

## Лекція 5 (4.2)\_РТ та МТ

Тема: **Концепція проектування мехатронних модулів і систем**  
(продовження теми попередньої лекції 4)

### 4.2.1. Викладення змісту процедури (продовження Л4)

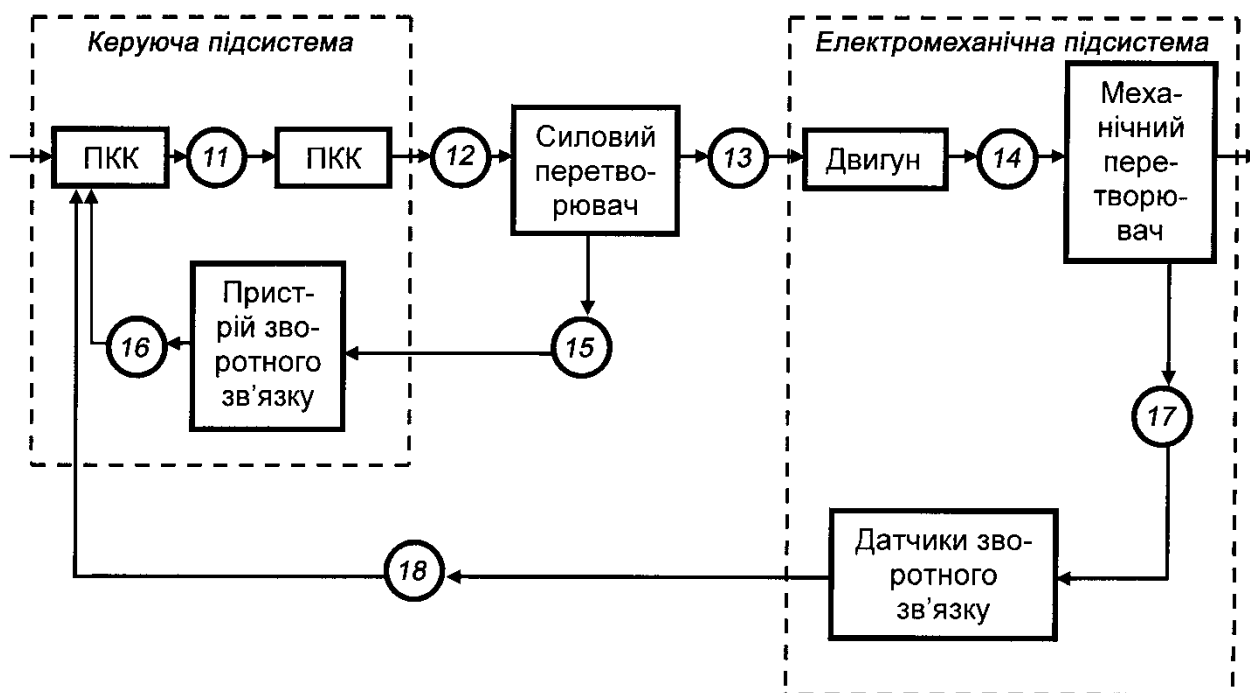


Рис. 4.5. Структурна модель електроприводу з комп'ютерним керуванням:  
ПКК – пристрій комп'ютерного керування;  
11 – 18 – інтерфейсні пристрої

– механічний перетворювач, який реалізує заданий керований рух і взаємодіє із зовнішніми об'єктами; у приводних модулях у якості таких пристроїв застосовують редуктори, варіатори, або безпосередньо використовують робочий орган (наприклад, в мехатронних модулях типу “мотор-шпіндель”);

– пристрій зворотного зв'язку, який використовують для контролю поточної напруги і струмів у силовому перетворювачі, а також керуючих функцій (наприклад, для організації контуру регулювання моменту, що розвивається приводом);

– датчики зворотного зв'язку за положенням і швидкістю рухи вихідної ланки механічного пристрою, що виконують функції механіко-інформаційного перетворення;

– інтерфейсні пристрої, що позначені на блок-схемі рис. 4.5 номерами 11–18.

Залежно від фізичної природи вхідних і вихідних змінних інтерфейсні блоки можуть бути як механічними перетворювачами руху, так і містити електронні апаратно-програмні компоненти. Прикладами механічних інтерфейсів є передачі і трансмісії, що пов'язують вихідний механічний пристрій з двигуном (інтерфейс 14) і датчиками зворотного зв'язку (інтерфейси 17, 18).

