

## Лекція 7. Основи РТ та МТ

### Мехатронні модулі руху (ММР)

#### 7.1. Класифікація мехатронних модулів

Метою будь-якої класифікації є систематизація інформації про деякий об'єкт у вигляді упорядкованої структури для виконання певних задач:

- об'єктивного (забезпечення повноти інформації) та
- порівняльного (забезпечення інформацією для порівняння) представлення об'єкта.

Люба класифікація характеризується:

- об'єктом;
- ознаками класифікації;
- послідовністю ознак класифікації.

На підставі класифікації складаються образи об'єкта.

Нижче представлена одна із відомих класифікацій мехатронних модулів (ММ) за конструктивними ознаками. В даній класифікації виділено 3 ознаки, що достатньо повно характеризують конструкцію ММ:

- рівень інтеграції;
- кількість ступенів рухомості (рухливості);
- вид руху,

а також комплекс ознак (технічні характеристики), що визначають функціональні можливості модулів.

Таким чином, ММ класифікуються за наступними ознаками:

1 – за рівнем інтеграції:

- модулі руху;
- мехатронні модулі руху;
- інтелектуальні мехатронні модулі;

2 – за кількістю ступенів рухомості:

- 1;
- 2;
- 3;
- більше 3;

3 – за видом руху:

- поступальний;
- обертальний;

4 – за технічними характеристиками:

- за силою, що розвивається при роботі ММ:
  - до 10 Н;
  - (10...100) Н;

- (100...1000) Н;
- понад 1000 Н;
- за величиною робочого ходу:
  - до 100 мм;
  - (100...1000) мм;
  - понад 1000 мм;
- за швидкістю:
  - до 0,5 м/с;
  - (0,5...1) м/с;
  - понад 1 м/с;
- за точністю:
  - більше 1 мм;
  - (1,0...0,1) понад 1) мм;
  - (0,1...0,01) мм;
  - менше 0,01 мм;
- за моментом, що розвивається:
  - до 10 Нм;
  - (10...100) Нм;
  - (100...1000) Нм;
  - більше 1000 Нм;
- за кутовою величиною робочого ходу:
  - до 90 град;
  - (90...360) град;
  - більше 360 град;
- за кутою швидкістю:
  - до 1,0 град/сек;
  - (1,0...10) град/сек;
  - більше 10 град/сек;
- за кутовою точністю:
  - понад 60 мін;
  - (60...30) мін;
  - (30...10) мін;
  - до 10 мін.

## **7.2. Згальні відомості про типові механічні передачі як перетворювачів рухів в МТС**

**Механічною передачею (МП)** називають механізм, що передає рух від одного елемента, що називається *ведучим* (початковим, джерелом руху, іноді позначається цифрою 1, літерними символами *вч.* тощо) до іншого елемента, що називається *веденим* (кінцевим, споживачем руху, іноді позначається цифрою 2 та більшою, літерними

символами *вн.* тощо) або перетворює один вид руху в інший, наприклад, обертальний рух в поступальний тощо.

**Механічними передачами називаються механізми, що передають енергію від двигуна до виконавчого органу машини, як правило, з перетворенням швидкостей, сил і моментів, а іноді характеру і закону руху.** Вони призначені для узгодження виду, параметрів руху і розташування двигуна і виконавчого органу, коли швидкості руху робочих органів машини відрізняються від швидкостей стандартних двигунів, тобто робочий орган вимагає крутний момент більший або менший, ніж на валу двигуна. В окремих випадках потрібно також змінити просторову орієнтацію елементів передачі.

За способом передачі руху від провідної ланки до веденої розрізняють передачі:

- **тертям** : з безпосереднім контактом - фрикційні, з гнучкою зв'язком - ремінні;
- **зачіпленням** : з безпосереднім контактом - зубчасті, черв'ячні, з гнучким зв'язком - ланцюгові.

Кожна МП характеризується так званим *передатним відношенням* **i**, тобто числом, що показує в скільки разів частота обертання веденого елемента  $n_{2(вн)}$  більша або менша частоти обертання ведучого елемента  $n_{1(вч)}$ :

$$i = n_{2(вн)} / n_{1(вч)} = n_{внх} / n_{вх}$$

Тут **i** – передатне відношення МП;

$n_{2(вн)}$  – частота обертання веденого вала,  $хв^{-1}$ ,  $с^{-1}$ , об/хв.;

$n_{1(вч)}$  – частота обертання ведучого вала,  $хв^{-1}$ ,  $с^{-1}$ , об/хв.

Величина, обернена передатному відношенню, називається *передатним числом* **u**:

$$u = 1/i = n_{1(вч)} / n_{2(вн)} = n_{вх} / n_{внх}$$

Для передач: - понижувальних  **$i < 1$ ,  $u > 1$** ;

- підвищувальних  **$i > 1$ ,  $u < 1$** .

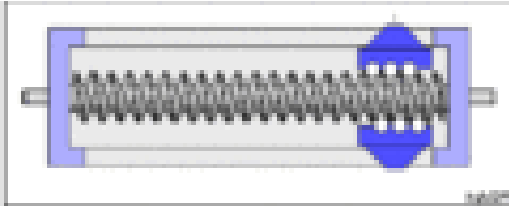
При цьому *типовими МП* в ММР, а також в металорізальних верстатах та в іншому основному та допоміжному технологічному обладнанні машино та приладобудівних виробництв є наступні:

1. пасові (ремінні - РП) передачі (ПП);
2. ланцюгові передачі (ЛП);
3. зубчасті передачі (ЗП);
4. черв'ячні передачі (ЧП);
5. рейкові передачі (РП);

## 6. гвинтові передачі (ГП).

Доречно наголосити, що загалом до ЗП входять також ЧП, РП та ГП.

На рис. 7.1 представлені приклади типових механічних передач, що широко використовуються в ММР та в машино- та приладобудуванні.



Кульковогвинтова передача

Клинопасова передача





Гіпоїдна передача

Черв'ячна передача



Ланцюгова передача



Зубчато-рейкова передача



Зубчаста конічна передача

Зубчаста циліндрична передача

*Рис. 7.1. Основні види типових механічних передач*

### **7.3. Загальні положення щодо ММР**

Нижче подано матеріал про основні види однокоординатних модулів руху, що розроблені для розв'язання завдань автоматизованого приладо- та машинобудування.

Мехатронні модулі руху (ММР) є функціональними “кубиками”, цеглинками, які придатні для компонування складних МТС.

Загальна схема, що пояснює еволюцію розвитку ММР від моторів-редукторів до перспективних модулів, наведена на рис. 7.2.

Запропонована схема, незважаючи на її очевидну умовність, наведена з метою систематизації відомих ММР за складом і за ступенем інтеграції елементів.

