

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни

«Основи мехатроніки»

для студентів спеціальності 133

«Галузеве машинобудування»

(«Колісні та гусеничні транспортні засоби»),
усіх форм навчання

Частина 2 - змістовий модуль 1.

Промислова робототехніка

2020

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни «Основи мехатроніки» для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» («Колісні та гусеничні транспортні засоби») усіх форм навчання. Частина 2 - змістовий модуль 1. Промислова робототехніка / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 98 с.

Укладачі: О.М. Артюх, доцент, канд.техн.наук;
О.В. Дударенко, доцент, канд.техн.наук;
А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук;
А.В. Щербина, доцент, канд.техн.наук

Рецензенти: О.С. Слюсаров, доцент, канд.техн.наук;
С.М. Турпак, професор, д-р.техн.наук

Відповідальний за випуск: А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук

Затверджено
на засіданні кафедри «Автомобілі»
Протокол № 8
від « 30 » червня 2020.

Рекомендовано для видання
НМК Транспортного факультету
Протокол № 88
від « 31 » серпня 2020.

ЗМІСТ**Частина 2**

Вступ	90
Тематичний план лекційних занять	92
Лекція № 4. Структура і принципи побудови мехатронних систем	95
Лекція № 5. Мехатронні модулі.....	120
Лекція № 6. Мехатронні системи.....	142
Лекція № 7. Інформаційні технології в мехатроніці	166
Рекомендована література	180
Базова	180
Допоміжна.....	180
Інформаційні ресурси	183

ВСТУП

На сьогоднішній день мехатроніка є напрямком сучасної науки, техніки і технології який виключно динамічно розвивається і визначає вигляд техносфери нового століття. Головним завданням мехатроніки є створення інтелектуальних машин і рухомих систем, які мають якісно нові функції і властивості.

Провідною тенденцією розвитку сучасного машинобудування є перехід від механіки до мехатроніки. Вона особливо чітко проявляється при створенні нового покоління автотранспортних засобів, інтелектуальних роботів і реконфігурованого обладнання, авіаційної та військової техніки, мікросистем і медичного обладнання.

У всьому світі відзначається швидко зростаючий інтерес до мехатроніки в освітній, науково-дослідній та виробничій сферах. Обсяги світового виробництва мехатронних модулів і систем щорічно збільшуються, охоплюючи все нові сфери професійної і повсякденному житті сучасної людини.

Відповідно до оригінального визначення мехатроніки, запропонованого компанією Yasakawa Electric Company, та визначень, що з'явилися з тих пір, багато інженерних продуктів, розроблених і виготовлених за останні роки, можна класифікувати як мехатронні системи оскільки вони інтегрують механічні та електричні системи.

У документах про заявку на торговельну марку, Yasakawa визначила мехатроніку таким чином: слово «mechatronics» складається з «mecha» від механізму, та «tronics» від електроніки.

Іншими словами, технології та розроблені вироби надалі будуть все активніше та органічніше включати електроніку в механізми, що робить неможливим визначити, де закінчується одне, а починається інше. Адже поява мікрокомп'ютерів, вбудованих комп'ютерів та пов'язаних з цим інформаційних технологій та вдосконалення програмного забезпечення, призвело до значних успіхів у галузі мехатроніки.

Наприклад, розглянемо автомобіль. У ранніх конструкціях автомобілів радіо було єдиною значною електронікою в ньому. Усі інші функції були повністю механічними або електричними. Сьогодні в автомобілі є близько 30-60 мікроконтролерів. А із прагненням до розробки модульних систем для «plug-n-play» підсистем мехатроніки, очікується тільки зростання кількості мікроконтролерів в автомобілі.

Даний лекційний курс «Основи мехатроніки» є вступом до такої

яскравої і цікавої галузі інженерної науки як мехатроніка. Оскільки поділ що історично існував між різними галузями інженерії та інформатики стає все менш чітко визначеним, галузь мехатроніки стає своєрідною дорожньою картою для студентів-інженерів, які навчаються в рамках традиційної структури більшості інженерних спеціальностей.

Очевидно й те, що заняття з мехатроніки в університетському середовищі розширюються у всьому світі. Це відображає перелік бібліографічних посилань наведений в даному курсі лекцій, який включає авторів з усього світу.

Даний курс лекцій з мехатроніки був задуманий як опорний ресурс для спеціальності «Галузеве машинобудування», зі спеціалізацією «Колісні та гусеничні транспортні засоби». Тому в ньому викладені не тільки загальні питання побудови сучасних мехатронних систем загального машинобудування, а й розглянуті варіанти реалізації автоматичного електронного керування механічними вузлами, системами та агрегатами сучасних автотransпортних засобів.

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

Загальний об'єм курсу становить 30 годин і складається з двох змістових модулів. Даний конспект лекцій дисципліни «Основи мехатроніки» складається з п'яти частин, і розроблений відповідно до:

Робоча програма з дисципліни «Основи мехатроніки» для студентів за напрямом підготовки 6.050503 – «Машинобудування», спеціальністю 133 - Галузеве машинобудування (Колісні та гусеничні транспортні засоби), усіх форм навчання. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 22 с.

Нижче наведено назву змістового модуля дисципліни «Основи мехатроніки», найменування тем лекційних занять в модулі і вказано кількість годин аудиторних занять, для студентів денної форми навчання, окремо для кожної лекції.

Для кожної теми лекції вказано перелік питань які треба розглянути під час даної лекції. Слід враховувати те, що в даному конспекті лекцій приведено лише стислий огляд питань кожної лекції. Крім того навчальним планом дисципліни передбачено активну самостійну роботу студентів за вказаними темами курсу.

Вкінці кожної лекції наведено перелік питань для самоперевірки. Для самостійної роботи студенту слід користуватися рекомендованою літературою для вивчення дисципліни, перелік якої наведено в кінці даного конспекту лекцій, а також використовувати розроблені методичні вказівки:

Методичні вказівки з вивчення дисципліни «Основи мехатроніки» та виконання контрольних завдань, для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» («Колісні та гусеничні транспортні засоби»), усіх форм навчання / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 62 с.

Змістовий модуль 1. Промислова робототехніка.**Тема 1. Вступ до курсу (2 год.)**

Поняття про мехатроніку. Мета і предмет мехатроніки як галузі науки і техніки. Поняття мехатронних технологій. Функціональні та технічні показники мехатронних модулів. Службові та функціональні завдання мехатронних машин і систем.

Тема 2. Історія розвитку механічних, електронних і мехатронних систем (2 год.)

Механічні пристрої в доісторичні часи. Передісторія робототехніки. Середньовічні автомати. Поява і розвиток систем автоматичного керування зі зворотним зв'язком. Розвиток транспортних мехатронних систем. Поява нового науково-технічного напрямку - робототехніки. Поява терміну «мехатроніка».

Тема 3. Сучасні мехатронні системи в різних сферах людської діяльності (2 год.)

Загальна класифікація роботів. Класифікація промислових роботів. Робототехнічні комплекси. Мехатроніка в медицині. Мехатронні пристрої комп'ютерів. Побутові мехатронні пристрої. Мехатронні системи на транспорті. Роботи військового призначення. Технологічні машини-гексаподи.

Тема 4. Структура і принципи побудови мехатронних систем (2 год.)

Основи конструювання мехатронних систем. Рівні інтеграції в мехатронних системах. Місце інтерфейсу в структурі мехатронної системи. Суть мехатронного підходу в побудові системи. Алгоритм паралельного проектування мехатронних систем. Метод виключення проміжних перетворювачів та інтерфейсів. Метод об'єднання елементів мехатронного модуля. Метод перенесення функціонального навантаження на інтелектуальні пристрої.

Тема 5. Мехатронні модулі (2 год.)

Класифікація мехатронних модулів. Перетворювачі руху: рейкові, планетарні, хвильові зубчасті передачі; передачі типу гвинт-гайка, передачі з гнучким зв'язком. Напрямні елементів механізму. Гальмівні пристрої і механізми для вибірки люфтів. Електродвигуни мехатронних модулів. Силові перетворювачі. Мікропроцесорні системи управління. Інтеграція мехатронних модулів. Мікромехатронні пристрої.

Тема 6. Мехатронні системи (2 год.)

Інформаційні пристрої мехатронних систем: датчики положення, швидкості і технологічних параметрів. Завдання управління координованими рухами машин. Ієрархія управління в мехатронних системах. Системи управління виконавчого, тактичного і стратегічного рівнів. Інтелектуальні методи управління.

Тема 7. Інформаційні технології в мехатроніці (2 год.)

Дистанційне керування мехатронними системами з використанням Інтернету. Переваги та обмеження дистанційного керування. Вимоги до роботехнічних систем з керуванням по глобальній мережі. Середовища розробки програм для керування технічними об'єктами і технологічними процесами.

ЛЕКЦІЯ № 4. СТРУКТУРА І ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

План лекції. Основи конструювання мехатронних систем. Рівні інтеграції в мехатронних системах. Місце інтерфейсу в структурі мехатронної системи. Суть мехатронного підходу в побудові системи. Алгоритм паралельного проектування мехатронних систем. Метод виключення проміжних перетворювачів та інтерфейсів. Метод об'єднання елементів мехатронного модуля. Метод перенесення функціонального навантаження на інтелектуальні пристрої.

Література: [1], [5]-[11], [18]-[20], [22]-[44].

Методологічною основою розробки мехатронних систем служать методи паралельного проектування (concurrent engineering methods). При традиційному проектуванні машин з комп'ютерним управлінням послідовно проводиться розробка механічної, електронної, сенсорної та комп'ютерної частин системи, а потім вибір інтерфейсних блоків. Парадигма паралельного проектування полягає в одночасному і взаємопов'язаному синтезі всіх компонент системи.

На рис. 4.1 представлена узагальнена структура машин з комп'ютерним управлінням (автоматичних роботів), які використовуються в машинобудуванні. Дана схема дозволяє показати принципи побудови мехатронних систем. Зовнішньою середою для машин даного класу є технологічне середовище, яке містить основне і допоміжне обладнання, технологічне оснащення та об'єкти робіт.

При виконанні мехатронної системою заданого функціонального руху, об'єкти робіт надають впливи на робочий орган. Прикладами таких впливів можуть служити сили різання для операцій механічної обробки, контактні сили і моменти сил при складанні, сила реакції струменя рідини при операції гідравлічного різання.

Зовнішні середовища ділять на два основні класи: детерміновані і недетерміновані. До детермінованих відносяться середовища, для яких параметри збурюючих впливів і характеристики об'єктів робіт можуть бути заздалегідь визначені з необхідною точністю для проектування мехатронних систем.



Рисунок 4.1 - Узагальнена схема машини з комп'ютерним управлінням рухом

Деякі середовища є недетермінованими за своєю природою (наприклад, екстремальні середовища: підводні, підземні, тощо). Характеристики технологічних середовищ, як правило, можуть бути визначені за допомогою аналітико-експериментальних досліджень і методів комп'ютерного моделювання. Наприклад, для визначення сил різання при механічній обробці проводяться експериментальні дослідження на спеціальних установках, параметри вібраційних впливів вимірюють на вібростендах з подальшим формуванням математичних і/або комп'ютерних моделей збурюючих впливів.

Однак для проведення таких досліджень, як правило, потрібні дуже складні і дорогі апаратура і вимірювальні технології. Так для попередньої оцінки силових впливів на робочий орган на операції роботизованого видалення облоя з виливків необхідно контролювати їх форму і розміри. У таких випадках доцільно застосовувати методи адаптивного управління, які дозволяють автоматично коректувати за-

кон руху робочих органів мехатронних систем безпосередньо в ході виконання операції.

До складу традиційної машини входять наступні основні компоненти: механічний пристрій (кінцева ланка - робочий орган; блок приводів, що включає силові перетворювачі і виконавчі двигуни, устрій комп'ютерного управління, верхнім рівнем для якого є людина-оператор, або інша ЕОМ, що входить в комп'ютерну мережу; сенсори, призначені для передачі в пристрій управління інформації про фактичний стан блоків машини і рух мехатронної системи.

Таким чином, наявність трьох обов'язкових частин - механічної (електромеханічної), електронної та комп'ютерної, пов'язаних енергетичними та інформаційними потоками, є первинною ознакою мехатронних систем.

Електромеханічна частина включає механічні ланки і передачі, робочий орган, електродвигуни, сенсори і додаткові електротехнічні елементи (гальма, муфти). Механічний пристрій призначений для перетворення рухів ланок в необхідний рух робочого органу. Електронна частина складається з мікроелектронних пристроїв, силових перетворювачів і електроніки вимірювальних ланцюгів. Сенсори призначені для збору даних про фактичний стан зовнішнього середовища і об'єктів робіт, механічного пристрою і блоку приводів з подальшою первинною обробкою і передачею цієї інформації в пристрій комп'ютерного управління. До складу цього пристрою зазвичай входять комп'ютер верхнього рівня і контролери управління рухом.

Пристрій комп'ютерного управління виконує основні функції:

- управління процесом механічного руху мехатронного модуля або багатовимірної системи в реальному часі з обробкою сенсорної інформації;
- організація управління функціональними рухами мехатронної системи, яка передбачає координацію управління механічним рухом мехатронних системи і супутніми зовнішніми процесами;
- взаємодія з оператором через інтерфейс в режимах автономного програмування (off-line) і безпосередньо в процесі руху мехатронної системи (on-line);
- організація обміну даними з периферійними пристроями, сенсорами та іншими пристроями системи.

Завданням мехатронної системи є перетворення вхідної інфор-

мації, що надходить з верхнього рівня управління, в цілеспрямований механічний рух з керуванням на основі принципу зворотного зв'язку.

Характерно, що електрична енергія (рідше гідравлічна або пневматична) використовується в сучасних системах як проміжна енергетична форма.

Особливість мехатронного підходу до проектування полягає в інтеграції в єдиний функціональний модуль двох або більше елементів можливо навіть різної фізичної природи. Відповідно на стадії проектування з традиційної структури машини виключається як мінімум один інтерфейс при збереженні фізичної сутності перетворення, виконуваного даним модулем.

В ідеальному для користувача варіанті мехатронний модуль, отримавши на вхід інформацію про мету управління, буде виконувати заданий функціональний рух з допустимою похибкою. Апаратне об'єднання елементів в єдині конструктивні модулі обов'язково супроводжують розробкою інтегрованого програмного забезпечення.

Програмні засоби забезпечують безпосередній перехід від задуму системи через її математичне моделювання до управління функціональним рухом в реальному часі.

Застосування мехатронного підходу при створенні машин з комп'ютерним управлінням визначає їх основні переваги в порівнянні з традиційними засобами автоматизації:

- відносно низьку вартість завдяки високому ступеню інтеграції, уніфікації та стандартизації елементів та інтерфейсів;
- високу точність складних рухів внаслідок застосування методів інтелектуального управління;
- високу надійність, довговічність і перешкодозахищеність;
- конструктивну компактність модулів (аж до мініатюризації в мікромашинах);
- поліпшені масогабаритні і динамічні характеристики машин внаслідок спрощення кінематичних ланцюгів;
- можливість об'єднання комплексних функціональних модулів в складні системи і комплекси під конкретні завдання замовника.

Основою методів конструювання мехатронних пристроїв є інтеграція складових частин, яка визначається на етапі проектування й реалізується при виробництві й експлуатації мехатронних модулів і систем. Інтеграція в межах мехатронного пристрою виконується за

допомогою об'єднання компонентів і через інтеграцію обробки інформації. На рис. 4.2 представлені такі компоненти, які можуть бути об'єднані.



Рисунок 4.2 - Інтеграція складових частин мехатронного пристрою

На сучасному етапі розвитку мехатроніки актуальним є вирішення наступних інтеграційних завдань:

- функціональна, структурна й конструктивна інтеграція елементів;
- апаратно-програмна інтеграція виконавчих та інтелектуальних елементів у мехатронних модулях;
- розробка й впровадження гібридних технологій виробництва інтегрованих модулів і машин;
- створення інформаційних середовищ для підтримки рішень міждисциплінарних мехатронних завдань;
- побудова математичних і комп'ютерних моделей мехатронних модулів і систем, що відбивають їхню інтеграційну спе-

- цифіку;
- застосування інтеграційних підходів в організаційно-економічній діяльності підприємств, що випускають мехатронні вироби;
- міждисциплінарна підготовка фахівців, здатних до системної інтеграції в області мехатроніки.

Розглянемо ієрархію рівнів інтеграції в мехатронних системах.

Перший рівень інтеграції утворюють мехатронні пристрої й складові їхні елементи.

Другий рівень включає інтегровані мехатронні модулі. Набір мехатронних пристроїв визначає тип мехатронного модуля (рис. 4.3).

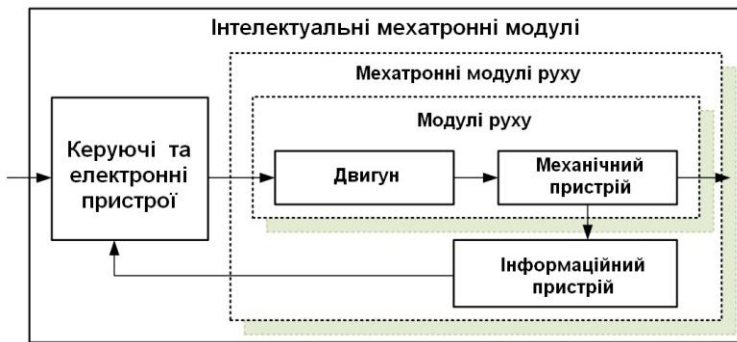


Рисунок 4.3 - Класифікація мехатронних модулів

У загальному випадку для інтелектуального модуля можна виділити дві основні групи пристроїв: у виконавчу групу входять механічні пристрої й двигуни, а група інтелектуальних пристроїв є сукупністю електронних, інформаційних і керуючих компонентів.

На третьому рівні інтеграції з мехатронних модулів компонуються багатокоординатні мехатронні машини.

Вищий (четвертий) рівень припускає побудову на єдиній інтеграційній платформі комплексів мехатронних машин для реконфігурованого виробництва.

У цілому проектування мехатронних систем є складною багатфакторною проблемою вибору й оптимізації прийнятих технічних і технологічних, організаційно-економічних та інформаційних рішень. Одним з важливих проектних завдань є інтеграція елементів у мехатронних модулях і машинах.

Вузьким місцем мехатронних модулів і машин є інтерфейси між складовими пристроями й елементами.

Поняття «інтерфейс» є ключовим для пропонованого підходу до проектування мехатронних модулів і систем. У першу чергу відзначимо, що взаємодія основних пристроїв у мехатронній системі здійснюється не прямо, а через деякі сполучні блоки, позначені на малюнку стрілками. З фізичної й технічної точки зору пристрої можуть різнитися, але мати однакове функціональне призначення. Їхня основна функція – це виконання енергетичного й інформаційного обміну між сполучними структурними елементами системи.

Місце інтерфейсу в структурі мехатронної системи задається зв'язками із вхідними й вихідними пристроями. Технічні характеристики інтерфейсу визначаються способом і процедурою передачі (при необхідності – перетворення, зберігання й синхронізації) впливів, сигналів та інформації, а також апаратно-програмною реалізацією використовуваних каналів зв'язку.

Численні інтерфейси в мехатронній машині зв'язують пристрої різної фізичної природи (механічні, електронні та інформаційні), що визначають їхню конструктивну й апаратно-програмну складність. При традиційному проектуванні інтерфейси являють собою самостійні пристрої й вузли.

Якщо блоки, як правило, випускаються спеціалізованими фірмами, то багато інтерфейсів розробляються й виготовляються самостійно користувачами. При проектуванні машини, з комп'ютерним керуванням по трьом координатам, побудованої на традиційних приводах, для зв'язку основних пристроїв необхідно з'єднати порядку 100 сигнальних і силових проводів. Досвід експлуатації комплексних машин і систем показує, що до 70 % проблем їх функціонування пов'язані з надійністю зв'язків і з'єднань.

Суть мехатронного підходу полягає в об'єднанні елементів в інтегровані модулі вже на етапах проектування й виготовлення, звільняючи кінцевого споживача від проблем при експлуатації мехатронної машини.

Інтегровані мехатронні машини відрізняються підвищеною надійністю, стійкістю до несприятливих зовнішніх впливів, точністю виконання рухів, модульністю й компактністю конструкції. З погляду споживача – це цілісні вироби, зручні при налаштуванні й програмуванні рухів. Інтегровані розв'язки економічно доцільні завдяки спро-

щенню сервісу машини й підвищенню її ремонтпридатності.

Системи із глибоким ступенем інтеграції елементів мають і зворотний бік – такі машини є менш гнучкими (мають обмежені можливості для модернізації й реконфігурації). Тому мехатронні модулі різного рівня інтеграції дозволяють виявляти раціональну структуру під конкретні завдання автоматизації.

Ідея інтеграції широко використовується в інженерній практиці при проектуванні пристроїв і систем всіякого призначення. Характерним прикладом реалізації цієї інженерної ідеї в побутовій техніці є MP3-Player – сучасний цифровий пристрій, у якому об'єднані аудіоплеєр, радіоприймач, диктофон і магнітофон. Очевидні переваги цього комбінованого пристрою – багатофункціональність, компактність, економічність, зручність (користувач звільнений від проблем з підключенням кабелів і рознімань). Але ця система негнучка, окремі її компоненти не можна замінити й модернізувати, усі вони можуть експлуатуватися й ремонтуватися тільки спільно.

Розв'язок «проблеми інтерфейсів» у мехатроніці можна трактувати як завдання мінімізації структурної складності мехатронної системи. Структурна складність комплексних систем у загальному випадку визначається кількістю елементів, що з'єднуються, числом і інтенсивністю їх взаємозв'язків.

В основі даного підходу лежать *три фундаментальні напрямки теорії системного проектування складних систем*:

- функціонально-структурний аналіз і еволюційний синтез технічних систем;
- методологія паралельного проектування систем;
- структурний синтез і оптимізація технічних систем по критеріям складності.

Ключові положення перерахованих напрямків. Функціонально-структурний підхід базується на ідеї пріоритету функції системи над її структурною організацією. Завданням проектування є визначення такої структури, яка дозволить системі виконувати задані функціональні завдання з максимальною ефективністю за обраними критеріями якості. Основні положення цього методу розроблені стосовно до завдань проектування інформаційно-керуючих комплексів і обчислювальних пристроїв.

Метод еволюційного синтезу передбачає знаходження раціональних рішень шляхом багатоетапної процедури оптимізації. Пошук

варіантів проводиться з бази перспективних структурних рішень, яка відкрита для редагування (удосконалювання) і має ієрархічну структуру. Такий метод проектування дозволяє підвищити якість проекту й знизити вимоги до досвіду розроблювача.

Методологічною основою для розробки мехатронних систем служать методи паралельного проектування. При традиційному проектуванні розробка механічної, електронної, інформаційної й комп'ютерної частин ведеться послідовно й незалежно одна від одної (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 - Традиційний алгоритм проектування

Завданнями системної інтеграції займається розроблювач системи керування. Його можливості обмежені, тому що основні конструкторські рішення ухвалюються на попередніх етапах. Обрані двигуни й механічні пристрої відносяться до незмінної частини, склад і характеристики якої не коректуються при розробці електронної й керуючої частин.

Методологія паралельного проектування полягає в одночасному й взаємозалежному синтезі всіх пристроїв мехатронної системи (рис. 4.5). Одна з відомих процедур проектування інтегрованих мехатронних машин представлена на рис. 4.5.

Ця процедура (рис. 4.6) передбачає чотири взаємозалежні етапи:

- визначення функцій мехатронних модулів на основі аналізу вихідних вимог до мехатронної машини;
- функціонально-структурний аналіз із метою вибору й формування структури всіх мехатронних модулів системи;
- структурно-конструктивний аналіз, конструювання й формування моделі модулів системи;
- планування й оптимізація функціональних рухів, розробка

програм руху машини та її модулів.



