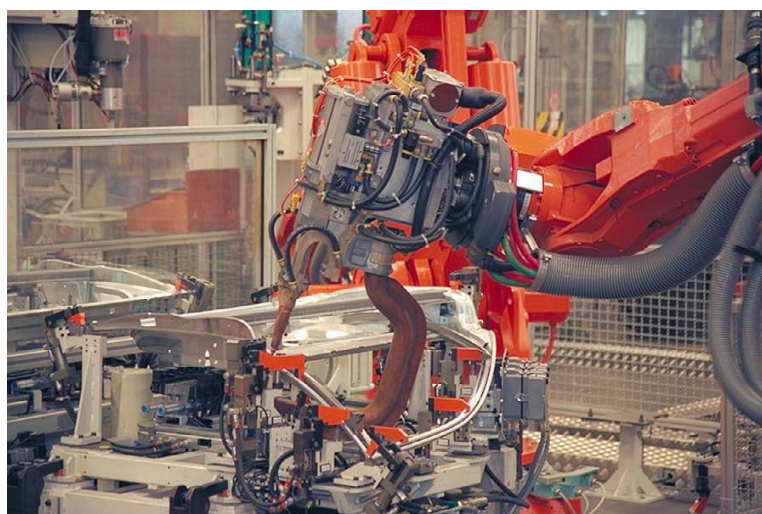


Рисунок 6.33 – Зварювання автомобільних компонентів

Дугове зварювання – більш складний технологічний процес, ніж контактне точкове. Тут потрібно здійснювати безперервне переміщення зварювального електрода або пальника з певною швидкістю по складній траєкторії, яка формує шов, що зварюється, з одночасним поперечним переміщенням для створення шва потрібної форми. Електрод повинен зберігати

певну орієнтацію відносно площини шва. Вантажопідйомність маніпуляторів ПР для дугового зварювання менше, ніж ПР для контактної точкової зварювання та не перевищує 5–8 кг. Зовнішній вигляд ПР для дугового зварювання наведено на рис. 6.34.

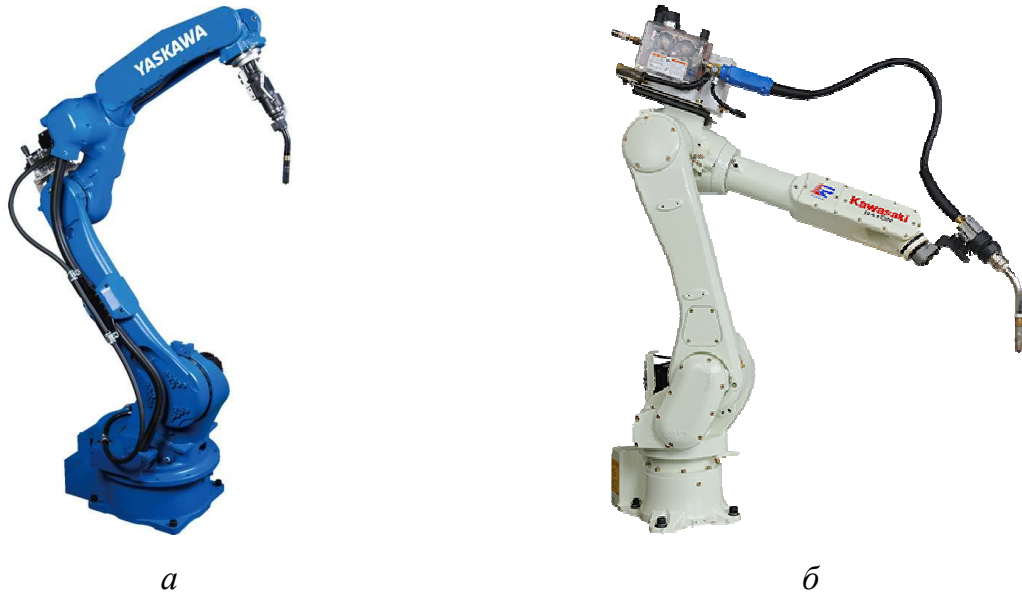


Рисунок 6.34 – Роботи для дугового зварювання

Дугове зварювання, що застосовується в робототехніці, зазвичай використовує технологію зварювання метал-інертний газ (рис. 6.35). Дуга запалюється між заготовкою і дротом присадного металу, що повільно подовжується в міру його витрачання. Він оточений трубкою, через яку продувається аргон або гелій для захисту зварювальної ділянки від кисню і азоту атмосфери, які можуть з'єднуватися з металом зварного шва при температурі дуги. Процес автоматичного дугового зварювання заснований на використанні дротяного електрода і захисного газу, які подаються через зварювальний пістолет (рис. 6.36).

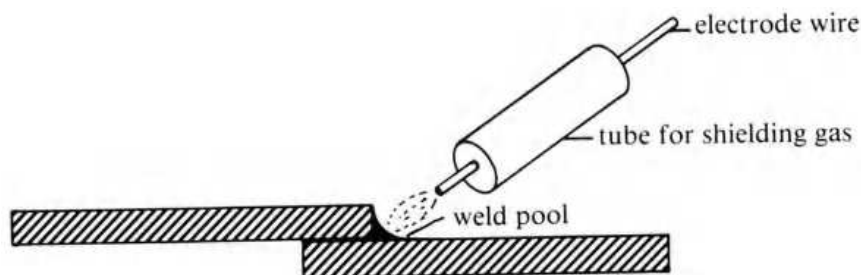


Рисунок 6.35 – Основна схема дугового зварювання



Рисунок 6.36 – Дугове зварювання

Дугове зварювання може використовуватися з широким спектром металів, включаючи алюмінієві сплави та нержавіючу сталь. Типові умови дуги – величина струму 100 А при напрузі 20 В та зазор у кілька міліметрів. Для дугового зварювання потрібен робот із безперервним керуванням траєкторією.

Зварювальні роботи можуть вести дугове зварювання зі швидкістю до 0,5 м/с при величині похибки контурного відпрацювання траєкторії руху вздовж шва до 0,5 мм.

Робот повинен мати не менше 5 ступенів руху. Оскільки похибка позиціонування об'єкта зварювання на порядок більша від похибки відпрацювання траєкторії переміщення електрода, то необхідна адаптація до траєкторії шва.

Розглянемо схему організації РТК для дугового зварювання (рис. 6.37).

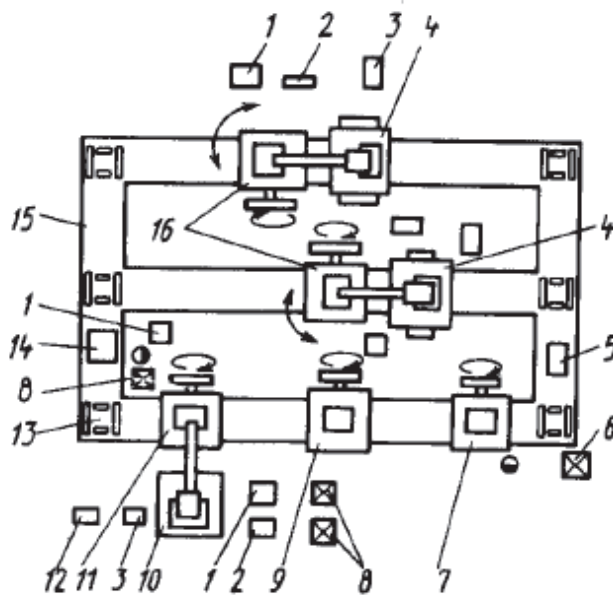


Рисунок 6.37 – Компонування РТК для дугового зварювання

Робот 10, використовуючи тару для деталей 8, здійснює складання деталей, що підлягають зварюванню, на пристрої-супутнику 5. По рольгангу 15 автоматично виконується транспортування деталей до одного з двох па-

паралельно працюючих зварювальних роботів 4. Потім той же супутник 5 супроводжує зварені вузли в тару 6. Усією роботою керує система програмного керування РТК 12 та системи програмного керування роботів 1 та зварювального обладнання 2. Вводиться ряд допоміжних пристроїв (9, 7, 11, 13, 14, 16) – кантувачі, позиціонери та підйомні столики, а також джерела електроживлення 3. ПР для дугового зварювання часто комплектується столом з кількома кутовими ступенями рухливості для розміщення на ньому виробів, що зварюються, і маніпулювання ними. Варіанти РТК для дугового зварювання наведені на рис. 6.38 та рис. 6.39.

У функції пристрою керування ПР для дугового зварювання, крім керування рухом, входить ще регулювання параметрів режиму зварювання (струму, напруги дуги, припливу газу тощо).

Керування має бути адаптивним. Основні завдання адаптації – пошук початку шва, стеження за кромками деталей, що зварюються з урахуванням можливої кривизни їх поверхонь та орієнтація робочого органу (електрода).



Рисунок 6.38 – Робототехнічний комплекс для дугового зварювання

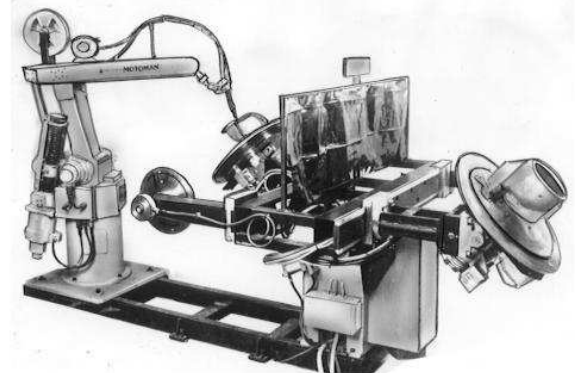


Рисунок 6.39 – РТК для дугового зварювання з двокоординатним столом

Крім того, адаптація потрібна при регулюванні технологічних параметрів власне процесу зварювання з урахуванням стану зовнішнього середовища. Для контролю положення робочого органу щодо кромки деталей, що зварюються, застосовують контактні і магнітні датчики, ультразвукові і оптичні далекоміри, телевізійні системи.

Електронно-променеве зварювання здійснюється у вакуумі шляхом переміщення електронного пучка, створюваного електронною гарматою, по лінії шва. Цей вид зварювання цікавий тим, що на відміну від звичайних

механічних маніпуляторів, тут маніпулювання проводиться електронним променем, що відхиляється за допомогою магнітного або електричного полів. Існують установки з переміщенням столу, на якому кріпляться деталі, що зварюються.

Керування рухом променя по шву здійснюється у найпростіших випадках за жорсткою програмою, а для найбільш складних траєкторій стиків – із застосуванням адаптивного керування та зворотного зв'язку з використанням телевізійної системи технічного зору.

З РТК зварювання схожі комплекси для паяння та різання (дугою, лазерним променем, плазмою). Пристрої для плазмового різання, зокрема, широко застосовують для розкрою матеріалу і мають зазвичай пристрої ЧПК.

6.2.3. Робототехнічні комплекси для нанесення покриттів

Важливим елементом машинобудівних підприємств є обладнання для фарбування. Промислові роботи знайшли застосування на операціях нанесення покриттів різного призначення: лакофарбових, захисних, зміцнюючих, герметизуючих і т.п. Ці операції фізично важкі для людини і шкідливі для її здоров'я. У більшості випадків нанесення покриттів пов'язане із застосуванням вибухо- та пожежонебезпечних речовин. Тому ПР, які використовуються на таких операціях, повинні мати вибухобезпечне виконання.

Існують методи фарбування об'єкта шляхом його занурення у ванну, струменевого поливання, електроосадження або розпилення.

При фарбуванні зануренням у ванну використовують маніпулятор з цикловим керуванням. Для струменевого поливання застосовують маніпулятор з позиційним керуванням. Метод фарбування електроосадженням полягає в тому, що фарборозпилювач і поверхню, що фарбується, з'єднують з різними полюсами джерела постійної напруги. За рахунок провідності дрібнодисперсного потоку фарби між фарборозпилювачем і поверхнею, що фарбується, досягається краща якість нанесення покриття. У цій технології маніпулятор з контурним керуванням переміщає фарборозпилювач перед поверхнею, що фарбується. Цей спосіб забезпечує високу якість покриття та економічність. Однак висока напруга (десятки кіловольт) створює додаткову вибухонебезпечність, що обмежує сферу застосування фарбувальних ПР з такого типу розпилювачами.

Для роботизованого фарбування найчастіше застосовують метод розпилення. Фарбувальний робот переміщує фарборозпилювач з великою

швидкістю на оптимальній відстані від поверхні деталі. При зміні форми деталі змінюється програма фарбування.

За рахунок стабілізації відстані до поверхні деталі, що фарбується, узгодження швидкості переміщення розпилювача з інтенсивністю і площею розпилення підвищується якість фарбування, а витрата фарбувальних матеріалів знижується на 20-30%. Фарбування можна вести у процесі руху деталі. Компанії Adept та Triton постачають роботи-маніпулятори для фарбування за ціною від 2500 доларів. Зовнішній вигляд ПР для фарбування наведено на рис. 6.40. Дані машини оснащені спеціальними пульверизаторами для фарбування деталей і мають підвищену гнучкість для захисту шлангів при подачі фарби в робочу зону від механічних впливів, скручування і зламу, забруднення та запилення.

У деяких випадках для фарбування методом розпилювання використовують ПР з гнучкими конструкціями маніпуляторів (рис. 6.41).



Рисунок 6.40 – Промисловий робот для фарбування



Рисунок 6.41 – Фарбування салону фургона роботом Spine

Для керування фарбувальними роботами застосовуються безперервні (контурні) системи керування з програмуванням методом навчання. Порівняно зі зварювальними ПР вимоги до точності ПР для нанесення покриттів суттєво нижчі, а до швидкодії, навпаки, вищі. У ПР для фарбування може застосовуватися адаптивне керування з використанням системи технічного зору для визначення контурів чергового виробу, на яке має бути нанесене

покриття. За отриманими даними автоматично вибирається та коригується керуюча програма для ПР.

Особливо ефективна роботизація двостороннього багатоетапного фарбування у процесі руху великих виробів складної форми. Ця технологія застосовується в роботизованих лініях фарбування кузовів автомобілів. Приклади компонування роботизованих комплексів фарбування показані на рис. 6.42.

Програма та колір фарбування змінюються залежно від замовлення, заданого датчиком розпізнавання номера кузова.

Роботи наносять ґрунтовку, осушують поверхню струменем гарячого повітря, наносять лакофарбове покриття, виявляють та усувають дефекти фарбування. При фарбуванні за допомогою робота не потрібні вентиляція, витяжка та підтримання нормальної температури.



а



б

Рисунок 6.42 – Роботизовані фарбувальні комплекси



Рисунок 6.43 – Фарбування бампера



Рисунок 6.44 – ПР FANUC P-50iA

Деякі елементи кузовів автомобілів фарбуються на окремих ділянках. Як приклад на рис. 6.43 наведена ділянка фарбування бамперів.

На рис. 6.44 показано застосування ПР для нанесення захисного покриття. Широке застосування отримали засоби робототехніки для *нанесення гальванічних покриттів*. Процес нанесення гальванічних покриттів являє собою послідовне витримування підвісок з деталями у ваннах нікелювання, хромування, цинкування, кадмірування, мідіння, анодування та ін.

Основна маніпуляційна операція в цьому випадку є занурення в підігрівані ванни з розчинами деталей або корзин з деталями та переміщення їх від однієї ванни до іншої.

Промислові роботи здійснюють установку, зняття та перенесення підвісок з деталями з ванни у ванну (рис. 6.45).

Застосування роботів для виконання цих операцій дозволить звільнити робітників від шкідливої для здоров'я праці у вологій атмосфері, насиченій випарами розчинів.

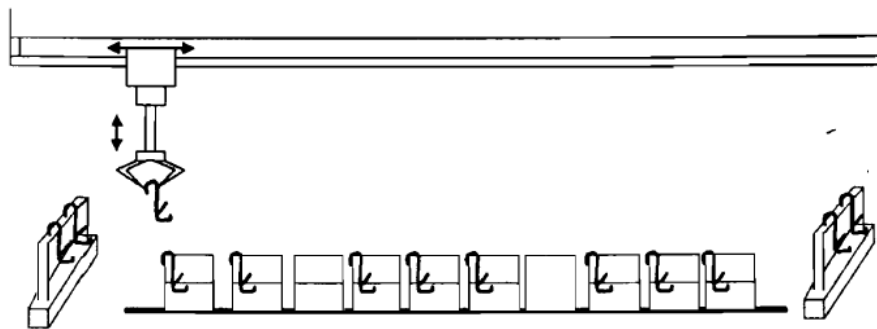


Рисунок 6.45 – Використання роботів для обслуговування лінії гальванопокриття

Для цього застосовуються:

- універсальні роботи, встановлені стаціонарно або на рухомому рейковому візку, що переміщується вздовж ванн;
- підвісні транспортні роботи на монорейці;
- спеціалізовані роботи у складі автоматичних ліній гальванопокриття.

Промисловий робот за програмою захоплює підвіску з деталями з гнізд магазину, переміщує та опускає її у ванни із розчинами. У системі керування роботом програмуються послідовність обслуговування ванн та час витримки підвіски у кожній ванні. Швидкість опускання підвіски у

ванну обмежується необхідністю пом'якшення удару обмежувача спуску по краю ванни і стійкістю підвіски деталей, а швидкість підйому – часом стікання залишків розчину з деталей.

Універсальні роботи застосовуються для окремих деталей, гальванічна обробка яких потребує поворотів та переміщень. Зазвичай використовують підвісні роботи, що забезпечують компактність лінії, вільний доступ до ванн, зниження металомісткості. В автоматичних лініях над ваннами підвішують монорейку, якою рухаються роботи або ж на бортах ванни встановлюють рейковий шлях, яким рухається робот.

Вантажопідйомність робота складає до 5000 Н; кількість позицій обслуговування – до 18; число ступенів рухливості – 2; похибка позиціонування – 50 мм; швидкість переміщення – 15 м/хв, швидкість підйому чи опускання – 30 м/хв. Як пристрій захоплення зазвичай використовують гак і застосовують циклове керування роботом.

Герметики та клеї можуть наноситися методом розпилення або екструзії (рис. 6.46), причому вибір зазвичай визначається характеристиками матеріалу. Нанесення розпиленням часто використовується в ситуаціях, коли косметична обробка не має першорядного значення або розташування деталей означає, що стики будуть розташовані менш точно. Екструзія вимагає, щоб деталі були повторюваними, а положення стику або поверхні, на яку наноситься матеріал, було позиціоновано у всіх трьох вимірах.

Подібно до операцій дугового зварювання та фарбування повторюваність траєкторії дозуючого робота забезпечує основну перевагу роботизації, гарантуючи, що герметик або клей правильно розміщені на деталі. Системи можуть включати обладнання для керування дозуванням подачі матеріалу.

Близькі до процесу нанесення покриттів піскоструминна та дробоструминна обробка поверхонь. На цих операціях також знайшли застосування



Рисунок 6.46 – Склеювання фар

ПР із безперервним керуванням. З інших основних технологічних операцій, де використовуються ПР із безперервним керуванням, слід назвати шліфування, різання, зачистку (наприклад, виливків), обрубкування облою.

6.2.4. Робототехнічні комплекси для обробки різанням

Різнання матеріалів. Програмування складних траєкторій різання матеріалів робочим органом робота не вимагає спостереження оператора за переміщенням ріжучого органу. Це дозволяє застосовувати нетрадиційні способи різання тонкими струменями високого тиску, лазерним променем та потоком плазми. Застосування таких технологій дозволяє підвищити швидкість, точність та якість різання, скоротити витрати сировини та зношення інструменту.

Приклади застосування ПР для різання металу показано на рис. 6.47. Для високошвидкісного різання листів по програмованій траєкторії застосовують маніпулятори з контурним керуванням в прямокутній системі координат. Робочий орган переміщується над горизонтальною поверхнею, на яку укладають лист, що розрізається. Вантажопідйомність робота не більше 50 кг, похибка позиціонування при швидкості переміщення робочого органу 0,1 м/с становить 0,2 мм.

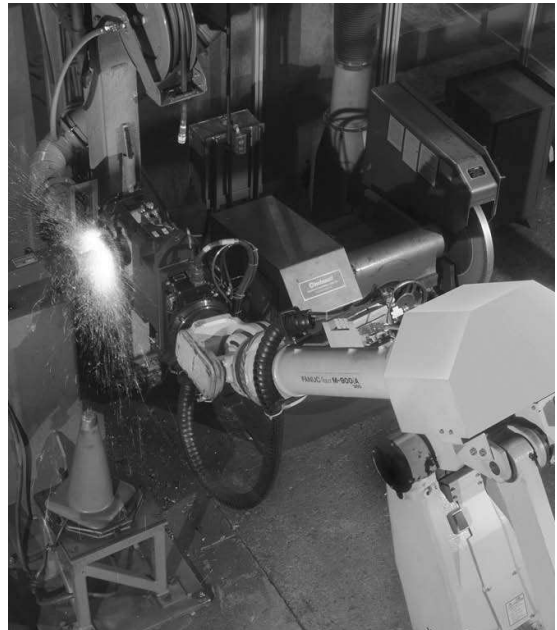
Робочий орган робота для різання тонким струменем високого тиску оснащують сапфіровою насадкою з діаметром вихідного отвору до 0,4 мм. Через неї подають воду під тиском до 400 МПа. Струмінь високого тиску набуває нових властивостей, що дозволяють, наприклад, розрізати пластину алюмінію товщиною до 20 мм зі швидкістю до 3 м/с при ширині розрізу 1,5 мм. Швидкість водяного струменя досягає тисячі метрів за секунду. Відстань від насадки до матеріалу складає 10–100 мм. Для підвищення ріжучих здібностей струменя до нього додають дрібнодисперсний порошок кварцу або граніту. Це дозволяє різати листову сталь завтовшки до 7,5 мм зі швидкістю 0,4 м/хв або титан завтовшки 1,75 мм зі швидкістю 0,3 м/хв.

Подача води під високим тиском може здійснюватися тільки металевими трубами. Це може знизити можливості орієнтації робота і зазвичай вирішується за допомогою фіксованих труб до плеча робота, а потім спіралі труби, намотаної навколо руки, щоб забезпечити подачу до сопла, встановленого на зап'ясті робота. Ця спіраль може намотуватися і розкручуватися у міру того, як зап'ястя робота орієнтується, і, отже, не перешкоджає

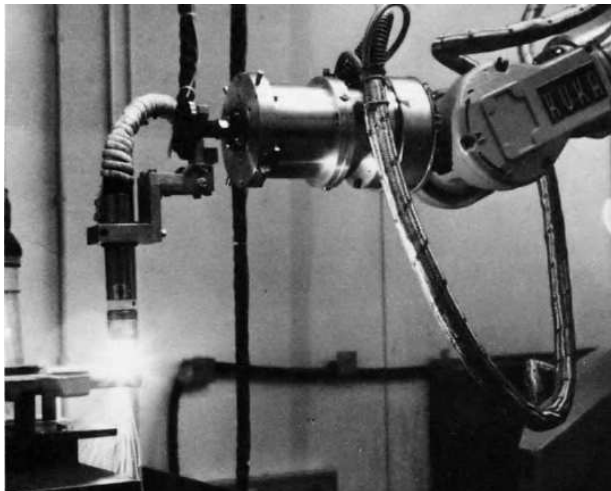
руху зап'ястя. Робот повинен бути належним чином захищений від водяного туману, що зазвичай досягається за допомогою захисту IP67.



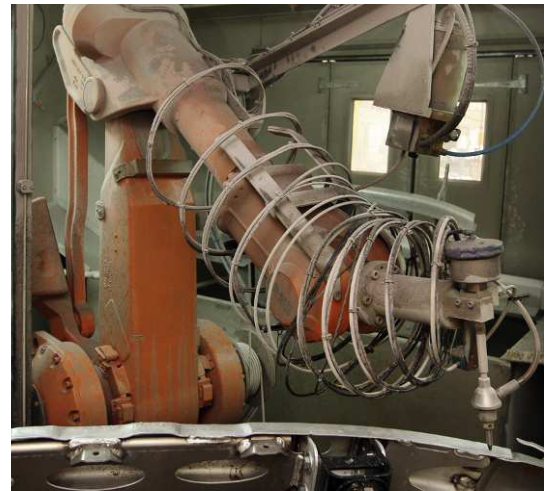
a



б



в



г

Рисунок 6.47 – Використання ПР для різання металу

Лазерне різання засноване на локальному нагріванні матеріалу променем лазера діаметром до 0,13 мм із щільністю енергії до 109 Вт/см. Лазер потужністю 600 Вт встановлений стаціонарно, а його промінь підводиться до робочого органу маніпулятора через світловод. При потужності лазера 1200 Вт можливе різання сталевих листів завтовшки до 12 мм із шириною

розрізу 0,2 мм, дерева – до 30 мм, синтетичних матеріалів – до 40 мм, титану – до 2,4 мм. При різанні дрібних деталей робот переміщує затискач з деталлю перед стаціонарним лазером.

Плазмове різання відрізняється від традиційного газового різання наявністю високотемпературної дуги з іонізованого газу, під дією якої плавиться метал. Іонізований газ являє собою струмінь розпеченого газу, до якого підводять електричну напругу величиною 170-190 В. Сила струму, що протікає через струмінь, становить 150-220 А. Робочий орган робота являє собою пальник, що обдувається захисним газом. Плазмове різання застосовують для металевих листів завтовшки до 65 мм. Для різання дрібних заготовок робот переміщає деталь перед стаціонарним різальним органом зі швидкістю до 1,5 м/хв.

Абразивне зачищення поверхонь. Застосування роботів для видалення виступів виливків, зняття задирок, очищення поверхні, шліфування та полірування підвищує продуктивність праці в 1,5–2,5 рази. В якості робочого органу застосовують стрічкові пилки, шліфувальні круги, фрези, відбійні молотки або піскоструминні насадки.

Зони зачистки задають одним із способів:

- обхід усієї поверхні за заданою програмою;
- автоматичне стеження за відхиленням від правильних розмірів деталі;
- фарбування людиною площадок, які потребують різних режимів зачистки з наступним наведенням робочого органу на площадки заданого кольору;
- порівняння деталі з еталоном, заданим системою технічного зору.

Наведення робочого органу на ділянки заготовки для зачистки залежить від розміру заготовки. При малих розмірах заготовки робот переміщає її відносно робочого органу зачистки. Для великих заготовок робочий орган зачистки переміщують відносно нерухомої заготовки. Для підвищення продуктивності при зачистці середніх заготовок здійснюють одночасні переміщення заготовки та робочого органу зачистки.

Операції абразивної зачистки виливків та шліфування виробів також відносяться до категорії операцій, які важко автоматизуються за допомогою промислових роботів, що функціонують за жорсткою програмою. Причини труднощів полягають у значних відхиленнях форм виливків та структури задирок від зразка до зразка, великих похибках їх позиціонування на робочій позиції, великому зносі абразивного інструменту в процесі об-

робки та у багатьох інших факторах (рис. 6.48), що не дозволяють забезпечити задану якість обробки, керуючи роботом за програмою.