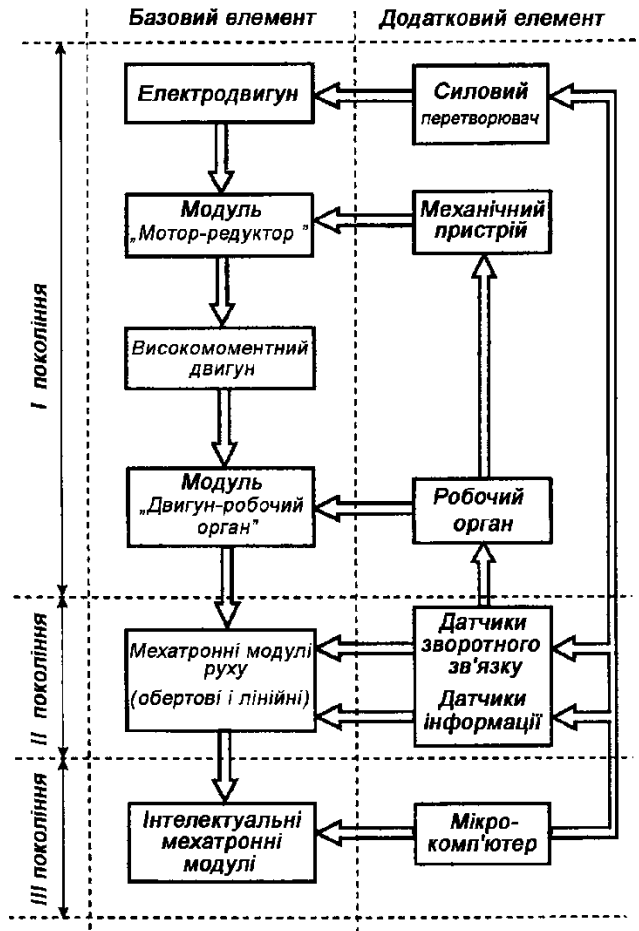


Рис. 7.2. Спрощена схема еволюційного розвитку ММР

#### 7.4. Мотори-редуктори

Мотори-редуктори є, очевидно, історично першими за принципами своєї побудови ММР, що стали серійно випускатися і знайшли широке застосування в приводах різних машин і механізмів.

Мотор-редуктор уявляє собою компактний конструктивний модуль, що об'єднує електродвигун і редуктор. Порівняно з традиційним з'єднанням двигуна і редуктора через муфту мотори-редуктори володіють цілим рядом істотних переваг, а саме:

- зменшення габаритних розмірів;
- зниження вартості за рахунок скорочення кількості приєднувальних деталей, зменшення витрат на встановлення, налагодження і запуск виробу;

- покращення експлуатаційних властивостей (пило- і вологозахисність, мінімальний рівень вібрацій, безпека і надійність роботи у несприятливих виробничих умовах).

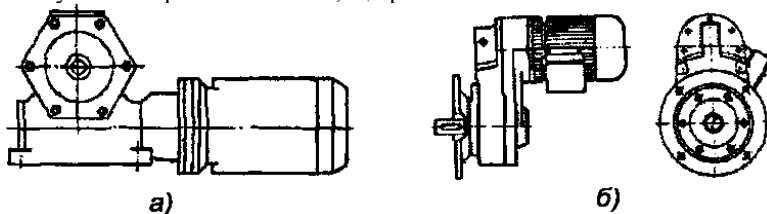
Конструктивне виконання модуля визначається типами редуктора і електродвигуна, що використовуються для його утворення. В залежності від технічних вимог завдання застосовуються:

- циліндричні;
- насадні;
- конічні;
- черв'ячні;
- інші види редукторів, наприклад, хвильові.

У якості двигунів найбільш часто використовують:

- асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором і регульованим перетворювачем частоти обертання;
- однофазні двигуни;
- двигуни постійного струму.

Одноступеневий черв'ячний мотор-редуктор наведений на рис. 7.3,а. Редуктор випускається для загальномашинобудівного застосування. Особливість конструкції полягає в тому, що в ступиці черв'ячного колеса вбудована запобіжна муфта, що дозволяє обмежувати обертовий момент, що розвивається.



*Рис. 7.3. Мотори-редуктори  
а) черв'ячний мотор-редуктор;  
б) насадний мотор-редуктор*

Наприклад, основні технічні характеристики даного мотора-редуктора типорозміру МРЧс-82 наступні:

- потужність електродвигуна – 0,27 кВт;
- номінальна частота обертання вихідного вала – 0,28 с<sup>-1</sup>;
- максимальний момент на вихідному валу – 50 Нм;
- передатне число редуктора – 86;
- габаритні розміри модуля – 500 x 255 x 245 мм;



– маса модуля – 35 кг.

На рис. 7.2, б показаний насадний мотор-редуктор фірми “Бауер”, який насаджується (монтується) безпосередньо на вал веденого механічного пристрою і тому є швидкознімним модулем. Блочно-модульний принцип конструювання дозволяє комбінувати в модулі двигуни і редуктори різних типів і потужностей, забезпечуючи таким чином широкий спектр механічних характеристик модуля за:

- частотою обертання від 0,2 до 160 хв<sup>-1</sup>;
- потужністю від 0,015 до 75 кВт.

Вартісний аналіз, що проведений фірмою “Бауер”, показав, що застосування моторів-редукторів рентабельне в машинах з низькою швидкістю переміщення робочого органу (особливо при частотах обертання менше 500 хв<sup>-1</sup>).

Таким чином, споживач здобуває і експлуатує мотор-редуктор як єдиний модуль, здогадуючись про наявність в його складі зубчастих передач тільки з назви і при заміні масла.

### **7.5. Мехатронні модулі обертального руху на базі високомоментних двигунів**

Наступним кроком у розвитку приводної техніки стала поява високомоментних двигунів обертального руху, застосування яких дозволило взагалі виключити механічний редуктор із складу електроприводів постійного струму, що працюють на низьких швидкостях.

*Високомоментними* називаються двигуни постійного струму із збудженням від постійних магнітів і електронною комутацією обмоток, які допускають багатократне перевантаження за моментом.

Для визначення положення полюсів на роторі вентильного високомоментного двигуна встановлюють додаткові технічні засоби (наприклад, датчики Хола, індуктивні і фотоелектричні датчики). Зазвичай високомоментні двигуни стійко працюють на частотах обертання (0,1–1) хв<sup>-1</sup>, які типові для металорізальних верстатів і ПР.