Рисунок 4.5 - Алгоритм паралельного проектування мехатронних систем

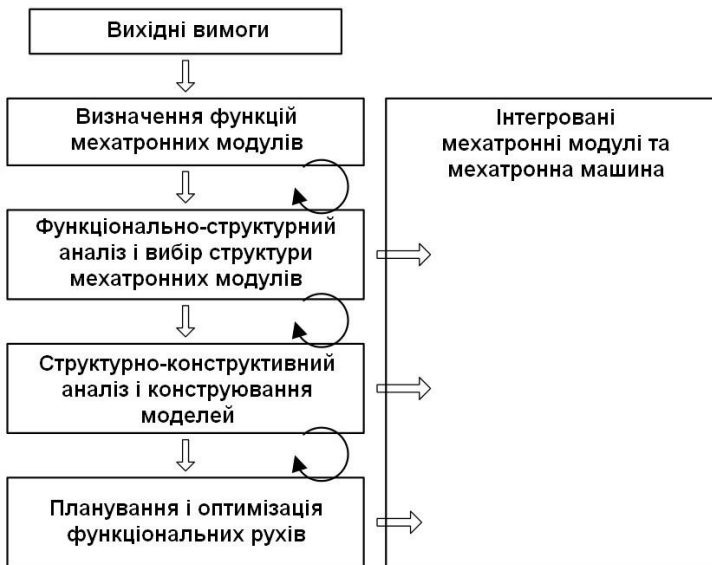


Рисунок 4.6 - Процедура проектування інтегрованих мехатронних машин

Вихідні вимоги до мехатронних машин що визначають основні проектні рішення, формуються шляхом аналізу виконуваних техноло-

гічних операцій. Рекомендації технологів, як правило, обмежуються вибором номінальних режимів руху машини. При проектуванні мехатронної системи, як правило, задають вихідні дані, що включають інформацію про програмувальні рухи й комплекси обмежень.

Вимоги до траєкторій руху містять опис програмувальних траєкторій робочого органа в просторі й припустиму погрішність їх відпрацювання. Траєкторії робочого органа визначаються геометрією контурів і поверхонь об'єктів робіт. Наприклад, формою лопатки газотурбінного двигуна. При цьому треба щоб погрішність відпрацювання траєкторії не перевищувала припустимі значення.

На наступному етапі проектування формується структура мехатронних модулів зі схемою енергетичних і інформаційних потоків. На третьому етапі проводиться конструювання модулів і мехатронної машини в цілому. Застосовуючи процедури функціонально-структурного й структурно-конструктивного аналізу оцінюються проектні варіанти для забезпечення високого рівня інтеграції елементів. Завдання проектування, таким чином, полягає в знаходженні найкращої відповідності між заданою функцією й технічним виконанням.

Побудова функціональної, структурної й конструктивної моделей дозволяє застосовувати в мехатроніці методи й засоби автоматизованого аналізу, проектування й конструювання.

На заключному етапі даної процедури виконується планування й оптимізація функціональних рухів мехатронної машини. Результатом цього етапу є створення програм керування цими рухами.

Усі проектні етапи мають циклічний характер, що відзначене круговими стрілками на рис. 4.6. Наприклад, на другому етапі пряме завдання полягає у визначенні структури модулів по заданій функціональній моделі. Але можливе й зворотнє завдання, коли структурні модифікації приводять до зміни функціональних можливостей системи.

При проектуванні інтегрованих мехатронних модулів можуть використовуватися три методи інтеграції. Методи інтеграції можна класифікувати по характеру об'єднання складових пристроїв і способу вирішення «проблеми інтерфейсів» мехатронних систем. Кожний з методів може застосовуватися як самостійно, так і в комбінації з іншими методами, оскільки вони реалізуються на різних етапах проектування.

Перший метод полягає в побудові інтегрованих мехатронних

машин шляхом виключення з їхньої структури проміжних перетворювачів і відповідних інтерфейсів. Це найбільш глибокий рівень інтеграції, виключення багатоступінчастого перетворення енергії й інформації в мехатронних системах створює фундаментальну основу для досягнення їх високої точності й швидкодії, компактності й надійності.

Другий метод припускає апаратно-конструктивне об'єднання пристроїв різної фізичної природи в єдиному корпусі багатфункціонального мехатронного модуля. У результаті такі модулі руху представляються єдиними виробами.

Третій метод інтеграції (найбільш сучасний) полягає в переносі функціонального навантаження від механічних вузлів до інтелектуальних (електронним, комп'ютерним і інформаційним). Інтелектуальні пристрої, на відміну від механічних надають системі гнучкість, оскільки їх легко перепрограмувати під нове завдання. Даний метод дозволяє забезпечити постійне зниження собівартості пристроїв шляхом мінімізації механічної складності мехатронної системи, при розширенні функціональних можливостей.

Метод виключення проміжних перетворювачів та інтерфейсів. Застосування цього методу інтеграції забезпечує мінімізацію структурної складності мехатронних модулів шляхом виключення проміжних перетворювачів. При проектуванні з традиційної структури виключають проміжні блоки й відповідні інтерфейси, зберігаючи функціональне перетворення, виконуване мехатронним модулем у цілому, його вхідні й вихідні змінні. Метод реалізується, як правило, на другому етапі проектування мехатронних систем при синтезі структури модулів. Структурні рішення для мехатронних систем виявляються за допомогою методики функціонально-структурного аналізу проектних рішень.

Відомі два основні підходи для побудови моделей складних технічних систем. Перший полягає у функціональному визначенні розглянутої системи через її поведінку стосовно зовнішніх об'єктів і зовнішнього середовища. Другий підхід заснований на структурному представленні системи й зв'язків між її елементами. Дослідження й оптимізація взаємозв'язків між функцією й структурою системи лежить в основі функціонально-структурного підходу, який застосовують до завдань мехатроніки.

Для методично коректного проектування необхідно розглянути функціональну організацію мехатронної системи. Функціональне

представлення з певними вхідними й вихідними змінними (модель типу «чорний ящик») показано на рис. 4.7.

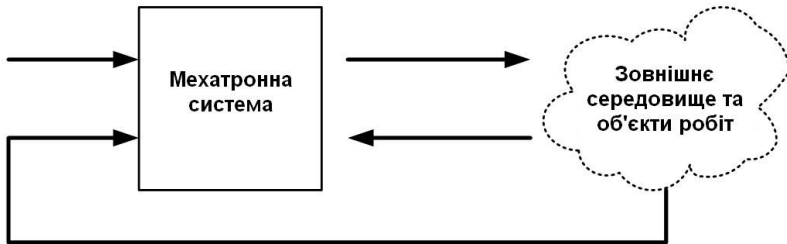


Рисунок 4.7 - Функціональне представлення мехатронної системи

Головне функціональне завдання мехатронної системи полягає в перетворенні інформації про програму руху в керований рух її кінцевої ланки. Програма руху задається комп'ютером або оператором.

Керований рух здійснюється ланками механічного пристрою, причому кінцева ланка – робочий орган взаємодіє із зовнішнім середовищем. У процесі руху на механічний пристрій діють зовнішні сили з боку об'єктів робіт (наприклад, сили різання при шліфувальних і фрезерних операціях, контактні сили й моменти при роботизованому складанні). Інформаційний зворотний зв'язок необхідний для оцінки в режимі реального часу поточного стану керованої системи й зовнішнього середовища.

Виділена основна функція не обов'язково є єдиною для мехатронних систем. Деякі додаткові функції, такі як: реконфігурація системи, обмін сигналами й інформацією з іншим технологічним устаткуванням, самодіагностика, також повинні бути реалізовані для її ефективно й надійно роботи. Але саме виконання заданого функціонального руху є головною функцією, яка визначає поведінку мехатронної системи в зовнішньому середовищі.

Функціональне представлення мехатронного модуля у формі «чорного ящика» (рис. 4.7) містить два інформаційні входи (програма руху й інформаційний зворотний зв'язок), додатковий механічний вхід (сили реакції зовнішнього середовища) і один вихід – цілеспрямований механічний рух. Отже, у загальному випадку функціональна схема мехатронного модуля може бути побудована як інформаційно-механічний перетворювач.

Фізична реалізація мехатронного інформаційно-механічного перетворення здійснюється шляхом використання електричних джерел енергії. Відповідно функціональна модель для сучасних мехатронних систем представлена на рис. 4.8.

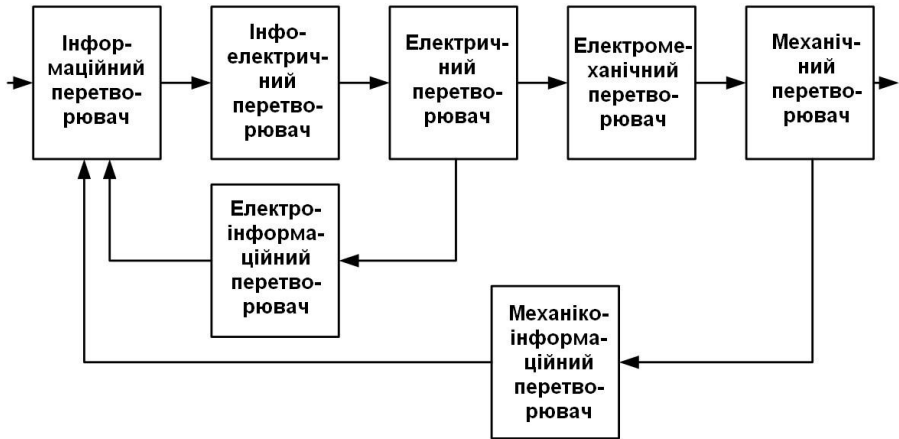


Рисунок 4.8 - Функціональна модель мехатронного модуля

Отримана функціональна модель у загальному випадку містить сім базових перетворювачів, зв'язаних енергетичними й інформаційними потоками.

Електрична енергія є тільки проміжною енергетичною формою між вхідною інформацією й вихідним механічним рухом.

Вибір фізичної природи проміжного перетворювача визначається можливостями технічної реалізації, вихідними вимогами й особливостями застосування. У мехатронних модулях широко застосовують:

- гідравлічні перетворювачі, які найбільш ефективні в машинах з високим навантаженням;
- пневматичні перетворювачі, які характеризуються простотою, надійністю й мають високу швидкодію;
- хімічні перетворювачі застосовуються в біоприводах, аналогічних за принципом дії м'язам живих організмів;
- теплові енергетичні процеси використовуються в мікромехатронних системах з використанням матеріалів з пам'яттю форми;
- комбіновані перетворювачі, засновані на енергетичних про-

цесах різної фізичної природи.

У загальному випадку в мехатронному модулі (рис. 4.7) реалізується сім функціональних перетворень. Три моноенергетичні перетворювачі (інформаційний, електричний і механічний), у яких вхідні й вихідні змінні мають одну фізичну природу. І чотири – дуальні (двоїсті), у них вхідні й вихідні змінні різних фізичних видів.

Структурна модель мехатронного модуля відбиває склад його елементів і зв'язки між ними. Структурні моделі можна графічно представити у вигляді блок-схем. У якості вихідної структури мехатронного модуля представлений традиційний електропривод з комп'ютерним керуванням (рис. 4.9).

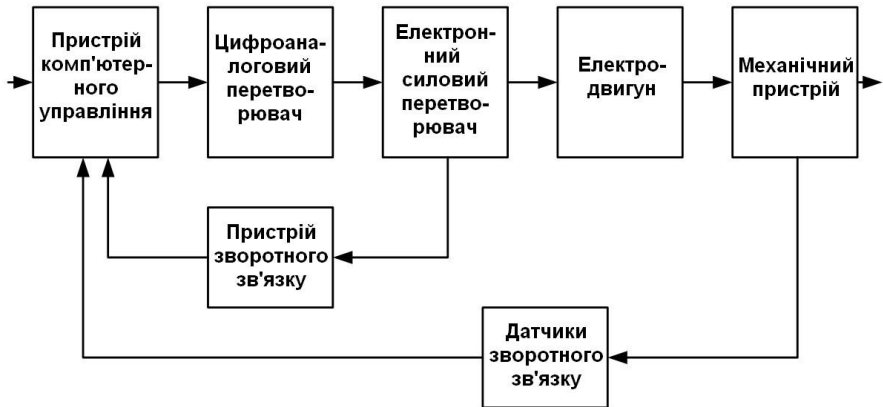


Рисунок 4.9 - Структура традиційного електроприводу з комп'ютерним керуванням

У представленій структурній схемі виділяють керуючу й електромеханічну підсистеми. Структурна модель електроприводу (рис. 4.9) містить у собі наступні елементи:

- пристрій комп'ютерного керування рухом (інформаційне перетворення: обробка цифрових сигналів, цифрове регулювання, розрахунки керуючих впливів, обмін даними з периферійними пристроями);
- цифроаналоговий перетворювач (функція інформаційно-електричного перетворення);
- силовий перетворювач, як правило, що складається з підсилювача потужності, широтно-імпульсного модулятора й три-

- фазного інвертора (для асинхронних двигунів);
- керований електродвигун (електромеханічне перетворення);
- механічний пристрій (реалізує заданий керований рух, і робочий орган, взаємодіючий із зовнішніми об'єктами);
- пристрій зворотного зв'язку (подає інформацію про значення електричних напруг і струмів у силовому перетворювачі);
- датчики зворотного зв'язку (по положенню й швидкості руху ланок), що виконують функцію механіко-інформаційного перетворення;
- інтерфейсні пристрої.

Залежно від фізичної природи вхідних і вихідних змінних інтерфейсні блоки можуть бути як механічними, так і інтелектуальними перетворювачами. Прикладами механічних інтерфейсів є передачі й трансмісії, що зв'язують механічний пристрій із двигуном і датчиками зворотного зв'язку.

Інтелектуальні інтерфейси розташовані на входах і виходах пристрою комп'ютерного керування мехатронного модуля й призначені для його сполучення з наступними структурними елементами:

- комп'ютером верхнього рівня керування й іншими модулями мехатронної системи;
- цифроаналоговим перетворювачем і далі із силовим перетворювачем модуля;
- датчиками зворотного зв'язку, який у випадку застосування сенсорів з аналоговим вихідним сигналом будується на основі аналого-цифрового перетворювача;
- пристроями зворотного зв'язку для контролю рівня електричних струмів і напруг у силовому перетворювачі.

У традиційній приводній техніці інтерфейси є сепаратними пристроями. Тому їх проектування, виготовлення й налагодження стають проблемою, особливо при вимогах надійного з'єднання нестандартних і спеціалізованих елементів різних виробників.

Порівняння функціональної моделі мехатронного модуля (рис. 4.8) і структурної моделі традиційного електроприводу (рис. 4.9), показує, що сумарна кількість основних і інтерфейсних блоків у структурі електропривода значно перевищує число виконуваних функціональних перетворень. Ця обставина вказує на структурну надмірність традиційного електроприводу. Наявність надлишкових блоків приводить до зниження надійності й точності технічної системи, погіршен-

ню її масогабаритних і вартісних показників.

Завданням функціонально-структурного аналізу є пошук мехатронних структур, що реалізують задані функціональні перетворення за допомогою мінімальної кількості структурних блоків. Представлені рішення засновані на спільному аналізі функціональної моделі мехатронного модуля й структури традиційного електропривода (рис. 4.9).

Застосування вентильних високомоментних двигунів дозволяє замінити пари «двигун + механічний перетворювач руху» на один виконавчий елемент – двигун. Тут виключається механічний перетворювач із функціональної моделі (рис. 4.8) і, відповідно, механічний пристрій і інтерфейс із традиційної структури привода (рис. 4.9).

До основних переваг мехатронних модулів з вентильними високомоментними двигунами відносяться компактність і модульність конструкції, підвищені точностні характеристики привода завдяки відсутності зазорів, кінематичних погрішностей, пружних деформацій ланок, а також виключенню тертя в механічній трансмісії. У сучасних машинах використовуються такі двигуни – кутового й лінійного типів.

Для визначення положення полюсів на роторі двигуна в конструкцію такого двигуна вбудовують датчик положення (звичайно датчик Холу). У виконавчих приводах інформацію із цього датчика можна використовувати і як сигнал позиційного зворотного зв'язку. Отже, застосування їх із вбудованими датчиками дозволяє спростити не тільки виконавчу частину модуля, але й ланцюги зворотного зв'язку.

Побудова мехатронних модулів з так званим «безсенсорним» керуванням означає виключення датчиків зворотного зв'язку разом з відповідними інтерфейсами, які традиційно виконують функціональне механіко-інформаційне перетворення. При цьому інформація про швидкість і положення ротора двигуна визначається в пристрої комп'ютерного керування непрямыми методами.

Даний спосіб дозволяє суттєво знизити вартість виробу й підвищити надійність його роботи, радикально полегшити механічну конструкцію модуля, поклавши завдання організації зворотного зв'язку на електронні й комп'ютерні пристрої. Фактично в цьому випадку метод виключення проміжних перетворювачів сполучається з методом інтеграції, який спрямований на розширення функцій інтелектуальних пристроїв у мехатроніці.

Створення безсенсорних способів керування особливо актуально в цей час для мехатронних модулів на базі двигунів змінного стру-

му, широке застосування яких стримувалося відсутністю ефективних систем керування. Світовий ринок цих модулів оцінювався в 2003 р. в 12 млрд. дол. і прогнозується його подальший ріст (близько 12 % у рік). Тому що двигуни змінного струму мають високий показник ціна/якість у порівнянні з машинами постійного струму. Тільки за останні десять років ціна одиниці потужності асинхронних машин знизилася приблизно в 10 раз, при цьому компактність конструкції покращилася в 15 раз.

Проблеми практичної реалізації методу безсенсорного керування пов'язані з побудовою адекватних комп'ютерних моделей для процесів, що протікають у двигунах. Характер цих процесів суттєво різниться для ділянок розгону й гальмування, руху з номінальною швидкістю й у зоні малих швидкостей, на холостому ходу й при наявності зовнішніх моментів. Необхідною умовою працездатності такої системи є організація всіх обчислювальних процедур у реальному масштабі часу.

До складу сучасних мехатронних модулів входять інтелектуальні силові перетворювачі, що поєднують електричне й електроінформаційне перетворення. Особливість їх полягає в тому, що вони містять вбудовані блоки мікроелектроніки, призначені для виконання інтелектуальних функцій – керування рухом, захист в аварійних режимах і діагностику несправностей. Інтелектуальні силові перетворювачі будують на базі напівпровідникових приладів нового покоління. Типовими представниками цих приладів є силові польові транзистори (MOSFET), біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT), що й замкнуті тиристори з польовим керуванням (MCT).

Використання інтелектуальних силових перетворювачів у складі мехатронних модулів дозволяє суттєво знизити масогабаритні показники, підвищити надійність при експлуатації, поліпшити техніко-економічні показники мехатронних систем.

Перспективні рішення на базі розглянутого методу інтеграції ґрунтуються на застосуванні гібридних виробничих технологій і нових конструкційних матеріалів, загальних для виконавчих і інтелектуальних компонентів.

Метод об'єднання елементів мехатронного модуля.

Метою методу інтеграції є мінімізація конструктивної складності мехатронних модулів шляхом створення інтегрованих мехатронних модулів, що реалізують кілька функціональних і структурних перет-

ворень. Ця мета може бути досягнута на третьому етапі проектування мехатронних систем – етапі структурно-конструктивного аналізу (рис. 4.9). Структуру модуля, яка сформована на попередньому етапі, тепер вважаємо відомою. Завдання розробки полягає у виборі конструктивних рішень, реалізованих заданим набором елементів і зв'язків між ними. Розглянутий метод інтеграції полягає в апаратно-конструктивному об'єднанні обраних елементів та інтерфейсів у єдиному корпусі. Технологічною базою для даного методу інтеграції є гібридне складання вузлів і елементів. Апаратне й конструктивне об'єднання елементів у єдині модулі повинно супроводжуватися розробкою інтегрованого програмного забезпечення.

Методичним підходом пошуку варіантів є розгляд інтерфейсних блоків (рис. 4.9) у якості локальних точок, де потенційно можлива інтеграція елементів. Для одержання високоінтегрованих модулів при проектуванні можна базуватися на кілька інтерфейсних точок одночасно. У корпусі модуля рухи об'єднані виконавчий двигун і механічний пристрій, причому вал двигуна є елементом механічного перетворювача руху. Модулі руху реалізують електромеханічне й механічне функціональні перетворення.

Прикладами модулів руху можуть служити: мотор-редуктор, мотор-колесо, шпіндель-мотор і мотор-барабан. До складу сучасних модулів руху крім двигунів і перетворювачів руху входять інші види механічних пристроїв – гальмові й люфто-вибираючі механізми, напрямні і перетворювачі руху.

Так, мехатронний модуль фірми Dunkermotoren на базі асинхронного двигуна містить додатково гальмовий пристрій. НТЦ «Редуктор» (Санкт-Петербург) робить мотор-редуктори із планетарно-фрикційними варіаторами швидкості. До модулів руху можна віднести також високооборотні шпіндель-мотори, які отримані об'єднанням ротора електродвигуна й вала установки.

Мехатронні модулі руху є багатофункціональними виробами, які виконують електромеханічне, механічне й механіко-інформаційне перетворення. У єдиному корпусі модуля перебувають: двигун, механічний пристрій і датчик зворотного зв'язку. Точками структурно-конструктивної інтеграції цих елементів є інтерфейси.

Головною особливістю сучасного етапу розвитку мехатроніки є створення принципово нового покоління модулів – інтелектуальних мехатронних модулів. У порівнянні з мехатронними модулями руху, в

їхню конструкцію додатково вбудовуються комп'ютерні пристрої й силові електронні перетворювачі, що надає цим модулям інтелектуальні властивості та є їхньою головною відмітною ознакою.

Інтелектуальні мехатронні модулі реалізують усі сім функціональних перетворень, представлених на рис. 4.8. У цих модулях структурно-конструктивна інтеграція здійснюється по всім інтерфейсним точкам.

У загальному випадку *інтелектуальний мехатронний модуль складається з наступних основних елементів:*

- електро- (або, наприклад, гідро-) двигун;
- механічний пристрій;
- датчики й пристрої зворотного зв'язку;
- пристрій комп'ютерного керування;
- електронний силовий перетворювач;
- інтерфейс для зв'язку з комп'ютером верхнього рівня керування, а також внутрішні інтерфейси.

Основними перевагами застосування інтелектуальних мехатронних модулів є:

- здатність виконувати складні рухи самостійно, без звертання до верхнього рівня керування, що підвищує автономність модулів, гнучкість і живучість мехатронних систем;
- спрощення комунікацій між модулями й центральним пристроєм керування (наприклад, з використанням бездротових комунікацій), що дозволяє домагатися підвищеної перешкодозахищеності мехатронної системи та її здатності до швидкої реконфігурації;
- підвищення надійності й безпеки мехатронних систем завдяки комп'ютерній діагностиці несправностей і автоматичному захисту в аварійних і позаштатних режимах роботи;
- створення розподілених систем керування із застосуванням комп'ютерних і мережних технологій;
- використання сучасних методів керування (програмних, адаптивних, інтелектуальних, оптимальних) безпосередньо на виконавчому рівні для підвищення якості процесів керування в конкретних реалізаціях;
- інтелектуалізація силових перетворювачів для захисту модуля в аварійних режимах і діагностики несправностей;
- інтелектуалізація сенсорів для мехатронних модулів дозволяє

добитися більш високої точності виміру, програмним шляхом забезпечивши в самому сенсорному модулі фільтрацію шумів, калібрування, лінеаризацію характеристик вхід/вихід, компенсацію перехресних зв'язків, гістерезису й дрейфу нуля.

Вбудовування інтелектуальних пристроїв безпосередньо в мехатронний модуль породжує й ряд обмежень. До них слід віднести складність модернізації, збільшення масогабаритних показників модуля руху в порівнянні із приводами, де керуючі електронні пристрої розташовані окремо.



Рисунок 4.10 - Мехатронний модуль фірми Siemens

На рис. 4.10 представлений інтелектуальний мехатронний модуль, на прикладі модуля «Simodrive Posmo SI» фірми Siemens. Відмітною рисою цього модуля є те, що силовий перетворювач і керуючий пристрій конструктивно об'єднані із двигуном. За допомогою штекерної техніки здійснюється підключення цифрових входів і діагностичних сигналів, а також електричний зв'язок між двигуном і силовим перетворювачем. Зв'язок із центральним пристроєм керування та іншими модулями іде через стандартну шину «PROFIBUS».

Метод переносу функціонального навантаження на інтелектуальні пристрої.

На етапі проектування здійснюється розподіл функцій між структурними елементами мехатронної системи. Сучасна тенденція при побудові машин полягає в переносі функціонального навантаження від механічних вузлів до інтелектуальних (електронним, комп'ютерним і інформаційним) компонентам, відносно дешевим і легко перепрограмованим під нове завдання.

Використання даного методу інтеграції дозволяє мінімізувати механічну складність мехатронної системи. На рис. 4.11 наведено графік, що показує динаміку цього процесу у виробничих машинах за останні десятиліття. Аналіз показує, що ще на початку 90-х років XX століття переважна більшість функцій машини (більш 70 %) реалізовувалася механічним шляхом. Однак сучасні механічні пристрої все

частіше стають вузьким місцем у складних машинах. Це пояснюється їхньою недостатньою функціональною гнучкістю, наявністю тертя, люфтів і пружностей у передачах, відносно високою вартістю виготовлення.