Інтерфейсні електронні пристрої розташовані на входах і виходах пристрою комп'ютерного керування (ПКК) і призначені для його спряження з наступними структурними елементами:

- з цифро-аналоговим перетворювачем (вбудований інтерфейс 11) і далі з силовим перетворювачем модуля (інтерфейс 12);

- з датчиками зворотного зв'язку (інтерфейс 17), який у разі застосування сенсорів з аналоговим вихідним сигналом будується на основі аналого-цифрового перетворювача (АЦП);

- з пристроями зворотного зв'язку для контролю рівня електричних струмів і напруги в силовому перетворювачі (для традиційного приводу інтерфейс 16 також використовує стандартний АЦП).

У традиційній приводній техніці інтерфейси є сепаратними пристроями. Тому їх проектування, виготовлення і наладка стають серйозною проблемою для розробника приводу, особливо коли потрібно надійно сполучати нестандартні і спеціалізовані елементи різних виробників.

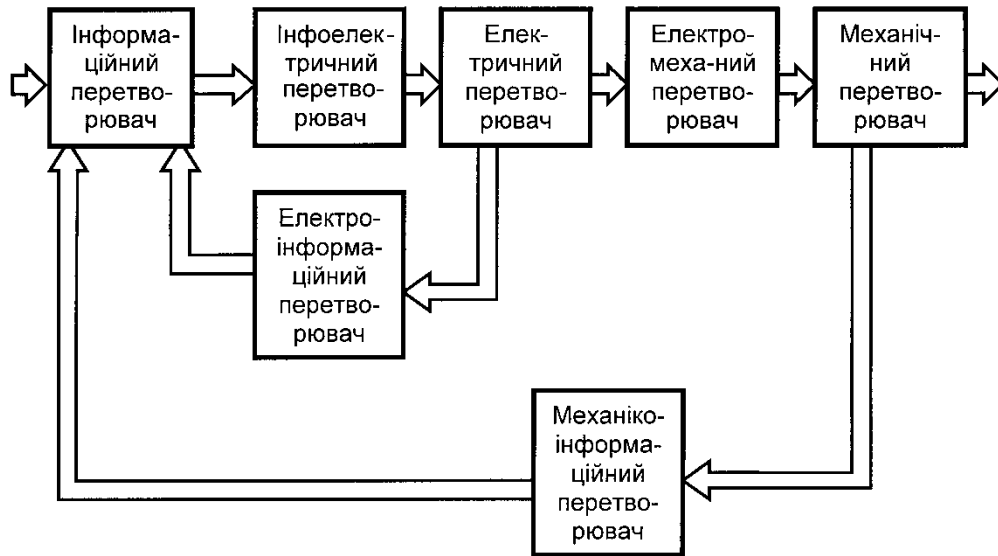
Мехатронні структури відрізняються високим ступенем інтегрованості елементів, причому ці рішення закладаються вже на стадії проектування модулів і машин.

## **4.2.2. Синергетична інтеграція в мехатронних модулях**

### **4.2.2.1. Стисла сутність проблеми**

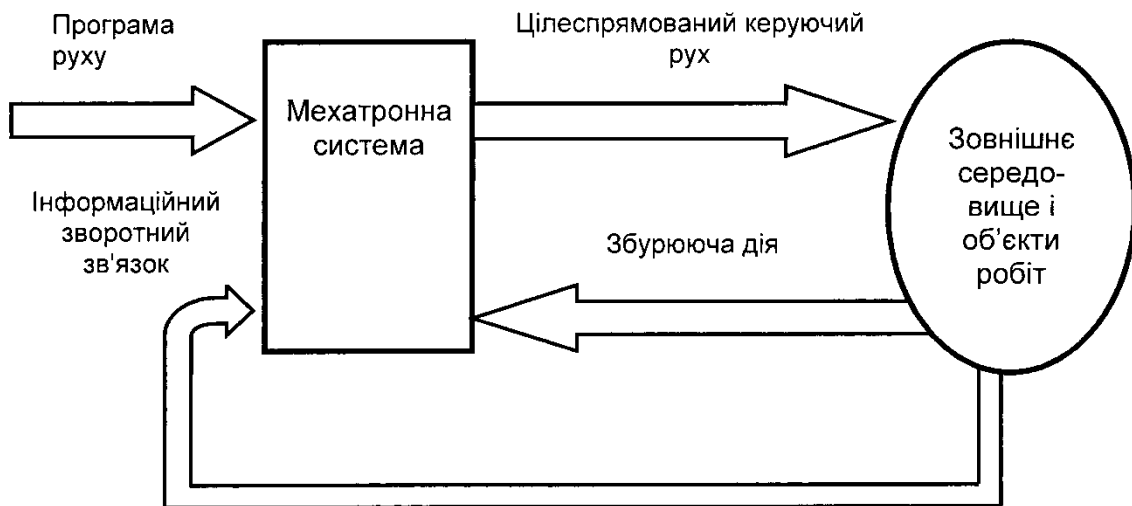
Порівнюючи функціональну модель мехатронного модуля (див. рис. 4.4) і структурну модель традиційного електроприводу (див. рис. 4.5), можна зробити висновок про те, що сумарна кількість основних та інтерфейсних блоків у структурі електроприводу значно перевищує число необхідних функціональних перетворювачів.