Основні *переваги високомоментних двигунів* визначаються:

- відсутністю в приводі редуктора;
- зниженням матеріаломісткості, компактність і модульність конструкції;
- підвищеними характеристиками точності приводу завдяки відсутності зазорів;
- виключенням тертя в механічній трансмісії, що дозволяє істотно зменшити похибки позиціонування і нелінійні динамічні ефекти на повзучих швидкостях;
- підвищенням резонансної частоти.

Високомоментні двигуни випускаються в даний час колекторного і вентиляного (іноді використовується термін “безщіткового”, або “безконтактного”) типів.

*Основні переваги вентиляних двигунів у порівнянні з колекторними:*

- висока надійність;
- великий термін служби;
- мінімальні витрати на обслуговування (внаслідок виключення іскріння і зносу щіток);
- найкращі теплові характеристики (оскільки тепло розсівається на обмотках статора, а на роторі тепловиділяючі елементи відсутні), звідси можливість використання проводів малого діаметру;
- висока швидкодія за рахунок високого співвідношення моменту, що розвивається, до моменту інерції ротора;
- велика перевантажувальна здатність за моментом (типово  $M_{\max} / M_{\text{ном}} = (8 \dots 10)$ ) в широкому діапазоні регулювання швидкості;
- близькі до лінійних механічні і регульовальні характеристики.

Порівняно із синхронними двигунами вентиляні високомоментні двигуни дозволяють регулювати швидкість обертання за допомогою зворотного зв'язку. При цьому частота обертання не залежить від напруги живлення, немає проблеми випадання із синхронізму.

*Основний недолік* вентиляних двигунів – наявність дорогих магнітів і блоку управління комутацією обмоток, звідси знижений показник відношення потужність / ціна і підвищені габарити. У сучасних модифікаціях ця проблема вирішується шляхом побудови цих блоків на базі відносно дешевих інтегральних мікросхем.

До складу сучасних ММР на основі високомоментних двигунів обов'язково входять також датчики зворотного зв'язку та іноді керовані гальма, що дозволяє віднести такі високомоментні двигуни до другого покоління (див. рис. 7.1). У якості датчиків найчастіше застосовуються:

- фотоімпульсні датчики (інкодери);
- тахогенератори;
- револьвери;
- кодові датчики положення.

Принципово важливо, що модуль “двигун-датчик” має єдиний вал, що дозволяє поєднувати високі технічні параметри і низьку вартість.

Конструктивна схема модуля “двигун постійного струму - вбудований тахогенератор”, що ілюструє цю ідею, наведена на рис. 7.4.

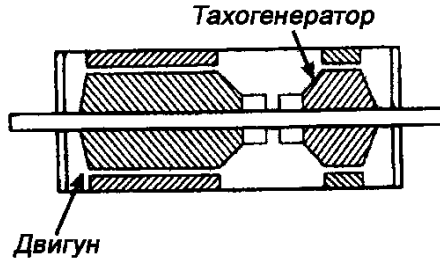


Рис. 7.4. Мехатронний модуль “двигун – тахогенератор”

На рис. 7.5 показана конструкція MPM Dynaserv Motor, розробленого фірмою PARKER Corp. на базі високомоментного двигуна.

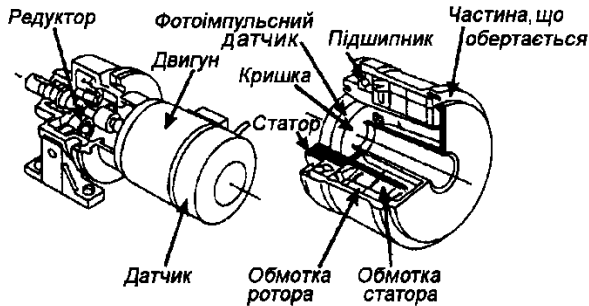


Рис. 7.5. MPM Dynaserv Motor серії Dm

До складу модуля входять:

- ротор двигуна;
- статор двигуна;
- підшипник;
- фотоімпульсний датчик.

Зовнішня частина модуля обертається на опорних підшипниках.

Основні технічні характеристики MPM Dynaserv Motor серії DM наступні:

габаритні розміри модуля	– довжина до 295 мм ,
	– діаметр від 150 до 250 мм ,
маса модуля	– від 5,5 до 29 кг ,
точність позиціонування	– 0.0069 кутових град ,
електроживлення	– 115 В або 230 В (однофазне)

максимальний момент	–	до 200 Нм ,
номінальна швидкість	–	до 1 рад/с.

## 7.6. Мехатронні модулі лінійного руху

Розглянутий вище мехатронний підхід до побудови модулів обертового руху на базі високомоментних двигунів отримав останніми роками свій розвиток і в модулях лінійного переміщення. Мета проектування аналогічна – виключити механічну передачу зі складу ММР.

ММР на основі лінійних високомоментних двигунів знаходять все більше застосування в:

- гексаподах;
- високошвидкісних металорізальних верстатах (багатоцільових, фрезерних, шліфувальних);
- комплексах для лазерного та водоструминного різання;
- допоміжному обладнанні (хрестових столах, транспортерах) тощо.

Традиційні електроприводи лінійних переміщень включають двигун обертового руху і механічну передачу для перетворення обертового руху в поступальне переміщення (шарикогвинтові передачі, зубчасті рейки, пасові передачі тощо).

З початку 80-х років відомі розробки власне лінійних двигунів. Проте з причин низьких питомих силових показників вони мали обмежену область застосування (графічні пристрої, координатно вимірювальні машини) і в автоматизованому обладнанні не могли бути використані.

*Основні переваги* модулів на базі лінійних високомоментних двигунів порівняно з традиційними лінійними приводами:

- підвищення у декілька разів максимальної швидкості руху (до 150...210 м/хв.) і прискорення (у перспективі до 5g);
- висока точність реалізації руху;
- висока статична і динамічна жорсткість.

Разом з тим є *ряд проблем* при проектуванні і використанні лінійних високомоментних двигунів:

- вища вартість;
- необхідність використання систем охолодження мехатронних модулів руху (рідинною або повітрям);
- відносно невисокий ККД. модуля.

Серійно лінійні ММР випускаються провідними фірмами.

Як приклад нижче подані технічні характеристики лінійного високомоментного двигуна, що випускає фірма Krauss Maffei (серія LIMES TS, із спеціальним охолоджувачем):

- максимальне зусилля – від 1720 до 14800 Н;
- максимальна швидкість – до 3,5 м/с;
- маса модуля – від 13,1 до 132,9 кг.

На сьогодні створюються модулі лінійного руху із зусиллям до 20000 Н, швидкістю переміщення до 3 м/с і прискоренням до 2g, які орієнтовані на застосування в металорізальних верстатах, ПР, у засувних газових і нафтопровідних пристроях.