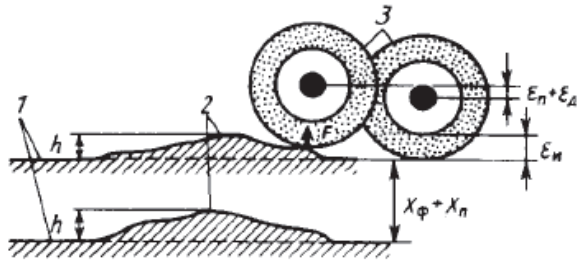


Рисунок 6.48 – Особливості автоматизації очищення виливків

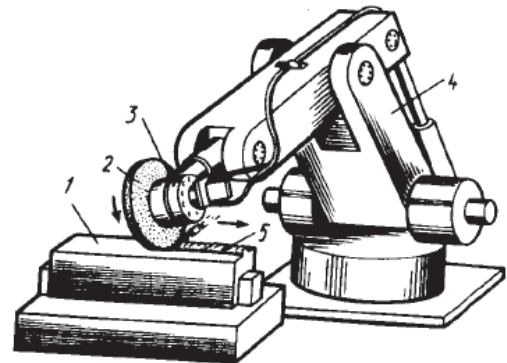


Рисунок 6.49 – Роботизоване зачищення виливків

Застосування методів корекції положення інструменту, що використовують інформацію про сили різання, дозволяє роботу не тільки адаптуватися до несприятливого впливу факторів, що вказані вище, але й забезпечує можливість регулювання глибини різання та швидкості подачі інструменту. Сутність активної корекції полягає в організації комбінованого керування траєкторією руху інструменту та величинами сил різання (рис. 6.49). Для цього попередньо навченому роботу встановлюють у робочу позицію черговий виливок, що підлягає обробці, і переводять його в режим відтворення програми, виконуючи яку він, вимірюючи сили та моменти сил, що діють між деталлю та інструментом, коригує свою швидкість переміщення таким чином, щоб значення сил різання не виходили за межі допуску.

Якщо виконання останньої умови призводить до значного відхилення реальної форми оброблюваної поверхні від бажаної, що може мати місце при шліфуванні облою великих розмірів, то робот може прийняти рішення про повторний прохід інструментом вже обробленої ділянки деталі.

На рис. 6.48 прийнято позначення: 1 – виливок; 2 – облой; 3 – абразивний інструмент, а на рис. 6.49: 1 – виливок; 2 – абразивний інструмент; 3 – силомоментний датчик; 4 – робот; 5 – облой.

Робот для абразивної зачистки повинен мати підвищену жорсткість ланок маніпулятора, датчик сили контакту робочого органу та заготовки, протипиловий захист. Щоб уникнути руйнування робочого органу, резо-

нансна частота маніпулятора повинна вибиратися за межами смуги частот вібрації, що виникає в процесі зачистки.

Для таких предметів, як дверна фурнітура, лопатки малих авіаційних двигунів, робот часто переміщує деталі між однією або декількома полірувальними машинами (рис. 6.50). Зазвичай є кілька машин, кожна з яких несе стрічки з різними ступенями абразиву або полірувальні круги. Робот орієнтує деталі на ці стрічки (круги) по черзі, починаючи з грубої, і виконує послідовність рухів на кожному ступені абразивності стрічки (круга), поки деталь не буде остаточно оброблена полірувальною машиною.



Рисунок 6.50 – Роботизоване полірування



Рисунок 6.51 – Роботизоване свердлення

Для великих деталей можуть використовуватися додаткові сервоприводні позиціонери, щоб забезпечити орієнтацію деталі перед роботом. При цьому робот переміщує інструмент за заданою траєкторією часто з увімкненим керуванням силою шліфування для досягнення необхідної обробки. Якщо потрібно кілька інструментів, їх зміна також може бути автоматизована. Приклад роботизованого свердлення наведений на рис. 6.51.

6.3. Промислові роботи на допоміжних операціях

6.3.1. Організація взаємодії обладнання РТК

Одним із актуальних завдань робототехніки є заміна робітників, зайнятих на допоміжних операціях. Незважаючи на те, що вартість автоматизації

допоміжних операцій у три-чотири рази нижча, ніж основних, ступінь їхньої автоматизації майже вдвічі нижчий. Тому в даний час близько половини робітників, зайнятих у промисловості, працюють на найменш престижних ручних операціях, що не вимагають високої кваліфікації.

Роботизовані технологічні комплекси, в яких ПР використовуються на допоміжних операціях з обслуговування основного технологічного обладнання, і самі такі ПР класифікуються за видом основного технологічного процесу або основного технологічного обладнання, що його реалізує. Основними за значенням типами таких РТК є РТК механообробки, холодного штампування, пресування пластмас, гарячого штампування і кування, лиття під тиском і внутрішньо-цехового транспорту.

У першу чергу ПР знайшли застосування в масовому виробництві при обслуговуванні високопродуктивного обладнання, наприклад, в автоматичних лініях. Цикл роботи автоматичних ліній можна порівняти з циклом роботи робота. Тому питання щодо коефіцієнта використання такого дорогого обладнання, як ПР, не виникає.

У серійному та дрібносерійному металообробному виробництві робот у складі автоматизованої ділянки повинен обслуговувати один або кілька верстатів. Тривалість виконання операцій на верстатах значно перевищує тривалості циклів руху робота.

У цьому випадку гостро стоїть питання підвищення фондovіддачі та коефіцієнта використання обладнання. Складність вирішення цієї проблеми викликана безліччю значимих чинників компоновально-організаційного характеру. Наприклад, ділянки можуть бути організовані за принципом виконання однакових операцій (тільки токарних, фрезерних, свердлильних і т.д.), або комплексної обробки деталей певного виду (тіл обертання, корпусних деталей тощо).

Усередині ділянки обладнання може працювати як за жорстким циклом (заготовка послідовно проходить верстати на ділянці і на останньому верстаті перетворюється на готову деталь), так і незалежним (кожен верстат має свій магазин заготовок). Можливий комбінований спосіб, коли кілька верстатів на ділянці працюють за жорстким циклом, а решта – за незалежним. Можна поставити робот для обслуговування одного верстата, розмістити групу верстатів навколо одного робота чи забезпечити переміщення робота вздовж фронту верстатів.

У всіх зазначених випадках виникають специфічні завдання узгодження циклів верстатів між собою та з циклом робота. Розглянемо часову діаграму періоду обслуговування роботом токарного верстата ($T_{об}$), подану на рис. 6.52. Початок цього періоду віднесено на момент зупинки шпинделя, коли формується сигнал, що дозволяє розпочати обслуговування верстата. Закінчення періоду збігається з моментом виходу робота з робочої зони верстата і вироблення сигналу на включення шпинделя та початок робочого циклу верстата.

Як видно з діаграми, час простою верстата в основному визначається часом маніпулювання робота з обробленою деталлю та заготовкою. Традиційний шлях зниження цього часу полягає у форсуванні швидкостей руху робота та скороченні його переміщення при обслуговуванні, використанні човникової схеми роботи обладнання, оснащенні верстата спеціальними пристроями вивантаження (або завантаження), що працюють паралельно з роботом тощо.

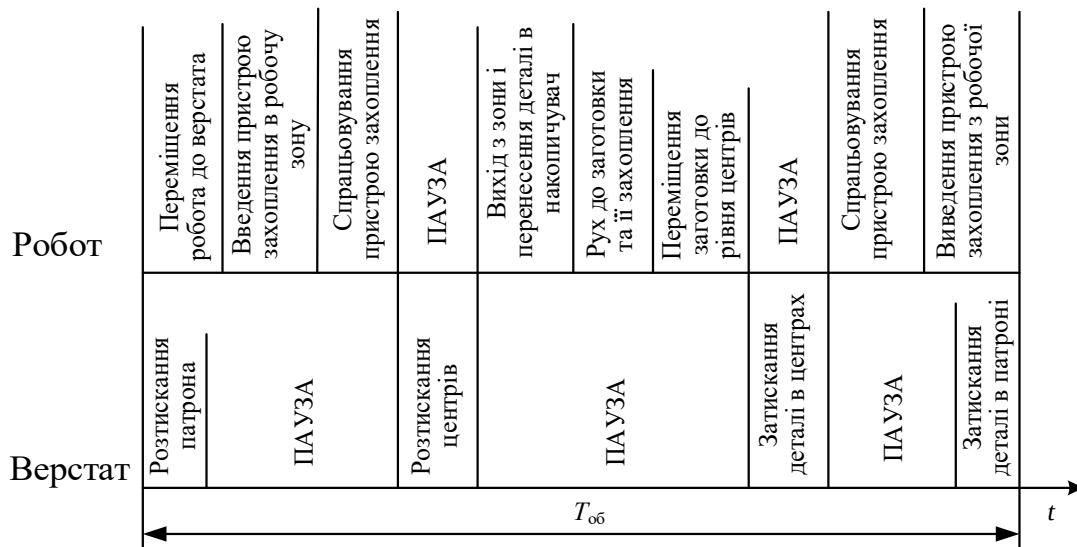


Рисунок 6.52 – Часова діаграма періоду обслуговування роботом токарного верстата

Інший шлях заснований на специфічних особливостях застосування промислових роботів. У робочій зоні верстата організують так званий пункт перевалки. При появі команди на обслуговування робот підносить до верстата заготовку, залишає її на перевалочному пункті, бере оброблену деталь, змінює її на заготовку та встановлює заготовку на верстат. Перене-

сення деталі з робочої зони в накопичувач може бути поєднано з робочим циклом верстата.

Можливе також поєднання часів маніпулювання робота із заготовкою та обробленою деталлю. Для цієї мети робот має два пристрої захоплення, або дві руки.

При організації ділянки виникає завдання визначення максимальної кількості верстатів n , які може обслуговувати один ПР. Для приблизної оцінки цієї величини можна скористатися виразом:

$$0 < \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_{об i}} \right) + 1 - n < 1, \quad (6.1)$$

де T_i і $T_{об i}$ – відповідно час робочого циклу i -го верстата при оптимальному режимі обробки та час обслуговування роботом цього верстата.

Однак наведена нерівність не враховує співвідношення часу T_i і $T_{об i}$ з простоями, і може виявитися, що в момент виклику робота на обслуговування він може бути зайнятий. Як приклад на рис. 6.53 та рис. 6.54 наведено діаграми роботи ділянки з двома верстатами та одним роботом. Заштриховані прямокутники, що відповідають $T_{пр}$ і $T_{пс i}$ – часу простою робота та i -го верстата (на діаграмі $T_{об 1} = T_{об 2} = T_{об}$). Видно, що простоюють як устаткування, так і сам робот. Характерно, що при тих самих значеннях $\sum_{i=1}^n T_i$ і $\sum_{i=1}^n T_{об i}$ час $T_{пр}$ і $\sum_{i=1}^n T_{пс i}$ за фіксований проміжок часу (у разі 6 хв. 15 с) значно різняться.

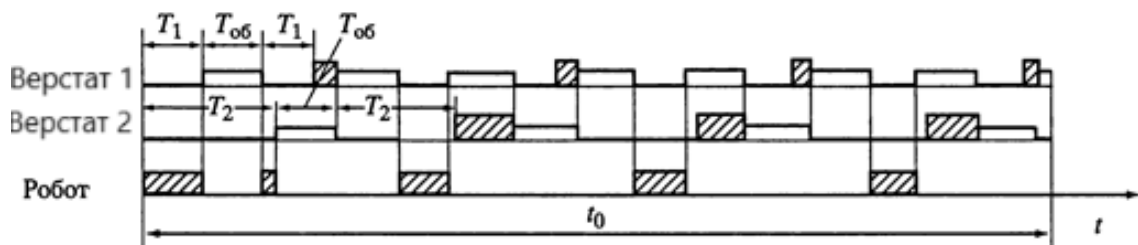


Рисунок 6.53 – Діаграма роботи ділянки з двома верстатами та одним роботом
 $T_1 = 20$ с, $T_2 = 50$ с, $T_{об} = 25$ с

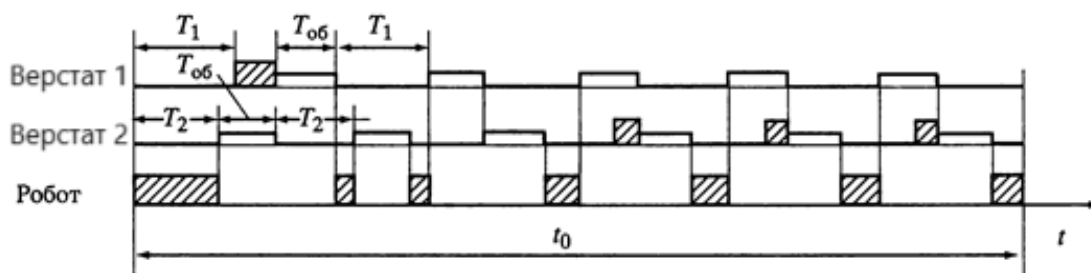


Рисунок 6.54 – Діаграма роботи ділянки з двома верстатами та одним роботом
 $T_1 = 40$ с, $T_2 = 30$ с, $T_{об} = 25$ с

У першому випадку (рис. 6.53) $T_{пс\ 1} = 25$ с, $T_{пс\ 2} = 60$ с, $T_{пр} = 85$ с. У другому випадку (рис. 6.54) $T_{пс\ 1} = 16$ с, $T_{пс\ 2} = 24$ с, $T_{пр} = 117$ с.

Очевидно, що оптимальний режим роботи ділянки досягається, якщо обладнання та робот завантажені повністю, тобто:

$$\sum_{i=1}^n T_{пс\ i} + T_{пр} = 0. \quad (6.2)$$

Умова (6.2) виконується лише в тому випадку, коли часові параметри роботи верстатів та роботів пов'язані співвідношенням

$$\frac{\sum_{i=1}^n T_{об\ i}}{(T_{об\ i} + T_i)} = 1.$$

Тільки за умови виконання (6.2) коефіцієнти використання верстатів і робота рівні одиниці. Дійсно,

$$\begin{aligned} K_{с\ i} &= 1 - \frac{T_{пс\ i}}{t_0}; \\ K_p &= 1 - \frac{T_{пр}}{t_0}, \end{aligned} \quad (6.3)$$

де t_0 – деякий фіксований проміжок часу. Умову (6.2) можна подати у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n K_{с\ i} + K_p = n + 1. \quad (6.4)$$

Однак у загальному випадку доданки у виразі (6.2) не дорівнюють нулю. Тому доцільно використовувати вираз (6.2) як критерій оптимальності роботи ділянки та порівнювати різні варіанти організації роботи ділянки за значенням наступного параметра:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n T_{\text{пс } i}}{t_0 n} + \frac{T_{\text{пр}}}{t_0}. \quad (6.5)$$

Час $T_{\text{пс } i}$ і $T_{\text{пр}}$ визначається безліччю чинників: кількістю устаткування, циклом роботи кожної одиниці устаткування, часом $T_{\text{об } i}$, що залежить від відстані між верстатами (тобто компонування ділянки) тощо. Аналітичну залежність $T_{\text{пс } i}$ і $T_{\text{пр}}$ від цих факторів у загальному випадку не можна отримати. Значення F та його складових можна визначити чисельним методом при імітаційному моделюванні процесу роботи ділянки на ЕОМ.

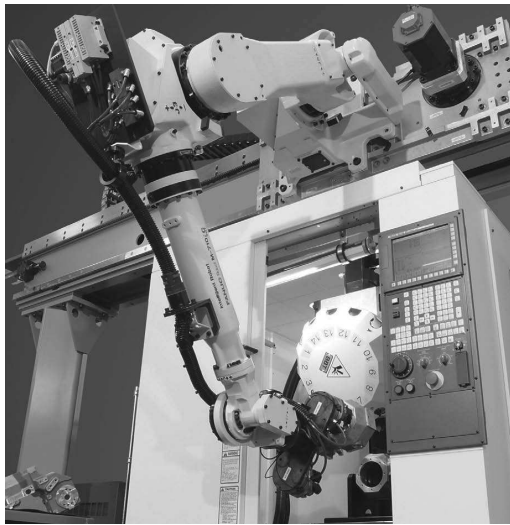
Розрахувавши за програмою різні варіанти організації ділянок для виробництва однієї й тієї продукції, можна за отриманим значенням F вибрати найкращий варіант. Значення $K_{\text{с } i}$ характеризують рівень завантаження кожного верстата. Очевидно, що слід досягати більшого значення $K_{\text{с } i}$ на тому верстаті, вартість якого вища. Зіставляючи коефіцієнти $K_{\text{р}}$ і $K_{\text{с}}$ з нормами використання устаткування, можна робити висновки про ефективність роботи ділянки, а порівнюючи $K_{\text{р}}$ і $K_{\text{с}}$ між собою, намічати заходи для більш рівномірного завантаження основного устаткування й робота. Якщо $K_{\text{с}} \ll K_{\text{р}}$, то слід зменшити кількість верстатів ділянки.

6.3.2. Роботизовані технологічні комплекси механообробки

Одна з важливих галузей застосування ПР на допоміжних операціях – обслуговування металорізальних верстатів (рис.6.55). Тут ПР виконують найбільш типову допоміжну операцію завантаження-розвантаження устаткування, тобто установки оброблюваної деталі та зняття її після закінчення обробки. Аналогічні операції здійснюють ПР при обслуговуванні інших видів технологічного устаткування. Є ще деякі більш специфічні допоміжні операції, виконувані ПР. До них відносяться мащення пресформ, занурення деталей у рідину, міжопераційне транспортування, штабелювання тощо.

Основним технологічним обладнанням у РТК механообробки є верстати: токарні, свердлильні, фрезерні, зубообробні, шліфувальні та ін. Металорізальні верстати у складі РТК повинні забезпечувати автоматичний режим роботи, автоматизацію затиску, базування та звільнення деталі, видалення стружки, контроль параметрів деталі, зміну інструменту, взаємозв'язок сис-

тем керування верстатом та роботом, можливість доступу маніпулятора ПР до зони встановлення деталі на верстаті.



а



б

Рисунок 6.55 – ПР для завантаження і вивантаження та обслуговування верстатів

Для забезпечення автоматичного режиму роботи РТК до його складу повинні входити пристрої для видалення стружки, мастила та охолодження робочих органів та інструменту, очищення поверхонь базування, засоби контролю якості обробки виробів, магазини з поштучною видачею орієнтованих деталей, пристрої огорожі. Основним типом верстатів для РТК є верстати з ЧПК або верстати-напіваавтомати з часом обробки виробу понад 3 хвилини.

При обслуговуванні верстата робот здійснює встановлення орієнтованих заготовок у робочу зону верстата, зняття деталей з верстата та їх укладання в магазин, видачу команд керування обладнанням, транспортування деталей між верстатами.

Найбільш ефективно застосування роботизованих комплексів для механообробки втулок, дисків, зубчастих коліс, фланців, валів та важелів, що мають однорідні поверхні для базування та захоплення.

В однопозиційних роботизованих комплексах автономний або вбудований робот обслуговує один верстат. У багатопозиційних або групових комплексах робот здійснює завантаження та розвантаження кількох верстатів, а також здійснює транспортування деталей між верстатами, їх переорієнтацію та керування верстатами.

Є чотири типових варіанти компоновання роботизованих комплексів механообробки (рис. 6.56).

1. Підвісні роботи 1 з прямокутною системою координат завантажують зверху або збоку верстатів 2 розташовані в одну лінію (рис. 6.56, *а*). Для подачі деталей у робочу зону робітників використовують крокові конвеєри 3. Робот також встановлює деталь на позицію контролю 4. Такі РТК застосовують для автоматичних ліній у масовому чи багатосерійному виробництві.

2. Підвісний робот 1 обслуговує групу верстатів 2, переміщаючись вздовж лінії верстатів (рис. 6.56, *б*). Заготовки подаються конвеєром 3. Напівфабрикати укладаються роботом у проміжні накопичувачі 5. Робот здійснює зміну інструменту та оснащення, видалення стружки, а також контроль розмірів деталей у позиції 4.

3. Підвісний робот 1 рухається між верстатами 2, завантажуючи їх маятниковим рухом маніпулятора (рис. 6.56, *в*). Крокові конвеєри 3 для подачі заготовок та видачі виробів встановлені перпендикулярно лінії руху робота.

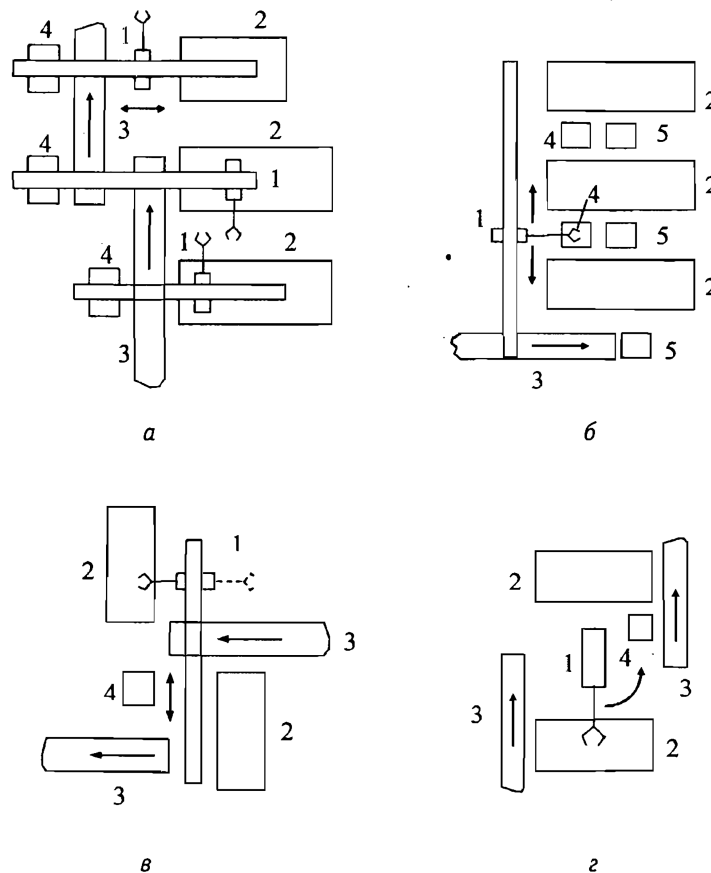


Рисунок 6.56 – Структури РТК для обслуговування металорізальних верстатів

4. Підлоговий робот 1 з циліндричною системою координат обслуговує по колу верстата 2 та конвеєри 3 для подачі заготовок та видачі виробів (рис. 6.56, з).

Точність обробки може бути підвищена за рахунок введення додаткових ступенів рухливості в конструкцію верстата. Спеціально розроблений комплекс із токарного або фрезерного верстата з ЧПК, автоматизованим завантаженням-розвантаженням, зміною інструменту, контролем розмірів деталі називається обробним центром. Завантаження-розвантаження виробів та зміна інструменту здійснюються вбудованим роботом.

На рис. 6.57 показано найпростіший роботизований технологічний осередок «верстат – ПР». Деталь, яку треба обробити, ПР бере з лівого магазину М із поштучною видачею орієнтованих деталей. Тут вони розташовані в осередках або поштучно подаються до ПР.

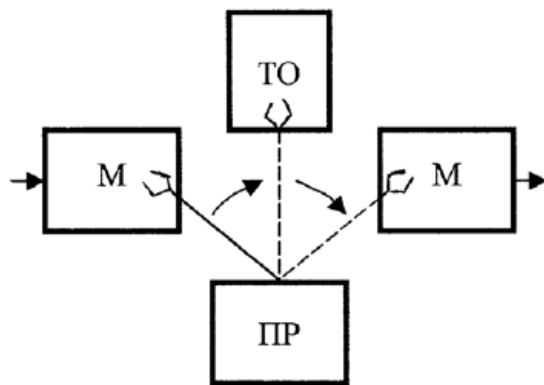


Рисунок 6.57 – Компонування роботизованого технологічного осередка «верстат – ПР»

Після закінчення обробки ПР знімає деталь з верстата (ТО – основне технологічне обладнання) і кладе її в правий магазин М. З таких осередків збирають ділянки. При послідовному з'єднанні подібних осередків у лінію всі наступні осередки отримують деталі з магазину на виході попереднього осередку. Однак для лівого магазину першого осередку необхідно попереднє орієнтоване розміщення в ньому деталей, одержуваних у загальному випадку в неорієнтованому вигляді, тобто навалом Н.

Принципово можливі такі варіанти вирішення цієї задачі:

- застосування спеціального пристрою орієнтації ПО, наприклад у вигляді вібробункера (рис. 6.58);
- використання для завантаження магазину адаптивного ПР (АПР);
- застосування адаптивного ПР для обслуговування верстата першого осередку (рис. 6.59).

Основний недолік застосування адаптивних ПР – їх значна вартість.

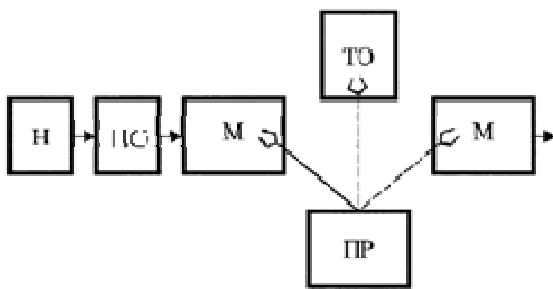


Рисунок 6.58 – Компонування РТК з орієнтуючим пристроєм

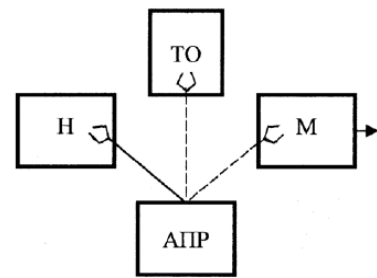


Рисунок 6.59 – Компонування РТК з адаптивним ПР

Тому в тих випадках, коли можуть бути використані спеціальні орієнтуючі пристрої, вони є кращими. На жаль, область їх застосування, як і взагалі всіх спеціальних пристроїв, обмежена багатосерійним та серійним виробництвом з досить рідкою змінюваністю оброблюваних деталей. Для послаблення цього обмеження створюються орієнтуючі пристрої, що перебудовуються (зі змінними частинами і т.п.).

Варіант використання адаптивних ПР безпосередньо для обслуговування верстатів в основному застосовується лише при досить тривалому циклі обробки деталей на верстаті, тривалість якого дозволяє здійснювати обслуговування одним ПР кількох верстатів. В цьому випадку вартість ПР відповідно розподіляється на кілька технологічних осередків.

Для обслуговування верстатів у найпростіших випадках застосовують ПР із цикловим керуванням, а найбільш загальним варіантом є використання дискретних позиційних ПР. Ці ПР перепрограмуються загалом щотижня, тобто рідше, ніж верстати з ЧПК, що обслуговуються ними. Середня тривалість циклу роботи таких ПР – хвилини.

Внаслідок значного часу механообробки у таких комплексах широке застосування отримало обслуговування одним ПР кількох верстатів. Варіанти відповідних компоновок РТК зі стаціонарними та мобільними ПР були наведені вище. Приклад схеми РТК, де чотири верстати обслуговуються двома роботами, наведено на рис. 6.60. На рисунку позначено такі вузли РТК: 1 – верстат; 2 – робот; 3 – пристрій керування робота; 4 – пристрій керування верстата; 5 – приймальний стіл.