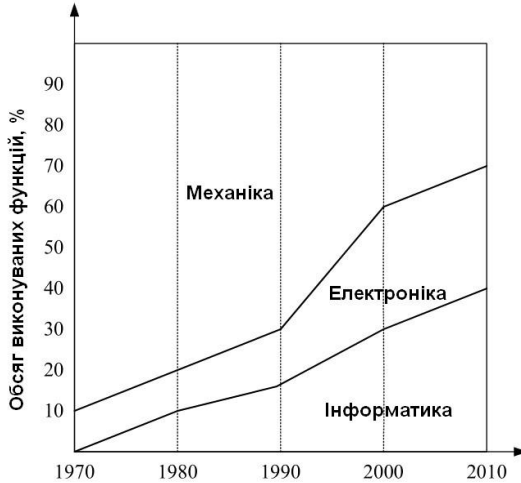


Рисунок 4.11 - Розподіл функціонального навантаження у виробничих машинах

Тому в наступні десятиліття відбувалося поступове витиснення механічних вузлів спочатку електронними, а потім і комп'ютерними блоками. У мехатронних системах спрощуються механічні рішення, але використовуються складні інтелектуальні системи керування. У цей час обсяг функцій (а відповідно й вартість) розподілена між механічними, електронними й комп'ютерними компонентами практично рівномірно. При цьому частка комп'ютерної частини зростає, і є всі підстави прогнозувати збереження цієї тенденції на майбутнє.

Мехатронний підхід припускає не доповнення, а заміщення функцій, традиційно виконуваних механічними елементами системи, електронними й комп'ютерними блоками. Якщо та сама функція може бути реалізована пристроями різної фізичної природи, то при розробці системи необхідно враховувати технологічні й організаційно-економічні критерії.

Метод електронної редукції, являє приклад, коли керований виконавчий механізм відслідковує рух задаючого пристрою (рис. 4.12).

Цей метод є аналогом способу копіювального керування, широко використовуваного для дистанційно керованих роботів і маніпуляторів.

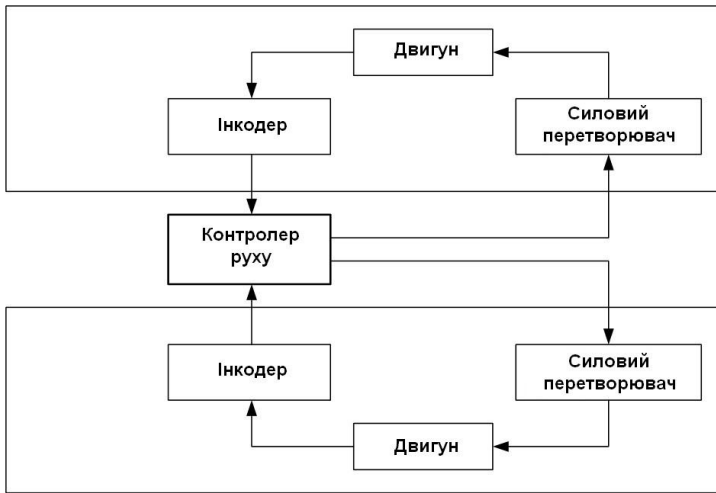


Рисунок 4.12 - Система керування рухом на основі методу електронної редукції

Для кількісного аналізу й оцінки мехатронних модулів і систем вводять спеціальний захід – показник розподілу функціонального навантаження. Цей показник дозволяє оцінити обсяг функціонального навантаження, яке несе кожний зі структурних елементів або блоків у досліджуваній системі. Чим вище значення даного показника, тем більший вплив виявляє даний елемент на якість системи в цілому, тобто її вартість, надійність та інші комплексні характеристики.

Показник розподілу функціонального навантаження визначає важливість структурної одиниці (елемента, групи елементів, підсистеми) на основі наявності й числа її зв'язків з іншими елементами системи. Чим вище ранг даного вузла, тем більше функціональне навантаження він несе, і тим істотніше впливає на якість системи в цілому.

Цей показник розраховується по алгоритму обчислення рангів структурних елементів і аналізу розподілу функціонального навантаження усередині системи, розробленому на основі теорії графів і матриць. У роботах Ю.В. Подураєва методика розрахунків показника розподіленого функціонального навантаження розглядалася на прикладі

трьох варіантів системи керування робота «PUMA». Структура досліджуваної системи містила в собі як керуючу підсистему, так і електромеханічну частину (електродвигун і фотоімпульсні датчики зворотного зв'язку), незмінної при виконанні аналізу.

З результатів досліджень випливає що розглянутий показник для структури третього рівня інтеграції (з підсистемою керування на основі контролерів руху) майже в 3 рази вищий, ніж у випадку традиційного варіанта.

Таким чином, оцінка функціонально-структурної інтеграції й показник розподілу функціонального навантаження – у сукупності дозволяють на етапі проектування оцінювати рівень структурних рішень. Ці показники не враховують усіх особливостей мехатронної системи, але дають можливість аналізувати загальносистемні структурні характеристики.

Питання для самоперевірки

1. Які основні принципи покладені в основу побудови мехатронних систем?
2. Які пристрої можуть бути складовою частиною машин з комп'ютерним управлінням рухом?
3. Які функції виконує пристрій комп'ютерного управління в мехатронній системі або модулі?
4. Поясніть суть мехатронного підходу до проектування.
5. Які основні переваги мехатронного підходу при створенні машин з комп'ютерним управлінням в порівнянні з традиційними засобами автоматизації?
6. Перелічіть інтеграційні завдання, розв'язувані при конструюванні мехатронних пристроїв.
7. Опишіть особливості ієрархії рівнів інтеграції у мехатронних системах.
8. Дайте визначення поняття «інтерфейс».
9. Перелічіть основні інтерфейси, які присутні в узагальненій структурі мехатронних машин.
10. Приведіть основні напрямки теорії системного проектування мехатронних систем.
11. Опишіть суть функціонально-структурного підходу.
12. Опишіть суть структурного синтезу й оптимізації технічних систем за критеріями складності.

13. В чому полягає суть методології паралельного проектування?
14. Опишіть узагальнену процедуру проектування інтегрованих мехатронних модулів і машин.
15. Перелічіть й коротко опишіть методи інтеграції при проектуванні інтегрованих мехатронних модулів.
16. Які основні особливості має метод виключення проміжних перетворювачів та інтерфейсів?
17. Опишіть проміжні перетворювачі, застосовувані в мехатронних модулях.
18. Наведіть структурну модель мехатронного модуля.
19. Суть методу об'єднання елементів мехатронного модуля.
20. З яких елементів у загальному випадку складається інтелектуальний мехатронний модуль?
21. Які основні переваги створює застосування інтелектуальних мехатронних модулів?
22. Які основні особливості має метод переносу функціонального навантаження на інтелектуальні пристрої?
23. Яка сутність показника розподілу функціонального навантаження у виробничих машинах і тенденції його зміни в процесі розвитку мехатроніки?

ЛЕКЦІЯ № 5. МЕХАТРОННІ МОДУЛІ

План лекції. Класифікація мехатронних модулів. Перетворювачі руху: рейкові, планетарні, хвильові зубчасті передачі; передачі типу гвинт-гайка, передачі з гнучким зв'язком. Напрямні елементів механізму. Гальмівні пристрої і механізми для вибірки люфтів. Електродвигуни мехатронних модулів. Силові перетворювачі. Мікропроцесорні системи управління. Інтеграція мехатронних модулів. Мікромехатронні пристрої.

Література: [1], [5]-[11], [18]-[20], [22]-[44].

Систематика мехатронних модулів.

Метою будь-якої класифікації є систематизація інформації про деякий об'єкт у вигляді впорядкованої структури для виконання завдань об'єктивного (забезпечення повноти інформації) і порівняльного (забезпечення інформацією для порівняння) представлення об'єкта. Використання ієрархічної структури дозволяє спростити пошук інформації про об'єкт. Це дозволяє створити ефективні інформаційно-пошукові системи на базі комп'ютерних баз даних.

Класифікація характеризується об'єктом, ознаками класифікації та їх послідовністю. Згідно із класифікацією створюються образи об'єкта. Тому для того самого об'єкта залежно від обраних ознак та їх послідовності, можна побудувати різні варіанти ієрархічного дерева, тобто кілька різних класифікацій. Вибір кращої класифікації здійснюється виходячи з вимог розв'язку певного завдання.

На рис. 5.1 представлена, одна з відомих, класифікацій мехатронних модулів по конструктивних ознаках. У даній класифікації виділено 3 ознаки мехатронних модулів, що досить повно характеризують конструкцію (рівень інтеграції, число ступенів рухливості й вид рухів), а також комплекс ознак (технічні характеристики), що визначає функціональні можливості модулів.

Класифікація мехатронних модулів передбачає за рівнем інтеграції: модулі руху, мехатронні модулі руху й інтелектуальні мехатронні модулі. По числу ступенів рухливості – 1, 2, 3, і > 3 . По виду рухів – поступальні й обертальні. Комплекс ознак технічних характеристик включає: силу й крутний момент що розвивається; величину, швидкодію й точність робочого ходу (лінійного й кутового).

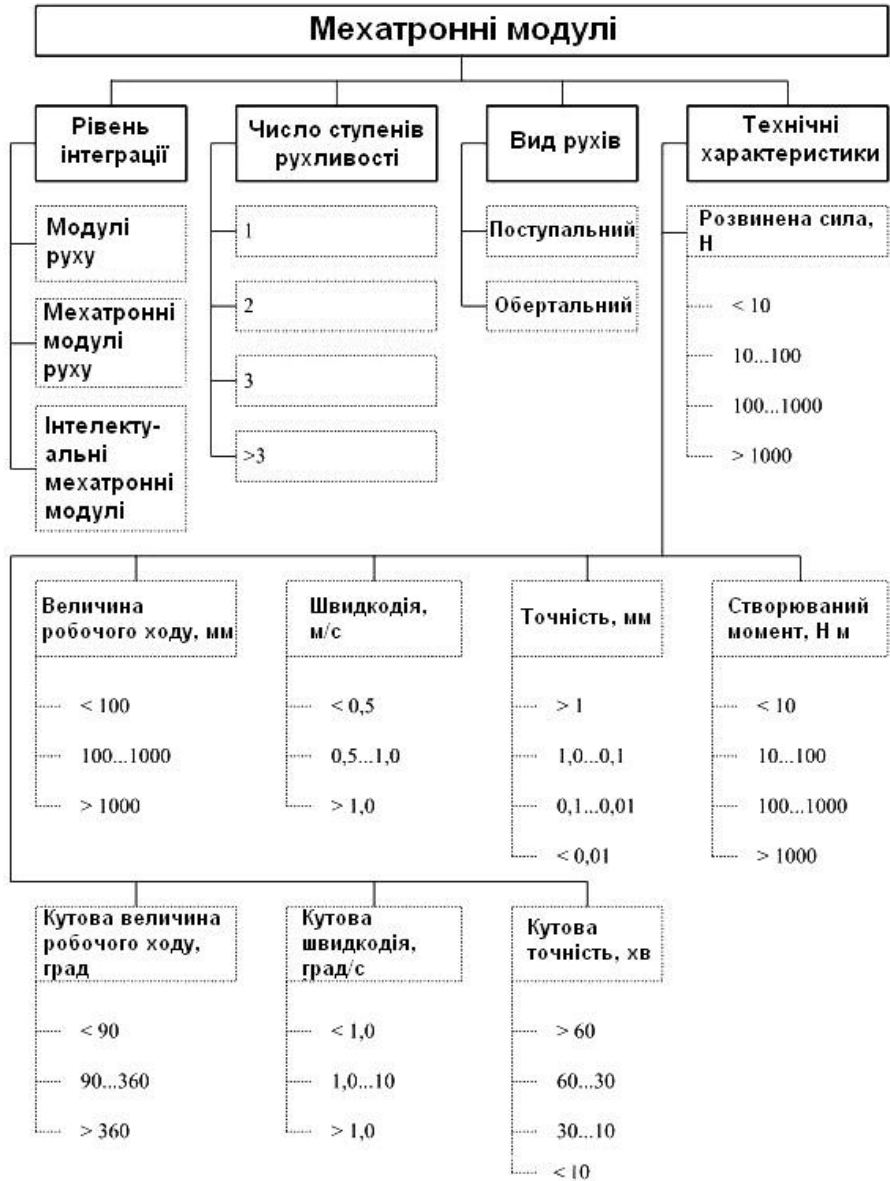


Рисунок 5.1 - Класифікація мехатронних модулів

Перетворювачі руху.

Передача руху від двигуна до вихідної ланки мехатронного модуля може бути забезпечена за допомогою різних перетворювачів руху (передач), структура й конструктивні особливості яких залежать від типу двигуна, виду переміщення вихідної ланки та їх розташування (компонування).

Перетворювачі руху призначено для перетворення одного виду руху в інший, узгодження швидкостей і обертаючих моментів двигуна й вихідної ланки. Для перетворення руху використовують гвинтові, рейкові, ланцюгові, тросові передачі, а також передачі зубчастим ременем, мальтійські механізми та ін. Тому що електродвигуни в основному високооборотні, а робочі швидкості вихідних ланок мехатронних модулів порівняно невеликі, то для узгодження швидкостей використовують понижувальні передачі (редуктори): зубчасті циліндричні й конічні, черв'ячні, планетарні й хвильові. Тип перетворювача руху вибирають, виходячи зі складності його конструкції, коефіцієнта корисної дії, люфту в передачі, габаритних розмірів і маси, властивостей самогальмування, твердості, зручності компонування, технологічності, довговічності, вартості й т.п. Вибір перетворювача руху впливає на характеристики мехатронного модуля.

Рейкові передачі. Рейкова передача призначена для перетворення обертового руху шестірні в поступальний рух рейки й, навпаки, поступального руху рейки в обертовий рух шестірні. Основними ланками рейкової передачі є шестірня й зубчата рейка (рис. 5.2).

Планетарні передачі. Планетарними називають передачі, що містять зубчасті колеса, осі яких рухливі, як показано на рис. 5.3. Рух цих коліс подібний до руху планет і тому їх називають планетарними або сателітами. Найпростіша планетарна передача складається із центрального сонячного зубчастого колеса із зовнішніми зубами, центрального корончатого зубчастого колеса із внутрішніми зубами, сателітів із зовнішніми зубами, які входять у зачеплення одночасно із сонячним і корончатим колесами, і водила, на якому розташовані осі сателітів (рис. 5.3).

У сучасних мехатронних модулях планетарні зубчасті передачі знаходять широке застосування завдяки їхній компактності й малій масі, реалізації великих передатних відношень, малого навантаження на опори, великого коефіцієнта корисної дії, високої кінематичної точності, твердості й надійності.



Рисунок 5.2 - Рейкова передача

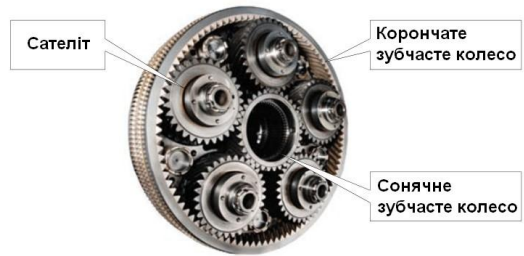


Рисунок 5.3 - Планетарна передача

При проектуванні планетарних зубчастих передач слід враховувати їх недоліки: конструктивну складність, підвищені вимоги до точності виготовлення й монтажу, зниження коефіцієнта корисної дії при збільшенні передатного відношення. Залежно від порядку накладення зв'язків на ланки планетарні передачі можуть використовуватися як для підсумовування декількох обертових рухів, так і для їхнього поділу між декількома веденими валами.

Хвильові зубчасті передачі.

Робота хвильової передачі заснована на принципі перетворення параметрів руху внаслідок хвильового деформування одної з ланок механізму. Цей принцип вперше був запропонований в 1944 році А.І. Москвітіним для фрикційної передачі з електромагнітним генератором хвиль, а потім в 1969 р. В. Массером для зубчастої передачі з механічному генераторі хвиль.

З погляду кінематики вона являє собою планетарну передачу, у якій одне з коліс виконане у вигляді гнучкого вінця. Хвильова зубчаста передача складається із гнучкого зубчастого колеса із зовнішніми зубами, твердого зубчастого колеса із внутрішніми зубами й генератором хвиль (рис. 5.4). Недоліками хвильових передач є: обмеження по частотах обертання ведучого валу генератора хвиль при великих діаметрах коліс (щоб уникнути високої окружної швидкості генератора), дрібні модулі зубів коліс, менша крутильна твердість гнучкого колеса порівняно зі звичайною зубчастою передачею.

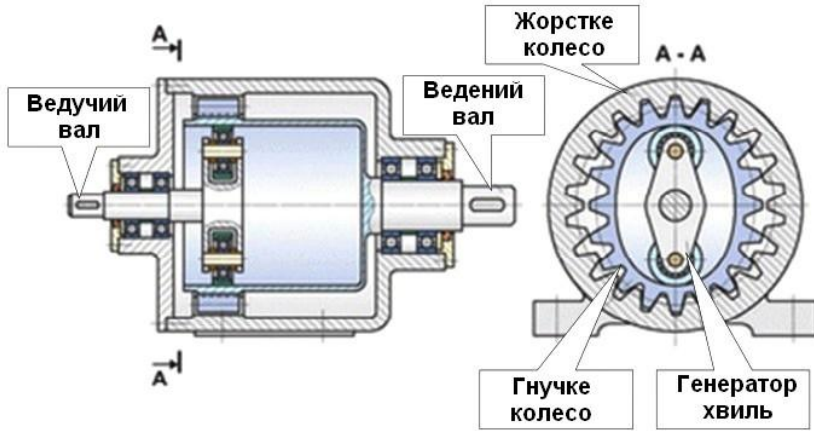


Рисунок 5.4 - Хвильова зубчаста передача

Хвильові передачі можуть працювати в якості редуктора (ККД 80...90 %) і мультиплікатора (ККД 60...70 %). У першому випадку провідною ланкою є генератор хвиль, у другому – вал гнучкого або твердого колеса.

Передача гвинт-гайка кочення (шарику-гвинтова передача) призначена для перетворення обертального в поступальний рух, і навпаки, поступального в обертаний рух (при забезпеченні відсутності самогальмування). Вона характеризується високим ККД (0,9...0,95), малим коефіцієнтом тертя-кочення, невеликим зношуванням, високою точністю ходу, довговічністю, можливістю повного усунення зазорів, високою чутливістю до мікропереміщень, можливістю роботи без змащення. Недоліками передачі є: досить складна технологія виготовлення, висока вартість, знижене демпфірування й необхідність захисту від пилу.

У гвинтових кулькових парах між робочими гвинтовими поверхнями гвинта й гайки (іноді вкладиша) поміщені сталеві кульки, як показано на рис. 5.5. Для забезпечення безперервної циркуляції кульок кінці робочої частини гвинтової поверхні з'єднані зворотним каналом. Зворотний канал може являти собою отвір, просвердлене в тілі гайки й з'єднуючий початок першого витка з кінцем останнього витка різьблення (рис. 5.5), вигнуту трубку, кінці якої вставлені в отвори гайки, просвердлені по дотичній до поверхні різьблення, спеціальний

вкладиш, який направляє кульки із западин одного витка через виступ різьблення гвинта в западину сусіднього витка.

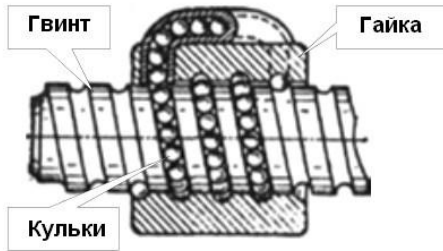


Рисунок 5.5 - Гвинтова кулькова пара



Рисунок 5.6 - Передача гвинт-гайка ковзання

Вкладиш вставляють у вікно гайки. У більшості випадків у гайці застосовують 3, 4 або 6 вікон, розташованих відповідно під кутом 120, 90 або 60 градусів.

Передача гвинт-гайка ковзання служить для перетворення обертального в поступальний рух, а іноді й для перетворення поступального в обертовий рух (при використанні багатозаходної гвинтової пари). Передача складається із гвинта й гайки, як показано на рис. 5.6.

Передача має простоту конструкції й виготовлення, компактність при високій навантажувальній здатності, високу надійність, плавність й безшумність, можливість забезпечення переміщень із великою точністю й вирашем у силі.

Недоліками передачі є: обов'язкова наявність зазорів (люфтів), підвищене зношування різьблення й низький ККД через великий коефіцієнт тертя-ковзання.

Диференціальна й інтегральна передачі гвинт-гайка.

Диференціальна передача гвинт-гайка складається із гвинта, що має дві різьбові ділянки з різьбленнями, що мають різний хід ($P_{h1} \neq P_{h2}$) і одного напрямку гвинтової лінії (правого або лівого), гайки та стійки, як показано на рис. 5.7 ($P_{h1} < P_{h2}$). При обертанні гвинта гайка робить поступальний результируючий рух: переносний рух разом із гвинтом відносно стійки й рух щодо гвинта (рис. 5.7). Напрямок і величина переміщень гайки залежить від співвідношення ходів різьби P_{h1} , P_{h2} (в однозаходної різьби крок P і хід P_h однакові, а в багатозаходної $P_h = n \cdot P$, де n – число заходів різьби).

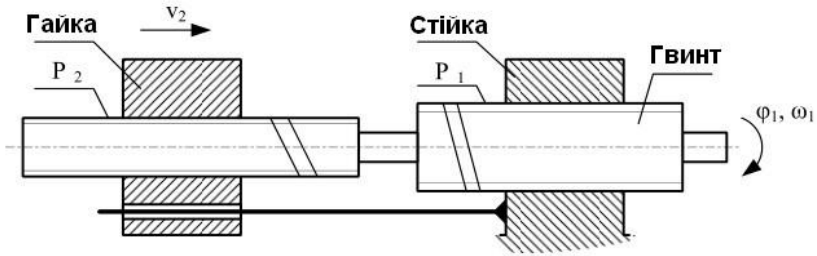


Рисунок 5.7 - Диференціальна передача гвинт-гайка

Диференціальна передача гвинт-гайка дозволяє одержати: при перетворенні обертового руху в поступальний – малі лінійні переміщення й швидкості гайки при великих кутових переміщеннях і швидкостях гвинта, при перетворенні поступального руху в обертальний – великі кутові переміщення й швидкості гвинта при малих переміщеннях і швидкостях гайки (має місце обмеження по куту самогальмування). Крок P_{h2} різьблення гвинта й гайки та інші параметри передачі визначають аналогічно гвинтовим передачам ковзання й кочення. Інтегральна передача гвинт-гайка влаштована аналогічно диференціальній передачі, але має протилежні напрямки гвинтової лінії на двох різьбових ділянках гвинта.

Передачі із гнучким зв'язком призначені для передачі обертового руху й перетворення поступального в обертальний рух, і навпаки, обертального в поступальний рух. До передач із гнучким зв'язком відносять ремінну, ланцюгову, тросову передачі й передачу сталеву стрічкою. Деякі приклади передач обертового руху представлені на рис. 5.8.

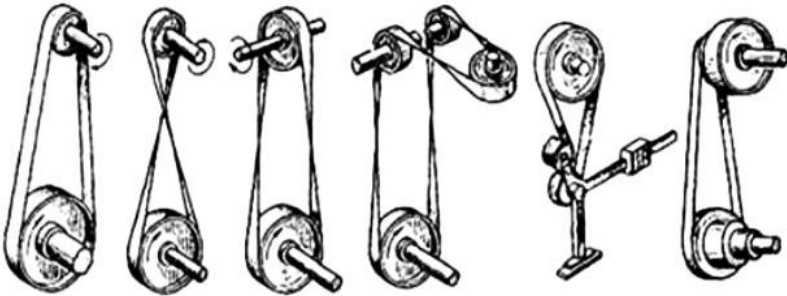


Рисунок 5.8 - Передачі із гнучким зв'язком

Напрявні. Напрявними називають конструктивні елементи пристрою, що забезпечують заданий відносний рух елементів механізму. У мехатронних модулях в основному застосовують напрямні для поступального руху. Їх використовують при необхідності здійснення переміщення однієї деталі щодо іншої із заданою точністю.

До напрямних висувають наступні вимоги: забезпечення плавності переміщення, малі сили тертя, великий ресурс роботи, зносостійкість, здатність до переміщення в широкому температурному діапазоні. Залежно від виду тертя розрізняють напрямні з тертям ковзання й кочення. Вибір типу напрямних і конструктивних схем залежить від їхнього призначення, а також від вимог до точності напрямку переміщення, допустимого навантаження, значень сил тертя, вартості виготовлення.

Напрявні з тертям ковзання й кочення по характеру (виду) сприйманого навантаження розрізняють відкриті й закриті. До відкритих відносять напрямні, у яких для замикання силового ланцюга використовують додаткові притискні зусилля (маса рухливої деталі, зусилля плоскої або спіральної пружини, мембрани). Закритими є напрямні, у яких рухливий вузол має один ступінь волі (замикання силового ланцюга забезпечується конструктивним виконанням).