### 7.7. ММР типу “двигун – робочий орган”

Важливим етапом розвитку ММР стали розробки типу “двигун-робочий орган”. Такі конструктивні модулі мають особливе значення для технологічних МТС, метою руху яких є реалізація цілеспрямованої дії робочого органу на об’єкт робіт.

У верстатах з відносно невеликим обертовим моментом (токарних малих розмірів, консольно-фрезерних, високошвидкісних фрезерних, в механізмах з паралельною кінематикою тощо) застосовуються так звані “мотори-шпинделі”. Відмітною конструктивною особливістю цих електромеханічних виробів для приводів головного руху є монтаж шпинделя безпосередньо на роторі двигуна.

Одна з перших промислових розробок “мотор-шпиндель” фірми “Fanuc” має наступні основні технічні характеристики:

- габарити – 784 x 338 x 430 мм;
- потужність – 5,5 кВт;
- номінальна частота обертання – 750 хв<sup>-1</sup>;
- максимальна частота обертання – 4500 хв<sup>-1</sup>;
- номінальний момент – 70 Нм.

Використання у виробі шпинделів механічних підшипників визначило їх *обмежені функціональні можливості*, в першу чергу при високій частоті обертання:

- недостатній ресурс роботи;
- необхідність змащування пар тертя;
- проблему герметизації.

Для реалізації на верстатах високопродуктивних режимів різання розроблені вироби шпинделів на електромагнітних опорах, які забезпечують частоту обертання до 200000 хв<sup>-1</sup>.(!!!)

Схема шпиндельного виробу на електромагнітних опорах наведена на рис. 7.6.

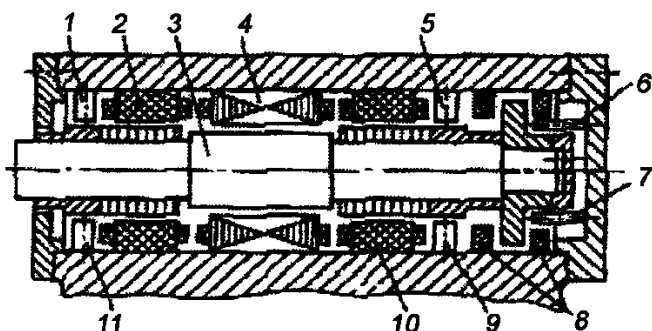


Рис. 7.6. Шпиндельний виріб на електромагнітних опорах:

- 1, 5, 9, 11 – радіальні датчики інформації;
- 6, 7 – осьові датчики інформації;
- 4 – статор асинхронного двигуна;
- 2, 10 – радіальні електромагнітні опори;
- 8 – осьові електромагнітні опори

Частота обертання ротора асинхронного двигуна регулюється зміною частоти напруги живлення на статорі. Модуль має чотири опори: дві радіальні і дві осьові. Додатковим електронним елементом даного МТМ є система стабілізації положення осі ротора. Під дією збуджуючих зусиль виникають відхилення в положенні ротора, які вимірюються відповідними осьовими і радіальними датчиками інформації. Пристрій комп'ютерного управління, автоматично регулює силу струму в обмотках збудження електромагнітів, підтримує задане положення осі ротора, або змінює його за бажаним законом (в межах зазору в опорах) для отримання деталей складного профілю.

Проте слід враховувати, що мотори-шпинделі на електромагнітних опорах вимагають інтенсивного охолодження при тривалій роботі на високошвидкісних режимах.

Модулі типу “двигун – робочий орган” знайшли широке розповсюдження також в електроприводах різних самохідних засобів (електровелосипедів і електромобілів, робокарів і мобільних роботів тощо).

Так, при розробці тягового приводу крісла-коляски використаний безколекторний високомоментний двигун із збудженням від постійних магнітів, вбудований у ведуче колесо без проміжного механічного редуктора. Такі модулі отримали назву “мотор-колесо”. Вибране рішення дозволило зменшити матеріаломісткість і трудомісткість виготовлення приводу, забезпечити безшумність переміщення, зменшити габарити і вивільнити таким чином простір

для розміщення джерела живлення. Привід забезпечує рух крісла-коляски із швидкістю 6 км/год при загальній масі 150 кг.

## 7.8. Інтелектуальні ММР

Головною особливістю сучасного етапу розвитку ММР є інтелектуалізація процесів керування їх функціональними рухами. По суті мова йде про розробку принципово нового покоління модулів, в яких здійснена інтеграція всіх трьох компонентів: електромеханічного, електронного і комп'ютерного. Технічна реалізація інтелектуальних ММР стала можливою завдяки бурхливому розвитку останніми роками мікропроцесорних систем, орієнтованих на завдання управління рухом. Постійне вдосконалення виробничих технологій веде до стабільного зниження вартості апаратних засобів, що зробило їх до теперішнього часу рентабельними для практичного впровадження.

Розглянемо загальну структуру однокоординатного мехатронного модуля, що наведений на рис. 7.7.

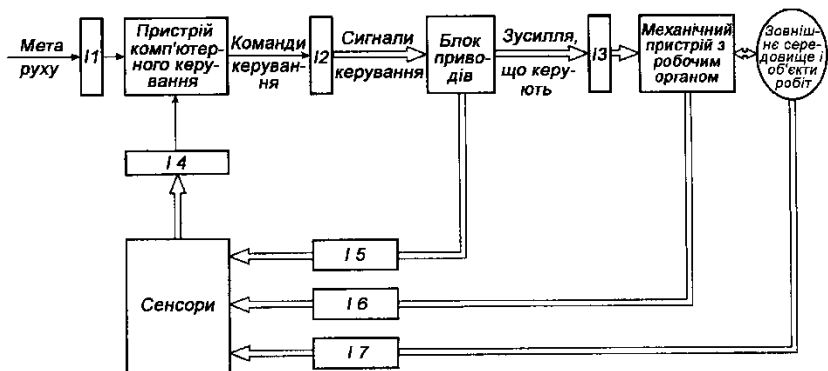


Рис. 7.7. Блок-схема традиційної машини з комп'ютерним керуванням (I1 – I7: інтерфейсні блоки)

Пристрій комп'ютерного управління має два вхідні інформаційні канали:

- інтерфейс I1 пов'язує його з верхнім рівнем управління;
- інтерфейс I4 – з сенсорами і одним вихідним каналом (інтерфейс I2), через який поступають керуючі команди на виконавчий привод.

Відповідно можна виділити три *напрями інтелектуалізації* ММР, які класифікуються *залежно від інтерфейсних точок інтеграції*:

1. Розвиток інтегрованих інтерфейсів, що пов'язують керуючий контролер з комп'ютером верхнього рівня в єдиний апаратно-програмний керуючий комплекс (інтерфейс *I1*).

