

Управление промышленными мехатронными системами

Объем занятий:

18 часов лекций,
54 часов практических занятия,
экзамен.

Храмшин Вадим Рифхатович

**4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ
МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ**

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Постановку проблемы будем рассматривать применительно к мехатронным системам, которые используются в производственных машинах и комплексах автоматизированного машиностроения как основное технологическое оборудование.

К таким системам управления предъявляются, как правило, весьма жесткие требования, так как режимы управления определяют ход технологического процесса и, следовательно, качество получаемого изделия. Именно задачи компьютерного управления технологическими машинами, которые не могли быть решены на базе традиционных подходов, стимулировали разработку и внедрение в практику принципиально новых методов управления.

В общем случае объектом управления в мехатронике является сложная многосвязная система, в состав которой входят:

- комплекс исполнительных приводов;
- механическое устройство с рабочим органом;
- блок сенсоров;
- объект работ, с которым взаимодействует рабочий орган.

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Дополнительно необходимо учитывать специфические особенности мехатронных систем:

1. Движение рабочего органа как конечного управляемого звена обеспечивается взаимосвязанными (кинематически и динамически) перемещениями нескольких исполнительных приводов и звеньев механического устройства.

2. Задача управления мехатронной системой должна быть решена в пространстве (т. е. найдены оптимизированные траектории движения всех звеньев, включая рабочий орган) и во времени (т. е. определены и реализованы желаемые скорости, ускорения и развиваемые усилия для всех приводов системы).

3. Для многих технологических задач параметры внешних и возмущающих воздействий, приложенных к рабочему органу и отдельным мехатронным модулям, заранее не определены.

4. Сложность построения адекватных математических моделей мехатронных систем традиционными аналитическими методами (особенно прецизионных многосвязных систем, включающих динамическую модель технологического процесса).

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Компьютерный расчет требует построения адекватной динамической модели системы с учетом весьма сложных для аналитической оценки факторов:

- всех действующих сил (управляющих моментов приводов, сил трения, внешних сил и моментов, центробежных сил);
- первичных погрешностей системы (упругих деформаций звеньев, люфтов в механических передачах, погрешностей изготовления и сборки, узлов), которые определяют ее интегральные точностные характеристики в текущей конфигурации;
- переменных параметров объекта управления (приведенных моментов инерции и масс механизма и нагрузки).

Наилучшим вариантом с точки зрения достоверности получаемой информации о фактическом движении является установка датчиков непосредственно на рабочий орган.

Примерами такого подхода могут служить:

- применение систем технического зрения для определения положения рабочего органа и объектов в рабочей зоне (например, на сборочных операциях);
- установка силомоментных датчиков в запястье манипулятора для измерения действующих сил на операциях механообработки;
- использование блоков акселерометров для определения линейных ускорений непосредственно рабочего органа при быстрых транспортных перемещениях.

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Принципы построения систем интеллектуального управления в мехатронике

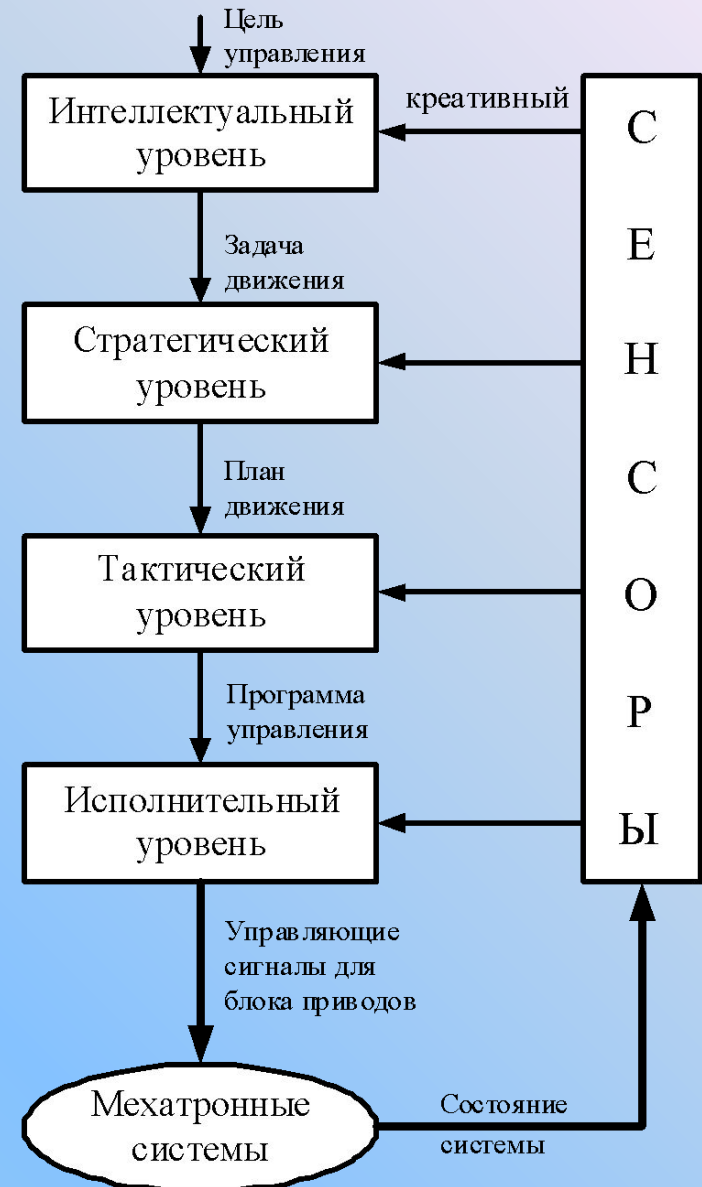
К **основным признакам** систем интеллектуального управления рассматриваемого класса применительно к задачам мехатроники следует отнести:

- способность автономно (без участия человека-оператора) принимать решения о поведении системы в некоторых заранее не определенных ситуациях;
- возможность адаптировать структуру и законы движения мехатронной системы к изменяющимся условиям внешней среды и возмущающим воздействиям;
- способность системы управления к самообучению и накоплению знаний в процессе действий управляемой машины и их использование в последующих задачах управления;
- применение процедур оптимизации на этапах планирования, программирования и исполнения всех функциональных движений машины;
- оценка качества выполняемых движений и диагностика фактического состояния управляемой машины и протекающих процессов в реальном времени;
- эффективное взаимодействие с человеком-оператором, использование его интеллекта как эксперта и навыков при планировании действий машины;
- иерархичность структуры системы с четким выделением функций, информационного обеспечения и обратных связей для каждого уровня управления;
- гибкое взаимодействие распределенных подсистем через компьютерные сети для достижения общих для всей системы целей управления;
- повышенные показатели гибкости, робастности и точности управления.

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Иерархия управления в мехатронных системах

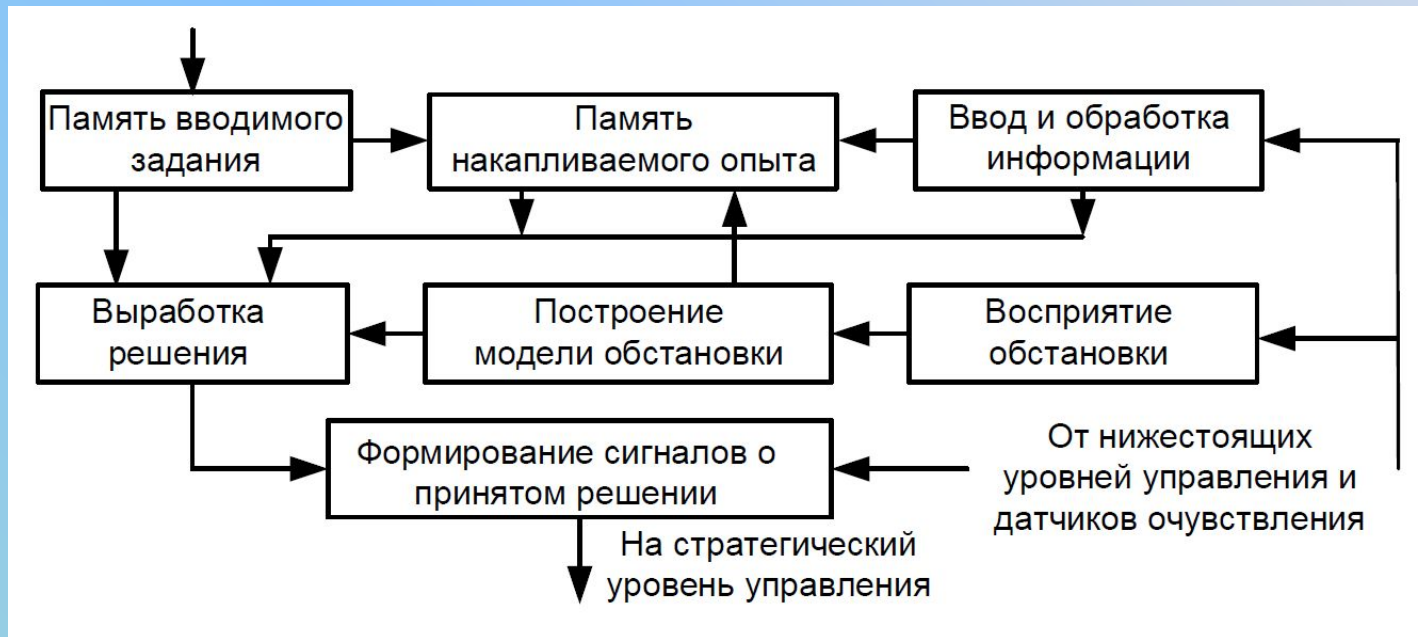
Иерархическая структура – это многоуровневый набор взаимодействующих подсистем, каждая из которых ответственна за решение определенной задачи и имеет доступ к сенсорной информации, необходимой для решения задач управления данного уровня.



4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Интеллектуальный уровень – высший уровень управления в системе.

Под интеллектуальными понимают методы, основанные на использовании аналогии с функционированием человеческого мозга. К ним относятся метод нечеткой логики и метод нейронных сетей. Эти методы реализуются компьютерными устройствами – контроллерами и достаточно хорошо программно обеспечены, например, известными пакетами Fuzzy Logic Toolbox, Neural Network Toolbox из программного пакета MATLAB.



Структура системы управления интеллектуального уровня

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Стратегический уровень управления предназначен для планирования движений мехатронной системы. Планирование движений предполагает разбиение задачи движения, поставленной интеллектуальным уровнем, на последовательность согласованных во времени элементарных действий и формализацию целей управления для каждого из этих действий.