Напрявні залежно від форми виконання робочих поверхонь ділять на циліндричні, призматичні (наприклад, типу «ласточкин хвіст»), Н-, П-, Т-образні.

Напрявні з тертям ковзання.

По конструктивному виконанню напрямні з тертям ковзання простіше напрямних з тертям кочення й менші їх по габаритних розмірах. При відповідному виборі матеріалів вони зазнають впливу від незначних температурних перепадів. Основний їхній недолік – відносно великі втрати на тертя. Приклад конструктивної схеми призматичної відкритої напрямної з тертям ковзання наведений на рис. 5.9, б, де по циліндричних напрямних, закріплених на нерухливій основі, переміщається каретка із призматичними робочими поверхнями.

Схеми напрямних закритого типу наведені на рис. 5.9, а, в, г. На схемі (рис. 5.9, а) по циліндричних напрямних переміщається повзун із циліндричною й плоскою робочими поверхнями; по прямокутним призматичним напрямним (рис. 5.9, в) переміщається П-образна призма; по призматичних напрямних типу «ласточкин хвіст» з кутом профілю $\alpha = 45^\circ$ переміщається призма.

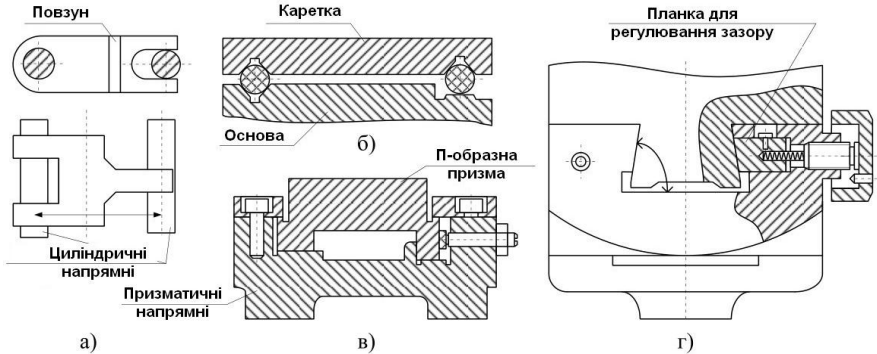


Рисунок 5.9 - Напрявні з тертям ковзання

Для призматичних напрямних типу «ласточкин хвіст» пред'являються підвищені вимоги до точності складання й регулювання для запобігання перекосу деталей і можливого заїдання напрямних. У призматичних напрямних застосовують призми трапецеїдального, прямокутного або трикутного перетину. Регулювання зазорів у напрямних роблять за допомогою планок або «сухариків» (рис. 5.9, г).

Напрявні з тертям кочення.

Напрявні з тертям кочення застосовують у тих випадках, коли потрібно забезпечити легкість і плавність руху. У порівнянні з напрямними тертя ковзання ці напрямні мають менші втрати на тертя, більш довговічні, малочутливі до перепадів температури.

Напрявні з тертям кочення за формою тіл кочення ділять на кулькові й роликові (циліндричні й конічні). Для втримання кульок або роликів на певній відстані одне від одного застосовують сепаратори, виготовлені з латуні або текстоліту. Можливе застосування стандартних кулькових або роликів підшипників.

Істотними факторами, що виявляють негативний вплив на роботу напрямних з тертям кочення, є зазори між сполученими з тілами кочення поверхнями каретки й основи. У відкритих напрямних зазори вибираються автоматично (саморегулюються), а в закритих потрібно їхнє регулювання.

На рис. 5.10 наведена конструктивна схема закритої кулькової напрямної із сепараторами, у якій регулювання зазору між кульками й кареткою проводять за допомогою переміщення однієї або двох пла-

нок з наступним їхнім закріпленням гвинтами. У роликових напрямних (рис. 5.10, 5.11) основною деталлю є ролик, який перекочується по циліндричній або пласкій поверхні. У якості роликів іноді використовують стандартні радіальні підшипники.

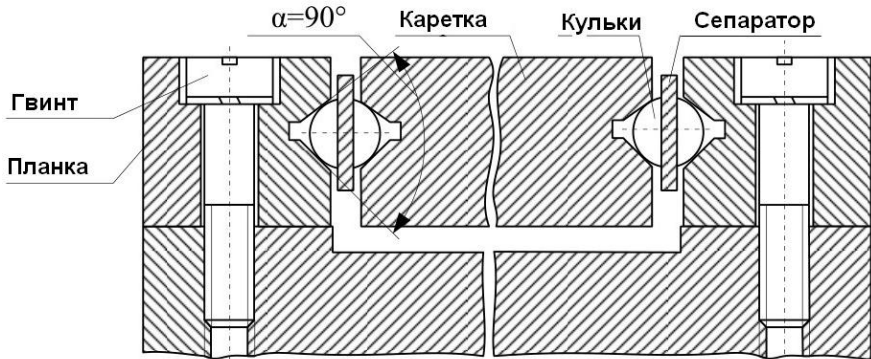


Рисунок 5.10 - Напрямні з тертям кочення закритого типу

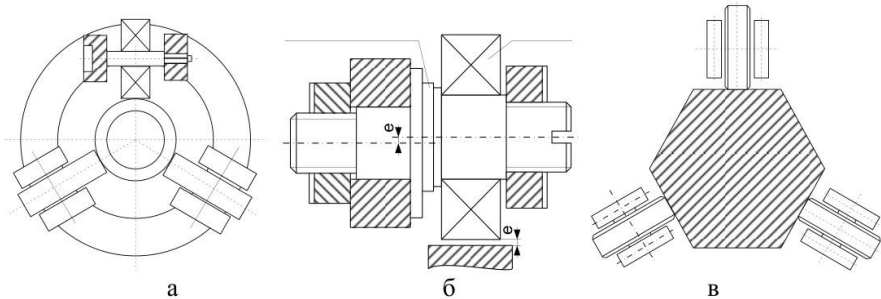


Рисунок 5.11 - Напрямні з тертям кочення відкритого типу

Для забезпечення контакту всіх роликів з напрямними повинно бути передбачене спеціальне регулювання, один з варіантів якої показаний на рис. 5.11,б. Ролик встановлюється на осі з ексцентриситетом.

Для напрямних, представлених на рис. 5.11, в - ролики з ексцентричними осями необов'язкові, тому що кожен ролик закріплений в окремій державці. Регулювання здійснюють переміщенням державок.

На рис. 5.12 а, б, в, наведені конструктивні схеми роликових напрямних закритого типу. Останнім часом застосовують більш економічні кулькові напрямні лінійного переміщення, які зменшують габарити

ритні розміри конструкції, масу й загальну вартість мехатронного модуля.

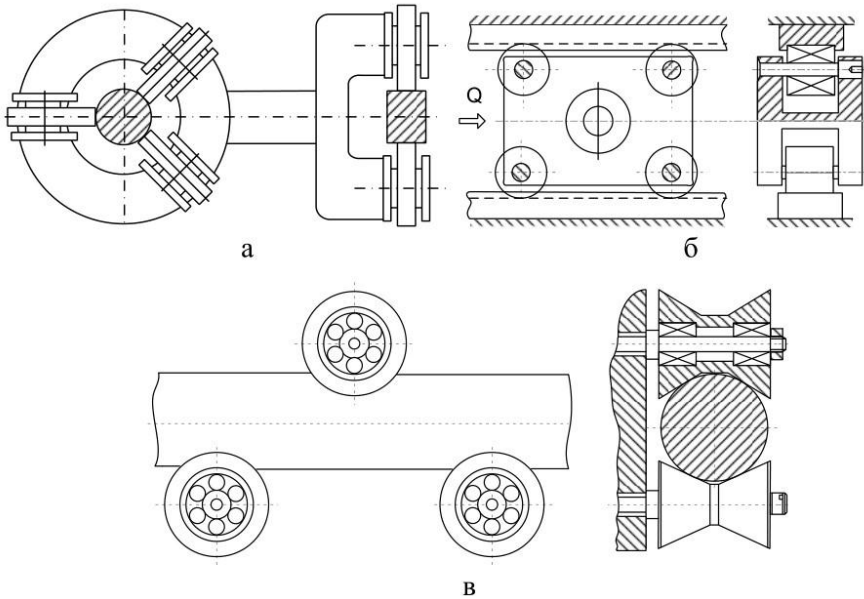


Рисунок 5.12 - Роликові напрямні закритого типу

Гальмові пристрої й механізми для вибірки люфтів.

Гальмовими називають пристрої, якими постачають мехатронні модулі, для зменшення швидкості рухливої ланки, зупинки й фіксації її в певній позиції. Залежно від природи сил гальмування гальмові пристрої ділять на механічні, гідравлічні, пневматичні, електричні й комбіновані. Механічні гальмові пристрої – пружинні, гумові, еластомерні, інерційні та фрикційні. Гідравлічні – пристрої дросельного регулювання. Пневматичні – можуть бути напірними й вакуумними. До електричних відносять електромагнітні, індукційні й гістерезисні, а також порошкові гальмові пристрої із сухим і рідким наповнювачем фрикційного й дросельного типів. Комбіновані – містять у собі два або більше типів пристроїв (наприклад, пневмогідравлічні або пружинно-пневматичні).

До всіх типів гальмових пристроїв пред'являють наступні основні вимоги: забезпечення заданого закону гальмування; безударний

останов і фіксація рухливих елементів у точках позиціонування; висока надійність і довговічність конструкції; висока швидкодія; простота й компактність конструкції; стабільність характеристик при зміні умов роботи; мала чутливість до зміни температури, вологості, маси що гальмується, швидкості; можливість настроювання й доступність регулювання; зручність огляду й обслуговування; низька вартість, мінімальні габарити й маса.

Механічні гальмові пристрої.

У механічних гальмових пристроях силу опору руху рухливої ланки створюють деформацією робочих елементів (пружні) або тертям (фрикційні). У якості пружних елементів найбільш часто застосовують циліндричні пружини стиску, рідше - розтягання. Поширення одержали гумові й гумометалеві пружні елементи різної конфігурації, а також пінополіуретанові пружні елементи.

Основними робочими елементами фрикційних гальмових пристроїв є пари тертя обертового або поступального типів.

Прикладами найпростіших гальмових пристроїв можуть служити одна або кілька циліндричних пружин, які встановлюють безпосередньо між функціональною ланкою й упорами паралельно осі його руху або оформляють у вигляді окремого конструктивного вузла.

Циліндричні пружини допускають більші деформації, зберігають свої характеристики під впливом тривалого статичного навантаження, витримують значні температурні впливи, мають мале демпфірування, але можуть виникати труднощі при регулюванні (настроюванні) силової характеристики, тому що початкове підтискання приводить до виникнення стрибка навантаження на маси що гальмуються.

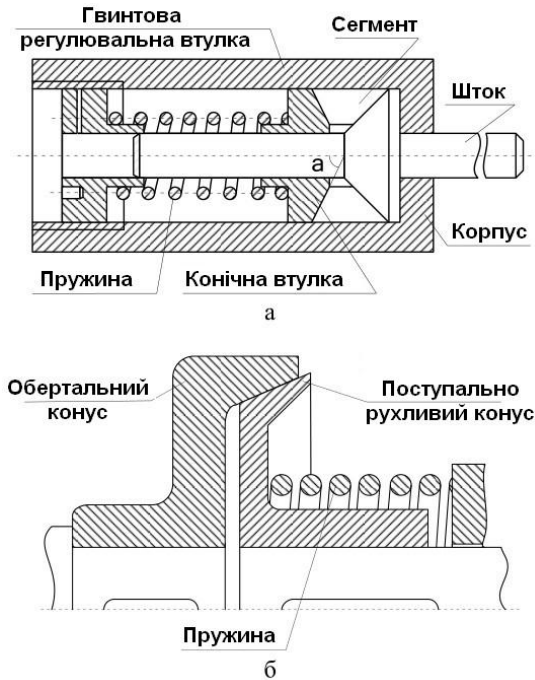
Гумові гальмові пристрої складаються з послідовно встановлених гумових втулок, розділених металевими шайбами. По конструкції гумові втулки можуть працювати на стиск або зрушення. Втулки, що працюють на стиск, мають невелику піддатливість, але значною навантажувальною здатністю, втулки зрушення – навпаки великою піддатливістю й порівняно малою навантажувальною здатністю.

Гумометалеві гальмові пристрої мають високу надійність, просту конструкцію й технологію виготовлення, зручність обслуговування й велику енергоємність. Є недоліки – чутливість до зміни температури й вологості, наявність великої сили віддачі.

Фрикційні гальмові пристрої використовують для гальмування, позиціонування й утримання (фіксації) функціональних ланок. Вони

дозволяють перетворити більшу частину кінетичної енергії в теплову, яка розсіюється в навколишньому середовищі. По конструкції фрикційні гальмові пристрої діляться на автономні поступального й обертового руху, вбудовані в пневмо- та гідродвигун, керовані й некеровані, нормально замкнені й розімкнуті, одно- та двосторонньої дії.

Як правило, одна з ланок фрикційної пари кріпиться до корпусу або іншому вузла, щодо якого здійснюється гальмування. На рис. 5.13 представлені приклади фрикційних гальмових пристроїв.



а – пружно-фрикційний із циліндричною пружиною та розрізною конічною втулкою; б – фрикційне конусне гальмо

Рисунок 5.13 - Фрикційні гальмові пристрої

При переміщенні штока з конічним буртиком сегменти сковзають по внутрішній циліндричній поверхні корпусу притискаючись до неї пружиною, розташованою між конічною й гвинтовою регулювальною втулкою (рис. 5.13, а). Фрикційне конусне гальмо (рис. 5.13, б)

складається з обертового конуса з робочою ланкою конуса, що поступально рухається, і пружини.

Фрикційні гальмові пристрої характеризуються нестабільністю сили тертя та її залежністю від якості й стану поверхонь ковзання (шорсткості, наявності масла, тощо) і швидкості переміщення рухливих елементів, що приводить до зміни умов роботи у порівнянні з номінальними, й відхиленню реального закону гальмування від заданого. Тому пристрої цього типу доцільно використовувати для гальмування механізмів з досить стабільними режимами роботи.

Для створення гальмових пристроїв із програмованими точками останову й регулювання швидкості руху вихідної ланки використовують вбудовані фрикційні пристрої.

Електромагнітні гальмові пристрої.

У керованих електромагнітних гальмових пристроях джерелом створення гальмуючого моменту або зусилля є електромагнітне поле, що впливає безпосередньо на елементи що рухаються (електромагнітні, індукційні та гістерезисні гальма), або побічно через порошкоподібний сухий або рідкий наповнювач (електромагнітні порошкові або з феромагнітними рідинами гальма).

За принципом дії та устрою, електромагнітні гальмові пристрої індукційного й гістерезисного типів аналогічні електричним двигунам, у яких ротор або статор нерухливий. Взаємодія між рухливою і нерухливою частинами гальма здійснюється електромагнітним полем, створюваним обмоткою керування (збудження).

За принципом дії електромагнітні гальмові пристрої з порошковим і рідким наповнювачами аналогічні відповідно до фрикційних гальм і гідравлічним гальмовим пристроям дросельного регулювання. Дія електромагнітного порошкового гальма фрикційного типу заснована на властивості сухого або змоченого в маслі феромагнітного порошку збільшувати в магнітному полі свою в'язкість і міцно прилипати до поверхні магнітної системи.

Механізми для вибірки люфтів.

Точність роботи мехатронних модулів визначається допусками на розміри деталей що сполучаються, і величиною мертвого ходу (холостого, тобто не переданого на відому ланку руху провідної ланки механізму, що виникає в момент реверсування руху).

Мертвий хід призводить до помилок переміщення, тому його прагнуть зменшити або усунути. Цього можна досягти за допомогою

спеціальних регулювальних пристроїв-механізмів вибірки мертвого ходу (люфтоусуваючих механізмів).

У мехатронних модулях можуть використовувати механізми вибірки бічного зазору між зубами коліс зубчастих передач двох типів: автономні й з додатковим кінематичним ланцюгом (замкненим енергетичним потоком). В автономних механізмах вибірки мертвого ходу використовують метод роздвоєння веденого колеса, де в якості силових елементів використовують пружини.

Крім вибірки мертвого ходу за допомогою пружин використовують тверду фіксацію, що полягає в попередньому відносному зсуві половинок роздвоєного зубчастого колеса та їхньому твердому закріпленні за допомогою гвинтів, болтів, клемових з'єднань, тощо. На рис. 5.14 представлена черв'ячна передача з роздвоєним черв'ячним колесом.

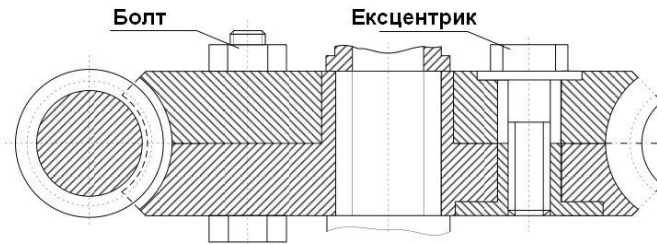


Рисунок 5.14 - Черв'ячна передача з роздвоєним черв'ячним колесом

Основними недоліками вибірки мертвого ходу методом роздвоєння колеса є: наявність великої кількості додаткових елементів (пружин, зубчастих коліс, гвинтів, тощо), збільшені втрати в зачепленні, обумовлені тим, що тертя виникає з двох сторін зуба.

Зазначені недоліки частково можуть бути усунуті в механізмах вибірки мертвого ходу з додатковим кінематичним ланцюгом (безлюфтові механізми із замкненим енергетичним потоком). Вони дозволяють здійснити повний вибір люфтів у всіх складових ланках шляхом примусового розвороту в протилежні сторони двох соосно розташованих елементів однієї з передач. Як правило, для утвору замкнутого контуру до вихідного кінематичного ланцюга додають так само паралельно розташований кінематичний ланцюг.

Розрізняють два способи вибірки бічного зазору у гвинтових механізмах – радіальний і осьовий зсув гайки щодо гвинта. При радіальному способі здійснюють стиск гайки в радіальному напрямку, а при осьовому – відносний зсув розрізної гайки в осьовому напрямку.

Радіальний спосіб усунення мертвого ходу доцільно застосовувати для метричних різьб, тобто для різьби із великим кутом профілю, а осьовий спосіб – для різьб із малим або нульовим кутом профілю (трапецеїдальні, упорні, прямокутні). Пристрої, що забезпечують вибірку радіальної складової бічного зазору, являють собою розрізні гайки. У цих пристроях дві половинки гайки стягаються гвинтами й обжимають гвинт. При цьому створюється нерівномірне обтиснення гвинта, що викликає нерівномірне зношування різьблення гайки.

На рис. 5.15 а, в, г, наведені механізми для вибірки радіальної складової бічного зазору, які необхідно періодично регулювати, а в пристрої рис. 5.15 б, що має пружини, це не потрібно.

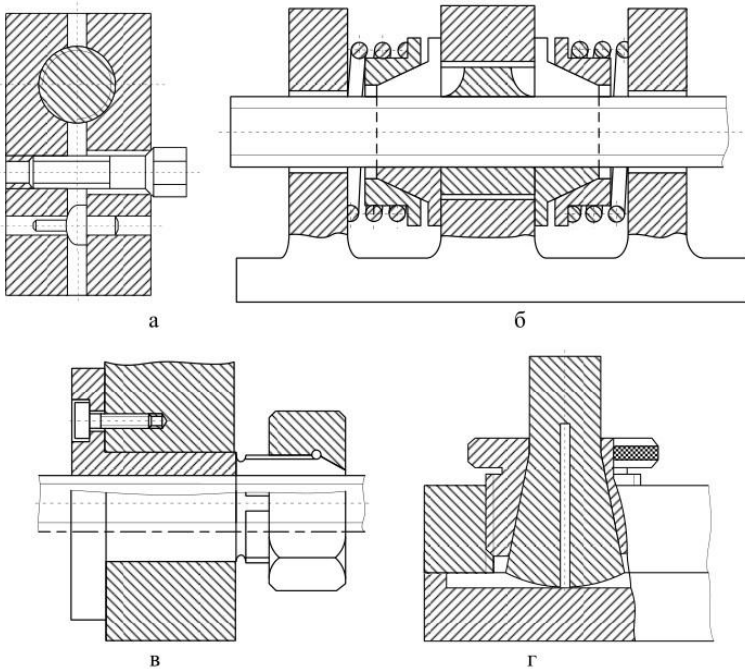


Рисунок 5.15 - Механізми вибірки радіальної складової бічного зазору гвинтової передачі

Пристрої з розрізною гайкою й цанговим затискачем забезпечують більш рівномірне обтиснення гвинта, що сприяє вирівнюванню зношування гвинтової пари. Вибірку осьової складової бічного зазору здійснюють шляхом відносного осьового зсуву частин складеної гайки. На рис. 5.16 а показана схема люфтоусуваючого механізму на основі гайки із твердим регулюванням осьового зазору (загвинчуванням). Люфт вибирається одночасним контактом профілів різьблень гвинта й профілів обох гайок, як показано на рис. 5.16 в.

Люфтоусуваючий механізм на основі гайки із пружним регулюванням осьового зазору показаний на рис. 5.16, б. Вибірку осьової складової бічного зазору здійснює пружина, віджимаючи регулюючу гайку від базової гайки, забезпечуючи двопрофільний контакт різьблення гвинта з різьбленнями гайок, як показано на рис. 5.16 г.

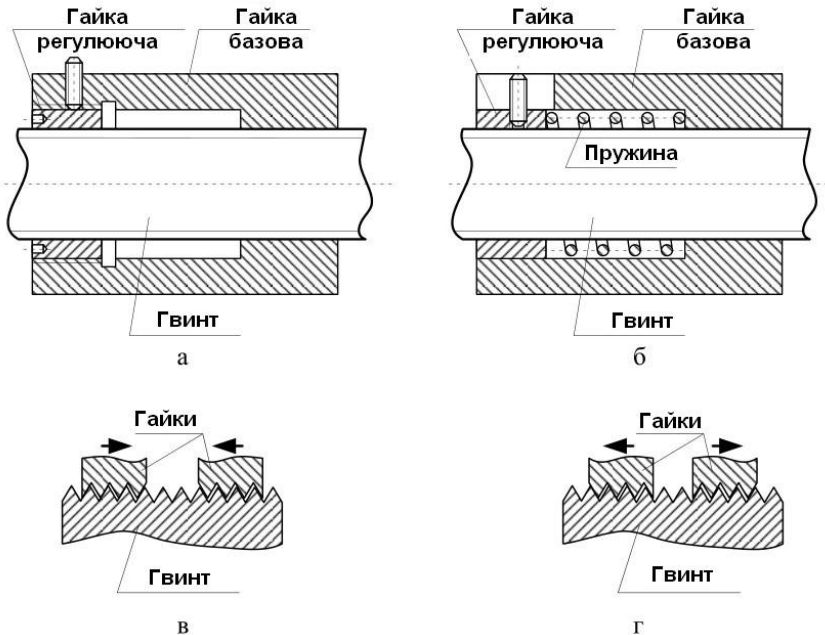


Рисунок 5.16 - Схема люфтоусуваючого механізму на основі гайки із твердим і пружним регулюванням осьового зазору

Механізми вибірки мертвого ходу на основі гайок із твердим і пружним регулюванням осьової складової бічного зазору забезпечу-

ють високу точність відносного переміщення гвинта й гайки при їхньому русі як у прямому, так і у зворотному напрямках.

Електродвигуни мехатронних модулів.

Застосування в мехатронних системах електродвигунів постійного струму обумовлене такими їхніми перевагами як: лінійність характеристик, широкий діапазон регулювання швидкості, достатня перевантажувальна здатність, рівномірне обертання на низьких швидкостях. У свою чергу двигуни постійного струму з постійними магнітами, які за принципом дії не відрізняються від двигунів з електромагнітним збудженням, дозволяють одержати більш високий ККД, менші масогабаритні показники (в області малих потужностей), мають полегшені умови охолодження. Постійний магніт виготовляють із магнітотвердих матеріалів, які мають широкую петлю гістерезису.

Для одержання постійних магнітів використовують різні сплави на основі заліза, алюмінію, цинку, кобальту й деяких рідкісноземельних металів. Найкращі властивості має сплав самарію з кобальтом і празеодимом. Регулювання швидкості двигуна здійснюється шляхом зміни якірної напруги. Сімейство механічних характеристик для різних значень якірної напруги наведено на рис. 5.17.