2. Створення інтелектуальних силових модулів керування рухом інтеграції керуючих контролерів і силових перетворювачів (інтерфейс *I2*).

3. Розробка інтелектуальних сенсорів МТМ, які додатково до звичайних вимірювальних функцій здійснюють комп'ютерну обробку і перетворення сигналів за гнучкими програмами (інтерфейс *I3*).

### **7.9. Тенденції та способи технічної реалізації пристрою комп'ютерного керування в сучасних МТМ**

Як було вказано на одній із минулих лекцій, виділено три *напрями інтелектуалізації* ММР, які класифікуються *залежно від інтерфейсних точок інтеграції*. Це з врахуванням позначень на рис. 7.7 такі напрями:

1. розвиток інтегрованих інтерфейсів, що пов'язують керуючий контролер з комп'ютером верхнього рівня в єдиний апаратно-програмний керуючий комплекс (інтерфейс *I1*);

2. створення інтелектуальних силових модулів керування рухом інтеграції керуючих контролерів і силових перетворювачів (інтерфейс *I2*);

3. розробка інтелектуальних сенсорів МТМ, які додатково до звичайних вимірювальних функцій здійснюють комп'ютерну обробку та перетворення сигналів за гнучкими програмами (інтерфейс *I3*).

Нижче розглянуто тенденції і способи технічної реалізації пристрою комп'ютерного керування в сучасних МТМ.

#### **7.9.1. Контролери руху**

Перший із вказаних напрямів полягає в створенні нового покоління комп'ютерних пристроїв, що дозволяють користувачеві гнучко і швидко вирішувати весь комплекс завдань керування рухом ММР.

Узагальнено можна розділити завдання управління робочих органів МТС на дві основні частини:

- планування руху;
- його виконання в часі.



Задачу планування руху і автоматизованого формування програми керування вирішує комп'ютер верхнього рівня, який отримує цілевказівку від людини-оператора. Функцію розрахунку і видачі керуючих сигналів безпосередньо на виконавчі приводи виконує контролер руху. Таким чином, поєднання комп'ютера і контролера в архітектурі пристрою комп'ютерного керування є обґрунтованим з погляду розділення підзадач керування, що вирішуються.

Кожному з перерахованих етапів відповідають певні рівні в ієрархічній структурі системи керування.

Нижче проаналізовано варіанти архітектури пристроїв комп'ютерного керування, що застосовуються в МТ.

Лише у простих модулях іноді використовуються сепаратні контролери, які привабливі для користувачів своєю відносною дешевизною. Функції такого контролера обмежені завданням управління механічним рухом за однією координатою (рідко за двома), деякі модифікації мають стандартний інтерфейс для включення в складніші керуючі структури. Проте необхідність програмування безпосередньо оператором на мові достатньо низького рівня (типу BASIC) мала кількість каналів зв'язку і обмежений об'єм пам'яті роблять цей тип контролерів неперспективним для багатокоординатних МТС з інтелектуальними методами керування.

Сучасні контролери зазвичай реалізують управління із зворотним зв'язком за положенням та/або швидкості керованого механічного об'єкту, тобто мехатронна система керування є замкнутою на виконавчому рівні.

Принцип розімкненого керування в даний час використовується тільки в системах управління кроковими двигунами. Такі двигуни застосовуються, наприклад в графічних пристроях, плотерах, поворотних столах та інших пристроях, в роботі яких не маю місце істотні збурюючі дії. В устаткуванні автоматизованого машинобудування (металорізальних верстатах, ПР) забезпечити прийнятну точність руху можна тільки з використанням замкнених систем керування.

Для реалізації функціональних рухів контролери мають також додаткові входи/виходи для зв'язку із зовнішнім устаткуванням (рис. 7.8). Як правило, це сигнали, дискретні за формою (I/O). Тут доречно звернути увагу на дуже широке розповсюдження в промислових системах автоматички програмованих логічних контролерів (ПЛК).

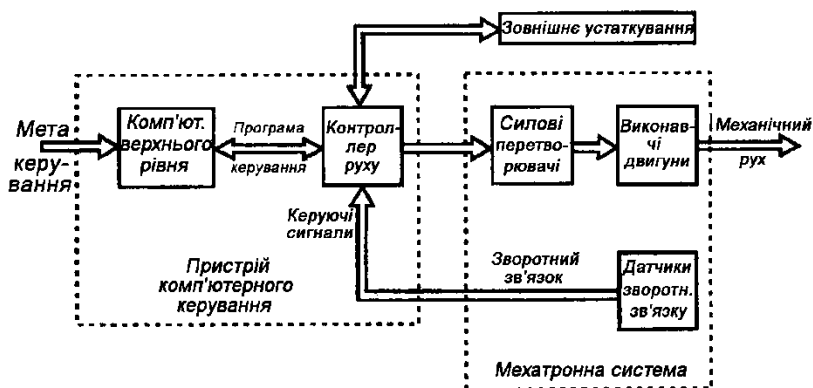


Рис. 7.8. Структура системи керування функціональним рухом

Головне завдання ПЛК – це ефективні операції виключно з дискретною інформацією. Тому побудова на базі ПЛК систем управління рухом мехатронними модулями, і тим більше мехатронними системами, логічно недоцільно. Але при цьому можливий обмін інформацією між контролерами керування рухом і програмованими логічними контролерами через блок дискретних входів/виходів.

Найбільш поширено в даний час два методи формування контролером керуючих сигналів для силового перетворювача:

- аналогові командні сигнали;
- модульовані керуючі сигнали.

Для формування аналогових керуючих сигналів необхідний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), який видає електричну напругу (зазвичай від  $-10\text{В}$  до  $+10\text{В}$  постійного струму). З енергетичної точки зору вигідним вважається метод широтно-імпульсного керування силовими ключами перетворювача.

**Примітка.** У технічних описах контролерів величини переміщень зазвичай мають розмірність [Імп] (Steps або Counts) та їх швидкості відповідно [Імп/с] (Steps/sec або Counts/sec). Дані значення важливі тим, що визначають власні можливості контролера без урахування параметрів датчиків зворотного зв'язку.

Для визначення параметрів руху в системі одиниць СІ слід розділити вказані числа на коефіцієнти вибраних датчиків. Припустимо, що стандартний кутовий фотоімпульсний датчик (інкодер) має коефіцієнт 5000 імпульсів/об., а вибраний резольвер – коефіцієнт 65000 імпульсів/об. Тоді при паспортній характеристиці контролера 1000000 імпульсів/с отримуємо максимальні частоти обертання

двигуна відповідно  $200 \text{ c}^{-1}$  при використанні інкодера і  $15,38 \text{ c}^{-1}$  при установці резольвера.