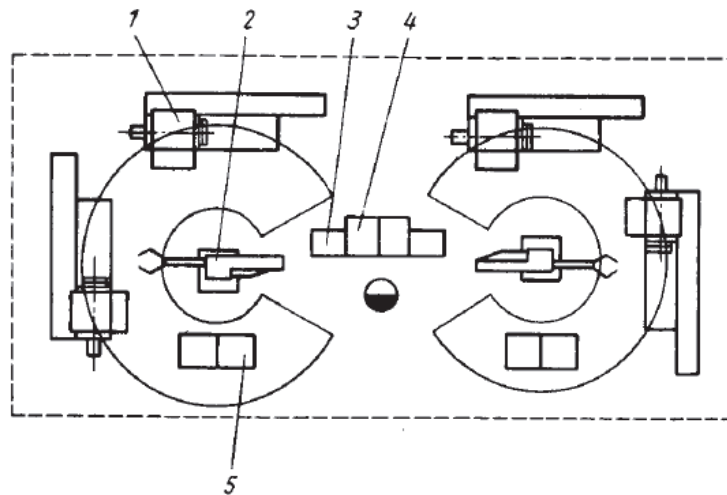


Рисунок 6.60 – РТК, що містить чотири верстата і два робота

На рис. 6.61 показаний цех механообробки, в якому автоматизовано всі операції, включаючи транспортно-складські. Система керування включає ЕОМ, пристрій безпроводного зв'язку та пульт з мовним командним пристроєм. На рисунку прийнято такі позначення: 1, 2, 11, 12, 13 – токарні верстати; 3 – склад; 4 – завантажувальний пристрій; 5 – розвантажувальний пристрій; 6 – підлогові транспортні ПР; 7 – проміжні склади; 8 – протяжний верстат; 9 – шліфувальні верстати; 10 – фрезерні верстати; 14 – ПР; 15 – магазини; 16 – пульт диспетчера.

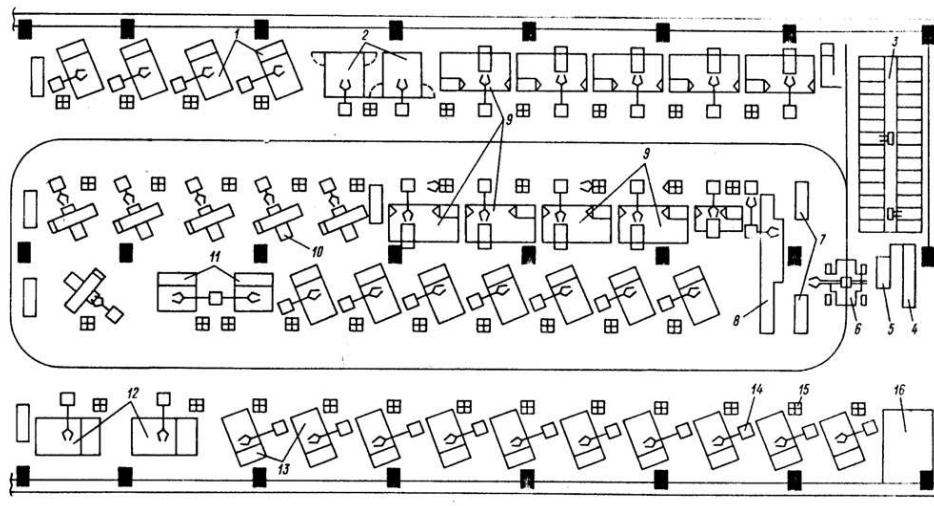


Рисунок 6.61 – Роботизований цех механообробки

6.3.3. Роботизовані технологічні комплекси холодного штампування

Однією з областей широкого застосування ПР є холодне листове штампування. Це пояснюється великим (до 30%) травматизмом обслуговуючих преси робітників, монотонністю цієї роботи, а також простотою застосування ПР на цих операціях.

Технологія холодного листового штампування зводиться до перенесення плоскої заготовки з накопичувача заготовок на матрицю преса, опускання пуансона на матрицю, підйому пуансона, перенесення виробу штампування в накопичувач деталей. Холодне листове штампування, що відрізняється багаторазовим повторенням одноманітних рухів «взяти-покласти-зняти», стало першим об'єктом промислового застосування роботів.

Промислові роботи використовуються тут, як і в механообробці, для виконання операцій завантаження-розвантаження: завантаження преса вихідним листовим матеріалом (подача листа в штамп) та розвантаження штамп (зняття штампування та укладання його в магазин).

Особливістю застосування ПР в холодному штампуванні в порівнянні з механообробкою є необхідність забезпечити значно більшу швидкодію, оскільки цикл роботи преса вимірюється лише кількома секундами. Використовувані тут ПР мають просте циклове керування, як правило, циліндричну систему координат та три ступені рухливості. Пристрій захоплення найчастіше виконується у вигляді вакуумних присосок. Для забезпечення необхідної швидкості обслуговування преса часто застосовують ПР із двома маніпуляторами – один для завантаження, а інший для розвантаження штамп. Іноді розвантаження здійснюють за допомогою штовхача, що встановлюється на станині пресу, або здуванням штампування стисненим повітрям.

Варіанти компоновання РТК холодного штампування (рис. 6.62) розрізняються розміщенням робота 1 щодо преса 2, завантажувального пристрою (вібробункер 3, магазин 4, подавач стрічки 5, накопичувач 7), числом маніпуляторів, способом знімання виробу (пневмосдув 6 або маніпулятор).

Основні вимоги до роботів: швидкодія, легкість переналадження, зміна пристроїв захоплення, точність позиціонування об'єкта. Зазвичай застосовуються пневматичні роботи з цикловою системою керування та вантажопідйомністю 0,8–10 кг.

На рис. 6.63 показаний приклад РТК холодного штампування з адаптивним ПР на вході для взяття заготовок з навалу.

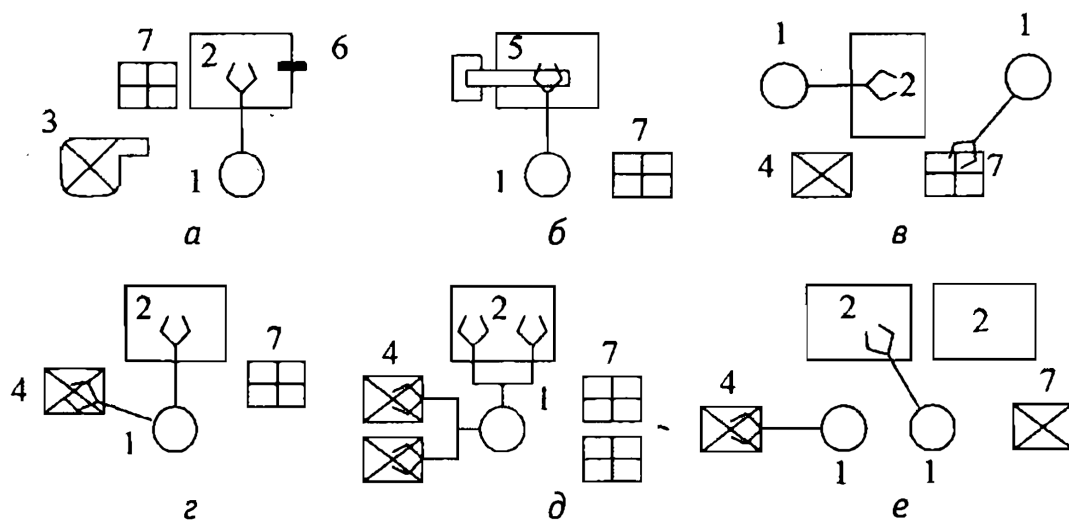


Рисунок 6.62 – Схеми використання роботів при холодному листовому штампуванні пресом

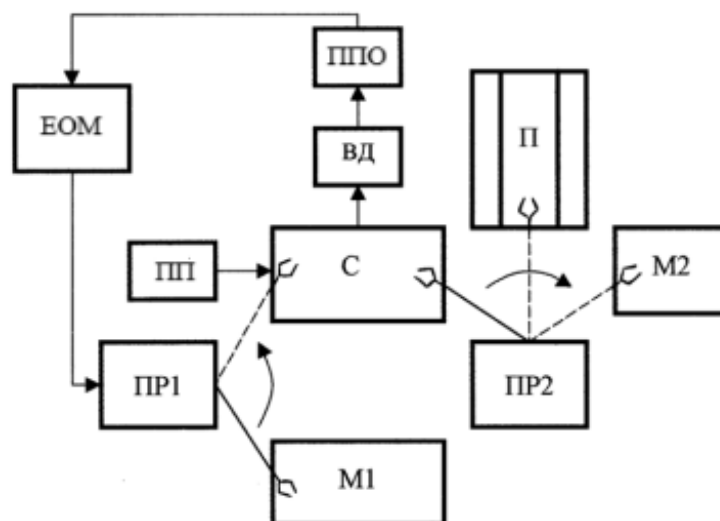


Рисунок 6.63 – РТК холодного штампування з адаптивним ПР на вході

Адаптивний позиційний робот ПР1 з технічним зором бере неорієнтовані листові заготовки з магазину М1, де вони розташовані навалом, і довільно кладе на стіл С. Над столом розташовані відеодатчик ВД (телевізійна камера) і пристрій підсвічування ПП. Інформація від відеодатчика надходить на пристрій попередньої обробки відеоінформації ППО, де здійснюється виділення контуру заготовки. Далі в мініЕОМ обчислюються ко-

ординати і орієнтація заготовки і формуються коригувальні сигнали в пристрій керування ПР1, за якими останній переміщає заготовку на столі в розрахункову позицію для можливості подальшого взяття її цикловим промисловим роботом ПР2. Цикловий ПР встановлює цю заготовку в прес П, витягує з нього відштамповану деталь і кладе в магазин М2 готових деталей.

На рис. 6.64 показаний приклад планування цеху холодного листового штампування радіозаводу. АСУ цеху здійснює планування виробництва, включаючи визначення потреб у матеріалах, заготовках, планування та управління для окремих ділянок, складів та транспортних систем, вирішення інших завдань цеху, у тому числі обмін інформацією з АСУ заводу.

На рисунку прийняті такі позначення: ДР – ділянка розкрою; ДВК – ділянка вирубки та касетування; РТД-1–РТД-6 – роботизовані технологічні ділянки; СТ – система транспортування технологічного оснащення, заготовок та готової продукції; СТВ – система транспортування та сортування відходів; ТССД – транспортно-складська система ділянки; СГП-1–СГП-2 – склади готової продукції; СМ – склад матеріалів; СО – склад оснащення.

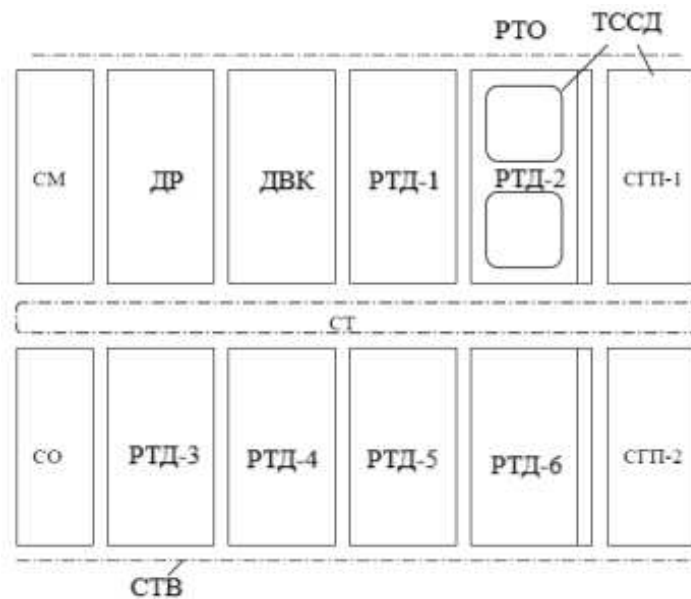


Рисунок 6.64 – Планування роботизованого цеху холодного листового штампування

Номенклатура деталей, що виготовляються, включає такі типові для радіотехнічних виробів деталі, як підстави, плати, кронштейни, скоби і т.п. Вихідний листовий матеріал на ділянці розкрою перетворюється на заго-

товки у вигляді смуг. Лист кроїться за картами, розрахованими на ЕОМ. Заготовки здаються до складу заготовок. Звідси за командою АСУ цеху вони надходять через транспортну систему на лінію касетування, і далі заповнені касети повертаються до складу заготовок. Ділянки штампування забезпечуються заготовками та оснащенням через відповідну транспортну систему, яка забезпечує також транспортування готових деталей на склад готової продукції. Транспортні системи побудовані на основі підлогових транспортно-завантажувальних роботів.

Загальне управління цехом здійснює оператор за допомогою пульта, на який надходить інформація про кількість заготовок на касетах, заповнення магазинів готовою продукцією, положення транспортно-завантажувальних роботів, можливі несправності в роботі обладнання.

Як приклад використання роботів на операціях холодного листового штампування на рис. 6.65 наведена роботизована ділянка листозгинальних пресів. У цих випадках робот забезпечує орієнтацію деталі між операціями, щоб гарантувати досягнення правильних змін форми. РТК холодного листового штампування забезпечують підвищення продуктивності, повторюваності деталей та зниження проблем зі здоров'ям та безпекою.



Рисунок 6.65 – Обслуговування листозгинального преса

6.3.4. Роботизовані технологічні комплекси гарячого об'ємного штампування

Основним стимулом для автоматизації ковальсько-штампувального виробництва поряд із підвищенням продуктивності є важкі умови роботи у

ковальських цехах. Однак на відміну, наприклад, від холодного штампування завдання комплексної автоматизації такого виробництва становить значні труднощі, пов'язані зі складністю роботи коваля. Тому поряд з ПР тут широко застосовують маніпулятори з ручним та автоматизованим керуванням: кувальні телеоператори, керовані кваліфікованими ковалями.

Технологічний процес полягає у перенесенні розпеченої заготовки під молот та її повороті перед ударами молотом. Для цього потрібні однаковий час перенесення заготовки та можливість багатоопераційної обробки заготовки зі зміною її форми в робочій зоні. Робот повинен утримувати заготовку при ударах кувального молота.

З позиції роботизації технологія характеризується необхідністю підтримки нагріву заготовки в процесі обробки, що вимагає мінімального часу перенесення заготовки із зони нагріву під прес, виконанням багатоперехідної обробки на одній машині, зміною форми виробу ударами при обробці. Роботи повинні забезпечувати високу швидкість переміщень, контроль температури та фіксацію заготовки, мати вантажопідйомність 10–50 кг. Зовнішній вигляд робота для операцій гарячого об'ємного штампування наведено на рис. 6.66.

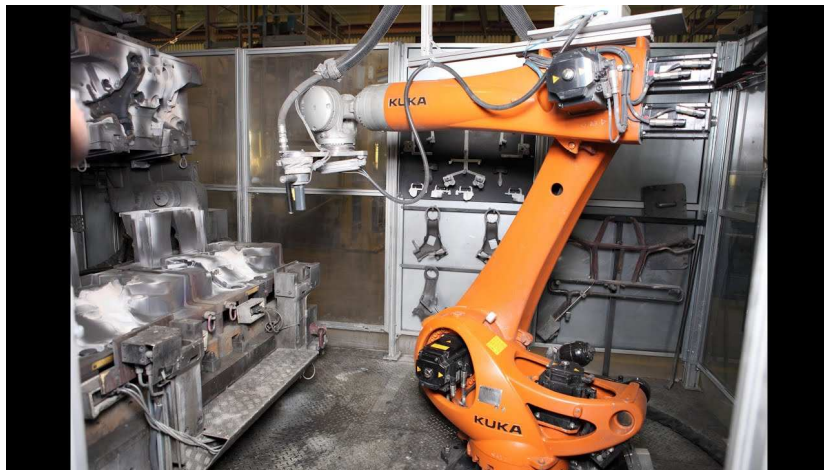


Рисунок 6.66 – Робот для гарячого штампування

Крім власне штампування автоматизації підлягають операції завантаження заготовок в нагрівальну піч, вилучення нагрітої заготовки з пічі, переміщення її до кувального преса, маніпулювання заготовкою при куванні, укладання готової поковки в магазин. Крім того, є ще ряд допоміжних опе-

рацій, таких як автоматична видача заготовок з нагрівального пристрою, виштовхування поковок з преса, змащування та обдубування штампу (здув окалини), обрізання облою з деталі та укладання його в тару.

Схема найпростішого РТК гарячого об'ємного штампування показана на рис. 6.67. Схема містить індукційний нагрівач 1 з автоматичним завантажувачем заготовок з тари 10. З нагрівача 1 по транспортеру 2 заготовка передається роботу 8. Його маніпулятор 7 відіграє роль коваль, що встановлює нагріту заготовку в штамп 6 кривошипного гарячостампувального преса 5. Готова деталь по лотку 4 відправляється в тару 3. Тут відсутній обрізний прес, оскільки організовано штампування без облою. Дії всіх пристроїв РТК автоматично узгоджуються системою керування 9 за єдиною програмою.

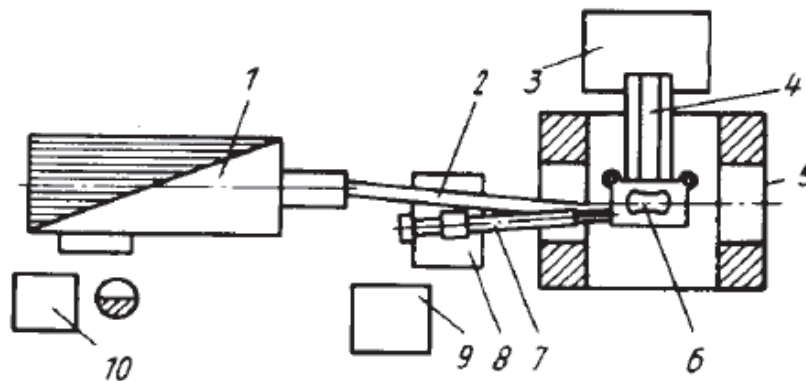


Рисунок 6.67 – РТК гарячого штампування

На рис. 6.68 показана схема РТК гарячого об'ємного штампування, що включає два ПР: ПР1 – робот-коваль та ПР2 – робот-обрубник. Робот-коваль ПР1 обслуговує індукційну піч ПІ для нагрівання заготовок та прес гарячого штампування ПШ, а робот-обрубник ПР2 – обрубувальний прес для обрубки облою з поковки. Поковки до обрубувального пресу та облою в магазин транспортуються за допомогою транспортерів Т. М1, М2, М3 – магазини для заготовок, поковок та облою.

Сьогодні понад 80% номенклатури поковок масою 25–500 кг виготовляються методом вільного кування. РТК вільного кування включає зазвичай гідравлічний прес і маніпулятор з ручним керуванням, за допомогою якого оператор-коваль здійснює маніпулювання заготовками під час кування.

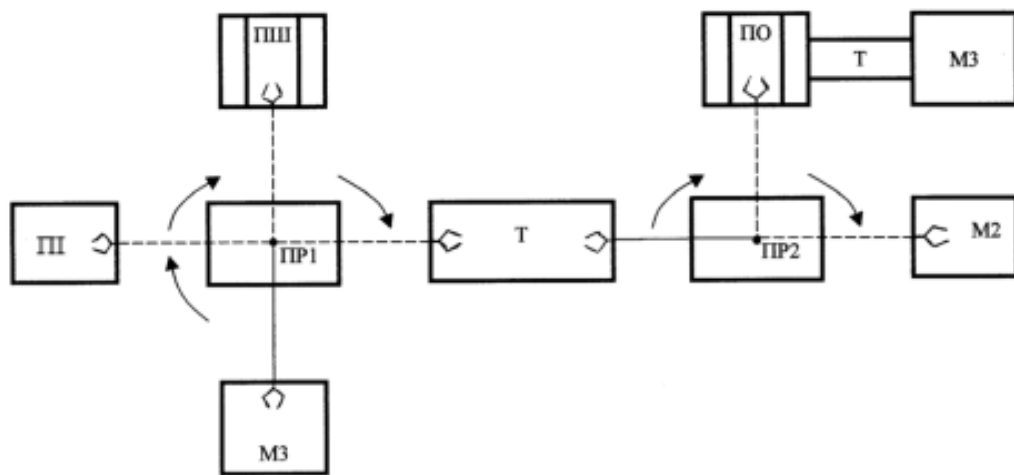


Рисунок 6.68 – РТК гарячого об'ємного штампування

Система керування комплексом, що виконана на мікроЕОМ, передбачає такі режими:

- напіваавтоматичне керування пресом за допомогою пульта керування;
- напіваавтоматичне керування маніпулятором у копіювальному режимі за допомогою задавальної рукоятки на пульті керування;
- автоматичне керування за заздалегідь введеною в пам'ять пристрою керування програмою (з можливістю оперативного втручання оператора шляхом переривання виконання програми з переходом на іншу програму або інший режим керування);
- програмування маніпулятора методом навчання за допомогою керуючої рукоятки.

При виконанні вільного кування необхідні контроль звільнення штампу від деталі, фіксація деталі при ударі штампу, видалення відходів штампування, блокування преса при захопленні роботом більше двох заготовок.

6.3.5. Роботизовані технологічні комплекси в ливарному виробництві

Ливарне виробництво – галузь машинобудування, що займається виготовленням фасонних деталей та заготовок шляхом заливання розплавленого металу у форму (виливницю), порожнина якої має конфігурацію необхідної деталі. Для отримання внутрішньої порожнечі у майбутньому виробі у виливниці встановлюються стрижні.

Ливарне виробництво включає наступне:

- виготовлення моделі виробу;

- виготовлення виливниці та стрижнів, складання виливниці;
- плавлення та рафінування металу;
- розливання металу у виливницю;
- охолодження виливка;
- звільнення металевого виливка з виливниці та від стрижня;
- видалення зайвого металу з отриманого виливка.

У процесі лиття, при охолодженні метал у формі твердне і виходить виливок – готова деталь або заготовка, яка при необхідності (підвищення точності розмірів і зниження шорсткості поверхні) піддається наступній механічній обробці. У зв'язку з цим перед ливарним виробництвом стоїть завдання отримання виливків, розміри та форма яких максимально наближена до розмірів та форми готової деталі. У машинах та промисловому устаткуванні від 50% до 95% всіх деталей виготовляють способом лиття у форми.

Розрізняють різноманітні способи ливарного виробництва:

- лиття у піщані форми;
- лиття під тиском з використанням металевих виливниць;
- кокільне лиття з використанням чавунних або сталевих виливниць;
- лиття за моделями, що виплавляються (для кожного виливка виготовляється воскова модель, що покривається вогнетривким матеріалом, – вона стає виливницею). Для отримання алюмінієвих виливків використовуються разові шаблони зі спіненого полістиролу в піщано-глинистій суміші (технологія з полістиролом, що «видаляється»).

Лиття в піщані (піщано-глинисті) форми – один із найпоширеніших методів отримання литих заготовок у багатьох галузях промисловості – верстатобудування, автомобільна галузь та багато іншого. Цей спосіб широко застосовують при одиничному, серійному і масовому виробництві для отримання виливків різної складності масою від декількох грамів до сотень тон з чавунів, сталей і сплавів кольорових металів.

Складання форм є відповідальною операцією, що значною мірою визначає геометричну точність розмірів виливків, трудомісткість обробування та очищення внаслідок можливості утворення заток. Складання форм виконують у такій послідовності: підготовка напівформ і стрижнів до складання, проставлення стрижнів і контроль їх положення у формі, накриття нижньої напівформи верхньою, встановлення випірних і литникових чаш, скріплення або навантаження напівформ.

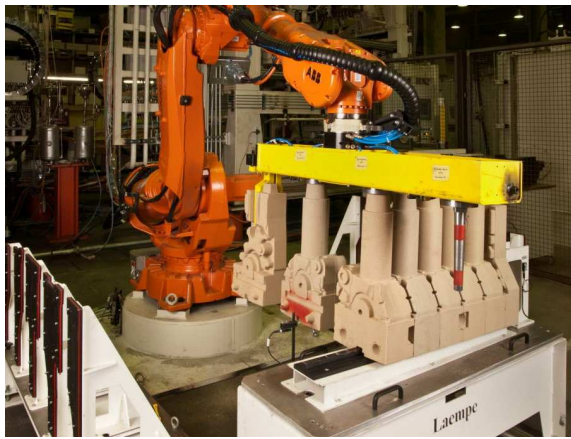


Рисунок 6.69 – Роботизована ділянка для збирання прес-форм

Застосування промислового робота для збирання форм та встановлення піщаних стрижнів показано на рис. 6.69.

Для виготовлення піщаної форми необхідно мати ливарне технологічне оснащення та технологічні пристрої, необхідні для отримання у формі відбитка моделі: моделі виливки (або шаблони для виготовлення форми), елементи литникової системи, один або кілька стрижневих ящиків та інші пристрої.

Лиття в піщані форми полягає в тому, що спочатку утрамбовують наповнювач, в якому знаходиться деталь. Потім деталь витягають з прес-форми і в порожнечу, що утворилася, заливають рідкий метал. Після його застигання виливок витягають із прес-форми.

Перше застосування промислових роботів було для розвантаження машин для лиття під тиском. Принцип процесу лиття під тиском ґрунтується на примусовому заповненні робочої порожнини металевої прес-форми розплавом металом, як правило, цинком або алюмінієм.

Виливок формується під впливом тиску прес-поршня, що переміщається в камері пресування, заповненій розплавом. Робочі поверхні прес-форми, що контактують з виливком, не мають вогнетривкого покриття.

Це призводить до необхідності короткочасного заповнення прес-форми розплавом і дії на виливок, що кристалізується, надлишкового тиску, який в сотні разів перевищує гравітаційний. Час циклу процесу лиття під тиском становить щонайменше кілька секунд. Сучасний процес, що реалізується на спеціальних гідравлічних машинах, забезпечує отримання від кількох десятків до декількох тисяч виливків різного призначення за годину. Виливки мають високі механічні властивості, низьку шорсткість поверхні і розміри, відповідні або максимально наближені до розмірів готової деталі. Товщина стінки виливків може бути меншою за 1,0 мм, а маса – від кількох грамів до десятків кілограмів.

Залежно від конструкції камери пресування розрізняють машини з холодною та гарячою камерами пресування.

Кокільне лиття або лиття в постійні форми – це лиття металу, яке здійснюється вільною заливкою коків. Кокіль (від фр. *Coquille* – раковина, шкаралупа) – металева форма з природним чи примусовим охолодженням, що заповнюється роз-плавленим металом під дією гравітаційних сил.

Роботи застосовують для очищення прес-форми струменем стисненого повітря та нанесення на її поверхню мастильного матеріалу з програмованою інтенсивністю. Стабілізація часу нанесення мастила дозволяє підтримувати задане нагрівання прес-форми.

Застосування роботів для автоматизації заливки металу в прес-форму підвищує точність дозування та стабілізує процес заливання. Маніпулятор-заливник здійснює рухи пристрою захоплення з ковшем, що гойдається, від тигля з розплавленим металом до заливального вікна прес-форми і назад.

Роботи, що працюють в циліндричній системі координат, застосовуються для вилучення неохололених, крихких або великогабаритних виливків з прес-форми. Після вилучення виливка роботи можуть подавати його в камеру охолодження. Прес-форма охолоджується водою; коли метал твердне, прес відкривається, і робот витягує виливок і занурює його в ванну-гарт для подальшого охолодження або під прес для обрубки литника – застиглому каналу, яким подавався рідкий метал.