Іншими словами, можна говорити про структурну надмірність традиційного електроприводу. Наявність надмірних блоків призводить до зниження надійності і точності технічної системи, погіршенню її масогабаритних і вартісних показників. Тому доцільно прагнути до скорочення кількості сепаратних структурних елементів (як основних, так і інтерфейсних блоків) у системі.



*Для довідок! Рис. 4.4. Функціональна модель (F-модель) МТМ*

В ідеальному для користувача варіанті мехатронний модуль як чорний ящик (див. рис. 4.3 передньої лекції), прийнявши на інформаційний вхід програму руху, повинен виконати цілеспрямований керований рух із заданими показниками якості. При цьому всі проблеми інтеграції в модулі механічних, електронних і керуючих пристроїв повинні бути вирішені розробником для кожної стадії життєвого циклу – від проектування системи до її експлуатації у кінцевого споживача.



*Для довідок! Рис. 4.3. МТМ у вигляді "чорного ящика"*

Сутність синергетичної інтеграції полягає в об'єднанні в єдиний модуль елементів різної фізичної природи при збереженні функціонального перетворення, що виконується даним модулем.

Синергетична інтеграція елементів при проектуванні мехатронних модулів заснована на *трьох базових принципах*:

- реалізація заданих функціональних перетворень мінімально можливим числом структурних і конструктивних блоків шляхом об'єднання двох і більше елементів у єдині багатофункціональні модулі;

- вибір інтерфейсів у якості локальних точок інтеграції і виключення надмірних структурних блоків і інтерфейсів як сепаратних елементів;

- перерозподіл функціонального навантаження в мехатронній системі від апаратних блоків до інтелектуальних (електронним і комп'ютерним) компонентів.

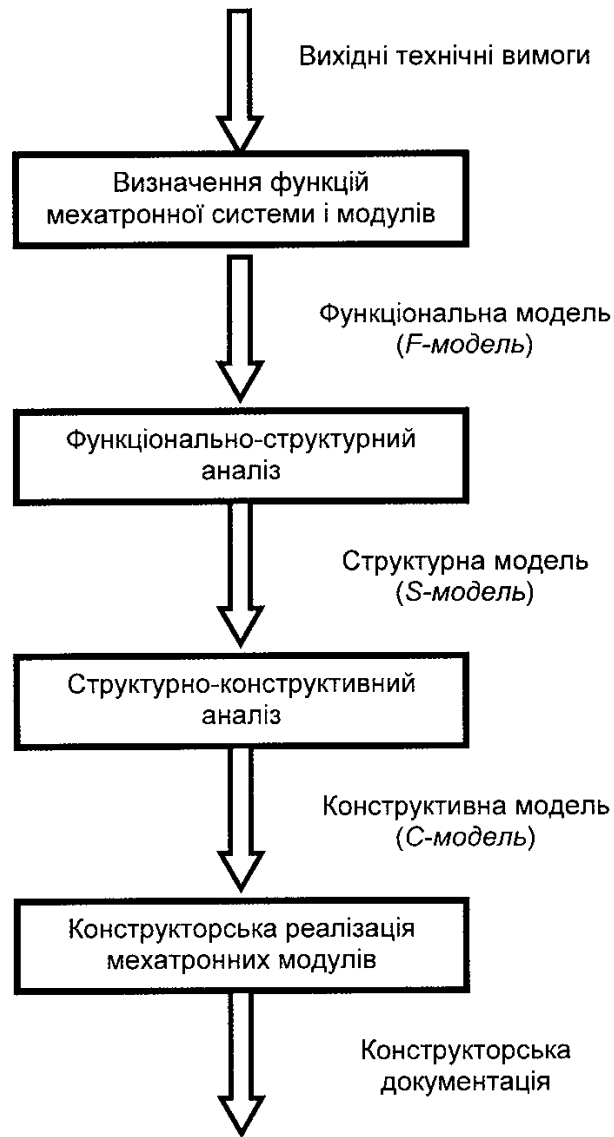
Практична реалізація принципів синергетичної інтеграції при проектуванні дозволяє забезпечити основні переваги мехатронних систем у порівнянні з традиційними машинами і добитися якісно нових показників, в першу чергу за компактністю конструкції, швидкістю і точністю рухів. Зняття з апаратної (“залізної”) частини системи функціонального навантаження (перш за все, через спрощення механічного вузла) і її перенесення на керуючу й електронну підсистему додає системі гнучкість, робить її здібною до легкої реконфігурації під нові технологічні завдання. Слід відмітити, що інтеграція припускає не тільки апаратне об'єднання елементів, але й організацію інтегрованих інформаційних процесів у інтелектуальних модулях.