При створенні інтелектуального МТМ можливі два *базові варіанти апаратної архітектури* пристрою комп'ютерного керування:

– використання комп'ютера верхнього рівня і контролера руху як окремих пристроїв, сполучених стандартним інтерфейсом (в цьому випадку контролер є зовнішнім блоком по відношенню до комп'ютера);

– моноблочна структура, коли контролер апаратно встановлюється всередину комп'ютера (“вбудований контролер”).

Дані апаратні схеми мають різні області переважного застосування. Архітектуру типу “*зовнішній контролер*” доцільно використовувати у великих МТС, що складаються з декількох багатокординатних керованих машин (верстатів, роботів, допоміжного обладнання). У таких системах комп'ютер виконує функції сервера, вирішуючи завдання планування рухів, диспетчерування і керування роботою всіх контролерів комплексу.

Архітектура на базі *вбудованих контролерів* орієнтована на завдання координованого керування рухом декількох МТМ, що входять до складу, як правило, однієї МТС (наприклад, ПР для лазерного різання).

Блок-схема пристрою комп'ютерного керування із зовнішнім контролером руху наведена на рис. 7.9.

Гнучкість керування забезпечується застосуванням мікропроцесора. Виконувана програма керування зберігається в оперативному запам'ятовуючому пристрої. Планування функціональних рухів здійснюється оператором на комп'ютері верхнього рівня з використанням пакетів прикладних програм. Комп'ютер виконує також автоматичну генерацію команд для контролера, які поступають на виконання через стандартний інтерфейс (наприклад, RS-232C). Ці команди задають бажані закони зміни в часі: положення, швидкості і прискорення валу виконавчого двигуна. Типовим є трапецеїдальний закон зміни швидкості руху, що включає ділянки розгону, переміщення з постійною швидкістю і гальмування із заданим прискоренням (рис. 7.9, б).

Як приклад нижче на рис. 7.9 розглянуто пристрій комп'ютерного керування із зовнішнім контролером Compumotor Plus (серія “X”), що випускається фірмою Parker (USA). Даний пристрій призначений для управління однокоординатними МТМ.

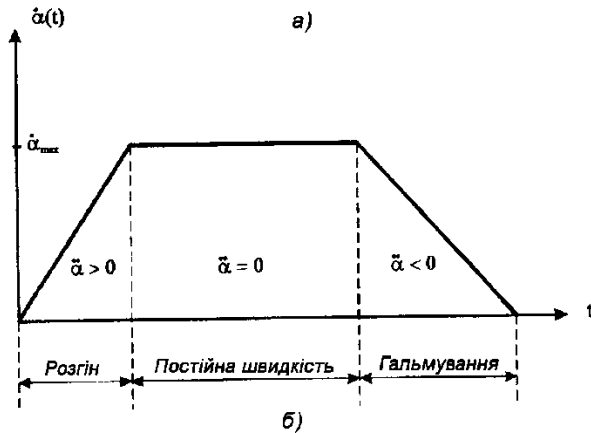


Рис. 7.9. Пристрій комп'ютерного керування із зовнішнім контролером руху:

- а) блок-схема контролера руху,  
 б) типовий закон руху

До складу пристрою входять:

- контролер управління рухом, що реалізовує алгоритм цифрового ПД-регулювання (коефіцієнти регулятора можуть програмно змінюватися за командами зовнішнього комп'ютера);
- цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП);
- постійний запам'ятовуючий пристрій на 40 програм керування рухом;
- блок дискретних програмованих входів/виходів (3 виходи і 2 входи);
- стандартний інтерфейс RS-232C для зв'язку з комп'ютером верхнього рівня;

– інтерфейс для перетворення в цифрову форму сигналу від резольвера;

– панель оператора (монітор і кнопочвий пульта).

Основні технічні характеристики керованого руху наступні:

– інтервал швидкості  $0,0001 \dots 50 \text{ c}^{-1}$ ,

– інтервал переміщення  $0 \dots 327679 \text{ 999 імп}$ ,

– позиційна помилка не більше  $0,200$  кут. град,

– повторюваність  $0,0334$  кут. град.

Архітектура типу “вбудований контролер” полягає у використанні ПК як апаратної платформи пристрою керування рухом. Це дозволяє поєднувати функції планування і керування функціональними рухами МТМ і МТС, збиранню і обробки інформаційно-вимірювальних даних в апаратно і програмно єдиному пристрої. Важливою позитивною якістю такого підходу з погляду користувача є інтеграція стандартних операційних систем і програмних засобів (AutoCAD, Excel, Windows, C++ і тому подібне) з системами програмування рухів. Об'єднання керуючих комп'ютерів у мережу дає можливість створювати розподілені керуючі комплекси для завдань автоматизації виробничих комірок, цехів і підприємств. При цьому модульна архітектура на базі персонального комп'ютера (ПК) промислового виконання гарантує ефективний захист апаратної частини від теплових, вібраційних і інших дій виробничого середовища.

Технічно вбудовані контролери руху випускаються у вигляді спеціальних плат (plug-in card), що встановлюються в додатковий слот ПК. Обмін даними між контролером і ПК здійснюється через стандартну шину (зазвичай 32-бітова) адреси і даних. Прикладами типових шин можуть служити стандарти ISA, STD, VME і IBM-PC Bus. На платі контролера також необхідні рознімні пристрої для підключення силового перетворювача привода, датчиків зворотного зв'язку (аналогових і цифрових), зовнішніх пристроїв з дискретним входом/виходом.

Прикладом вбудованого контролера руху, що серійно випускається, є модель PCI-FlexMotion-6C фірми National Instruments (USA). Пристрій дозволяє одночасно управляти рухом МТС за шістьма координатами із зворотним зв'язком і додатково за двома осями в кроковому режимі. До складу контролера входять потужний багатозадачний процесор Motorola real-time 32-bit, цифровий сигналний процесор (DSP-processor) фірми Analog Device, багатоканальні аналого-цифровий і цифро-аналоговий перетворювачі (відповідно АЦП та ЦАП), інтерфейси для внутрішніх і зовнішніх комунікацій.

Контролер дозволяє реалізовувати наступні види керованих рухів:

- позиційне управління;
- переміщення за просторовими (3D) траєкторіями з лінійною інтерполяцією;

- контурні рухи з круговою і сплайновою інтерполяцією;
- копіювальні рухи.