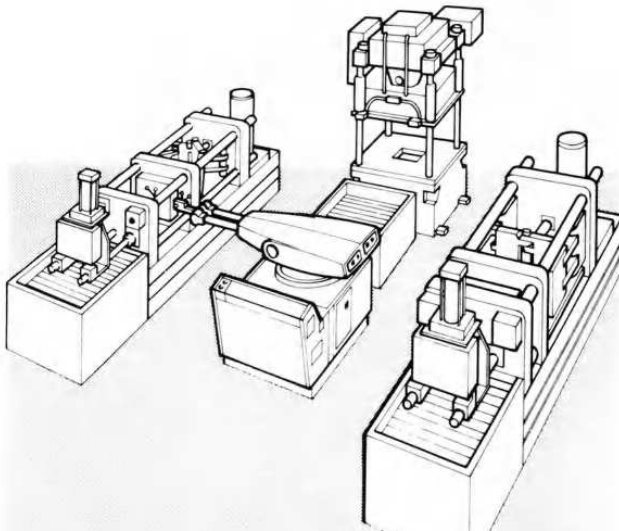


Рисунок 6.70 – Роботизована ділянка для лиття під тиском з одним ПР



Рисунок 6.71 – Роботизована ділянка для лиття під тиском з двома ПР

Можливо багато комбінацій роботів, машин для лиття під тиском і пресів. На рис. 6.70 наведений РТК, в якому робот обслуговує дві машини

для лиття під тиском та обрізний прес. Робот часто захоплює виливок за литник. Одночасно можна виготовляти кілька виливків; у цьому випадку вони з'єднуються з загальним литником іншими литниками.) Коли литники відрізаються обрізним пресом, прес повинен автоматично виштовхувати виливки на конвеєр. Лиття під тиском (рис. 6.71) використовується для широкого діапазону деталей із широким діапазоном розмірів.

На інших ділянках ливарного виробництва роботи виконують операції з шліфування поверхні виливків за допомогою дробоструминного пістолета або абразивного інструменту, перенесення форм і виливків.

При обслуговуванні машин лиття під тиском роботизуються операції:

- заливання певної порції рідкого металу, взятого з пічи;
- змащення та обдування прес-форм;
- вилучення готових виливків;
- при необхідності, передача виливка на операцію обрубкування литників;
- видалення виливка в тару.

Ефективність застосування ПР для обслуговування машин лиття під тиском пов'язана з тим, що при обслуговуванні їх робітниками значні втрати металу через неточність його дозування та розбризкування під час розливання, а також простої обладнання та зниження продуктивності через стомлюваність робітника. При цьому умови праці є не лише важкими, а й шкідливими для здоров'я.

РТК лиття під тиском складається з роздавальної печі, машини лиття під тиском, преса для обрубкування литників, робота-заливника та робота для взяття виливки та охолодження її в баку з водою. Зовнішній вигляд роботизованої ділянки лиття під тиском показано на рис. 6.72.



Рисунок 6.72 – Роботизована ділянка лиття під тиском

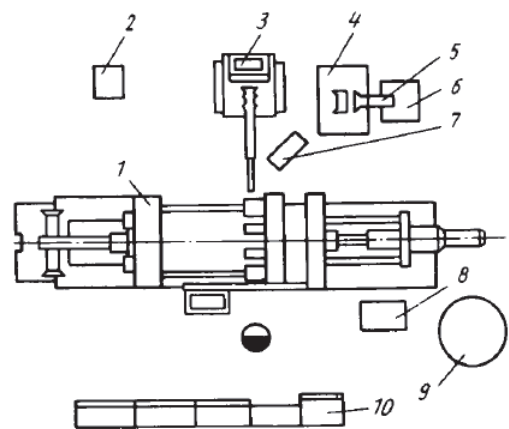
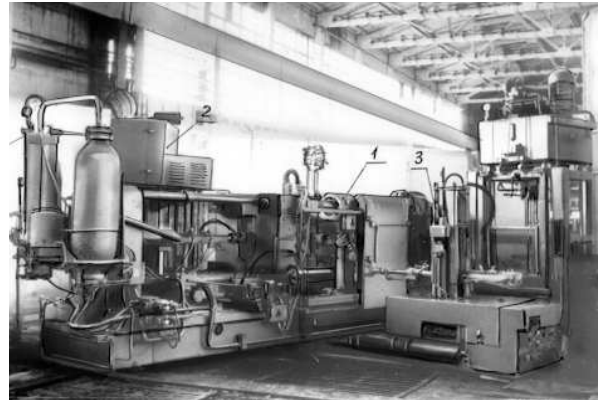
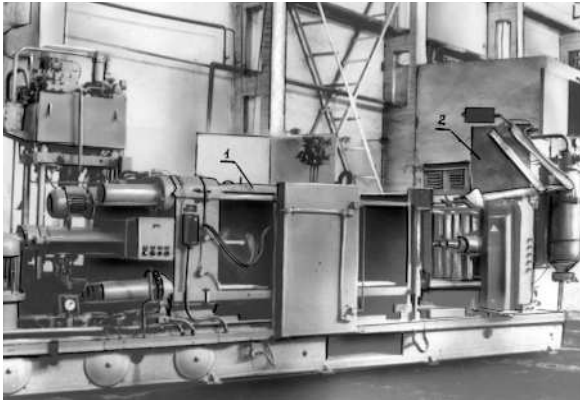


Рисунок 6.73 – РТК з машиною лиття під тиском

Інший приклад компоновання РТК наведений на рис. 6.73. Важливим елементом загальної системи автоматизації є засоби контролю стабільності температури металу, що заливається, тривалості циклу, швидкості і тиску пресування.

Комплекс складається з наступного обладнання: 1 – машина лиття під тиском; 2 – система керування ПР; 3 – робот; 4 – обрубний прес; 5 – скліз; 6 – тара для виливків; 7 – ванна для охолодження; 8 – дозатор; 9 – тигельна роздавальна піч; 10 – шафи керування технологічним процесом.

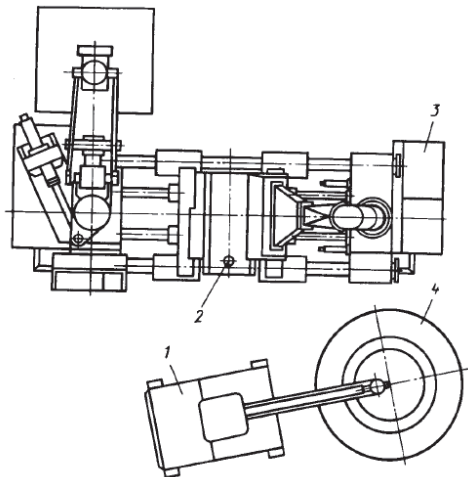
На рис. 6.74 показано компоновання ділянки з машиною для лиття під тиском 1, що обслуговується двома ПР. Робот-заливник 2 занурює свій робочий орган – ківш у розплавлений метал у роздавальній печі.



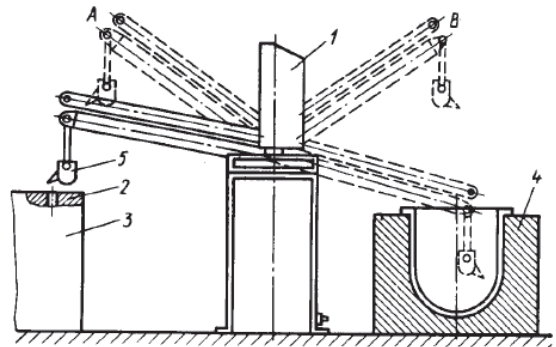
а – вид зі сторони робота-заливника б – вид з боку робота, що знімає виливок
Рисунок 6.74 – Роботизований комплекс лиття під тиском

Глибина занурення ковша визначає масу металу, що ним забирається, і контролюється спеціальними контактними датчиками. Після закінчення певної витримки часу, необхідної для розігріву та заповнення ковша, ківш піднімається, переміщається до приймача металу машини лиття під тиском і нахиляється для зливу металу. Коли метал повністю злитий, здійснюється основна операція пресування. Після розкриття прес-форми виливок виштовхується штовхачем і переноситься роботом для зняття виливків з бак з водою для охолодження. Потім тим же роботом він подається на прес для обрубання литників 4 і скидається до магазину.

Розглянемо схему розміщення обладнання та принцип роботи РТК кокільного лиття (рис. 6.75).



a – розміщення обладнання



б – схема дії робота

Рисунок 6.75 – Роботизований комплекс кокільного лиття

Робот-дозатор 1 переміщає свій маніпулятор з підвіскою 5 то до роздавальної печі 4, то до місця заливки 2 металу в кокільну машину 3. Різні положення маніпулятора позначені літерами *A* і *B*.

Крім обслуговування ливарних машин ПР застосовуються також для укладання виливків на піддони. На рис. 6.76 показано компонування роботизованої ділянки для укладання виливків кольорових металів.

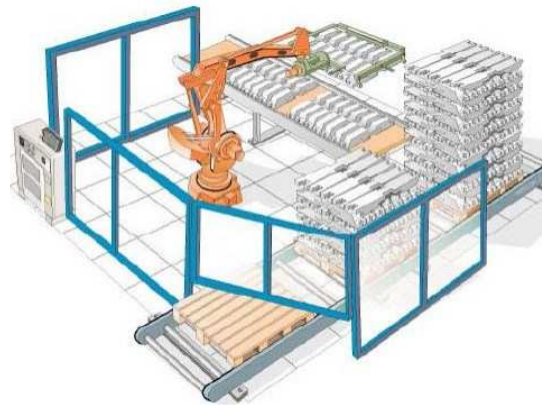


Рисунок 6.76 – Роботизована ділянка укладання виливків

6.3.6. Роботи для палетування і пакування

Палетування – це процес завантаження чи вивантаження матеріалів на піддони. Роботизована система палетування забезпечує більшу гнучкість для обробки більшої кількості продуктів протягом тривалого періоду часу.

З розвитком пристроїв захоплення на багатьох заводах були інтегровані роботизовані робочі осередки палетування. Палетування є основним застосуванням ПР через швидкість роботи та гнучкість, які можуть запропонувати ПР, а також надійність, що забезпечується роботизованою системою. В порівнянні з ручними операціями роботизована система забезпечує переваги, що базуються на економії робочої сили, збільшенні швидкості

роботи, а також поліпшенні здоров'я та безпеки за рахунок усунення підйомних операцій.

У порівнянні з більш спеціалізованими палетоукладальними машинами робот забезпечує більшу гнучкість і, в деяких випадках, особливо для легких упаковок, покращену надійність палетування. Підвищена гнучкість дозволяє палетувати різні упаковки на різні піддони, навіть якщо вони надходять на одну лінію, скорочуючи час, витрачений через зміну піддонів.

Зазвичай для палетування використовується робот з чотирма ступенями рухливості, оскільки не потрібно змінювати орієнтацію упаковки (рис. 6.77).

Вибір робота багато в чому залежить від вантажопідйомності та досяжності, а проєктувальник визначає його частково на основі продукту, який має бути розташований на палеті, та компонування РТК.



Рисунок 6.77 – Палетування відер для фарби

Необхідний час циклу може впливати на конструкцію, якщо необхідно вибрати кілька упаковок або навіть цілі шари для кожного циклу.

Укладання коробок, мішків з цементом або цегли на піддон вилкового навантажувача стабільним і компактным способом вимагає, щоб робот поміщав кожен предмет в різне місце (рис. 6.78).

Кожну коробку необхідно розмістити в різному положенні, і часто потрібно більше однієї орієнтації, щоб запакувати максимальну кількість коробок на піддоні. Робота, що працює за принципом «точка-точка», можна навчити або запрограмувати всі ці положення окремо. Іноді надається можливість кроку і повтору. Тому що штабель регулярний, необхідно навчити лише першу позицію, а потім програмувати збільшення переміщення і кількість кроків у кожному напрямі.

Практичною проблемою під час палетування є захоплення предметів таким чином, щоб пристрій захоплення не стикався з предметами, які вже знаходяться на місці. Можуть бути розроблені спеціальні захвати з тонкими лезоподібними губками; також замість того, щоб опускати кожен предмет прямо вниз, його можна піднести легким бічним рухом; інший спосіб – захопити предмет за його верхню поверхню за допомогою присоски.

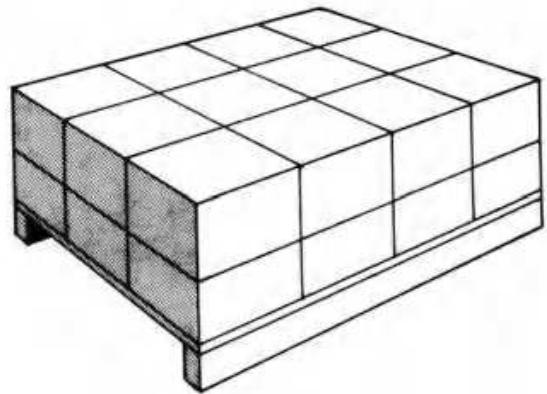


Рисунок 6.78 – Розташування коробок на палеті



Рисунок 6.79 – Грейферний пристрій захоплення



Рисунок 6.80 – РТК палетування головок циліндрів

На рис. 6.80 наведено палетування головок циліндрів за допомогою робота KUKA IR 160/60. ПР має систему технічного зору, яка визначає тип, положення та орієнтацію кожної головки циліндра. Вони випускаються двох розмірів і розміщуються на двох окремих піддонах відповідно до розміру.

Пакування та комплектування. Переваги застосування роботів для пакування та комплектування часто полягають у пропускній спроможності; економії праці, особливо в багатозмінних операціях; та послідовності, що веде до покращення якості. Для визначення розташування продукції, що підля-

гає збору, часто потрібні системи технічного зору, які також можуть забезпечити контроль якості. Якщо потрібна дуже висока швидкість, а продукти легкі, зазвичай використовують дельта-роботи (рис. 6.81), такі як Flex-Picker.

Вони спеціально розроблені для цього використання, а конструкція та розташування осей забезпечують рух, необхідний більшості задач комплектування та пакування. У деяких випадках, особливо для вторинної упаковки, під час яких продукція міститься в тару або картонні коробки, ефективнішими можуть бути універсальні шестиосьові шарнірні роботи, оскільки вони забезпечують додаткові можливості орієнтації та мають найкращу конфігурацію для проникнення в коробки (рис.6.82).



Рисунок 6.81 – Приклад роботизованого пакування



Рисунок 6.82 – Приклад роботизованого пакування в тару

Для пакувальних ПР важливим елементом є базова конструкція захоплювача. Пакувальні ПР досить поширені на харчових заводах, де гігієна має вирішальне значення, і роботи повинні відповідати певним стандартам.

6.4. Особливості застосування засобів робототехніки в немашинобудівних і в непромислових галузях

6.4.1. Особливості застосування засобів робототехніки в немашинобудівних галузях промисловості

Машинобудування стало першим і основним споживачем засобів робототехніки, оскільки роботи власно є продуктами машинобудівного виробництва. На першому етапі в машинобудуванні було вирішено завдання обслуговування роботами технологічного обладнання. Потім стали створювати гнучкі виробничі системи для дрібносерійного виробництва та застосовувати технологічні роботи для різання, зварювання, фарбування та складання.

Крім машинобудування та приладобудування засоби робототехніки знаходять все більш широке застосування у вугільній та гірничодобувній промисловості, чорній та кольоровій металургії, будівництві, легкій та харчовій промисловості, на транспорті, у сільському господарстві.

Робототехніка в немашинобудівних та непромислових галузях розвивається на базі досвіду, накопиченого в машинобудуванні, і в тій же послідовності:

- вивчення потреб та визначення технічних вимог до робіт;
- створення та відпрацювання типових роботизованих технологічних осередків, створення на їх основі великих базових комплексів;
- тиражування останніх у межах галузей.

Застосування засобів робототехніки в немашинобудівних галузях здійснюється насамперед шляхом використання досвіду машинобудівних галузей щодо застосування робіт на аналогічних операціях – для обслуговування основного технологічного обладнання, на вантажно-розвантажувальних роботах, при виконанні таких основних операцій, як нанесення покриттів, зварювання, складально-монтажні роботи та т.п.

Аналіз процесів з позиції роботизації показав, що роботи з машинобудування можуть використовуватися лише для 20% технологічних процесів. Інші процеси вимагають створення галузевих засобів робототехніки. Це пояснюється переміщеннями робочих місць у просторі та спеціальними вимогами до технологічних процесів. Досвід створення та застосування засобів робототехніки в немашинобудівних галузях поки невеликий. Загальна кількість використовуваних тут робіт і маніпуляторів не перевищує 10%

їхнього загального парку. Аналіз основних немашинобудівних галузей показує, що тільки за рахунок використання роботів загальнопромислового застосування ця величина може бути збільшена приблизно вдвічі.

Однак для основної частини виробництв у цих галузях потрібні роботи спеціальних типів. У табл. 6.3 наведено приклади використання засобів робототехніки у немашинобудівних галузях.

Аналіз технічних вимог до роботів, що необхідні цим галузям, та умов їх експлуатації показує, що на відміну від машинобудування тут значно менше можливостей до застосування роботів з програмним керуванням, а потрібні, передусім, сенсорні роботи з адаптивним керуванням. Це пояснюється тим, що в немашинобудівних галузях існує значно більша невизначеність і широкий діапазон зміни як параметрів об'єктів маніпулювання, так і зовнішнього середовища в цілому. Тут потрібна велика частка мобільних роботів (у тому числі для пересування на відкритій місцевості), роботів підвищеної вантажопідйомності та для роботи в екстремальних умовах.

Гірнича справа. Більше половини підземних робітників зайнято важкою фізичною працею, частка якої збільшується в міру погіршення умов видобутку. Зростають рівні травматизму та профзахворювань, виплати для компенсації екстремальних умов праці.

Традиційна механізація має обмежене застосування та нездатна зупинити зростання трудомісткості видобутку. Майбутній перехід до видобутку корисних копалин на великій глибині зробить роботу гірників неможливою через нагрівання виробок теплом Землі, зміни властивостей гірських порід, значних втрат часу на доставку людей до місця роботи і назад.

Цілями застосування робототехніки в гірській справі є ведення робіт у небезпечних для людини умовах, виїмка запасів, що важко вилучаються, перехід до видобутку без постійної присутності людей під землею.

При видобутку корисних копалин відкритим способом можуть бути застосовані самохідні маніпулятори з гідроударниками для дроблення великих шматків породи, ковшові навантажувачі з дистанційним керуванням для зачерпування руди та автоматичним рухом між пунктами навантаження та розвантаження, самохідний укладальник кабелю для бурового верстата та екскаватора, робот для доставки вибухових речовин та заряджання свердловин.

Таблиця 6.3 – Приклади застосування засобів робототехніки у машинобудівних галузях промисловості

Операція	Тип засобів робототехніки
Вугільна і гірничодобувна промисловість	
Установка кріплення у забої	Мобільний робот з технічним зором і двома маніпуляторами
Буріння шурфів	Багатоманіпуляторний мобільний робот з навігаційною системою
Відокремлення вугілля від породи	Робот з СТЗ та іншими сенсорами
Навантаження гірської маси Вантажно-розвантажувальні роботи в збагачувальному виробництві	Мобільний робот-навантажувач
Металургія	
Завантаження чушок та металобрухту в піч	Маніпулятори, керовані оператором
Ремонт вогнетривкої кладки печей, домен	Мобільні роботи
Пробивання кірки шлаку та усунення анодного ефекту при електролізі алюмінію	Робот з технічним зором і силовим сенсором
Вилучення штирів в електролізерах та їх перестановка	
Укладання та обв'язування пакетів чушок, їх навантаження та доставка	Маніпулятори, керовані оператором
Будівельна промисловість	
Бетонні, будівельно-монтажні, оздоблювальні роботи	Адаптивні мобільні роботи, оснащені спеціальним інструментом
Облицювальні роботи	Робот для монтажу облицювальної плитки
Монтаж металоконструкцій (будівель, мостів тощо)	Робот-монтажник-висотник
Фарбувальні роботи	Робот-маляр
Лісозаготівельне виробництво	
Валочно-пакувальні роботи на лісосіках	Маніпулятори, керовані оператором
Деревообробне виробництво	
Навантажувальні роботи	Засоби робототехніки, аналогічні застосовуваним у машинобудуванні
Легка та харчова промисловість	
Обслуговування основного технологічного обладнання (прядильні та швейні машини, агрегати, що формують синтетичні нитки, преси гарячої вулканізації, печі для випалу керамічних виробів тощо)	Засоби робототехніки, аналогічні застосовуваним у машинобудуванні та приладобудуванні
Внутрішньо-цехові вантажно-розвантажувальні та транспортні роботи	
Розкрій шкіри та інших матеріалів	
Укладання в тару цукерок, овочів при консервування тощо	
Вантажно-розвантажувальні роботи в холодильниках	
Транспорт	
Навантажувально-розвантажувальні роботи	Засоби робототехніки, аналогічні застосовуваним у машинобудуванні
Регламентне обслуговування залізничних колій	
Крокуючі транспортні машини	

Для проведення підземних виробок пропонується розробити: буровий робот для буріння шурфів за програмованою розміткою забою; навісний маніпулятор для монтажу та демонтажу штанг бурового ставу; навісний маніпулятор для буріння шурфів та встановлення анкерів у привибійній зоні; автоматичний маніпулятор з позиційним керуванням для нанесення набризк-бетонної суміші на стінки виробітку; навісний маніпулятор, що оконтурює заданий профіль виробітку високонапірним тонким струменем води перед виїмкою по перерізу виробітку; робочари для доставки вантажів в низьких виробітках та вивезення гірничої маси.

У Канаді, Великій Британії, Австралії та інших країнах прийнято національні програми зі створення робототехніки для підземних робіт. На великих рудниках Швеції, Канади, ПАР, Чилі застосовують системи керування підземними машинами з поверхні з використанням аудіо-, відео- та іншої цифрової інформації.

Спостерігаючи через бортові телекамери за поведінкою машин, оператори передають команди керування з імітаторів кабін на поверхні (рис. 6.83). Імітаційне моделювання технології у вигляді системи масового обслуговування показало, що при реалізації автоматичного руху вантажно-транспортної машини по виробку один оператор з кабіни 5 може керувати 3-4 машинами (1 – бурильна машина; 2 – вантажно-транспортна машина; 3 – набризк-бетонна машина; 4 – зарядна машина).

До складу таких комплексів повинні входити роботи для встановлення/кріплення опалубки у вибої, роботи-бурильники шурфів, роботи-підрильники, роботи-навантажувачі гірської породи, роботи для проведення виробок. Подібні роботи повинні бути мобільними, забезпечуватися, як правило, розвиненою системою сенсорів, включаючи технічний зір, декількома маніпуляторами і мати вибухобезпечне виконання.

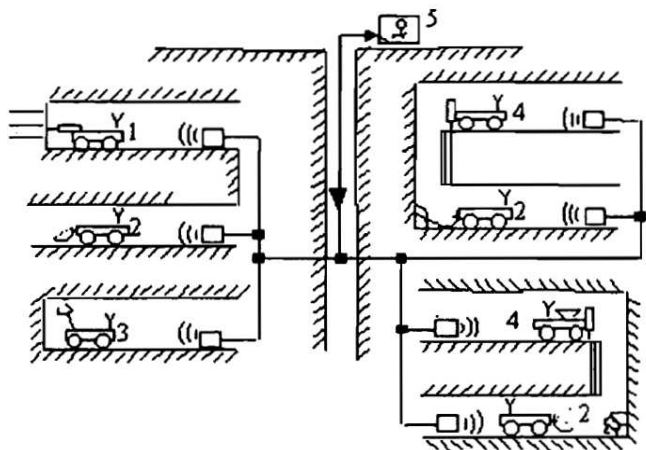


Рисунок 6.83 – Керування підземними машинами з поверхні

Створення РТК для безлюдного вилучення корисних копалин дозволить звільнити сотні тисяч гірників від роботи у важких та небезпечних

підземних умовах, підвищити в 4–10 разів продуктивність праці, суттєво знизити собівартість видобутку та звести до мінімуму втрати руди.

У існуючій технології проведення виробки комбайновим способом (рис. 6.84, *а*) використовують прохідницький комбайн вибіркової дії 1 з перевантажувачем гірничої маси на конвеєр 2. Елементи кріплення доставляють за допомогою монорейкової дороги 3.

У роботизованій технології (рис. 6.84, *б*) на комбайн встановлюють автоматичний маніпулятор 4 для нанесення набризк-бетонного кріплення. Замість конвеєра та монорейкової дороги вводять самохідний вагон 5 для вивезення гірничої маси та доставки матеріалів у забій. Кріплення виконують роботом з двома маніпуляторами, що встановлює анкери (рис. 6.84, *в*). Перший маніпулятор 7 наводить тонкоструминний насадок для буріння шпурів під анкери, а другий маніпулятор 8 захоплює трубчастий анкер, вводять в шпур і розпирає подачею води під тиском. Перед роботою комбайна перший маніпулятор також обробляє контур вибою струменем високого тиску заданої траєкторії на глибину 0,3–0,4 м.

Наступна обробка вибою різальним робочим органом дозволяє зберегти заданий контур виробки і виключити трудомісткі роботи із заповнення порожнин між рамою кріплення та виробкою.

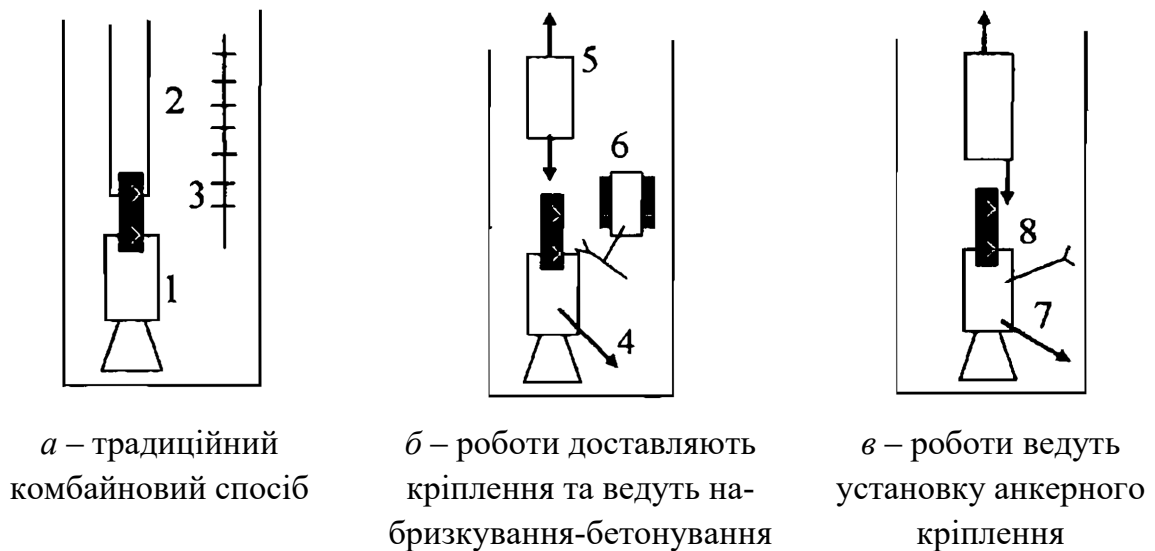
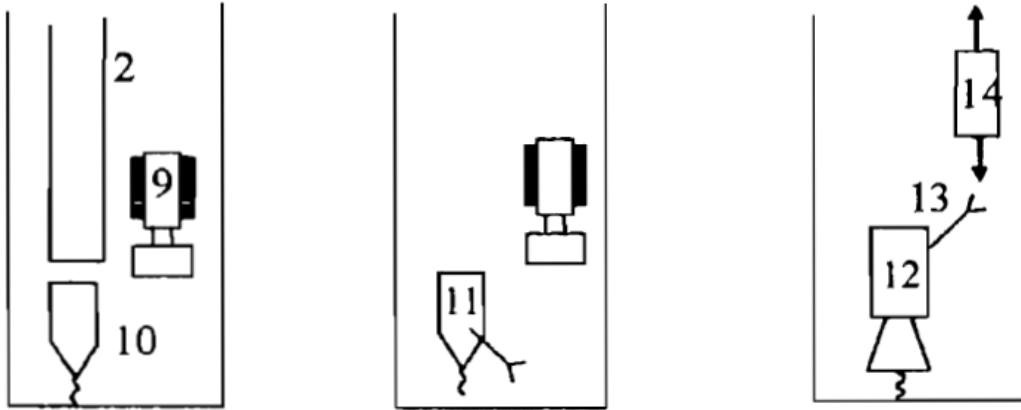


Рисунок 6.84 – Схеми застосування робототехніки при виконанні виробки

В технології проведення виробки буровибуховим способом (рис. 6.85, *а*) використовують самохідну навантажувальну машину 9, бурильну установку

10 і конвеєр 2. За допомогою навантажувальної машини ведуть доставку і навантаження гірничої маси на конвеєр, зачистку ґрунту виробки, доставку елементів кріплення.