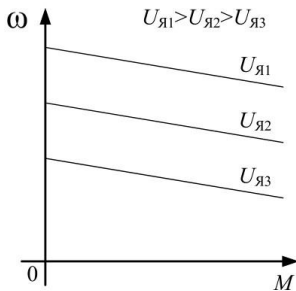


Рисунок 5.17 - Механічні характеристики

Наявність у двигунах постійного струму колекторно-щіткового вузла, що знижує надійність систем та збільшує витрати на обслуговування, призвели до розробки вентильних двигунів. Вентильний двигун (ВД) містить електронний комутатор (К), який за своїми функціями заміняє колектор і щітки двигуна. На статорі вентильного двигуна розташовується трифазна обмотка змінного струму, що живиться через комутатор. Ротор забезпечує зрушення двигуна за допомогою постійного магніту (потужності до 30 кВт).

Комутатор за принципом дії являє собою керований інвертор (КІ), який може живитися безпосередньо від джерела постійного струму (аккумуляторна батарея, мережа постійного струму) або від керованого випрямляча (КВ), якщо двигун підключений до мережі змінного струму. У другому випадку комутатор являє собою перетворювач частоти з ланкою постійного струму.

Керування комутатором проводиться за допомогою датчика положення ротора (ДП), установлюваного на валу двигуна. ДП формує сигнали, що надходять на систему керування (СК). У результаті чого за допомогою статорних обмоток створюється обертове магнітне поле, яке взаємодіє з полем ротора й у результаті виникає синхронізуючий момент. Функціональна схема включення ВД показана на рис. 5.18.

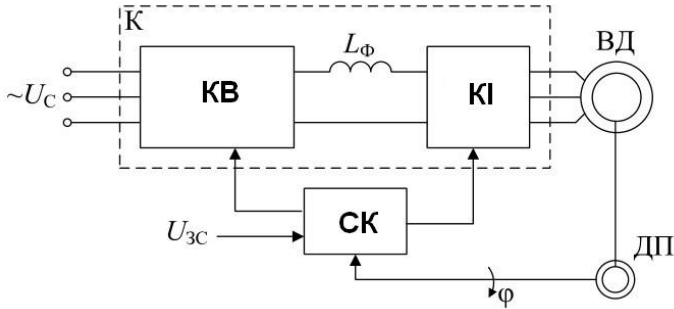


Рисунок 5.18 - Функціональна схема вентильного двигуна

Регулювання швидкості вентильного двигуна проводиться шляхом зміни задаючого сигналу U_{zc} , внаслідок чого змінюється вихідна напруга і частота струму КІ.

Вентильні двигуни в порівнянні з колекторними мають ряд переваг: більш висока надійність і термін служби; поліпшення теплової характеристики через відсутність теплоелементів у роторі; більш висока швидкодія за рахунок меншого моменту інерції ротора, більша перевантажувальна здатність. Така електрична машина з n -фазною обмоткою на статорі й ротором у вигляді постійного магніту являє собою по суті синхронний двигун.

Відомо, що різновидом синхронного двигуна є кроковий двигун, у якого живлення статорних обмоток здійснюється шляхом подачі імпульсів напруги від джерела постійного струму за допомогою електронного комутатора. При цьому ротор, виконаний у вигляді постійного магніту, під впливом кожного імпульсу робить певне кутове переміщення, називане кроком. Крокові двигуни застосовується в тому випадку, якщо керуючий сигнал заданий у вигляді послідовності імпульсів. Це має місце в приводах роботів, маніпуляторів, верстатів ЧПУ. Найпростіша двофазна модель, що пояснює принцип роботи

крокового двигуна показана на рис. 5.19.

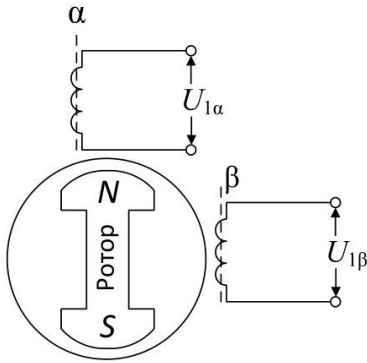


Рисунок 5.19 - Двофазна модель крокового двигуна

Якщо обмотка статора по осі α підключена до джерела з напругою $U_{1\alpha}$ і в ній протікає постійний струм, а обмотка по осі β відключена, то створюване обмоткою α поле статора буде взаємодіяти з полем ротора, внаслідок чого виникає синхронізуючий момент.

Ротор двигуна фіксується в положенні, обумовленому вектором поля статора з точністю, що залежить від навантаження й твердості електромагнітної кутової характеристики. Перемикання обмоток викликає поворот ротора на один крок, якому відповідає кут $\Delta\varphi_{ш}$.

Середня кутова швидкість ротора визначається як:

$$\omega_{ср} = \frac{\Delta\varphi_{ш}}{\Delta t_{ш}} = f\Delta\varphi_{ш}, \quad (5.1)$$

де f – частота проходження імпульсів напруги, що надходять на статорні обмотки.

У мехатронних модулях лінійного руху, які застосовуються в багатоцільових верстатах, комплексах лазерного різання, деяких видах транспорту, використовується лінійний двигун. Основними перевагами лінійного двигуна в порівнянні із традиційним двигуном і передачею типу зубчастої рейки або гвинтової передачі, є в кілька разів більша швидкість руху й прискорення, висока точність руху, сталість характеристик.

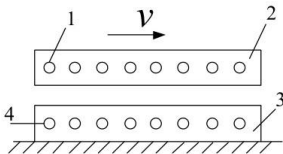


Рисунок 5.20 - До принципу дії ЛАД

Лінійні двигуни можуть бути асинхронними, синхронними й постійного струму. Найбільше поширення одержали асинхронні двигуни. Уяву про устрій лінійного асинхронного двигуна (ЛАД) можна одержати, якщо подумки розрізати уздовж по утворюючій статор і ротор асинхронного двигуна обертового руху й розгорнути їх у площині, як показано на рис. 5.20.

Принцип дії ЛАД аналогічний обертовому асинхронному двигуну. При підключенні обмотки 4 статора 3 до мережі змінного струму вона створює магнітне поле, що рухається, з лінійною швидкістю

$$v = 2\tau f_1, \quad (5.2)$$

де f_1 - частота живлячої напруги;

τ - довжина полюсного розподілу статора.

Магнітне поле що лінійно переміщається, наводить в обмотці 1 ротора 2 ЕРС, під дією якої в ній протікає струм. Взаємодія цього струму з магнітним полем створює на роторі (його називають вторинним елементом) тягове зусилля, під дією якого й буде відбуватися рух.

ЛАД можуть працювати й у зверненому режимі, коли вторинний елемент нерухливий, а переміщається статор. Такі ЛАД звичайно застосовуються на транспортних засобах, коли в якості вторинного елемента використовується рейка або спеціальна смуга, статор розташований на рухливому засобі. Для ЛАД, як і звичайного обертового асинхронного двигуна, регулювання швидкості здійснюється шляхом зміни частоти живлячої напруги, а гальмування – динамічне або противмиканням.

Питання для самоперевірки

1. Перелічіть класифікаційні ознаки мехатронних модулів по конструктивних ознаках.
2. Наведіть приклади перетворювачів руху.
3. Яка область застосування рейкових передач?
4. Назвіть особливості застосування планетарних передач.
5. Які є особливості застосування хвильових зубчастих передач?
6. Наведіть порівняльні відмінності передач гвинт-гайка кочення від гвинт-гайка ковзання.
7. Які області застосування диференціальних і інтегральних передач гвинт-гайка?
8. Яке призначення напрямних, та які є їхні різновиди?
9. Який принцип дії гальмових пристроїв?
10. Які є механізми для вибірки люфтів у мехатронних пристроях?
11. Перелічіть переваги двигуна постійного струму з постійними магнітами.
12. З яких матеріалів виготовляються постійні магніти для двигунів?

13. Поясніть призначення електронного комутатора у вентильному двигуні.
14. Назвіть спосіб регулювання швидкості крокового двигуна.
15. У яких механізмах застосовуються лінійний двигун?
16. Як забезпечується регулювання вихідної напруги в схемі Ларіонова?
17. Чому дорівнює середнє значення напруги на навантаженні в широтно-імпульсному перетворювачі?
18. Які функції виконує інвертор у ПЧ із ланкою постійного струму?
19. Запишіть закон регулювання напруги при зміні частоти ПЧ виходячи з незмінної перевантажувальної здатності двигуна.
20. Укажіть переваги ПЧ із безпосереднім зв'язком з живильною мережею.
21. Назвіть переваги мікропроцесорних систем керування.
22. Дайте класифікацію мікропроцесорів відповідно до використовуваного набору команд.
23. Дайте класифікацію мікропроцесорів відповідно до методів роботи з пам'яттю.
24. Приведіть структуру мікропроцесорного ядра.
25. Що являють собою мікроконтролери?
26. Що являють собою цифрові сигнальні процесори?
27. Класифікація мехатронних модулів.
28. Сформулюйте визначення «модуль руху», «мехатронний модуль руху» і відмінності між ними.
29. Поясніть принцип дії модулів руху.
30. Склад мехатронного модуля руху.
31. Структурна й функціональна схема мехатронних модулів руху.
32. Що таке контролери руху?
33. Що таке інтелектуальні силові модулі?
34. Що таке інтелектуальні сенсори?
35. Що таке інтелектуальні мехатронні модулі?
36. Визначення, структура й класифікація мікромехатронних пристроїв.
37. Області застосування мікромехатронних пристроїв.
38. Принципи функціонування розповсюджених мікромехатронних пристроїв.
39. Оцінка рівня інтеграції мікромехатронних систем.

ЛЕКЦІЯ № 6. МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ

План лекції. Інформаційні пристрої мехатронних систем: датчики положення, швидкості і технологічних параметрів. Завдання управління координованими рухами машин. Ієрархія управління в мехатронних системах. Системи управління виконавчого, тактичного і стратегічного рівнів. Інтелектуальні методи управління.

Література: [1], [5]-[11], [18]-[20], [22]-[44].

Датчики положення.

Усі датчики, у тому числі й датчики положення, перетворюють контрольовану величину у вихідний електричний сигнал для подальшого виміру й перетворення. Перетворення, як правило, містить у собі: нормування вихідного сигналу, усунення перешкод, компенсацію коливань нульової точки.

По виду вихідної величини розрізняють параметричні й генераторні датчики. У параметричних датчиках контрольована величина перетворюється в зміни таких параметрів як активний опір, індуктивність або ємність. Параметричні датчики вимагають джерела живлення для виявлення зміни контрольованої величини. У генераторних датчиках зміни контрольованої величини перетворюються в зміни ЕРС на виході датчика, а це не вимагає окремого джерела живлення.

Одним з найпоширеніших методів виміру переміщення й кута повороту, який використовується в різних системах автоматики, є потенціометричний метод. Зміна опору досягається зміною рухливої щітки. Деякі варіанти схем потенціометричних датчиків наведені на рис. 6.1. Регульований резистор R_p виконується із дроту, шару напівпровідника, металевої плівки.

Характеристики датчиків залежно від того як вони включені реостатом або потенціометром виражаються залежностями $R(x)$ або $U(x)$, де R - вихідний опір, U - вихідна напруга, X - зміна щітки.

Потенціометри залежно від типу руху можуть бути лінійними або кутовими. При індуктивному методі виміру переміщення використовується явище зміни магнітного поля індуктивності L у результаті руху феромагнітного сердечника. Найчастіше індуктивні датчики включаються в мостові диференціальні схеми, які забезпечують велика відносну зміну вихідного сигналу й розширення лінійної зони хара-

ктеристики, ніж інші схеми включення. Схеми включення індуктивних датчиків приводяться на рис. 6.2.

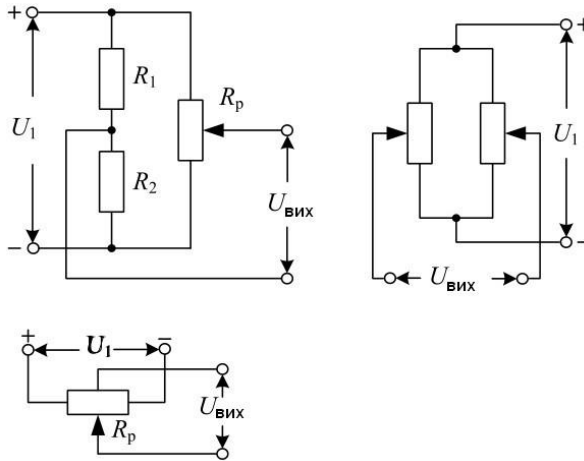


Рисунок 6.1 - Схеми потенціометричних датчиків

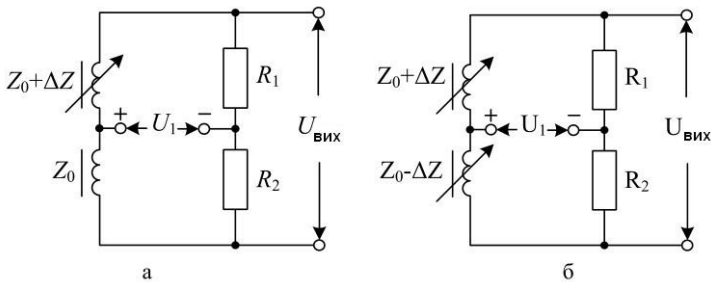


Рисунок 6.2 - Мостова схема з одним регульованим плечем (а), диференціальна схема (б)

У цих схемах Z_0 - повний опір обмотки датчика в рівноважному стані мосту, ΔZ - зміна опору обмотки датчика в результаті переміщення X , U_1 - напруга джерела живлення. Вихідна напруга $U_{вих}$ залежно від переміщення визначається характеристикою, показаною на рис. 6.3. Індуктивні датчики можуть бути використані для виміру кутових і лінійних (до 2 м) переміщень. Погрішність цих датчиків обумовлена в основному температурою й звичайно становить 0,1-1,5 %.

Зазначені датчики досить різноманітні по конструкції й широко використовуються в приводах металорізальних верстатів, а також у

приводах регулювальних органів ядерних реакторів.

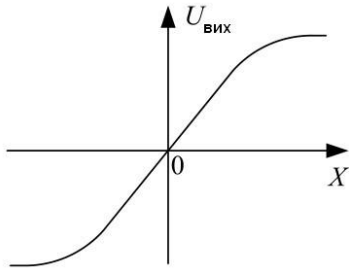


Рисунок 6.3 - Вихідна характеристика

У ємнісних датчиках зміна переміщення перетворюється в зміну ємності конденсатора. При цьому може змінитися площа пластин, відстань між ними, може відбуватися заміна одного діелектрика іншим, як показано на рис. 6.4. Для випрямлення характеристики $C(x)$ застосовуються диференціальні датчики (рис. 6.4 в, г). У різних системах автоматизації сигнал зворотного зв'язку по куту або керуючий сигнал у задаючих пристроях формується за допомогою сельсина або обертового трансформатора.

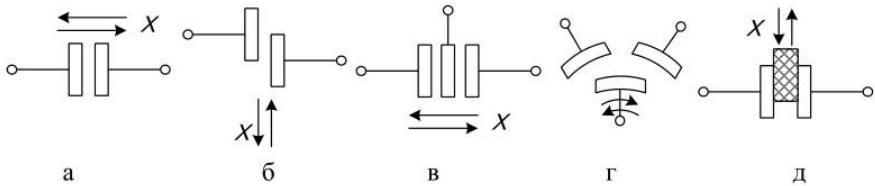


Рисунок 6.4 - Ємнісні датчики

Сельсин являє собою мікромашину змінного струму, який має дві обмотки: однофазну (обмотку збудження) і трифазну (обмотку синхронізації). Схема включення сельсина показана на рис. 6.5.

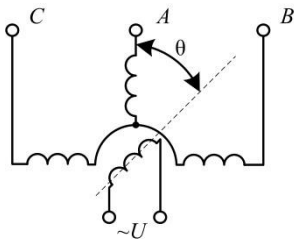


Рисунок 6.5 - Схема включення сельсина

Кут повороту ротора Θ перетворюється в амплітуду або фазу вихідного переміщення. Залежно від використання тієї або іншої координати розрізняють амплітудний режим, коли $\varphi = \text{const}$, а $U_{\text{вих}} = f(\Theta)$, і режим фазообертача, коли $U_{\text{вих}} = \text{const}$, $\varphi = f(\Theta)$. В амплітудному режимі обмотки збудження одержує живлення від мережі змінного струму й магнітний потік, що діє по осевій лінії обмотки збудження, наводить відповідні ЕРС у фазах обмотки сельсина.

Характеристика управління сельсина в амплітудному режимі

здобуває синусоїдальну залежність як показано на рис. 6.6.

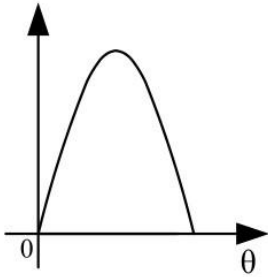
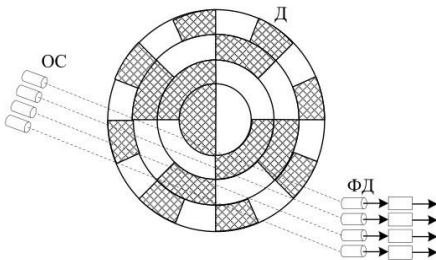


Рисунок 6.6 - Характеристика управління сельсина

Позитивні значення ЕРС відповідають $\varphi = 0$, а негативні $\varphi = \pi$. У режимі фазообертача обмотки статора одержують живлення від джерела трифазної напруги з незмінною амплітудою.

В обмотці ротора, вісь якої зрушена на кут Θ відносно початку відліку, наводиться ЕРС, що має зрушення по фазі, рівної φ . В системах, у яких потрібний більш точний вимір кутової координати, замість сельсинів застосовуються синусно-косинусні обертові трансформатори (резольвери).

За своїм устроєм синусно-косинусні обертові трансформатори (СКОТ) - це двофазні мікромашини змінного струму. Неявнополюсний статор і ротор мають по дві взаємно перпендикулярні обмотки. СКОТ, як і сельсин, може працювати у двох режимах: амплітудному й фазообертальному.



Д - диск; ОС - освітлювачі;
ФД - фотодіоди;
РЕ - релейний елемент
Рисунок 6.7 - Енкодер

Для виміру кутів у більших діапазонах і з високою точністю використовується дискретний датчик, вихідний сигнал яких може бути представлений у вигляді двійкового коду (енкодери). До таких датчиків відноситься фотоелектричний датчик. Його схема показана на рис. 6.7.

Основним елементом фотоелектричного датчика є диск, вал якого з'єднаний з валом механічного пристрою.

Диск розділений на кілька полів, кількість яких відповідає кількості двійкових розрядів числа й визначає точність датчика.

На малюнку число розрядів дорівнює 4. На практиці використовують 10 розрядів і більше. У свою чергу кожне кільце розділене на ряд прозорих і непрозорих частин. Внутрішнє кільце відповідає старшому розряду й розділене на дві частини. Зовнішнє кільце розділене

на вісім частин і відповідає молодшому розряду. Освітлювачі, які можуть бути будь-якого типу, у тому числі й світлодіоди, дають вузькі паралельні пучки світла, спрямовані на фотодіоди. Напруга з фотодіодів надходить на релейні елементи й на їхньому виході формується напруга логічної 1 або 0. Таким чином, кожному куту повороту диска відповідає свій код.

Датчики швидкості.

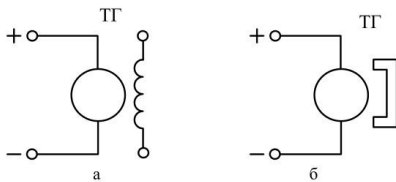
Для виміру швидкості можна використовувати методи й датчики, що дозволяють визначати кутове або лінійне переміщення описані вище. При цьому для підвищення перешкодозахищеності в ряді випадків здійснюється чисельне диференціювання сигналу пройденого шляху, засноване на вимірі збільшення шляху на деякому тимчасовому інтервалі.

У той же час, використання закону електромагнітної індукції дозволяє за допомогою тахогенераторів вимірювати кутову швидкість безпосередньо, без додаткових перетворень. Тахогенератор - це електрична машина малої потужності, що виробляє електричний сигнал пропорційний кутовій швидкості ротора.

До всіх типів тахогенераторів пред'являються наступні вимоги:

- лінійність залежності ЕРС тахогенератора від швидкості;
- мінімальність пульсацій вихідної напруги;
- малий момент інерції й момент тертя.

Тахогенератори постійного струму можуть бути з незалежним збудженням або зі збудженням від постійних магнітів (рис. 6.8).



а - з незалежним збудженням;
б - з постійними магнітами

Рисунок 6.8 - Схеми включення тахогенератора

Тахогенератори постійного струму розрізняють не тільки величину, а й напрямок швидкості, і тому знаходять застосування в реверсивних і нереверсивних системах. Тахогенератори змінного струму виконані на базі асинхронної двофазної машини. На статорі машини є дві взаємно перпендикулярні обмотки: обмотка збудження, розташована по осі α

(фаза α) і вихідна обмотка, розташована по осі β (фаза β), включена на опір навантаження Z_n , як показано на рис. 6.9. Для зменшення моменту інерції ротор виконують тонкостінним у вигляді порожнього

стакану з немагнітного матеріалу (зазвичай з алюмінієвого сплаву).

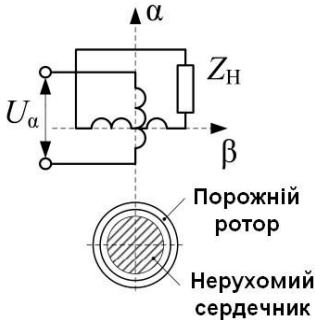


Рисунок 6.9 - Тахогенератор змінного струму

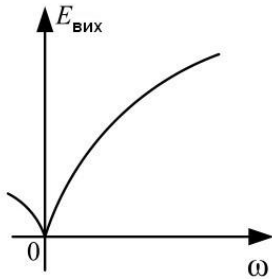


Рисунок 6.10 - Амплітудна характеристика

Усередині ротора розміщується нерухливий сталевий шихтований сердечник, по якому замикається магнітний потік. Амплітудна характеристика асинхронного тахогенератора наведена на рис. 6.10. Викривлення даної характеристики обумовлене опором навантаження.

Тому на практиці використовують режим близький до холостого ходу. Для реалізації такого режиму тахогенератор з'єднують із навантаженням через емітерний повторювач, що має високий вхідний опір. Смуга пропускання асинхронного тахогенератора обмежена частотою напруги мережі живлення. Тому для швидкодіючих систем застосовують підвищену частоту (400 Гц і вище).

У сучасних системах з великим діапазоном регулювання швидкості й високими вимогами стабілізації й точності, використовують цифрові датчики швидкості (ЦДШ). Функціонально ЦДШ містить датчик імпульсів, який перетворює кутову швидкість в імпульси із частотою

пропорційною швидкості, й лічильник імпульсів, що формує на інтервалі виміру цифровий код, який є вихідною величиною. Датчик імпульсів може бути виконаний на основі фотоелектричного кодового диска. У кожному разі датчик імпульсів виробляє дві серії імпульсів, зрушених по фазі на $\pi/2$, які використовуються для визначення, як величини швидкості, так і її знака. Частота проходження імпульсів f знаходиться як:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} N, \quad (6.1)$$

де ω - кутова швидкість,

N - число імпульсів (роздільна здатність датчика).

Формування цифрового коду на виході датчика швидкості за допомогою лічильника може виконуватися двоюко. У першому випадку на заданому періоді виміру лічильник рахує число імпульсів, які характеризують середнє значення швидкості.

У другому випадку формування індуктивного коду полягає у визначенні інтервалу часу між двома імпульсами, шляхом підрахунку числа високочастотних опорних імпульсів, що вміщаються на вимірюваному інтервалі. Розглянуті варіанти забезпечують високу точність виміру швидкості, і тим більшу, ніж тривалий період виміру.

Датчики технологічних параметрів.

Датчики технологічних параметрів дозволяють одержати інформацію про змінні мехатронної системи, яка бере участь у тому або іншому технологічному процесі. До цих датчиків можна віднести датчик сили, моменту, температури, маси та інші.

Вимір сили полягає в зрівноважуванні її протидіючої силою таким чином, що тіло, до якого воно прикладене, залишається в спокої, й тоді сила що є результуючою, дорівнює нулю.

Датчик сили містить чутливий елемент, що зазнає дії невідомої сили. У цьому елементі виникає деформація, яка породжує протидіючу силу. У зоні пружності деформація, відповідно до закону Гука, пропорційна силі.

У робототехніці, біомеханіці за допомогою датчиків сили вимірюється вага тіла. Ці виміри дають можливість визначити масу тіла (об'єкта), що має найважливіше значення, оскільки в ряді випадків дозволяє виключити датчики витрати матеріалу.

Деформація, а, отже, сила може бути обмірювана побічно, якщо яка-небудь із електричних властивостей матеріалу залежить від деформації (наприклад, п'єзоефект).