Примерами элементарных действий мобильного робота может служить:

- вывод рабочего органа в заданную позицию;
- захват предмета;
- тестовое движение для определения сил реакции со стороны объекта;
- транспортировка объекта и возвращение робота в исходную позицию.
- Формализация целей управления означает, что для каждого из элементарных действий должны быть записаны математические соотношения, выполнение которых обеспечивает успешное выполнение действия. Для технологических роботов на стратегическом уровне решается задача геометрического планирования движения рабочего органа.

Стратегический уровень выдает информацию о плане движения и целях управления в форме команд управления движением, которые поступают на тактический и (или) исполнительный уровни.

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

На тактическом уровне необходимо определить обобщенные координаты манипулятора, которые соответствуют желаемым декартовым координатам характеристической точки схвата. Для этого должна быть решена обратная задача о положении манипулятора.

Для управления скоростью движения программа управления строится как результат решения обратной задачи о скорости рабочего органа. Для реализации данных алгоритмов устройство компьютерного управления должно выполнять в реальном времени следующие основные функции:

- прием информации от стратегического уровня в форме команд управления движением;
- прием и обработку информации от датчиков положения манипулятора о текущей конфигурации для расчета элементов матрицы Якоби;
- обращение матрицы Якоби;
- умножение обратной матрицы Якоби на вектор-столбец программной скорости рабочего органа;
- выдачу программы управления на исполнительный уровень.

Тактический уровень выполняет преобразование команд управления движением, поступающих со стратегического уровня, в программу управления, которая определяет законы согласованного движения во времени всех звеньев механического устройства с учетом технических характеристик блока приводов (в первую очередь ограничений на обобщенные скорости, ускорения и силы).

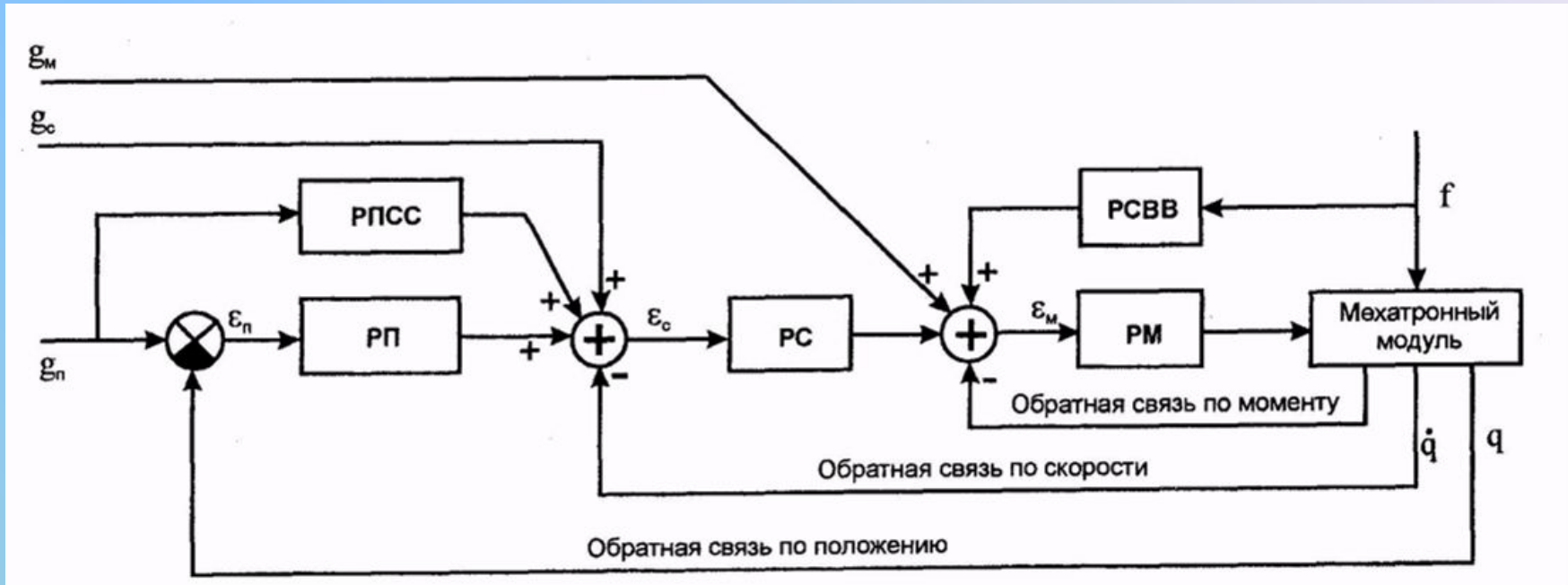
4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Исполнительный уровень управления предназначен для расчета и выдачи управляющих сигналов на блок приводов мехатронной системы в соответствии с программой управления с учетом технических характеристик силовых преобразователей.

Для иерархических систем управления в мехатронике действует принцип, согласно которому по мере продвижения от высших к низшим уровням управления понижается интеллектуальность системы, но повышается ее точность. При этом под «интеллектуальностью» понимается способность системы приобретать специальные знания, позволяющие уточнить поставленную задачу и определить пути ее решения, а под «неточностью» – неопределенность в операциях по решению данной задачи.