Синергетичну інтеграцію в мехатроніці здійснюють при проектуванні двома основними способами:

- функціонально-структурною інтеграцією (ФС-інтеграція);

- структурно-конструктивною інтеграцією (СК-інтеграція).

Вказане є основними компонентами загальної процедури проектування мехатронних систем (див. рис. 4.2 попередньої лекції).



*Для довідок! Рис. 4.2. Загальна процедура проектування МТМ*

#### **4.2.2.2. Функціонально-структурна інтеграція (ФС-інтеграція)**

*Завданням етапу функціонально-структурної інтеграції (ФС-інтеграції) є пошук мехатронних структур, що реалізують задані функціональні перетворення за допомогою мінімальної кількості структурних блоків. ФС-інтеграція направлена на вибір проектних рішень, які забезпечують виключення деяких основних блоків, а значить, і суміжних з ними інтерфейсів із структури системи.*

Приклади мехатронних проектних рішень, що засновані на способі ФС-інтеграції елементів, наведені в табл. 4.1. Представлені рішення засновані на сумісному аналізі функціональної моделі мехатронного модуля (див. рис. 4.4) і структури традиційного електроприводу (див. рис. 4.5).

## Функціонально-структурна (ФС) інтеграція елементів у МТМ

Мехатронне рішення	Функціональне перетворення	Сепаратні елементи, що виключаються	
		Основні блоки	Інтерфейси
1. Фотоімпульсний датчик зворотного зв'язку	Механіко-інформаційне	Один датчик зворотного зв'язку	17, 18
2. Вентильний високомоментний двигун	Електромеханічне і механіко-інформаційне	Механічний пристрій, сепаратні датчики зворотного зв'язку	14, 17, 18
3. Інтелектуальний силовий перетворювач	Інформаційно-електричне	Надмірний пристрій зворотного зв'язку	15, 16
4. Керуючі контролери	Електро-інформаційне	Цифро-аналоговий перетворювач	11, 12

Перші два мехатронних рішення відносяться до електромеханічної підсистеми модуля, наступні варіанти інтеграції можна реалізувати в його керуючій підсистемі (див. рис. 4.5).

При конструюванні мехатронних модулів найбільшу увагу приділяють рішенням, що направлені на спрощення механічної частини модулів і пов'язаних з нею блоків та інтерфейсів, які реалізують електромеханічне і механіко-інформаційне функціональні перетворення.

Нижче докладніше проаналізовано мехатронні рішення за функціонально-структурною інтеграцією елементів з табл. 4.1.

Перший варіант передбачає використання в зворотному зв'язку замість двох окремих датчиків положення і швидкості тільки одного елементу – фотоімпульсного датчика (ФІД), який дозволяє отримувати інформацію і про кут повороту валу, і про швидкість його обертання. При цьому також важливо, що ФІД видає вихідний сигнал в кодовій формі, що дає можливість вводити інформацію до пристрою комп'ютерного керування (ПКК) без додаткового аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що було необхідне для традиційних датчиків з аналоговим вихідним сигналом (тахогенераторів, потенціометрів тощо).