Явище п'єзоефекту полягає у виникненні (або в зміні) електричної поляризації в деяких діелектриках таких як: кварц, турмалін, сульфат літію, спеціально оброблена кераміка, тощо.

Якщо розташувати пару обкладок на протилежних сторонах п'єзоелектричної пластини й прикласти до неї силу, то на обкладках з'являться заряди протилежних знаків, тобто різниця потенціалів, яка буде пропорційна прикладеній силі. Такий конденсаторний пристрій дозволяє виміряти силу, тиск, прискорення.

За винятком кварцу, відомого своєю стабільністю й твердістю, у датчиках зазвичай використовується кераміка як більш дешева, більш

зручна в обробці, що має досить високу чутливість. Схема формування сигналу з електричним зарядом на вході від п'єзодатчика й пропорційною йому напругою на виході показана на рис. 6.11.

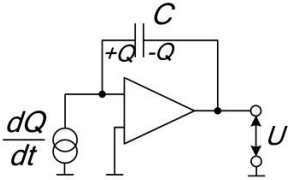
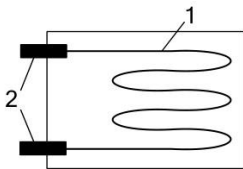


Рисунок 6.11 - Схема формування сигналу з електричним зарядом на вході від п'єзодатчика

Наявність конденсатора забезпечує повний розряд п'єзодатчика при будь-якому входньому опорі підсилювача. Часто на практиці для виміру деформації використовуються досить прості тензодатчики. Робота тензодатчика заснована на ефекті, при якому електричний провідник з високим питомим опором і малим температурним коефіцієнтом при зміні довжини змінює свій електричний опір.

Тензодатчики наклеюються на деформовану поверхню так, щоб прямолінійні ділянки провідника розтягувалися або звужувалися відповідно до деформації деталі. Конструкція розповсюджененого тензодатчика спірального типу показана на рис. 6.12. Такі датчики разом з тензопідсилювачами дозволяють вимірювати малі механічні деформації які складають декілька мікрон.



1 - дротова спіраль,
2 - контакти підведення

Рисунок 6.12 - Конструкція тензодатчика

При вимірі моменту, що виникає внаслідок додавання сили до важеля, існує проблема передачі інформації з датчика, що рухається, у стаціонарний вимірювальний ланцюг. Цей зв'язок може здійснюватися контактним або безконтактним шляхом. При контактному зв'язку застосовуються ковзні контакти, або занурені в ртуть обертові контакти. Очевидно, що робочий ресурс таких датчиків обмежений ресурсом контактів.

Тому в сучасних системах одержав поширення безконтактний зв'язок. У цьому випадку для передачі електричного сигналу використовується ємнісний (обертовий конденсатор) або індуктивний (обертовий трансформатор) зв'язок.

Такий датчик складається з передавальної і приймачої частин. У передавальній частині, для виміру моменту, може бути використаний магнітострикційний вимірник. Його робота заснована на явищі

зміни магнітної проникності μ феромагнітного матеріалу у випадку додавання до нього зусилля. Так, наприклад, μ росте в області розтягання матеріалу й убуває в області стиску.

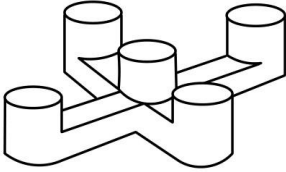


Рисунок 6.13 - Хрестоподібний сердечник

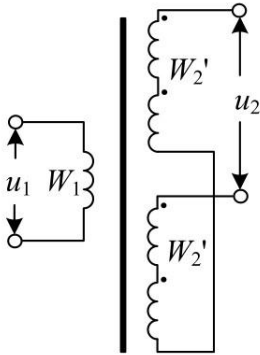


Рисунок 6.14 - Схема обмоток

Якщо на феромагнітний циліндричний стрижень діє момент, вісь якого збігається з віссю стрижня, то виникаючі напруги визначають на його поверхні два взаємно перпендикулярні напрямки до осі циліндра, уздовж яких зміна магнітних проникностей μ_1 і μ_2 максимальна й протилежна за знаком.

Для виявлення цих змін можна використовувати сердечник хрестоподібної форми, показаний на рис. 6.13. На сердечнику розташована первинна обмотка й дві пари з'єднаних послідовно вторинних обмоток, включених диференційно, як показано на рис. 6.14.

Якщо момент відсутній, то $\mu_1 = \mu_2$, $U_2 = 0$. З появою моменту ці умови не виконуються, тобто $\mu_1 \neq \mu_2$ і $U_2 \neq 0$.

Більш високу точність виміру моменту має датчик, що використовує п'єзоефект, або датчики індуктивного типу з виміром кута крутіння.

Впровадження мікропроцесорної техніки дозволяє перейти від процедури виміру до процедури обчислення моменту. Якщо рушійний момент створюється двигуном постійного струму, у якого магнітний потік - величина постійна, то в цьому випадку момент пропорційний току, який легко визначити за допомогою датчика струму (у найпростішому випадку шунта).

Вимір потоку двигуна можливий за допомогою датчиків Холу, які виготовляють із германія, сурм'янистого індію та інших напівпровідникових матеріалів.

Крім того, необхідно відзначити, що момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату статорної напруги, тому використовуються датчики напруги (у найпростішому випадку дільник напруги).

Розвиток робототехніки викликав появу тактильних датчиків,

що відтворюють дотикальні властивості людської шкіри.

Тактильні датчики матричного типу дають цілісну уяву про форму предмета, оскільки кожне гніздо матриці, є не що інше, як мікроелектронний датчик сили або деформації, що виробляє електричний сигнал й дозволяє розпізнавати образ.

Тактильні датчики на інтегральних схемах із застосуванням кремenea, кварцу й полікристалічної кераміки можуть забезпечити досить високий діапазон вимірів при відносно невеликій вартості. Найбільше часто вимірюваною фізичною величиною різних технологічних процесів є температура.

Температура являє собою найважливішу характеристику стану речовини. Працездатність будь-якої системи обмежена деяким діапазоном температур. Для виміру температури використовують термодатчики. Їхня робота заснована на здатності провідників і напівпровідників змінювати питомий опір під дією температури.

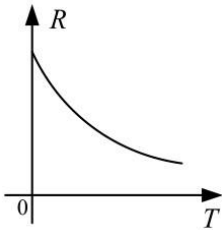


Рисунок 6.15 - Температурна характеристика $R(T)$ терморезистора

У термодатчиках використовують терморезистори, що представляють собою резистори, з явно вираженою залежністю $R(T)$. Звичайно терморезистори виконуються у вигляді циліндрів, таблеток, бусинок, на кінцях яких зміцнюються електроди.

У якості напівпровідників використовують оксиди, сульфідів й нітриди металів. Температурна характеристика $R(T)$ терморезистора має вигляд, показаний на рис. 6.15.

Терморезистори можуть використовуватися в якості датчиків вакууму, швидкості й напрямку потоку рідини або газу, оскільки залежно від цих параметрів змінюється коефіцієнт тепловіддачі.

Постановки завдання керування мехатронними системами.

Розглянемо завдання керування стосовно до мехатронних систем, які використовуються у виробничих машинах і комплексах автоматизованого машинобудування й виконують основні технологічні функції. До таких систем керування пред'являються, як правило, досить жорсткі вимоги, тому що режими керування визначають хід технологічного процесу а, отже, якість одержуваного виробу.

Завдання комп'ютерного керування технологічними машинами,

які не могли бути вирішені на базі традиційних підходів, стимулювали розробку й впровадження в практику принципово нових методів керування. У мехатроніці ставиться завдання керування координованим функціональними (механічними) рухами машин.

Розглянемо функціональну схему пристрою з комп'ютерним керуванням (рис. 6.16).

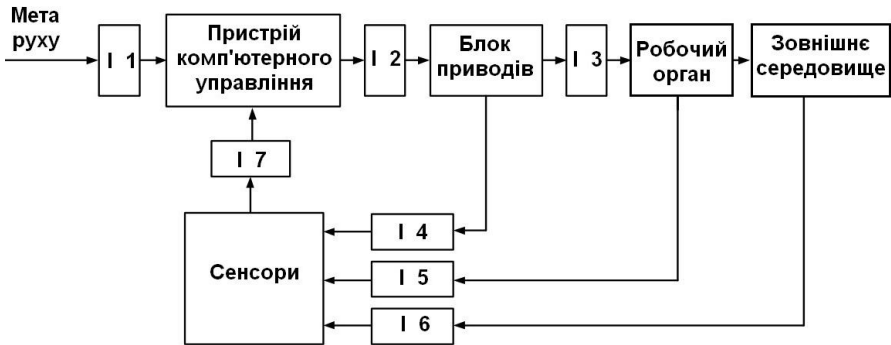


Рисунок 6.16 - Функціональна схема пристрою з комп'ютерним керуванням

Завдання керування полягає у виконанні бажаного руху робочого органу, який цілеспрямовано впливає на об'єкт робіт. При цьому з боку зовнішнього середовища об'єкт отримує збурюючий вплив. Отже, у загальному випадку об'єктом керування в мехатроніці є складна багатозв'язна система (за допомогою інтерфейсів І1-І7), до складу якої входять:

- блок виконавчих приводів;
- механічний пристрій з робочим органом;
- блок сенсорів (датчиків);
- об'єкт робіт, на який впливає робочий орган.

Окремі блоки й пристрої системи можуть бути інтегровані в мехатронні модулі. Процес взаємодії робочого органу й зовнішніх об'єктів (наприклад, при виконанні операцій складання, механообробки і т.д.) дозволяє організувати технологічно орієнтований процес керування, враховуючий характер і специфіку даної взаємодії в конкретно поставленому завданні.

Наведена структура об'єкта керування визначає вимоги й постановку завдання керування мехатронними системами розглянутого

класу. Відтворення заданих рухів мехатронними модулями ґрунтується на виконанні класичних вимог теорії автоматичного керування: стійкості, точності і якості процесу керування.

Крім того, необхідно додатково враховувати наступні специфічні особливості мехатронних систем:

- рух робочого органа, як правило, забезпечується взаємозалежними переміщеннями декількох виконавчих приводів і ланок механічного пристрою;
- завдання керування мехатронною системою повинне бути вирішене в просторі (знайдені оптимізовані траєкторії руху всіх ланок, включаючи робочий орган) і в часі (визначені й реалізовані бажані швидкості, прискорення, зусилля що й розвиваються для всіх приводів системи);
- параметри збурюючих впливів, прикладених до робочого органу й окремих мехатронних модулів, для багатьох технологічних завдань заздалегідь не визначені;
- складність побудови адекватних математичних моделей мехатронних систем (особливо багатозв'язних систем, що включають динамічну модель технологічного процесу).

Розмірність завдання керування в мехатроніці визначається кількістю незалежно керованих приводів системи. Мехатронні системи металорізальних верстатів з ЧПУ, промислових роботів і багатьох інших об'єктів структурно є багатомірними й багатозв'язними системами. Для цих об'єктів задається бажаний рух робочого органу, а реалізується воно сукупними переміщеннями всіх ланок. Звідси виникають спеціальні математичні, алгоритмічні й технічні завдання керування.

Для планування заданого руху мехатронної системи необхідно розв'язати зворотне завдання про положення механізму. Суть даного завдання полягає у визначенні необхідних переміщень ланок системи по заданому рухові робочого органа.

Наприклад, для маніпулятора промислового робота із шістьма ступенями рухливості постановка зворотного завдання про положення робочого органа зводиться до наступного (рис. 6.17). По заданій траєкторії руху робочого органа P необхідно розрахувати узагальнені координати ступенів рухливості q_1 - q_6 маніпулятора.

При розв'язку зворотного завдання слід урахувувати, що для визначення узагальнених координат ступенів рухливості необхідно вирішувати систему з m алгебраїчних рівнянь (m - число ступенів волі

робочого органа) з n невідомими (n - число керованих ступенів рухливості механізму).

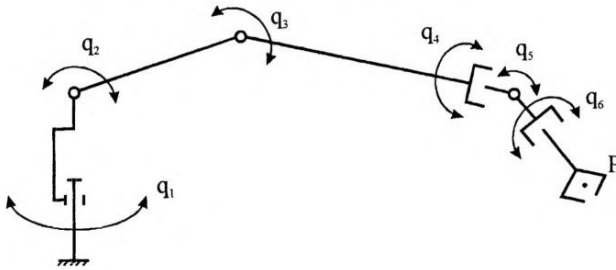


Рисунок 6.17 - Узагальнені координати маніпулятора

Для маніпуляційних механізмів з послідовним розташуванням кінематичних пар розв'язок зворотного завдання про положення є проблемним, у той час як пряме завдання вирішується відносно нескладно. Для машин з паралельною кінематичною структурою (наприклад, станків гексаподів) ситуація зворотна.

Необхідно відзначити, що вихідна система рівнянь є нелінійною. Це утрудняє розв'язок зворотного завдання в масштабі реального часу для багатоланкових механізмів. Тому перспективними є методи автоматизованого виводу й розв'язку нелінійних рівнянь або способи лінеаризації вихідних нелінійних систем. Ефективним способом, що дозволяють «природнім» шляхом одержати лінійні рівняння, є перехід від керування положенням робочого органа до керування по швидкості його руху. Після диференціювання вихідної системи одержуємо систему лінійних рівнянь зі змінними коефіцієнтами.

При розв'язку системи рівнянь необхідно враховувати обмеження на узагальнені координати й відповідно на розміри робочої зони й кути сервісу механізму.

Багатозв'язність системи означає, що рух кожної ланки впливає на рух інших ланок. Зазначений взаємовплив відбувається через механічний пристрій як загальне навантаження, через загальне джерело енергії, а також внаслідок природніх і штучних динамічних зв'язків між каналами керування в блоці приводів. Отже, необхідно формувати керування рухом мехатронної системи (особливо на високих швидкостях, де вплив динамічних факторів суттєвий) з урахуванням перехресних зв'язків між ланками.

Проблемним є також питання організації зворотних зв'язків при керуванні багатоланковими мехатронними системами. Технічно найбільш просто встановлювати датчики положення й швидкості в приводних модулях. Однак потім необхідно обчислити в реальному часі фактичне переміщення робочого органа. Причому ці комп'ютерні розрахунки вимагають побудови адекватної динамічної моделі системи з обліком досить складних для аналітичної оцінки факторів:

- усіх діючих сил (керуючих моментів приводів, сил тертя, зовнішніх сил і моментів, відцентрових і коріолісових сил);
- первинних погрішностей системи (пружних деформацій ланок, люфтів у механічних передачах, погрішностей виготовлення й складання, вузлів), які визначають її інтегральні точності характеристики;
- змінних параметрів об'єкта керування (наведених моментів інерції й мас механізму й навантаження).

Тому найкращим варіантом з погляду вірогідності одержуваної інформації про фактичний рух є установка датчиків безпосередньо на робочий орган. Прикладами такого підходу можуть служити:

- застосування систем технічного зору для визначення положення робочого органа й об'єктів у робочій зоні (наприклад, при складанні);
- установка силомоментних датчиків у зап'ястя маніпулятора для виміру діючих сил на операціях механообробки;
- використання блоків акселерометрів для визначення лінійних прискорень робочого органа при швидких транспортних переміщеннях.

Перспективним представляється також комбінація розглянутих підходів при виборі зворотних зв'язків у складних мехатронних системах. Характерною рисою мехатронних систем для автоматизованого машинобудування є можливість поділу завдань програмного керування рухом на просторову й тимчасову. Це означає, що траєкторія переміщення робочого органа в просторі, і його контурна швидкість можуть плануватися роздільно з використанням різних критеріїв оптимізації. Оптимізацію закону руху технологічної машини в часі звичайно проводять за критеріями продуктивності, точності обробки, а також по економічних і комбінованих показниках.

Ієрархія керування в мехатронних системах.

Ієрархічна структура - це багаторівневий набір взаємодіючих пі-

дсистем, кожна з яких відповідальна за розв'язок певного завдання й має доступ до сенсорної інформації, необхідної для розв'язку завдань керування даного рівня. У сучасних мехатронних системах, як правило, використовується ієрархія «зверху - вниз», коли нижній рівень повністю підлеглий вищим рівням.



Рисунок 6.18 - Ієрархія керування в мехатронних системах

Така структура забезпечує необхідну гнучкість і багатоплановість керування на кожному рівні ієрархії й мехатронної системи в цілому. При такій організації керування зміна окремих характеристик мехатронної системи приведе до зміни тільки деякої частини алгоритмів керування певного рівня.

При цьому алгоритмічне забезпечення інших рівнів залишається без змін. Розглянемо ієрархію керування, характерну для мехатронних (зокрема, робототехнічних) систем (рис. 6.18). У даній структурі виділяються чотири рівні керування: інтелектуальний, стратегічний, тактичний і виконавчий. Інтелектуальний рівень - вищий рівень керування.

Призначення цього рівня - прийняття рішень про рух механічної системи в умовах неповної інформації про зовнішнє середовище й об'єкти. Ціль керування задається у великому плані (наприклад, узяти заготовку зі складу, передати її на верстат, обробити й перевірити якість, передати на інший верстат). Функції інтелектуального рівня в сучасних мехатронних системах звичайно виконує людина-оператор або потужний комп'ютер верхнього рівня керування.

ЕОМ на інтелектуальному рівні аналізує складну мінливу зовнішню обстановку, ухвалює рішення щодо дій, формує послідовність виконання елементарних завдань і передає їх на стратегічний рівень керування. Таким чином, ЕОМ сама планує свої дії на основі аналізу зовнішньої обстановки.

Система керування на інтелектуальному рівні вирішує завдання

сприйняття й розпізнавання обстановки, автоматичного прийняття рішень в умовах мінливої обстановки, а також нагромадження досвіду роботи й самонавчання (рис. 6.19).

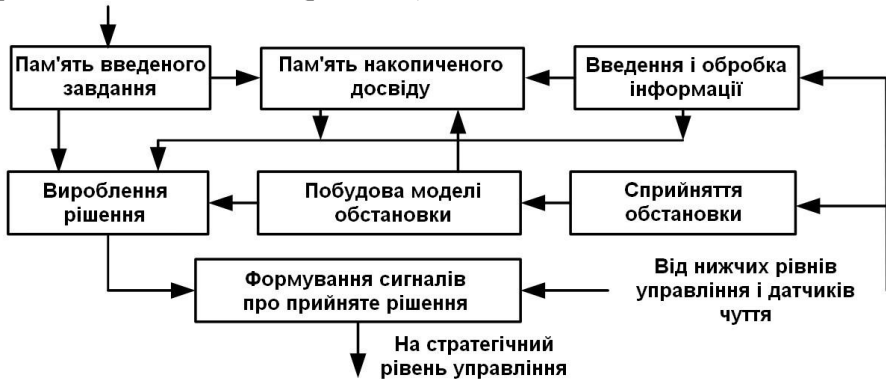


Рисунок 6.19 - Структура системи керування інтелектуального рівня

Стратегічний рівень керування призначений для планування рухів мехатронної системи. Планування рухів припускає розбивку завдання руху, поставленої інтелектуальним рівнем, на послідовність погоджених у часі елементарних дій і формалізацію цілей керування для кожної із цих дій. Прикладами елементарних дій мобільного робота може служити:

- вивід робочого органа в задану позицію;
- захват предмета;
- тестовий рух для визначення сил реакції з боку об'єкта;
- переміщення об'єкта й повернення робота у вихідну позицію.

Формалізація цілей керування означає, що для кожної з елементарних дій повинні бути записані математичні співвідношення, виконання яких забезпечує успішне виконання дії. Для технологічних робіт на стратегічному рівні вирішується завдання геометричного планування руху робочого органа.

При формалізації цілей керування для мехатронних систем необхідно враховувати:

- ціль керування може бути формалізована неоднозначно;
- форма моделі може бути різною (алгебраїчні й диференціальні векторні рівняння, система нерівностей);
- вибір способу формалізації суб'єктивний і залежить від дос-

віду розроблювача і його бачення постановки завдання.

Сенсори інтелектуального й стратегічного рівнів (система чуття) повинні відповідати органам почуттів людини (для інтелектуальних робіт це технічний зір, тактильне й силомоментне чуття, пристрої аналізу звукових і ультразвукових сигналів).

Стратегічний рівень видає інформацію про план руху й мету керування у формі команд керування рухом. Важливо підкреслити, що структура й синтаксис проблемно-орієнтованих мов керування рухом суттєво відрізняються від універсальних мов програмування, хоча деякі оператори можуть збігатися.

Тактичний рівень виконує перетворення команд керування рухом, що надходять зі стратегічного рівня керування, у програму керування, яка визначає закони погодженого руху в часі всіх ланок механічного пристрою з урахуванням технічних характеристик блоку приводів (у першу чергу обмежень на узагальнені швидкості, прискорення й сили).

Наприклад, для виконання команди позиційного керування рухом маніпулятора на тактичному рівні необхідно визначити узагальнені координати маніпулятора, які відповідають бажаним декартовим координатам характеристичної точки схвата. Для цього повинне бути вирішене зворотнє завдання про положення маніпулятора в заданій точці траєкторії руху.

Відповідно, для керування швидкістю руху програма керування будується як результат розв'язку зворотного завдання про швидкість робочого органа. Для реалізації даних алгоритмів пристрій комп'ютерного керування повинен виконувати в реальному часі наступні основні функції:

- приймання інформації від стратегічного рівня у формі команд керування рухом;
- приймання й обробку інформації від датчиків положення маніпулятора про поточну конфігурацію;
- розрахунки значень узагальнених координат та їх похідних;
- видача керуючої програми на виконавчий рівень.

На розв'язок зворотного завдання витрачається значна частина машинного часу, тому звичайно воно вирішується тільки в опорних точках траєкторії руху. При цьому на тактичний рівень лягає завдання інтерполяції траєкторії руху між опорними точками.

Виконавчий рівень керування призначений для розрахунків і

видачі керуючих сигналів на блок приводів мехатронної системи відповідно до програми керування й з урахуванням технічних характеристик силових перетворювачів.

Для ієрархічних систем керування в мехатроніці слушний наступний принцип: у міру просування від вищих рівнів керування до більш низьких знижується інтелектуальність системи, але підвищується її точність. При цьому під «інтелектуальністю» розуміється здатність системи здобувати спеціальні знання, що дозволяють уточнити поставлене завдання й визначити шляхи його розв'язку.

Системи керування виконавчого рівня.

Контролери руху, архітектура яких вже була розглянута, згідно із прийнятою ієрархією керування рухом мехатронних систем є пристроями керування виконавчого рівня (рис. 6.18). Призначення пристрою керування полягає в забезпеченні заданих вимог по стійкості, точності і якості перехідних процесів у системі при досягненні мети керування рухом, яка надходить із тактичного рівня керування.

При цьому необхідно враховувати специфіку мехатронних об'єктів керування. Структурна схема системи керування рухом, реалізована типовим контролером, представлена на рис. 6.20.

До складу системи входять п'ять основних регуляторів: регулятор положення (РП), регулятор швидкості (РШ), регулятор моменту або сили (РМ), регулятор прямого зв'язку по швидкості зміни керуючого впливу (РПЗШ) і регулятор коригувального зв'язку по збурюючому впливу f (РЗЗВ). Вхідними впливами для системи залежно від поставленої мети керування можуть бути керуючі сигнали по положенню q , швидкості, або по розвиненому зусиллю. У системі реалізується принцип замкненого керування, що передбачає наявність відповідних зворотних зв'язків по фазових координатах системи.

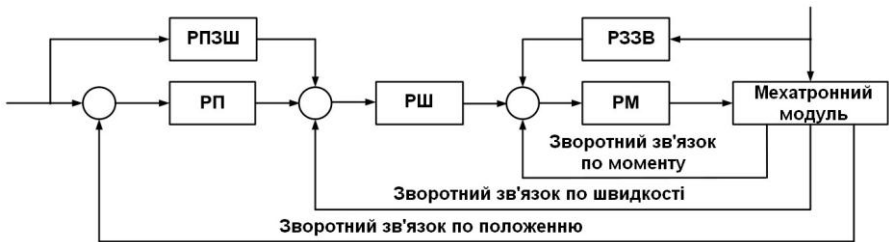


Рисунок 6.20 - Функціональна схема системи керування на виконавчому рівні

Для забезпечення заданих вимог необхідно виконати структурний і параметричний синтез регуляторів виконавчих приводів. Традиційний підхід передбачає, що структура й коефіцієнти підсилення всіх регуляторів і коригувальних пристроїв визначаються при проектуванні системи й далі залишаються фіксованими в процесі її експлуатації.

У сучасних системах керування вид і параметри регуляторів автоматично модифікуються залежно від мети конкретного руху й умов, у яких воно фактично здійснюється. Це дозволяє адаптувати (приспосувати) рух мехатронної системи до початкової невизначеності й мінливим умовам роботи. Адаптація по суті є оптимізація в умовах недостатньої апріорної інформації.