Основні технічні характеристики контролера руху наступні:

- період розрахунку керуючого сигналу (по одній осі) 62,5 мкс;

- інтервали управління:

- за швидкістю 0 ... 16 Мега-серія імпл/с ;

- по переміщенню 0 ... 2 147 483 647 імпл ;

- по прискоренню 0 ... 134 217 728 імпл/с<sup>2</sup>;

- максимальні похибки управління:

- позиційна похибка  $\pm 1$  імпл (для інкодера в зворотному зв'язку), 0,0049 В (для аналогового зворотного зв'язку);

- швидкісна помилка 0,02%;

- дискретні входи/виходи 24 біт, 22 лінії ,

- аналого-цифрове перетворення: 8 ліній, 12 біт, 10 мкс,  $\pm 10$ В;

- цифро-аналогове перетворення: 16 біт,  $\pm 10$  В;

- вихід широко-імпульсного модулятора 0,5 ... 32 КГц.

### 7.9.2. Інтелектуальні силові модулі

Повернемося до аналізу можливих способів інтелектуалізації МТМ і розглянемо підхід, що направлений на інтеграцію контролерів руху і силових перетворювачів приводу (інтерфейс *I2* на рис. 7.7). Таке рішення доцільне для багатовимірних мехатронних систем, компоненти яких розташовані на значному віддаленні один від одного. У цих випадках комплексувати систему керування на базі одного персонального комп'ютеру дуже складно, а іноді і технічно неможливо з причин проблем передачі сигналів і даних на великі відстані. Так, стандартний протокол RS-232 дозволяє передавати дані на відстані не більш, ніж 9,15 м.

Блок управління кожним модулем в таких системах вбудовується в корпус перетворювача або навіть в клемну коробку електродвигуна. Такі модулі отримали назву *інтелектуальних силових модулів*.

Прикладом такого рішення є нова система керування промисловими роботами ПР 125/150. Силова і слабкострумova електронні частини системи встановлені в загальній шафі керування.

Система керування має два керівних модуля – модуль приводу РМ6-600 і пристрій комп'ютерного керування на базі процесора Pentium. Даний варіант зручний для обслуговування і експлуатації, економічний за займаною площею, забезпечує вільний доступ до всіх комунікацій системи.

Інтелектуальні силові модулі будуються на базі напівпровідникових приладів нового покоління.

Типовими представниками цих приладів є:

- силові польові транзистори (MOSFET);
- біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT);
- запираючі тиристри з польовим управлінням (MCT).

Нове покоління приладів відрізняється:

- високою швидкістю (для транзисторів IGBT частота комутації складає до 50000 Гц, для транзисторів MOSFET – 100000 Гц);

- високими значеннями комутованих струмів і напруги (для IGBT: гранична сила комутованого струму – до 1200 А, гранична комутувана напруга – до 3500 В);

- мала потужність керування.

До складу інтелектуальних силових модулів входять, окрім традиційних приладів силової електроніки (ключів на базі силових транзисторів або тиристорів, діодів тощо), елементи мікроелектроніки, що призначені для виконання інтелектуальних функцій, – управління рухом, захист в аварійних режимах і діагностика несправностей.

Використання інтелектуальних силових модулів у складі приводів мехатронних модулів дозволяє:

- істотно зменшити масогабаритні показники силових перетворювачів;
- підвищити їх надійність під час експлуатації;
- поліпшити техніко-економічні показники.

Останніми роками ринок інтелектуальних силових модулів швидко розвивається.

### **7.9.3. Інтелектуальні сенсори МТМ і МТС**

Метою створення інтелектуальних сенсорів є об'єднання функцій вимірювання поточних параметрів механічного руху, їх перетворення і комп'ютерної обробки за заданими алгоритмами в єдиному інформаційно-вимірювальному модулі. Із структурної точки зору мова йде про інтеграції сенсорного і комп'ютерного блоків мехатронного модуля (інтерфейс ІЗ на рис. 7.7).

Інтелектуалізація сенсорів дозволяє добитися вищої точності вимірювання, програмним шляхом забезпечивши в самому сенсорному модулі фільтрацію шумів, калібрування, лінеаризацію характеристик

вхід/вихід, компенсацію перехресних зв'язків, гістерезису і дрейфу нуля.

У мехатронних модулях сенсори призначені для збирання даних про фактичний стан елементів рухомої системи (виконавчого приводу, механічного пристрою і робочого органу), обробки в реальному часі і передачі сигналів зворотного зв'язку до пристрою комп'ютерного керування.

До типових вимірюваних величин, інформація про яких використовується при керуванні мехатронними модулями і системами, відносяться:

- переміщення (лінійне або кутове);
- швидкість;-
- прискорення;
- моменти, що розвиваються виконавчими двигунами;
- зовнішні зусилля, що діють на робочий орган (наприклад, на шпindel модуля, див. рис. 7.6);
- положення і орієнтація робочого органу в просторі (наприклад, схвата промислового робота або шупа контрольно-вимірювальної машини).

В цілому проблема проектування і технології виробництва інтелектуальних сенсорів є самостійною науково-технічною областю і виходить за рамки даного кола питань.

Для мехатроніки представляють інтерес способи інтеграції інтелектуальних сенсорів у мехатронні модулі руху і методи мінімізації проміжних перетворень вимірюваної фізичної величини в цифровий код, придатний для введення до пристрою комп'ютерного керування.

З точки зору мінімізації проміжних перетворень одним з найбільш ефективних (і тому дуже широко вживаних у мехатроніці) інтелектуальних датчиків зворотного зв'язку є оптичні інкодері з вбудованими мікропроцесорами.

Серед відмітних переваг сучасних інкодерів слід виділити:

- можливість визначення як переміщення, так і швидкості руху;
- високу точність і низькі шуми при вимірюванні;
- багатооберненість;
- конструктивну компактність;
- можливість вбудовування в МТМ.

Важливо підкреслити, що інкодери видають вихідний сигнал у кодовій формі, що зручно для комп'ютерної обробки в реальному часі.

Розрізняють два основні види інкодерів – абсолютні та інкрементальні.



*Абсолютні інкодери* дають інформацію про величину переміщення (лінійного або кутового) рухомого валу щодо фіксованого нульового положення.

Перевагами абсолютного інкодера є:

- надійність вимірювання (навіть при тимчасовому відключенні живлення інформація датчиком не буде втрачена);
- висока точність при великих швидкостях руху;
- запам'ятовування нульового положення (це важливо при необхідності управління реверсивними і аварійними рухами машин).

*Інкрементальний датчик* дає інформацію про напрям і величину переміщення в прирощеннях щодо початкового положення, що цілком достатньо в багатьох практичних застосуваннях.

Інтелектуалізація інкодерів забезпечується вбудованими мікропроцесорами, які виконують наступні основні *функції*:

- кодування інформації датчика;
- виявлення помилок вимірювання;
- масштабування сигналу;
- передача поточного коду до контролера руху за стандартним протоколом.