Розрізняють два основні види фотоімпульсних датчиків - *абсолютні* та *інкрементальні*.

*Абсолютні ФІД (encoder)* дають інформацію про величину переміщення (лінійного або кутового) рухомого елемента щодо фіксованого нульового положення.

Перевагами абсолютного ФІД 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 керування реверсивними і аварійними рухами машин).

*Інкрементальні датчики* дають інформацію про напрям і величину переміщення в приростах щодо початкового положення, яке вони займали до початку руху.

*Інтелектуалізацію ФІД* забезпечують вбудованими мікропроцесорами, які виконують наступні основні *функції*:

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

Сучасна тенденція щодо створення ФІД полягає в об'єднанні в одному сенсорному модулі конструктивних елементів (валів, підшипників), кодувальних дисків, фотоелементів і мікропроцесора.

Таким чином, використання ФІД дозволяє виключити із структури традиційного приводу один датчик зворотного зв'язку з його інтерфейсом (17), а також аналого-цифровий перетворювач (АЦП) на вході до пристрою комп'ютерного керування (ПКК, інтерфейс 18).

Застосування *високомоментного двигуна (ВМД)* дозволяє (друге рішення в табл. 4.1) замінити виконавчу пару "двигун + перетворювач руху" на один приводний елемент "двигун". Цей спосіб ФС-інтеграції означає виключення механічного пристрою і надмірного інтерфейсу 14 із структури приводу.

Нижче перераховані основні *переваги мехатронних модулів з високомоментним двигуном (ВМД)*:

- зниження матеріаломісткості;
- компактність;
- модульність конструкції;
- підвищення точнісних характеристик приводу завдяки відсутності зазорів, кінематичних похибок, пружних деформацій ланок тощо;

– виключення тертя в механічній трансмісії, що дозволяє уникнути нелінійних динамічних ефектів, особливо на повзучих швидкостях.

Для визначення положення полюсів на роторі двигуна в конструкцію вентильного ВМД вбудовують датчик положення. У виконавчих приводах інформацію з цього датчика можуть використовувати і як сигнал зворотного зв'язку. Отже, застосування вентильних ВМД з вбудованими ФІД дозволяє спростити не тільки механічну частину модуля, але і ланцюг зворотного зв'язку, оскільки розробникові не потрібно вводити до конструкції модуля сепаратні датчики положення і швидкості.

ВМД можуть бути як кутового, так і лінійного типу.

До появи *лінійних двигунів* традиційні електроприводи лінійних переміщень включали двигун кутового руху і механічну передачу для перетворення обертального руху в поступальне (шарико-гвинтову передачу, зубчасту рейку, стрічкову передачу і т. п.).

Основні *переваги мехатронних модулів на базі лінійних двигунів* у порівнянні з традиційними приводами обумовлені:

- виключенням багатоступінчастого перетворення руху,
- відсутністю характерних недоліків механічних перетворювачів (люфт, пружність, сили тертя, висока інерція).

Це дозволяє добитися:

- підвищення у декілька разів лінійної швидкості і прискорення;
- високої точності реалізації руху;
- підвищеної статичної і динамічної жорсткості приводу.

У табл. 4.1 наведено також два приклади застосування способу ФС-інтеграції до елементів керуючої підсистеми МТМ.

До складу мехатронних модулів можуть входити *інтелектуальні силові перетворювачі (ІСП)*. Їх будують на базі напівпровідникових приладів нового покоління.

Типовими представниками цих приладів є:

- силові польові транзистори (*MOSFET*);
- біполярні транзистори з ізольованим затвором (*IGBT*);
- замикаючі тиристори з польовим управлінням (*MCT*).

Нове покоління приладів відрізняється високою швидкодією (наприклад, для транзисторів *MOSFET* – 100 000 Гц), високими значеннями комутованих струмів і напруги (для *IGBT* гранична сила комутованого струму – до 1200 А, гранична комутована напруга – до 3 500 В).

Особливість інтелектуальних силових перетворювачів (ІСП) полягає в тому, що вони містять вбудовані блоки мікроелектроніки, що призначені для виконання інтелектуальних функцій, – керування рухом, захист в аварійних режимах і діагностика несправностей.



Використання ІСП у складі мехатронних модулів дозволяє:

- істотно понизити масогабаритні показники силових перетворювачів;
- підвищити їх надійність при експлуатації;
- поліпшити техніко-економічні показники.