Адаптивне настроювання регуляторів необхідне, якщо введені негативні зворотні зв'язки у виконавчих приводах не здатні компенсувати вплив збурюючих впливів і зміни параметрів (і, можливо, структури) об'єкта керування, які викликають неприпустиме зниження показників якості керованого руху.

Адаптивні системи керування в порівнянні із традиційними мають суттєво більш складну структуру й технічну реалізацію. Тому їх проектування вимагає розв'язку цілого ряду теоретичних проблем керування й рішення про застосування адаптивного регулятора повинне бути технічно й технологічно обґрунтованим. Завдання побудови адаптивного керування мехатронною системою містить у собі три основні розділи: створення сенсорних пристроїв, обробка інформації сенсорів і синтез адаптивних законів керування.

Сенсорні пристрої виконують роль технічних органів почуттів і необхідні для розв'язку двох основних завдань:

- підвищення точності роботи мехатронної системи;
- забезпечення автономності функціонування в мінливих умовах роботи.

Для розв'язку зазначених завдань мехатронна система оснащується датчиками двох типів:

- датчики виміру положення, швидкості й прискорення самої мехатронної системи;
- датчики виміру стану навколишнього середовища.

З позицій адаптивного керування найбільший інтерес представляють датчики другого типу. Вони діляться на три великі групи:

- сенсори геометричних властивостей, що виконують функції обмеження руху (тактильні датчики) і визначення відстані до

- навколишніх предметів і їх розмірів (системи технічного зору, локаційні системи);
- сенсори фізичних властивостей, що виконують функції виміру зусиль і моментів, щільності й тиску, температури, кольору й запаху;
 - сенсори хімічних властивостей.

Системи керування тактичного рівня.

Розглянемо побудову системи керування тактичного рівня для технологічного робота, що виконує операції механообробки. Параметричний підхід при постановці завдання для технологічного робота припускає одночасне керування переміщенням робочого органа по заданій траєкторії (крива L), силою що розвивається в процесі руху (вектор P), яка впливає на об'єкт робіт (рис. 6.21). Таким чином, у системі повинні сполучатися методи контурного й силового керування рухом робота.

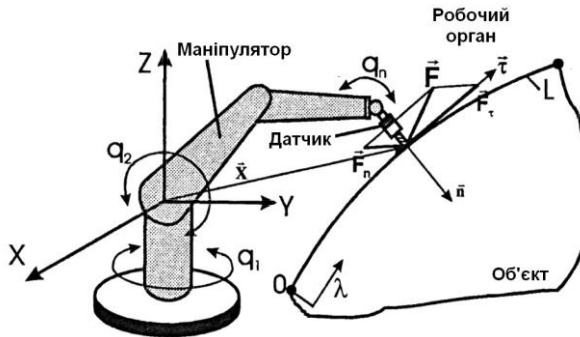


Рисунок 6.21 - Схема роботизованої механообробки

Робот при цьому діє аналогічно людській руці. Розвиваючи певні зусилля в суглобах руки, людина може переміщати в просторі предмети, виконувати механічну роботу. У той же час за допомогою нервово-м'язової системи вона сприймає й зворотні силові впливи з боку об'єкта, що дозволяє виконувати людині багато складних операцій, (наприклад, складальні) навіть наосліп.

Застосування принципу двосторонньої дії для технологічних роботів вимагає обліку їх специфіки як об'єкта автоматичного керування, а також особливостей роботизованих технологічних операцій.

Контурну швидкість робота для операції механообробки доці-

льно регулювати залежно від величини зовнішнього силового впливу. Це дозволяє забезпечувати високу продуктивність при зміні сили в широкому діапазоні через змінні розміри й форми задинок, а також попереджати силові перевантаження виконавчої системи робота.

Наприклад, при зачищенні обля на шасі відеомагнітофона за допомогою промислового робота РМ-01 внаслідок коливань розмірів задинок амплітуда сили різання коливалася в діапазоні (10-300%) від номінального значення.

На рис. 6.22 наведена блок-схема системи контурного силового керування, яка забезпечує адаптацію руху робота до силового збурюючого впливу. Силомоментний датчик, встановлений у зап'ястя маніпулятора, подає інформацію про сили, що діють безпосередньо на робочий орган. Силовий зворотний зв'язок замикає систему керування на тактичному рівні, що в комбінації зі зворотними зв'язками у виконавчих приводах забезпечує необхідну точність руху. Обчислювач контурної швидкості служить для завдання технологічно раціонального швидкісного режиму руху робота по заданій траєкторії.

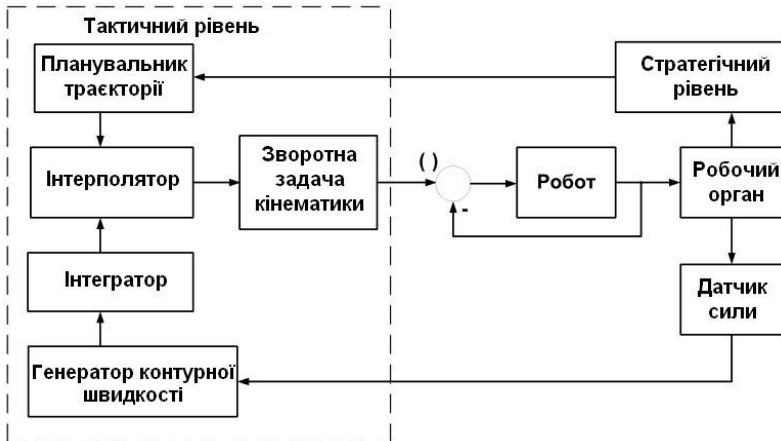


Рисунок 6.22 - Блок-схема контурного силового керування

Завдання інтерполяції траєкторії руху й розв'язку зворотного завдання про положення виконуються керуючою ЕОМ у реальному масштабі часу. Результатом роботи цих програм є формування вектора узагальнених координат $q_{pr}(t)$, який визначає бажані переміщення ступенів рухливості маніпулятора.

Програмна траєкторія (L) робочого органу визначається геометричними характеристиками оброблюваної поверхні й задається як параметрична функція, аргументом якої є не час t , як у традиційних системах автоматичного керування, а шлях (геометрична змінна).

Таким чином, особливість параметричного підходу полягає в незалежному завданні траєкторії робочого органу в просторі й в адаптивному керуванні його контурною швидкістю в часі. Роздільне формування законів керування рухом мехатронної системи в просторі й у часі дозволяє використовувати різні критерії при їхній оптимізації, що відповідає постановці завдань керування мехатронними системами.

При цьому рух робочого органу як кінцевої керованої ланки забезпечується погодженими переміщеннями всіх виконавчих приводів і ланок маніпулятора.

Пропонований параметричний підхід дозволяє також урахувати вплив робочого процесу на рух робота при виконанні ним технологічної операції. При механообробці розрізняють два види технологічних збурювань:

- погрішності, які мають систематичний характер для конкретного виробу;
- випадкові зміни технологічних параметрів.

Систематичні погрішності в розглянутій системі враховуються на етапі програмування траєкторії L . Використання адаптивного регулятора дозволяє компенсувати вплив відхилень технологічних параметрів, які носять випадковий характер. Таким чином, здійснюється комбінація корекції траєкторії робочого органу в просторі (у режимі автономного програмування off-line) з адаптивним керуванням контурною швидкістю робота в часі (безпосередньо в процесі руху мехатронної системи в режимі on-line).

Використання параметричного підходу дозволяє звести завдання адаптивного керування багатомірною нелінійною системою «технологічний робот-робочий процес» до синтезу адаптивного керування скалярним параметром - контурною швидкістю. Це завдання може бути вирішене в масштабі реального часу з використанням мікропроцесорних пристроїв керування що серійно випускаються.

Системи керування стратегічного рівня.

Стратегічний рівень керування призначений для планування рухів мехатронної системи. Планування рухів полягає в розбивці вхідної інформації (завдання руху) на послідовність погоджених у часі елеме-

ментарних дій (рис. 6.23).

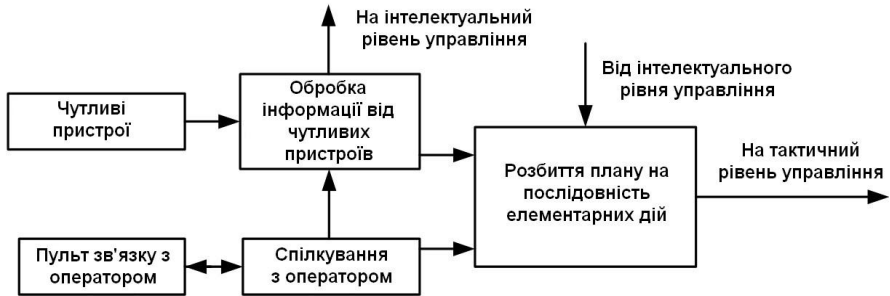


Рисунок 6.23 - Структура системи керування стратегічного рівня

На стратегічному рівні керування здійснюється попередня обробка інформації від чутливих сенсорних пристроїв і синтез функціонально закінчених дій. Алгоритми стратегічного рівня керування забезпечують діалог з оператором і виконання заданих інструкцій. Інформація від чутливих пристроїв використовується для корекції плану виконання операції при зміні умов функціонування мехатронної системи. Система керування стратегічного рівня видає інформацію про план руху й мету керування у формі команд керування рухом, які надходять на тактичний і (або) виконавчий рівні.

Інтелектуальні методи керування.

В інтелектуальних мехатронних системах широко використовуються інтелектуальні методи керування. Під інтелектуальними розуміють методи, засновані на використанні аналогії з функціонуванням людського мозку. До них ставляться метод нечіткої логіки й метод нейронних мереж. Ці методи реалізуються комп'ютерними пристроями - контролерами й досить добре програмно забезпечені, наприклад, відомими пакетами Fuzzy Logic Toolbox, Neural Network Toolbox із програмного пакета MATLAB.

Метод нечіткої логіки або фаззі-логіки ґрунтується на асоціативному сприйнятті мозком людини сукупності деяких кількісно обумовлених явищ і виробітку рішень, виходячи із цих сприйнятих. Наприклад, якщо людині навіть не вказати значення температури повітря, але сказати «дуже холодно», «тепло», «жарко», у нього виникне асоціативна уява про неї. У результаті він ухвалить рішення, у якому одязі вийти з будинку.

Метод керування на основі нейронних мереж використовує способи приймання й обробки інформації мозком людини. При цьому незрівнянно більш висока швидкодія комп'ютера й здатність нелінійного перетворення сигналів забезпечують комп'ютеру велику перевагу при вирішенні завдань керування технічними системами.

Питання для самоперевірки

1. Які відмінності між параметричними й генераторними типами датчиків?
2. Назвіть особливості режиму роботи селсина.
3. Що собою представляє резольвер?
4. Чим визначається роздільна здатність цифрового датчика швидкості або кута повороту?
5. Перелічіть основні типи датчиків технологічних параметрів.
6. У чому полягає сенс завдання управління мехатронною системою?
7. Яка ієрархічна схема мехатронної системи управління?
8. Які завдання управління вирішуються на виконавчому рівні?
9. Які завдання вирішуються на тактичному рівні управління?
10. Що таке зворотна задача?
11. Які завдання вирішуються на стратегічному рівні управління?
12. Які переваги фаззи-систем управління?
13. У якому вигляді надходить інформація для логічної обробки після дефазифікації?
14. Що таке «терм»?
15. Які методи дефазифікації найбільш часто використовуються?
16. Наведіть приклади правил логічної обробки.
17. Коли використовується оператор *minimum* і коли *maximum*?
18. Які технічні переваги комп'ютерного нейрона перед нейроном людського мозку?
19. Що таке «активаційна функція»?
20. У чому полягає синтез нейронної мережі.
21. У чому полягає сутність методу генетичних алгоритмів?
22. Які переваги методу генетичних алгоритмів при синтезі нейронних мереж?
23. Які переваги гібридних нейронних мереж?

ЛЕКЦІЯ № 7. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МЕХАТРОНІЦІ

План лекції. Дистанційне керування мехатронними системами з використанням Інтернету. Переваги та обмеження дистанційного керування. Вимоги до робототехнічних систем з керуванням по глобальній мережі. Середовища розробки програм для керування технічними об'єктами і технологічними процесами.

Література: [1], [5]-[11], [18]-[20], [22]-[44].

Використання Інтернет-технологій в мехатроніці і робототехніці відкриває нові перспективи в розвитку розподілених систем управління та збору даних. Завдання дистанційного моніторингу експериментів і контролю віддалених технічних систем за допомогою Інтернету можуть бути виконані з мінімальними витратами практично в будь-якій точці світу за рахунок широкого поширення і доступності глобальної мережі.

Дистанційне керування мехатронними об'єктами з використанням Інтернету має на увазі не тільки збір даних за допомогою інформаційно-вимірювальної апаратури, а й подачу керуючих впливів на виконавчі елементи різних типів.

Це завдання є, мабуть, найбільш перспективним, але разом з тим складним для практичної реалізації. Аналіз сучасних тенденцій, а також ряду реально здійснених проєктів показує, що Інтернет є досить ефективним і зручним засобом організації дистанційного керування технічними об'єктами, перевагами якого є:

- можливість організувати дистанційне керування реальними об'єктами і експериментами практично з будь-якої точки світу;
- зниження витрат на створення спеціалізованих каналів зв'язку;
- можливість організації доступу широкого кола фахівців-експертів, територіально віддалених один від одного, до уніфікованого обладнання в режимі реального часу.

Перспективні сфери застосування Інтернет-робототехніки:

- дистанційне керування в умовах агресивного навколишнього

- середовища (мобільні роботи);
- астрономія (створення роботизованих автономних телескопів);
- дистанційна освіта (створення віртуальних лабораторій віддаленого доступу);
- віддалене управління роботизованими осередками і системами;
- індустрія розваг (віртуальні візити в музеї, змагання з управлінням Інтернет-роботами і т.п.).

Застосування роботів для проведення операцій у важкодоступних і небезпечних середовищах висуває вимоги до створення систем дистанційного керування мобільними роботами, які використовують переваги мережі Інтернет в якості каналу зв'язку.

При використанні Інтернету для цілей дистанційного керування виникає цілий ряд науково-технічних проблем. Вони пов'язані з оптимізацією взаємодії web-сервера і системи управління роботом, необхідністю передачі великих обсягів даних, нестабільністю віддаленого з'єднання з оператором.

Таким чином, для ефективного використання перспектив, які відкриває застосування глобальної мережі в області управління технікою, необхідно розробити такий підхід до її використання, який враховував би проблеми, зумовлені специфікою Інтернету, як каналу зв'язку в системі дистанційного керування технічним об'єктом, а також специфіку керованого об'єкта.

При використанні глобальної мережі як каналу зв'язку слід враховувати наступні важливі фактори:

- обмеження по пропускну здатності мережі, адже додаток може зажадати передачі таких обсягів даних і з такою швидкістю, що неможливо забезпечити за допомогою Інтернету;
- тимчасові затримки, верхня межа яких непередбачувана і залежить від якості віддаленого з'єднання;
- флуктуація часу затримки в широких межах, пов'язаної зі зміною завантаження мережі в часі;
- можливість втрати окремих пакетів даних для передачі при переповненні вхідних буферів проміжних серверів, через які проходять дані.

Проведений аналіз показує, що для правильного підходу до вирішення проблем використання Інтернету для управління необхідно

знати параметри тимчасової затримки і ймовірність втрати пакетів даних, тобто необхідно сформувати модель сегмента Інтернету. Залежно від місцезнаходження оператора може змінюватися трасування маршруту до сервера робота, яке містить різну кількість проміжних серверів з невизначеними часом переходів і різним ступенем завантаження цих серверів.

Представивши Інтернет як "чорний ящик", характеристики моделі якого невідомі, за допомогою програмних засобів були проведені експерименти з вимірювання протягом тривалого часу передачі тестових пакетів даних до віддаленого сервера керованого робота і назад в окремо взятому сегменті мережі Інтернет.

За допомогою модифікованої ping-процедури, яка посилає ICMP-пакети (Internet Control Message Protocol) по 32 байта з частотою 100 Гц і записуючої час передачі в log-файл, були отримані дані, які показали варіації часової затримки протягом певного часу.

Використовуючи отримані в результаті експерименту дані, можна визначити пропускну здатність мережі і верхню межу смуги переданого сигналу. Підвищення частоти сигналу збільшує продуктивність системи, однак при цьому через високу завантаженість мережі зростають тимчасові затримки і підвищується ймовірність втрати пакетів даних.

Робототехнічна система з керуванням по глобальній мережі повинна задовольняти ряду основних практичних вимог:

- робот не повинен бути пошкоджений або введений у несправний стан в результаті варіацій часової затримки, що виникає при передачі даних по Інтернету;
- вплив зміни завантаженості мережі на роботу оператора і якість його взаємодії з роботом має бути зведено до мінімуму;
- для ефективного використання робота при інспекції об'єктів частота оновлення переданого зображення з телевізійної камери, встановленої на роботі, повинна бути максимально можливою;
- для поліпшення взаємодії оператора з роботом web-сервер повинен забезпечувати "доброзичливий" людино-машинний інтерфейс.

Для того щоб відповідати перший вимозі, система управління повинна мати високий ступінь інтелектуальності, що дозволяє здійс-

нювати:

- самонастройку системи на параметри Інтернет-з'єднання (середня швидкість передачі даних, ймовірність втрати даних і т.д.);
- прогноз виникнення критичних ситуацій, на які оператор не зможе адекватно відреагувати через тимчасові обмеження на передачу керуючих впливів;
- автоматичне відключення або перехід в режим очікування при втраті керуючих впливів від оператора.

Для зменшення впливу завантаженості мережі на роботу оператора необхідно приділити достатню увагу оптимізації обсягу переданої по мережі інформації. Додатково поліпшити взаємодію оператора з роботом можна за рахунок розробки людино-машинного інтерфейсу, проте при цьому необхідно враховувати, що його створення ускладнене специфікою і форматами, використовуваними в мережі Інтернет.

Узагальнена схема системи управління мобільним роботом по глобальній мережі представлена на рис. 7.1.

За цією схемою можна організувати ефективне управління мобільними роботами в різних умовах зовнішнього середовища з використанням комунікаційного ресурсу Інтернету і зручним призначенням для користувача web-інтерфейсом.

Розглянемо більш докладно дві основні частини системи: мобільний робот з бортовою системою управління і web-інтерфейс.

Перетворювач інформації виконує функцію перетворення уніфікованих команд верхнього рівня управління, що надходять від людино-машинного інтерфейсу системи, в команди для тактичного рівня управління.

Інформаційна система навігації мобільного робота виконує функцію збору і обробки даних з датчиків пройденого шляху, швидкості і прискорення, датчиків наявності перешкод і т.п. Обробка цих даних дозволяє видавати інформацію про поточний стан і швидкості руху робота, наявності перешкод, відстані до них і т.п.

Значення цих навігаційних змінних використовуються системою управління тактичного рівня, а також дозволяють сформувати модель робота і навколишнього середовища для відображення параметрів системи на моніторі оператора.

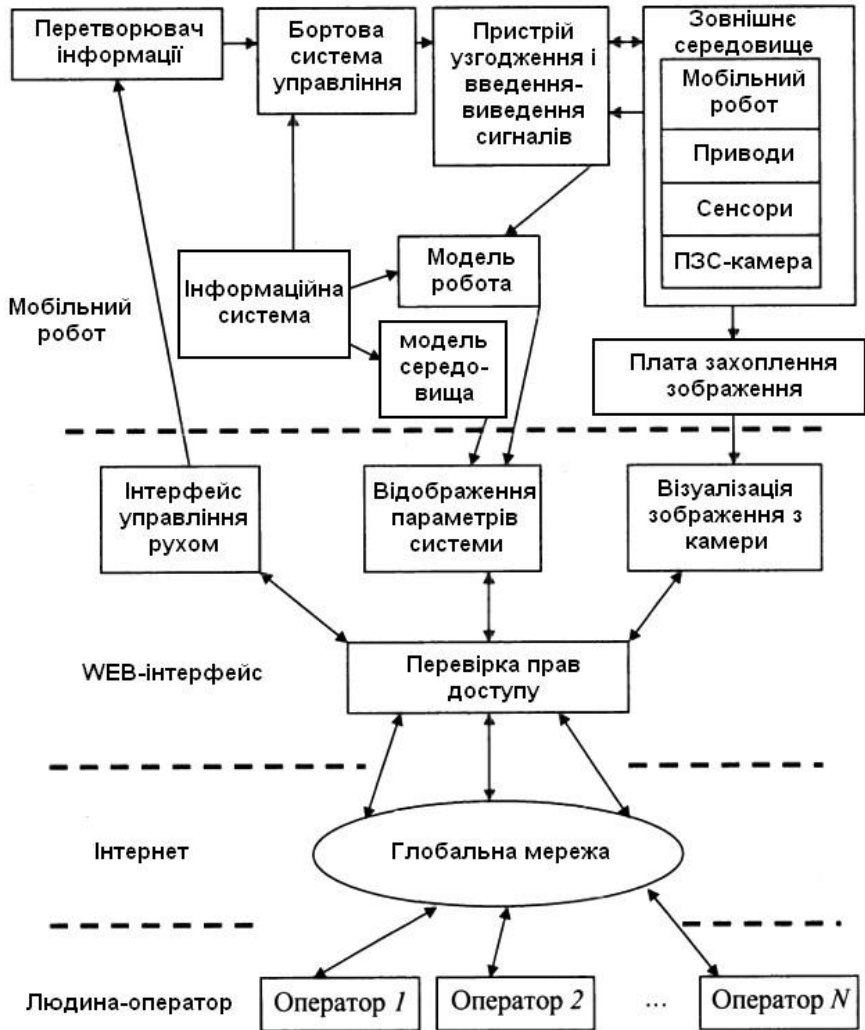


Рисунок 7.1 - Узагальнена схема системи дистанційного керування мобільним роботом по мережі Інтернет

Бортова система управління рівня повинна мати високий ступінь інтелектуальності на тактичному рівні. В її завдання входить:

- формування команд для виконавчих приводів робота;

- коригування команд з урахуванням поточних параметрів інтернет-з'єднання і прогнозу виникнення критичних ситуацій;
- автоматична зупинка руху і перехід в режим очікування при втраті керуючих впливів від оператора.

Пристрої узгодження і введення-виведення сигналів забезпечують роботу системи на виконавчому рівні управління. Вони здійснюють посилення сигналів, збір даних, видачу керуючих впливів на приводи робота. Плата захоплення зображень необхідна для введення зображення з ПЗС-камери в бортовий комп'ютер, в разі використання декількох камер здійснюється також синхронізація їх роботи.

Основними функціональними блоками web-інтерфейсу є інтерфейси управління рухом, відображення параметрів системи і передачі відео зображення.

Інтерфейс управління рухом надає оператору можливість подавати такі уніфіковані команди верхнього рівня за допомогою натискання кнопки на екрані монітора, як дозвіл на початок руху, зупинку, поворот, зміна швидкості.

При дистанційному управлінні через Інтернет виникає технічне протиріччя. З одного боку, оператор для правильного і своєчасного прийняття рішення повинен мати максимально повну інформацію про стан робота і навколишнього його середовища; з іншого - при збільшенні обсягу переданої оператору інформації збільшуються тимчасові затримки, і оператор може не встигнути зреагувати на зміну зовнішніх умов або стану робота.

Методика взаємодії оператора з роботом за допомогою мережі Інтернет передбачає:

- уніфікацію команд верхнього рівня управління (команд оператора);
- максимально можливе спрощення введення керуючих впливів оператором;
- реалізацію управління у вигляді команд, які задають відносне або абсолютне приращення до поточного значення параметра;
- відображення параметрів системи на моніторі оператора з обов'язковим підтвердженням прийняття команд до виконання і наявністю індикаторів небезпечних ситуацій.

Для зменшення завантаження каналу зв'язку при взаємодії оператора з роботом пропонується зменшити обсяг переданих керуючих

впливів за рахунок використання CGI-інтерфейсу. Алгоритм роботи системи з використанням інтерфейсу CGI включає наступні основні етапи:

- клієнт встановлює з'єднання з web-сервером через стандартний браузер (наприклад, Microsoft Internet Explorer);
- браузер клієнта передає серверу HTTP-запит;
- Web-сервер аналізує запит щодо розширення і з'ясовує, що це звернення не статичної сторінки, а запит до CGI-скрипту;
- при виявленні вказаного в запиті CGI-додатку і наявності прав на запуск web-сервер запускає додаток;
- CGI-скрипт виконує необхідні дії і в результаті взаємодії з додатком формує відповідні дані, виводить їх в стандартний потік вводу-виводу. Web-сервер передає ці дані клієнта. Причому CGI-скрипт може передавати не тільки HTML-дані, але і бінарні дані, таким чином повністю формується HTTP-відповідь;
- Web-сервер розриває з'єднання, завершуючи тим самим обмін.