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Системы управления исполнительного уровня



Структурная схема системы управления движением на исполнительном уровне

Регулятор положения (РП), регулятор скорости (РС), регулятор момента сил или силы (РМ), регулятор прямой связи по скорости изменения управляющего воздействия (РПСС) и регулятор корректирующей связи по возмущающему воздействию (РСВВ)

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Наиболее общим является алгоритм ПИД-регулирования, когда выходной сигнал описывается выражением:

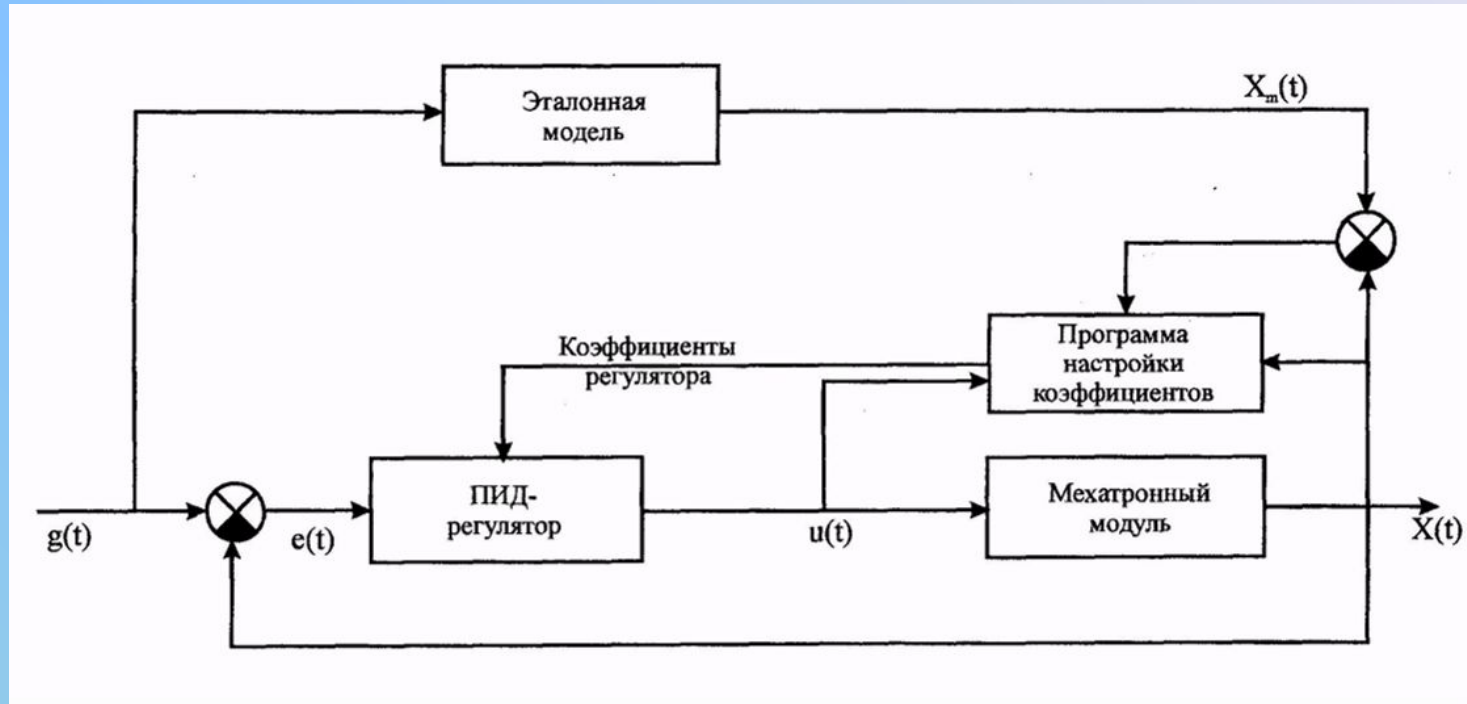
$$u(t) = K_{\text{П}} \cdot e(t) + K_{\text{Д}} \cdot \frac{de}{dt} + K_{\text{И}} \int_0^t e(t) \cdot dt$$

где $K_{\text{П}}$, $K_{\text{Д}}$, $K_{\text{И}}$ – коэффициенты, соответственно, пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих сигнала; $e(t)$ – сигнал ошибки в данном контуре управления (положения, скорости или момента). В конкретных случаях некоторые из этих коэффициентов можно положить равными нулю, фактически применяя упрощенные алгоритмы управления (П-алгоритм, ПИ-алгоритм и т. д.).

Решение о применении **адаптивного регулятора** в мехатронных системах автоматизированного машиностроения должно быть обязательно технологически и технически обосновано.

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Адаптивное регулирование по эталонной модели