Використання контролерів руху з блоками FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) дозволяє виключити цифро-аналогове перетворення сигналів при комп'ютерному керуванні двигуном. На виході блоків FPGA відразу формується широтно-модульований сигнал, який має цифрове зображення. При цьому вони володіють унікальним поєднанням дуже високої продуктивності (швидкість обчислень порівнянну з апаратними компонентами) з можливістю програмування як звичайні мікропроцесорні пристрої.

Узагальнюючи розглянуті приклади, слід звернути увагу на те, що точками для *ФС-інтеграції* є структурні блоки, що реалізують функціональні перетворення тільки дуального типу (див. третій стовпець табл. 4.1). До цієї групи відносять інформаційно-електричний і електромеханічний перетворювачі, що розташовані в прямому ланцюзі функціональної моделі мехатронного модуля (див. рис. 4.4) і електро-інформаційний і механіко-інформаційний перетворювачі в ланцюзі зворотного зв'язку.

#### **4.2.2.3. Структурно-конструктивна інтеграція (СК-інтеграція)**

Вона заснована на аналізі структурної моделі мехатронного модуля, яка сформована на етапі *ФС-інтеграції*. Задана структура модуля може бути реалізована різними конструктивними рішеннями. СК-інтеграція націлює розробника мехатронних модулів на вибір проектних рішень, які забезпечують виключення інтерфейсів як сепаратних блоків шляхом вбудовування їх в окремий корпус. При автоматизованому проектуванні ухвалені рішення представляють у вигляді конструктивної моделі (див. рис. 4.2).

Методичним ключем при пошуку варіантів СК-інтеграції є розгляд інтерфейсних блоків 11-18 у якості локальних точок, де потенційно можлива СК-інтеграція. Можна рекомендувати при проектуванні спиратися відразу на декілька точок інтеграції.

Приклади мехатронних модулів, що засновані на способі СК-інтеграції елементів, наведені в табл. 4.2. Представлені рішення базуються на аналізі структурних моделей мехатронних модулів, що розроблені на етапі функціонально-структурної інтеграції (див. рис. 4.5).

Інтеграція елементів у МТМ є провідною тенденцією при створенні сучасних машин і систем, оскільки дозволяє добитися якісно нового рівня за основними технічними показниками – швидкості і точності руху, компактністю конструкції і здатністю машини до швидкої реконфігурації. Практичне втілення

цієї тенденції у машинах сьогодення залежить від ефективності взаємодії конструктора, який висуває нові інтеграційні ідеї, і технолога, що реалізовує запропоновані проектні рішення в автоматизованих технологічних процесах.

Таблиця 4.2

*СК-інтеграція елементів у МТМ*

Мехатронні модулі	Функціональні перетворення	Вбудовані елементи	
		Основні блоки	Інтерфейси
1 Модуль руху	Електромеханічне та механічне	Двигун, механічний пристрій	14
2 Мехатронний модуль руху	Електромеханічне, механічне і механіко-інформаційне	Двигуни, механічний пристрій, датчик зворотного зв'язку	14, 17, 18
3 Інтелектуальний мехатронний модуль	Інформаційне, інформаційно-електричне, електричне, електромеханічне	Керуючий контролер, силовий перетворювач, двигун	11, 12, 13, 15, 16

Специфіка і складність мехатронних модулів і систем полягає ще і в тому, що їх складники (механічна, електронна і комп'ютерна) мають різну фізичну природу, а основні структурні елементи випускаються часто підприємствами різних галузей промисловості.

Розглянемо стисло принципи проектування інтелектуальних систем управління.

Фундаментальну *основу концепції побудови інтелектуальних систем управління* складними динамічними об'єктами складають *чотири* ключові положення (принципи), які детальніше будуть розглянуті на одній із наступних лекцій:

1 – принцип ситуаційного керування, коли кожному класу можливих станів ставиться у відповідність певний клас допустимих рішень;

2 – принцип ієрархічної організації інтелектуальної системи керування, що включає до свого складу стратегічний рівень планування поведінки, тактичний рівень планування дій, виконавчий (приводний) рівень і комплекс інформаційно-вимірювальних засобів;

3 – принцип обґрунтованого вибору інтелектуальних технологій, що використовуються для вирішення завдань окремих рівнів ієрархії керування;

4 – застосування концепції модульного конструювання систем керування.