На основі аналізу ефективності різних мов програмування при розробці CGI-додатків в якості основного середовища розробки зазвичай обирають мову графічного програмування LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench - робоче місце проектування лабораторних віртуальних приладів).

LabVIEW - це потужна, повнофункціональна мова програмування, що працює на платформах: PC під управлінням Microsoft Windows, комп'ютерів Apple Macintosh, робочих станцій Sun SPARCstations, Concurrent PowerMax і HP-UX. LabVIEW відступає від послідовної природи традиційних мов програмування і відрізняється графічним програмним середовищем і інструментарієм, необхідним для збору даних, аналізу та представлення результатів.

За допомогою базису LabVIEW - графічної мови програмування, іменованої "G," можна створювати програми у вигляді блок-діаграм, які дозволяють більш адекватно сприймати "текст" програми, полегшують її налагодження, модернізацію, пошук і коригування помилок. Після написання програми у вигляді блок-діаграми LabVIEW перетворює її в машинний код.

LabVIEW об'єднує збір, аналіз і представлення інформації в єдиний комплекс ("наскрізна" технологія програмування). Для отри-

мання даних і управління приладами LabVIEW підтримує протоколи RS-232/422, IEEE 488 (GPIB) і VXI, включаючи функції Virtual Instrument Software Architecture (VISA), а також вбудовані плати збору даних. До складу пакету входить інструментальна бібліотека з драйверами для сотень приладів, що значно спрощує програми управління приладами. Велика бібліотека для аналізу даних містить функції: генерації сигналів, їх обробки, фільтрації, статистичної оцінки, лінійної алгебри та операцій з масивами.

Пакет LabVIEW є графічним за своєю природою і забезпечує такі засоби візуалізації, як створення таблиць, приладових індикаторів, двовірних графіків і тривимірних зображень.

У числі інших переваг LabVIEW можна відзначити можливість вбудовування в блок діаграми підпрограм користувача, написаних на традиційних "текстових" мовах програмування (C, C ++, Java, Visual Basic), компілювати у вигляді динамічно підключених бібліотек, а також скриптів, написаних в широко поширеному середовищі MatLab. Це дозволяє забезпечити спадкоємність програмного забезпечення і виключає необхідність повторної розробки раніше створених підпрограм.

Вирішальними аргументами на користь LabVIEW при виборі способу розробки є такі наступні переваги.

1. Можливість розробки CGI-додатків, що дозволяє реалізувати концепцію інтеграції програмного забезпечення web-сервера з керуючою роботою програмою.

2. Підтримка операційної системи жорсткого реального часу LabVIEW RT, що дозволяє здійснювати розробку коду, а також моніторинг та налагодження програми в середовищі LabVIEW під управлінням операційної системи Microsoft Windows, а потім завантажити створений код на комп'ютер (бортовий контролер), що працює під управлінням операційної системи жорсткого реального часу.

3. Наявність додаткової бібліотеки "Internet Developers for G Toolkit" вбудованого G web-сервера - базисного компонента, що дозволяє на його основі розробляти інтернет-додатки.

Програми на мові G прийнято називати віртуальними приладами -VI (virtual instrument - англ.). Програма складається з діаграми і лицьової панелі віртуального приладу. Оператор має можливість змінювати значення змінних, що визначають швидкість роботи, напрямку руху і т.д., натискаючи на кнопки і перемикачі, повертаючи регулято-

ри на лицьовій панелі віртуального приладу (рис. 7.2).

Програма написана на графічній мові програмування, а тому являє собою блок-діаграму. На рис. 7.3 представлений фрагмент діаграми програми, що управляє рухом робота. Дана програма має високу ступінь вкладеності - велике число підпрограм - віртуальних підприладів. Кожен з них виконує певний набір функцій і для кожного строго визначені вхідні та вихідні параметри.

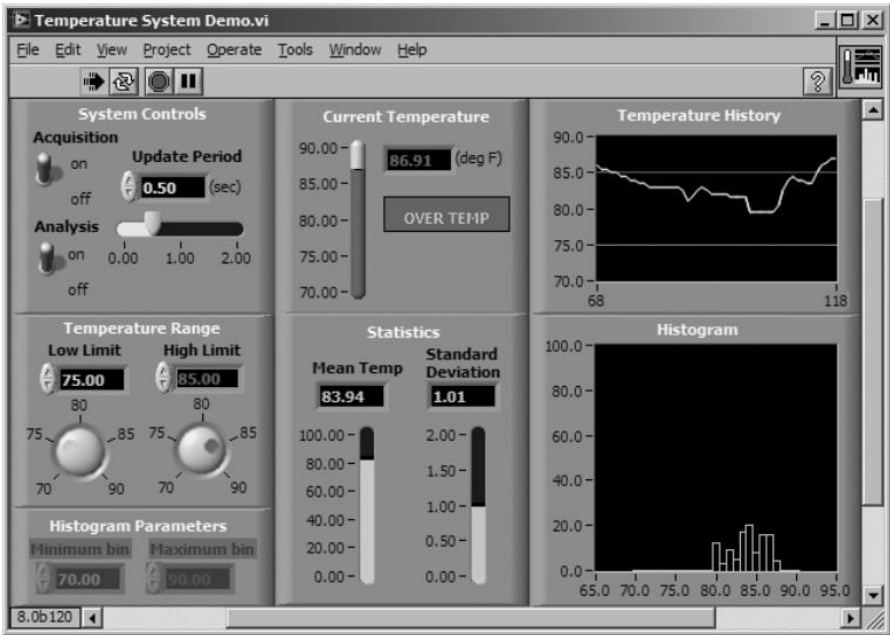


Рисунок 7.2 - Приклад віртуальної панелі управління в системі LabVIEW

З'єднання між функціональними блоками відображають потоки даних при роботі програми, а об'єднання декількох функціональних блоків в "рамки" - відображає використання таких структур, як цикли, послідовності, case-структури.

Використання середовища LabVIEW при розробці керуючої програми дозволило за рахунок підключення зовнішніх бібліотек забезпечити роботу з багатофункціональною платою введення-виведення Lcard-650. Таким чином, змінні визначають зміну сигналу на виході ЦАП плати і управляють перемиканням цифрових ліній.

Метод POST використовується для запиту серверу, щоб той прийняв інформацію, включену в запит, як і ставиться до ресурсу, зазначеному ідентифікатором ресурсу. Метод GET використовується для отримання будь-якої інформації, ідентифікованої ідентифікатором ресурсу в HTTP-запиті. CGI визначає 4 інформаційних потоки: змінні оточення, стандартний вхідний потік, стандартний вихідний потік.

На рис. 7.4-7.7 показані модулі, призначені для обробки і перетворення сенсорної інформації, що надходить від системи технічного зору, ультразвукових і мікрохвильових датчиків, а також кутових датчиків коліс мобільного робота.

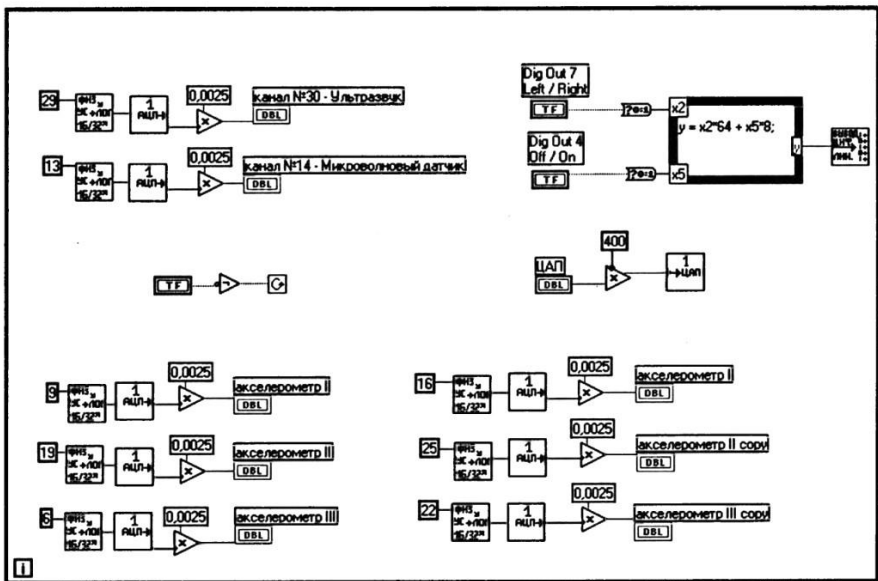


Рисунок 7.4 - Діаграма блоку обробки сигналів з ультразвукових і мікрохвильових датчиків

Для створення людино-машинного інтерфейсу - клієнтської частини системи управління - необхідно створити HTML-документ, в якому реалізований інтерфейс з оператором. У мові HTML це можливо за допомогою форм. При їх розробці використана вбудована можливість LabVIEW по опублікуванню у вигляді HTML лицьової панелі віртуального інструменту.

Далі здійснюють підключення апаратної частини, а також роз-

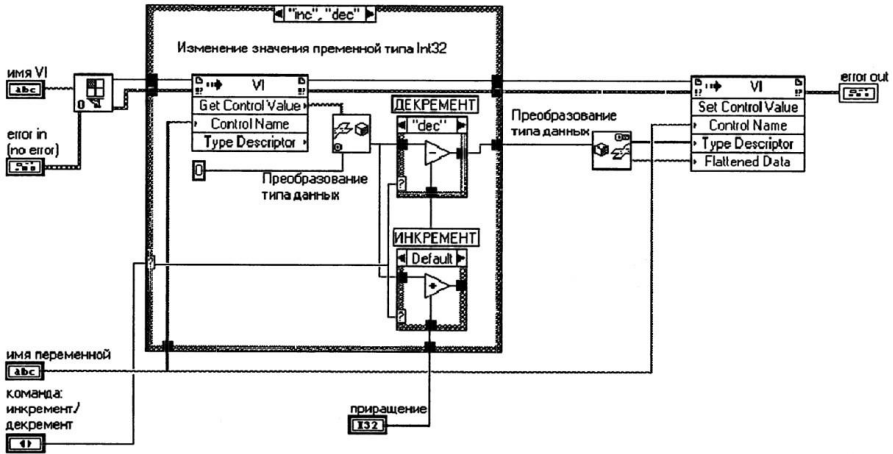


Рисунок 7.7 - Діаграма блоку обробки сигналів з кутових датчиків коліс мобільного робота

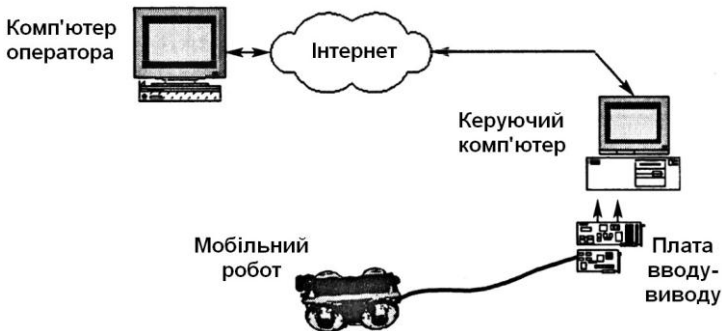


Рисунок 7.8 - Управління мобільним роботом через мережу Інтернет

Оператору надається можливість давати команду "старт/стоп", змінювати швидкість і напрямок руху робота. Поточні значення сигналів з датчиків відображаються у вигляді графіків, стрілочних і цифрових індикаторів на динамічно оновлюваній web-сторінці на моніторі оператора. Реалізована також передача відео зображення з камери.

При цьому обробка навігаційних змінних, а також параметрів поточного стану робота здійснюється на керуючому комп'ютері в рамках роботи керуючої програми незалежно від оператора і часу затримки мережі Інтернет. Таким чином, в разі виникнення критичного ре-

жиму роботи аварійна зупинка робота станеться автоматично по сигналу керуючої програми.

Питання для самоперевірки

1. Які перспективи відкривають Інтернет-технології в мехатроніці та робототехніці?
2. Які переваги Інтернету як засобу організації дистанційного управління технічними об'єктами?
3. Які перспективні сфери застосування Інтернет-робототехніки?
4. Які умови використання роботів для проведення операцій у важкодоступних та небезпечних середовищах?
5. Які фактори слід враховувати при використанні мережі Інтернет як каналу зв'язку?
6. Що таке ICMP-пакет?
7. Як визначити пропускну здатність мережі і верхню межу смуги переданого сигналу?
8. Яким вимогам повинна відповідати робототехнічна система з керуванням по глобальній мережі?
9. Що треба зробити для зменшення впливу завантаженості мережі на роботу оператора?
10. Поясніть що слід розуміти під терміном «людино-машинний інтерфейс»?
11. В чому полягає самоналаштування системи на параметри Інтернет-з'єднання?
12. Як повинна вести себе робототехнічна система при втраті керуючих впливів від оператора?
13. Які задачі стоять перед бортовою системою управління робототехнічною системою?
14. Яке призначення пристроїв узгодження і вводу-виводу сигналів?
15. Для чого призначена плата захвату зображення?
16. В чому полягає методика взаємодії оператора з роботом?
17. За рахунок чого досягається зменшення завантаження каналу зв'язку при взаємодії оператора з роботом?
18. Розкажіть алгоритм роботи системи з використанням інтерфейсу CGI.
19. Що таке LabVIEW?
20. Які мови програмування використовуються у LabVIEW?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Базова

1. Грабченко А. И., Клепиков В. Б., Доброскок В. Л. Введение в мехатронику. Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. 264 с.
1. Кашканов А. А. Інформаційні комп'ютерні системи автомобільного транспорту. Вінниця : ВНТУ, 2010. 230 с.
2. Konrad Reif. Automotive mechatronics. Automotive networking, driving stability systems, electronics. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2015. 549 p.
3. Levent Güvenc, Bilin Aksun Güvenc, Burak Demirel. Control of mechatronic systems. London : The Institution of Engineering and Technology, 2017. 217 p.
4. Patrick Kaltjob. Mechatronic Systems and Process Automation. Boca Raton : CRC Press, 2018. 468 p.

Допоміжна

5. Andrew J. Kurdila. Dynamics and control of robotic systems. Hoboken : John Wiley & Sons Ltd, 2020. 517 p.
6. Mohammad H. Abedin-Nasab. Handbook of robotic and image-guided surgery. Cambridge : Elsevier, 2020. 724 p.
7. Ambarish Goswami. Humanoid robotics: a reference. Dordrecht : Springer Nature B.V., 2019. 2676 p.
8. Clifford A. Pickover. Artificial intelligence. An illustrated history. New York : Sterling Publishing Co., Inc., 2019. 268 p.
9. Сторожев В. В. Системотехника и мехатроника технологических машин и оборудования. М. : Дашков и К°, 2016. 412 с.
10. Юревич Е. И. Основы робототехники. Спб. : БХВ-Петербург, 2017. 284 с.
11. Карташев А. Н. Тракторы и автомобили. Тормозные системы автомобилей. Пневматические тормозные приводы. Горки : БГСХА, 2014. 52 с.
12. Кусяк В. А., Руктешель О. С. Проектирование автоматизированных мехатронных систем управления силовым агрегатом грузовых автомобилей и автопоездов. Минск : БИТУ, 2015. 295 с.
13. Сергеев Н. Н., Хонелидзе Д. М. Электрооборудование и электрон-

- ные системы автомобиля. Тула : ТулГУ, 2015. 156 с.
14. Болштянский А. П. Электронные системы автомобилей. Омск : ОГТУ, 2010. 125 с.
 15. Коваленко О. Л. Электронные системы автомобилей. Архангельск : ИПЦ САФУ, 2013. 80 с.
 16. Котельников А. П. Мехатронные системы тормозного управления автомобилем. Екатеринбург : УрГУПС, 2011. 80 с.
 17. Горбенко Т. И., Горбенко М. В. Основы мехатроники и робототехники. Томск : Томский государственный ун-т, 2012. 126 с.
 18. Виноградов В. М. Проектирование технологических машин и комплексов. Введение в специальность. М. : МАМИ, 2014. 188 с.
 19. Ревин А. А. Автоматика и автоматизация рабочих и производственных процессов. Волгоград : ВолгГТУ, 2015. 388 с.
 20. Черепанов Л. А. Автоматические системы автомобиля. Тольятти : Тольяттинский государственный ун-т, 2006. 132 с.
 21. Подураев Ю. В. Основы мехатроники. М. : МГТУ, 2000. 80 с.
 22. Подураев Ю. В. Мехатроника основы, методы, применение. М. : МГТУ, 2006. 256 с.
 23. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Расчет и конструирование мехатронных модулей. М. : МГТУ, 2012. 422 с.
 24. Егоров О. Д., Подураев Ю. В., Бубнов М. А. Робототехнические мехатронные системы. М. : МГТУ, 2015. 326 с.
 25. Лукинов А. П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. Спб. : Лань, 2012. 608 с.
 26. Готлиб Б. М. Введение в мехатронику. Екатеринбург : Изд-во Уральского государственного ун-та путей сообщения, 2007. 782 с.
 27. Пупков К. А. Мехатроника. М. : РУДН, 2008. 132 с.
 28. Хомченко В. Г., Соломин В. Ю. Мехатронные и робототехнические системы. Омск : ОмГТУ, 2008. 160 с.
 29. Свербилов В. Я. Основы мехатроники. Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева, 2011. 58 с.
 30. Храменко С. А. Основы мехатроники. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. 782 с.
 31. Сырямкин В. И. Информационные устройства и системы в робототехнике и мехатронике. Томск : Томский гос. ун-т, 2016. 524 с.
 32. Сырямкин В. И. Интеллектуальные робототехнические и мехатронные системы. Томск : Томский гос. ун-т, 2017. 256 с.
 33. Бектайл Дж. Конструируем роботов. Дроны. Руководство для

- начинающих. М. : Лаборатория знаний, 2018. 226 с.
34. Гололобов В. Н., Ульянов В. И. Беспилотники для любознательных. СПб. : Наука и техника, 2018. 256 с.
 35. Петров М. А., Шейпак А. А., Петров П. А. Мехатронные системы в машиностроении и их моделирование. М. : МАМИ, 2015. 115 с.
 36. Экзоскелеты : анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования. Курск : Юго-Зап. гос. ун-т., 2015. 179 с.
 37. Рассадкин Ю. И., Синицын А. В. Компьютерное управление в мехатронных системах. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 61 с.
 38. Robert H. Bishop. Mechatronics. An Introduction. Boca Raton : CRC Press, 2006. 285 p.
 39. Robert H. Bishop. Mechatronic System Control, Logic, and Data Acquisition. Boca Raton : CRC Press, 2008. 755 p.
 40. Robert H. Bishop. Mechatronic Systems, Sensors, And Actuators. Boca Raton : CRC Press, 2007. 656 p.
 41. William Bolton. Mechatronics : electronic control systems in mechanical and electrical engineering. Harlow : Pearson, 2015. 663 p.
 42. David G. Alciatore. Introduction to mechatronics and measurement systems. New York : McGraw-Hill Education, 2018. 609 p.
 43. Erika Ottaviano. Mechatronics for cultural heritage and civil engineering. Cham : Springer International Publishing, 2018. 372 p.
 44. Fijalkowski B.T. Automotive mechatronics: operational and practical issues. Heidelberg : Springer, 2011. Volume I. 612 p.
 45. Fijalkowski B.T. Automotive mechatronics: operational and practical issues. Heidelberg : Springer, 2011. Volume II. 538 p.
 46. Edwin Kiel. Drive Solutions. Mechatronics for production and logistics. Berlin : Springer-Verlag, 2008. 545 p.
 47. Uwe Kiencke, Lars Nielsen. Automotive control systems for engine, driveline, and vehicle. Berlin : Springer-Verlag, 2005. 521 p.
 48. John Billingsley. Essentials of mechatronics. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2006. 267 p.
 49. Frank Lamb. Industrial Automation. Hands On. New York : McGraw-Hill Education, 2013. 369 p.
 50. Günter Ullrich. Automated guided vehicle systems a primer with practical applications. Berlin : Springer-Verlag, 2015. 237 p.
 51. Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations. Washington, DC : The national academies press, 2005. 257 p.
 52. Driver Reactions to Automated Vehicles. A Practical Guide for Design

- and Evaluation. Boca Raton : CRC Press, 2018. 177 p.
53. Road Vehicle Automation. Lecture notes in mobility / Gereon Meyer, Sven Beiker (editors). Switzerland : Springer, 2014. 257 p.
 54. Road Vehicle Automation 2. Lecture notes in mobility / Gereon Meyer, Sven Beiker (editors). Switzerland : Springer, 2015. 226 p.
 55. Road Vehicle Automation 3. Lecture notes in mobility / Gereon Meyer, Sven Beiker (editors). Switzerland : Springer, 2016. 292 p.
 56. Road Vehicle Automation 4. Lecture notes in mobility / Gereon Meyer, Sven Beiker (editors). Switzerland : Springer, 2018. 255 p.
 57. Road Vehicle Automation 5. Lecture notes in mobility / Gereon Meyer, Sven Beiker (editors). Switzerland : Springer, 2019. 246 p.
 58. Road Vehicle Automation 6. Lecture notes in mobility / Gereon Meyer, Sven Beiker (editors). Switzerland : Springer, 2019. 146 p.
 59. Hans-Leo Ross. Functional safety for road vehicles. New challenges and solutions for E-mobility and automated driving. Switzerland : Springer International Publishing, 2016. 276 p.
 60. Huaqun Guo. Automotive informatics and communicative systems: principles in vehicular networks and data exchange. New York : Information Science Reference, 2009. 364 p.
 61. Jan Fischer-Wolfarth. Advanced microsystems for automotive applications 2014. Smart systems for safe, clean and automated vehicles. Switzerland : Springer International Publishing, 2014. 305 p.
 62. Kimon P. Valavanis. Advances in Unmanned Aerial Vehicles. State of the Art and the Road to Autonomy. Dordrecht : Springer, 2007. 551 p.
 63. Hassan Rashidi, Edward Tsang. Vehicle Scheduling in Port Automation. Advanced Algorithms for Minimum Cost Flow Problems. Boca Raton : CRC Press, 2016. 260 p.
 64. Steffen Heinrich. Planning universal on-road driving strategies for automated vehicles. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018. 141 p.

Інформаційні ресурси

65. The IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS (TMECH) is a bimonthly periodical source. <http://www.ieee-asme-mechatronics.org> (дата звернення: 27.12.2019).
66. Mechatronics - an international journal. <https://www.journals.elsevier.com/mechatronics> (дата звернення: 27.12.2019).

67. Mechatronics, Informatics and Control Group (MICG) - incorporates the Mechatronics Forum, which has been actively promoting mechatronics internationally for the past 20 years.
<https://www.imeche.org/get-involved/special-interest-groups/mechatronics-informatics-and-control-group> (дата звернення: 27.12.2019).
68. Robotics. <https://curlie.org/Computers/Robotics> (дата звернення: 27.12.2019).
69. IEEE Robotics and Automation Society. <http://www.ieee-ras.org> (дата звернення: 27.12.2019).
70. Investigation of social robots – Robots that mimic human behaviors and gestures. <http://www.ai.mit.edu/projects/humanoid-robotics-group/index.html> (дата звернення: 27.12.2019).
71. Wired's guide to the '50 best robots ever', a mix of robots in fiction (Hal, R2D2, K9) to real robots (Roomba, Mobot, Aibo).
<https://www.wired.com/wired/archive/14.01/robots.html> (дата звернення: 27.12.2019).
72. Automotive Electronic Systems Clemson Vehicular Electronics Laboratory Website <http://www.cvel.clemson.edu/auto/systems/auto-systems.html> (дата звернення: 27.12.2019).
73. Seattle Robotics "What is a Servo?". <http://www.seattlerobotics.org/guide/servos.html> (дата звернення: 27.12.2019).
74. Different types of servo motors. <http://www.servotronix.com/servomotors.html> (дата звернення: 27.12.2019).
75. Automotive Manufacturing Engineering Overview.
<http://www.automotiveengineeringhq.com/automotive-manufacturing-engineering/> (дата звернення: 27.12.2019).
76. Engineering Synergy. <http://myengineeringsystems.co.uk/> (дата звернення: 27.12.2019).
77. The Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), formerly the Institute of Industrial Engineers, is a professional society dedicated solely to the support of the industrial engineering profession and individuals involved with improving quality and productivity.
<http://www.iise.org/> (дата звернення: 27.12.2019).
78. SME (previously the Society of Manufacturing Engineers) is a non-profit student and professional association for educating and advancing the manufacturing industry in North America. <http://sme.org/> (дата звернення: 27.12.2019).