Блок-схема адаптивной системы с эталонной моделью

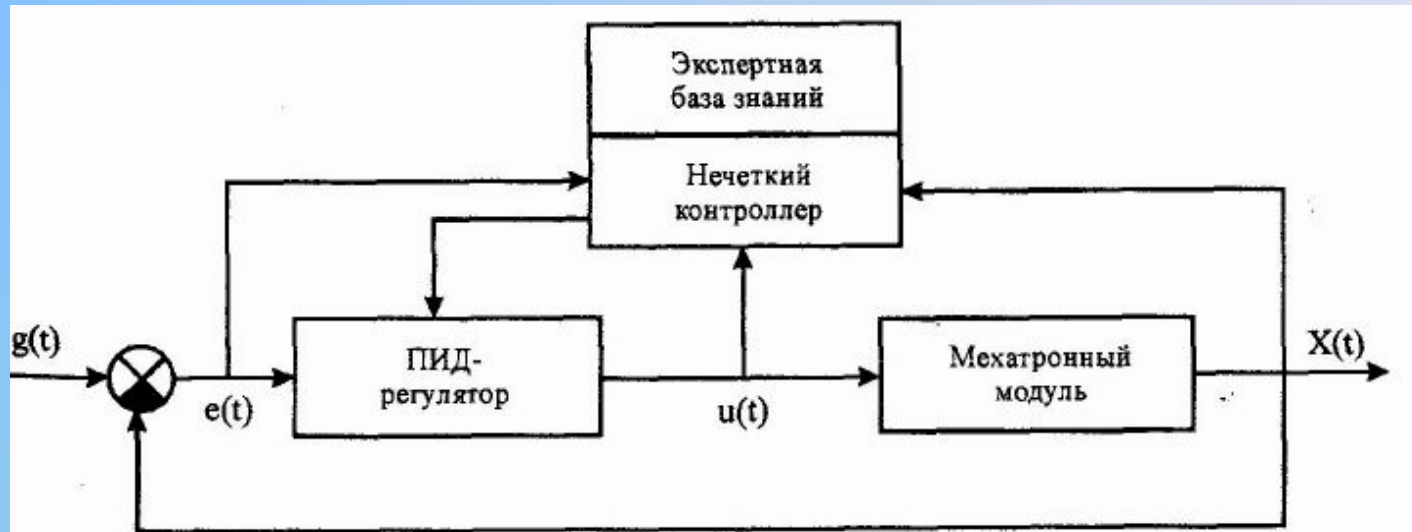
Алгоритм настройки параметров

$$\frac{dk}{dt} = -A \cdot c \cdot \text{grad}_k c$$

где k – настраиваемые коэффициенты ПИД-регулятора; A – постоянный коэффициент, задающий скорость адаптации.

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Нечеткие регуляторы исполнительного уровня

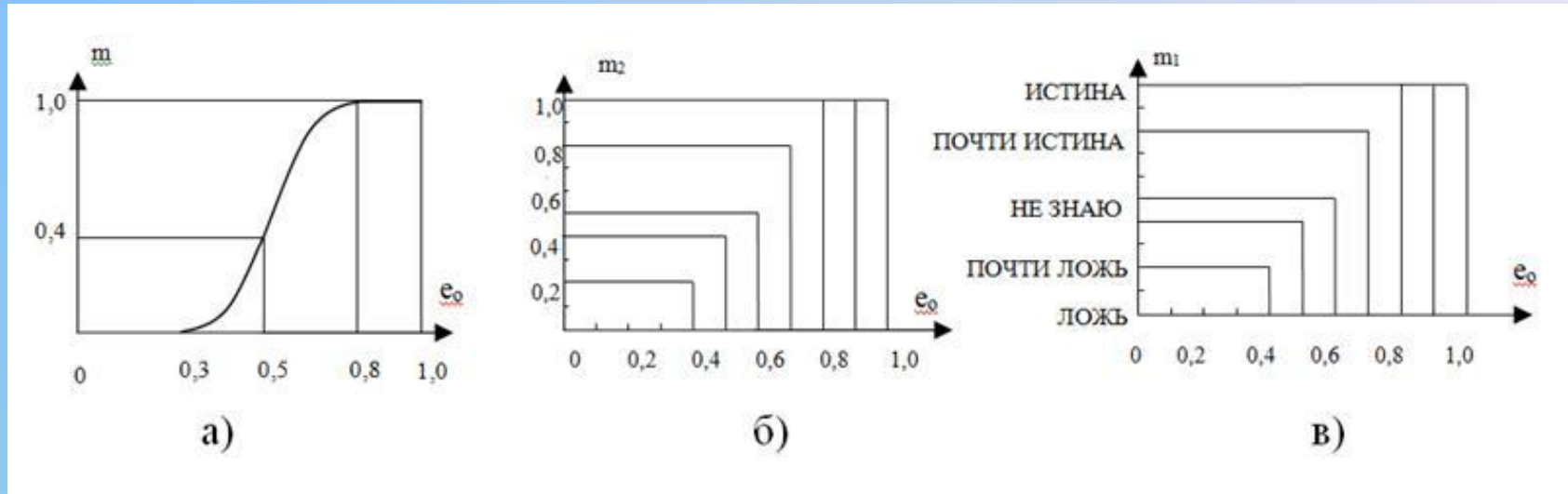


Блок-схема системы с нечетким регулированием

Нечеткий контроллер функционирует на основе экспертной базы знаний и выполняет следующие основные операции:

- преобразование данных о переменных состояния системы в нечеткую форму (операция фазификации), хранение и обработка нечеткой информации;
- выполнение нечетких выводов по лингвистическим правилам управления, заложенным в базу знаний;
- перевод нечетких переменных в четкое представление для управления системой (операция дефазификации).

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ



а) – непрерывная числовая функция принадлежности; б) – дискретная числовая функция принадлежности; в) – дискретная лингвистическая функция принадлежности

Графическое представление функций принадлежности, описывающие для сигнала рассогласования $e(t)$ в замкнутой системе (слайд 13) нечеткое множество $X = \text{«Большая ошибка»}$

По оси абсцисс отложена безразмерная величина относительной ошибки

$$e_0 = |e| / a$$

где $|e|$ – модуль сигнала рассогласования; a – максимальная величина ошибки.