а – традиційний
буровибуховий спосіб

б – робот доставляє
кріплення і вивозить
гірничу масу

в – робот для кріплення
встановлений на буронавантажувальній машині

Рисунок 6.85 – Схеми застосування робототехніки при виконанні виробки буровибуховим способом

При роботизації замість бурильної установки вводять мобільний бурильний робот з навісним автоматичним пристроєм для установки анкерів 11 (рис. 6.85, б). Робот здійснює забурювання, повернення штанги, захист від заклинювання, переміщення бурильної головки, буріння шурфів за заданою програмою. Доставку матеріалів та вивіз гірничої маси веде навантажувальна машина з автоматичним керуванням навантаженням, рухом та розвантаженням.

В іншому варіанті (рис. 6.85, в) на буронавантажувальній машині 12 встановлюють маніпулятор 13 для установки кріплення. Як і в попередній технології, доставку матеріалів та вивезення гірничої маси веде навантажувальна машина 14 з автоматичним керуванням.

На рис. 6.86 наведений робот-бурильник шурфів, а на рис. 6.87 – самхідний робототехнічний прохідницький комбайн. Для виїмки пластів вугілля товщиною 0,3-0,7 м з кутом залягання більше 40° застосовується маніпуляційний робот 1, який рухається перед комбайном 3 і захоплює модуль 2 пневмобалонного кріплення (рис. 6.88).

Для комбайнової виїмки вугілля перспективна роботизація пересування механізованого кріплення до забою. Захоплення петлі кріплення маніпулятором робота можливе за допомогою пружного гака за сигналом далекоміра або направляючим тросом. Після захоплення він випускає повітря з балона, переміщає його до вибою та подає повітря у балон до повного розпору. Потім робот піднімається до наступного модуля кріплення.

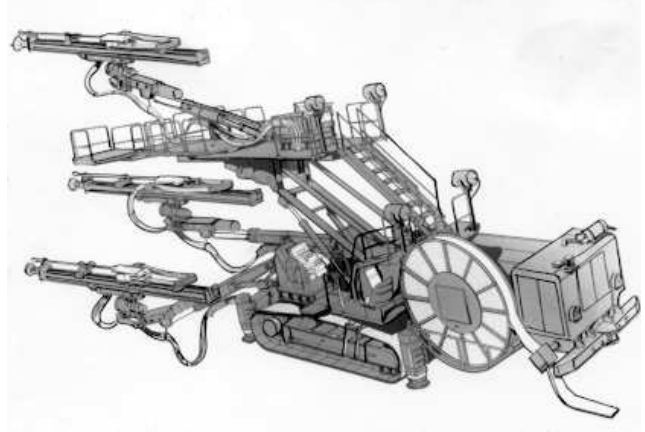


Рисунок 6.86 – Робот для буріння шурфів (робот-бурильник)

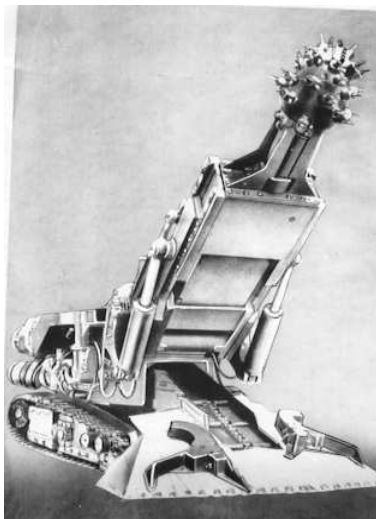


Рисунок 6.87 – Самохідний робототехнічний прохідницький комбайн

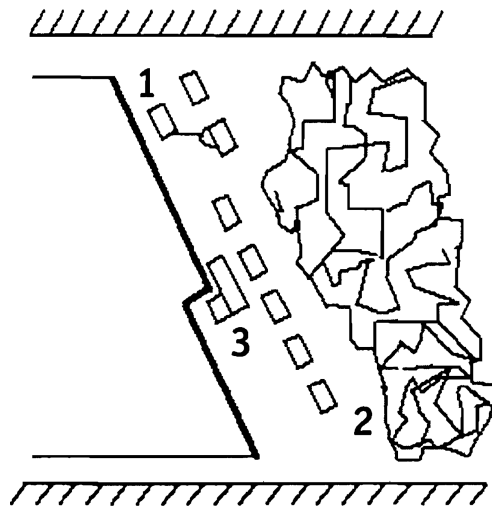


Рисунок 6.88 – Роботизована технологія виймання тонких крутих пластів вугілля

Металургія. Особливостями об'єктів роботизації є перенесення важких вантажів з невисокою точністю позиціювання, розширена зона обслуговування, робота при підвищеній температурі, різноманітність форм та розмірів об'єктів маніпулювання. На першому етапі введення робототехніки дозволить скоротити витрати важкої ручної праці, а на другому – створити РТК, що виключатимуть участь людини у процесі.

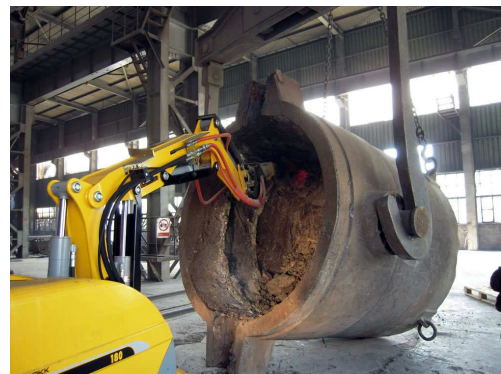
Для галузі можливі такі програми робототехніки:

- крокуючий робот для укладання цегли та вирівнювання днища доменної пічі до її повного остигання, що триває кілька місяців;
- маніпулятор для завантаження заготовок у нагрівальну піч та вивантаження нагрітих заготовок;
- підвісний маніпулятор для захоплення та переміщення смуги прокату під час її руху по рольгангу;
- маніпулятор для заміни валків рольгангу;
- маніпулятор для нанесення тавра виробника на нагрітий виріб.

На рис. 6.89 як приклад представлений РТК для очищення ковшів.



а



б

Рисунок 6.89 – Робот для очищення розливних ковшів

Будівництво. Застосування роботів безпосередньо на будівельному майданчику обмежено через переміщення фронту робіт, різноманітність технологічних операцій, необхідність маніпулювання важкими об'єктами в обмеженому просторі. Мобільні фарбувальні роботи з контурним керуванням можуть застосовуватися для внутрішнього оздоблення приміщень. Створено роботи, здатні переміщатися вертикальною стіною за допомогою присосок. Їх використовують для зварювання циліндричних резервуарів, усунення дефектів поверхні, миття вікон, гасіння пожеж. При виробництві будматеріалів можна застосовувати:

- збалансовані маніпулятори для встановлення вікон та дверей у отвори стінових панелей;
- зварювальні роботи для виготовлення арматурних каркасів;
- маніпулятори для завантаження печей випалу керамічних труб;

- мобільні маніпулятори для укладання бетону та вирівнювання не застиглого бетону;

- фарбувальні роботи для високоякісних покриттів;

- різноманітні маніпулятори для вантажно-розвантажувальних робіт.

На рис. 6.90 як приклад будівельного робота наведений мобільний маніпулятор для укладання та вирівнювання не застиглого бетону.



Рисунок 6.90 – Телекерований мобільний робот-бетоноукладач

Легка та харчова промисловість. Швидко розширюється застосування засобів робототехніки в легкій і харчовій промисловості. На швейних фабриках роботи здійснюють розкрій тканин та обробку деталей одягу. У харчовій промисловості роботи використовують для укладання в ящики та упаковки цукру-рафінаду, хлібобулочних виробів, для розкладки цукерок у коробки тощо.

У *легкій промисловості* різноманітність та нежорстка форма виробів, необхідність зв'язку з високопродуктивним основним обладнанням вимагають розробки спеціальних роботів:

- автоматичний маніпулятор для знімання шпуль з намотувальних машин та їх укладання на транспортний візок;

- автоматичний маніпулятор з груповим пристроєм захоплення для знімання шкарпеткових виробів з формувальної машини та їх укладання на конвеєр;

- автоматичний маніпулятор для перекладання стандартного та бракованого взуття зі столу контролю на транспортери готових виробів та браку;

- робокар для обслуговування ткацьких верстатів;

- підвісний транспортний маніпулятор для транспортування рулонів тканини між верстатами та цехами;

- робот з контурним керуванням для орієнтації заготовок тканини та зшивання одягу, складування готових виробів;

- робот для орієнтації шматків шкіри при багатоетапному виробленні.

На рис. 6.91 показано груповий пристрій захоплення для вилучення з коробки шпуль з намотаним волокном. Пристрій складається з відрізків трубок 1, обтягнутих гумовою оболонкою 2 і закріплених на тришаровій плиті 3. Під час подачі стисненого повітря через середній шар всередину трубок гумові оболонки роздмхуються, щільно захоплюючи шпулі 4 зсередини.

Пристрій захоплення зі шпулями піднімають за допомогою збалансованого маніпулятора, який переносить шпулі на стрижні транспортного візка, а потім подає команду зняття розпору. Після цього шпулі під дією власної ваги ковзають стрижнями вниз.

Застосування робокара 1 для знімання готових рулонів тканин 2 з валу 3 намотувальної машини 4 дозволить виключити важку фізичну ручну працю з перенесення рулонів до транспортного пристрою (рис. 6.92).

Робокар рухається вздовж ряду машин по пилкоподібній траєкторії, уповільнюючи рух на ділянках, паралельних валу 3. Збоку робокара винесено пасивний пристрій захоплення у вигляді жолоба, задня частина якого має торцеву стінку з прорізом для валу. У процесі руху рулон захоплюється торцевою стінкою, падає в жолоб і скочується в накопичувач 5 робокара.

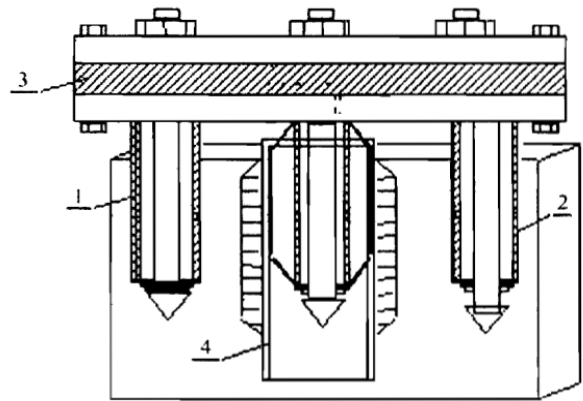


Рисунок 6.91 – Груповий пристрій захоплення для витягання шпуль з ниткою з коробки

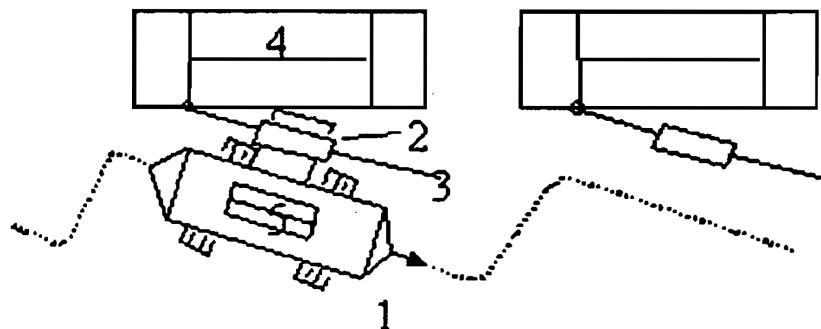


Рисунок 6.92 – Застосування робокара для зняття рулонів тканини

Мікроелектроніка. Близько 70% трудомісткості виготовлення плат мікроелектроніки припадає на складання, що відрізняється надмірною мініатюризацією, різноманітністю операцій, чутливістю до пилу, вологості та статичної електрики.

Ручне складання плат взагалі не можливе через малі відстані між елементами плати. Роботи, що застосовуються в мікроелектроніці, повинні забезпечувати підвищену швидкість переміщень, точне позиціонування і високу надійність. Вони використовуються на операціях:

- мікрозварювання виводів інтегральних схем із розпізнаванням місць зварювання системою технічного зору;
- встановлення кристала у корпус мікросхеми;
- встановлення компонентів на друковану плату з розпізнаванням координат отворів за допомогою підсвічування плати знизу;
- контролю введення виводів в отвори за сигналами силомоментних датчиків маніпулятора,
- відбраковування мікросхем та друкованих плат шляхом їхнього зіставлення з еталоном;
- сортування готових виробів;
- збирання виробів з електронних плат.

Висока точність позиціонування роботів дозволяє знизити частку браку та підвищити продуктивність. Застосування роботів у мікроелектроніці дозволяє адаптувати обладнання до швидкої змінності виробів та реалізувати нові технології, недоступні для людини. Приклади застосування роботів у мікроелектроніці наведено на рис. 6.93 та рис. 6.94.

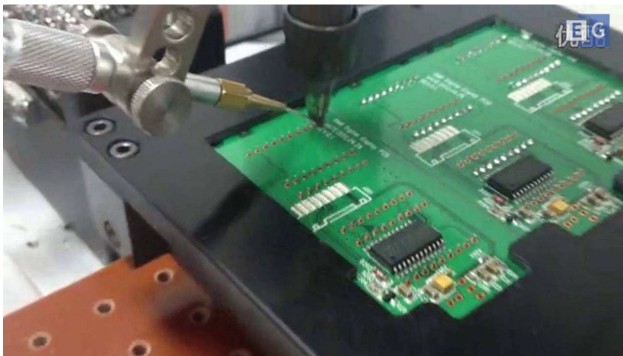


Рисунок 6.93 – Роботизований верстат для паяння мікросхем



Рисунок 6.94 – Роботизований модуль лудіння виводів компонентів

6.4.2. Робототехніка в непромислових галузях

В табл. 6.4. наведено приклади застосування засобів робототехніки у деяких непромислових галузях.

Таблиця 6.4 – Приклади застосування засобів робототехніки у непромислових галузях

Операція	Тип засобів робототехніки
Агропромислове виробництво	
Збирання овочів та фруктів	Мобільні сенсорні роботи
Прополювання та проріджування овочів	Робот з технічним зором для роботи в комплексі з проріджувачами
Обслуговування теплиць	Мобільний робот для вирощування розсади, збирання продукції
Товарна доробка плодоовочевої продукції (сортування та завантаження в контейнери)	Робот з технічним зором та іншими сенсорними системами
Обслуговування свинарських комплексів та комплексів для великої рогатої худоби	
Доїння та санітарна обробка вим'я корів Стрижка овець	Спеціальні сенсорні роботи
Вантажно-розвантажувальні роботи із сільськогосподарською продукцією, сіном, силосом, добривами тощо	Засоби робототехніки, аналогічні застосовуваним в машинобудуванні
Водіння тракторів та інших машин	Робот-тракторист
Медицина	
Хірургія (мікрохірургія, дистанційна хірургія, стерильна хірургія)	Прецизійні роботи і маніпулятори, керовані оператором
Внутрішньо-порожнинна та внутрішньо-судинна діагностика	Мобільні мікророботи
Реабілітація та догляд	
Реабілітації інвалідів та хворих	Роботи для масажу і фізичних вправ
Догляд за хворими та інвалідами	Робот-доглядальниця
Допомога при пересуванні сліпих людей	Робот-поводир
Сфера обслуговування	
Вантажно-розвантажувальні роботи	Засоби робототехніки, аналогічні застосовуваним в машинобудуванні
Охорона приміщень	Робот з технічним зором та іншими сенсорними системами
Миття вікон висотних будівель	
Прибирання приміщень	Побутові мобільні роботи
Догляд за дітьми	Робот-нянька, роботи-іграшки

Сільське господарство. У сільському господарстві робототехніка відкриває широкі можливості для комплексної автоматизації та роботиза-

ції. Основні особливості застосування тут засобів робототехніки полягають у великій територіальній протяжності та роз'єднаності підприємств, сезонності робіт, сильній залежності від погодних та кліматичних умов, у безпосередньому контакті з тваринами та рослинними організмами, що мають велику розкиданість характеристик та суттєві специфічні вимоги до взаємодії з ними.

Одне з важливих завдань у рільництві – створення роботів для водіння тракторів, комбайнів та інших агрегатів із вивільненням працівників наймасовішої тут професії – трактористів та водіїв.

Роботи-трактористи повинні бути пристосовані для заміни тракториста на стандартному робочому місці. Це дозволить оперативно використовувати такі роботи в серійних машинно-тракторних агрегатах, замінювати трактористів при виконанні робіт особливо небезпечних (внесення отрутохімікатів і т.п.) або втомлювальних (водіння культиваторів і проріджувачів строго по рядках рослин і т.п.), здійснювати групове керування тракторами та іншими машинами з роботами-водіями за трактором-лідером, яким керує тракторист. Заміна трактористів роботами дозволить підвищити продуктивність агрегатів, змінність, ритмічність та якість роботи, знизити витрату палива.

Одна з найбільш трудомістких галузей сільськогосподарського виробництва – овочівництво та картоплярство. Продуктивність праці на ряді операцій тут обмежена фізичними можливостями людини. Наприклад, для укладання розсади в апарат, що висаджує, потрібні кілька садильниць на кожній розсадній машині, які повинні працювати в ритмі приблизно одна операція в секунду в умовах трясіння, пилу і за різної погоди.

У теплицях застосування мобільних роботів дозволяє комплексно автоматизувати велике коло робіт з підготовки ґрунту, висіву насіння, обприскування хімікатами, збирання готової продукції (розсади, овочів, фруктів), її сортування та укладання в тару. Наприклад, робот для посадки розсади виконує операції вилучення пучків розсади з піддонів та укладання в посадкову машину зі швидкістю вищою, ніж при ручній посадці.

Для теплиць великої площі розроблено транспортний робот, що забезпечує доставку розсади чи зібраного врожаю (рис. 6.95). Робочий P із віддаленого місця теплиці замовляє вид розсади та термін її доставки. На складі C на платформу транспортного робота TP встановлюють самохідні мікророботи MP із замовленими вантажами.

Транспортний робот рухається інформаційною напрямною і зупиняється перед проходами, в яких було зроблено замовлення. Після зупинки з нього з'їжджає мікроробот та доставляє вантаж до місця замовлення.

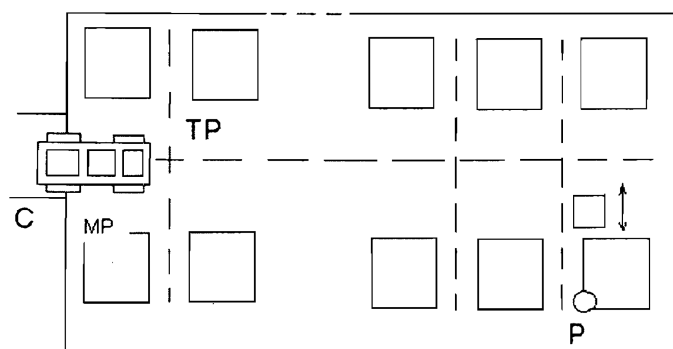


Рисунок 6.95 – Застосування транспортного робота для робіт в теплиці

Приклади використання роботів для збирання ягід показано на рис. 6.96.



а



б

Рисунок 6.96 – Роботи для збору ягід

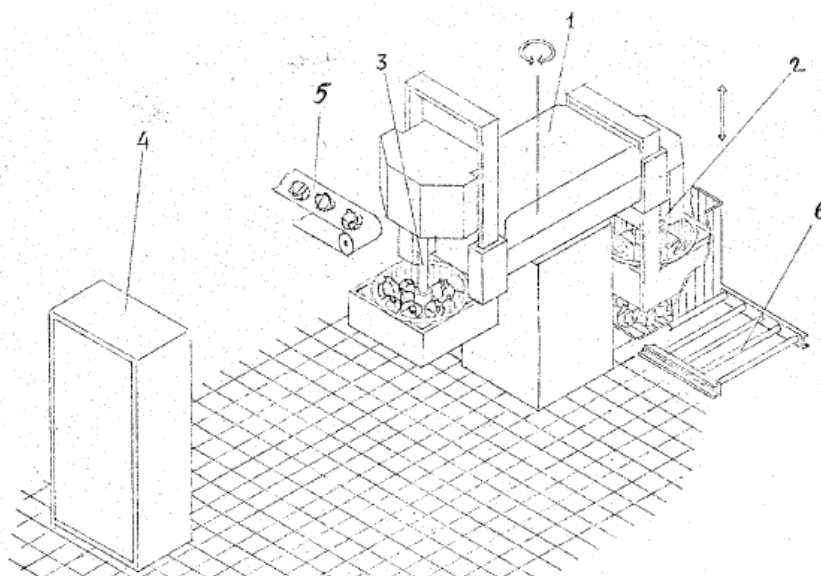


Рисунок 6.97 – Робототехнічний комплекс для завантаження капусти

Аналогічні завдання необхідно вирішувати на стаціонарних пунктах після-збиральної обробки овочів та фруктів, включаючи їх сортування, відділення домішок та некондиційних екземплярів.

На рис. 6.97 представлений зразок робототехнічного комплексу для завантаження капусти та інших овочів у контейнери. На рисунку прийняті такі позначення: 1 – робот-завантажувач, 2,3 – його маніпулятори, 4 – пристрій керування, 5 – транспортер для готової продукції, 6 – завантажувач.

Комплекс виконує такі операції:

- подача порожніх контейнерів у зону завантаження;
- завантаження капусти в контейнер;
- переміщення завантажених контейнерів у зону накопичення готової продукції.

Завдяки акуратному поводженню з капустяними качанами повністю виключено їх пошкодження, яке при інших використовуваних на сьогодні способах завантаження досягає 45%.

Для роботизації деяких операцій у сільському господарстві необхідно застосовувати різноманітні сенсори.

У макеті робота для виявлення та збирання апельсинів використовується система технічного зору з вузько-смуговим фільтром, що формує зображення апельсину у вигляді білого кола на темному тлі листя. Роботизована газонокосарка розпізнає межу між скошеною та нескошеною травою по контрастній лінії, отриманій за допомогою системи технічного зору. В Австралії розробляють роботи для автоматизованої стрижки овець за сигналом ультразвукового датчика контурів шкіри.

У тваринництві та птахівництві потрібні роботи для виконання таких робіт:

- механізоване доїння корів;
- основні технологічні операції: дозована роздача кормів, розкидання підстилки, збирання перегною, дезінфекція приміщень, зважування тварин;
- дефектоскопія та сортування яєць у неорганізованих потоках з подальшим укладанням у тару.

На рис. 6.98 показаний приклад використання роботів на залізничному транспорті для миття, дезінфекції та фарбування вагонів. Гідравлічний робот з контурним керуванням, зі змінними робочими органами, розміщений на рухомій підставі. Підстава переміщується оператором усередині вагона

за допомогою пантографічної стріли в міру обробки чергової частини вагона в межах робочої зони робота. На рисунку прийняті такі позначення: 1 – візок із оператором; 2 – рухлива основа; 3 – промисловий робот; 4 – пантографічна стріла.

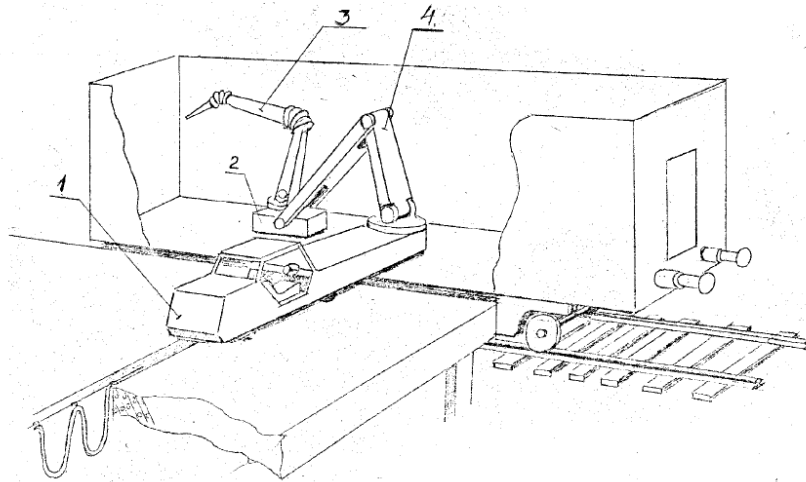


Рисунок 6.98 – Робототехнічний комплекс для хімічної обробки залізнодорожних вагонів

На рис. 6.99 показаний керований оператором робот для лісної промисловості, а на рис. 6.100 – робот для обробки деревини.



Рисунок 6.99 – Багатоопераційний мобільний лісосічний робот

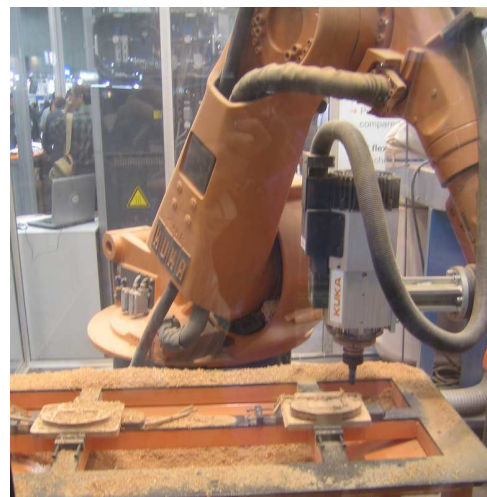


Рисунок 6.100 – Робот для обробки деревини

Великі перспективи має робототехніка в медицині, у тому числі у хірургії, протезуванні, для реабілітації та обслуговування хворих та інвалідів. На основі досягнень робототехніки створюються все більш досконалі штучні кінцівки – протези рук і ніг, що мають приводи, вбудовані мікропроцесорні пристрої керування та біологічні зворотні зв'язки. Створено штучні скелети з приводами, звані екзоскелетони (екзо означає «зовнішній»), для паралізованих людей.