Сучасна тенденція в створенні інкодерів полягає в об'єднанні в єдиному сенсорному модулі конструктивних елементів (валів, підшипників), копіювальних дисків, фотоелементів і мікропроцесора.

Прикладом технічного втілення цієї тенденції є обертальний інкодер серії AR (розробка фірми Parker). Нижче наведені його деякі технічні характеристики :

– розрізняльна здатність 1024 позицій/об або 16384 позицій/об (вибирається і масштабується користувачем за допомогою мікропроцесора);

– максимальне число позицій 8 388 608 (досягається застосуванням додаткових дисків і переходом до багатооборотного режиму роботи);

– похибка не більше 5,5 кут. хв.;

– швидкість обертання до 5000 хв<sup>-1</sup>;

– габарити: довжина 87 мм, діаметр 60 мм;

– маса 0,45 кг

Інтеграційна спрямованість МТ стимулює розвиток так званих гібридних технологій для виробництва особливо компактних і мініатюрних модулів. Гібридні технології передбачають використання єдиних матеріалів (в першу чергу напівпровідникових, наприклад, кремнію) як для механічних, так і для мікроелектронних компонентів. Це дозволяє радикально зменшувати розміри модуля без збільшення його вартості, що практично неможливе при традиційних виробничих технологіях.

Фірма Analog Device серійно випускає сенсори для визначення параметрів механічного руху на основі гібридних технологій.

Прикладом є датчик прискорення моделі ADXL05, який може використовуватися як в МТМ, так і в системах вібродіагностики і захисної сигналізації.

Акселерометр є інтегральною мікросхемою (діаметр корпусу 9,4 мм, висота 4,7 мм) у герметичному виконанні, яка має 10 виводів. Інтервал вимірювальних прискорень може бути вибраний користувачем від  $\pm 1g$  до  $\pm 5g$  відповідно з вихідним сигналом від 200mV/g до 1V/g. Вихід акселерометра безпосередньо підключається до АЦП без будь-яких додаткових активних елементів. До складу сенсора входять наступні основні блоки: датчик прискорення (включає загальну вібраційну пластину і 46 додаткових елементів), генератор, демодулятори, джерело живлення, попередній і буферний підсилювачі, а також ряд пасивних елементів (резисторів і конденсаторів) для настроювання.

Дія акселерометра заснована на принципі диференціального ємкісного перетворювача, тобто блоку конденсаторів, електричні параметри якого змінюються під дією вимірювальної дії.

Розглянутий датчик моделі ADXL05 може використовуватися в однокоординатних МТМ, оскільки вимірює тільки одну компоненту вектора прискорення.

Для багатовимірних МТС фірмою розроблені багатокомпонентні сенсори, наприклад, акселерометр моделі АОХ1.202. Цей сенсор застосовується в мобільних роботах фірми "ТАРІС" для визначення кутів крену і диференту при виконанні робіт в похилих підземних трубопроводах.

Функціональна схема цього сенсора наведена на рис. 7.10.

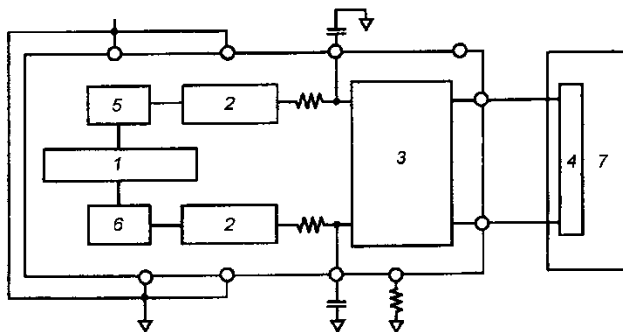


Рис. 7.10. Блок-схема двокомпонентного акселерометра:

1 - генератор коливань; 2 - демодулятори;

3 - широтно-імпульсні модулятори;

4 -

5 - вимірювач прискорення по осі X;

6 - вимірювач прискорення по осі Y; 7 - мікропроцесор

Датчик дає інформацію про значення прискорень під час просторового руху об'єкта керування за двома осями (X та Y) в діапазоні  $\pm 2g$ . Смуга пропускання датчика встановлюється користувачем в інтервалі від 0,01 Гц до 5 КГц залежно від вирішуваного завдання. Похибка вимірювання складає 5 mg для смуги 60 Гц.

Вихідний сигнал формується широтно-імпульсним модулятором, тому його цифровий код визначається мікропроцесорним лічильником без попереднього аналого-цифрового перетворення. Період вихідного сигналу регулюється в інтервалі від 0,5 мс до 10 мс. Гарантується нормальна робота сенсора при температурах від 0°C до +70 °C у звичайному виконанні або від -40°C до +85°C у спеціальному варіанті.

Іншим прикладом реалізації гібридних технологій, що орієнтовані на масового споживача, може служити інтелектуальна авторучка, що дозволяє писати на папері з одночасним введенням тексту до комп'ютера. Для кодування графічної інформації використовуються п'єзоелектричний датчик сили/прискорення і датчик кута нахилу ручки. Розміщення в якості чутливих елементів п'єзодатчика та всіх електронних ланцюгів на одному кремнієвому кристалі дозволить, на думку авторів, добитися бажаних габаритів авторучки (що не перевищують розмірів звичайного маркера) при доступній для споживача ціні.

Цікавим напрямом є застосування в інтелектуальних МТМ непрямих методів вимірювання параметрів механічного руху. В цьому випадку можна взагалі відмовитися від установки типових датчиків (навіть вбудованих), добиваючись мінімальних габаритів і матеріаломісткості модуля. Величини швидкості, положення, діючого моменту розраховуються комп'ютерним блоком за математичними моделями електромеханічних процесів (тому іноді застосовується термін "віртуальні датчики").

Добре відомий спосіб непрямого визначення моменту, що розвивається двигуном постійного струму, за пропорційною величиною струму в якірному ланцюзі, який часто використовується в промислових приводах. Останнім часом розроблений ряд методів і пристроїв непрямого вимірювання швидкості електродвигунів. Так, стабілізувати частоту обертання асинхронного двигуна можна без установки датчика частоти на його валу, підтримуючи в обмотці статора відношення струму до напруги на заданому рівні за допомогою зворотного зв'язку розроблений метод комутації обмоток

за ЕДС обертання, що дозволив усунути традиційні датчики положення ротора з конструкції двигуна.

Всі методи непрямого вимірювання вимагають побудови адекватних математичних моделей та їх ефективної комп'ютерної реалізації в реальному часі, включаючи алгоритми фільтрації перешкод, статистичної обробки вимірювань і цифрового кодування інформації.

Поява на ринку швидкодіючих і недорогих вбудованих мікропроцесорних засобів робить ці методи перспективними для інтелектуальних МТМ – модулів нового покоління.