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Для малых периодов квантования T уравнение ПИД-регулятора можно преобразовать в разностное, если заменить производную разностью первого порядка, а интеграл – суммой. При использовании численного интегрирования по методу прямоугольников получаем для k -го шага управления:

$$u(k) = K_{\Pi} \cdot e(k) + K_{И} \cdot T \cdot \sum_{i=0}^k e(k-i) + K_{Д} \cdot T^{-1} [e(k) - e(k-1)].$$

Для вычисления суммы на текущем i -м шаге, входящей в данное уравнение, необходимо помнить все предыдущие значения сигнала ошибки $e(k)$, $k=0, \dots, i$. Для получения общего алгоритма достаточно вычесть из вышеуказанного уравнения следующее уравнение:

$$u(k-1) = K_{\Pi} \cdot e(k-1) + K_{И} \cdot T \cdot \sum_{i=0}^{k-1} e(i-1) + K_{Д} \cdot T^{-1} [e(k-1) - e(k-2)].$$

В результате получим формулу для определения приращения управляющего сигнала:

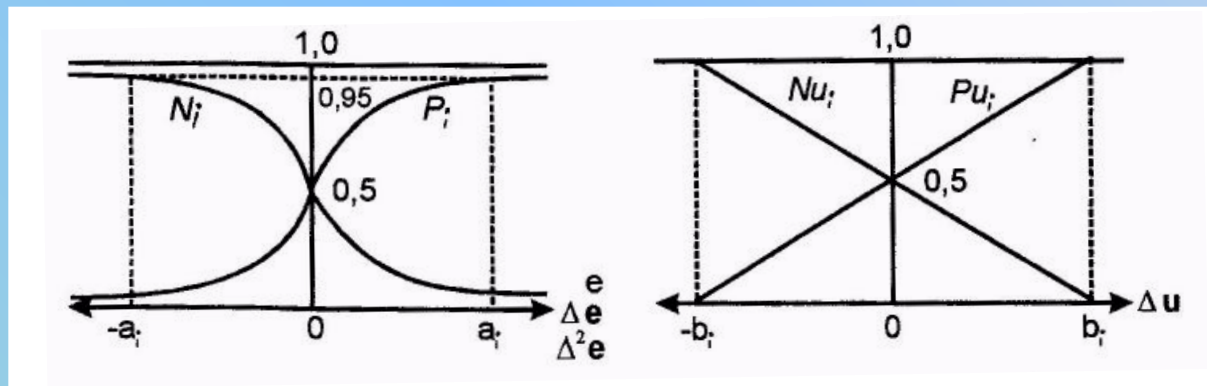
$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) = K_{\Pi} [e(k) - e(k-1)] + K_{И} \cdot T \cdot e(k) + \\ &+ K_{Д} \cdot T^{-1} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] = K_{\Pi} \cdot \Delta e(k) + K_{И} \cdot T \cdot e(k) + K_{Д} \cdot T^{-1} \cdot \Delta^2 e(k), \end{aligned}$$

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Лингвистические правила управления (ЛПУ) для нечеткого контроллера:

- ЛПУ1: ЕСЛИ e_k ЕСТЬ P_1 , ТО ΔU_k ЕСТЬ P_{U1} ;
- ЛПУ2: ЕСЛИ e_k ЕСТЬ N_1 , ТО ΔU_k ЕСТЬ N_{U1} ;
- ЛПУ3: ЕСЛИ Δe_k ЕСТЬ P_2 , ТО ΔU_k ЕСТЬ P_{U2} ;
- ЛПУ4: ЕСЛИ Δe_k ЕСТЬ N_2 , ТО ΔU_k ЕСТЬ N_{U2} ;
- ЛПУ5: ЕСЛИ $\Delta^2 e_k$ ЕСТЬ P_3 , ТО ΔU_k ЕСТЬ P_{U3} ;
- ЛПУ6: ЕСЛИ $\Delta^2 e_k$ ЕСТЬ N_3 , ТО ΔU_k ЕСТЬ N_{U3} .

P_i , P_{U_i} и N_i , N_{U_i} ($i = 1, 2, 3$) – соответственно положительные и отрицательные переменные для сигналов рассогласования и управления, функции принадлежности которых представлены на рисунке