На рис. 6.101 наведено приклад хірургічного комплексу з чотирма маніпуляторами, керованими хірургом за допомогою задавальних рукояток.



Рисунок 6.101 – Медичний робот da Vinci (Intuitive Surgical, США)

Розробляються маніпулятори для проведення мікрохірургічних операцій із точністю, недоступною руці людини. У 2000 році було проведено першу трансатлантичну операцію, при якій хірург із США, керуючи маніпулятором через Інтернет, провів операцію з видалення жовчного міхура пацієнту у Франції.

Для огляду внутрішніх органів, спрямованого введення ліків та хірургічних маніпуляцій застосовують багатоланкові маніпулятори з ефектом пам'яті форми.

На рис. 6.102 показано медичний РТК для виправлення переломів. На рисунку прийняті позначення: 1 – рентгенівський апарат, 2 – медичний пульт, 3 – телевізійна система, 4 – маніпулятор, 5 – пристрій керування, 6 – пульт оператора з задавальною рукояткою та з відображенням зусилля.

Значними темпами розвиваються такі напрямки застосування роботів: сервісні роботи для обслуговування хворих, інвалідів та дітей; для використання в домашньому господарстві з прибирання приміщень, роботи на

кухні, для охорони квартири, виконання функцій швейцара, обслуговування телефону, радіо- та телевізійної апаратури тощо.

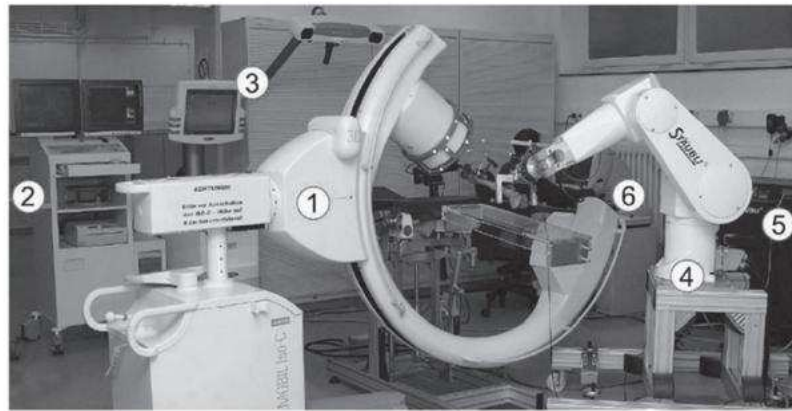


Рисунок 6.102 – Медичний робототехнічний комплекс

Такі роботи мають технічний зір, слух, дистанційні і тактильні датчики, можуть вести діалог з людиною в обсязі сотень фраз, забезпечені системами радіокерування і пересування. У США створено робот – нічний сторож («Центуріон-1»). Він має колісний хід, інфрачервону систему виявлення людей, пристрій для позбавлення порушника рухливості за допомогою ультразвуку, газу, що веселить або паралізує, електричних розрядів. Як приклад на рис. 6.103 показано робот-іграшку РаРеРо, а на рис. 6.104 – креслярський робот.

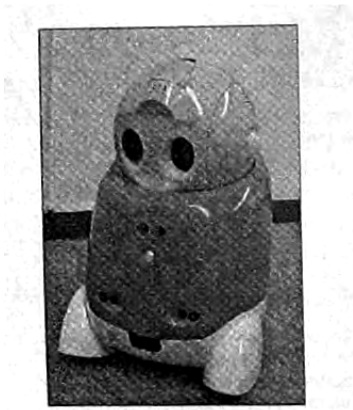


Рисунок 6.103 – Робот-іграшка
РаРеРо (Японія)

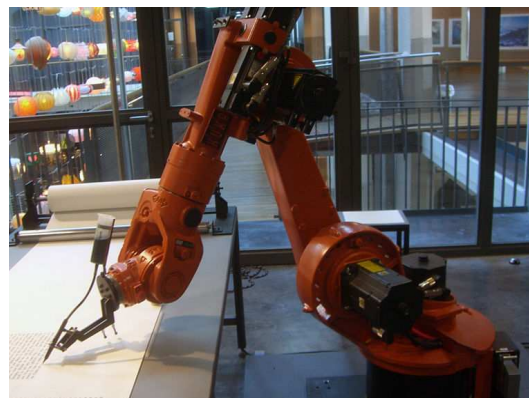


Рисунок 6.104 – Креслярський
робот

За прогнозами японських фахівців, сфера використання роботів у побуті стане в 10 разів ширшою, ніж у промисловості. Створено робот-

офіціант, який приймає замовлення та доставляє його клієнту. Розробляються роботи для обслуговування інвалідів за голосовими командами, водіння сліпих за заданими орієнтирами, доставки різних предметів.

6.5. Екстремальна робототехніка

6.5.1. Екстремальна робототехніка в промисловості

Одне з призначень робототехніки – виконання різноманітних робіт в екстремальних зовнішніх умовах або небезпечних і шкідливих для людини, або таких що взагалі повністю виключають його присутність. Відповідний розділ робототехніки отримав назву «екстремальна робототехніка». Під екстремальними умовами розуміються як аварійні ситуації, включаючи стихійні лиха, і штатні екстремальні ситуації, зумовлені технологією виробництва. У міру інтенсифікації виробництва питома вага тих і інших неухильно зростає. Це відноситься, зокрема, до атомної енергетики та промисловості, хімічної, металургійної, гірничодобувної галузей промисловості, підводних робіт, освоєння космосу, військової справи.

Екстремальні умови визначаються насамперед зовнішніми умовами роботи (радіація, сильні електромагнітні поля, екстремальні значення температури, тиску тощо). Крім зовнішніх умов екстремальні ситуації визначаються і операціями що підлягають виконанню.

У табл. 6.5 наведено приблизний перелік таких операцій. Відповідно до цього переліку, основним типом технічних систем, що необхідні для виконання цих операцій, є робототехнічні системи. Завдяки характерній для РТС багатофункціональності та гнучкості, вони дозволяють оперативно виконувати різноманітні технологічні операції. Окрім РТС для виконання окремих типових технологічних операцій, потрібна досить широка номенклатура спеціальних технологічних систем, з якими вони повинні взаємодіяти. Прикладами таких спеціальних технічних систем можуть бути будівельні, будівельно-дорожні, транспортні, вантажно-розвантажувальні машини – екскаватори, бульдозери, крани тощо, але у спеціальному виконанні для роботи в екстремальних зовнішніх умовах.

Найбільш важливими характеристиками РТС для області застосування, що розглядається, є способи керування, переміщення і енергоживлення.

Таблиця 6.5 – Приблизний перелік робіт та технологічних операцій в екстремальних умовах

№ за/п	Найменування робіт	Найменування операції
1.	Інспекція	Візуальний контроль, визначення фізичного стану місцевості, об'єктів, обладнання (з землі, з повітря, у воді)
		Радіаційний контроль на місцевості, в приміщеннях
		Визначення складу атмосфери, води та земляного покриття
		Візуальний контроль важкодоступних приміщень
		Зняття показань контрольно-вимірювальних приладів
		Визначення положення показувальних та виконавчих органів, вентилів, тумблерів
		Виявлення місць витоків у трубопроводах та устаткуванні
2.	Вантажно-розвантажувальні та транспортні роботи	Доставка різних технічних засобів до місць надзвичайних ситуацій
		Розчищення проходів, влаштування транспортних шляхів (проїздів, переправ тощо)
		Розбирання завалів, зміцнення або обвалення нестійких конструкцій
		Транспортування матеріалів, інструменту, ємностей та інших об'єктів
		Збирання та транспортування небезпечних відходів
		Видалення небезпечних предметів (вибухових пристроїв, радіоактивних джерел тощо)
		Створення дамб та загороджувальних смуг
3.	Будівельно-відновлювальні роботи	Організація енергопостачання
		Забезпечення засобами зв'язку
		Відновлення транспортних шляхів (шосейних доріг, залізничних колій та аеродромів)
4.	Очищення	Дезактивація місцевості, будівель, приміщень, конструкцій та обладнання
		Очищення майданчиків
		Відкачування води із затоплених приміщень
5.	Пожежогасіння	Розвідка вогнищ пожежі
		Локалізація та гасіння пожеж
6.	Порятунок людей	Пошук людей у місцях їхнього блокування
		Евакуація людей із місць надзвичайних ситуацій
7.	Маніпуляційні роботи	Монтаж та демонтаж обладнання та конструкцій
		Складання та розбирання з'єднань
		Нанесення та видалення покриттів
		Бандажування теч на трубопроводах, заміна прокладок у з'єднаннях
		Робота з вибуховими, радіоактивними та іншими небезпечними матеріалами (кантування, укладання, пересипання, ущільнення та ін.)
		Збір та видалення розсипаних матеріалів
		Установка та зняття домкратів, опор та розтяжок
		Зварювання та різання труб, металоконструкцій
		Свердління та фрезерування
		Буріння
		Різання металевих, бетонних, залізобетонних, дерев'яних конструкцій
		Дроблення уламків будівельних конструкцій
		Відкриття дверей, люків, засувок

Основним способом керування такими технічними системами є комбінація дистанційного автоматизованого керування з боку людини-оператора та місцевого автоматичного керування. Переміщення до місця роботи може забезпечуватись спеціальними транспортними засобами (крани, вертольоти тощо) або власною системою пересування (мобільні РТС). Енергоживлення може бути автономним, кабельним чи комбінованим.

За характером виконуваних операцій всі РТС можна поєднати у 2 групи: інспекційні та технологічні.

Інспекційні системи (розвідники) часто мають маніпулятори. Вони призначаються для розчищення проходів, взяття проб, пошуку та взяття окремих об'єктів, виконання різних операцій з органами керування основного технологічного та іншого обладнання та окремих технологічних операцій за допомогою змінного інструменту.

Технологічні РТС призначені для виконання різних технологічних операцій зазвичай за допомогою змінних робочих органів, включаючи укріплені на шасі бульдозерні відвали, грейфери, зварювальні апарати тощо. Ці системи з урахуванням обмежень, що накладаються їх масогабаритними характеристиками, прохідністю та стійкістю до зовнішніх впливів, застосовуються у важкодоступних та обмежених приміщеннях усередині будівель та на відкритій території. Наприклад, для атомної промисловості типові зовнішні умови включають:

- радіаційне опромінення з інтенсивністю до 10 рентгенів у секунду та інтегральною дозою до 10⁶ рентгенів;
- температура навколишнього середовища в окремих випадках до 3000°C;
- вологість 100%;
- вибухо- та пожежонебезпека;
- радіоактивні забруднення, які потребують дезактивації.

Основна тенденція розвитку розглянутої техніки – створення автономних та телекерованих мобільних РТС з розвиненими сенсорами, адаптивним та інтелектуальним керуванням. Роботи в цій галузі ведуться найбільшими машинобудівними фірмами, включаючи Дженерал Електрик, Вестінгауз, Мартін Марієтта, Катерпіллер, Дженерал Дайнамікс, Сіменс, Міцубісі. Основною формою організації цих робіт є державні (США, Японія, Франція, Англія) та міжнародні програми і проєкти.

На рис. 6.105 показаний інспекційний мобільний робот, що застосовувався при ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС.

На рис. 6.106 та рис. 6.107 наведено приклади технологічних мобільних роботів, що використовувалися під час виконання робіт з ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС для збирання радіоактивних уламків. На роботу ці роботи доставлялися з допомогою вертольотів.

За допомогою гамма-прицілу робот відшукує джерело підвищеної радіації та наводить на нього пристрій захоплення.

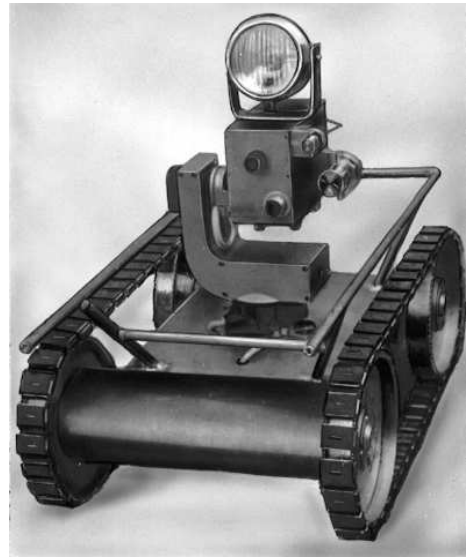


Рисунок 6.105 – Робот-розвідник

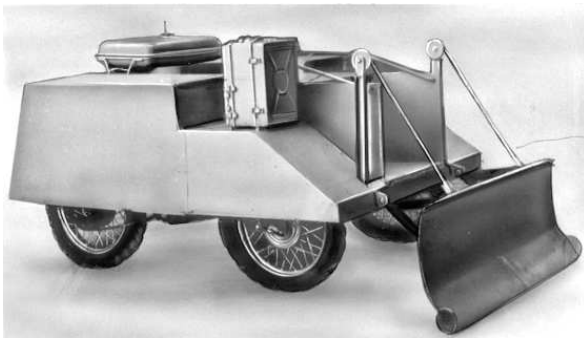


Рисунок 6.106 – Радіокерований робот для прибирання та транспортування радіоактивних сипучих матеріалів



Рисунок 6.107 – Робот з телевізійною камерою та іншими сенсорними пристроями

Дистанційно керовані мобільні роботи можуть проводити ремонт ядерних реакторів, знезараження забрудненого обладнання, обстеження прихованих порожнин. Робот з бортовою телекамерою може проходити у двері, розвертатися на місці, долати сходові переходи, рухатися під кутом 300° , долати бар'єри та траншеї розміром до 300 мм. На відкритій місцевості робот може оглядати територію з метою оцінки руйнувань, шукати проходи; збирати радіоактивні уламки, передавати дані для карти радіаційної обстановки, розбирати завали. При звичайній роботі робот знезаражує облад-

нання перед ремонтом, виконує огляд прихованих порожнин, профілактичні роботи.

На рис. 6.108 наведено приклад пізнішої розробки мобільного робота, призначеного для роботи в екстремальних ситуаціях в якості робота-розвідника (інспекція), а також для виконання різних технологічних операцій змінним інструментом, ведення охорони та боротьби з терористами. Робот комплектується різними дистанційно керованими засобами активного захисту та нападу. Робот забезпечений 5-ступеневим шарнірним маніпулятором вантажопідйомністю 10 кг і рухомою двоступеневою передавальною телекамерою. Енергоживлення – комбіноване: автономне від акумуляторів і по кабелю довжиною 300 м. Кабель розміщений на барабані з струмознімачем, що обертається. Керування дистанційне супервізорне, автономне програмне та адаптивне, включаючи автоматичний обхід та подолання перешкод.

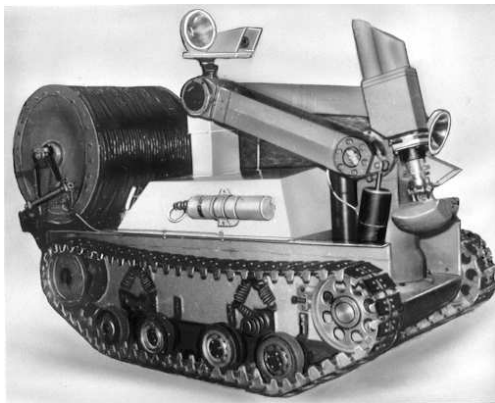


Рисунок 6.108 – Робот-розвідник



Рисунок 6.109 – Робот «Антитерорист»

На рис. 6.109 показаний мобільний робот «Антитерорист», призначений для пошуку та ідентифікації небезпечних предметів.

Вирішення проблеми створення РТС для екстремальних умов пов'язане з такими особливостями:

- складність (екстремальність) зовнішніх умов, які часто перебувають на межі можливостей сучасної техніки;
- складність, різноманіття, нечіткість (мінливість) функцій, що підлягають виконанню, та призводять до великої номенклатури потрібних технічних засобів при, як правило, одиничному характері потреб у цій техніці;
- міжгалузевий характер проблеми як з погляду споживачів, так і виробників необхідних технічних засобів.

З урахуванням цих особливостей в основу проектування засобів екстремальної робототехніки має бути покладено функціональну та конструктивну уніфікацію технічних засобів на основі їх модульної побудови.

6.5.2. Космічна робототехніка

Космічна робототехніка – новий перспективний напрямок розвитку космонавтики, у тому числі для робіт у далекому космосі, на Місяці та на навколоземних орбітах. Робототехніка розширює функціональні можливості безпілотних космічних апаратів, доводячи їх практично до рівня сучасних пілотованих апаратів. У пілотованій космонавтиці робототехніка дозволяє значною мірою звільнити космонавтів від важких і небезпечних робіт у відкритому космосі та в умовах інтенсивних іонізуючих випромінювань і перетворити житлові космічні апарати у періодично відвідувані.

Національне управління з аеронавтики та дослідження космічного простору НАСА (США) виділяє чотири види космічних робіт: дослідницькі системи, глобальні обслуговуючі комплекси, системи індустріалізації космосу та транспортні системи.

У космонавтиці робототехніка і, насамперед, маніпулятори та мобільні роботи призначені для виконання різних маніпуляційних транспортних операцій, включаючи технічне обслуговування космічних апаратів та космонавтів, заміну останніх на окремих технологічних операціях, та виконання операцій, недоступних або небезпечних для космонавтів, а також обстеження та моніторинг навколишнього середовища. Ефективність заміни людини засобами робототехніки полягає, крім того, і у виключенні ефекту «людського фактору».

Космічна робототехніка вже сьогодні дозволяє різко підвищити ефективність космічних систем, знизити витрати на їх експлуатацію, суттєво розширити їх функціональні можливості, значно збільшити ресурс і надійність, підвищити безпеку космонавтів.

Об'єктами застосування космічної робототехніки є:

- космічні апарати в навколоземному просторі, на навколоземних орбітах і в міжорбітальних польотах;
- вільно літаючі роботи у відкритому космосі (обстеження космічного простору та окремих об'єктів, їх технічне обслуговування, складання габаритних конструкцій тощо);
- поверхня космічних тіл, включаючи Місяць, інші планети тощо.

Кінцеві цілі застосування робототехніки в космосі:

- розширення функціональних можливостей космічних апаратів;
- вивільнення космонавтів від виконання небезпечних та стомлюючих операцій;
- підвищення надійності та ресурсу космічних апаратів.

У світі розробки систем космічної робототехніки ведуться переважно у США, Канаді, європейських країнах, Японії.

Найбільш важливою розробкою, яка продемонструвала високу ефективність цієї техніки в умовах космосу, є канадський маніпулятор Canadarm на американському космічному кораблі Shuttle (Шаттл) (рис. 6.110). Усього було збудовано 5 таких маніпуляторів. Вони використовувалися для переміщення вантажів у космосі. Маніпулятор розташовувався у вантажному відсіку Шаттла, керування здійснювалося дистанційно з кабіни. Маніпулятор має 6 ступенів руху. Механізм захоплення за принципом роботи нагадує діафрагму фотоапарата. Характеристики маніпулятора: довжина – 15,2 м; діаметр – 38 см; власна вага – 410 кг; вага у складі загальної системи – 450 кг.

Вперше Canadarm використовувався на борту Шаттла Колумбія під час місії STS-2 у 1981 році. За час експлуатації маніпулятор Canadarm брав участь у 50 місіях та здійснив 7000 обертів навколо Землі, відпрацювавши без жодної відмови.

Маніпулятор використовувався для захоплення телескопа Хаббл, переміщення і вивантаження понад 200 тон компонентів міжнародної космічної станції (МКС) та переміщення астронавтів.

При складанні МКС Canadarm застосовувався багато разів, починаючи з місії STS-88, під час якої були з'єднані два перші модулі – «Зоря» та «Юніті».

У 2001 році на МКС була запущена пересувна обслуговуюча система Canadarm2 (РТК і пов'язане з ним обладнання) (рис. 6.111).



Рисунок 6.110 –
Маніпулятор Canadarm

Система виконує ключову роль при складанні та обслуговуванні станції: переміщає обладнання та матеріали в межах станції, допомагає космонавтам працювати у відкритому космосі і обслуговує інструменти та інше корисне навантаження, що знаходяться на поверхні станції.



Рисунок 6.111 – Система Canadarm2 при виконанні завдання STS-114 (утримання астронавта Стівена Робінсона)

В даний час до складу пересувної обслуговувальної системи входить дистанційний маніпулятор космічної станції (рука Space Station Remote Manipulator – SSRMS), а також гнучкий маніпулятор спеціального призначення (Special Purpose Dexterous Manipulator – SPDM), відомий також як Dextre (рис. 6.112). Система може переміщатися рейками, розташованими на фермових конструкціях за допомогою візка транспортера. Dextre (Декстр) був доставлений на МКС у рамках місії STS-123 у березні 2008 р. Декстр призначений для розширення

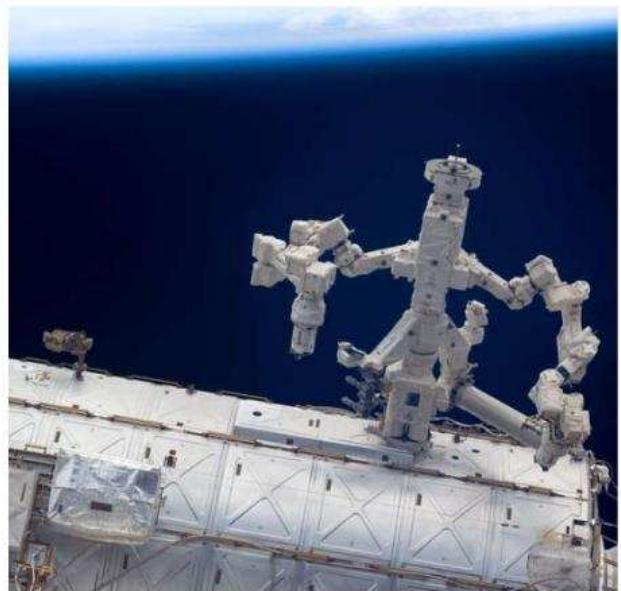


Рисунок 6.112 – Маніпулятор Dextre

функціональності системи Canadarm2 і дозволяє виконувати дії за бортом станції без необхідності виходу у відкритий космос. Назва «Декстр» походить від англ. dexterity – гнучкість, спритність.

«Декстр» виглядає як безголовий тулуб, оснащений двома вкрай рухливими руками завдовжки 3,35 м. Корпус завдовжки 3,5 метра має вісь обертання в «талії».

Корпус з одного кінця обладнаний захоплюючим пристроєм, за який його може схопити Canadarm2 і перенести до будь-якого орбітального елемента, що замінюється на станції. З іншого кінця корпусу є виконавчий орган робота, фактично ідентичний органу Canadarm2, тому SPDМ може бути закріплений на захоплюючих пристосуваннях МКС або може використовуватися для того, щоб розширювати функціональність Canadarm2.

Обидві руки SPDМ мають сім суглобів, що дає їм таку гнучкість, як у Canadarm2, у поєднанні з більшою точністю. Наприкінці кожної руки знаходиться система, названа «Орбітальний елемент, що замінюється / Механізм заміни інструментів». До неї входять вбудовані чіпкі захоплення, висувна головка, монохромна телекамера, підсвічування і штекер, що розділяється, та забезпечує живлення, обмін даними і телеспостереження. Внизу корпусу «Декстр» знаходиться орієнтована пара телекамер кольорового зображення з підсвічуванням, платформа для зберігання орбітальних елементів і утримувач для інструментів. Утримувач обладнаний трьома різними інструментами, що використовуються для вирішення різних завдань.

У 2004 році на замовлення Європейського космічного агентства консорціумом європейських космічних фірм розроблено європейський маніпулятор ERA (European Robotic Arm) – дистанційно керований космічний робот-маніпулятор. Робот-маніпулятор створений для виконання складальних робіт та обслуговування МКС без виходу у відкритий космос (рис. 6.113).

Маніпулятор ERA встановлений на 17-му модулі МКС – модулі

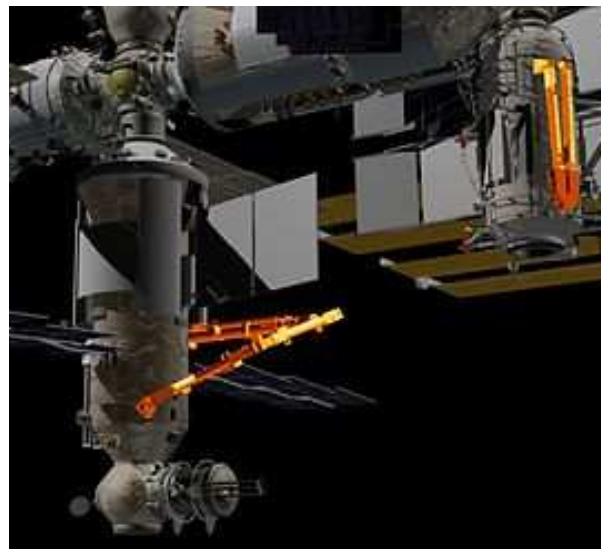


Рисунок 6.113 – Робот-маніпулятор ERA

«Наука». Запуск модуля «Наука» до МКС та його підключення (було потрібно 10 виходів у відкритий космос) було виконано влітку 2021 р.

Робот-маніпулятор ERA довжиною 11,3 метра, масою 600 кг, з максимальною вантажопідйомністю 8 тон може переміщати окремі великі модулі МКС, здатний також захоплювати і переміщати об'єкти з точністю до 5 міліметрів.

У США розробляються: робот Robonaut з маніпуляторами, здатними виконувати операції підвищеної складності та точності; літаючий робот для обслуговування МКС та шестиногий напланетний транспортний робот Spider Nant. У Японії поряд із маніпулятором на японському модулі МКС ведуться розробки РТС для технічного обслуговування космічних апаратів, а також перспективних американських ядерних енергоустановок на Місяці. Розгортаються дослідження та розробки з космічної робототехніки у Китаї.

Однією з найбільших розробок є система бортових маніпуляторів для багаторазового космічного корабля «Буран» (рис. 6.114).



Рисунок 6.114 – Маніпулятор космічного корабля «Буран»

Шарнірні маніпулятори з шістьма ступенями рухливості мають електричні приводи. Довжина маніпулятора – близько 15,3 м, зусилля у пристрої захоплення – приблизно 5 кг. Найбільша маса об'єкта маніпулювання – 3 т. Лінійна швидкість з вантажем – до 0,03 м/с, без вантажу – 0,6 м/с. Похибка позиціонування – 5 мм. У вихідному положенні маніпулятори кріпляться вздовж корабля за допомогою ложементів.

6.5.3. Підводна робототехніка

Дослідження та освоєння глибин океану та морського дна – ще одна важлива сфера екстремальної робототехніки, перспективність якої аналогічно космосу пов'язана, перш за все, з важкими та небезпечними для людини зовнішніми умовами. Наслідком останніх є низька ефективність роботи водолазів. Призначення підводних роботів аналогічне до призначення роботів космічних.