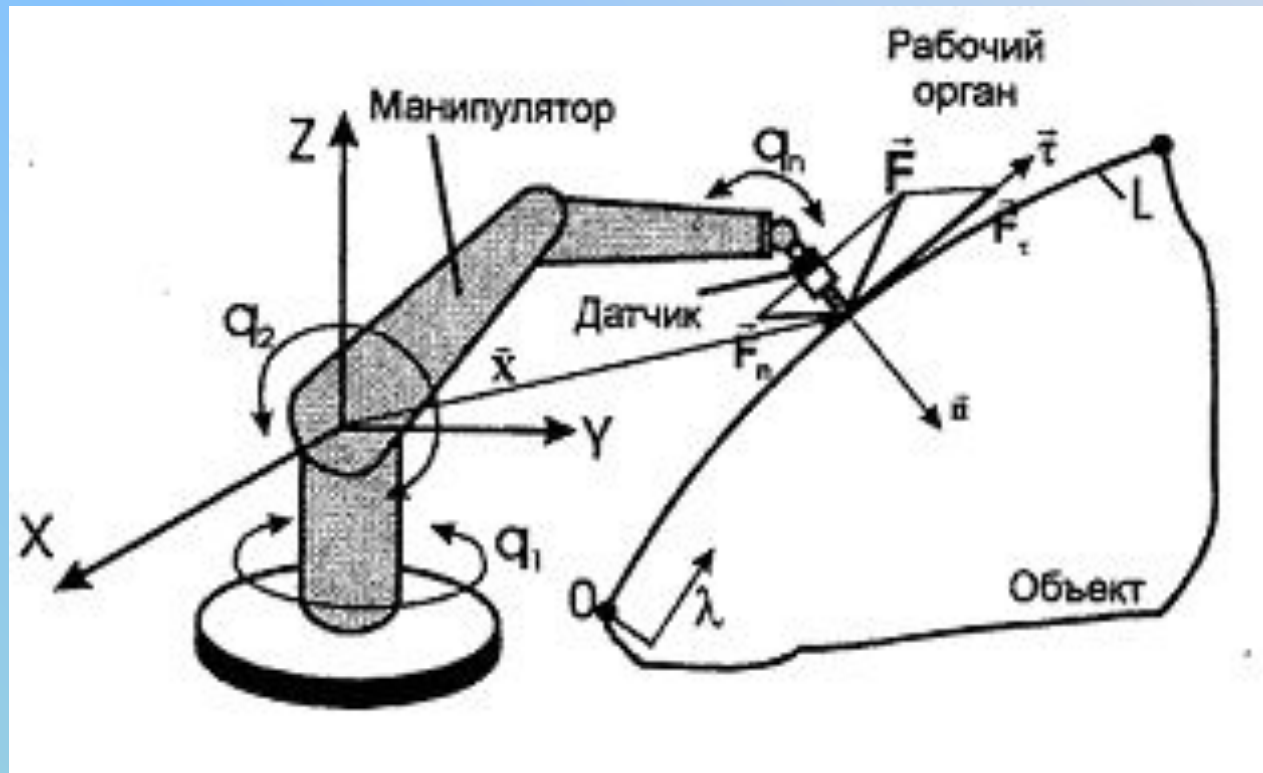


Функция принадлежности сигналов системы

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

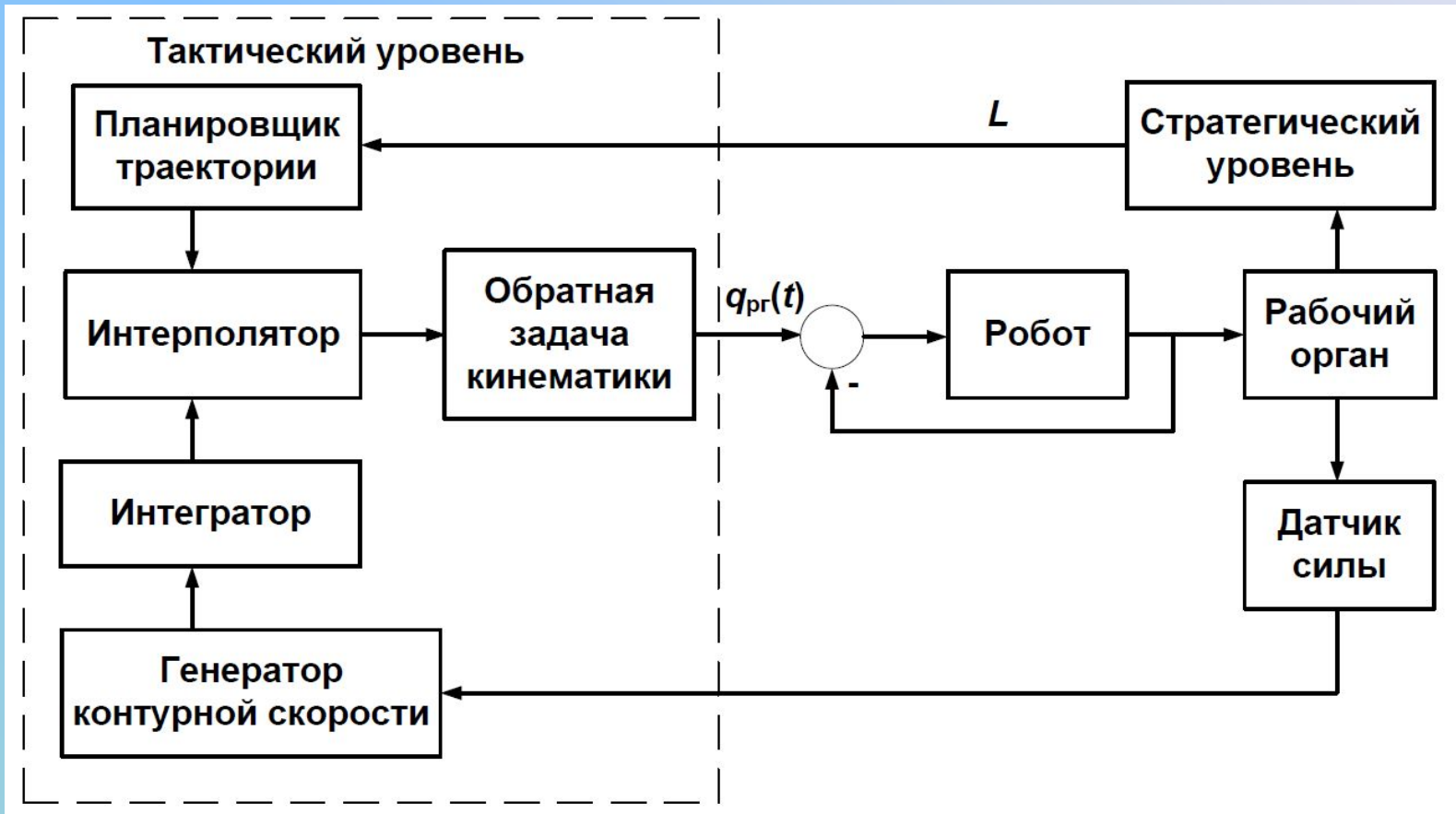
Системы управления тактического уровня

Построение системы управления тактического уровня для технологического манипулятора, выполняющего операции механообработки на основе параметрического подхода.