В даний час у світі створено близько тисячі підводних роботів – від мікророботів з масою менше 1 кг до великих – більше 1000 кг. За призначенням їх можна поділити на такі групи:

- інформаційні роботи для дослідження океану, моніторингу, пошуку затонулих суден та інших об'єктів;
- технологічні роботи для виконання різних технологічних силових операцій з обслуговування підводних споруд (бурових свердловин, трубопроводів, кабелів), будівельно-монтажні роботи, бурильні роботи, очищення та фарбування підводної частини кораблів;
- рятувальні роботи;
- військові та військово-технічні роботи (мінування та розмінування, бойова охорона акваторій тощо).

Підводні роботи діляться на вільно плаваючі, прив'язні та донні. Вони можуть бути заселеними та без операторів на борту. Прив'язні роботи з'єднані кабель-тросом із кораблем. Через кабель здійснюється енергоживлення підводної частини та двосторонній інформаційний зв'язок.

На рис. 6.115 показаний зовнішній вигляд житлового дослідницького підводного робота, з двома маніпуляторами, з глибиною занурення до 6000 м.



Рисунок 6.115 – Підводний робот

Структурна схема системи керування роботом наведена на рис. 6.116. До складу схеми входять пульт керування з пристроєм цілевказівки на телеекрані та бортовий комп'ютер.

Комп'ютер забезпечує автономне виконання роботом наступних інструкцій оператора у супервізорному режимі керування:

- взяти вказаний оператором на телеекрані об'єкт;
- перенести цей об'єкт ближче до телекамери, покласти в бункер або в будь-яку точку простору що задана на телеекрані;
- шукати об'єкт наосліп (на дотик) у заданому квадраті (у разі поганої видимості через замутнення води та інших причин).

У останньому режимі забезпечується автоматичний обхід маніпулятором перешкод, що зустрічаються.



Рисунок 6.116 – Структурна схема системи керування підводного робота

6.5.4. Військова робототехніка

Важливим розділом екстремальної робототехніки є робототехніка для збройних сил. До неї входять такі типи засобів робототехніки:

- бойові;
- бойового забезпечення;
- спеціально-технічного забезпечення;
- тилового забезпечення.

Основними специфічними видами засобів робототехніки для збройних сил є:

- мобільні роботи наземного, повітряного та водного базування;

- роботи-водії та роботи-пілоти для різних видів бойових та транспортних машин;
- роботи та інші засоби робототехніки для обслуговування озброєнь та військової техніки.

На рис. 6.117 показаний телекерований мобільний робот-розвідник на шасі, що трансформується, та дозволяє долати високі бордюри і підніматися сходами. Робот забезпечений системою технічного зору у видимому та інфрачервоному спектрах, мікрофоном, світлодіодним прожектором.



Рисунок 6.117 – Робот-розвідник Viper (Elbit Systems, Ізраїль)



Рисунок 6.118 – Бойовий робот MAARS (Foster-Miller, США)

На рис. 6.118 показаний бойовий автономний мобільний робот модульної конструкції з оснащенням, що оперативно змінюється – від засобів ураження (кулемет, гранатомет) до маніпулятора для знешкодження мін.

Основними факторами ефективності застосування робототехніки у збройних силах є:

- застосування в екстремальних умовах, що не допускають участі людського персоналу;
- підвищення швидкодії, точності та стабільності основних характеристик озброєння та військової техніки;
- виключення помилок операторів (від втоми, впливу несприятливих факторів зовнішнього середовища, стресових ситуацій і т.п.);
- скорочення чисельності особового складу та виведення його із зон, небезпечних для життя та здоров'я;

- зниження втрат особового складу;
- спрощення власне озброєння та військової техніки;
- менша її вартість.

Важливою умовою підвищення ефективності військової робототехніки є комплексна уніфікація номенклатури засобів робототехніки та їх основних комплектуючих систем.

Хоча на озброєнні армій у світі знаходяться десятки зразків військових РТС, широкому застосуванню робототехніки у збройних силах перешкоджають такі недоліки та обмежені можливості сучасної робототехніки:

- виконавчі системи та насамперед маніпуляційні мають незадовільні масо-габаритні параметри, що у багато разів поступаються аналогічним параметрам людини;
- незадовільні інтелектуальні можливості інформаційних та керуючих систем.

З урахуванням зазначеного вище першочерговими напрямками застосування робототехніки у збройних силах є:

- створення мобільних роботів-розвідників, саперів, охоронців та подібних легких роботів;
- створення стаціонарних роботів для обслуговування озброєння та військової техніки;
- застосування засобів робототехніки для забезпечення функціонування традиційних рухомих засобів військової техніки без екіпажу.

На першому етапі цієї роботи будуть створені роботи з дистанційним керуванням з подальшим нарощуванням їх інтелекту та відповідно кількості автоматично виконуваних операцій.

Розвиток інтелектуальної робототехніки дозволить підвищити ефективність озброєнь та військової техніки не менш як у 2-3 рази.

6.5.5. Мікроробототехніка

Мікроробототехніка – новий напрямок у робототехніці, що швидко розвивається, та виник на базі тривимірних технологій мікроелектромеханічних систем. На основі цих технологій розроблено мікроприводи та мініатюрні датчики (вимірювачі переміщення, швидкості, прискорення з розмірами в одиниці міліметрів). Це дозволило створити мікрomanipулятори та роботи відповідних розмірів.

Поряд із терміном мікроробот існує термін міні-робот. Прийнято вважати, що міні-роботи – це роботи з габаритними розмірами в сотні, а мікророботи – в десятки міліметрів.

Швидко розвивається мікроробототехніка військового призначення – розвідники, диверсанти тощо. До їх специфічних переваг відносяться важка виявленість і можливість використання великими групами. На рис. 6.119 показано зразок бойових крокуючих мікророботів-охоронців на чолі з міні-роботом (Spawer System Center, США).



Рисунок 6.119 – Група крокуючих мікророботів

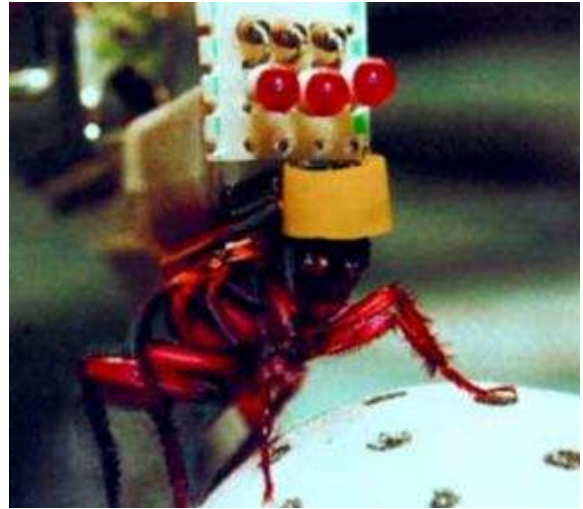


Рисунок 6.120 – Біоробот-тарган (Tokyo University, Японія)

Особливий клас мікророботів становлять біороботи. Це живі організми, переважно, дрібні тварини, керовані людиною чи автоматично шляхом впливу на їх нервову систему електричними сигналами через електроди, вживлені у відділи мозку. Типові призначення таких біороботів – радіаційна та хімічна розвідка, пошук вибухових речовин та людей під руїнами. Для цього вони оснащуються додатковими сенсорними системами, включаючи мікрофони, системи технічного зору, радіоприймачи.

На рис. 6.120 показаний приклад біоробота-таргана. Він обладнаний процесором, відеокамерою та призначений для виконання розвідувальних операцій. Основна перевага біороботів – можливість цілеспрямовано тривалий час (більше місяця) функціонувати без води та їжі, у тому числі в недоступних для людини місцях, використовуючи при цьому властиві живим організмам здібності до орієнтації, навігації, подолання перешкод тощо.

6.6. Техніка безпеки в робототехніці

У проблемі безпеки праці при використанні роботів можна виділити такі два аспекти:

- застосування роботів як засобу підвищення безпеки виробництва;
- забезпечення безпеки під час експлуатації самих роботів.

Перший аспект відповідає одному з першочергових призначень роботів – вивільнення людей від травмонебезпечної, шкідливої та важкої фізичної праці. При плануванні застосування роботів у виробництво такого роду технологічні операції отримують пріоритет і на таких операціях роботи застосовуються найбільш успішно.

У машинобудуванні до цих операцій, зокрема, належать:

- обслуговування ковальсько-пресового обладнання та металорізальних верстатів (особливо при обробці важких заготовок);
- обслуговування обладнання у гальванічному та ливарному виробництві, у виробництві виробів із пластмас;
- основні технологічні операції, як зварювання, фарбування, вантажно-розвантажувальні та транспортні роботи.

У немашинобудівних галузях такими операціями є встановлення кріплення у вибої, обслуговування відбійних та бурильних агрегатів у гірничодобувній та вугільній промисловості, обслуговування обладнання, фасування продукції у шкідливій для здоров'я атмосфері у хімічній та нафтохімічній промисловості, різні маніпуляційні операції у металургійній промисловості, атомній енергетиці та в екстремальних умовах (шкідливі випромінювання, вибухонебезпечність, граничні температури, загазованість, запиленість тощо).

У світі накопичений певний позитивний досвід підвищення безпеки праці за допомогою роботів, насамперед у машинобудуванні (на штампуванні, у гальванічному виробництві, у виробництві пластмасових виробів, на термообробці, вантажно-розвантажувальних та транспортно-складських операціях).

Другий аспект робототехніки з погляду безпеки праці – це забезпечення безпечної роботи самих роботів, які за певних умов можуть бути джерелом підвищеної небезпеки для людини, а також для устаткування, що з ними працює. В оповіданні «Скиталець» (1942 р.) американський фантаст Айзек Азімов сформулював три закони безпеки робототехніки:

- робот не повинен своєю дією або бездіяльністю завдавати шкоди людині;
- робот повинен коритися командам, які йому дає людина, крім тих випадків, коли ці команди суперечать першому закону;
- робот повинен дбати про свою безпеку, якщо це не суперечить першому та другому законам.

Перший випадок загибелі людини від дій робота був зареєстрований на японському заводі. Наладчик, який перебував у робочій зоні, усунув несправність фрезерного верстата з відключеним роботом та підключив робот до верстата. Маніпулятор, що рухався зі швидкістю близько 1 м/с, притиснув наладчика і роздав його. За даними статистики в Японії, де застосування роботів досягло найбільших розмірів, майже кожен третій робітник стикається з небезпеками, створюваними роботами. В основному ця небезпека викликається такими причинами:

- несправність власне роботів через порушення їхньої механічної міцності або відмов у системі керування;
- помилки програмування та налаштування, що викликають при експлуатації непередбачені рухи з виходом із огороженої робочої зони;
- втрати об'єкта маніпулювання та інші аварійні ситуації через перевищення допустимих динамічних режимів та перевантажень;
- порушення персоналом умов експлуатації робота (вхід у робочу зону, особливо при відключених засобах безпеки; відсутність особистих засобів безпеки, включаючи каску; перевищення допустимої вантажопідйомності; невідповідність виконання робота реальним умовам експлуатації; інші порушення технічних умов експлуатації робота або РТК);
- неправильна робота засобів безпеки, якими обладнані робот та його робоча зона (пристрої блокування, сигналізації, захисні огороження).

Статистика показує, що основна частина нещасних випадків пов'язана зі знаходженням обслуговуючого персоналу в робочій зоні під час програмування, налаштування та ремонту роботів. Нещасні випадки під час роботи робота в автоматичному режимі становлять лише одиниці відсотків. У середньому на 100 промислових роботів припадає один нещасний випадок на рік. Протягом 14 днів роботи РТК виникає приблизно 3 травмонебезпечні ситуації.

Заходи щодо забезпечення безпеки роботизованих виробництв повинні бути передбачені на всіх етапах їх створення і експлуатації, починаючи з

формулювання технічних вимог, та регламентовані відповідними нормативно-технічними документами, а також спеціальними документами з техніки безпеки. Загальні вимоги щодо безпеки при проєктуванні та експлуатації роботів стандартизовані.

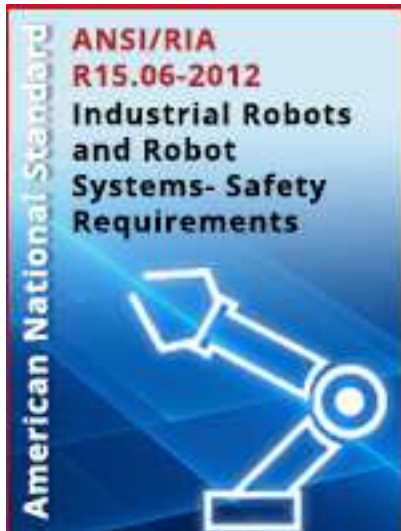


Рисунок 6.121 – Стандарт ANSI/RIA R15.06-2012

Американським національним інститутом стандартів (ANSI) та Асоціацією робототехнічної промисловості (RIA) розроблений стандарт ANSI/RIA R15.06-2012 «Промислові роботи та робототехнічні системи – Вимоги безпеки» що є фактичним стандартом безпеки роботів (рис. 6.121).

У вимогах щодо безпеки при експлуатації роботів, зокрема, регламентовано такі позиції:

- якщо при програмуванні та налагодженні робота потрібне перебування персоналу в його робочій зоні, то в цих режимах має бути передбачене зниження швидкості виконавчих пристроїв робота до 0,3 м/с;
 - пульт керування робота повинен видавати інформацію про режим його роботи, спрацювання блокувань, функціонування технологічного обладнання, що працює з ним, наявність збоїв у роботі, початок руху робота.
- Регламентовано також вимоги до запобіжних, блокувальних та захисних пристроїв, якими мають бути оснащені роботи. Щодо організації технологічних комплексів регламентуються:
- наявність блокуючих пристроїв і огорож, вимоги до них;
 - планування комплексу з урахуванням розмірів робочих зон роботів;
 - необхідність комплексної автоматизації всіх основних та допоміжних операцій з допустимістю збереження за оператором в основному лише деяких функцій керування та контролю;
 - вимоги до організації робочих місць операторів, до пультів керування та додаткових органів аварійного відключення, що розташовані в інших місцях.
- Щодо правил експлуатації роботів розроблено:
- вимоги до обслуговуючого персоналу та перелік його обов'язків;
 - інструкції з охорони праці.

До обов'язків обслуговуючого персоналу, зокрема, входять перевірка обладнання та блокувальних пристроїв перед початком роботи, обов'язкова реєстрація у спеціальному журналі всіх неполадок та аварійних ситуацій. При роботі ремонтного персоналу з роботом, що працює, необхідно знати місцезнаходження найближчої кнопки аварійної зупинки.

Персонал повинен бути захищений від небезпек, пов'язаних з обмеженим простором, за допомогою одного або кількох захисних пристроїв:

- механічні обмежувальні пристрої;
- немеханічні обмежувальні пристрої;
- пристрої безпеки з датчиками присутності;
- стаціонарні бар'єри (які запобігають контакту з частинами, що рухаються);
- бар'єрні огорожі, що блокуються.

Оцінка ризику повинна охоплювати всі потенційні ризики, які повинні бути усунені або мінімізовані шляхом застосування систем безпеки та огорожі. Основна огорожа зазвичай утворена фіксованою огорожею, що оточує осередок. Зазвичай вона має висоту 2 м із невеликим зазором внизу. Огорожа зазвичай складається з стовпів, закріплених на підлозі, до яких прикріплені захисні панелі. Панелі можуть бути з листового металу, сітки, оргскла або інших форм пластикових листів. Вибір матеріалу зазвичай залежить від галузі застосування та переваг замовника.

Для дугового зварювання також необхідно захистити персонал від яскравого світла зварювальної дуги. Тому використовуються суцільні панелі або зварна сітка з підкладкою у вигляді екрану. Пластикові панелі можна використовувати в чистіших умовах, оскільки вони забезпечують кращу загальну обробку осередку. Зварна сітка коштує дешевше і часто використовується в складніших умовах, де пластикові панелі швидко зношуються.

Для РТК, що використовують лазерне випромінювання, зазвичай потрібний повністю світлонепроникний корпус, щоб гарантувати відсутність можливості передачі лазерного променя за межі осередку. Застосування потужного лазера створило велику проблему, оскільки лазер, якщо його спрямувати на стінку огорожі навіть на дуже короткий період, прорізав би стіну. Щоб вирішити цю проблему, внутрішня стінка огорожі повністю покрита пластинами, які сприймають вплив лазера і змушують лазер вимикатися протягом секунд, тим самим роблячи систему безпечною.

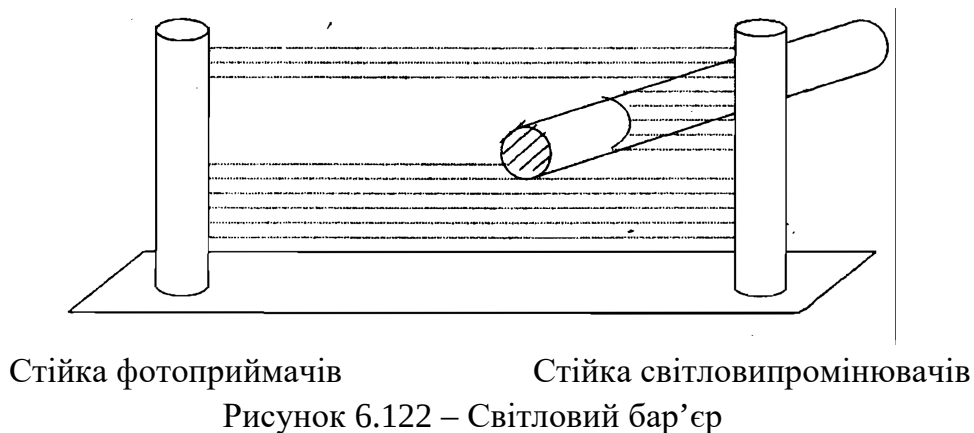
Основним засобом забезпечення безпеки є запобігання одночасної появи людини та рухомих елементів робота в одній точці робочої зони робота.

Пристрої захисту повинні зупиняти рух елементів робота в тих областях робочої зони, де знаходиться людина. При раптовому відключенні живлення рух ланок робота має припинятися. Уздовж траси руху підвісного робота повинні встановлюватися сітки, що захищають людей та обладнання від раптового падіння переносних об'єктів.

Пристрої контролю відпрацювання програми контролюють появу ланок робота у певних точках робочої зони. Ними можуть бути дорожні перемикачі, які спрацьовують при проходженні ланки через точку.

Пристрої контролю взаємодії робота з середовищем відключають приводи ланок при збільшенні опору руху, наприклад при торканні перешкоди однією з ланок. Для вимірювання навантаження застосовують силомоментні чи тактильні датчики.

Огородження робочої зони здійснюють за допомогою сіткових огорож, перехідних містків, світлових бар'єрів. Сіткові огорожі та перехідні містки застосовують для запобігання доступу людей до робочої зони. Світловий бар'єр є стійкою світловипромінювачів і стійкою фотоприймачів (рис. 6.122).



Для огороження РТК з усіх боків застосовують кілька світлових бар'єрів (рис. 6.123). Якщо кожен фотоприймач ФП отримує сигнал від відповідного світловипромінювача (СВ), то роботизований комплекс працює. Поява об'єкта між стійкою світловипромінювачів та стійкою фотоприймачів призводить до перетину світлового променя, внаслідок чого технологічне обладнання ТО та ПР вимикається.

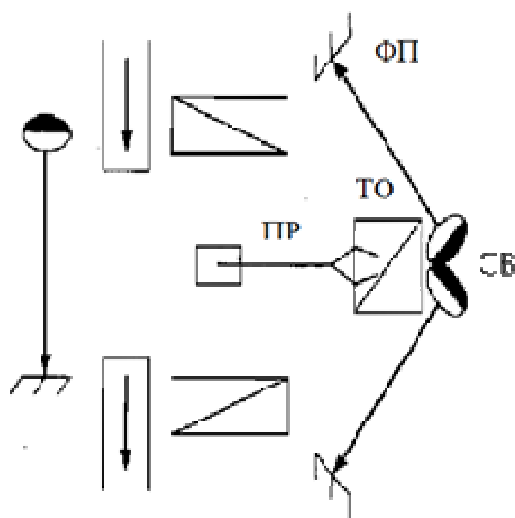


Рисунок 6.123 – Огородження
робочої зони світловими бар'єрами

На рис. 6.124 наведений вид зверху на роботизований осередок. Робот витягує деталі з прес-форми, поміщає їх на проміжну пластину, вимірює внутрішній та зовнішній діаметр та поміщає готові деталі на ваги. Хороші деталі передаються з осередку для виконання наступної операції, а браковані деталі викидаються у контейнер для сміття.

Утримання персоналу поза робочою зоною робота під час нормальної роботи має першорядне значення. У цьому прикладі це досягається за допомогою фізичних бар'єрів та пристрою виявлення присутності.

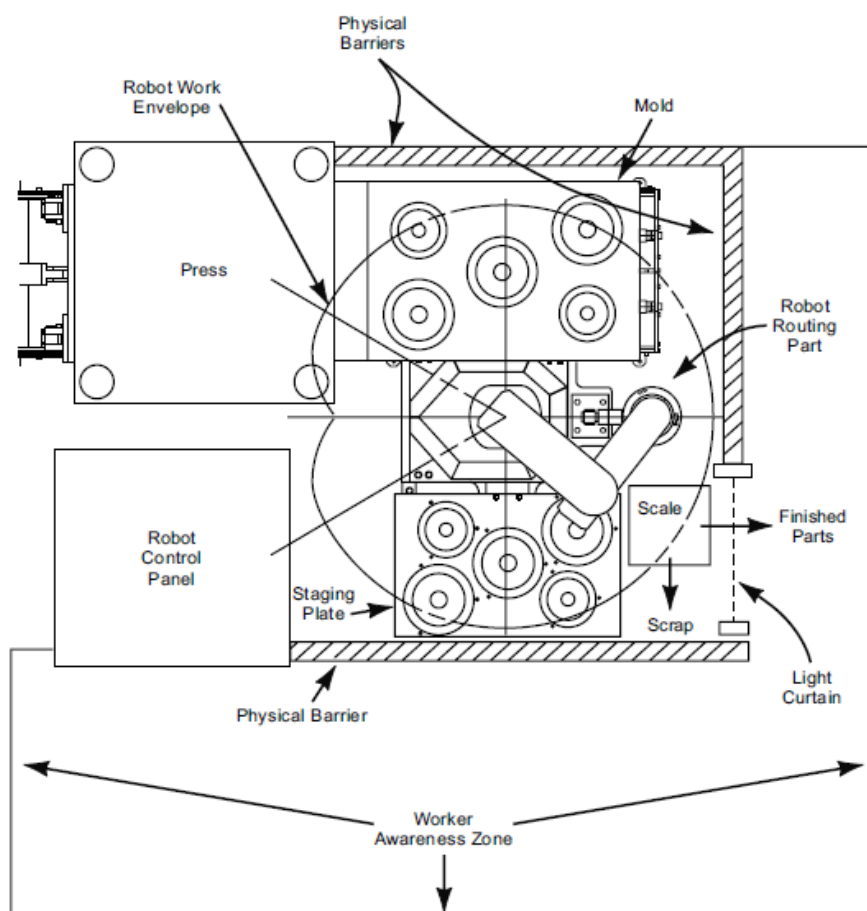


Рисунок 6.124 – Приклад системи захисту РТК

Фізичні бар'єри можуть включати практично будь-який тип огороження або перешкоди, які можуть перешкодити людині або частини тіла людини увійти в робочу зону робота, включаючи інше обладнання в осередку. Тому на рисунку панель керування робота та прес служать ефективними фізичними бар'єрами. Вони використовуються в поєднанні з іншими фізичними бар'єрами, такими як огороження із дрютяної сітки.

Фізичні бар'єри, що знімаються, повинні бути заблоковані з контролером осередку або джерелом живлення. Таким чином, якщо фізичний бар'єр буде видалено, робот чи інше обладнання не працюватимуть.

Світловий бар'єр є пристроєм виявлення присутності. Це електронний пристрій, який спрямовує синхронізовані паралельні світлові промені на приймач. Якщо непрозорий об'єкт перериває промінь, контролер світлової завіси надсилає стоп-сигнал контролеру осередка робота. Таким чином, він запобігає доступу до робочої зони, коли робот рухається, але дозволяє легко отримати доступ до робочої зони в інший час. Інші типи пристроїв виявлення присутності включають сенсорні накладки тиску і ультразвукові або лазерні датчики наближення.

За межами фізичних бар'єрів є зона обізнаності працівників. Мета визначення зони обізнаності працівників – інформувати персонал про те, що вони знаходяться поблизу потенційної небезпеки. Периметр цієї області може бути позначений жовтою запобіжною фарбою у поєднанні з миготливими вогнями, фізичними бар'єрами, такими як стійки та канати, та попереджувальними знаками. Доступ до цієї області повинен бути обмежений для операторів осередків, програмістів та обслуговуючого персоналу.

Часто перемикач просто встановлюється на роботі, тому коли робот стикається з чимось, перемикач натискається, і пристрій керування може виявити, що робот увійшов у контакт з якимось об'єктом, і вжити відповідних дій. Бампер на роботі, що наведений на рис. 6.125, є прикладом датчика дотику. Коли робот стикається зі стіною, бампер вдаряється об мікроперемикач, який формує сигнал контролеру робота, що робот уперся у стіну. Інші типи датчиків торкання використовуються всередині, щоб повідомити робот, коли рука висунута надто далеко.

ПР повинні бути захищені від несприятливих умов роботи. Серед шкідливих впливів, яких можуть зазнавати роботи, можна назвати такі:

- радіація;

- екстремальні температури (ливарні цехи);
- абразивні частинки (шліфування);
- іскри та бризки розплавленого металу (зварювання, лиття);
- частинки фарби (розпилення фарби);
- їдкі хімікати (лиття за моделями);
- удари та вібрація (кування);
- електричний шум;
- вода та інші рідини (від розпилювачів охолоджуючої рідини та миття);
- пар (від парового очищення).

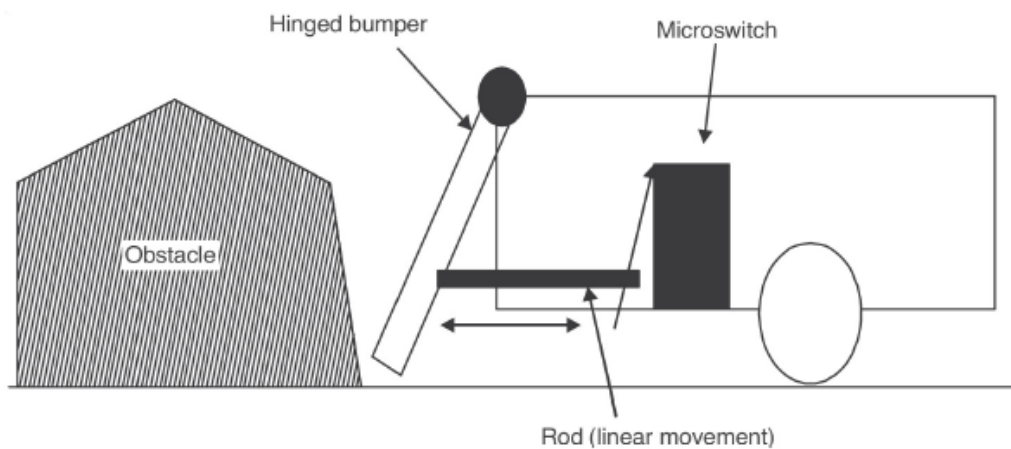


Рисунок 6.125 – Роботизована платформа з датчиком торкання

Запобіжні заходи, які необхідно дотримуватися, такі ж, як і для будь-якої машини: гнучкі покриття на з'єднаннях, циркуляція відфільтрованого повітря під позитивним тиском по всьому роботі, негорючі та корозійно-стійкі матеріали, мережеві фільтри або джерела безперебійного живлення тощо.