4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

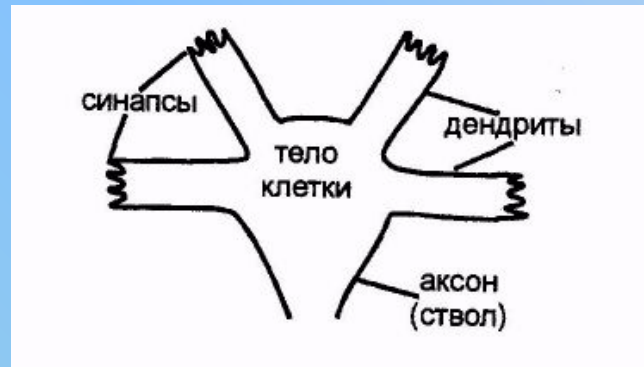
Блок-схема системы контурного силового управления, которая обеспечивает адаптацию движения робота к возмущающему силовому воздействию.



4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

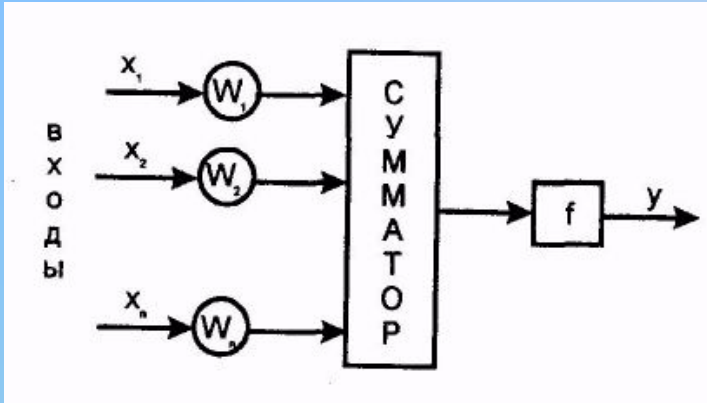
Интеллектуальные системы управления на основе искусственных нейронных сетей

Системы управления на основе искусственных нейронных сетей (НС) – один из ярких примеров бионического подхода, когда принципы функционирования и управления живыми организмами эффективно использованы для создания нового поколения систем управления техническими (в частности, мехатронными) системами.



Биологический нейрон

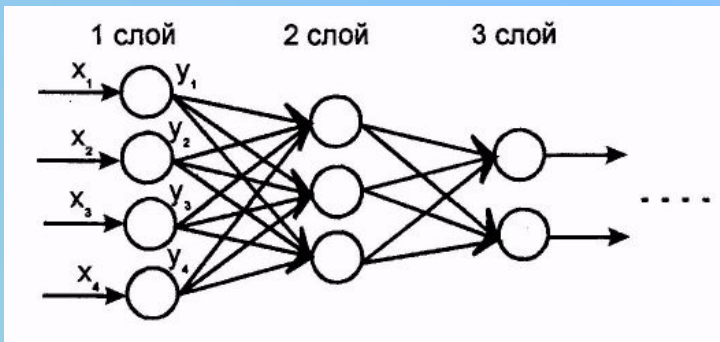
4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ



Входные сигналы поступают на сумматор, где определяется их взвешенная сумма (с учетом весовых коэффициентов):

$$u = W_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot X_2 + \dots + W_n \cdot X_n.$$

Математическая модель нейрона



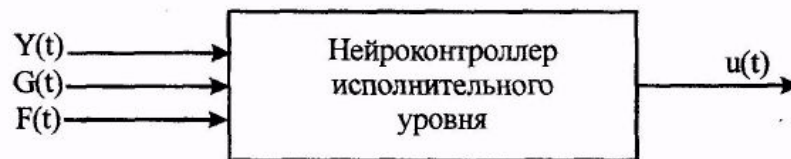
Выходной сигнал нейрона формируется на выходе нелинейного блока. При реализации нелинейного блока f обычно используются пороговые и экспоненциальные функции.

Трехслойная нейронная сеть

4. ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ И СИСТЕМАМИ

Контроллеры на основе НС эффективны в случаях, когда создание адекватной аналитической модели исполнительной системы и синтез на ее основе регуляторов крайне затруднен. Такая ситуация может быть обусловлена целым рядом факторов, среди которых наиболее распространенными являются:

- наличие заранее неопределенных внешних воздействий (например, при работе машины в экстремальных средах);
- переменность параметров и структуры самой мехатронной системы;
- существенные внутренние возмущающие воздействия (например, действие сил сухого и вязкого трения в механических устройствах);
- сложные физические (в частности, динамические) взаимосвязи между элементами системы (например, в системах гидравлических приводов);
- технические и методические проблемы с постановкой и проведением экспериментальных исследований на реальных объектах для идентификации параметров математической модели с необходимой точностью.



$Y(t)$ - вектор состояний системы
 $G(t)$ - вектор управляющих воздействий
 $F(t)$ - вектор возмущающих воздействий

Схема нейроконтроллера