6.7. Перспективи розвитку робототехніки

На початку розвитку робототехніки визначалися дві досить слабо пов'язані цілі – *прикладна* та *фундаментальна*.

Прикладна ціль була об'єктивно обумовлена розвитком сучасного виробництва, саме переходом до комплексної гнучкої автоматизації, до гнучкого автоматизованого виробництва. Одним з першочергових завдань при цьому стало створення виявленої в ході цих робіт недостатньої ланки в пе-

реліку компонентів таких виробництв. Ця ланка повинна замінювати людину при виконанні різних маніпуляційних операцій – основних технологічних та допоміжних. З цього завдання відразу ж виділилося самостійне завдання звільнення людей від виконання робіт у небезпечних та шкідливих умовах.

Подальший розвиток робототехніки поставив окреме завдання створення засобів робототехніки, призначених для робіт, які принципово не можуть виконуватися за допомогою або навіть просто в присутності людей (далекій космос, глибини океану, нові інтенсивні технології тощо). Виникли екстремальна робототехніка, медична мікроробототехніка, біоробототехніка, крокуючі машини та інші спеціальні розділи робототехніки.

З'явилося роботобудування з міжнародною кооперацією та спеціалізацією. Поступово склалися певні принципи побудови, проектування та застосування засобів робототехніки та роботизованих технічних комплексів. Визначилися галузі застосування та перспективи їх розширення, засновані на реальних технічних та економічних характеристиках цієї техніки.

Принципове питання – яким шляхом йти робототехніці – у бік підвищення універсальності роботів чи, навпаки, їх спеціалізації, вирішилося визнанням як основного – модульного принципу їх побудови. Цей принцип дозволяє промисловості оперативно постачати навіть у поодиноких кількостях роботи, зібрані з уніфікованих модулів для виконання найрізноманітніших технологічних операцій. Таким чином, приваблива ідея створення порівняно невеликого сімейства універсальних роботів, близьких до їх прототипу – людині, була замінена ідеєю універсального набору компонентів роботів – модулів.

Сьогодні роботи застосовуються практично у всіх сферах людської діяльності, а рівень робототехніки є важливим показником науково-технічного, промислового та оборонного потенціалів кожної країни.

Фундаментальна мета робототехніки – це експериментальне вивчення та відтворення феномену розумної поведінки живих істот. Надалі ця проблема призвела до появи самостійного науково-технічного спрямування, що отримало назву «штучний інтелект». Те, що ця проблематика є найбільш актуальною саме для робототехніки, впливає з вихідної ідеї цієї галузі знань, як альтернативи зайнятої фізичною працею людини.

Перший досвід створення таких машин показав недостатність, і навіть примітивність сучасної теорії та техніки автоматичного керування та теорії

інформації в порівнянні з завданнями, розв'язуваними людиною при виконанні навіть найпростіших операцій. У зв'язку з цим були розгорнуті інтенсивні експериментальні дослідження з об'єктами типу «око-рука» та різними сенсорними мобільними об'єктами, які тривають і сьогодні. Останнім часом до них додалися дослідження групової поведінки подібних об'єктів (мультіагентні системи, ігри роботів і т.п.).

Цей напрямок у робототехніці безпосередньо відповідає основній ідеї кібернетики про спільність інформаційно-керівних процесів у техніці та в живому світі. Однією з цілей цього напрямку в робототехніці є відтворення процесу еволюції живої природи, оскільки саме робот є технічною системою, яка реалізує тріаду «сенсори-мозок-активатори», замкнуту через зовнішнє середовище. Кінцевим науково-технічним результатом цих досліджень мають стати принципи та методика самовдосконалення інтелектуальних технічних систем типу «робот».

Проте вирішити цю проблему у межах однієї робототехніки нереально. Тут необхідна скоординована взаємодія багатьох суміжних науково-технічних напрямів, хоча б тому, що її рішення вимагає створення принципово нового матеріально-технічного забезпечення не лише для інформаційно-керуючих систем (технічні нейроподібні структури тощо), але й для інших компонентів названої вище тріади – виконавчих систем та сенсорів.

Подібно до того, як робототехніка стала однією з спонукальних причин і полігоном розвитку робіт з проблеми штучного інтелекту, вона ж ініціювала проблему «штучного м'яза», як проблему створення принципово нових приводних виконавчих систем. Сучасні приводи більш ніж на порядок поступаються за масо-габаритними характеристиками поперечно-смугогим м'язам тварин. Йдеться про принципово новий підхід до побудови приводів, також запозичений у живої природи і заснований на паралельно-послідовній роботі сотень і тисяч елементарних мікроприводів.

Аналогічна проблема стоїть перед сенсорними системами. Ця проблема полягає у переході до мікромодульної побудови. Її успішне рішення матиме революційне значення не тільки для робототехніки, але й для машинобудування загалом.

Прикладна робототехніка у своєму розвитку практично вичерпала науковий заділ, який був наданий їй, насамперед теорією автоматичного керування та інформатикою, а також технічний заділ у вигляді приводів та систем ЧПК, запозичений у верстатобудівників. Сьогодні подальший розвиток

практичної робототехніки майже повністю залежить від успіхів у вирішенні перерахованих фундаментальних проблем.

В даний час визначився комплекс найсерйозніших науково-технічних проблем, які стоять на шляху до царства штучного розуму та роботів. Генеральний напрямок подальшого розвитку робототехніки – це, перш за все комплексна мініатюризація компонентів та інтелектуалізація у вигляді розподіленого інтелекту, що пронизує всі системи роботів від сенсорики до приводів і навіть до конструктивних матеріалів штучної «шкіри» роботів.

Обидві ці проблеми відповідають загальним взаємопов'язаним тенденціям розвитку техніки загалом. Саме поняття інтелектуалізації (штучного інтелекту) могло виникнути і набути реального сенсу лише на певному етапі розвитку мініатюризації. Процес мініатюризації спочатку був пов'язаний з процесом підвищення точності і роздільної здатності виробів, що створюються. Саме останнє є основою створення все більш малорозмірних виробів.

Процес мініатюризації на першому етапі пов'язаний з механікою і породжений розвитком технологій, що підвищують точність виготовлення деталей. Цей процес почався з виробництва замків, потім настала черга годинниківів. Саме вони створили перші механічні вироби лічильно-вирішальної (обчислювальної) техніки – арифмометри, інтегратори тощо. У 1950-ті роки механічні інтегратори змінилися на електромеханічні (у складі перших електромеханічних обчислювальних машин).

Другий етап мініатюризації розпочався на базі двовірних (2D) технологій мікроелектроніки, пов'язаної з інтелектуалізацією. Символ цього етапу – багатошарові плати друкарського монтажу з мікронною точністю.

На рубежі XXI століття розпочався третій етап мініатюризації на базі 3D мікросистемних технологій. Це вже не електроніка, а тривимірна електромеханіка – *мікроелектромеханічні системи*.

Кожен із перерахованих етапів не змінював попередній, а надбудовував над ним новий рівень. Так, 3D-технології розвинулися на базі 2D-технологій і додали механіку рухів з мікронною розподільною здатністю. Наступний етап – вже досліджуваний етап нанотехнологій з молекулярною роздільною здатністю та використанням органіки, тобто симбіозу живого та техніки (біокомп'ютери тощо).

Розглянутий процес, окрім можливості створення все більш малорозмірних міні-, мікро- та наносистем, створює технічну базу для розробки

нового покоління та великомасштабних об'єктів аж до важкого машинобудування, наділених принципово новими, у тому числі інтелектуальними, функціональними можливостями та технічними характеристиками.

Інтелектуалізація як процес удосконалення інформаційно-керуючих можливостей техніки також пройшла три етапи: програмне керування, адаптивне керування та інтелектуальне керування на базі мікроелектронної техніки та технологій штучного інтелекту. При цьому штучний інтелект поступово охопив всі функції технічних систем. Як і в процесі мініатюризації, тут кожен наступний етап не заміняв попередній, а поглинав його: адаптивне керування утворює наступний рівень керування над програмним, а інтелектуальне включає і програмне керування, і адаптацію.

Розглянутий процес мініатюризації та інтелектуалізації техніки починається, перш за все, з її основних компонентів, замкнених в кільце через зовнішнє середовище (сенсорні, інформаційно-керуючі та виконавчі), потім зв'язок та енергоживлення.

У загальному випадку їхня сукупність утворює відкриту систему, інформаційно та енергетично залежну від навколишнього середовища, включаючи й іншу подібну техніку. В основі мініатюризації цих компонентів – підвищення точності виготовлення деталей.

Сьогодні в цьому процесі лідирує обчислювальна техніка на базі мікроелектроніки. Насамперед, це інформаційно-керуючі компоненти, з певним відставанням слідує сенсорика та зв'язок. Їхня загальна база – 2D-мікротехнології. Якісний перехід до 3D-мікротехнологій, що почався, особливо важливий для сенсорики та силових компонентів (виконавчих та енергоживлення). Загальна тенденція розвитку передбачає технологічне зближення всіх компонентів та його конструктивне об'єднання в мехатронні системи.

Подальша мініатюризація веде до переходу на новий нанорівень молекулярної розмірності та відповідно до аналогічного укрупнення інтегральних *наноелектромеханічних систем*.

Цифровізація та інші досягнення в галузі робототехніки та розробки AGV (Automated (Automatic) Guided Vehicle) створюють можливості розвитку високо-гнучкого виробництва. AGV (автономні керовані транспортні засоби), модернізовані з використанням новітніх навігаційних технологій, зайняли ключову роль у цифровому виробництві, яке обходиться без конвеєрних систем.

Постійний розвиток робототехніки упродовж останніх десятиліть призвів до збільшення швидкодії ПР. З настанням Industry 4.0 (Промисловість 4.0, четверта промислова революція) динаміка розвитку суттєво збільшилась. Industry 4.0 це поняття, що означає розвиток і злиття автоматизованого виробництва, обміну даних і виробничих технологій в єдину саморегульовану систему, з як найменшим або взагалі відсутнім втручанням людини у виробничий процес. Термін був визначений як «збірне поняття для технологій і концепцій організації ланцюжка створення додаткової вартості» із використанням кіберфізичних систем, Інтернету речей, Інтернету послуг, розумних заводів. Фаза промислової революції, яка характеризується злиттям технологій, що розмиває межі між фізичною, цифровою та біологічною сферами.

Експерти визначають Industry 4.0 як інтеграцію людей, процесів і продуктів (включаючи послуги), пов'язаних у режимі реального часу за допомогою цифрових рішень. Вона спирається на кілька технологічних можливостей, таких як:

- масове підключення за допомогою інтернет-з'єднання між пристроями/машинами;
- хмарні рішення та обчислення;
- інтернет речей (IoT) – обмін даними за допомогою галузевих комунікаційних протоколів для безпечного спілкування через мережу;
- кіберфізичні системи, які дозволяють промисловим пристроям безпечно підключатися та обмінюватися даними;
- функціональність машинного навчання, що дозволяє промисловим машинам вчитися у оточення та діяти на основі цих знань;
- віртуальна реальність (VR) використовує відео/зображення, відтворені комп'ютерами, для імітації реального середовища для навчальних цілей або візуалізації. VR можна використовувати як ефективний інструмент для співпраці між командами, розташованими в різних регіонах світу;
- доповнена реальність (AR) використовує створені комп'ютером удосконалення, щоб покращити уявлення користувачів про своє фізичне середовище;
- блокчейн – це ще одна галузева технологія, яка сьогодні набирає обертів. Блокчейн – це цифровий реєстр для запису транзакцій, угод тощо, тому його безпека гарантується шифруванням і розподілом по мережах.

Галузеві пристрої IoT швидко стають стандартом серед виробників у всьому світі через величезні переваги цього нового покоління машин та інструментів.

Перераховані вище технології дозволяють компаніям перейти від серійного виробництва та використовувати дані в режимі реального часу шляхом інтеграції різних пристроїв, систем і процесів. Виробники можуть покращити ефективність і загальні можливості планування, оскільки тепер вони можуть планувати технічне обслуговування на основі фактичного попиту.

Деякі істотні переваги включають:

- покращення якості виробництва;
- зниження витрат за рахунок усунення непотрібних завдань;
- надання компаніям можливостей для збільшення доходу за рахунок підвищення продуктивності;
- підвищення ефективності за рахунок автоматизації процесів;
- можливість для виробників інтегрувати промислові пристрої та системи;
- скорочення часу, необхідного для доведення продукту від проектування до виробництва;
- оптимізація управління запасами.

Багато необхідних надгнучких компонентів автоматизації або вже доступні протягом деякого часу, або можуть бути адаптовані до нових виробничих середовищ з мінімальними зусиллями і витратами.

Лише нещодавно AGV (автономні керовані транспортні засоби), модернізовані з використанням новітніх навігаційних технологій, стали відігравати ключову роль у цифровому мережному виробництві, яке обходиться без конвеєрних систем.

Відсутність цілісних цифрових мережних рішень також перешкоджала швидкому застосуванню спільних роботизованих рішень.

Співпраця людини та робота (HRC – Human-robot collaboration) відносно повільно прогресувала у промисловості. Тільки зараз, з інтеграцією виробничих осередків з колаборативними роботами до інтелектуальних гнучких підприємств, продажі цих роботів починають набирати обертів. Промислові програми співробітництва людини і робота включають колаборативні роботи або коботи, які фізично взаємодіють з людьми в загальному робочому просторі для виконання таких завдань, як спільна маніпуляція або передача об'єктів.

У деяких новаторських секторах, таких як автомобільна промисловість, цифрова трансформація вже дозволила реалізувати нові концепції виробництва. Саме тут ми спостерігаємо поступовий занепад складальної лінії, яка домінувала у виробництві автомобілів понад 100 років. Майбутнє належить цифровій мережній взаємодії стаціонарних та мобільних роботів, коботів та AGV, які через свою необмежену гнучкість надають нові свободи у виробництві.

На сучасних складальних лініях автомобілів технологія фіксованих конвеєрів була замінена на високогнучкі транспортні рішення з використанням AGV. Кузови автомобілів транспортуються на безпілотних транспортних системах зі змінною швидкістю. Їх можна від'єднати від потоку складальної лінії та перенаправити на складальні станції, де виконуються різні завдання. Таким чином, можна збирати індивідуально оснащені варіанти. При повній зміні моделі потрібно лише перепрограмувати робота і AGV, а не демонтувати всю виробничу лінію.

Цей прорив знаходить своє застосування також в інших секторах. На розумному підприємстві різні продукти можуть збиратися на одній і тій же лінії тому, що традиційної виробничої лінії більше не існує. Натомість AGV і AMR (автономні мобільні роботи) переміщуються між виробничими ділянками та автоматизованими осередками, в яких звичайні та колаборативні роботи працюють пліч-о-пліч з людьми (рис. 6.126).



Рисунок 6.126 – Виробництво з автономним та колаборативним роботом

Така високогнучка транспортна та виробнича логістика пропонують ідеальні рішення для сучасних технологічних завдань виробництва: невеликі партії, індивідуальна продукція, часта зміна моделей та одночасне складання різних продуктів не становлять проблем для розумного підприємства. Можна бути впевненими, що в деяких галузях, особливо в автомобільній, медичній/фармацевтичній, відбудуться зміни в ланцюжках постачання.

Піонер у цьому новому напрямку – компанія Stäubli Robotics (Швейцарія). Stäubli Robotics – провідне підприємство у галузі промислової автоматизації, яке надає інженерну та технічну підтримку. Компанія надає комплексні рішення для цифрових виробничих ліній та заводів. Асортимент продукції було розширено за межі стандартної кінематики і тепер включає інноваційні AGV, AMR, а також коботи POWER для взаємодії людини і робота.

З появою в 2015 році ПР серії TX2 із шістьма осями (рис. 6.127) був взятий курс на реалізацію і забезпечення цифрового мережного виробництва. Дані роботів постійно реєструються та можуть бути доступні системам керування вищого рівня через OPC UA. Це створило основу для розгортання машин в цифрових мережних виробничих лініях. Усі наступні покоління роботів, такі як недавно випущена серія TS2 з чотирма осями, працюють за цим принципом (рис. 6.128).



Рисунок 6.127 – TX2-90 робот



Рисунок 6.128 – TS2 SCARA робот

Шестиосьові роботи Stäubli TX2 безперервно реєструють близько 2000 параметрів даних, включаючи робочі температури по кожній осі, значення швидкості та прискорення, значення крутного моменту та багато іншого. За допомогою інструменту Stäubli Optimize Lab або виробничої системи вищого рівня користувачі можуть у будь-який час отримати огляд профілю навантаження своїх роботів та окремих осей. Таким чином, можна уникнути перевантажень, виключивши змінні перешкоди до виникнення пошкоджень. Крім моніторингу продуктивності, дані можна використовувати для високо економічних концепцій предиктивного обслуговування (обслуговування обладнання, засноване на діагностиці та контролі його стану).

Встановивши на борт безліч складних технологій безпеки, Stäubli успішно адаптувала свої передові шестиосьові роботи для взаємодії з людиною, зберігши їх повну продуктивність. Під назвою TX2touch вони входять до найшвидших коботів у світі. TX2touch освоїв усі рівні HRC і є базовим блоком для мобільних роботизованих систем. У цьому випадку роботи встановлюються на керовану коботом мобільну платформу (рис. 6.129).

В асортименті продукції Stäubli є різні типи AGV, такі як AMR та колаборативні AMR, які здатні зробити революцію у внутрішньовиробничій логістиці, сфері діяльності, яка досі була лише мінімально автоматизованою. Це сприятиме впровадженню інтегрованих рішень Industry 4.0, які виведуть гнучкість та продуктивність на новий рівень.



Рисунок 6.129 – Кобот TX2touch-90

Всі AGV та мобільні платформи Stäubli мають одну унікальну характеристику: вони оснащені запатентованою технологією приводу, яка гарантує максимальну точність.

Навіть найбільші AGV вантажопідйомністю до 500 тон можуть пересуватися автономно з точністю до кількох міліметрів (рис. 6.130). Мобільна платформа Auto-Trailer дозволяє операторам заводів відмовитись від використання дизельних вантажівок на своїх територіях. Ця мобільна платформа може легко приєднуватися

за допомогою інтегрованої сенсорної системи до напівпричепа та доставляти його до місця призначення.

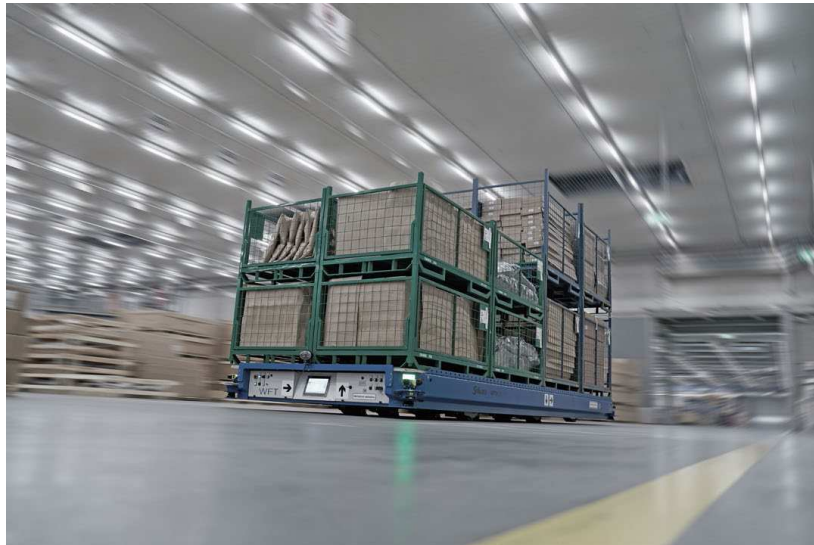


Рисунок 6.130 – AutoBox, переміщення піддонів в приміщенні

AutoTrailer використовує лазерну навігацію, щоб орієнтуватися за межами заводських будівель без необхідності у вказівках чи розмітці. Транспортування за допомогою цих електромобілів має ту перевагу, що вони не тільки значно екологічніші, а й безпечніші, оскільки усувають потребу в окремих поїздках вантажівок територією заводу.

Крім того, завантаження та розвантаження сотень напівпричепів може краще координуватися за допомогою головного фреймового комп'ютера, що також унеможлиблює час очікування для водіїв вантажівок, тим самим поєднуючи економічну ефективність зі стійкістю.

Багато інших інноваційних рішень, що включають штучний інтелект, вказують шлях у майбутнє, в якому виробництво радикально змінюватиметься з феноменальною швидкістю. Такі фактори, як вартість робочої сили та місце розташування виробництва, у майбутньому відіграватимуть набагато менш важливу роль, тоді як такі аспекти, як можливості доставки, стійкість, екологія та менший вуглецевий слід у результаті скорочення транспортних маршрутів, все більше виходять на перший план.

Контрольні запитання

1. Назвіть типи підрозділів технологічних комплексів з роботами.
2. Назвіть основні схеми компонування комплексів з роботами.
3. Поясніть призначення верхнього рівня керування РТК: оперативно-календарне планування та контроль функціонування.
4. Назвіть основні етапи проектування технологічних комплексів.
5. Поясніть особливості роботизації діючого виробництва.
6. Дайте визначення гнучкої виробничої системи. Назвіть види ГВС.
7. Назвіть види РТК з ПР на основних технологічних операціях.
8. Поясніть необхідність застосування адаптивних ПР при виконанні складальних операцій.
9. Поясніть необхідність застосування адаптивних ПР при виконанні дугового зварювання.
10. Назвіть види РТК з ПР на допоміжних операціях.
11. Особливості взаємодії основного технологічного обладнання і ПР на допоміжних операціях.
12. Поясніть необхідність використання адаптивних ПР на допоміжних операціях.
13. Назвіть основні області застосування ПР у ливарному виробництві.
14. Назвіть основні області застосування ПР у немашинобудівних галузях промисловості.
15. Дайте приклади застосування ПР у немашинобудівних галузях промисловості.
16. Назвіть основні області застосування ПР у непромислових галузях.
17. Дайте приклади застосування ПР у непромислових галузях.
18. Дайте перелік робіт та технологічних операцій в промисловості в екстремальних умовах.
19. Назвіть основні аспекти безпеки праці при використанні ПР.
20. Назвіть закони безпеки робототехніки.
21. Назвіть основні види захисних пристроїв.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Аніщенко М. В. Системи числового програмного керування : підручник. Харків : Факт, 2024. 416 с.
2. Цвіркун Л. І. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. 3-тє вид., перероб. і допов. Дніпро : НГУ, 2017. 224 с.
3. Ніколайчук В. М. Основи робототехніки : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2008. 76 с.
4. Павленко І. І. Структура промислових роботів. Кіровоград : РВЛ, 1998. – 98 с.
5. Пелевін Л. Є. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні : підручник. Київ : Інтерсервіс, 2016. 258 с.
6. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технологічні комплекси: навч. посіб. Кіровоград : КНТУ, 2010. 392 с.
7. Поліщук М. М., Ткач М.М. Робототехнічні системи: проєктування і моделювання : навч. посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології». Електронне видання. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 112 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/79c84ed9-6378-48be-95dc-e00452017708> (дата звернення: 16.09.2024).
8. Михайлов Є. П. Конспект лекцій з дисципліни «Комп'ютерні методи розрахунку роботів» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, спеціальність: 131 – Прикладна механіка, освітні програми: Мехатроніка та промислові роботи, Інженерія логістичних систем. Одеса : ОНПУ, 2021. 112 с.
9. Теряєв В. І., Король С. В. Системи програмного та слідкуючого керування рухом : підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність». Електронне видання. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/36433/1/IOAV_verstaty_ChPK.pdf (дата звернення: 16.09.2024).
10. Richard P Paul. Robot manipulators: mathematics, programming and control. The computer control of robot manipulators. Електронне видання. URL: <https://kupdf.net/download/mit-press-series-in-artificial-intelligence-richard-p-paul-robot-manipulators-mathematics-programming-and-control-the->

[computer-control-of-robot-manipulators-mit-press-1981-pdf_58ff9a61dc0d60f67d959ecd_pdf](http://www.robot.bmstu.ru/files/books/Robot%20Manipulator%20Control%20Theory%20and%20Practice%20-%20Frank%20L.Lewis.pdf) (дата звернення: 05.09.2024).

11. FL Lewis, CT Abdallah, DM Dawson. Control of Robot Manipulators. Електронне видання. URL: <http://www.robot.bmstu.ru/files/books/Robot%20Manipulator%20Control%20Theory%20and%20Practice%20-%20Frank%20L.Lewis.pdf> (дата звернення: 05.09.2024).

12. Zongwei Luo. Robotics, automation, and control in industrial and service settings. Електронне видання. URL: <https://dlib.hust.edu.vn/bitstream/HUST/18626/3/OER000000210.pdf> (дата звернення: 05.09.2024).

13. Peter Corke. Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB®. Second, completely revised, extended and updated edition. Електронне видання. URL: <https://ru.scribd.com/document/751690193/Full-download-Robotics-Vision-and-Control-Fundamental-Algorithms-In-MATLAB-Peter-Corke-pdf-docx> (дата звернення: 05.09.2024).

14. Martin Hägele, Klas Nilsson, J. Norberto Pires. Industrial Robotics. Електронне видання. URL: https://www.researchgate.net/publication/305719517_Industrial_Robotics (дата звернення: 05.09.2024).

15. Todd, DJ. Fundamentals of robot technology: an introduction to industrial robots, teleoperators and robot vehicles. Електронне видання. URL: <https://www.studocu.com/row/document/kabale-university/mechanical-engineering/fundamentals-of-robot-technology-an-introduction-to-industrial-robots-teleoperators-and-robot-vehicles-pdfdrive/16533124> (дата звернення: 05.09.2024).

16. Mike Wilson. Implementation of robot systems. An introduction to robotics, automation, and successful systems integration in manufacturing. Електронне видання. URL: <https://www.pdfdrive.com/implementation-of-robot-systems-an-introduction-to-robotics-automation-and-successful-systems-integration-in-manufacturing-d186488030.html> (дата звернення: 05.09.2024).

Навчальне видання

АНИЩЕНКО Микола Васильович

ПРОМИСЛОВІ РОБОТИ

Навчальний посібник

для студентів освітньої програми

«Електропривод, мехатроніка та робототехніка»

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Відповідальний за випуск доц. Воробйов Б. В.

Роботу до видання рекомендував доц. Обруч І. В.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 1

Підп. до друку _____ р.

Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 20

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Електронне видання

